

低炭素型セメント結合材の利用技術 に関する共同研究報告書(V)

－高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの
設計・施工マニュアル(案)－

平成 28 年 1 月

国立研究開発法人土木研究所
戸田建設株式会社
西松建設株式会社

Copyright © (2016) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、この報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(V)

ー高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル(案)ー

国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター

グループ長	渡辺 博志
上席研究員	古賀 裕久 (2015.4～)
総括主任研究員	森濱 和正
主任研究員	中村 英佑 (2011.7～)
交流研究員	栗原 勇樹 (2015.4～)
交流研究員	石井 豪 (2013.4～2015.3)
交流研究員	鈴木 聡 (～2013.3)

戸田建設株式会社

請川 誠	(2014.4～)
田中 徹	
土師 康一	(2013.4～)
林 光芳	(～2014.3)

西松建設株式会社

佐藤 幸三	
椎名 貴快	
原田 耕司	(～2012.4)
迫 綾子	(～2014.4)

要 旨

低炭素社会の構築に向けた取組みとして、ポルトランドセメントの一部分あるいは大部分を高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材で置き換えたコンクリートの利用が注目されている。混和材を多量に用いたコンクリートの実用化を進めるためには、信頼性の高い品質評価方法と適切な設計施工方法の確立が不可欠である。この共同研究では、日本国内で一般的に用いられているセメントと比較して混和材の置換率を高めて材料製造時の二酸化炭素排出量を削減した結合材を「低炭素型セメント結合材」と定義して、これを用いたコンクリート構造物の設計施工方法について検討した。

この共同研究報告書では、ポルトランドセメントの 70～90%を高炉スラグ微粉末で置換した低炭素型のコンクリートの設計及び施工について標準的な方法を示した「高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル(案)」を提案するとともに、検討の過程で得られた研究成果をとりまとめた。

キーワード: 低炭素型セメント結合材, コンクリート, 混和材, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 品質評価方法, 設計施工方法, 二酸化炭素排出削減

はじめに

近年、地球温暖化問題に対する世界的な関心の高まりを受けて、社会資本整備に伴って発生する二酸化炭素排出量を削減するための一つの対策として、ポルトランドセメントの一部分あるいは大部分を高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材で置き換えたコンクリートの利用が注目されている。コンクリートの主要な構成材料であるセメントの製造過程では原料や熱エネルギー源として多量の産業副産物や産業廃棄物を有効利用しているが、コンクリート関連部門が二酸化炭素排出量に与える影響は依然として大きい。例えば、世界全体の二酸化炭素排出量の約5%がセメントの製造に由来すること¹⁾、日本国内におけるプレストレストコンクリート道路橋を対象とした試算例では、建設工事で発生する二酸化炭素排出量の約40%がコンクリート関連部門に起因する二酸化炭素排出量で占められること²⁾が報告されている。このため、混和材の置換率を高めてポルトランドセメントの使用量を抑制することによって、コンクリート構造物の構築に必要な材料の製造時に発生する二酸化炭素の相当量を削減できることが期待される。また、混和材の使用は、塩化物イオン浸透抵抗性の向上やアルカリシリカ反応の抑制に効果的であり、コンクリート構造物の耐久性の向上や長寿命化にも寄与できる可能性が高い。しかし、混和材を多量に用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの品質が大幅に異なる場合もあり、強度特性、耐久性及び温度ひび割れ抵抗性の評価方法、構造計算に用いる設計値、施工時の留意点等が十分には明確にされていない。また、混和材の使用による二酸化炭素排出量の削減効果を定量的に評価するための統一的な手法も整備されていない。混和材を多量に用いたコンクリートを広く実用化していくためには、信頼性の高い品質評価方法と適切な設計施工方法を確立することが不可欠である。

これらのことを背景として、国立研究開発法人土木研究所は、平成23年6月から、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会、株式会社大林組、大成建設株式会社、前田建設工業株式会社、戸田建設株式会社、西松建設株式会社、鉄鋼スラグ協会、電源開発株式会社との共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」を実施した。この共同研究では、日本国内で一般的に用いられているセメントと比較して混和材の置換率を高めて材料製造時の二酸化炭素排出量を削減した結合材を「低炭素型セメント結合材」と定義して、これを用いたコンクリート構造物の設計施工方法について検討した。この結果、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計及び施工の原則と配慮することが望ましい事項をとりまとめた「低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案）」、対象とする結合材や構造物の種別ごとに設計及び施工の標準的な方法を取りまとめた5編の「設計・施工マニュアル（案）」を提案した。全6編の共同研究報告書の構成と概要を次のページに示す。

この共同研究報告書は、「低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案）」（第Ⅰ部）、「高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル（案）」（第Ⅱ部）を示すとともに、検討の過程で得られた知見を付録資料（第Ⅲ部）としてまとめたものである。

低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書の構成と概要

共同研究報告書 第 471 号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (I)

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン (案)

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートに求められる品質を定義するとともに、これを用いたコンクリート構造物の設計及び施工の原則と配慮することが望ましい事項を示した。

国立研究開発法人土木研究所、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会、株式会社大林組、大成建設株式会社、前田建設工業株式会社、戸田建設株式会社、西松建設株式会社、鐵鋼スラグ協会、電源開発株式会社

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン (案)

共同研究報告書 第 472 号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (II)

混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル (案)

早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートを用いたプレストレストコンクリート橋の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

共同研究報告書 第 473 号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (III)

混和材を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

ポルトランドセメントの 70~90% を 1~4 種類の混和材で置換した低炭素型のコンクリート「クリーンコンクリート」の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、株式会社大林組

共同研究報告書 第 474 号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (IV)

多成分からなる結合材を用いた低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

ポルトランドセメントの 75% あるいは 90% を 2~3 種類の混和材で置換した低炭素型のコンクリート「スーパーグリーンコンクリート」の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、大成建設株式会社、前田建設工業株式会社

共同研究報告書 第 475 号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (V)

高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

ポルトランドセメントの 70~90% を高炉スラグ微粉末で置換した低炭素型のコンクリート「スラグリート」の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、戸田建設株式会社、西松建設株式会社

共同研究報告書 第 476 号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (VI)

高炉スラグ微粉末を結合材とした低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

ポルトランドセメントの使用量を“ゼロ”として高炉スラグ微粉末と刺激材を結合材とした低炭素型のコンクリート「環境配慮コンクリート」の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、大成建設株式会社

※共同研究報告書第 472~476 号では、第 I 部に「低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン (案) (共同研究報告書第 471 号の第 I 部)」を共通編として収録し、第 II 部に対象とする結合材や構造物の種別ごとに設計及び施工の標準的な方法を取りまとめた「設計・施工マニュアル (案)」を収録している。

参考文献

- 1) IPCC: Climate Change 2007 Mitigation of Climate Change, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the IPCC, Cambridge University Press, pp.467-469, 2007
- 2) 手塚正道, 梶原勉, 齋藤謙一, 河合研至: PC 橋上部工の CO₂ 排出量の見える化, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.91-94, 2010

目次

第 I 部 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン (案)

1 章 総則.....	1
1.1 適用の範囲	1
1.2 用語の定義	5
2 章 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの品質.....	8
2.1 一般.....	8
2.2 ワーカビリティ	8
2.3 強度.....	9
2.4 耐久性.....	9
2.5 ひび割れ抵抗性.....	11
2.6 環境負荷低減効果	12
3 章 材料.....	13
3.1 一般.....	13
3.2 セメント	14
3.3 練混ぜ水	14
3.4 混和材.....	15
3.5 化学混和剤.....	16
4 章 配合.....	17
4.1 一般.....	17
4.2 セメントと混和材の種類及び混和材の置換率.....	17
4.3 水結合材比	18
5 章 設計.....	19
5.1 一般.....	19
5.2 強度.....	19
5.3 クリープ・収縮.....	21
5.4 中性化に対する抵抗性.....	21
5.5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性.....	24
5.6 凍結融解に対する抵抗性.....	26

5.7 温度ひび割れに対する抵抗性.....	27
5.8 二酸化炭素排出削減効果.....	28
6 章 製造及び施工	30
6.1 一般.....	30
6.2 計量.....	30
6.3 練混ぜ.....	31
6.4 運搬・打込み・締固め・仕上げ.....	32
6.5 湿潤養生	33
7 章 品質管理.....	35
8 章 検査.....	36
9 章 記録.....	37

第Ⅱ部 高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル(案)

1 章 総則.....	39
1.1 適用の範囲	39
1.2 用語の定義	41
2 章 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの品質.....	44
2.1 一般.....	44
2.2 材料.....	44
2.3 配合.....	45
2.4 製造.....	46
2.5 ワーカビリティ	47
2.6 強度, ヤング係数.....	47
2.7 発熱特性	48
2.8 耐久性.....	49
2.9 ひび割れ抵抗性.....	52
2.10 色調.....	53
2.11 環境負荷低減効果	53
3 章 材料.....	54
3.1 一般.....	54
3.2 セメント	55
3.3 練混ぜ水	57
3.4 骨材.....	58
3.5 混和材.....	59
3.6 化学混和剤	62
4 章 配合.....	65
4.1 一般.....	65
4.2 セメントと混和材の種類及び混和材の置換率.....	65
4.3 粗骨材の最大寸法.....	66
4.4 スランプまたはスランプフロー.....	67
4.5 呼び強度	67
4.6 単位水量	68
4.7 水結合材比	68
4.8 単位結合材量.....	69

4.9 細骨材率	70
4.10 空気量	70
4.11 化学混和剤	71
5 章 設計	73
5.1 一般	73
5.2 強度	73
5.3 ヤング係数	78
5.4 熱物性値	79
5.5 収縮	82
5.6 中性化に対する抵抗性	87
5.7 塩化物イオン浸透に対する抵抗性	93
5.8 凍結融解に対する抵抗性	95
5.9 温度ひび割れに対する抵抗性	97
5.10 二酸化炭素排出削減効果	98
5.11 材料コスト	101
6 章 製造	102
6.1 一般	102
6.2 高炉スラグ微粉末の貯蔵設備	103
6.3 計量	103
6.4 練混ぜ	104
7 章 運搬, 打込み, 締固め及び仕上げ	106
7.1 一般	106
7.2 運搬	106
7.3 打込み	107
7.4 締固め	107
7.5 仕上げ	108
8 章 養生	109
8.1 一般	109
8.2 養生方法と期間	109
8.3 養生温度	111
9 章 品質管理及び検査	112

9.1 一般.....	112
9.2 品質管理及び検査.....	112

第Ⅲ部 付録資料

付録－1	試験概要	115
付録－2	アブサンデン現象	126
付録－3	高性能 AE 減水剤（SF500BB）の作用機構について	127
付録－4	高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの基本特性（参考）	129
付録－5	フレッシュコンクリート性状	132
付録－6	化学混和剤の選定	136
付録－7	化学混和剤（SF500BB）の上限使用量	142
付録－8	化学混和剤（主剤）の使用量	144
付録－9	化学混和剤（助剤）の使用量	148
付録－10	ブリーディング	149
付録－11	凝結特性	153
付録－12	断熱温度上昇特性	159
付録－13	熱膨張係数	166
付録－14	圧縮強度	168
付録－15	引張強度	191
付録－16	ヤング係数	193
付録－17	塩化物イオン浸透抵抗性	196
付録－18	中性化抵抗性	204
付録－19	化学的抵抗性（耐硫酸性）	217
付録－20	自己収縮特性	219
付録－21	乾燥収縮特性	224
付録－22	凍結融解抵抗性	227
付録－23	温度ひび割れ照査事例	230
付録－24	色調	247
付録－25	材料製造時における二酸化炭素の排出量削減効果（試算例）	251
付録－26	実機プラント設備を用いた製造確認	254

第Ⅰ部
低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の
設計・施工ガイドライン（案）

担当：国立研究開発法人土木研究所

1 章 総則

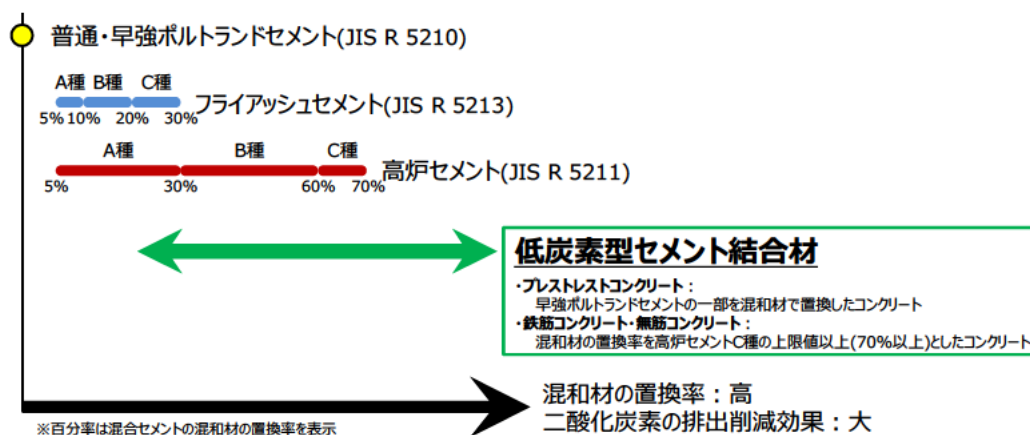
1.1 適用の範囲

「低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案）（以下、このガイドライン（案）という）」は、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計及び施工の原則と配慮することが望ましい事項を示したものである。

【解説】

低炭素社会の構築に向けた取組みの一環として、ポルトランドセメントの一部分あるいは大部分を高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材で置き換えたコンクリートの利用が注目されている。混和材の使用は、材料製造時の二酸化炭素排出量の削減に寄与する一方で、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質に多大な影響を与える。このため、混和材を多量に用いたコンクリートの適用にあたっては、品質の特徴を適切に把握して設計及び施工を行うことが肝要である。

このガイドライン（案）では、プレストレストコンクリート、鉄筋コンクリート、無筋コンクリート等の構造物の種別ごとに日本国内で一般的に用いられているセメントよりも混和材の置換率を高めて材料製造時の二酸化炭素排出量の削減を可能とし、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有する結合材を「低炭素型セメント結合材」と定義して、これを用いたコンクリート構造物の設計及び施工の原則と配慮することが望ましい事項を示した。日本国内で一般的に用いられているセメントとしては、プレストレストコンクリートでは早強ポルトランドセメント、鉄筋コンクリート及び無筋コンクリートでは普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を想定した。したがって、低炭素型セメント結合材は、プレストレストコンクリートでは早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換し、鉄筋コンクリート及び無筋コンクリートでは高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等を含めた混和材の置換率を高炉セメント C 種の上限值以上（70%以上）とすることによって、材料製造時の二酸化炭素排出量の大幅な削減を可能とした結合材といえる（図－1.1）。



図－1.1 低炭素型セメント結合材の位置づけ

低炭素型セメント結合材を構成するセメントと混和材の種類及び混和材の置換率は、プレストレストコンクリート、鉄筋コンクリート、無筋コンクリート等の対象とする構造物の種別に加えて、目標とする強度、耐久性及び二酸化炭素排出削減効果、構造物が供用される環境条件等によっても異なる。このガイドライン（案）では、これらの違いにかかわらず、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計及び施工の原則と共通的に配慮することが望ましい事項を示している。また、このガイドライン（案）に付属する5編の「設計・施工マニュアル（案）（以下、マニュアル（案）という）」では、このガイドライン（案）に基づき、対象とする結合材や構造物の種別ごとに設計及び施工の標準的な方法を示している（図-1.2）。5編のマニュアル（案）で対象としている結合材は、このガイドライン（案）で定義した低炭素型セメント結合材に適合するものである。

このガイドライン（案）と5編のマニュアル（案）に示されていない事項については、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計及び施工において特別の配慮が不要と考えられたため、対象とする構造物の設計及び施工に関する既存の基準類を参考としてよい。

一般的なコンクリート構造物の設計及び施工については、必要に応じて、次の文献を参考にとよい。

- ・土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔基本原則編〕，〔設計編〕，〔施工編〕，2013
- ・土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書〔維持管理編〕，〔規準編〕，2013
- ・日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編，Ⅲコンクリート橋編），2012

また、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリートの品質の一般的な特徴については、必要に応じて、次の文献を参考にとよい。

- ・土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー86，1996
- ・土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），コンクリートライブラリー94，1999

このガイドライン（案）と5編のマニュアル（案）で参照する基準類及びJISについては、このガイドライン（案）と5編のマニュアル（案）の発刊時（2016年1月）で最新のものとした。今後、基準類の改訂あるいはJISの改正が行われた場合には、これらの影響を適切に考慮した上で、最新の基準類及びJISを参照してよい。

共同研究報告書 第471号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅰ）

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案）

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートに求められる品質を定義するとともに、これを用いたコンクリート構造物の設計及び施工の原則と配慮することが望ましい事項を示した。

国立研究開発法人土木研究所、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会、株式会社大林組、大成建設株式会社、前田建設工業株式会社、戸田建設株式会社、西松建設株式会社、鉄鋼スラグ協会、電源開発株式会社

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案）

共同研究報告書 第472号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅱ）

混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル（案）

早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートを用いたプレストレストコンクリート橋の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

共同研究報告書 第473号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅲ）

混和材を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル（案）

ポルトランドセメントの70～90%を1～4種類の混和材で置換した低炭素型のコンクリート「クリーンコンクリート」の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、株式会社大林組

共同研究報告書 第474号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅳ）

多成分からなる結合材を用いた低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル（案）

ポルトランドセメントの75%あるいは90%を2～3種類の混和材で置換した低炭素型のコンクリート「スーパーグリーンコンクリート」の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、大成建設株式会社、前田建設工業株式会社

共同研究報告書 第475号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅴ）

高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル（案）

ポルトランドセメントの70～90%を高炉スラグ微粉末で置換した低炭素型のコンクリート「スラグリート」の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、戸田建設株式会社、西松建設株式会社

共同研究報告書 第476号 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書（Ⅵ）

高炉スラグ微粉末を結合材とした低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル（案）

ポルトランドセメントの使用量を“ゼロ”として高炉スラグ微粉末と刺激材を結合材とした低炭素型のコンクリート「環境配慮コンクリート」の設計及び施工について、標準的な方法を示した。

国立研究開発法人土木研究所、大成建設株式会社

※共同研究報告書第472～476号では、第Ⅰ部に「低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案）（共同研究報告書第471号の第Ⅰ部）」を共通編として収録し、第Ⅱ部に対象とする結合材や構造物の種別ごとに設計及び施工の標準的な方法を取りまとめた「設計・施工マニュアル（案）」を収録している。

図-1.2 このガイドライン（案）及び5編のマニュアル（案）の構成と概要

【参考】

混和材を用いたコンクリートの品質の一般的な傾向について

高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を混合セメントB種相当としたコンクリートの品質の一般的な傾向については、表-1.1のように整理できる。しかし、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等を含めた混和材の置換率を高炉セメントC種の上限值以上としたコンクリートの品質には、表-1.1と異なる傾向を示すものが散見される。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの品質については、このガイドライン（案）及び5編のマニュアル（案）の規定を入念に確認する必要がある。

表-1.1 混和材の置換率を混合セメントB種相当としたコンクリートの品質の一般的な傾向

項目	特徴（ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートとの比較）
強度発現	水結合材比が同程度の場合、初期材齢では遅れることが多いが、その後も継続することが多い。
中性化に対する抵抗性	水結合材比と単位水量が同程度の場合、環境条件の影響も受けるが、低下することが多い。
塩化物イオン浸透に対する抵抗性	水結合材比と単位水量が同程度の場合、環境条件の影響も受けるが、向上することが多い。
凍結融解に対する抵抗性	化学混和剤を用いて空気量を確保した場合、同等か向上することが多い。
アルカリシリカ反応の抑制効果	置換率を一定以上とした場合に抑制効果が得られることが多い。
クリープ係数	載荷時の圧縮強度が同程度の場合、同等か小さくなることが多い。
自己収縮ひずみ	水結合材比が同程度で、高炉スラグ微粉末を用いた場合は、せっこう添加量や温度履歴の影響も受けるが、収縮量は同等か大きくなることが多く、フライアッシュを用いた場合は、収縮量は同等か小さくなることが多い。
乾燥収縮ひずみ	水結合材比と単位水量が同程度の場合、収縮量は同等か小さくなるが多い。
ワーカビリティ	水結合材比と単位水量が同程度の場合、化学混和剤の種類と使用量の影響も受けるが、同等か向上することが多い。
単位水量	化学混和剤の使用量とスランプが同程度の場合、少なくできることが多い。
断熱温度上昇特性	水結合材比と単位水量が同程度で、高炉スラグ微粉末を用いた場合は、発熱速度は小さくなるが多いが、終局値は同等か大きくなることが多く、フライアッシュを用いた場合は、どちらも小さくなるが多い。
凝結時間	化学混和剤の種類と使用量、せっこうの添加量の影響も受けるが、水結合材比と単位水量が同程度の場合、同等か遅くなるが多い。
湿潤養生期間の影響	水結合材比が同程度の場合、湿潤養生期間の長短が品質に与える影響が大きく、同等の品質を得るための湿潤養生期間が長くなるが多い。
冬期施工時の低温の影響	水結合材比が同程度の場合、化学混和剤の種類と使用量の影響も受けるが、凝結や強度発現が遅れることが多い。
夏期施工時の高温の影響	化学混和剤の種類と使用量の影響も受けるが、ワーカビリティの経時的な低下の程度が大きくなることがある。
色調	高炉スラグ微粉末を用いた場合、表面は脱型直後に青藍色を呈するが徐々に白くなり、内部は長期材齢においても青藍色を呈することが多い。
材料製造時の二酸化炭素排出量	減少する。

※普通ポルトランドセメントを用いて、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を混合セメントB種相当としたコンクリートの品質の一般的な傾向である。高炉スラグ微粉末にはJISA 6206に適合する高炉スラグ微粉末4000、フライアッシュにはJISA 6201に適合するフライアッシュⅡ種の使用を想定している。

1.2 用語の定義

このガイドライン（案）では、次のように用語を定義する。

- ・ **低炭素型セメント結合材 (Low-carbon Cementitious Binders)**：プレストレストコンクリート、鉄筋コンクリート、無筋コンクリート等の対象とする構造物の種別に応じて、日本国内において一般的に用いられているセメントよりも混和材の置換率を高めて材料製造時の二酸化炭素排出量を削減し、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートがこのガイドライン（案）に示す所要の品質を有する結合材。
- ・ **混和材 (Supplementary Cementitious Materials)**：ポルトランドセメントの代替として用い、潜在水硬性あるいはポゾラン反応を示す無機物質。このガイドライン（案）では、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ等を指す。
- ・ **結合材 (Binders)**：硬化コンクリートの強度発現に寄与する物質を生成し、骨材を結合する役割を果たす材料の総称。このガイドライン（案）では、ポルトランドセメント、混和材等を指す。
- ・ **水結合材比 (Water to Binder Ratio)**：水の質量を結合材の質量で除したもの。百分率で表される。
- ・ **置換率 (Replacement Ratio)**：混和材の質量を結合材の質量で除したもの。百分率で表される。

【解説】

低炭素型セメント結合材について

混和材を多量に用いたコンクリートの名称として様々なものが提案されているが、このガイドライン（案）では、対象とする構造物の種別に応じて、日本国内で一般的に用いられているセメントよりも混和材の置換率を高めて材料製造時の二酸化炭素排出量を削減し、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートがこのガイドライン（案）に示す所要の品質を有する結合材を「低炭素型セメント結合材」と定義した。なお、日本国内で一般的に用いられているセメントとしては、プレストレストコンクリートでは早強ポルトランドセメント、鉄筋コンクリート及び無筋コンクリートでは普通ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を想定した。

5 編のマニュアル（案）では、図-1.2 に示したように、結合材の種類ごとに異なる名称を用いているものもあるが、いずれの結合材も、このガイドライン（案）で定義した低炭素型セメント結合材に適合するものである。

混和材と結合材について

このガイドライン（案）では、混和材の例として高炉スラグ微粉末、フライアッシュ等、結合材の例としてポルトランドセメント、混和材等を挙げた。これらの材料が有すべき品質については 3 章に示した。

また、5 編のマニュアル（案）では、対象とする結合材や構造物の種別ごとに、セメントと混和材の種類及び混和材の置換率が異なること、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ以外の混和材を用いることがある。このため、混和材あるいは結合材として取り扱うことのできる材料の選定にあたっては、5 編のマニュアル（案）の規定を参照するとよい。

水結合材比について

このガイドライン（案）及び5編のマニュアル（案）の規定に適合する結合材については、水結合材比の計算において結合材として取り扱ってよい。水結合材比の計算は、式(1.1)によるものとする。

$$\text{水結合材比 (\%)} = \frac{W}{B} \times 100 \quad (1.1)$$

ここに、 W ：単位水量(kg/m³)、 B ：単位結合材量(kg/m³)である。

また、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質が、このガイドライン（案）、5編のマニュアル（案）及び対象とする構造物の設計及び施工に関する既存の基準類の規定に適合することを試験によって確認した場合には、既存の基準類に示されている「水セメント比」をここで定義した「水結合材比」で読み替えてよい。

置換率について

混合セメントの JIS（JIS R 5211 高炉セメント、JIS R 5212 シリカセメント、JIS R 5213 フライアッシュセメント）では、「分量（質量%）」によって各混合セメントに含まれる混和材の割合を表している。このガイドライン（案）では「置換率（質量%）」、5編のマニュアル（案）では「置換率（質量%）」あるいは「混合割合（質量%）」によって結合材に含まれる混和材の割合を表すこととした。これらの用語は、特に記載がない限り、同義とみなしてよい。なお、混和材の置換率の計算は、式(1.2)によるものとする。

$$\text{置換率 (\%)} = \frac{SCMs}{C + SCMs} \times 100 \quad (1.2)$$

ここに、 C ：単位セメント量(kg/m³)、 $SCMs$ ：単位混和材量(kg/m³)である。単位混和材量には、複数の混和材の使用量を含めてよい。

また、混合セメントの JIS では、混和材の分量の上限値と下限値を規定し、これに応じて各混合セメントを A 種、B 種、C 種の 3 種類に分類している。一方、このガイドライン（案）及び5編のマニュアル（案）で取り扱う低炭素型セメント結合材では、対象とする結合材や構造物の種別によって選定する混和材の種類や置換率が異なること、混和材の置換率を高炉セメント C 種の上限値以上とした結合材も含まれること、混和材の置換率を高めるほど二酸化炭素の排出削減効果が大きくなること等を踏まえて、混和材の置換率の上限値と下限値を規定していない。個別の結合材における混和材の種類や置換率の選定方法については、5編のマニュアル（案）の規定を参照するとよい。

なお、ここで定義した用語以外の用語については、JIS A 0203 コンクリート用語等を参考にするとしてよい。

規定の末尾に用いられる字句の意味について

このガイドライン（案）及び5編のマニュアル（案）では、適用上の疑義を防ぐため、規定の末尾に用いられる字句の意味を表-1.2のように定義して区別している。

表-1.2 規定の末尾に用いられる字句の意味

規定の末尾に用いられる字句	意味
・・・しなければならない。 ・・・とする。	明確な理由がない限り従わなければならない規定。
・・・することが望ましい。	特に大きな支障がなければ従わなければならない規定。
・・・を標準とする。	実用上、従わなければならない規定。一律な規制が困難なため、規定の趣旨の範囲内であれば、実験結果や実績等をもとに別途定められた実用可能かつ簡便な方法を用いることができる規定。
・・・してよい。 ・・・することができる。	本来は厳密な検討を行うとよいが、実験結果や実績等を参考として、便宜上、実用可能かつ簡便な方法を示した規定。

「品質」と「性能」の区別について

このガイドライン（案）及び5編のマニュアル（案）では、適用上の疑義を防ぐため、コンクリート構造物を構築するために用いられるコンクリート、セメント、混和材等の材料の特性を「品質」、構築されたコンクリート構造物が有する耐久性、安全性、使用性等を「性能」と称して区別している。

英語の語尾に対応する長音符号の扱いについて

JIS Z 8301 規格票の様式及び作成方法では、学術用語においては英語のつづりの終わりの-er, -or, -ar等を仮名書きにする場合に、長音符号を付けるか、付けないか厳格に一定にすることが困難なため、長音符号は用いても略しても誤りでないとしている。このことを踏まえて、このガイドライン（案）及び5編のマニュアル（案）でも、英語のつづりの終わりの-er, -or, -ar等を仮名書きにする場合の表し方を統一することとはせず、長音符号の使用の有無については個別に対応方法を設定している。

2 章 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの品質

2.1 一般

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートは、品質のばらつきが少なく、所要のワーカビリティ、強度、耐久性、ひび割れ抵抗性を有し、環境負荷の低減に配慮したものでなければならない。

【解説】

この章では、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートに求められる品質を示した。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートに求められる品質は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、ばらつきが少ないこと、施工に適したワーカビリティを有すること、所要の強度、耐久性、ひび割れ抵抗性を有することに加えて、構造物の構築に伴って発生する環境負荷の低減に配慮したものであることである。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質が大幅に異なる場合があるため、所要の性能を有する構造物を構築するためには、品質の特徴を適切に把握しておくことが肝要である。

2.2 ワーカビリティ

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートは、施工条件と環境条件に応じて、運搬、打込み、締固め、仕上げ等に適したワーカビリティを有するものでなければならない。

【解説】

所要の性能を有する構造物を構築するためには、施工条件と環境条件を適切に踏まえた上で、コンクリートの運搬、打込み、締固め、仕上げ等を円滑に行う必要がある。低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのワーカビリティは、セメントと混和材の種類及び混和材の置換率によって異なる傾向を示すことがある。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの施工を問題なく行うためには、特に、充填性、圧送性、凝結特性の特徴を適切に把握しておく必要がある。

高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートでは、フレッシュコンクリートの粘性が高くなり、充填性や圧送性が低下することがある。このような粘性の高いコンクリートでは、均質なコンクリートを得るために要する練混ぜ時間が長くなることもある。また、打込み時の気温が高いとワーカビリティの経時的な低下の程度が大きくなることや凝結が早まることも想定される。これらのことが懸念される場合には、化学混和剤の選定と使用量の調整を適切に行うとともに、事前の試験によってワーカビリティとその経時変化を確認しておくことが望ましい。

また、粘性の高いコンクリートのワーカビリティを確保するために、スランプの目標値を大きく設定す

ることやスランプフローで品質管理を行うことも想定されるが、その際には、フレッシュコンクリートが十分な材料分離抵抗性を有することにも配慮することが望ましい。

2.3 強度

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートは、構造物に求められる強度を有するものでなければならない。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度発現の傾向は、セメントと混和材の種類及び混和材の置換率によって異なることがある。また、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度発現は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、湿潤養生期間や打込み後の温度履歴の影響を受けやすく、湿潤養生期間が短い場合や打込み後のコンクリートの温度が低い場合に遅れることがある。これらの特徴を適切に考慮し、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートは、構造物に求められる性能や施工時の気象条件の影響を踏まえて、所定の材齢において所要の強度を有するものである必要がある。

2.4 耐久性

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートは、構造物が供用期間中に受ける様々な作用に対して十分な抵抗性を有し、内部の鋼材を保護できるものでなければならない。

【解説】

構造物を問題なく供用していくため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートは、様々な作用に対して十分な抵抗性を有し、内部の鋼材を保護できるものである必要がある。これを阻害する要因としては、中性化、塩化物イオン浸透、凍結融解、化学的侵食、アルカリシリカ反応等が挙げられる。これらの要因と低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの関係については、次のように整理できる。

中性化について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントの使用量が抑制されて、水酸化カルシウムの含有量が少なくなるため、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、中性化に対する抵抗性が低下する可能性が高い。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの中性化に対する抵抗性については、5.4節に示す方法で適切に評価する必要がある。

中性化に対する抵抗性の評価にあたっては、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件の影響を適切に考慮する必要がある。例えば、降雨等によって水分が供給される環境や大気との接触が少ない環境では、降雨等の影響を受けにくく湿度が低い環境や二酸化炭素濃度が高い環境と比較して、中性化の進行が遅くなる

ことが多い。また、中性化と塩化物イオン浸透が同時に作用する環境では、中性化の進行とともに水和生成物に固定されていた塩化物イオンがコンクリートの内部へ移動・濃縮する場合があります、この塩化物イオンによって鋼材腐食が発生する可能性がある。

塩化物イオン浸透について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、硬化体の細孔構造が緻密になること、水和生成物の塩化物イオンの固定化能力が高まること等から、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上することが多い。しかし、塩化物イオンに起因する鋼材の腐食速度は中性化に起因するものと比較して速く、腐食の程度によっては構造物の耐荷性能にも甚大な影響を及ぼす場合がある。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性については、5.5 節に示す方法で適切に評価する必要がある。

凍結融解について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、化学混和剤を用いて AE コンクリートとすることによって、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同等以上の凍結融解に対する抵抗性を確保することが多い。しかし、高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメント C 種の上限值よりも高くしたコンクリートでは、化学混和剤を用いて AE コンクリートとしても凍結融解に対して十分な抵抗性が得られない場合がある。また、フライアッシュを用いたコンクリートでは、化学混和剤がフライアッシュに含まれる未燃カーボンに吸着されて空気量の確保が困難となる場合がある。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性については、5.6 節に示す方法で適切に評価する必要がある。

化学的侵食について

混和材の使用は化学的侵食に対する抵抗性を向上させることが多いが、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートが硫酸塩を含む土壌や水と接する場合等、あらかじめ化学的侵食の作用を受けることが判明している際には、事前の試験によって化学的侵食に対する抵抗性を確認しておくことが望ましい。

アルカリシリカ反応について

混和材の置換率一定以上とすると、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの反応とともに細孔溶液中の水酸化物イオンの濃度が低下すること等によって、アルカリシリカ反応の抑制効果が得られる。JIS A 5308 の附属書 B における「アルカリシリカ反応抑制効果のある混合セメントなどを使用する抑制対策の方法」では、JIS R 5211 に適合する高炉セメント B 種もしくは C 種または JIS R 5213 に適合するフライアッシュセメント B 種もしくは C 種を用いることとし、高炉セメント B 種の高炉スラグの分量は 40%以上、フライアッシュセメント B 種のフライアッシュの分量は 15%以上でなければならないとしている。低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいても、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率をこれらの分量以上とする場合には、アルカリシリカ反応の抑制効果が得られると考えてよい。ただし、骨材の種類によっては、

混和材の置換率を一定以上としてもアルカリシリカ反応を完全に抑制できない場合があるため、アルカリシリカ反応が疑われる骨材を用いる場合には、事前の試験によって十分な抑制効果が得られることを確認することが望ましい。

また、アルカリシリカ反応が疑われる骨材との組合せで、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性あるいはフライアッシュのポズラン活性による反応を促進させることを目的として、ナトリウム、カリウム等を主成分とする刺激剤を併用する場合にも、アルカリシリカ反応の抑制効果を事前の試験によって確認しておくことが望ましい。

長期的な安定性について

高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメント C 種の上限值よりも高くしたコンクリートでは、コンクリートの仕上げ面のペーストが脆くなり骨材が露出するアブサンデン現象の発生が懸念される場合がある。また、混和材の使用によって DEF (Delayed Ettringite Formation : エトリンガイトの遅延生成) の抑制効果が得られることを期待できるが、せつこうの添加量が多く若材齢で高温履歴を受けるようなコンクリートでは、逆に DEF の発生が懸念される場合もある。アブサンデン現象や DEF の発生が懸念される場合には、供用時に構造物が置かれる環境条件となるべく近い条件での暴露試験等によって硬化コンクリートの長期的な安定性を確認しておくことが望ましい。

2.5 ひび割れ抵抗性

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートは、温度変化や収縮等に伴う体積変化に起因するひび割れの発生ができるだけ少ないものでなければならない。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいても、コンクリート表面のひび割れは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、構造物の美観を損なわせ、水や酸素等の腐食因子の侵入を容易にして鋼材腐食の発生リスクを高め、構造物の耐久性を低下させる要因となる場合がある。このため、コンクリートに発生するひび割れをできるだけ少なくするとともに、ひび割れが発生しても、耐久性上有害なひび割れとならないように、ひび割れ幅を制御する必要がある。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、若材齢の結合材の反応による発熱量が少なくなることが多い。しかし、高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートでは、特にコンクリート打込み直後の若材齢において自己収縮に起因する体積変化が大きくなることが多く、また、この傾向は若材齢で高温履歴を受けるマスコンクリートで顕著に現れる可能性が高い。若材齢の温度変化や自己収縮に伴う体積変化が拘束されて発生する温度ひび割れに対する抵抗性については、5.7 節に示す方法で適切に評価する必要がある。

2.6 環境負荷低減効果

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートは、構造物のライフサイクルで発生する環境負荷をできるだけ少なくし、特に材料製造時に発生する二酸化炭素排出量の削減に寄与するものでなければならない。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいても、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、構造物のライフサイクルで発生する環境負荷をできるだけ少なくなるよう抑制する必要がある。ここでの環境負荷の抑制には、温室効果ガス、汚染物質及び廃棄物の発生量の削減に加えて、自然環境の保護等も含まれる。

温室効果ガスには様々なものが存在するが、人為的に排出されるもので地球温暖化への影響度が最も大きいと考えられているのが二酸化炭素である。低炭素型セメント結合材の特徴の一つは、ポルトランドセメントの一部分あるいは大部分を高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材で置換してポルトランドセメントの使用量を抑制し、コンクリートに用いる材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量を削減できることである。低炭素型セメント結合材の使用によって得られる二酸化炭素排出量の削減効果については、5.8節に示す方法で定量的に評価する必要がある。

また、高炉スラグ微粉末は鉄鋼生産、フライアッシュは石炭火力発電の過程で得られる産業副産物である。このため、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材の置換率を高め、これらの使用量を増やすことによって、産業副産物の有効利用にも貢献できる。

3 章 材料

3.1 一般

- (1) 材料は、品質が確かめられたものでなければならない。
- (2) JIS 及び土木学会規準の品質規格に適合する材料は、品質が確かめられた材料であると判断してよい。ただし、JIS 及び土木学会規準の品質規格に適合する材料であっても、品質規格の試験条件と異なる条件で用いる場合には、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。
- (3) JIS 及び土木学会規準に品質規格の定められていない材料を用いる場合には、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

この章では、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートを構成する材料に求められる品質を示した。

なお、対象とする結合材や構造物の種別によって用いる材料の種類と品質が異なるため、個別の結合材で用いる材料の選定については、5 編のマニュアル（案）の規定を参照するとよい。

(1)について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートを構成する材料の品質はフレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質に多大な影響を与えるため、所要の性能を有する構造物を構築するためには品質が確かめられた材料を用いる必要がある。

(2)について

JIS 及び土木学会規準の品質規格に適合する材料は品質が確かめられた材料であると判断してよいが、JIS 及び土木学会規準の品質規格に適合する材料であっても、品質規格の試験条件と異なる条件で用いられる場合がある。このような場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。例えば、JIS A 6202 コンクリート用膨張材の膨張性試験は普通ポルトランドセメントを用いた供試体を製作して行われるため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでの膨張材の効果については試験によって別途確認しておくことが望ましい。

(3)について

JIS 及び土木学会規準に品質規格の定められていない材料を用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

3.2 セメント

- (1) セメントは、JIS R 5210 に適合したものを標準とする。
- (2) (1)以外のセメントについては、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

(1)について

このガイドライン（案）では、JIS R 5210 に適合するポルトランドセメントを用いることを標準とした。JIS R 5210 では6種類のポルトランドセメントの品質が規定されているが、ポルトランドセメントの種類はフレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性に多大な影響を与えるため、対象とする構造物の種別、施工条件、環境条件等を考慮して適切なセメントを選定する必要がある。

また、JIS R 5210 に適合するポルトランドセメントには、少量混合成分として、高炉スラグやシリカ質混合材、フライアッシュ、石灰石が 5%以下の割合で含まれるものもあるが、これらの少量混合成分については混和材としては考慮しないこととする。

(2)について

JIS R 5210 に適合するポルトランドセメント以外のセメントを用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

混合セメントの JIS（JIS R 5211 高炉セメント、JIS R 5212 シリカセメント、JIS R 5213 フライアッシュセメント）では混合セメントに含まれる混和材の分量を規定しているが、市販されている混合セメントには混和材の置換率が明示されていないものもある。このため、低炭素型セメント結合材の一部として混合セメントを用いる場合には、ヒアリング等によって混合セメントに含まれる混和材の置換率を明確にし、低炭素型セメント結合材に含まれる混和材の置換率を把握しておくことが望ましい。

3.3 練混ぜ水

- (1) 練混ぜ水は、上水道水、JSCE-B 101 または JIS A 5308 附属書 C に適合したものを標準とする。
- (2) (1)以外の練混ぜ水については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

(1)について

このガイドライン（案）では、上水道水、JSCE-B 101 または JIS A 5308 附属書 C に適合した練混ぜ水を用

いることを標準とした。ただし、回収水を用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しておくことが望ましい。

(2)について

(1)以外の練混ぜ水を用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

3.4 混和材

- (1) 高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206 に適合したものを標準とする。
- (2) フライアッシュは、JIS A 6201 に適合したもののうち、フライアッシュⅠ種あるいはフライアッシュⅡ種を標準とする。
- (3) (1)～(2)以外の混和材については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

(1)について

このガイドライン（案）では、JIS A 6206 に適合する高炉スラグ微粉末を用いることを標準とした。

JIS A 6206 では、高炉スラグ微粉末 3000、高炉スラグ微粉末 4000、高炉スラグ微粉末 6000、高炉スラグ微粉末 8000 の 4 種類の高炉スラグ微粉末の品質を規定している。これらの高炉スラグ微粉末は比表面積や活性度指数等が異なるため、いずれの高炉スラグ微粉末を用いるかによって、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性に与える影響が異なる可能性がある。したがって、対象とする構造物の種別、施工条件、環境条件等を考慮して、適切な高炉スラグ微粉末を選定して用いる必要がある。

(2)について

このガイドライン（案）では、JIS A 6201 に適合するフライアッシュのうち、フライアッシュⅡ種とこれと同等以上の品質を有するフライアッシュⅠ種を用いることを標準とした。

JIS A 6201 では、フライアッシュⅢ種とフライアッシュⅣ種の品質も規定しているが、これらは細骨材の代替として用いられることが多く、この場合には結合材としては取り扱わない。このため、フライアッシュⅢ種とフライアッシュⅣ種の使用については標準としなかった。

(3)について

高炉スラグ微粉末とフライアッシュ以外に、シリカフューム、膨張材、刺激剤、せっこう等を用いる場合

には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

3.5 化学混和剤

- (1) 化学混和剤は、JIS A 6204 に適合したものを標準とする。
- (2) (1)以外の化学混和剤については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

(1)について

このガイドライン（案）では、JIS A 6204 に適合する化学混和剤を用いることを標準とした。

高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートでは、所要のワーカビリティを確保するために、高性能 AE 減水剤、高性能減水剤、高機能タイプの AE 減水剤等の使用が必要となることが多い。また、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率が高いと所定の空気量を確保するための AE 剤の使用量が多くなることがあり、混和材の種類と置換率、水結合材比によっては化学混和剤の効果が異なることもある。このため、化学混和剤の選定と使用量の調整を行う際には、実施工となるべく近い条件で試し練りを行い、フレッシュコンクリートの品質を確認することが望ましい。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのフレッシュ性状は、セメント及び混和材の種類や混和材の置換率によって、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと異なる傾向を示すことがある。例えば、高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートではフレッシュコンクリートの粘性が高くなる場合があること、フライアッシュの品質によっては化学混和剤がフライアッシュに含まれる未燃カーボンに吸着されて空気量の確保が困難となる場合があること、スランプや空気量等のフレッシュ性状や凝結時間が施工時の気温の影響を受けやすく、特に施工時の気温が高いとワーカビリティの経時的な低下の程度が大きくなる場合があること、化学混和剤の使用量が過大になると凝結の遅延を引き起こす場合があること等が知られている。これらの点を十分に踏まえて、フレッシュコンクリートが所要の品質を有するよう、化学混和剤の選定と使用量の調整を行う必要がある。

(2)について

混和材の置換率の高いコンクリートを主な用途とした化学混和剤が開発されつつあるが、JIS A 6204 に適合する化学混和剤以外の化学混和剤を使用する場合には、実施工となるべく近い条件での試験の結果等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

4 章 配合

4.1 一般

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの配合は、コンクリートが所要のワーカビリティ、強度、耐久性、ひび割れ抵抗性を有する範囲内で、単位水量をできるだけ小さくし、かつ、品質のばらつきが少なくなるように設定するものとする。

【解説】

この章では、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの配合を設定する際に配慮することが望ましい事項を示した。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいても、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質を確保するため、単位水量をできるだけ小さくし、かつ、品質のばらつきが少なくなるように配合を設定する必要がある。

なお、対象とする結合材や構造物の種別ごとの配合設計の標準的な方法については、5 編のマニュアル(案)の規定を参照するとよい。

4.2 セメントと混和材の種類及び混和材の置換率

低炭素型セメント結合材に用いるセメントと混和材の種類及び混和材の置換率は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有するよう、適切に設定するものとする。

【解説】

セメントと混和材の種類及び混和材の置換率には、多種多様な組合せが存在する。これらの組合せはフレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性等に多大な影響を及ぼすため、対象とする構造物の種別、施工条件、環境条件等を考慮して、セメントと混和材の種類及び混和材の置換率を適切に設定する必要がある。

また、環境負荷の低減の観点からは、混和材の置換率を高めるほど二酸化炭素排出削減効果を大きくできること、混和材の産地には地域的な偏りがあるため、地産地消に配慮することによって輸送に伴って発生する環境負荷を低減できること等を踏まえた上で、混和材の種類及び置換率を検討することが望ましい。

4.3 水結合材比

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの水結合材比は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有するよう、適切に設定するものとする。

【解説】

コンクリートの水結合材比は強度と耐久性に影響を及ぼすことから、特に混和材の置換率の高いコンクリートでは、初期材齢の強度発現と中性化に対する抵抗性を確保するために、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、水結合材比を小さく設定することが多い。ただし、混和材の置換率が高く、かつ、水結合材比が小さいコンクリートでは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、フレッシュコンクリートの粘性が高くなり、ワーカビリティが損なわれることがある。このため、水結合材比を設定する際には、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性等を総合的に勘案する必要がある。

5 章 設計

5.1 一般

- (1) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの設計値は、試験等に基づいて設定するものとする。
- (2) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの耐久性及び温度ひび割れ抵抗性は、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、十分な信頼性を有する方法によって評価するものとする。
- (3) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの二酸化炭素排出削減効果は、十分な信頼性を有する方法及びデータに基づき、定量的に評価するものとする。

【解説】

この章では、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計の原則と配慮することが望ましい事項を示した。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの品質には、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと異なる傾向を示すものが多くある。このため、構造計算に用いる設計値については、試験等に基づいて設定し、耐久性及び温度ひび割れ抵抗性については、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して十分な信頼性を有する方法によって評価する必要がある。また、二酸化炭素排出削減効果については、十分な信頼性を有する方法及びデータに基づいて、定量的に評価する必要がある。

なお、対象とする結合材や構造物の種別ごとの設計の標準的な方法については、5 編のマニュアル（案）の規定を参照するとよい。

5.2 強度

- (1) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度は、原則として、標準養生を行った供試体の材齢 28 日における試験強度に基づいて定めるものとする。ただし、構造物の要求性能に応じて、28 日以外の材齢を設定してよい。
- (2) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度を確認または推定する際には、打込み後のコンクリートの温度履歴の影響を適切に考慮するものとする。
- (3) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの圧縮強度以外の強度特性のうち、試験によって圧縮強度との関係を確認したものについては、圧縮強度に基づいて設定してよい。

【解説】

(1)について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度は、原則として、標準養生を行った供試体の材齢 28 日における試験強度に基づいて定めることとした。ただし、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート

の強度はポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも長期にわたって増加することが確認されているため、早期の強度発現が求められない構造物では、28日以外の材齢、例えば、56日や91日、の試験強度に基づいて強度を定めてもよい。

(2)について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度発現は、初期材齢の温度履歴の影響を受けるため、強度の確認または推定にあたっては、打込み後のコンクリートの温度履歴の影響を適切に考慮する必要がある。例えば、型枠や支保工の取外しやプレストレス力の導入等、材齢28日よりも早期の段階でコンクリートの強度を確認する必要がある場合には、実際の部材となるべく近い条件で養生を行った供試体の試験強度に基づいて強度を確認することが望ましい。

打込み後のコンクリートの温度履歴を考慮した強度の推定方法として、有効材齢や積算温度を用いた方法がある。低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、これらの方法の推定精度が温度履歴によって異なる場合があることが確認されている。例えば、冬期に打込み後のコンクリートが低温状態に継続して置かれる場合には、初期材齢の強度発現の遅れが著しくなるため、強度を過大に推定することがある。この傾向は特にコンクリートの平均温度が10℃よりも低いと明確に現れることが確認されているため、冬期で打込み時の気温が低く、かつ、部材寸法が小さく結合材の反応による温度上昇が見込めない場合には、初期凍害の防止の観点から注意が必要である。一方、マスコンクリートで若材齢において高温履歴を受ける場合や冬期以外で打込み後のコンクリートが低温状態に継続して置かれない場合には、初期材齢の強度を精度良く推定できることが確認されている。

(3)について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのヤング係数や割裂引張強度、曲げ強度等、圧縮強度以外の強度特性のうち、試験によって圧縮強度との関係を確認したものについては、圧縮強度に基づいて設定してよいこととした。

5.3 クリープ・収縮

クリープ及び収縮の影響を無視できない構造物の設計においては、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのクリープ及び収縮の特性を適切に考慮するものとする。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのクリープ及び収縮の特性には、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと異なる傾向を示すものもある。このため、プレストレストコンクリートや持続荷重の作用を受ける構造物等、クリープ及び収縮の影響を無視できない構造物の設計においては、試験や実績等に基づき、クリープ及び収縮の特性を適切に考慮する必要がある。

例えば、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのクリープ係数と乾燥収縮ひずみは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、圧縮強度が同程度の場合、同等か小さくなることが確認されている。また、高炉スラグ微粉末を用い、かつ、水結合材比の小さいコンクリートでは、特に若材齢で高温履歴を受ける場合に、自己収縮ひずみの進行速度と最終値が大きくなる場合があることが確認されている。このような場合には、5.7 節に基づき、温度ひび割れに対する抵抗性を適切に評価する必要がある。

5.4 中性化に対する抵抗性

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの中性化に対する抵抗性は、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法によって評価するものとする。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントの使用量が抑制されて、水酸化カルシウムの含有量が少なくなるため、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、中性化に対する抵抗性が低下する可能性が高い。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの中性化に対する抵抗性は、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法によって評価する必要がある。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの中性化に対する抵抗性の評価には、構造物の供用期間中に中性化深さが鋼材腐食発生限界深さに達しないことを照査する方法を用いてよい。暴露試験や促進試験の結果等に基づいて構造物の供用期間中に中性化深さが鋼材腐食発生限界深さに達しないことを確認し、これを担保するかぶりの最小値を確保する場合には、中性化に対して十分な抵抗性を有すると判定してよい。ただし、これらの方法によって中性化に対する抵抗性を評価する際には、次の事項に留意する必要がある。

中性化深さの推定方法について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの中性化は、時間の平方根に比例して進行すると仮定してよい。すなわち、構造物の供用期間中における中性化深さは、式(5.1)で示される $\sqrt{t}$ 則に従うと仮定して推定してよい。ここで用いる中性化速度係数については、暴露試験あるいは促進中性化試験の結果等に基づいて設定する必要がある。

$$y = \alpha \cdot \sqrt{t} \quad (5.1)$$

ここに、 y ：中性化深さの推定値(mm)， α ：中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$)， t ：供用期間(year)である。

暴露試験の結果に基づく中性化速度係数の設定について

供用時に構造物が置かれる環境条件と同様の環境条件で行った暴露試験の結果を入手できる場合には、この結果を用いて中性化速度係数を設定してよい。

屋外での暴露試験の結果を用いる場合には、なるべく長期の暴露試験の結果を用いることが望ましい。長期的な暴露試験の実施は必ずしも容易ではないが、気温や降水量等の気象条件は季節によって異なり、このような年間をとおした気象条件の違いは中性化の進行速度にも影響を与える可能性が高いため、屋外暴露試験の実施期間については少なくとも1年間以上とすることが望ましい。

促進中性化試験の結果に基づく中性化速度係数の設定について

暴露試験の結果を入手できない場合には、JIS A 1153 に準拠した促進中性化試験を行い、この結果を用いて中性化速度係数を設定してよい。ただし、この促進中性化試験では供用時に構造物が置かれる屋外の環境条件と大幅に異なる試験条件（温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相対湿度 $60 \pm 5\%$ ，二酸化炭素濃度 $5 \pm 0.2\%$ ）を採用しているため、促進中性化試験から得られた中性化速度係数については、式(5.2)を用いて二酸化炭素濃度の差を補正する必要がある。式(5.2)と同様の考え方は文献 1)～3)でも採用されており、異なる二酸化炭素濃度の環境での中性化の進行速度が二酸化炭素濃度の平方根の比で関係づけられるとするものである。

$$\alpha_{ACT} = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO_2 / CO_{2,ACT}} \quad (5.2)$$

ここに、 α_{ACT} ：二酸化炭素濃度の差を補正した中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{week}}$)， A_{ACT} ：促進中性化試験から得られる中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{week}}$)， CO_2 ：実環境の二酸化炭素濃度(%)， $CO_{2,ACT}$ ：促進中性化試験の二酸化炭素濃度(=5%)である。

式(5.2)の実環境の二酸化炭素濃度については、供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して設定する必要がある。例えば、文献2)では、屋外で0.05%、室内で0.2%、文献3)では、屋外で0.03%、室内で0.1%、気象庁のホームページ⁴⁾では、2014年の世界の二酸化炭素の平均濃度を0.03977%としており、これらの値を参考として設定するとよい。

中性化残りの設定について

鋼材腐食発生限界深さは、かぶりの設計値から中性化残りを差し引いて得られる。ここで用いる中性化残りについては、供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して設定する必要がある。塩化物イオンの供給がある環境では、かぶり部のコンクリートの中性化によって水和生成物に固定されていた塩化物イオンがコンクリート内部に移動・濃縮することが確認されている。現時点ではこのような複合劣化を簡易にモデル化する方法が存在しないため、中性化と塩化物イオン浸透が同時に進行する環境では、塩化物イオンの供給がない環境よりも中性化残りを大きく設定し、中性化によって移動・濃縮した塩化物イオンに起因する鋼材腐食の発生を防止する必要がある。例えば、コンクリート標準示方書⁵⁾では、中性化残りを通常環境下で10mm、塩害環境下で10～25mmとしており、これらの値を参考としてよい。ただし、塩化物イオンの供給がある屋外での暴露試験において、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を高炉セメントC種あるいはフライアッシュセメントC種の上限值以上としたコンクリートでは、JIS A 1152のフェノールフタレイン溶液噴霧法で測定した中性化深さよりも12mm程度内部まで塩化物イオンが浸透していたことが確認されているため、塩害環境下ではこれよりも大きく中性化残りを設定する必要がある。

中性化速度係数の予測式の適用性について

コンクリート標準示方書⁵⁾では、式(5.3)の中性化速度係数の予測式を採用している。この式から得られた中性化速度係数の予測値と暴露試験から得られた中性化速度係数の測定値を比較した結果、混和材の置換率を高炉セメントC種の上限值以上としたコンクリートにおいて、予測値が測定値よりも小さくなったことが確認されている。このため、混和材の置換率を高炉セメントC種の上限值以上としたコンクリートにおいては、式(5.3)の適用が困難であり、暴露試験あるいは促進中性化試験の結果に基づいて、中性化速度係数を設定する必要がある。

$$\alpha_{JSCE} = -3.57 + 9.0 \frac{W}{C_p + k \cdot A_d} \quad (5.3)$$

ここに、 α_{JSCE} ：中性化速度係数の予測値(mm/√year)、 W ：単位体積あたりの水の質量(kg/m³)、 C_p ：単位体積あたりのポルトランドセメントの質量(kg/m³)、 A_d ：単位体積あたりの混和材の質量(kg/m³)、 k ：混和材の種類により定まる定数(高炉スラグ微粉末の場合 $k=0.7$ 、フライアッシュの場合 $k=0$)である。

環境条件の考慮について

中性化の作用を受けない環境条件下で供用される構造物、無筋構造物で用心鉄筋も配置されていない構造物においては、供用期間中の中性化による鋼材腐食の懸念がないため、中性化に対する抵抗性の評価を省略してよい。中性化の作用を受けない環境条件としては、例えば、水中や土中等、大気との接触がない環境に常時置かれる場合が挙げられる。

5.5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法によって評価するものとする。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、硬化体の細孔構造が緻密になること、水和生成物の塩化物イオンの固定化能力が高まること等から、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上することが多い。しかし、塩化物イオンに起因する鋼材の腐食速度は中性化に起因するものと比較して速く、腐食の程度によっては構造物の耐荷性能にも甚大な影響を及ぼす場合がある。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法を用いて評価する必要がある。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性の評価では、十分な信頼性を有するデータを入手できる場合には、構造物の供用期間中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達しないことを照査する方法を用いてよい。また、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数が対象とする構造物で一般的に用いられているセメントを結合材としたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数よりも小さくなることを試験によって確認し、かつ、既存の基準類におけるかぶりの最小値の規定を順守する場合には、塩化物イオン浸透に対して十分な抵抗性を有すると判定してよい。ただし、これらの方法によって塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価する際には、次の事項に留意する必要がある。

かぶりの最小値について

電気泳動試験（JSCE-G 571）や浸せき試験（JSCE-G 572）の結果によると、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性はポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して向上することが確認されている。しかし、現時点では、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおける鋼材腐食発生限界濃度が明確でないこと、環境条件や構造物の部位の違い等による塩化物イオン供給量の差やかぶり部のコンクリートの中性化が塩化物イオンの浸透メカニズムに与える影響が十分には明確でないこと、実環境下における長期的な耐久性に関するデータの蓄積が十分でないこと等が懸念される。また、既存の基準類のかぶりの最小値の規定は、鋼材腐食の防止に加えて、コンクリートと鋼材の付着の確保と火災に対する鋼材の保護の観点からも定められたものである。したがって、構造物の供用期間中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達しないことを確認した場合においても、かぶりの最小値については既存の基準類の規定に準拠することが望ましい。

コンクリート内部の塩化物イオン濃度の推定方法について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの内部における塩化物イオンの浸透は、式(5.4)の Fick の拡散方程式の解に従うと仮定してよい。ただし、かぶり部のコンクリートの中性化深さが大きくなる場合には、式(5.4)を用いて塩化物イオン浸透を推定することが困難となる。このような場合には、中性化に対する抵抗性の評価において、中性化残りを大きく設定することで、かぶり部のコンクリートの中性化によって内部に移動・濃縮する塩化物イオンに起因する鋼材腐食の発生を防止する必要がある。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (5.4)$$

ここに、 $C(x,t)$ ：距離 x と供用期間 t での塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 x ：コンクリート表面からの距離(cm)、 t ：供用期間(year)、 C_0 ：コンクリート表面における塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_i ：初期含有塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 D_{ap} ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm^2/year)、 erf ：誤差関数である。

塩化物イオンの見掛けの拡散係数について

供用時に構造物が置かれる環境条件と同様の環境条件で行った暴露試験の結果を入手できる場合には、この結果を用いて塩化物イオンの見掛けの拡散係数を設定してよい。暴露試験の結果を入手できない場合には、浸せき試験の結果を用いて塩化物イオンの見掛けの拡散係数を設定してよい。

また、電気泳動試験から得られる実効拡散係数を用いても、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートとポルトランドセメントのみを用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を比較できることが確認されている。ただし、電気泳動試験から得られる実効拡散係数は、暴露試験や浸せき試験から得られる見掛けの拡散係数とは物理的意味が異なるため、実効拡散係数を見掛けの拡散係数に換算するためには、両者の関係を試験によって別途明らかにしておく必要がある。

鋼材腐食発生限界濃度の設定について

コンクリート標準示方書⁵⁾では、複数のセメントの種類ごとに鋼材腐食発生限界濃度が示されているが、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を高炉セメントC種相当以上あるいはフライアッシュセメントC種相当以上としたコンクリート、複数の混和材を同時に用いたコンクリート、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリート等については鋼材腐食発生限界濃度が示されていない。このため、供用期間中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達しないことを照査するためには、試験や実績等に基づき、鋼材腐食発生限界濃度を適切に設定する必要がある。

環境条件の考慮について

中性化と塩化物イオン浸透の作用を同時に受ける環境条件下で供用される構造物では、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の評価を行うとともに、中性化に対する抵抗性の評価において、かぶり部のコンクリートの中性化による塩化物イオンの移動・濃縮の影響を考慮して、中性化残りを適切に設定する必要がある。

5.6 凍結融解に対する抵抗性

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法によって評価するものとする。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、化学混和剤を用いて AE コンクリートとすることによって、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同等以上の凍結融解に対する抵抗性を確保できることが多い。しかし、高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメント C 種の上限值よりも高くしたコンクリートでは、化学混和剤を用いて AE コンクリートとしても凍結融解に対して十分な抵抗性が得られない場合がある。また、フライアッシュを用いたコンクリートでは化学混和剤がフライアッシュに含まれる未燃カーボンに吸着されて空気量の確保が困難となる場合もある。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法によって評価する必要がある。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性の評価は、JIS A 1148 の A 法に準拠した凍結融解試験による相対動弾性係数の測定値に基づいて行ってよい。コンクリート標準示方書⁵⁾では構造物の置かれる気象条件ごとに相対動弾性係数の最小限界値を示しており、供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、これを参考として凍結融解に対する抵抗性を評価してよい。

また、対象とする低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいて、セメントと混和材の種類、混和材の置換率、化学混和剤の種類と使用量、骨材の種類、空気量の目標値等、実施工と同条件で製作した供試体を用いた凍結融解試験を事前に行い、凍結融解に対して十分な抵抗性が得られることを確認している場合には、施工時のフレッシュコンクリートの空気量の管理を適切に行うことによって、凍結融解に対して十分な抵抗性を有すると判定してよい。

5.7 温度ひび割れに対する抵抗性

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートで温度ひび割れの発生が懸念される場合には、温度応力解析の結果等に基づき、温度ひび割れに対する抵抗性を評価するものとする。

【解説】

若材齢での温度変化や自己収縮等に伴う体積変化が拘束されるために発生する温度ひび割れに対する抵抗性の評価は、コンクリート標準示方書⁵⁾あるいはマスコンクリートのひび割れ制御指針⁶⁾に準拠した十分な信頼性を有する解析手法を用いて、温度ひび割れ発生確率あるいは温度ひび割れ指数に基づいて行う必要がある。また、これらと同等以上の信頼性を有することが確認された方法であれば、温度ひび割れに対する抵抗性の評価に用いてよい。

温度ひび割れに対する抵抗性の評価において、ひび割れ発生確率あるいはひび割れ指数の目標値については、構造物の要求性能と供用時に構造物が置かれる環境条件を考慮した上で適切に設定する必要がある。また、温度ひび割れを制御するためには、設計、材料選定、配合設計、施工等の各段階で採用することのできる温度ひび割れ制御対策を総合的に検討し、必要に応じた対策を実施する必要がある。

コンクリート標準示方書⁵⁾とマスコンクリートのひび割れ制御指針⁶⁾では、セメントの種類ごとに、コンクリートの熱特性（熱膨張係数、断熱温度上昇特性等）、力学特性（圧縮強度、割裂引張強度、ヤング係数等）、収縮特性（自己収縮ひずみ等）等の物性値を示している。混和材を用いる場合については、高炉セメントB種あるいはフライアッシュセメントB種を用いたコンクリートの物性値を示しているが、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を高炉セメントC種相当以上あるいはフライアッシュセメントC種相当以上としたコンクリート、複数の混和材を同時に用いたコンクリート、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリート等については、温度ひび割れに対する抵抗性の評価に用いる物性値が明確ではない。低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの物性値が既存の基準類に示されていない場合には、試験や実績等によって適切な物性値を設定して、温度ひび割れに対する抵抗性を評価する必要がある。

5.8 二酸化炭素排出削減効果

低炭素型セメント結合材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果は、評価の対象範囲を明確に設定した上で、十分な信頼性を有する方法及びデータを用いて定量的に評価するものとする。

【解説】

構造物の構築に伴って発生する二酸化炭素排出量を定量化する方法としては、コンクリートに用いる材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量を各材料の使用量とインベントリデータから算出する方法、構造物のライフサイクルで発生する二酸化炭素排出量を積上げ計算あるいは産業連関分析によって算出する方法の2種類がある。低炭素型セメント結合材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果は、これらの方法に基づき、十分な信頼性を有するデータを用いて定量的に評価する必要がある。

二酸化炭素排出削減効果を正確に定量化するためには、評価の対象範囲を事前に明確に設定することが不可欠である。低炭素型セメント結合材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果は、ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材で置き換えることで得られる。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの施工方法が一般的なコンクリートと同様であれば、インベントリデータを活用した材料製造時における二酸化炭素排出量の算出結果の比較のみで二酸化炭素排出削減効果を評価してよい。一方、施工方法がポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと大幅に異なる場合やコンクリート工事全体で得られる二酸化炭素排出削減効果を比較する場合には、ライフサイクルをとおした二酸化炭素排出削減効果を算出して評価することが望ましい。

二酸化炭素排出削減効果を定量化する際の参考資料としては文献 7)～14)がある。これらで示されている方法及びデータについては、十分な信頼性を有するものとして、二酸化炭素排出削減効果を定量化する際に採用してよい。また、これらと同等以上の信頼性を有することが確認された方法及びデータについても、二酸化炭素排出削減効果を定量化する際に採用してよい。ただし、評価の対象範囲、採用した方法及びデータによって二酸化炭素排出削減効果の試算結果が異なる傾向を示す場合があるため、試算結果を示す際にはこれらの情報も同時に明示する必要がある。

参考文献

- 1) fib: Model Code for Concrete Structures 2010, First Edition, 2013
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004
- 3) 日本建築学会：高耐久性コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，1991
- 4) 気象庁ホームページ：二酸化炭素濃度の経年変化，http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
- 5) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013
- 6) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008
- 7) ISO 13315-1: Environmental Management for Concrete and Concrete Structures – Part 1 General Principles, 2014
- 8) ISO 13315-2: Environmental Management for Concrete and Concrete Structures – Part 2 System Boundary and Inventory Data, 2014

- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所：社会資本のライフサイクルをととした環境評価技術の開発，国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告書第 36 号，2012
- 10) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の環境負荷低減への取組みーPC 構造物の建設に伴う CO₂ 排出量の見える化ー，2011
- 11) 日本コンクリート工学協会：コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究小委員会報告書，2010
- 12) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005
- 13) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その 2），コンクリート技術シリーズ 62，2004
- 14) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価，コンクリート技術シリーズ 44，2002

6 章 製造及び施工

6.1 一般

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの製造及び施工は、所要の品質を有するフレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが得られる方法によって行うものとする。

【解説】

この章では、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの製造及び施工の原則と配慮することが望ましい事項を示した。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのフレッシュ性状は、セメント及び混和材の種類や混和材の置換率によって、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと異なる傾向を示す場合がある。例えば、高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートではフレッシュコンクリートの粘性が高くなること、フレッシュ性状や凝結時間が施工時の気温の影響を受けやすく、特に施工時の気温が高いとワーカビリティの経時的な低下の程度が大きくなることがある。所要の性能を有する構造物を構築するためには、このような低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの特徴を適切に把握した上で、コンクリートの製造及び施工を行う必要がある。また、硬化コンクリートの品質を確保するためには、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいても、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、打込み後の養生を適切に行う必要がある。

なお、対象とする結合材や構造物の種別ごとの製造及び施工の標準的な方法については、5 編のマニュアル（案）の規定を参照するとよい。

6.2 計量

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートに用いる材料の計量は、原則として、1 バッチ分ずつ質量で行い、かつ、計量誤差があらかじめ決められた範囲内となるように行うものとする。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいても、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、材料の計量は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有するよう、材料の管理状態、コンクリートの温度等を勘案して定められた配合に基づいて適切に行う必要がある。この際、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、結合材として用いる材料の種類が多くなること、ポルトランドセメントの使用量が少なく混和材の使用量が多くなることに留意するとよい。

セメント及び混和材の計量誤差については、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートを参考に、1 回計

量分量の計量誤差をセメントで $\pm 1\%$ 、混和材で $\pm 2\%$ （高炉スラグ微粉末で $\pm 1\%$ ）としてよい。ただし、複数の混和材を同時に用いる場合、1回あたりに計量する結合材の質量が多い場合や少ない場合等、材料の計量誤差がコンクリートの品質に与える影響が大きくなることが懸念される際には、適切な計量誤差を別途設定することが望ましい。

セメント及び混和材が袋詰めで供給される場合で、1袋の質量が記載質量に対してあらかじめ決められた計量誤差の範囲内にあることを確認した場合には、袋単位で計量を行ってよい。また、複数の結合材をプレミックスして用いる場合には、プレミックス後の材料の計量誤差を適切に設定することが望ましい。

6.3 練混ぜ

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートに用いる材料は、練上がり後のコンクリートが均質になるまで、所要の性能を有するミキサを用いて十分に練り混ぜるものとする。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは複数の結合材を用いること、高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートでは粘性が高くなる場合があることから、所要の性能を有するミキサを用いて、練上がり後のコンクリートが均質になるまで十分に練り混ぜる必要がある。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して結合材の種類が多くなるため、あらかじめ材料の投入順序を決定しておくこと、試し練りによって練混ぜ時間を決定しておくことに対しては、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも配慮することが望ましい。

フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質を試験によって確認した場合には、これと同様の方法で材料を練り混ぜることが望ましい。また、試し練りを行う際には、実施工となるべく近い条件で材料の練混ぜを行う必要がある。

6.4 運搬・打込み・締固め・仕上げ

- (1) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの現場までの運搬は、荷卸しが容易で、運搬中に材料分離が生じにくく、スランプや空気量等の変化が小さい方法で行うものとする。
- (2) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのコンクリートポンプによる圧送は、コンクリートの圧送性や圧送後のコンクリートの品質を考慮して行うものとする。
- (3) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートは、コールドジョイントや材料分離が生じないように、適切な施工計画に従って連続して打ち込み、締め固めるものとする。
- (4) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの仕上げは、締固め後の適切な時期に行うものとする。

【解説】

(1)について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、ワーカビリティの経時的な低下の程度が大きくなる場合があること、また、この傾向は特に気温が高いと顕著に現れる場合があることから、荷卸し時に所要のワーカビリティを確保できるよう配慮して運搬を行う必要がある。また、化学混和剤を用いてワーカビリティを確保する場合には、実施工となるべく近い条件で試し練りを行い、化学混和剤の種類の選定と使用量の調整を行う必要がある。

(2)について

高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートでは、フレッシュコンクリートの粘性が高くなることがあるため、コンクリートポンプを用いて圧送する場合には、必要に応じて実施工となるべく近い条件で試験を行い、圧送計画を入念に検討するとともに、圧送後のコンクリートの品質が低下しないよう配慮する必要がある。

(3)について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのスランプ保持性や凝結時間は、セメントと混和材の種類及び混和材の置換率、水結合材比、化学混和剤の種類と使用量、コンクリートの温度、外気温等の影響を受ける。特に高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートでは、フレッシュコンクリートの粘性が高くなること、ワーカビリティの経時的な低下の程度が大きくなることが懸念される。低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの打込みにおいては、これらのことを総合的に勘案して施工計画を作成し、打込み開始後は連続して作業を行い、締固めを行う必要がある。

(4)について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの凝結時間とブリーディング量は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して異なる傾向を示す場合があるため、試験によって傾向を把握し、締固め後の適切な時期に仕上げを行う必要がある。また、高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結

合材比の小さいコンクリートでは、ブリーディング量が小さくなる場合があるため、必要に応じて膜養生剤等を用いてコンクリートの表面の乾燥やこわばりを防ぐとよい。

6.5 湿潤養生

- (1) 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの養生は、打込み後の一定期間、硬化に必要な温度及び湿潤状態に保ち、硬化コンクリートが所要の品質を有するように行うものとする。
- (2) 硬化コンクリートが所要の品質を有するまでに必要となる湿潤養生期間は、試験等に基づいて設定するものとする。
- (3) 湿潤養生時のコンクリートの温度は、硬化コンクリートの品質が損なわれないよう、適切な温度に保つものとする。

【解説】

(1)について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの品質は、湿潤養生期間や打込み後の温度履歴の影響を受けるため、硬化コンクリートの品質を確保し、かつ、構造物に所要の性能を付与するため、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、打込み後の養生を適切に行う必要がある。

(2)について

コンクリート標準示方書¹⁾ではセメントの種類ごとに湿潤養生期間の標準を示しているが、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を高炉セメントC種相当以上あるいはフライアッシュセメントC種相当以上としたコンクリート、複数の混和材を同時に用いたコンクリート、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリート等については、湿潤養生期間の標準は明確ではない。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、試験等に基づき、適切な湿潤養生期間を設定する必要がある。

湿潤養生期間の設定方法について

既存の基準類では様々な根拠に基づいて湿潤養生期間を設定している。湿潤養生期間の設定方法としては、主に次の2つの方法がある。湿潤養生期間を検討する際には、硬化コンクリートの品質、すなわち、強度、耐久性、ひび割れ抵抗性に加えて、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件を考慮する必要がある。

・所要の品質を担保できる湿潤養生期間を試験によって設定する

構造物の種別、施工時と供用時に構造物が置かれる環境条件等を踏まえて低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートに求められる品質を明確にした上で、硬化コンクリートが所要の品質を有することを担保できる湿潤養生期間を試験によって確認し、これを湿潤養生期間として設定する。

例えば、構造物の種別によっては、所定の材齢で所要の強度を得ることが求められる場合、中性化や塩化

物イオン浸透、凍結融解等の作用に対して所要の抵抗性を有することが求められる場合がある。このような場合には、所要の品質を担保することができる湿潤養生期間を試験によって確認し、これを湿潤養生期間として設定してよい。

・既存の基準類の標準的な湿潤養生期間と同等の品質を担保できる湿潤養生期間を試験によって設定する

既存の基準類の標準的な湿潤養生期間で得られるコンクリートの品質を明確にした上で、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいて、これと同等の品質を担保できる湿潤養生期間を試験によって確認し、これを湿潤養生期間として設定する。

例えば、コンクリート標準示方書¹⁾には、普通ポルトランドセメント、混合セメント B 種、早強ポルトランドセメントを用いた場合の湿潤養生期間の標準が示されている。これらの湿潤養生期間の標準と同等の品質を確保できる湿潤養生期間を試験によって確認した場合には、これを湿潤養生期間として設定してよい。

なお、文献 2)、3)では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリートの湿潤養生期間の標準が示されているため、必要に応じて参考にとるとよい。

(3)について

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度発現は湿潤養生時のコンクリートの温度の影響を受けるため、打込み後から十分な硬化が進むまでは硬化に必要な温度に保ち、低温、高温、急激な温度変化等による有害な影響を受けないよう配慮する必要がある。冬期で気温が低い場合には、給熱養生や保温養生を行うことによって、湿潤養生時のコンクリートの温度を一定以上となるように制御することが望ましい。

冬期で気温が低い場合には、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、初期材齢の強度発現が遅くなることがある。特に初期材齢の平均温度が 10℃よりも低い状態が継続する場合には、強度発現の遅延の程度が大きくなることが確認されている。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの養生時の温度については、10℃以上に保つことが望ましい。ただし、初期材齢の平均温度が 10℃よりも低い状態が継続した際の強度発現の傾向と硬化コンクリートの品質を試験によって確認している場合には、この限りではない。

一方、マスコンクリートでは、気温によっては温度ひび割れの発生リスクが高くなる場合があるため、温度ひび割れに対する抵抗性を適切に評価し、必要に応じて、温度ひび割れの発生を抑制するための対策を実施することが望ましい。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2013
- 2) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー86，1996
- 3) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），コンクリートライブラリー94，1999

7 章 品質管理

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの品質管理は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有するよう、施工の各段階において適切に行うものとする。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいても、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質を確保するため、施工の各段階において品質管理を適切に行う必要がある。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの品質管理は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質の特徴を適切に把握した上で、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様の方法で行ってよい。ただし、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、結合材として用いる材料の種類が多くなる場合があること、気温が高いとワーカビリティの経時的な低下の程度が大きくなる場合があること、気温が低いと凝結や強度発現が遅くなる場合があることから、品質管理の頻度を高める等、必要に応じて、所要の品質を確保するための取組を行うとよい。

なお、対象とする結合材や構造物の種別ごとの品質管理の方法については、5 編のマニュアル（案）の規定を参照するとよい。

8 章 検査

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの検査は、あらかじめ定められた判定基準に基づいて、客観的な判定が可能な手法によって行うものとする。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートにおいても、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、あらかじめ定められた判定基準に基づいて、客観的な判定が可能な手法を用いて検査を行う必要がある。

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの検査は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質の特徴を適切に把握した上で、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様の方法で行ってよい。

【参考】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、混和材の使用量が多いため、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、コンクリートの表面や内部の色調が異なることがある。例えば、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの表面は、型枠を取り外した直後に青藍色を呈することがあるが、大気に触れることによって徐々に消色して、その後はポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも白くなることが多い。一方、コンクリートの内部は長期材齢においても青藍色を呈していることが多い（写真－8.1）。



(A) 普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリート (W/B=50%)



(B) 高炉スラグ微粉末の置換率を90%としたコンクリート (W/B=35%)

写真－8.1 供試体の割裂面の色調

※100×100×200mmの角柱供試体を材齢28日まで20℃の養生槽で水中養生し、材齢84日まで実験室（温度20℃、湿度60%）で気中養生した後、角柱供試体の中央部付近を割裂して断面を撮影した。

9 章 記録

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの設計、製造、施工、品質管理、検査で得られた情報は、構造物の維持管理で活用できるよう、適切に記録して保管するものとする。

【解説】

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの設計、製造、施工、品質管理、検査で得られた情報は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様に、構築された構造物の初期状態を表すものであり、構造物を長期的に維持管理していくための基礎データとなる。また、構造物に何らかの変状が認められた場合に、その原因を究明する上で重要な情報となる。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの設計、製造、施工、品質管理、検査で得られた情報については、適切に記録し、工事を終えた後も構造物の供用期間にわたって保管する必要がある。

記録の保管にあたっては、構造物の維持管理で確実に活用できるよう、次の 1.～5.に示す事項を参考に保管すべき情報を選定してよい。

1. 配合に関する資料
2. 設計に関する資料
3. 製造及び施工に関する資料
4. 品質管理の結果に関する資料
5. 検査の結果に関する資料

また、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートではポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して混和材の使用量が多くなること、混和材の種類や置換率はコンクリートの品質に多大な影響を与えることから、特に、結合材として用いた材料の品質、混和材の種類と置換率、水結合材比等の配合条件、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの品質管理の結果等について、構造物の維持管理で活用できるよう、明確な形で記録して保管することが望ましい。

第Ⅱ部

高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの 設計・施工マニュアル（案）

担当：戸田建設株式会社・西松建設株式会社

1 章 総則

1.1 適用の範囲

「高炉スラグ微粉末を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル（案）（以下、マニュアル（案）という）」は、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（以下、スラグリートという）の設計及び施工の標準的な方法を示したものである。

【解説】

近年、地球温暖化対策として、各事業分野で二酸化炭素排出量の削減に向けた取組みが進められている。建設分野でも、環境負荷の少ない構造物の実現に向けた研究開発が行われている。その取り組みの1つとして、ポルトランドセメントの一部分あるいは大部分を、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の二酸化炭素排出原単位の小さい混和材で置き換えたコンクリートの利用が注目されている。混和材の使用は、材料製造時の二酸化炭素の排出削減に寄与する一方で、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質に多大な影響を与える。このため、混和材の置換率の高いコンクリートの適用にあたっては、その特徴を適切に把握して設計及び施工を行うことが肝要である。

このマニュアル（案）では、混和材として製鉄所の副産物である高炉スラグ微粉末に着目した。高炉スラグ微粉末は、高温熔融状態の高炉スラグを水で急冷処理した高炉水砕スラグを乾燥及び破碎して製造したもので、少量のアルカリ刺激で硬化する性質（潜在水硬性）を有するため、ポルトランドセメントの代替材として多く使用することができる。しかしながら、ポルトランドセメントに対して高炉スラグ微粉末の置換率が高いと、コンクリートは安定したワーカビリティを得ることが難しくなる。このため、高炉スラグ微粉末以外の混和材と組み合わせた配合等が選定されてきたが、製造に要する設備の増設負担を軽減するためには、使用する混和材の種類はできるだけ少ない方がよい。そこで、高炉スラグ微粉末のみをポルトランドセメントの代替として多量に使用しても、所要のワーカビリティを確保でき、かつ強度や耐久性も通常の普通コンクリートと同程度のコンクリートとなる技術を開発し実用化した。

このマニュアル（案）では、日本工業規格（以下、JIS という）の JIS A 6206:「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に適合する高炉スラグ微粉末をポルトランドセメントの代替として高含有したコンクリートの設計及び施工について、標準的な方法を示した。なお、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（以下、スラグリートという）とは、具体的には、ポルトランドセメントに対する高炉スラグ微粉末の分量が質量比で 70%（JIS R 5211:「高炉セメント」の C 種上限）以上かつ 90%以下のコンクリートで、一般的なセメントよりも製造時の二酸化炭素排出量を大幅に削減した低炭素型セメント結合材を用いた低炭素型コンクリートのことである。ポルトランドセメントには、普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを使用し、高炉スラグ微粉末の種類は 4000 で、無水せっこうを三酸化硫黄（SO₃）換算で 2.0%内添したものをを使用することを標準とした。

このマニュアル（案）では、スラグリートの比較対象として、一般的に広く土木構造物に使用されているコンクリート（呼び強度 $18\sim 27\text{N/mm}^2$ ，スランプ $8\sim 12\text{cm}$ ，空気量 4.5% ，粗骨材の最大寸法 20 または 25mm ，水セメント比 $50\sim 55\%$ ，単位水量 175kg/m^3 以下）を例として使用し，これを一般的なコンクリートと称している。このマニュアル（案）に記載されていないコンクリートの設計及び施工，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質，さらに二酸化炭素排出削減等に係る環境性能照査については，必要に応じて，下記の文献を参考にするといふ。

土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，〔施工編〕，2013.

土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー86，1996

土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005

日本建築学会：高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説

日本建築学会：高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説

【参考】

このマニュアル（案）では，文中に「」マークが記載されている。これはそれぞれの項目欄で参考とすべき内容が記載された章や付録資料の番号を示したものである。必要に応じて，参考にするといふ。

1.2 用語の定義

このマニュアル（案）では、次のように用語を定義する。

- ・ **低炭素型のコンクリート (Low-carbon Concrete)** : セメント、水、骨材及び必要に応じて加える混和材料を構成材料とし、これらを練混ぜて混合したコンクリートの総称。このマニュアル（案）では、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（「スラグリート」）を指す。
- ・ **混和材 (Supplementary Cementitious Materials)** : ポルトランドセメントの代替として用い、潜在水硬性あるいはポズラン反応を示す無機物質。このマニュアル（案）では、潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末を指す。
- ・ **結合材 (Binders)** : 硬化コンクリートの強度発現に寄与する物質を生成し、骨材を結合する役割を果たす材料の総称。このマニュアル（案）では、ポルトランドセメント及び混和材を指す。
- ・ **水結合材比 (Water to Binder Ratio)** : 水の質量を結合材の質量で除したもの。百分率で表される。
- ・ **混合率 (Pre-Mix Ratio)** : セメントに混合材としてあらかじめ含まれる高炉スラグ微粉末の質量を、セメントの質量で除したもの。百分率で表される。このマニュアル（案）では、高炉セメントに含まれる高炉スラグ微粉末の比率を指す。
- ・ **混入率 (Mixing Ratio)** : 混和材として用いる高炉スラグ微粉末と高炉セメントに混合材としてあらかじめ含まれる高炉スラグ微粉末の質量の和を、結合材の質量で除したもの。百分率で表される。
- ・ **置換率 (Replacement Ratio)** : 混和材として用いる高炉スラグ微粉末の質量を、結合材の質量で除したもの。百分率で表される。
- ・ **高炉スラグ微粉末 (Ground Granulated Blast Furnance Slag)** : 銑鉄製造過程で生成する高炉水砕スラグを乾燥及び粉砕したもの。または、これにせっこうを添加したもの。JIS A 6206 では比表面積により、4 種類 (3000, 4000, 6000, 8000) に分類される。このマニュアル（案）では高炉スラグ微粉末 4000 に無水せっこうを三酸化硫黄 (SO_3) 換算で 2.0% 添加したものとする。
- ・ **せっこう (Gypsum)** : せっこうは硫酸カルシウム (CaCO_4) を主成分とした鉱物の総称であり、化学組成上 3 種類 (二水せっこう、半水せっこう、無水せっこう) に大別できる。このマニュアル（案）では、結晶水を持たない無水せっこうを指す。
- ・ **スラグリート (Slagrete)** : ポルトランドセメントに対する高炉スラグ微粉末の分量が質量比で 70% (JIS R 5211: 「高炉セメント」の C 種上限) 以上かつ 90% 以下のコンクリートである。ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを標準とし、高炉スラグ微粉末の種類は 4000 で、無水せっこうを三酸化硫黄 (SO_3) 換算で 2.0% 内添したものを使用する。

【解説】

混和材と結合材について

このマニュアル（案）において、混和材とは高炉スラグ微粉末であり、結合材とはポルトランドセメント及び混和材である。これらの材料が有すべき品質については 3 章に記載した。

水結合材比について

水結合材比とは、水の質量を結合材（ポルトランドセメント及び混和材（高炉スラグ微粉末）を足し合わせたもの）の質量で除したものである。

$$\text{水結合材比(\%)} = \frac{W}{B} \times 100 \quad \dots\dots \text{式(1.2.1)}$$

ここに、 W ：単位水量(kg/m^3)、 B ：単位結合材量(kg/m^3)である。

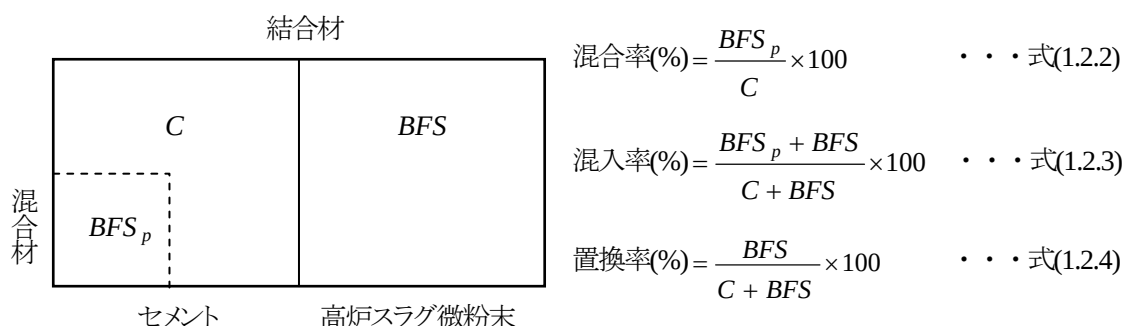
混合率、混入率、置換率について

図－1.2.1に混合率、混入率、置換率の定義を模式図として示した。

混合率とは、セメントに混合材としてあらかじめ含まれている高炉スラグ微粉末の質量の割合を示すものである。JIS R 5210:「ポルトランドセメント」では、普通ポルトランドセメントについては、高炉スラグ、シリカ質混合材、フライアッシュまたはセメント製造用石灰石を、単独でまたは適宜組み合わせて総量で5%以下であれば混合してもよいと規定されている。また、高炉セメントに含まれている高炉スラグの分量は、A種（5%を超え30%以下）、B種（30%を超え60%以下）、C種（60%を超え70%以下）としてそれぞれ規定されている（混合セメントのJIS（このマニュアル（案）では、JIS R 5211:「高炉セメント」を対象）では、結合材に含まれる混和材の割合を「分量（質量%）」と表している。このマニュアル（案）では「置換率（質量%）」で表すこととした。）。

混入率とは、混和材として用いた高炉スラグ微粉末とセメントに混合材としてあらかじめ含まれている高炉スラグ微粉末との質量の和が、結合材中に占める割合を示したものである。

置換率とは、混和材として用いた高炉スラグ微粉末の質量が、結合材中に占める割合を示すものである。このマニュアル（案）では、高炉スラグ微粉末の置換率が70～90%を対象としている。



図－1.2.1 混合率、混入率、置換率の定義

高炉スラグ微粉末について

高炉スラグは、溶鉱炉で銑鉄を製造する際に生成するものであり、冷却処理方法によって、結晶質の高炉徐冷スラグとガラス質の高炉水砕スラグとに大別される。高炉スラグ微粉末は、これらのうちの高炉水砕スラグを微粉碎したものであり、せっこうを添加したものと添加していないものがある。せっこうの添加量

については、JIS A 6206 :「コンクリート用高炉スラグ微粉末」において、三酸化硫黄 (SO_3) 換算で 4.0%以下と規定されている。また、比表面積の大きさに応じて 4 種類のものが JIS A 6206 に規定されている。

このマニュアル（案）で対象とする高炉スラグ微粉末は、高炉スラグ微粉末 4000 で、三酸化硫黄 (SO_3) 換算で 2.0%となる分量の無水せっこうを添加したものを標準とする。

ここで定義した用語以外の基本的な語句については、JIS A 0203:「コンクリート用語」や土木学会コンクリート標準示方書等に準じるものとする。

2 章 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの品質

2.1 一般

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、品質のばらつきが少なく、作業に適するワーカビリティを保持し、所要の強度、耐久性、ひび割れ抵抗性及び鉄筋を保護する性能を有するとともに、環境負荷の低減に配慮したものでなければならない。

【解説】

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートに求められる品質は、一般的なコンクリートと同様に、所要のワーカビリティ、強度、耐久性、ひび割れ抵抗性、鉄筋の保護性能を有し、さらに構造物の構築に伴って発生する環境負荷の低減に配慮したコンクリートであることである。しかしながら、高炉スラグ微粉末を用いない一般的なコンクリートや高炉セメントB種のような土木分野で比較的使用頻度の高い混合セメントを用いたコンクリートに比べると、フレッシュコンクリートや硬化コンクリートの品質が異なった特性を示すことがある。このため、その特性を十分に理解し、所要の品質を満足するものとする必要がある。

以下に、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの特性及び施工時の留意事項について示す。

 付録-4：「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの基本特性（参考）」

2.2 材料

高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートは、使用する高炉スラグ微粉末の種類や置換率、セメントや化学混和剤の種類等に応じて、練混ぜ性状やフレッシュコンクリートの性状、水和・発熱性状、強度発現特性、耐久性等が異なる。このため、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートにおいては、所要の品質や性能を得るため、品質が確かな材料を選定しなければならない。

【解説】

このマニュアル（案）では、材料について次のように定義している。セメントは普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメント、混和材は高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄（ SO_3 ）換算で 2.0%内添）、化学混和剤は高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）または AE 減水剤（高機能タイプ）を用いることを標準とする。練混ぜ水や骨材については、一部で留意事項を示しているが、一般的なコンクリートの規定と基本的には同様である。

 3 章：「材料」

2.3 配合

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、施工条件や環境条件を適切に踏まえた上で、コンクリートの製造、運搬、打込み、仕上げ等の作業を円滑に行うことのできる配合の選定が重要である。高炉スラグ微粉末の反応は温度依存性が高いため、特に、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでは、フレッシュコンクリートの性状が練上がり温度の影響を受けやすい。このため、施工時の環境条件（特に、気温）を適切に踏まえて配合を選定しなければならない。

【解説】

このマニュアル（案）では、配合に係わる項目として、「高炉スラグ微粉末の置換率、粗骨材の最大寸法、スランプまたはスランプフロー、呼び強度、単位水量、水結合材比（結合材水比）、単位結合材量、細骨材率、空気量、化学混和剤の添加量」について規定した。このうち、高炉スラグ微粉末の置換率は70～90%と多く、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートについては、配合設計に役立つ既報が極めて少ない。そこで、このマニュアル（案）では、実際に配合を組み立てる上で参考となるように、配合の具体例として以下の2配合を中心に示した。

■ 配合タイプⅠ）「中流動コンクリート相当（スランプフロー配合）」

呼び強度	: 27N/mm ² 相当
混和材	: 高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄（SO ₃ ）換算で2.0%内添）
混和材の置換率	: 90%置換（ポルトランドセメントに対して）
スランプフロー	: 35～50cm（42.5±7.5cm）
空気量	: 4.5±1.5%
単位水量	: 165kg/m ³
水結合材比	: 35%
細骨材率	: 50%程度
セメント種類	: 早強ポルトランドセメント
化学混和剤	: 高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）標準形

■ 配合タイプⅡ）「一般的な土木コンクリート相当（スランプ配合）」

呼び強度	: 24N/mm ² 相当
混和材	: 高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄（SO ₃ ）換算で2.0%内添）
混和材の置換率	: 70%置換（ポルトランドセメントに対して）
スランプ	: 12±2.5cm
空気量	: 4.5±1.5%
単位水量	: 163kg/m ³
水結合材比	: 50%

- 細骨材率 : 45%程度
- セメント種類 : 普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメント
(環境温度 10℃の時は早強ポルトランドセメントを推奨)
- 化学混和剤 : AE 減水剤 (高機能タイプ) 標準形または遅延形
(環境温度 30℃の時は遅延形を使用)

セメントや化学混和剤は、環境温度に応じて、使用する種類を変更することとした。スランプまたはスランプフローは、高炉スラグ微粉末を用いることにより、同等もしくは若干大きくなる傾向にある。このため、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの単位水量は、同一スランプまたはスランプフローを有する一般的なコンクリートに比べて、同程度か若干少なくなる。また、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、空気連行性が低下するため、AE 剤の添加量はやや多くなる。

☞ 4 章 : 「配合」

☞ 付録-1 : 「試験概要」の「2. コンクリート配合」

☞ 付録-4 : 「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの基本特性 (参考)」

☞ 付録-9 : 「化学混和剤 (助剤) の使用量」

2.4 製造

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、一般的なコンクリートに比べて粘性が高くなる傾向にある。このため、製造にあたっては、材料や配合の仕様に依拠して、均質なコンクリートを製造できるように練混ぜ時間を確保しなければならない。

【解説】

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、フレッシュコンクリートの粘性が高くなる傾向にある。このため、材料が均質になるまでに要する練混ぜ時間が長くなることがある。例えば、実機ミキサ (二軸強制型ミキサ) による練混ぜ時間は、一般的なコンクリートの場合は 30~60 秒だが、高炉スラグ微粉末 90% 置換で水結合材比 35% のスランプフロー配合では 90 秒以上を要する。実施工では、事前に室内での試し練りのほか、実際に使用する製造設備を用いた練混ぜ性能の検証を行い、材料が均質に混ざるまでに要する時間を確認しておくことが望ましい。

☞ 6 章 : 「製造」

☞ 付録-26 : 「実機プラント設備を用いた製造確認」

2.5 ワーカビリティー

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、特に環境温度の影響によって、フレッシュコンクリート性状の経時的な安定性や凝結時間（始発・終結）の確保が課題となる。このため、施工条件や環境条件に応じて、運搬、打込み、締固め、仕上げ等の作業に適するワーカビリティーを確保しなければならない。例えば、材料（特に、セメント、化学混和剤）の種類や使用量の選定を適切に行い、事前の試し練り等によってワーカビリティーとその経時変化を確認しておくことが望ましい。

【解説】

このマニュアル（案）では、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでも所要のワーカビリティーを確保することができる材料仕様や条件等について記載した。例えば、環境温度に応じて、使用する化学混和剤の種類や区分、使用量のほか、セメントの種類についても配合ごとに試験で確認し、所要のワーカビリティーを有することを検証している。検証結果については付録資料を参考にとよい。

👉 3章：「材料」

👉 4章：「配合」

👉 付録－5：「フレッシュコンクリート性状」

👉 付録－6：「化学混和剤の選定」

👉 付録－7：「化学混和剤（SF500BB）の上限使用量」

👉 付録－8：「化学混和剤（主剤）の使用量」

👉 付録－10：「ブリーディング」

👉 付録－11：「凝結特性」

2.6 強度、ヤング係数

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度発現は、高炉スラグ微粉末の種類や置換率による影響のほか、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、環境温度（練上がり温度）及び養生の影響を大きく受ける。特に、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでは、所要の強度発現性を確保するため、十分な湿潤養生期間をとり、環境温度に応じて施工上の対策を講じることが望ましい。なお、圧縮強度と引張強度の関係及び圧縮強度とヤング係数の関係は、概ね一般的なコンクリートと同様の傾向と考えてよい。

【解説】

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの圧縮強度は、環境温度及び養生の影響を大きく受ける。例えば、環境温度が低い時は初期強度発現が著しく遅延し、また湿潤養生期間が十分でないと所要の強度を確保することが困難となる場合がある。環境温度（10～30℃）や配合条件（高炉スラグ微粉末の置換率、結合

材水比，単位結合材量，セメントの種類)，湿潤養生期間といった項目が，高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの圧縮強度に与える影響については，付録資料を参考にするといよい。

このマニュアル（案）では，高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの呼び強度は，強度管理材齢 28 日で $24\sim 27\text{N/mm}^2$ を標準とした。なお，より高い圧縮強度が必要な場合には，圧縮強度と結合材水比との間には正の相関があることが実験により確認されたため，結合材水比を大きくすることで対応できる。ただし，事前の試し練りにより，フレッシュコンクリートや硬化コンクリートの品質を確認することが望ましい。

圧縮強度と引張強度の関係は，概ね一般的なコンクリートと同様の傾向と考えてよい。また，圧縮強度とヤング係数の関係についても同様である。

☞ 5 章：「設計」の「5.2 強度」，「5.3 ヤング係数」

☞ 付録-14：「圧縮強度」

☞ 付録-15：「引張強度」

☞ 付録-16：「ヤング係数」

2.7 発熱特性

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの発熱特性は，高炉スラグ微粉末の種類や置換率の影響を受ける。また，高炉スラグ微粉末を用いた場合の発熱の温度依存性は，ポルトランドセメントのみを用いた場合に比べて大きく，打込み時のコンクリート温度や気温の影響をより敏感に受ける。このため，高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートをマスコンクリートに用いる場合，事前に試験で発熱特性を確認しておくといよい。

【解説】

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの終局断熱温度上昇量は，高炉スラグ微粉末の置換率が小さい場合や練上がり温度が大きい場合には，普通ポルトランドセメントのみを用いた場合より大きくなることもある。しかしながら，この場合でも発熱速度は，普通ポルトランドセメントのみを用いたものと比較して，高炉スラグ微粉末の比表面積が小さいほど，また置換率が高いほど，それぞれ遅くなる。このため，高炉スラグ微粉末の比表面積及び置換率を適切に設定すれば，コンクリートの最高温度到達時間を遅くし，かつ最高温度も小さくすることができる。

このマニュアル（案）で規定した高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートについて，断熱温度上昇試験を実施して発熱特性を確認した。その結果，一般的に低発熱型セメントとして使用されている中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して，最高温度到達時間は高炉スラグ微粉末の置換率が 70% の場合は概ね同等で，置換率が 90% の場合では遅れていた。また，最高温度は高炉スラグ微粉末の置換率 70% 及び 90% とともに中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも低くなった。

☞ 5 章：「設計」の「5.4 熱物性値」

☞ 付録-12：「断熱温度上昇特性」

☞ 付録-23：「温度ひび割れ照査事例」

2.8 耐久性

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、構造物が供用期間中に受ける種々の物理的、化学的作用に対して十分な抵抗性を有し、内部の鋼材を保護できるものでなければならない。このマニュアル（案）では、コンクリートの性能を阻害する劣化要因として、中性化、塩化物イオンの浸透、凍結融解、化学的侵食、アルカリシリカ反応に着目し、これらの劣化要因が高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートに与える影響について実験で確認し、その結果から標準的な対策を規定した。

【解説】

このマニュアル（案）では、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの耐久性に影響を与える劣化因子として、中性化、塩化物イオンの浸透、凍結融解、化学的侵食、アルカリシリカ反応に着目した。これらの劣化因子による影響を屋内及び屋外での実験で確認し、その結果から標準的な対策を規定した。試験結果の詳細については、必要に応じて、付録資料を参照するとよい。

中性化について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでは、ポルトランドセメントの使用量が少なく、水酸化カルシウムの含有量も少なくなるため、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、中性化に対する抵抗性が低下する。例えば、中性化速度係数の値は、所要の湿潤養生を行った高炉スラグ微粉末の置換率 90% のコンクリート（水結合材比 35%）でも $3.99\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ （屋外暴露の実験結果）と大きい。さらに、屋内環境での中性化速度係数は、この値の約 1.9 倍と極めて大きい結果であった。ここで得られた値から、設計耐用年数を 100 年と設定した場合、必要な最小かぶり（安全率は考慮しない）は、通常環境下（中性化残り 10mm 確保）では、屋外構造物で 50mm 以上、屋内では 100mm 以上となる。なお、表面塗布剤を用いることで、中性化の進行を 10～20% 抑制できることを確認しており、必要に応じて用いるとよい。また、促進中性化試験を行うことで、暴露試験よりも短期間で実際の中性化進行の予測を行える可能性があるため、適宜、利用するとよい。

以上より、中性化進行による影響は一般的なコンクリートに比べて大きい。このため、中性化に対する抵抗性の評価にあたっては、構造物に求められる要求性能や環境条件の影響を適切に考慮する必要がある。また、必要に応じて、効果的な対策を講じるとよい。

 5 章：「設計」の「5.6 中性化に対する抵抗性」

 付録－18：「中性化抵抗性」

塩化物イオン浸透について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、細孔構造が緻密になること、高炉スラグ微粉末を用いた場合に水和生成物の塩化物イオンの固定化能力が高まること等から、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上する。例えば、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、所要の湿潤養生を行ったコンクリート（高炉スラグ微粉末の置換率 90%、水結合材比 35%）の場

合、 $0.17\text{cm}^2/\text{year}$ （浸せき試験の結果）で極めて小さい結果であった。しかし、塩化物イオン浸透に起因する鋼材の腐食速度は中性化に起因したものと比較して速い。さらに、中性化と塩化物イオン浸透が同時に起こる環境では、中性化の進行とともに水和生成物に固定されていた塩化物イオンがコンクリート内部へ移動・濃縮し、この塩化物イオンによっても鋼材腐食が引き起こされる可能性がある。したがって、塩化物イオン浸透に対する抵抗性については、適切に評価する必要がある。

☞ 5章：「設計」の「5.7 塩化物イオン浸透に対する抵抗性」

☞ 付録-17：「塩化物イオン浸透抵抗性」

凍結融解について

高炉スラグ微粉末の置換率が異なるコンクリートの気泡間隔係数（リニアトラバース法）を測定した結果、水結合材比が35%と小さく、高炉スラグ微粉末の置換率が70%以上の場合、気泡間隔係数の値が 300μ 以上で高い値であった。また、凍結融解試験を実施した結果、高炉スラグ微粉末の置換率が90%の場合、湿潤養生期間が長いほど凍結融解抵抗性が向上したものの、通常の空気量4.5%では所要の耐凍害性能（相対動弾性係数60%以上）を得ることができなかった。そこで、空気量を5.5%として再試験を実施した所、所要の凍結融解抵抗性を確保することができた。つまり、水結合材比が小さく、高炉スラグ微粉末の置換率が高炉セメントC種上限以上（70%以上）の分量の場合、空気量を通常の4.5%から5.5%に増加させることで耐凍害性を確保することが可能となった。これは、高炉スラグ微粉末の置換率が高い場合に、耐凍害性を確保するために必要な空気量が十分に連行されていなかったためと推察される。

以上より、凍結融解抵抗性が求められる構造物を施工する場合には、空気量の調整が重要であり、適切な対応を講じて評価する必要がある。

☞ 5章：「設計」の「5.8 凍結融解に対する抵抗性」

☞ 付録-9：「化学混和剤（助剤）の使用量」

☞ 付録-22：「凍結融解抵抗性」

化学的侵食について

一般的に、混和材を用いたコンクリートは、化学的侵食に対する抵抗性を改善する効果があるとされる。高炉セメントを用いた使用実績からも明らかのように、酸に対する抵抗性は、高炉スラグ微粉末の置換率を50%程度以上とすれば相当の向上が期待できるとされる。しかし、高炉スラグ微粉末のせっこう添加率が小さすぎると、耐酸性が一般的なコンクリートに比べて劣る場合があることが明らかにされている。したがって、特に酸性の作用が厳しい環境で用いる場合は、適切な高炉スラグ微粉末の置換率及びせっこう添加率を試験で確認するのがよい。

このマニュアル（案）で規定した高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートを濃度5%の硫酸溶液に浸せきした結果、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートに比べて、耐硫酸性は良好であった。ただし、硫酸溶液への浸せき期間が長くなると、普通コンクリートと同様に、コンクリート表面から酸劣化が進行する傾向があった。このため、コンクリートが酸性を含む土壌や水と接する場合等、あらかじめ化学

的侵食の作用を受けることが判明している場合には、事前に施工環境を模擬した条件で試験等により化学的侵食に対する抵抗性を確認しておくことが望ましい。

 付録-19：「化学的抵抗性（耐硫酸性）」

アルカリシリカ反応について

高炉スラグ微粉末の使用量を一定量以上とすると、高炉スラグ微粉末の反応によって細孔溶液中の水酸化物イオン濃度を低下させることができるため、アルカリシリカ反応の抑制に効果が得られる。特に、JIS A 5308:2014 の附属書 B における「アルカリシリカ反応抑制効果のある混合セメントなどを使用する抑制対策の方法」では、JIS R 5211:「高炉セメント」に適合する高炉セメント B 種もしくは C 種で、高炉スラグ微粉末の分量が 40% 以上の場合、アルカリシリカ反応に対して有効であるとされる。このため、アルカリシリカ反応が疑われる骨材を用いる場合、このマニュアル（案）で規定したコンクリートはアルカリシリカ反応の抑制に有効であるといえる。しかし、高炉スラグ微粉末の分量が B 種以上でも一部でアルカリシリカ反応の発生が確認されているため、アルカリシリカ反応の抑制効果については、事前に試験等で確認することが望ましい。

長期的な安定性について

一般的に、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでは、コンクリート表面が脆くなってペースト分や骨材が剥離していくアブサンデン（Absanden）現象の発生が懸念される。アブサンデン現象の発生は、コンクリート構造物の長期的な安定性を大きく阻害するため、その発生を防止する必要がある。このマニュアル（案）で規定した高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートについては、高炉スラグ微粉末の置換率が 70～90% と極めて多い配合でも、高炉スラグ微粉末の反応を刺激する無水せっこうの添加や、試験結果に基づいた適切な使用材料の組合せによる配合設計、さらに湿潤養生期間の確保等の対策を講じたことで、アブサンデン現象の発生は屋外に 2 年以上暴露した試験体でも確認されていない。

 付録-2：「アブサンデン現象」

2.9 ひび割れ抵抗性

コンクリートに発生するひび割れは、構造物の美観を損なうだけでなく、水や酸素等の腐食因子の侵入を容易にして鋼材腐食の発生リスクを高め、構造物の耐久性を低下させる。このため、ひび割れの発生はできるだけ防止し、また、ひび割れが発生しても、耐久性上、有害とならないようにひび割れ幅を制御しなければならない。

【解説】

コンクリートに発生するひび割れには、沈下ひび割れ、初期乾燥に伴うプラスチック収縮ひび割れ、温度ひび割れ、自己収縮ひび割れ、乾燥収縮ひび割れ等がある。高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、凝結の始発・終結が一般的なコンクリートに比べて遅い傾向にある。このため、特に、気温の低い時期には凝結が遅延し、沈下ひび割れの発生が懸念されることから、適宜、コンクリート表面の仕上げ時期に注意を払い、沈下ひび割れの発生を防止することが望ましい。また、ブリーディングの発生量が少ない傾向にあるため、特に気温の高い夏場では初期乾燥に伴う微細なプラスチック収縮ひび割れの発生が懸念される。このため、マットや散水による養生のほか、膜養生剤の散布等の適切な養生対策を講じることを推奨する。このほか、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、特に、コンクリート打込み直後の若材齢時において自己収縮に起因した体積変化が大きくなる場合があり、特に、高炉スラグ微粉末を高含有した場合に顕著になるとの指摘がある。そこで、高炉スラグ微粉末の置換率 50%、70%、90%のコンクリートについて自己収縮試験を実施した。試験の結果、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、高炉スラグ微粉末に内添した無水せっこう成分の反応によって生成されたエトリンガイトの働きにより、材齢初期（凝結始発後）に適度な膨張作用が加わることで、自己収縮ひずみの発生が緩和されて小さくなることがわかった。また、温度ひび割れについて、実験結果から得られた材料定数を用いて解析による検証を行った。その結果、例えば、橋脚を模擬した解析モデルを対象に、高炉スラグ微粉末を 70%置換で用いたコンクリートの場合、同程度の 28 日強度を有する中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリート（24-12-20M）に比べて、温度ひび割れ指数が約 18%向上した。

このように、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートのひび割れ抵抗性は、一般的なコンクリートと同程度以上となる。しかしながら、施工においては、環境条件に応じて、配慮が必要となる点があるので注意を要する。また、マスコンクリートの内部のように若材齢時に高温履歴を受ける場合、想定以上の収縮挙動が起こる可能性を指摘する報告もある。このため、大断面構造物を対象にした温度ひび割れの発生リスクについては、より詳細で適切な評価が求められる。

📖 付録-12：「断熱温度上昇特性」

📖 付録-13：「熱膨張係数」

📖 付録-21：「乾燥収縮特性」

📖 付録-23：「温度ひび割れ照査事例」

2.10 色調

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの色調は、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、一般的なコンクリートに比べて、白くなることが多い。ただし、初期材齢時においては、硫化鉄の影響によって青緑色がかった色調を呈する。品質には問題はなく、時間の経過とともに青緑色は退色していき、一般的なコンクリートと同程度かやや白くなる。

【解説】

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、高炉スラグ微粉末自体の色がセメントに比べて白いため、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、練上がったフレッシュコンクリートの色は一般的なコンクリートよりもやや白色を帯びている。特に、モルタルでは高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、明確に色調の差が現れる。ただし、硬化してから数日間か数週間は、高炉スラグ微粉末にわずかに含まれている硫化鉄の影響により青緑色がかった色調を呈する。

この色調は、特に水中や海水中にあると長期間にわたるとされる。なお、時間が経過すると、酸化作用などによってコンクリート表面の青緑色は退色していき、最終的には一般的なコンクリートと同程度かやや白い色となる。一方、コンクリート内部では、硫化鉄の酸化現象が表面よりも遅いため、色調は青緑色がかった状態が長期にわたって継続する。なお、色調の変化はコンクリートの品質に悪影響を及ぼすことはない。

 付録-24：「色調」

2.11 環境負荷低減効果

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、ポルトランドセメントの使用量が極めて少ないため、材料製造時の二酸化炭素排出量が一般的なコンクリートに比べて少なく、環境負荷低減に有効である。

【解説】

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートについて、材料製造時の二酸化炭素排出量を試算した。その結果、結合材に占める高炉スラグ微粉末の量が多いほど、材料製造時の二酸化炭素排出量は減少した。また、このマニュアル（案）で対象としている低炭素型コンクリート（高炉スラグ微粉末の置換率 70～90%）の配合では、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートに比べて、材料製造時の二酸化炭素排出量を約34%以下（削減効果 66%以上）と試算でき、環境負荷低減効果が高いことが示された。

 5 章：「設計」の「5.10 二酸化炭素排出削減効果」

 付録-25：「材料製造時における二酸化炭素の排出量削減効果（試算例）」

3 章 材料

3.1 一般

- (1) 材料は、品質の確かめられたものを用いなければならない。
- (2) JIS 及び土木学会規準の品質規格を満足する材料は、品質が確かめられた材料であると判断してよい。ただし、JIS 及び土木学会規準の品質規格を満足する材料であっても、品質規格の試験条件と異なる条件でこれを用いる場合には、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。
- (3) JIS 及び土木学会規準に品質規定の定められていない材料を使用する場合には、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

この章では、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートを構成する材料に求められる品質を規定している。一般的に、混和材として高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質は、その養生温度や高炉スラグ微粉末の種類及び置換率などによって変化する。このため、このマニュアル（案）に記載されたデータのほか、信頼できる資料によるか、または、実際の工事における使用材料、配合及び施工条件と同等の条件であらかじめ試し練りを行って、品質を確認しておくのがよい。

(1)について

コンクリートに用いる材料の品質はフレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質に多大な影響を与える。このため、所要の性能を有する構造物を造るためには、品質が確かな材料を用いる必要がある。

(2)について

JIS 及び土木学会規準の品質規格を満足する材料は、品質が確かめられた材料であると判断してよい。ただし、JIS 及び土木学会規準の品質規格を満足する材料であっても、品質規格の試験方法と異なる条件で用いられる場合がある。このような場合には、実施工となるべく近い条件での試験や過去の実績等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

(3)について

JIS 及び土木学会規準の品質規格を満足しない材料を使用する場合には、実施工となるべく近い条件での試験や過去の実績等を参考にして、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

3.2 セメント

- (1) セメントは、JIS R 5210 に適合したものとし、普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを用いることを標準とする。
- (2) JIS R 5211 に適合する高炉セメントを用いる場合には、事前に所要の品質を満足することを確認しなければならない。
- (3) 上記(1)及び(2)以外のセメントを使用する場合には、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

(1)について

使用するセメントの種類は、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性に多大な影響を与えるため、対象とする構造物の種別、施工条件、環境条件等を考慮して適切なセメントを選定しなければならない。このマニュアル（案）では、セメントはJIS R 5210:「ポルトランドセメント」に適合するポルトランドセメントのうち、普通ポルトランドセメントあるいは早強ポルトランドセメントを使用することを標準とする。なお、JIS R 5210:「ポルトランドセメント」に適合する普通ポルトランドセメントには、少量の混合成分として、高炉スラグやシリカ質混合材、フライアッシュ、石灰石が5%以下の割合で含まれているが、これらは混和材の分量としては考慮しないこととする。

セメント種類に関する事前検討の結果、水結合材比35%、高炉スラグ微粉末90%置換の配合ではH（早強ポルトランドセメント）、水結合材比50%、高炉スラグ微粉末70%置換の配合では、N（普通ポルトランドセメント）またはH（早強ポルトランドセメント）で、特に環境温度が10℃と低い時はH（早強ポルトランドセメント）の使用を推奨する。

表-3.2.1 セメントの種類（推奨）

水結合材比 W/B (%)	高炉スラグ微粉末 の置換率 BFS/B (%)	推奨するセメントの種類		
		環境温度		
		10℃	20℃	30℃
35	90	H		
50	70	H（推奨）	N または H	

備考) N（普通ポルトランドセメント）、H（早強ポルトランドセメント）

付録-5：「フレッシュコンクリート性状」

付録-6：「化学混和剤の選定」

付録-10：「ブリーディング」

付録-11：「凝結特性」

付録-14：「圧縮強度」

(2)について

JIS R 5211:「高炉セメント」に適合する高炉セメントについては、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換したセメントであるが、市販されている高炉セメントには高炉スラグ微粉末の混合率が明示されていないことがある。このため、高炉セメントを用いる場合、つまり高炉セメントの一部をさらに高炉スラグ微粉末で置換して用いる場合には、製造販売元にヒアリング等を行い、高炉セメント中に含まれる高炉スラグ微粉末の混合率を明確にし、結合材に含まれる混和材の置換率を明らかにしておくことが望ましい。なお、高炉セメント中の高炉スラグ微粉末の置換率を明確にすることが困難な場合は、事前の試し練り等により、コンクリートが所要のワーカビリティ及び強度、耐久性、ひび割れ抵抗性を有することを確認しなければならない。また、せっこう量についても確認し、必要に応じて、別途、添加するなどの検討が必要となる。

(3)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートに用いるセメントの種類は、フレッシュコンクリートのワーカビリティや硬化コンクリートの強度と耐久性、ひび割れ抵抗性だけでなく、硬化特性や発熱特性にも多大な影響を与える。こうしたコンクリートに求められる品質に加えて、施工条件や環境条件なども総合的に勘案した上で、適切なセメントを選定することが望ましい。なお、JIS R 5212:「シリカセメント」、JIS R 5213:「フライアッシュセメント」及びJIS R 5214:「エコセメント」は使用対象外とする。

3.3 練混ぜ水

- (1) 練混ぜ水は、上水道水、JSCE-B 101 または JIS A 5308 附属書 C に適合したものを標準とする。
- (2) 上記(1)以外の練混ぜ水については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。
- (3) 海水は練混ぜ水として使用しない。

【解説】

(1)について

このマニュアル（案）では、上水道水、JSCE-B 101（コンクリート用練混ぜ水の品質規格（案））または JIS A 5308:「レディーミクストコンクリート」の附属書 C（レディーミクストコンクリートの練混ぜに用いる水）に適合した練混ぜ水を用いることを標準とした。ただし、回収水（スラッジ水及び上澄水の総称）を用いる場合には、事前の試験あるいは過去の実績等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しておくことが望ましい。

(2)について

(1)以外の練混ぜ水を用いる場合には、実施工となるべく近い条件での試験や過去の実績等を参考として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

(3)について

海水を練混ぜ水に用いたコンクリートの耐久性に関する知見が十分に得られていないため、練混ぜ水に海水は使用しないものとする。

3.4 骨材

- (1) 骨材は JIS A 5308 の附属書 A に適合したもののうち、碎石及び砕砂、砂利及び砂を使用することを標準とする。
- (2) 粗骨材の最大寸法は、20mm または 25mm を標準とする。
- (3) 高炉スラグ骨材を使用する場合は JIS A 5011-1 に適合したものを使用し、高炉スラグ細骨材の混合率は 20%以下、高炉スラグ粗骨材は使用しないものとする。

【解説】

(1)について

JIS A 5308:「レディーミクストコンクリート」の附属書 A（レディーミクストコンクリート用骨材）に規定された骨材の種類のうち、碎石及び砕砂、砂利及び砂を使用することを標準とする。碎石及び砕砂については、JIS A 5005:「コンクリート用碎石及び砕砂」の規定によるものとする。なお、スラグ骨材、人工軽量骨材、再生骨材 H を用いる場合には、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しておくことが望ましい。

(2)について

粗骨材の最大寸法は、フレッシュコンクリートのワーカビリティや強度等に影響し、最大寸法が大きいほど、同一スランプを得るのに必要な単位水量は少なくなる。ただし、粒径の大きな骨材は、地域によっては流通しておらず、調達が困難な場合がある。このため、粗骨材の最大寸法は 20mm または 25mm を標準とする。なお、最大寸法の大きな粗骨材、例えば最大寸法 40mm 以上の粗骨材を用いる場合には、事前試験により、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しておくことが望ましい。

 4 章：「配合」の「4.3 粗骨材の最大寸法」

(3)について

JIS A 5011-1:「コンクリート用スラグ骨材—第 1 部：高炉スラグ骨材」に適合した高炉スラグ骨材を使用する場合、骨材の粒度や密度、吸水率といった物理的性質を考慮し、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質確保の観点から、高炉スラグ細骨材は普通骨材に対する混合率を 20%以下、高炉スラグ粗骨材は使用しないものとする。この理由として、高炉スラグ細骨材は物理的性質が産地により大きく異なるほか、表面に散布された固結防止剤（主成分は遅延剤）の影響により、大量に用いた場合にフレッシュコンクリートの凝結遅延やブリーディングの増加といった性状の不具合を引き起こすことが実験によって確認されたため、普通骨材に対する混合率の上限を 20%とした。また、高炉スラグ粗骨材については、骨材の吸水率が高く、空隙率が大きいため、フレッシュコンクリートの性状（スランプフロー、空気量）が安定しにくく、さらに AE 剤で所要の空気量を導入しても、硬化コンクリートの凍結融解抵抗性を確保することが極めて困難であることが実験で判明したためである。

3.5 混和材

- (1) 混和材は、JIS A 6206 に適合した高炉スラグ微粉末を使用するものとする。
- (2) 高炉スラグ微粉末の品質は、高炉スラグ微粉末 4000 で、三酸化硫黄 (SO_3) 換算で 2.0%となる分量の無水せつこうを添加したものを標準とする。
- (3) 上記(1)及び(2)以外の混和材については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

(1)について

このマニュアル（案）では、JIS A 6206:「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に適合した高炉スラグ微粉末を用いることとした。JIS A 6206 では、高炉スラグ微粉末 3000、高炉スラグ微粉末 4000、高炉スラグ微粉末 6000、高炉スラグ微粉末 8000 の 4 種類の高炉スラグ微粉末の品質を規定している。これら的高炉スラグ微粉末は比表面積や活性度指数等が異なるため、いずれの高炉スラグ微粉末を用いるかによって、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性に与える影響が異なる可能性がある。このため、対象とする構造物の種別、施工条件、環境条件等を考慮して適切な高炉スラグ微粉末を選定しなければならない。

(2)について

高炉スラグ微粉末の主原料である高炉水砕スラグは、熔融スラグを水で急冷しているためガラス質（非晶質）である。水に接すると脆弱な水和反応をするが、セメントのような急速な凝結や強度発現はない。セメントの水和反応で生成した水酸化カルシウムなどのアルカリ性物質やせつこうなどの刺激剤の働きにより、高炉スラグ微粉末はセメントと同様な水和反応をし、強度発現する性質（潜在水硬性）がある。このため、このマニュアル（案）では、JIS A 6206 に規定された高炉スラグ微粉末 3000、4000、6000、8000 の 4 種類のうち、製造量が比較的多く調達が容易な高炉スラグ微粉末 4000（比表面積：3500 以上 5000 cm^2/g 未満）に無水せつこう(CaSO_4)を三酸化硫黄 (SO_3) 換算で 2.0%添加したものを標準とする。

なお、無水せつこうの添加は、発熱特性や収縮特性、強度発現性などに関係しているといわれている。例えば、無水せつこうの反応で生成されたエトリンガイトにより、材齢初期に適度な膨張作用がコンクリートに付与される。これによって高炉スラグ微粉末を高含有した配合でも自己収縮ひずみを抑制する効果を期待できる。また、初期強度発現性も確保することができる。以上より、無水せつこう添加品を標準とした。

 付録-20：「自己収縮特性」



写真-3.5.1 高炉スラグ微粉末

表-3.5.1 高炉スラグ微粉末の材料仕様

品質 \ 種類		高炉スラグ微粉末 4000 (無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%添加)	
		JIS A 6206 による規格値	試験値 (例)
密度(g/cm ³)		2.80 以上	2.89
比表面積(cm ² /g)		3500 以上 5000 未満	4300
活性度指数 (%)	材齢 7 日	55 以上	83
	材齢 28 日	75 以上	105
	材齢 91 日	95 以上	111
フロー値比(%)		95 以上	98
酸化マグネシウム(%)		10.0 以下	5.17
三酸化硫黄(%)		4.0 以下	2.03
強熱減量(%)		3.0 以下	1.10
塩化物イオン(%)		0.02 以下	0.008
備考：全アルカリ量： 0.43% せっこう添加： 有（三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%となる分量の無水せっこう） 高炉水砕スラグの塩基度の試験値： 1.82			

【参考】

高炉スラグ微粉末 4000 の調達にあたり、主な製造供給元（2015 年 3 月時点）は下表のとおりである。詳細については、鐵鋼スラグ協会に確認・相談することが望ましい。また、せっこう添加品の供給についても各社に確認することが望ましい。なお、下表のうち、このマニュアル（案）に従って事前に試験で使用性能を確認した製品は No.3 と No.7 である。

表－3.5.2 高炉スラグ微粉末 4000 の主な製造供給元

No.	会社名	高炉スラグ 主要供給製鉄所	主な 供給先
1	日鉄住金セメント（株）	新日鐵住金(株) 室蘭事業所	北海道
2	日鉄住金スラグ製品（株）	新日鐵住金(株) 鹿島事業所	関東
3	エスメント関東（株）	新日鐵住金(株) 君津事業所	関東
4	エスメント中部（株）	新日鐵住金(株) 名古屋事業所	中部
5	和歌山高炉セメント（株）	新日鐵住金(株) 和歌山事業所	近畿
6	日鉄住金高炉セメント（株）	新日鐵住金(株) 八幡事業所	九州
7	（株）デイ・シイ	JFE スチール(株) 東日本製鉄所（京浜地区）	関東
8	千葉リバーメント（株）	JFE スチール(株) 東日本製鉄所（千葉地区）	関東
9	水島リバーメント（株）	JFE スチール(株) 西日本製鉄所（倉敷地区）	中国
10	（株）神戸製鋼所	(株)神戸製鋼所 加古川製鉄所	近畿

参考）鐵鋼スラグ協会：鐵鋼スラグの高炉セメントへの利用（2015 年版）, p.51

(3)について

高炉スラグ微粉末以外に、シリカフューム、膨張材、アルカリ刺激剤等を用いる場合には、事前の試験あるいは過去の実績等を参考について、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

3.6 化学混和剤

- (1) 化学混和剤は、JIS A 6204 に適合したものを使用するものとする。
- (2) 化学混和剤の種類は、高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）または AE 減水剤（高機能タイプ）を標準とする。
- (3) 化学混和剤の区分は、使用材料や配合、施工条件等を考慮して、標準形または遅延形から選択して使用する。
- (4) 上記(1)以外の化学混和剤については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートのフレッシュ性状は、セメント及び高炉スラグ微粉末の種類や置換率により、一般的なコンクリートと異なる傾向を示す場合がある。例えば、高炉スラグ微粉末は少量のアルカリ刺激で硬化する性質（潜在水硬性）を有するため、アルカリを大量に消費して硬化するポゾラン物質（例えば、フライアッシュ）よりもセメントの代替材として多く使用できるが、1) 高炉スラグ微粉末を高含有した配合や水結合材比の小さい配合ではフレッシュコンクリートの粘性が高くなり、安定したワーカビリティを得ることが困難となること、2) フレッシュ性状（スランプ、空気量等）や凝結時間が施工時の気温の影響を受けやすく、特に気温が高い夏期には高炉スラグ微粉末の反応が早期に活性化するため、フレッシュ性状の経時的な低下の程度が大きくなる傾向にあること、3) 化学混和剤の使用量が過大になると凝結の遅延を引き起こす可能性があること等が挙げられる。これらの点を十分に踏まえて、フレッシュコンクリートが所要の品質を有するよう、化学混和剤の選定と使用量の調整を行う必要がある。

混和材の置換率の高い配合や水結合材比の小さい配合では、所要のワーカビリティを確保するために、高性能 AE 減水剤、高性能減水剤、高機能タイプ AE 減水剤等の使用が必要となることが多い。また、混和材の置換率が高いほど、所定の空気量を確保するための AE 剤の使用量が多くなること、混和材の種類と置換率、水結合材比によって化学混和剤の効果が異なる場合がある。このため、実施工となるべく近い条件で試し練りを行い、化学混和剤の選定と使用量の調整を行うことが望ましい。

 付録－6：化学混和剤の選定

 付録－8：「化学混和剤（主剤）の使用量」

 付録－9：「化学混和剤（助剤）の使用量」

 付録－11：「凝結特性」

(2)について

化学混和剤の種類は、JIS A 6204:「コンクリート用化学混和剤」に適合した高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）または AE 減水剤（高機能タイプ）を標準とし、混和材（高炉スラグ微粉末）の置換率やフレッシュコンクリートの要求品質、施工条件等に応じて使い分ける。このマニュアル（案）で使用する化学混和

剤の仕様を表－3.6.1 に示す。同表に示した化学混和剤は、高炉スラグ微粉末を高含有した配合においても、所要のフレッシュ保持性能を有していることを確認した製品例である。特に、高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）は紛体量の多いスランプフロー配合に有利で、特殊な分散剤の処方によって経時安定性を大幅に改善している。ただし、その効果が高炉スラグ微粉末に添加されたせっこう量によって影響を受け、減水性やスランプの経時変化が変化する。例えば、せっこう添加量が多い場合、スランプの経時保持性は改善するが、凝結時間が遅延する。そこで、高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）を使用する場合、高炉スラグ微粉末に添加するせっこう（無水せっこう）の量は三酸化硫黄（SO₃）換算で 2.0% を標準とする。なお、せっこう添加量が 1.0% 以下及び 3.0% 以上の場合は、あらかじめ試し練りでスランプの経時変化や凝結時間を確認することが望ましい。

表中に示した使用範囲の上限量を超えて用いても、減水性能が頭打ちとなって性状改善効果を期待できないだけでなく、著しい凝結遅延や硬化不良、材料分離などの不具合を引き起こす原因となる。このため、高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）の使用量は単位結合材料（B）×1.3% 未満（絶対量 6kg/m³ 未満）、AE 減水剤（高機能タイプ）では B×1.5% 未満（絶対量 5kg/m³ 未満）を目安とした。この他、空気量は AE 剤や消泡剤等を適宜使用して調整することとする。

表－3.6.1 化学混和剤の物性例

種類	区分	主成分(参考)	外観	使用量の目安 (B×wt%)
高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ高含有用)	標準形(I 種)	ポリカルボン酸系化合物, リグニンスルホン酸塩	黒褐色 液体	B×0.7～1.3% (約 3～6kg/m ³)
AE 減水剤 (高機能タイプ)	標準形(I 種)	リグニンスルホン酸塩, オ キシカルボン酸塩とポリカ ルボン酸系化合物	黒褐色 液体	B×0.6～1.5% (約 2～5kg/m ³)
	遅延形(I 種)			

付録－3：「高性能 AE 減水剤（SF500BB）の作用機構について」

付録－5：「フレッシュコンクリート性状」

付録－6：「化学混和剤の選定」

付録－7：「化学混和剤（SF500BB）の上限使用量」

付録－8：「化学混和剤（主剤）の使用量」

付録－10：「ブリーディング」の「3. 化学混和剤の性能による区分」

付録－11：「凝結特性」の「4. 化学混和剤（SF500BB）の使用量」

(3)について

化学混和剤の区分は、使用材料や配合、施工条件等を考慮して、標準形または遅延形から選択して使用する。事前検討の結果、化学混和剤の種類が「高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）」を用いる場合は、環

境温度の違いによらず「標準形」，「AE 減水剤（高機能タイプ）」を用いる場合は，気温 10～20℃では「標準形」，30℃では「遅延形」の使用を推奨する。

表－3.6.2 化学混和剤の区分（推奨）

化学混和剤の種類	推奨する化学混和剤の区分		
	環境温度		
	10℃	20℃	30℃
高性能 AE 減水剤 （高炉スラグ高含有用）	標準形		
AE 減水剤 （高機能タイプ）	標準形		遅延形

👉 付録－5：「フレッシュコンクリート性状」

👉 付録－6：「化学混和剤の選定」

👉 付録－8：「化学混和剤（主剤）の使用量」

👉 付録－10：「ブリーディング」

👉 付録－11：「凝結特性」

(4)について

JIS A 6204 に適合していない化学混和剤を使用する場合には，例えば，分離低減剤（増粘剤）等の化学混和剤を使用する場合，実施工となるべく近い条件での試験や過去の実績等を参考として，フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有することを確認する必要がある。

4 章 配合

4.1 一般

- (1) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの配合は、コンクリートが所要のワーカビリティ、強度、耐久性、ひび割れ抵抗性、鋼材を保護する性能等を有する範囲内で、単位水量をできるだけ小さくし、かつ、品質のばらつきが少なくなるように設定しなければならない。
- (2) コンクリートの配合は、所要の性能を満足すること以外に、使用する製造プラントの設備条件や材料の調達、輸送コスト等を含めた経済性も考慮して定めることがよい。

【解説】

この章では、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートにおける配合設計の標準的な方法を示した。

4.2 セメントと混和材の種類及び混和材の置換率

- (1) セメントと混和材の種類及び混和材の置換率は、コンクリートが所要の品質を有し、使用目的が十分に達成されるように、適切に設定するものとする。
- (2) セメントの種類は、普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを標準とする。
- (3) 混和材の種類は、高炉スラグ微粉末 4000 で無水せっこうを三酸化硫黄（ SO_3 ）換算で 2.0% 内添したものを標準とする。
- (4) 高炉スラグ微粉末の置換率は、ポルトランドセメントの質量に対して 70% 以上かつ 90% 以下とする。

【解説】

(1)について

セメントと混和材の種類及び混和材の置換率は、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性に多大な影響を及ぼすため、対象とする構造物の種別、施工条件、環境条件等を考慮して、適切に設定しなければならない。また、環境負荷の低減の観点から、混和材の置換率を高めるほど二酸化炭素排出削減効果を大きくできること、混和材の産地には地域的な偏りがあるため、地産地消に配慮することにより輸送に伴って発生する環境負荷を低減できること等を踏まえた上で、混和材の種類及び置換率を検討することが望ましい。

(2)について

セメントの種類は、JIS R 5210:「ポルトランドセメント」に適合したものとし、普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを用いることを標準とする。また、JIS R 5211:「高炉セメント」に適合する高炉スラグ微粉末を用いる場合には、事前に所要の品質を満足することを確認する。

(3)について

混和材の種類は、JIS A 6206:「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に適合した高炉スラグ微粉末4000で、三酸化硫黄（SO₃）換算で2.0%となる分量の無水せっこうを添加したものを標準とする。無水せっこうは、その反応によって生成されるエトリンガイトの働きにより、材齢初期に適度な膨張作用をコンクリートに付与し、これによって高炉スラグ微粉末を高含有した配合でも自己収縮ひずみ量を抑制する効果を期待できる。また、初期強度発現性も確保することができる。以上より、無水せっこう添加品を標準とした。

☞ 3章：「材料」の「3.5 混和材」

(4)について

このマニュアル（案）における高炉スラグ微粉末の置換率は、ポルトランドセメントの質量に対して70%以上かつ90%以下とし、コンクリートに要求される品質に応じて、水結合材比や単位結合材量等の配合条件、セメントや骨材、化学混和剤等の使用材料などを選定する。例えば、高炉スラグ微粉末90%置換の場合、水結合材比35%（結合材水比2.86）、単位結合材量470kg/m³を目安に配合設計を行う。また、高炉スラグ微粉末70%置換の場合、水結合材比50%（結合材水比2.00）、単位結合材量330kg/m³を目安にするとよい。

☞ 付録-14：「圧縮強度」の「2. 結合材水比」、「3. 単位結合材量」

4.3 粗骨材の最大寸法

- (1) 粗骨材の最大寸法は、対象構造物の部材寸法、鉄筋のあき及びかぶりを考慮して設定する。
- (2) 粗骨材の最大寸法は、20mm または 25mm を標準とする。

【解説】

(1)について

粗骨材の最大寸法が大きいほど、同一スランプを得るのに必要な単位水量は少なくて済むので、同一強度を得るための単位セメント量を減らせる。さらに、乾燥収縮やクリープの減少にも有効である。したがって、部材寸法や鉄筋のあき及びかぶりを十分に考慮し、打込みに支障のない範囲内で最大寸法の大きな骨材を選定することが望ましい。

(2)について

粗骨材の最大寸法は、所要のワーカビリティを得るのに必要なコンクリートの単位水量、単位セメント量ならびに水密性等と密接な関係がある。このマニュアル（案）では、レディーミクストコンクリート工場への粗骨材の供給や貯蔵設備等を考慮して、粗骨材の最大寸法は20mm または 25mm を標準とした。

☞ 3章：「材料」の「3.4 骨材」

4.4 スランプまたはスランプフロー

- (1) スランプまたはスランプフローは、施工性と汎用性を考慮して、一般的なコンクリートを想定したスランプ 12cm と、中流動コンクリート相当のスランプフロー35～50cm の2種類とした。
- (2) 高炉スラグ微粉末の置換率は、スランプ 12cm 配合では 70%、スランプフロー35～50cm 配合では 90%を標準とする。

【解説】

(1)について

スランプまたはスランプフローの設定について、一般的に土木分野で使用されているコンクリート配合を参考に、スランプ配合はスランプ 12cm を標準とした。また、近年、施工性改善にも有効な配合として中流動コンクリートが注目されているため、中流動コンクリート相当のスランプフロー35～50cm 配合も標準配合として準備した。なお、室内試験の結果から、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートにおいて、スランプまたはスランプフローは、注水から 30 分程度すると、練上がり直後に比べて、同程度かやや大きくなる傾向にあった。このため、施工前に行う試し練り試験の時にはフレッシュコンクリート性状を確認し、必要に応じて、化学混和剤の適正な使用量等を選定するものとする。

(2)について

フレッシュコンクリートや硬化コンクリートの品質確保の観点から、上記(1)のスランプ配合及びスランプフロー配合における高炉スラグ微粉末の置換率は、70%及び90%を標準とした。

 付録-1:「試験概要」の「2. コンクリート配合」

 付録-5:「フレッシュコンクリート性状」

4.5 呼び強度

呼び強度は、材齢 28 日で $24 \sim 27 \text{N/mm}^2$ を標準とする。

【解説】

呼び強度は、室内試験や実機製造設備を用いた試験の結果から、材齢 28 日で、スランプ配合（スランプ 12cm）の場合は 24N/mm^2 、スランプフロー配合（スランプフロー35～50cm）の場合は 27N/mm^2 を標準とした。

 付録-1:「試験概要」の「2. コンクリート配合」

4.6 単位水量

- (1) 単位水量は、作業ができる範囲内でできるだけ小さくなるように、試験によって定めるものとする。
- (2) コンクリートの単位水量は 165kg/m^3 を目安とする。単位水量がこの値を超える場合には、所要の耐久性を満足していることを確認しなければならない。

【解説】

(1)について

スランブを同一とした場合の単位水量は、高炉スラグ微粉末を用いない一般的なコンクリートよりも小さくなる。また、コンクリートの練上がり温度が上昇あるいは下降すると、同一スランブを得るのに必要な単位水量はそれぞれ増加あるいは減少する。単位水量の値は、フレッシュコンクリートや硬化コンクリートの品質と関係しており、施工性が確保できる範囲内でできるだけ小さくするとよい。

 付録-4：「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの基本特性（参考）」

(2)について

このマニュアル（案）に規定した高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートについて、試験の結果、フレッシュコンクリートの性状や施工性の確保、硬化コンクリートの品質確保の観点から、単位水量は 165kg/m^3 を目安とした。また、この値を超える単位水量を設定する場合には、所要の耐久性を満足していることを確認しなければならないとした。

4.7 水結合材比

- (1) 水結合材比は、フレッシュコンクリートのワーカビリティを確保し、硬化コンクリートが所要の強度、耐久性、ひび割れ抵抗性及び鋼材を保護する性能を有するように、適切に設定するものとする。
- (2) 水結合材比は、原則として 60%以下とし、スランブ配合（スランブ 12cm）では 50%、スランブフロー配合（スランブフロー 35～50cm）では 35%を目安とする。
- (3) 圧縮強度と結合材水比の関係から、目標強度を満足する結合材水比を求め、その逆数である水結合材比を適切に設定してもよい。

【解説】

(1)について

コンクリートの水結合材比は、強度発現や耐久性に影響を及ぼす。特に、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでは、初期材齢の強度発現性や中性化に対する抵抗性を確保するため、一般的なコンクリートと比較して、水結合材比を小さく設定することが多い。ただし、高炉スラグ微粉末の置換率が高く、かつ水結合材比が低い配合では、一般的なコンクリートと比較して、フレッシュコンクリートの粘性が高くなり、ワーカビリティが低下する場合がある。このため、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コ

ンクリートの強度，耐久性，ひび割れ抵抗性，鋼材の保護性能に配慮し，水結合材比を適切に設定しなければならない。

(2)について

水結合材比は，所要の強度，耐久性等を考慮して，原則として，60%以下とした。また，このマニュアル（案）で規定した高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートについては，試験の結果から，スランブ配合（スランブ 12cm）では 50%，スランブフロー配合（スランブフロー 35～50cm）では 35%を目安とした。

(3)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートにおいても，高炉スラグ微粉末の置換率を一定とした場合，コンクリートの圧縮強度は，結合材水比と直線関係にある。このため，コンクリートの圧縮強度と結合材水比の関係から，目標強度を満足する結合材水比を求め，水結合材比を設定してもよい。

 付録－1：「試験概要」の「2. コンクリート配合」

 付録－14：「圧縮強度」の「2. 結合材水比」，「6. 材齢と圧縮強度」

4.8 単位結合材量

- (1) 単位結合材量は，単位水量と水結合材比とから求めるものとする。
- (2) 単位結合材量は，スランブ配合（スランブ 12cm）では 330kg/m^3 ，スランブフロー配合（スランブフロー 35～50cm）では 470kg/m^3 を目安とする。

【解説】

(1)について

単位結合材量は，単位水量と所要の強度，耐久性等を有するコンクリートが得られるように定めた水結合材比からこれを定め，これと高炉スラグ微粉末の置換率とから単位セメント量及び単位高炉スラグ微粉末量を定めるものとする。

(2)について

このマニュアル（案）で規定した高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートについて，その単位結合材量は，試験の結果から，スランブ配合（スランブ 12cm）では 330kg/m^3 ，スランブフロー配合（スランブフロー 35～50cm）では 470kg/m^3 を目安とした。

 付録－14：「圧縮強度」の「3. 単位結合材量」

4.9 細骨材率

- (1) 細骨材率は、所要のワーカビリティが得られる範囲内で、単位水量ができるだけ小さくなるように、試験によってこれを定めなければならない。
- (2) 細骨材率は、スランブ配合（12cm）で45%以上、スランブフロー配合（35～50cm）で50%以上を目安とする。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末の密度は 2.89g/cm^3 程度、セメント（例えば、普通ポルトランドセメント）は 3.16g/cm^3 程度で、高炉スラグ微粉末はセメントよりも密度が小さい。このため、同じ使用量では、高炉スラグ微粉末を用いた方がセメントのみの場合よりもペーストの容積が増える。さらに、比表面積が高炉スラグ微粉末の方がセメントよりも大きいため、細骨材率は、高炉スラグ微粉末を用いない一般的なコンクリートに比べて、小さくできる。細骨材率の値は、コンクリートが所要のワーカビリティを得られる範囲内で単位水量ができるだけ小さくなるように、試験によって定めるものとする。

 付録-1：「試験概要」の「1. 使用材料」

(2)について

細骨材率は、スランブ配合（スランブ 12cm、高炉スラグ微粉末 70%置換）では45%以上、スランブフロー配合（スランブフロー35～50cm、高炉スラグ微粉末 90%置換）では50%以上を標準とした。

4.10 空気量

- (1) コンクリートの空気量は、粗骨材の最大寸法、その他に応じてコンクリート容積の4～7%を標準とする。
- (2) 空気量の目標値は4.5%、寒冷地等で凍結融解作用を受ける場合は5.5～6.0%とする。
- (3) 高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるほどAE剤の添加量を若干多めに添加して調整する。
- (4) 環境温度が高いほど、スラグの反応が活性化して空気連行性が低下するため、特に暑中施工時には注意が必要である。

【解説】

(1)について

コンクリートの空気量は、強度及び耐久性に悪影響を及ぼさない範囲で所要のワーカビリティや耐凍害性が得られるように、練上がり時においてコンクリート容積の4～7%程度を標準とする。

(2)について

空気量の目標値について、JIS A 5308:「レディーミクストコンクリート」では、粗骨材の最大寸法 20, 25,

40mm のいずれの場合も 4.5%である。寒冷地等で長期的に凍結融解作用を受けるような場合には、所要の強度を満足することを確認した上で、5.5～6.0%程度の空気量とするのがよい。ここで示す空気量は、所要のワーカビリティや耐凍害性を得るための目標値であり、ばらつきを含めた値を示すものではない。なお、製造時の空気量は、必要に応じて、製造から打込みに至る経時変化や運搬中の変動を考慮して設定することが重要である。

 付録-22：「凍結融解抵抗性」

(3)について

高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、空気連行性がやや低下することが実験で確認されている。このため、高炉スラグ微粉末を高含有した配合では、AE 剤量を若干多めに添加して調整する。

 付録-9：「化学混和剤（助剤）の使用量」

(4)について

環境温度が高いほど、空気連行性がやや低下することが実験で確認されている。理由として、高炉スラグ微粉末の反応が早期に活性化するためと推定される。このため、暑中施工では空気量の調整に注意する。

 付録-6：「化学混和剤の選定」

4.11 化学混和剤

- (1) 化学混和剤は、所要のワーカビリティが得られるように、適切な種類と使用量を選定する。
- (2) 化学混和剤の種類は、高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）または AE 減水剤（高機能タイプ）を標準とする。
- (3) 化学混和剤の使用量（目安）は、高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）の場合は単位結合材量(B)×1.3%未満（絶対量：6kg/m³ 未満）、AE 減水剤（高機能タイプ）の場合は B×1.5%未満（絶対量：5kg/m³ 未満）とする。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を高含有した配合や水結合材比の小さい配合では、フレッシュコンクリートの粘性が高くなり、安定したワーカビリティを得ることが困難となる。また、フレッシュ性状（スランプ、空気量等）や凝結時間が施工時の気温の影響を受けやすく、特に気温が高い夏期には高炉スラグ微粉末の反応が早期に活性化するため、フレッシュ性状の経時的な低下の程度が大きくなる傾向にある。さらに、化学混和剤の使用量が過大になると凝結の遅延を引き起こす可能性がある。これらの点を十分に踏まえて、フレッシュコンクリートが所要の品質を有するよう、化学混和剤の種類を選定し、その使用量の調整を行う必要がある。

(2)について

化学混和剤の種類は、JIS A 6204:「コンクリート用化学混和剤」に適合した高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）または AE 減水剤（高機能タイプ）を標準とし、混和材（高炉スラグ微粉末）の置換率やフレッシュコンクリートの要求品質、施工条件等に応じて使い分ける。

(3)について

化学混和剤を過剰に使用すると、著しい凝結遅延や硬化不良、材料分離などの不具合を引き起こす原因となる。このため、化学混和剤の使用量は、事前に試験等で適切な量を選定する必要がある。このマニュアル（案）では、高性能 AE 減水剤（高炉スラグ高含有用）の使用量は単位結合材料（B）×1.3%未満（絶対量 6kg/m³ 未満）、AE 減水剤（高機タイプ）の使用量は B×1.5%未満（絶対量 5kg/m³ 未満）を目安とした。

👉 付録－3：「高性能 AE 減水剤（SF500BB）の作用機構について」

👉 付録－5：「フレッシュコンクリート性状」

👉 付録－6：「化学混和剤の選定」

👉 付録－7：「化学混和剤（SF500BB）の上限使用量」

👉 付録－8：「化学混和剤（主剤）の使用量」

👉 付録－10：「ブリーディング」の「3. 化学混和剤の性能による区分」

👉 付録－11：「凝結特性」の「4. 化学混和剤（SF500BB）の使用量」

5 章 設計

5.1 一般

- (1) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの設計値は、試験等に基づき、設定するものとする。
- (2) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの耐久性及び温度ひび割れ抵抗性は、施工時や供用時に構造物が置かれる環境条件等を適切に考慮して、十分な信頼性を有する方法により評価するものとする。
- (3) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの二酸化炭素排出削減効果は、十分な信頼性を有する方法及びデータに基づいて、定量的に評価するものとする。

【解説】

この章では、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートを構造物に使用する場合の設計の標準的な方法について示した。

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートとは異なる品質と性能を有している。このため、構造計算に用いる設計値については、試験等に基づいて設定すること、耐久性及び温度ひび割れ抵抗性については、施工時や供用時の環境条件等を適切に考慮して、十分な信頼性を有する方法により評価することとした。また、二酸化炭素排出削減効果については、十分な信頼性を有する方法及びデータに基づいて、定量的に評価することとした。

5.2 強度

- (1) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの強度は、原則として、材齢 28 日における標準養生を行った供試体の圧縮強度に基づいて設定することとする。ただし、構造物の要求性能に応じて 28 日以外の材齢を設定してもよい。
- (2) 呼び強度は、強度管理材齢 28 日で $24 \sim 27 \text{N/mm}^2$ を標準とする。
- (3) 施工段階の評価に用いる圧縮強度は、材齢及び温度の影響を適切に考慮して設定しなければならない。
- (4) 圧縮強度以外の強度の設計値は、圧縮強度に基づいて設定してよい。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの強度は、原則として、一般的なコンクリートと同様に、標準養生を行った供試体の材齢 28 日における圧縮強度を用いるものとする。なお、初期材齢での強度発現性は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりもやや遅れる傾向にあるが、長期的に継続する傾向にある。構造物に要求される強度特性を適切に踏まえ、早期の強度発現が求められない構造物では、標準養生を行った供試体の材齢 56 日あるいは 91 日における圧縮強度に基づいて強度を表してもよい。

(2)について

呼び強度は、強度管理材齢 28 日で $24 \sim 27 \text{ N/mm}^2$ を標準とした。具体的には、室内試験の結果に基づいて、高炉スラグ微粉末の置換率 70% で水結合材比 50% の時に 24 N/mm^2 、高炉スラグ微粉末の置換率 90% で水結合材比 35% の時に 27 N/mm^2 とした。

(3)について

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度発現は、高炉スラグ微粉末の種類や置換率による影響のほか、一般的なコンクリートと比較して、環境温度（練上がり温度）及び養生温度の影響を大きく受ける。このため、圧縮強度は、材齢及び温度の影響を適切に考慮して設定しなければならない。

コンクリートの強度発現を推定する方法として、有効材齢や積算温度を用いた方法が提案されている。以下に事前試験で確認した結果例を示す。

 付録-14：「圧縮強度」

有効材齢と圧縮強度の関係

一般的に、圧縮強度の発現は有効材齢を用いて下式(5.2.1)のように表すことができる。また、有効材齢は式(5.2.2)より求めることができる。

<圧縮強度発現式>

$$f'_c(t_e) = \frac{(t_e - S_f)}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_n) \quad \dots \dots \text{式(5.2.1)}$$

ここで、 $f'_c(t_e)$ ： 有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (Nmm^2)

$f'_c(t_n)$ ： 管理材齢 t_n (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

t_n ： 設計基準強度の管理材齢 (日)

t_e ： 有効材齢 (日)

S_f ： セメントの種類に応じた硬化原点（凝結始発）に対応する有効材齢 (日)

a, b ： セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す係数

<有効材齢>

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad \dots \dots \text{式(5.2.2)}$$

ここで、 t_e ： 有効材齢 (日)

Δt_i ： ある一定のコンクリート温度が継続する期間 (日)

$T(\Delta t_i)$ ： Δt_i の間継続するコンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 ： $1(^{\circ}\text{C})$

表-5.2.1 に、高炉スラグ微粉末を 90%置換（早強ポルトランドセメント使用）及び 70%置換（普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメント）で用いた配合において、試験結果から同定した圧縮強度発現式の各係数を示す。なお、圧縮強度の管理材齢は 28 日と 91 日の 2 ケースとし、係数 S_f と $f'_c(t_n)$ の値には試験結果の値を用いた。図-5.2.1 に有効材齢と圧縮強度（管理材齢 28 日）の関係を示す。

表-5.2.1 圧縮強度発現式（式(5.2.1)）における各係数

水結合材比 W/B (%)	スラグ 置換率 (%)	セメント 種類	データ 温度範囲	式(5.2.1)中の各係数				
				a	b	S_f	$f'_c(t_n)$	
							$t_n=28$	$t_n=91$
35	90	H (早強)	10~30℃	3.7	0.96	0.44	—	48.7
				3.4	0.82	0.44	41.7	—
50	70	N (普通)	10~30℃	8.3	0.94	0.53	—	43.6
				6.7	0.76	0.53	36.9	—
		H (早強)	10~30℃	8.3	0.94	0.44	—	44.6
				6.7	0.72	0.44	34.9	—

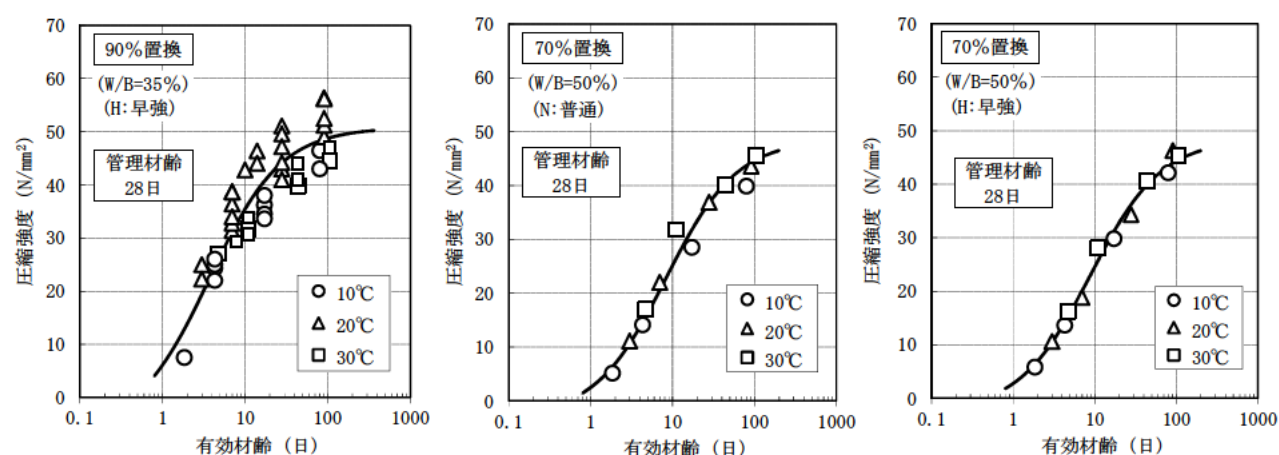


図-5.2.1 有効材齢と圧縮強度（管理材齢 28 日）の関係

付録-14：「圧縮強度」の「8. 有効材齢と圧縮強度の関係」

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2013

積算温度と圧縮強度の関係

一般的に、積算温度と圧縮強度との間には高い相関性があり、温度の違いによらず対数近似式で整理できる。表-5.2.2 に、水結合材比 (W/B) 35%で高炉スラグ微粉末を 90%置換（早強ポルトランドセメント）で用いた配合での積算温度と圧縮強度との関係を示す。また、表-5.2.3 に、W/B=50%，高炉スラグ微粉末 70%置換で、セメントに普通ポルトランドセメントまたは早強ポルトランドセメントを用いた配合における積算温度と圧縮強度との関係を示す。なお、積算温度と圧縮強度との関係式は、20℃ 7 日間に相当する積算温度 210(°D・D)を境界として対数近似式で定めた。図-5.2.2 に積算温度と圧縮強度の関係を示す。

表-5.2.2 積算温度と圧縮強度との関係（90%置換，W/B=35%）

スラグ置換率 (%)	水結合材比 W/B (%)	セメント種類	温度範囲 (°C)	積算温度範囲 (°D・D)	圧縮強度* (N/mm ²)
90	35	H (早強)	10～30	60～210	$\sigma_c = 41.6 \cdot \log_{10}(M) - 62.4$
				210～3010	$\sigma_c = 13.3 \cdot \log_{10}(M) + 3.9$

* 圧縮強度: σ_c (N/mm²), 積算温度: M (°D・D)

表-5.2.3 積算温度と圧縮強度との関係（70%置換，W/B=50%）

スラグ置換率 (%)	水結合材比 W/B (%)	セメント種類	温度範囲 (°C)	積算温度範囲 (°D・D)	圧縮強度* (N/mm ²)
70	50	N (普通)	10～30	60～210	$\sigma_c = 26.2 \cdot \log_{10}(M) - 41.4$
				210～3010	$\sigma_c = 19.3 \cdot \log_{10}(M) - 23.9$
		H (早強)	10～30	60～210	$\sigma_c = 26.5 \cdot \log_{10}(M) - 41.1$
				210～3010	$\sigma_c = 20.8 \cdot \log_{10}(M) - 26.3$

* 圧縮強度: σ_c (N/mm²), 積算温度: M (°D・D)

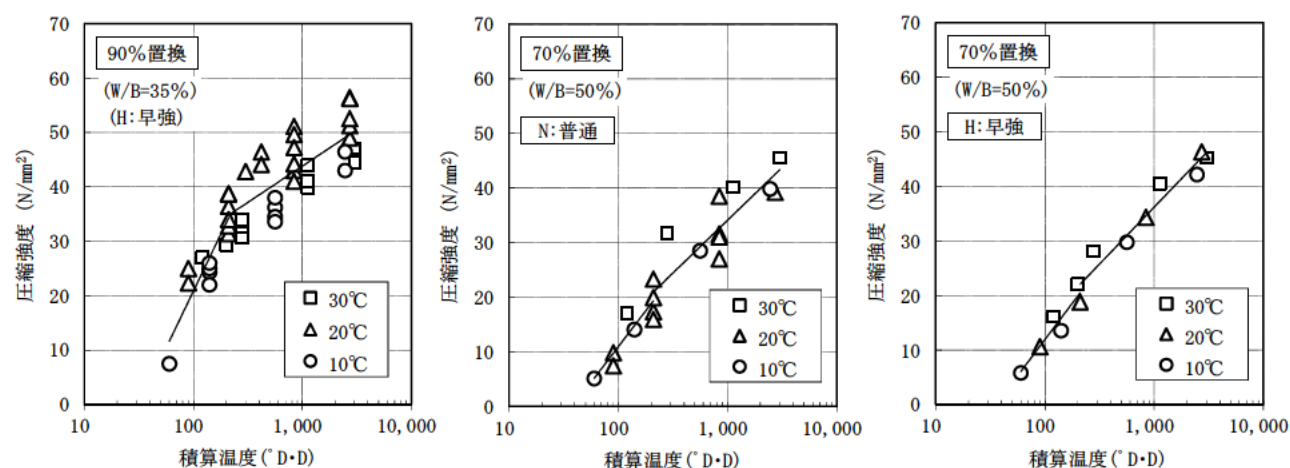


図-5.2.2 積算温度と圧縮強度の関係

付録-14: 「圧縮強度」の「7. 積算温度と圧縮強度の関係」

(4)について

圧縮強度以外の強度の設計値について、例えば、引張強度は、一般的なコンクリートと同様に、圧縮強度に基づいて推定することができる。以下に事前試験で確認した結果例を示す。

引張強度と圧縮強度の関係

一般的に圧縮強度と引張強度の関係は式(5.2.3)のように表すことができる。図-5.2.3 に試験結果から得られた圧縮強度と引張強度の関係を示す。また、土木学会¹⁾²⁾及び日本コンクリート工学協会³⁾（以下、JCI）の引張強度式も併記し、係数を表-5.2.4 に比較して示す。

$$f_t(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2} \quad \dots\dots\dots \text{式(5.2.3)}$$

ここで、 $f_t(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの引張強度 (N/mm²)

$f'_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t_e ：有効材齢 (日)

C_1, C_2 ：係数

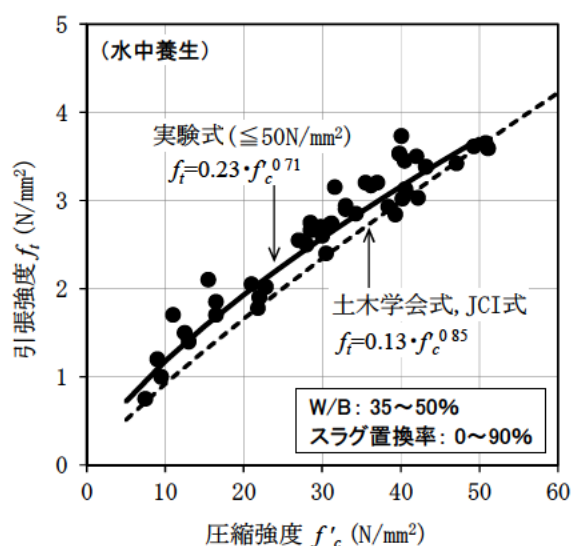


図-5.2.3 圧縮強度と引張強度の関係

表-5.2.4 引張強度式の係数

機関名	制定年	引張強度式の係数	
		C_1	C_2
土木学会	2007	0.44	0.50
	2012	0.13	0.85
JCI	2008	0.13	0.85
高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート		0.23	0.71

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2008
- 2) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008

付録-15：「引張強度」

5.3 ヤング係数

ヤング係数の設計値は，圧縮強度に基づいて設定してよい。

【解説】

ヤング係数は，一般的なコンクリートと同様に，圧縮強度に基づいて設定することができる。以下に事前試験で確認した結果例を示す。

付録-16：「ヤング係数」

圧縮強度とヤング係数の関係

一般的に圧縮強度とヤング係数の関係は式(5.3.1)のように表すことができる。図-5.3.1に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。また，表-5.3.1に土木学会¹⁾²⁾及び日本コンクリート工学協会（以下，JCI）³⁾でのヤング係数式の係数を比較して示す。

$$E_c(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4} \quad \dots \dots \text{式(5.3.1)}$$

ここで， $E_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートのヤング係数 (Nmm²)

$f'_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t_e ：有効材齢 (日)

C_3, C_4 ：係数

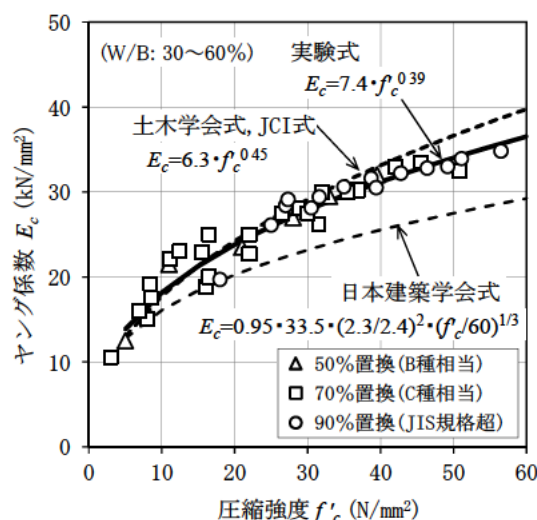


図-5.3.1 圧縮強度とヤング係数の関係

表ー5.3.1 ヤング係数式の係数

機関名	制定年	ヤング係数式の係数	
		C ₃	C ₄
土木学会	2007	4.7×10^3	0.50
	2012	6.3×10^3	0.45
JCI	2008	6.3×10^3	0.45
高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート		7.4×10^3	0.39

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2008
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008

5.4 熱物性値

- (1) 断熱温度上昇特性は，原則として，試験により定めなければならない。
- (2) コンクリートの温度解析に用いる熱物性値は，使用する材料，配合及び打込み時の温度等に基づいて適切に定めなければならない。

【解説】

(1)について

一般的に，高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは，高炉スラグ微粉末の粉末度，活性度指数，置換率，セメント種類，単位結合材料のほか，打込み時のコンクリート温度，養生温度等により，その発熱性状に相違がみられる。高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートについては，発熱性状について十分なデータがないため，あらかじめ試験によって発熱性状を定めることを原則とした。

断熱温度上昇特性

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの断熱温度上昇式は，セメントの使用量が極めて少なく，初期材齢時の温度上昇が小さいため，式(5.4.1)を採用した。

$$Q(t) = Q_{\infty} \left(1 - e^{-\gamma t^s} \right) \quad \dots \dots \text{式(5.4.1)}$$

ここで， $Q(t)$ ：材齢 t (日)における断熱温度上昇量(°C)

Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量(°C)

γ, s ：温度上昇速度に関する定数

t ：材齢(日)

高炉スラグ微粉末 70%置換の配合について、20℃環境での断熱温度上昇試験の結果から断熱温度上昇式における定数 (Q_{∞} , γ , s) を同定した。表-5.4.1 及び図-5.4.1 に同定した定数と同定結果を示す。

表-5.4.1 断熱温度上昇式における定数 (高炉スラグ微粉末 70%置換)

環境 温度 (℃)	粉体(mass%)		水結合材比 W/B (%)	単位水量 W (kg/m ³)	断熱温度上昇式における定数		
	普通 N	スラグ BFS			Q_{∞} (℃)	γ	s
20	30	70	50	163	31.0	0.812	1.805

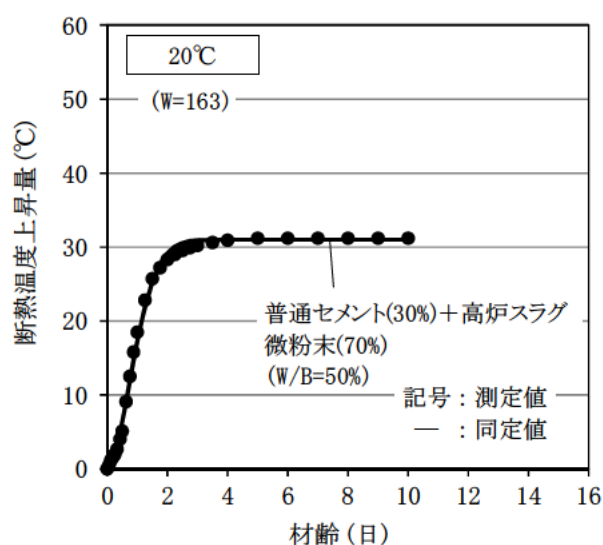


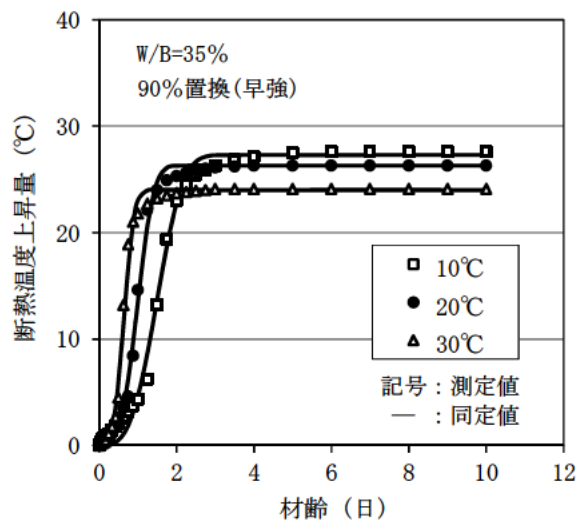
図-5.4.1 断熱温度上昇量の同定結果 (20℃)

付録-12: 「断熱温度上昇特性」の「1. セメント種類」

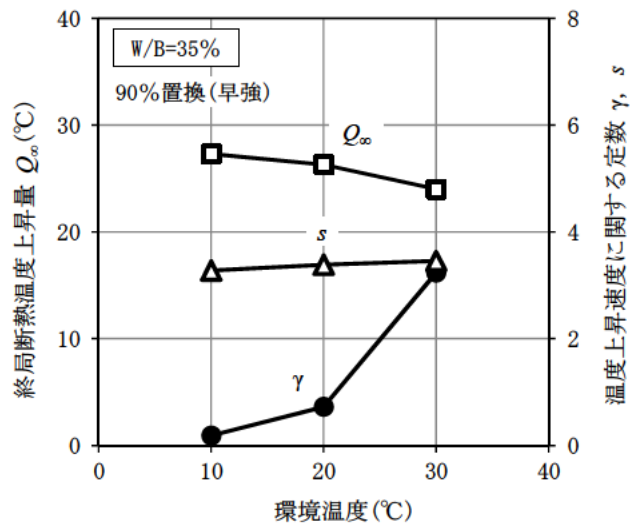
高炉スラグ微粉末 90%置換の配合について、10, 20, 30℃での断熱温度上昇試験の結果からそれぞれの温度での断熱温度上昇式における定数 (Q_{∞} , γ , s) を同定した。表-5.4.2, 図-5.4.2 及び図-5.4.3 に同定した定数と同定結果を示す。同図表より、温度が高いほど終局断熱温度上昇量 (Q_{∞}) は小さくなる一方で、温度上昇速度定数 (γ) は大きくなった。また温度上昇速度定数 (s) は温度の違いによらず概ね等しい値であった。

表-5.4.2 断熱温度上昇式における定数 (高炉スラグ微粉末 90%置換)

環境 温度 (℃)	粉体(mass%)		水結合材比 W/B (%)	単位水量 W (kg/m ³)	断熱温度上昇式における定数		
	早強 H	スラグ BFS			Q_{∞} (℃)	γ	s
10	10	90	35	165	27.3	0.186	3.277
20					26.3	0.725	3.385
30					24.0	3.235	3.455



図一5.4.2 断熱温度上昇量の同定結果（高炉スラグ微粉末90%置換，10～30℃）



図一5.4.3 環境温度と断熱温度上昇特性値との関係
（高炉スラグ微粉末90%置換，10～30℃）

付録-12：「断熱温度上昇特性」の「3. 断熱温度上昇式における係数」

(2)について

コンクリートの温度解析に用いる熱物性値（熱伝導率，比熱，熱伝達率等）は，使用する材料，配合及び打込み時の温度等に基づいて適切に定める必要がある。熱膨張係数については，室内試験の結果，高炉スラグ微粉末90%置換の場合， $12.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ であった。

付録-13：「熱膨張係数」

5.5 収縮

- (1) 収縮の影響を無視できない構造物の設計においては、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの収縮特性を適切に考慮するものとする。
- (2) 自己収縮特性は、使用する材料や配合等によって異なる傾向を示し、条件によっては極めて大きな値となる場合がある。特に、高炉スラグ微粉末の置換率が高く、水結合材比が小さいコンクリートではやや大きくなるといわれている。このため、事前に試験で自己収縮特性を確認することが望ましい。
- (3) 乾燥収縮特性は、高炉スラグ微粉末の置換率や粉末度、単位結合材量、養生条件等によって影響される。過去の実績等から、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、圧縮強度が同等の場合、十分な養生を行うことにより、同程度か小さくなることが確認されている。このため、乾燥収縮特性については、必要に応じて、確認することが望ましい。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの収縮特性は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと異なる傾向を示す。このため、収縮の影響を無視できない構造物の設計においては、事前の試験や過去の実績等に基づいて、収縮特性を適切に考慮する必要がある。土木学会コンクリート標準示方書では、コンクリートの収縮は、自己収縮、乾燥収縮、炭酸化収縮を含み、構造物の周辺の温度・湿度、部材断面の形状・寸法、コンクリートの配合のほか、骨材の性質、セメントの種類、コンクリートの締固め、養生条件等の種々の要因によって影響を受けるとしている。このマニュアル（案）では、コンクリートの収縮対象を「自己収縮」と「乾燥収縮」とした。一般的にコンクリートの収縮ひずみの経時変化は、図-5.5.1のように表すことができる。

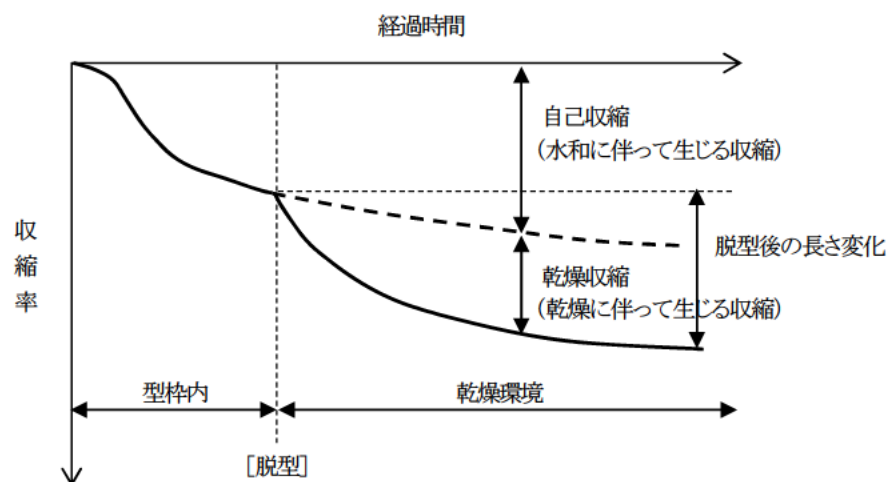


図-5.5.1 コンクリートの収縮ひずみの経時変化を表した模式図

（日本コンクリート工学協会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書，2010.3 を参考）

(2)について

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、特に、コンクリート打込み直後の若材齢時において自己収縮に起因した体積変化が大きくなる場合がある。特に、水結合材比が小さく、高炉スラグ微粉末の粉末度が大きいほど、コンクリートの組織は緻密化し、間隙水に生じるメニスカスの曲率半径が小さくなるため、自己収縮ひずみが大きくなると考えられている。この傾向は、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど顕著であるとの報告がある。このため、事前に試験で自己収縮特性を適切な方法で確認することが望ましい。

試験結果の例として、このマニュアル（案）で規定した配合（水結合材比 35%及び 50%）を対象に、高炉スラグ微粉末の置換率を 50%、70%、90%とした時のコンクリートの自己収縮ひずみ結果を図-5.5.2 に示す。同図より、高炉スラグ微粉末の置換率が JIS R 5211:「高炉セメント」の高炉セメント B 種相当である 50%と C 種相当の 70%は概ね等しい結果であった。しかし、JIS R 5211 の高炉セメント C 種を超える 90%では自己収縮ひずみが小さくなり、特に、水結合材比 35%の時に顕著であった。これは、高炉スラグ微粉末に内添した無水せっこう成分の反応によって生成されたエトリンガイトの働きにより、材齢初期（凝結始発後）に適度な膨張作用が加わることで、自己収縮ひずみの発生が緩和されて小さくなったものと考えられる。なお、水結合材比 50%では自己収縮は無視できる程度に小さい結果であった。

このように、高炉スラグ微粉末に無水せっこうを内添した場合、その働きによって自己収縮ひずみがそれほど大きな値とならない場合もあるが、現時点ではその傾向を断定することはできない。このため、特に、高炉スラグ微粉末の置換率が高く、水結合材比が小さいコンクリートでは、事前に試験で自己収縮特性を確認することが望ましい。

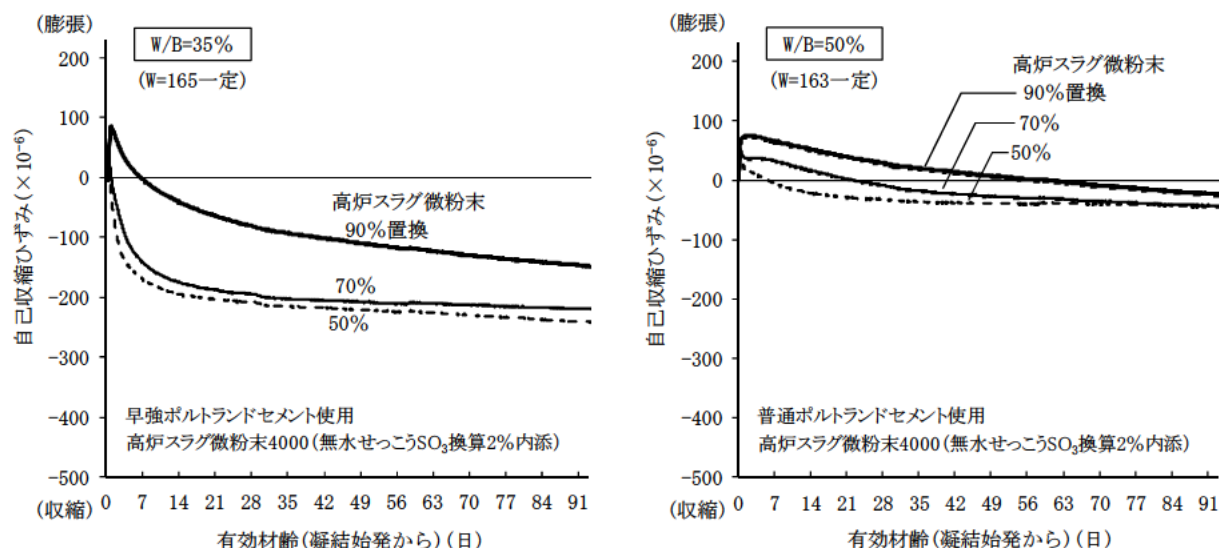


図-5.5.2 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの自己収縮試験結果

付録-20:「自己収縮特性」の「1. 高炉スラグ微粉末の置換率」,「2. 水結合材比」

一般的に、コンクリートの自己収縮ひずみは、使用するセメントの種類や水結合材比、温度依存性等を考慮して、式(5.5.1)から求めることができる。また膨張コンクリートの膨張ひずみは、式(5.5.2)より予測されている。

<自己収縮ひずみ式>

$$\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \times \varepsilon_{sh-\infty} \times \left(1 - e^{-a_{sh}(t_e - t_{e,set})^{b_{sh}}}\right) \quad \dots \dots \text{式(5.5.1)}$$

ここで、 $\varepsilon_{sh}(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t_e : 有効材齢 (日)

η_c : セメントの種類が自己収縮ひずみの終局値に及ぼす影響を表す係数

$\varepsilon_{sh-\infty}$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

a_{sh}, b_{sh} : 自己収縮ひずみの進行特性を表す係数

$t_{e,set}$: 凝結の始発 (有効材齢) (日)

<膨張ひずみ式>

$$\varepsilon_{ex}(t_e) = \varepsilon_{ex-\infty} \times \left(1 - e^{-a_{ex}(t_e - t_{ex,0})^{b_{ex}}}\right) \quad \dots \dots \text{式(5.5.2)}$$

ここで、 $\varepsilon_{ex}(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)における膨張コンクリートの膨張ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t_e : 有効材齢 (日)

$\varepsilon_{ex-\infty}$: 膨張ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

a_{ex}, b_{ex} : セメントの種類が膨張ひずみの進行特性に及ぼす影響を表す係数

$t_{ex,0}$: 膨張開始時点の有効材齢 (日) ($= t_{e,set}$)

先の図-5.5.2に示した高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの自己収縮試験の結果では、初期材齢時に、高炉スラグ微粉末に内添した無水せっこう成分の反応によって生成されたエトリンガイトの作用により、適度な膨張ひずみが付与される傾向がみられた。このため、初期材齢時に発生する膨張ひずみを再現するため、上記の自己収縮ひずみ式 (式(5.5.1)) と膨張ひずみ式 (式(5.5.2)) の組み合わせ式により自己収縮ひずみ挙動を再現するとよい。

図-5.5.3に、水結合材比 (W/B) 35%、高炉スラグ微粉末 90%置換での有効材齢と自己収縮ひずみの関係を示し、表-5.5.1に、同定した自己収縮ひずみ式及び膨張ひずみ式の係数を示す。ここでの結果は、試験結果の一例であるが、無水せっこうを三酸化硫黄 (SO₃) 換算で 2.0%内添した高炉スラグ微粉末を、ポルトランドセメントに対して高含有したコンクリートの自己収縮ひずみを推定する考え方として参考にとよい。

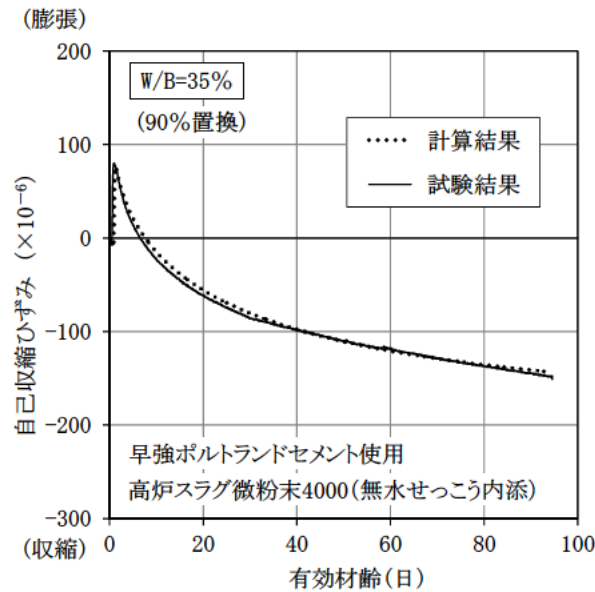


図-5.5.3 有効材齢と自己収縮ひずみの関係

表-5.5.1 有効材齢と自己収縮ひずみの関係

自己収縮ひずみ式の係数 (式(5.5.1)より)					膨張ひずみ式の係数 (式(5.5.2)より)			
η_c	$\varepsilon_{sh,\infty}$ ($\times 10^{-6}$)	a_{sh}	b_{sh}	$t_{e,set}$ (日)	$\varepsilon_{ex,\infty}$ ($\times 10^{-6}$)	a_{ex}	b_{ex}	$t_{ex,0}$ (日)
1.0	300	0.17	0.54	0.70	115	14	2.5	0.70

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013

付録-20：「自己収縮特性」の「3. 自己収縮ひずみの推定式」

(3)について

一般的に、コンクリートの乾燥収縮特性は、セメントや粗骨材の種類、単位水量、単位結合材量等の因子が大きく影響するといわれているが、混和材の使用は乾燥収縮低減に有効な対策とされる。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの乾燥収縮については、高炉スラグ微粉末の置換率や粉末度、養生条件等によって影響を受けるが、十分な養生を実施することで、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートに比較して、圧縮強度が同等の場合、同程度か小さくなることが確認されている。これは、高炉スラグ微粉末の働きによってコンクリート中の組織が緻密となり、強度も増加するため変形が生じにくくなること等が関係している。

図-5.5.4 に高炉スラグ微粉末の置換率の違いがコンクリートの長さ変化率（乾燥収縮特性）に与える影響を確認した試験結果を示す。同図より、水結合材比が35%では、高炉スラグ微粉末の置換率の違いによらず、長さ変化率は同程度である。一方、水結合材比が50%の場合は、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど、長さ変化率の値が小さくなり、JISの高炉セメントB種相当（50%）とC種相当（70%）は概ね等しいが、JISの高炉セメントC種を超える90%置換ではさらに小さな値となっている。

このように、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも乾燥収縮抵抗性が高いといえる。このため、乾燥収縮特性については、必要に応じて、確認することが望ましい。

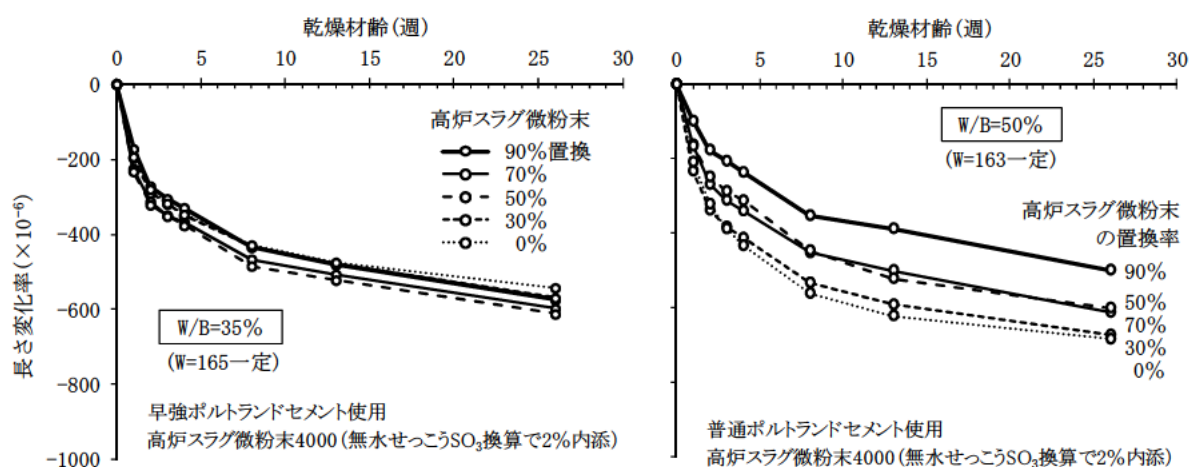


図-5.5.4 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの長さ変化試験結果

付録-21:「乾燥収縮特性」

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013

5.6 中性化に対する抵抗性

- (1) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化進行は、一般的なコンクリートと比較して、大きい傾向にある。このため、中性化に対する抵抗性は、供用時に構造物が置かれる環境条件等を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法により評価するものとする。
- (2) 中性化の進行は、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートにおいても、一般的なコンクリートと同様に、時間の平方根に比例する、すなわち $\sqrt{t}$ 則に従うものとする。
- (3) 中性化速度係数は、暴露試験あるいは促進中性化試験の結果に基づいて設定する。なお、暴露試験の期間は少なくとも1年間以上とする。
- (4) 中性化残りは、土木学会のコンクリート標準示方書に準拠して、屋外の通常環境下で10mm、塩害環境下で25mmとする。
- (5) 中性化進行抑制効果が確かめられた表面塗布剤の利用は、抑制対策として必要に応じて用いるとよい。

【解説】

(1)について

単位結合材量が同じで高炉スラグ微粉末の置換率のみが異なる場合、置換率が高いほど中性化に対する抵抗性が低下する。特に、高炉スラグ微粉末の置換率が70%程度になると、中性化深さが一般的なコンクリートの2倍程度になるとの報告もある。このため、中性化に対する抵抗性を評価する上で、供用時に構造物が置かれる環境条件等を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法により評価するものとする。

中性化に対する抵抗性の評価には、構造物の供用期間中に中性化深さが鋼材腐食発生限界深さに達しないことを照査する方法を用いてよい。また、事前の試験等に基づき、構造物の供用期間中に中性化深さが鋼材腐食発生限界深さに達しないことを確認し、これを担保するかぶりの最小値を確保する場合には、中性化に対する抵抗性の評価を省略してよい。

(2)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの中性化進行は、一般的なコンクリートと同様に、時間の平方根に比例する、つまり $\sqrt{t}$ 則に従うと仮定してよい。このため、中性化深さと中性化速度係数の関係は、式(5.6.1)のように定式化される。なお、中性化速度係数の値は、暴露試験あるいは促進中性化試験の結果等に基づいて設定する必要がある。

$$y = a \cdot \sqrt{t} \quad \cdots \text{式(5.6.1)}$$

ここで、 y : 中性化深さ(mm)

a : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$)

t : 暴露期間(year)

👉 付録-18 : 「中性化抵抗性」

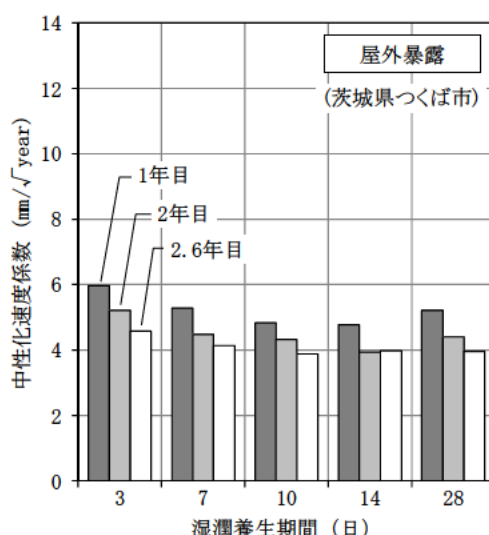
(3)について

中性化速度係数の値は、暴露試験あるいは促進中性化試験の結果に基づいて設定する必要がある。そこで、暴露試験及び促進中性化試験の結果から中性化速度係数を設定する場合の留意点について以下に示す。

暴露試験の結果に基づく中性化速度係数の設定

構造物が供用される環境と同様の環境条件で行った暴露試験の結果を入手できる場合には、この結果を用いて中性化速度係数を設定してよい。

暴露試験については、できるだけ長期間にわたって実施することが望ましく、このマニュアル（案）では少なくとも1年間以上とした。この理由は、暴露試験を実施した結果（水結合材比35%、高炉スラグ微粉末90%置換）から、暴露期間が長くなると中性化速度係数が小さくなる傾向を確認できたためである（図－5.6.1、表－5.6.1）。雨水等がコンクリート中に浸透したことで、表層部で結合材の反応が暴露後も継続したため、中性化抵抗性が材齢の経過とともに向上したためと考えられる。さらに、表層コンクリート中の含水率が高いため、二酸化炭素の侵入が抑制されたこと等が理由として考えられる。



図－5.6.1 屋外暴露期間と湿潤養生期間の異なる場合の中性化速度係数

表－5.6.1 屋外暴露期間と湿潤養生期間の異なる場合の中性化速度係数

暴露期間	中性化速度係数(mm/√ year)					備 考
	湿潤養生期間					
	3 日	7 日	10 日	14 日	28 日	
1 年	5.96	5.28	4.83	4.77	5.21	平均 5.02 (7～28 日)
2 年	5.21	4.48	4.32	3.94	4.40	平均 4.29 (7～28 日)
2.6 年	4.58	4.13	3.88	3.98	3.96	平均 3.99 (7～28 日)

付録－18：「中性化抵抗性」の「2. 環境条件」

促進中性化試験の結果に基づく中性化速度係数の設定

暴露試験の結果を入手できない場合、JIS A 1153 に準拠した促進中性化試験を行い、この結果を用いて中性化速度係数を設定してよい。ただし、促進中性化試験は屋外の環境条件と比較して過酷な試験条件（温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、二酸化炭素濃度 $5.0 \pm 0.2\%$ ）を採用している。例えば、二酸化炭素濃度 $5.0 \pm 0.2\%$ は、通常の大気中の二酸化炭素濃度（約 $0.04\%^{1)}$ よりも大幅に高い。このため、促進試験の結果から求めた中性化速度係数の値は、そのままでは実際の中性化進行の予測に用いることはできない。

そこで、コンクリートの中性化の進行が二酸化炭素濃度の平方根及び材齢の平方根に比例するとした式(5.6.2)を用いて、促進中性化試験から得られた中性化速度係数について、二酸化炭素濃度の差を補正する。

$$C = A \cdot \sqrt{CO_2 / CO_{2TEST}} \times \sqrt{t} \quad \dots \dots \text{式(5.6.2)}$$

ここで、 C : 中性化深さの推定値(mm)

A : 促進中性化試験から得られる中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{week}}$)

CO_2 : 実環境の二酸化炭素濃度(%) (屋外 $\approx 0.04\%$, 屋内 $\approx 0.2\%$)

CO_{2TEST} : 促進中性化試験の二酸化炭素濃度(%) (=5.0%)

t : 材齢(week)

図-5.6.2 に促進試験による中性化深さ推定値と暴露試験（屋外，屋内）による中性化深さ実測値を比較した例を示す。試験データ数は少ないが、屋外暴露及び屋内暴露ともに、二酸化炭素濃度の差の補正により、促進中性化試験の結果からも実際の暴露中性化進行をある程度の予測精度で推定できる可能性がある。

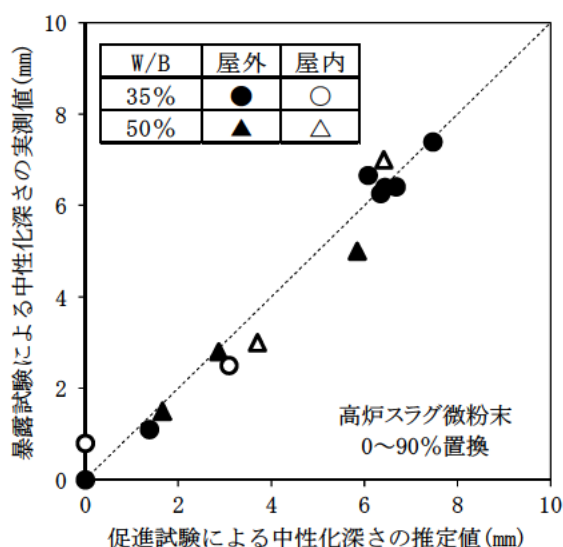


図-5.6.2 促進試験による中性化深さ推定値と暴露試験による中性化深さ実測値の比較

参考文献

- 1) 気象庁ホームページ：二酸化炭素濃度の経年変化, http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html

付録-18：「中性化抵抗性」の「5. 促進試験」

屋外と屋内での中性化速度係数

中性化に影響を及ぼす環境因子には、炭酸ガス濃度や温度、湿度などが挙げられ、実際の構造物ではこれらの環境因子が複合的に作用した条件に曝されている。例えば、屋内と屋外で比較すると、屋内の場合は炭酸ガス濃度が高く、湿度も比較的低いため、屋外に比べて中性化の進行が速いといわれている。

暴露試験により、屋外と屋内での中性化速度係数を比較した結果、屋内の中性化速度は屋外の約 1.9 倍であった。

付録-18：「中性化抵抗性」の「2. 環境条件」

中性化速度係数の予測式の適用性について

2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では、中性化速度係数の予測式として、有効水結合材比と結合材の種類から求まる式(5.6.3)が示されている。

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \frac{W}{B} \quad \dots \dots \text{式(5.6.3)}$$

ここで、 α_k : コンクリートの中性化速度係数の特性値(mm/√year)

W/B : 有効水結合材比

$$\frac{W}{B} = \frac{W}{C_p + k \cdot A_d} \quad \dots \dots \text{式(5.6.4)}$$

W : 単位体積あたりの水の質量(kg/m³)

B : 単位体積あたりの有効結合材の質量(kg/m³)

C_p : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量(kg/m³)

A_d : 単位体積あたりの混和材の質量(kg/m³)

k : 混和材の種類により定まる定数（高炉スラグ微粉末の場合、 $k = 0.7$ ）

上記の式(5.6.3)から得られた中性化速度係数の予測値と、暴露試験から得られた中性化速度係数の測定値を比較した結果、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートにおいて、予測値が測定値よりも小さくなることが確認された。このため、中性化速度係数の値は、暴露試験あるいは促進中性化試験の結果に基づいて設定する必要がある。

付録-18：「中性化抵抗性」の「3. 中性化速度係数と有効水結合材比の関係（土木学会式との比較）」

(4)について

鋼材腐食発生限界深さは、かぶりの設計値から中性化残りを差し引いて得られる。中性化残りについては、構造物が供用される環境条件を適切に考慮して設定する必要がある。塩化物イオンの供給がある環境では、かぶりコンクリートの中性化により水和生成物に固定化されていた塩化物イオンがコンクリート内部に移動・濃縮することが確認されている。現時点では、このような複合劣化を簡易にモデル化する方法が存在し

ないため、中性化と塩化物イオン浸透が同時に進行する環境では、塩化物イオンの供給がない環境よりも中性化残りを大きく設定して、中性化により移動・濃縮した塩化物イオンに起因する鋼材腐食の発生を防止する必要がある。例えば、土木学会の2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では、中性化残りを通常環境下で10mm、塩害環境下で10～25mmとしており、このマニュアル(案)ではこれらの値を参考にした。

図-5.6.3は、屋外及び屋内での暴露試験及び促進中性化試験の結果から求めた中性化速度係数の値を用いて、設計耐用年数と必要な最小かぶり(安全率は考慮していない)の関係を示したものである。コンクリート配合は、水結合材比(W/B)35%及び50%で、それぞれ高炉スラグ微粉末の置換率が90%及び70%である。なお、中性化残りは、通常環境下で10mm、塩分環境下で25mmとした。同図より、例えば、W/B=35%(高炉スラグ微粉末90%置換)の場合、設計耐用年数を100年と設定した時、通常環境下での必要な最小かぶりは、屋外構造物で50mm以上、屋内では100mm以上となる。

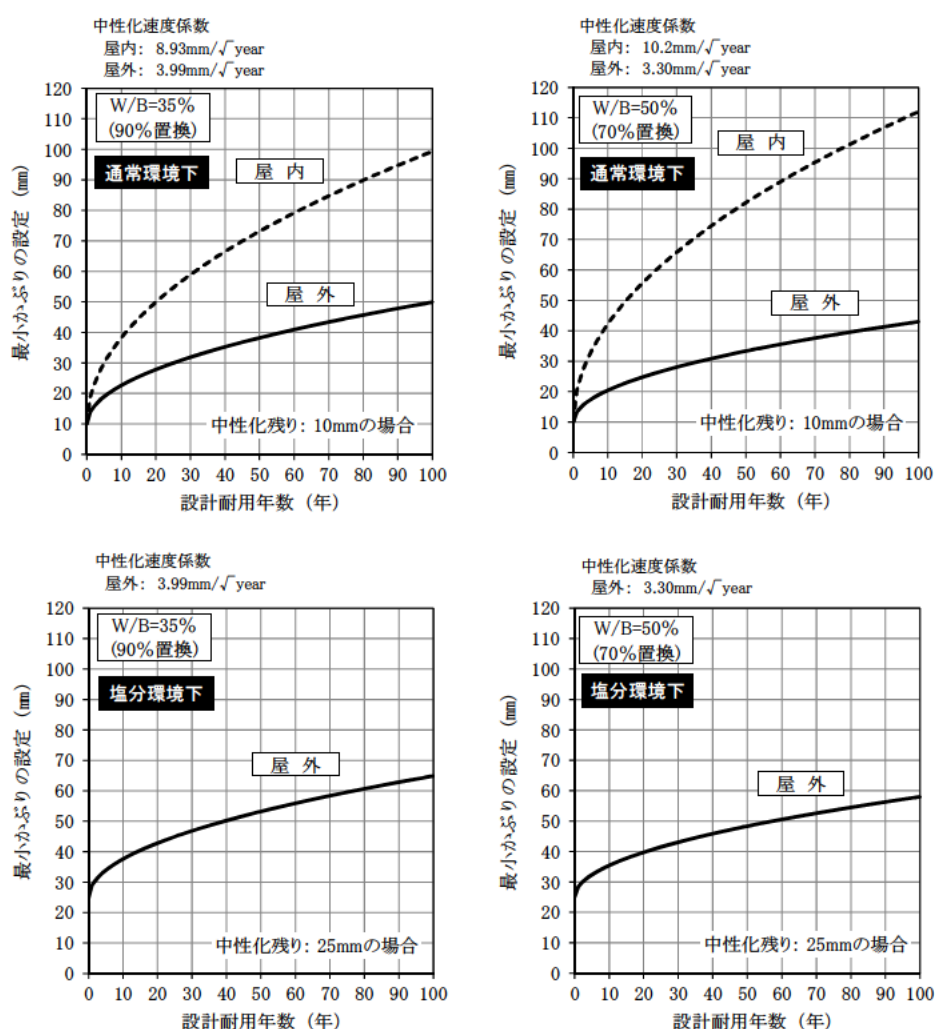


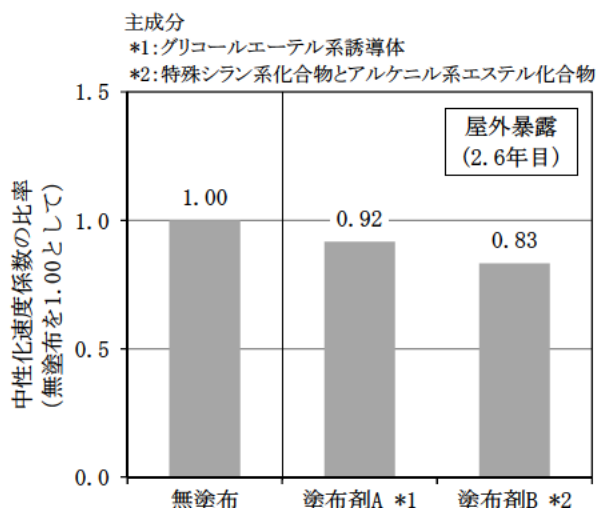
図-5.6.3 促進試験による中性化深さ推定値と暴露試験による中性化深さ実測値の比較

付録-18:「中性化抵抗性」の「6. 必要な最小かぶりの設定」

(5)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの中性化進行を抑制する対策として、事前の試験等で効果の確認された表面塗布剤を利用することは、簡易な中性化抑制対策として有効であり、必要に応じて用いるとよい。

例えば、グリコールエーテル系誘導体を主成分とした塗布型収縮低減剤や、特殊シラン系化合物とアルケニル系エステル化合物を主成分とした養生剤は、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートに対して、中性化の進行を10～20%抑制することを暴露試験で確認した（図－5.6.4）。



図－5.6.4 表面塗布剤による中性化抑制効果

付録－18：「中性化抵抗性」の「4. 表面塗布剤の効果」

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013

5.7 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

- (1) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、供用時に構造物が置かれる環境条件等を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法により評価するものとする。
- (2) コンクリート内部での塩化物イオンの浸透は、一般的なコンクリートと同様に、Fick の拡散方程式の解に従うと仮定してよい。
- (3) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、構造物が供用される環境と同様の環境条件で行った暴露試験または浸せき試験の結果から求めてよい。
- (4) 鋼材腐食発生限界濃度は、事前の試験や過去の実績等に基づき、適切に設定する必要がある。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートへの塩化物イオンの浸透は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して少ない。その理由は、高炉スラグ微粉末の効果により、細孔構造が緻密になることや、水和生成物の塩化物イオンの固定化能力が高まること等が関係している。しかし、塩化物イオンに起因する鋼材の腐食速度は、中性化に起因するものと比較して速く、腐食の程度によっては構造物の耐荷性能にも甚大な影響を及ぼす場合がある。このため、塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、供用時に構造物が置かれる環境条件等を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法を用いて評価することとした。

(2)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート内部での塩化物イオンの浸透は、式(5.7.1)の Fick の拡散方程式の解に従うと仮定してよい。ただし、かぶりコンクリートの中性化深さが大きくなる場合には、塩化物イオンの浸透を式(5.7.1)で推定することは困難となる。このような場合には、中性化に対する抵抗性の評価において、中性化深さを大きく設定することにより、かぶりコンクリートの中性化によって内部に移動・濃縮する塩化物イオンに起因した鋼材腐食の発生を防止する必要がある。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad \dots \dots \text{式(5.7.1)}$$

ここで、 x : コンクリート暴露面からの距離(mm)

t : 浸せき期間(year)

$C(x,t)$: 距離 x (mm), 浸せき期間 t (year)において測定された塩化物イオン濃度(kg/m³)

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度(kg/m³)

C_i : 初期含有塩化物イオン濃度(kg/m³)

D_d : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm²/year)

erf : 誤差関数

(3)について

構造物が供用される環境と同様の環境条件で行った暴露試験の結果を入手できる場合には、この結果を用いて塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めてよい。また、暴露試験の結果を入手できない場合には、浸せき試験の結果を用いて塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めてもよい。

ここで、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートにおける塩化物イオンの見掛けの拡散係数の例として、浸せき試験から求めた結果を示す。高炉スラグ微粉末の置換率が90%で水結合材比35%の場合、見掛けの拡散係数は $0.17\text{cm}^2/\text{year}$ （浸せき期間12ヶ月）で極めて小さい結果であった（図-5.7.1）。このように、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が高い。なお、事前の試験等に基づき、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が、対象とする構造物で一般に用いられているセメントを結合材としたコンクリートよりも小さくなることを確認し、既存の基準類におけるかぶりの最小値の規定を遵守する場合には、塩化物イオン浸透に対して十分な抵抗性を有すると判断してよい。

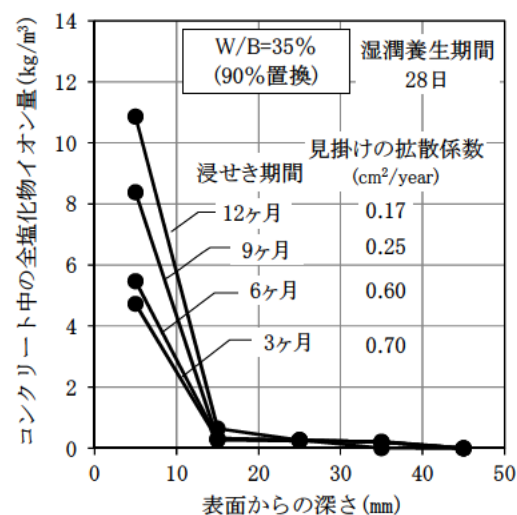


図-5.7.1 浸せき試験によるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布と見掛けの拡散係数

(4)について

事前の試験等により、十分な信頼性を有するデータを入手できる場合には、構造物の供用期間中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達しないことを照査する方法と用いてもよい。ただし、2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では、複数のセメントの種類ごとに鋼材腐食発生限界濃度が示されているものの、高炉スラグ微粉末の置換率がJIS R 5211:「高炉セメント」の高炉セメントC種上限以上となるコンクリートについては、鋼材腐食発生限界濃度が示されていない。このため、供用期間中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達しないことを照査するため、事前の試験や過去の実績等に基づき、

鋼材腐食発生限界濃度を適切に設定する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013

5.8 凍結融解に対する抵抗性

- (1) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、供用時に構造物が置かれる環境条件等を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法により評価するものとする。
- (2) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの凍結融解抵抗性は、初期養生の影響を大きく受けるため、十分な湿潤養生を行うことが望ましい。
- (3) 空気量は、通常よりも高い5.5%を目標にすることが望ましい。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、化学混和剤を用いて AE コンクリートとすることにより、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同等以上の凍結融解に対する抵抗性を確保できることが多い。しかし、高炉スラグ微粉末の置換率を JIS R 5211:「高炉セメント」の高炉セメント C 種上限以上としたコンクリートでは、化学混和剤を用いて AE コンクリートとしても凍結融解に対して十分な抵抗性を得られない場合がある。このため、凍結融解に対する抵抗性は、供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、暴露試験や促進試験の結果等に基づき、十分な信頼性を有する方法により評価する必要がある。

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの凍結融解に対する抵抗性の評価は、JIS A 1148:「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠した凍結融解試験（A 法）による相対動弾性係数の測定値に基づいて行つてよい。また、2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では、構造物の置かれる気象条件ごとに相対動弾性係数の最小限界値が示されており、供用時に構造物が置かれる環境条件を適切に考慮して、これを参考として凍結融解に対する抵抗性を評価してよい。

このほか、事前に試験を行い、凍結融解に対して十分な抵抗性が得られることを確認している場合には、施工時の空気量の管理を適切に行うことにより、凍結融解に対する抵抗性の評価を省略してよい。

(2)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、一般的なコンクリートと比べて、コンクリートの初期養生の影響が大きい。すなわち、十分に養生した場合、一般的なコンクリートと同等以上の凍結融解抵抗性を得られるが、養生が不十分の場合には劣ったものとなる。特に、高炉スラグ微粉末の置換率が高く、水結合材比の小さいコンクリートの場合、その影響は顕著である。

図-5.8.1 に高炉スラグ微粉末の置換率 90%（水結合材比 35%）のコンクリートで湿潤養生期間を 3 日，7 日，10 日，14 日，28 日とした場合の凍結融解試験結果を示す。この図から，湿潤養生期間が長いほど，凍結融解抵抗性が向上していることがわかる。このように，高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの凍結融解抵抗性は，初期養生の影響を大きく受けるため，十分な湿潤養生を行うことが望ましいとした。

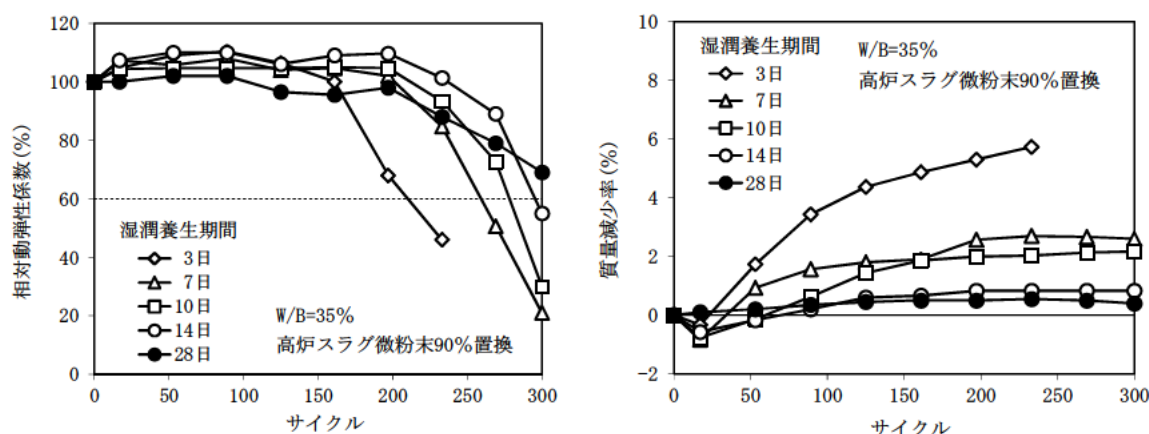


図-5.8.1 湿潤養生期間の違いが凍結融解抵抗性に与える影響

付録-22：「凍結融解抵抗性」の「1. 湿潤養生期間」

(3)について

図-5.8.2 に，フレッシュコンクリート中の目標空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ とした時，高炉スラグ微粉末の置換率と気泡間隔係数 (ASTM C 457: リニアトラバース法) の関係を示す。なお，コンクリートの水結合材比 (W/B) は 35% と 50% である。この図より，水結合材比 (W/B) が 50% の場合，高炉スラグ微粉末の置換率の違いによらず，気泡間隔係数の値は同程度で 250μ 以下となり，凍結融解抵抗性を確保する上で問題のない範囲であった。一方，水結合材比 (W/B) が 35% の場合，高炉スラグ微粉末の置換率が多いほど気泡間隔係数の値は緩やかに増加し，特に 90% 置換では急激に大きくなった。このように，水結合材比 (W/B) が小さく，高炉スラグ微粉末の置換率が高い場合，一般的な目標空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を導入しても，気泡間隔係数の値は大きく，耐凍害性を確保することは難しいと推定される。そこで，水結合材比 (W/B) が 35% で高炉スラグ微粉末の置換率が 90% のコンクリートにおいて，空気量を 5.5% に増やして再検証した結果，凍結融解抵抗性を確保することができた (図-5.8.3)。つまり，水結合材比が小さく，高炉スラグ微粉末の置換率が高炉セメント C 種以上の分量の場合，空気量を通常の 4.5% から 5.5% に増加させることで凍結融解抵抗性を確保できる可能性がある。このように，凍結融解抵抗性が求められる構造物を施工する場合には，空気量の調整が重要であり，適切な対応を講じて評価する必要がある。

付録-21：「凍結融解抵抗性」の「2. 高炉スラグ微粉末の置換率と気泡間隔係数の関係」

付録-21：「凍結融解抵抗性」の「3. 目標空気量の増量」

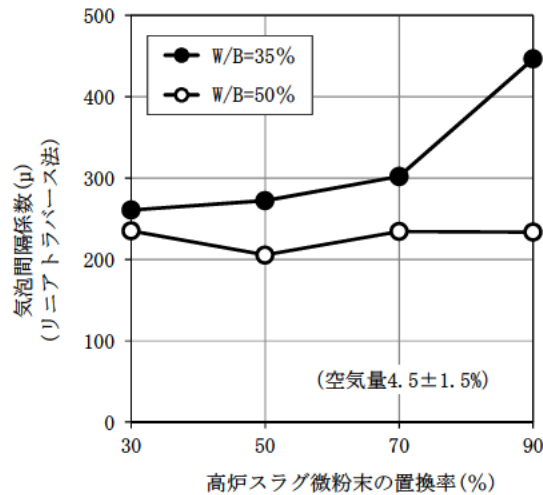


図-5.8.2 高炉スラグ微粉末の置換率と気泡間隔係数の関係

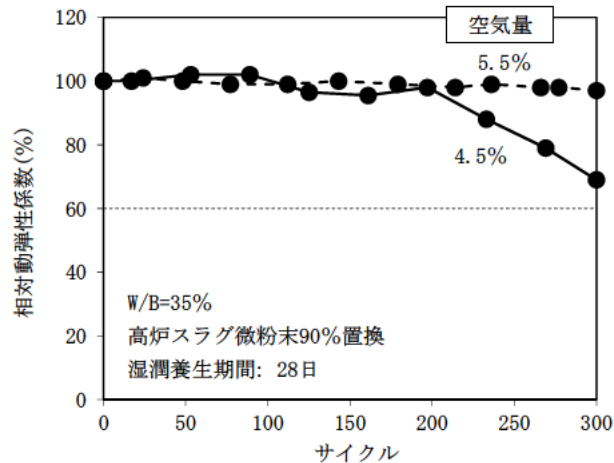


図-5.8.3 空気量の増量による凍結融解抵抗性の改善効果

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013

5.9 温度ひび割れに対する抵抗性

- (1) 温度ひび割れの発生が懸念される場合には，温度応力解析の結果等に基づき，温度ひび割れに対する抵抗性を評価するものとする。
- (2) 温度応力解析に用いる熱物性値や材料特性値は，事前の試験や過去の実績等に基づき，適切に設定する必要がある。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの発熱特性は，高炉スラグ微粉末の種類や置換率のほか，打込み

時のコンクリート温度にも影響を受ける。このため、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートをマスコンクリート構造物に用いる場合には、事前に温度応力解析を実施し、温度ひび割れに対する抵抗性を評価することが望ましい。温度ひび割れに対する抵抗性の評価は、2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕あるいはマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 に準拠した十分な信頼性を有する解析手法により、温度ひび割れ発生確率あるいは温度ひび割れ指数を用いることによって行う必要がある。また、ひび割れ発生確率あるいはひび割れ指数の目標値については、構造物の要求性能と環境条件を考慮した上で適切に設定する必要がある。付録資料に、橋梁下部構造（橋脚）を対象にした温度ひび割れ照査事例を示した。温度ひび割れに対する抵抗性を解析評価する場合の参考にとよい。

 付録-23：「温度ひび割れ照査事例」

(2)について

2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕とマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 では、セメントの種類ごとに、コンクリートの熱物性値（熱膨張係数、断熱温度上昇特性値）、力学特性（圧縮強度、引張強度、ヤング係数等）、収縮特性（自己収縮ひずみ等）等の物性値が示されている。しかしながら、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートについては、物性値が示されていない。このため、事前の試験や過去の実績等に基づき、適切な物性値を定め、これを用いて温度ひび割れに対する抵抗性を評価する必要がある。高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの熱物性値、力学特性、収縮特性等の物性値については、付録資料に記載したデータを参考にとよい。

 付録-12：「断熱温度上昇特性」

 付録-14：「圧縮強度」

 付録-15：「引張強度」

 付録-16：「ヤング係数」

 付録-23：「温度ひび割れ照査事例」

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御指針 2008，2008
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013

5.10 二酸化炭素排出削減効果

高炉スラグ微粉末の置換率が高いことによって得られる二酸化炭素排出削減効果は、評価の対象範囲を明確に設定した上で、十分な信頼性を有する方法及びデータを用いて定量的に評価するものとする。

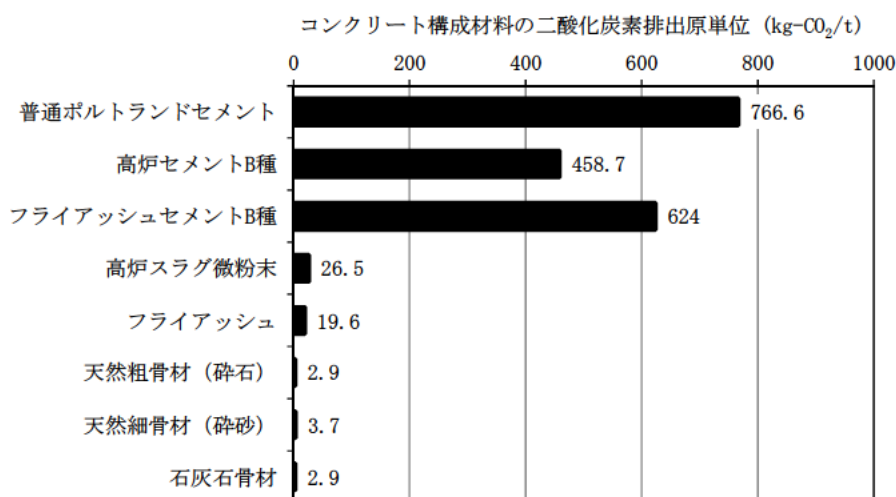
【解説】

構造物の構築に伴って発生する二酸化炭素排出量を定量化する方法としては、コンクリートに用いる材料

の製造時に発生する二酸化炭素排出量を各材料の使用量とインベントリデータから算出する方法、構造物のライフサイクルで発生する二酸化炭素排出量を積上げ計算あるいは産業連関分析により算出する方法の2種類がある。高炉スラグ微粉末を多量に用いることによって得られる二酸化炭素排出削減効果は、これらの方法に基づき、十分な信頼性を有するデータを用いて定量的に評価する必要がある。

二酸化炭素排出削減効果を正確に定量化するためには、評価の対象範囲を事前に明確に設定することが不可欠である。高炉スラグ微粉末の使用による二酸化炭素排出削減効果は、ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置き換えることで得られる。このため、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの施工方法が一般的なコンクリートと同様であれば、インベントリデータを活用した材料製造時における二酸化炭素排出量の算出結果の比較のみで二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価してよい。

二酸化炭素排出削減効果を定量化する際の参考資料として、文献 1)～8)がある。これらで示されている方法及びデータについては、十分な信頼性を有するものとして、二酸化炭素排出削減効果を定量化する際に採用してよい。また、これらと同等以上の信頼性を有することが確認された方法及びデータについても、二酸化炭素排出削減効果を定量化する際に採用してよい。ただし、二酸化炭素排出削減効果の試算結果は、評価の対象範囲、採用した方法及びデータによって異なる傾向の結果が得られることがあるため、試算結果を示す際にはこれらの情報も同時に示す必要がある。図—5.10.1 は一般的なコンクリートを構成する材料の二酸化炭素排出原単位を比較して示したものである。普通ポルトランドセメントに対して、高炉スラグ微粉末の二酸化炭素排出原単位が小さいことがわかる。



図—5.10.1 コンクリート構成材料の二酸化炭素排出原単位⁹⁾

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートについて、材料製造時の二酸化炭素排出量を試算した (図—5.10.2)。その結果、結合材に占める高炉スラグ微粉末の量が多いほど、製造時の二酸化炭素排出量は減少した。また、このマニュアル (案) で対象としている高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの配合では、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートに比べて、製造時の二酸化炭素排出量を約34%以下 (削

減効果 66%以上) と試算でき、二酸化炭素排出削減効果が高いことが示された。

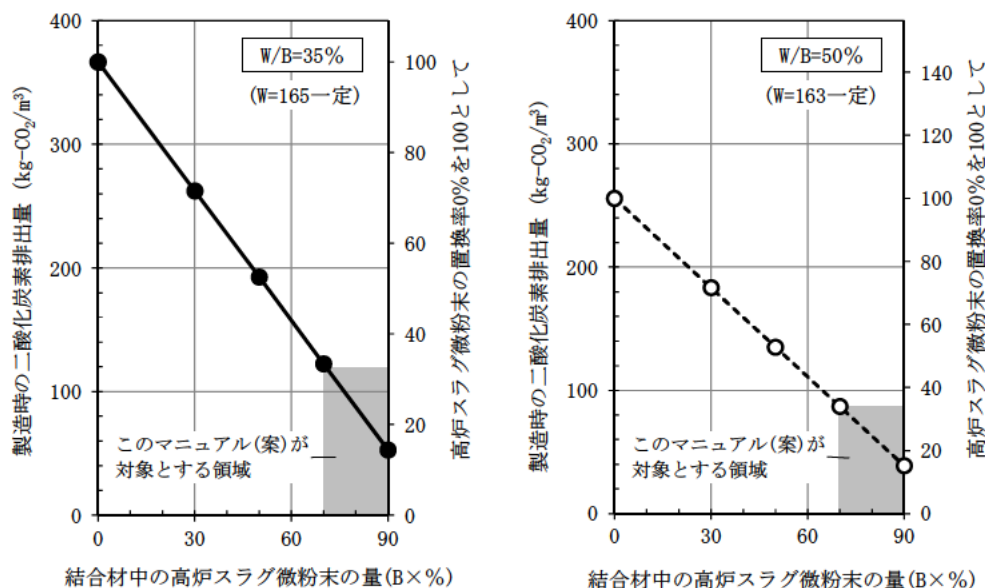


図-5.10.2 コンクリート製造時における二酸化炭素排出量試算結果

付録-25: 「材料製造時における二酸化炭素の排出量削減効果 (試算例)」

参考文献

- 1) ISO 13315-1:Environmental Management for Concrete and Concrete Structures –Part 1 General Principles, 2014
- 2) ISO 13315-2:Environmental Management for Concrete and Concrete Structures –Part 2 System Boundary and Inventory Data, 2014
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 社会資本のライフサイクルをととした環境評価技術の開発, 国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告書第 36 号, 2012
- 4) プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC 構造物の環境負荷低減への取り組みーPC 構造物の建設に伴う CO₂ 排出量の見える化ー, 2011
- 5) 日本コンクリート工学協会: コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究小委員会報告書, 2010
- 6) 土木学会: コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案), コンクリートライブラリー Vol.125, 2005
- 7) 土木学会: コンクリートの環境負荷評価 (その 2), コンクリート技術シリーズ Vol.62, 2004
- 8) 土木学会: コンクリートの環境負荷評価, コンクリート技術シリーズ Vol.44, 2002

5.11 材料コスト

設計段階で、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの材料コストを概算で把握できることは、実際の工事において、一般的なコンクリートに替わって使用する上で必要である。材料コストの試算は、コンクリートを構成する各種原材料費の積上げのほか、製造労務費や輸送関係費、販売経費等を加えて試算するとよい。

【解説】

ポルトランドセメントの代わりに混和材を多量に使用したコンクリートにおいて、混和材の種類が多いとレディーミクストコンクリート工場における製造整備の増設など負担が大きくなる。このマニュアル（案）で規定した高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、混和材に高炉スラグ微粉末のみを用いるため、例えば、レディーミクストコンクリート工場で使用されていない膨張材用のサイロを活用する等して、製造時の設備負担は最小限に抑えられると考える。

コンクリートの材料コストをあらかじめ概算で把握できることは、実際の工事で活用することを想定した場合に重要となる。そこで、材料コストの試算例として、付録資料に2つの比較ケースを示した。比較ケース（Ⅰ）では、マスコンクリート構造物への適用を想定した発熱量の小さいコンクリート配合での比較、比較ケース（Ⅱ）では、スランプが大きくワーカビリティに優れたコンクリート配合での比較、である。材料コストの試算にあたり、原材料費のほか、その他経費つまり製造関係費として、「＝製造労務費＋輸送関連費（輸送費＋輸送労務費＋輸送諸経費）＋販売経費（協同組合手数料等）」を計上した。また、それぞれの比率は、原材料費（40%）、製造労務費（10%）、輸送関係費（30%）、販売経費（20%）と仮定した。材料コストを概算で把握するには、これらの試算結果を参考にするとよい。

 付録-27：「材料コストの試算例」

6 章 製造

6.1 一般

- (1) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの製造は、所要の性能を有する設備を用いて、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を得られるように適切に行うものとする。また、製造にあたっては、材料の貯蔵、計量及び練混ぜの方法についてあらかじめ十分な計画を立て、適切に実施しなければならない。
- (2) 製造（材料投入から、練混ぜ、排出まで）に要する時間を製造設備を用いた試し練りによって事前に確認し、実際の出荷に備えることが望ましい。

【解説】

この章では、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの製造の標準的な方法を規定している。

(1)について

所要の品質を有する高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを製造するには、高炉スラグ微粉末が結合材の一部であること、その置換率がコンクリートの品質に与える影響が大きいことなどを十分に認識する必要がある。このため、所要の品質の高炉スラグ微粉末を用いることはもちろん、所要の性能を有する製造設備を使用し、材料の貯蔵から練混ぜまでの一連の製造工程を適切に実施することが必要である。また、高炉スラグ微粉末の置換率が高いコンクリートでは、凝結の遅延が生じたり、コンクリートの練上がり温度が低い場合には初期強度発現に影響が及ぶこと等を十分に考慮した上で、製造計画を立てて、適切に実施することが肝要である。

(2)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、一般的なコンクリートに比べて粘性が高い傾向にある。このため、製造（材料投入から、練混ぜ、排出まで）に要する時間は、一般的なコンクリートに比べて長くなる傾向にある。事前に実際の製造設備を用いた試し練りを行い、製造に要する時間を確認して、実際の出荷に備えることが望ましい。

6.2 高炉スラグ微粉末の貯蔵設備

高炉スラグ微粉末の貯蔵設備は、貯蔵中に品質が変化したり、外部から異物が混入しない構造のものでなければならない。

【解説】

高炉スラグ微粉末は、空気中の湿気を吸って固化したり品質が劣化したりする恐れがあるので、貯蔵においては湿気を防ぐことはもちろん、通気も避ける必要がある。貯蔵設備に要求される事項は、基本的にはセメントのそれと同じであり、必要とする容量も日平均使用量の3倍以上であることが望ましい。

高炉スラグ微粉末の貯蔵にあたり、専用の貯蔵設備を使用することが望ましいが、現実的には難しい。やむを得ずセメントあるいは膨張材等と兼用の設備を使用する場合には、高炉スラグ微粉末にセメントあるいは膨張材等が混入しないように、先に貯蔵されていた材料がなくなっていることを確認し、設備を清掃した後に貯蔵しなければならない。

6.3 計量

- (1) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに用いる材料の計量は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有するよう、材料の管理状態、コンクリートの温度、スランプまたはスランプフローの保持時間等を勘案して決定された配合に基づいて、適切に行うものとする。
- (2) セメント及び混和材の計量は、1 バッチ分ずつ質量で計量することを原則とする。
- (3) セメント及び混和材の計量誤差は、あらかじめ決められた範囲内でなければならない。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートを製造する上で、高炉スラグ微粉末の計量を正確に行うことは重要である。高炉スラグ微粉末は結合材の一部であり、このマニュアル（案）に規定したコンクリートは高炉スラグ微粉末の置換率が高いため、コンクリートの品質に多大な影響を与える。このため、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有するように、所要の配合に基づいて適切に材料の計量を行う必要がある。

(2)について

セメント及び混和材の計量は、一般的なコンクリートと同様に、1 バッチ分ずつ計量することを原則とする。

(3)について

高炉スラグ微粉末は潜在水硬性を有する材料であるため、基本的にはセメントと同様の結合材として扱わ

れることから、計量誤差はセメントと同様とする。つまり、セメント及び混和材（高炉スラグ微粉末）の計量誤差は、JIS A 5308:「レディーミクストコンクリート」の規定を参考に、1回計量分量に対して、セメントで±1%、混和材（高炉スラグ微粉末）で±1%としてよい。ただし、1回あたりに計量する結合材の質量が多い場合等、材料の計量誤差がコンクリートの品質に与える影響が大きくなることが懸念される際には、適切に計量誤差を別途設定することが望ましい。なお、セメントや混和材が袋詰めで供給され、1袋の正味質量が記載質量に対して上記の許容誤差内にあることが確認された場合には、袋単位で計量してもよい。ただし、1袋より少ない量は質量で計量しなければならない。また、その他の使用材料（水、骨材、化学混和剤）の計量値の許容差についても JIS A 5308:「レディーミクストコンクリート」に準じるものとする。

6.4 練混ぜ

- (1) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに使用する材料は、練上がり後のコンクリートが均質になるまで、所要の性能を有するミキサを用いて十分に練混ぜなければならない。
- (2) 材料をミキサに投入する順序は、あらかじめ定めておかななければならない。
- (3) 練混ぜ時間は、試験によって定めることを原則とする。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を高含有した配合や水結合材比の小さい配合ではコンクリートの粘性が高くなるため、所要の性能を有するミキサを用いて、練上がり後のコンクリートが均質になるまで十分に練混ぜを行わなければならない。

(2)について

材料をミキサに投入する順序は、ミキサの形式、練混ぜ時間、骨材の種類及び粒度、単位水量、単位セメント量、混和材料の種類等によって相違するため、JIS A 8603-2:「コンクリートミキサー第2部：練混ぜ性能試験方法」による試験、強度試験、ブリーディング試験等の結果または実績を参考にしてこれを定めるのがよい。高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの製造は、一般的なコンクリート以上に配慮が必要であり、材料の投入順序については、紛体材料を均質に分散させるため、セメントと同時あるいはセメントに続いて直ちに混和材をミキサに投入することが望ましい。参考として、このマニュアル（案）に規定した高炉スラグ微粉末の置換率 90%で水結合材比 35%のコンクリートについて、二軸強制型ミキサ（製造能力 1.75m³/バッチ）で材料一括投入により製造した実績がある。フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質を事前に試験により確認した場合には、これと同様の方法で練混ぜを行うものとする。また、事前に品質試験を行う際には、実際となるべく同様の条件及び方法により練混ぜを行うものとする。

(3)について

均質な練上がりコンクリートを得るために必要な練混ぜ時間は、ミキサの型式によって異なるほか、ミキサの容量、材料の種類、コンクリートの配合、投入順序等によっても相違する。このため、使用するミキサを用いた実機試験の結果から練混ぜ時間を定めることを原則とする。これまでの実績として、一般的なコンクリートでの練混ぜ時間は概ね30～60秒であるが、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでは、粘性が高くなること等から、材料が均質になるまでに要する練混ぜ時間は90秒以上を要した。

 付録-26：「実機プラント設備を用いた製造確認」

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，〔施工編〕，2013
- 2) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートラブラリー86，1996

7 章 運搬，打込み，締固め及び仕上げ

7.1 一般

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの運搬，打込み，締固め及び仕上げは，フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートが所要の品質を有するよう，適切に行わなければならない。

【解説】

この章では，高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの運搬，打込み，締固め及び仕上げの標準的な方法を規定している。

7.2 運搬

現場までの運搬は，荷卸しが容易で，運搬中に材料分離が生じにくく，スランプまたはスランプフロー，空気量等の変化が小さい方法で行うものとする。

【解説】

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートのフレッシュ性状は，ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して，経時的な低下の程度が大きくなる傾向があり，特に高温時に顕著となる。このため，荷卸し時に所要のフレッシュ性状を確保できるように十分に配慮する必要がある。また，化学混和剤を用いてコンクリートのワーカビリティを確保する場合には，実施工となるべく近い条件で試し練りを行い，化学混和剤の種類の選定や使用量の調整を行う必要がある。なお，気温が約 20℃の環境条件の下で，高炉スラグ微粉末の置換率が 90%のコンクリートをトラックアジテータ車（大型 10t 車）に積載し，フレッシュ性状の経時変化を確認した結果，90 分後でも所要の性状規定範囲内におさまることを確認している。

 付録-26：「実機プラント設備を用いた製造確認」

7.3 打込み

- (1) 現場に到着したコンクリートは、できるだけ時間をおかずに直ちに打込むことが望ましい。
- (2) 打込み時のコンクリート温度は、できるだけ高くなければならない。
- (3) コンクリートポンプによる圧送は、圧送後のコンクリートの品質やコンクリートの圧送性を踏まえた圧送方法で行うものとする。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末の反応は温度依存性が高いため、運搬中や荷卸し前の待機中にコンクリートの温度が大きく変化した場合、フレッシュ性状が急激に変わってしまうことがある。高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでは、特に気温が高い夏期に注意が必要である。このため、コンクリートが現場に到着したら、できるだけ時間をおかずに直ちに打込むことが望ましい。

(2)について

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度発現は、硬化時におけるコンクリート温度の影響を大きく受ける。打込み時のコンクリート温度が低く、かつ養生中のコンクリート温度が10℃以上に保てない場合は、初期材齢時の強度発現が著しく低下することがある。特に、スラブや壁等の薄い部材の場合、打込み時のコンクリート温度が低いと、硬化時の水和熱も小さく、養生中のコンクリート温度が低くなり、強度発現性に影響を及ぼすことがある。このため、特に寒冷時にはコンクリート温度の低下に十分に留意しなければならない。

(3)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、フレッシュコンクリートの粘性が高くなるため、コンクリートポンプを用いて圧送する場合には、事前に加圧ブリーディング試験でポンプ圧送が可能か材料評価を実施し、必要に応じて、実施工になるべく近い条件で試験を行い、圧送計画を入念に検討するとともに、圧送後の品質が低下しないように十分に配慮する必要がある。

7.4 締固め

コールドジョイントや材料分離が生じないように、適切な施工計画に従って連続して打込み、締固めるものとする。

【解説】

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの凝結時間は、セメントの種類や高炉スラグ微粉末の置換率、水結合材比、環境温度、化学混和剤の種類や使用量等によって影響を受けることがわかっている。このため、

配合仕様や施工条件、環境条件等によっては、凝結の時間が変動し、締固めが困難となる場合もある。コールドジョイントや材料分離が生じないように、適切な施工計画に従い、連続してコンクリートを打込み、締固めを適切な時期に行うものとする。

7.5 仕上げ

コンクリートの仕上げは、締固め後の適切な時期に行うものとし、被膜養生剤等を使用するとよい。

【解説】

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、ブリーディングの発生量が少なく、凝結が遅れる傾向にある。このため、打込み後に行うコンクリート表面の均し及び押さえ作業は、適切な時期に行う必要がある。また、初期乾燥に伴う微細なプラスチック収縮ひび割れの発生を防止し、仕上げ作業を容易にするため、養生剤等を使用することを推奨する。なお、コンクリート表面が乾燥した状態で無理に仕上げ作業を行うと、表面の硬化不良を引き起こすため、仕上げの時期は、事前の試験等によってあらかじめ確認しておくとうい。

 付録-10 : 「ブリーディング」

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，〔施工編〕，2013
- 2) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートラブラリー86，1996

8 章 養生

8.1 一般

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、打込み後、硬化に必要な温度及び湿度条件を保ち、有害な作用の影響を受けないように、適切に養生を行わなければならない。

【解説】

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、一般的なコンクリートに比べて、湿潤養生、特に初期材齢時の湿潤養生の良否がコンクリート品質に大きな影響を与える。このため、養生への十分な配慮が必要である。初期に乾燥を受けると、強度発現が停滞することもあり、たとえ強度が満足されても、耐久性が低下することがあるので注意を要する。

また、強度発現は、打込み時のコンクリート温度及び養生温度の影響を受けやすく、低温時には初期強度が小さい傾向がある。このため、低温度時にスラブや壁等の薄い部材を施工する場合には、養生計画をしっかりと立て、適切な養生温度を確保することが必要である。

8.2 養生方法と期間

- (1) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの養生では、養生期間中、直射日光や風等によってコンクリート表面からの水分の逸散を防止し、コンクリートの露出面を常に湿潤状態に保持しなければならない。
- (2) 湿潤養生は、硬化コンクリートが所要の品質を有する時期まで実施する必要がある、その期間は、事前の試験によって定めることが望ましいが、困難な場合は、過去の実績等に基づき、適切に設定するものとする。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの品質は、湿潤養生期間や養生時の温度の影響を受けやすい。このため、コンクリート打込み面は、表面を荒らさないで作業ができる程度に硬化していることを確認した後、養生マットや布等を濡らして覆うか、または散水あるいは湛水を行い、湿潤状態に保たなければならない。また、型枠を取り外した後の露出面も、所定の期間まで湿潤状態に保たなければならない。

(2)について

コンクリートの強度増進及び耐久性確保のためには、できるだけ長く湿潤状態を保持するのがよい。高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは、特に初期養生が重要であり、湿潤養生期間は、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも長くする必要がある。使用する高炉スラグ微粉末の種類、セメン

トの種類、高炉スラグ微粉末の置換率や水結合材比等の配合条件、構造物の種類、位置、気象条件、工事期間及び施工方法等をあらかじめ十分に検討し、湿潤状態に保つ期間を決定することが望ましい。事前の試験では、高炉スラグ微粉末の置換率が90%で水結合材比が35%のコンクリートを対象に、20℃環境で湿潤養生期間の違いが強度や耐久性（中性化抵抗性、塩化物イオン浸透抵抗性）に与える影響を確認した。その結果、湿潤養生期間を7日間以上行うことで、28日間湿潤養生した場合と同程度の性能を得られることがわかった。つまり、高炉スラグ微粉末をJIS R 5211:「高炉セメント」の高炉セメントC種以上用いたコンクリートでも、高炉セメントB種を用いたコンクリートと同程度の湿潤養生期間でよい結果であった。

2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では、セメント種類ごとに湿潤養生期間の標準が示されているが、高炉スラグ微粉末をJISの高炉セメントC種以上用いた場合については、湿潤養生期間の標準が示されていない。このため、事前の試験や過去の実績等に基づき、適切な湿潤養生期間を設定することとした。

湿潤養生期間の設定方法として、以下に示す2つの方法がある。

○ 所要の品質を担保できる湿潤養生期間を事前の試験等から設定する方法

構造物の種別や供用時の環境条件等を踏まえてコンクリートに求められる品質を明確にした上で、硬化コンクリートが所要の品質を有することを担保できる湿潤養生期間を事前の試験等により確認し、これを湿潤養生期間として設定する方法である。例えば、中性化や塩化物イオン浸透に対する抵抗性を担保できる湿潤養生期間を確認し、これを湿潤養生期間として設定してよい。

○ 既存の基準類の標準的な湿潤養生期間と同等の品質を担保できる湿潤養生期間を設定する方法

既存の基準類の標準的な湿潤養生期間で得られるコンクリートの品質を明確にした上で、事前の試験や過去の実績等により、これと同等の品質を担保できる湿潤養生期間を確認し、これを湿潤養生期間として設定する方法である。例えば、2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕には、普通ポルトランドセメント、混合セメントB種、早強ポルトランドセメントを用いた場合の湿潤養生期間の標準が示されている。事前の試験等により、これらの湿潤養生期間の標準と同等の品質を確保できる湿潤養生期間を確認した場合には、これを湿潤養生期間として設定してよい。

 付録－14：「圧縮強度」の「5. 養生条件（湿潤養生期間）」

 付録－17：「塩化物イオン浸透抵抗性」

 付録－18：「中性化抵抗性」の「1. 湿潤養生期間」

8.3 養生温度

- (1) 湿潤養生時の温度は、硬化後のコンクリートの品質が損なわれないように、適切に保つものとする。
- (2) 養生期間中は、コンクリートの温度を 10℃以上に保つことが望ましい。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの強度発現は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、養生時のコンクリート温度の影響を受けやすい。このため、打込み後から十分な硬化が進むまで必要な温度に保ち、急激な温度変化による有害な影響を受けないようにする必要がある。特に、冬期には必要に応じて、養生温度を制御することが望ましい。

(2)について

コンクリートの練上がり温度が低く、打込み完了後も低温環境に置かれた場合、初期材齢時の強度発現が遅くなることがわかっている。このため、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの養生温度は 10℃以上に保つことが望ましい。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，〔施工編〕，2013
- 2) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートラブラリー86，1996

9 章 品質管理及び検査

9.1 一般

所要の品質を有するコンクリートを製造して構造物を構築するため、コンクリートの材料や施工方法等、施工の各段階において適切に品質管理及び検査を行わなければならない。

【解説】

品質管理は、使用目的に合致したコンクリート構造物を造るために、施工の各段階において行う効果的で組織的な技術活動である。品質管理の方法は、実際に試験を行う方法のほかに、JIS 製品等の場合は、製造会社の JIS 試験成績表を確認することによる方法もある。

検査は、品質管理が適正に行われ、使用目的に合致した所要の品質を有するコンクリート構造物が造られていることを、あらかじめ定められた判定基準に基づいて確認することをいう。

9.2 品質管理及び検査

- (1) 材料の品質管理及び検査について、高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 に規定された項目について行わなければならない。この他、セメント、練混ぜ水、骨材等は、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕の規定に従って行うものとする。
- (2) 検査の結果、材料の品質が適当でないと判定された場合は、材料の改善あるいは材料の変更等の適切な対応を講じなければならない。
- (3) コンクリート製造の品質管理及び検査については、原則として、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕の規定に従って行うものとする。
- (4) 検査の結果、コンクリート製造が適当でないと判定された場合は、製造設備の改善などの適切な処置を講じなければならない。
- (5) コンクリートの品質管理及び検査は、原則として、土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕の規定に従って行うものとする。
- (6) 検査の結果、コンクリートの品質が適当でないと判定された場合は、材料の検査、配合の修正、製造設備の検査、作業方法の改善等の適切な措置を講じなければならない。

【解説】

(1)について

高炉スラグ微粉末の品質管理及び検査は、JIS A 6206：「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に規定された項目に従って行うが、製造工場から受領した試験成績表によって、高炉スラグ微粉末の品質を確認してもよい。

(2)について

検査の結果、使用する材料の品質が適当ではないと判定された場合は、使用する材料を改善するか変更する等の適切な処置をとる必要がある。

(3)について

レディーミクストコンクリート工場または現場プラントで製造される場合、いずれの場合もその製造設備及び製造工程を適切に管理し、所要の品質のコンクリートが製造できることを確認しなければならない。高炉スラグ微粉末の貯蔵は、他の結合材が混入しないような専用の貯蔵設備とするのが望ましい。また、計量設備は、セメントと同じ計量誤差1.0%以内で計量できるものとする。コンクリートの練混ぜの品質管理及び検査においては、十分な練混ぜが行われていること及び所定量が練混ぜられていることを確認する。

(4)について

検査の結果、コンクリートの製造が適当でないと判断された場合は、製造設備や製造工程を改善する等の適切な処置をとる必要がある。

(5)について

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートであっても、これに要求される性能項目や試験方法は、一般的なコンクリートと同様である。このため、品質管理及び検査も、原則として土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕の規定に従って行う。

(6)について

所要の品質のコンクリートが得られていることが疑わしい場合には、コンクリートの配合を適正に修正し、材料、製造設備、練混ぜ方法等を検査し、必要ならば改善する。コンクリートの品質を確かめ、必要に応じて、適切な処置を講じる必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2013
- 2) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートラブラリー86，1996

第Ⅲ部 付録資料

担当：戸田建設株式会社・西松建設株式会社

付録－1 試験概要

1. 使用材料

表－1 使用材料一覧

材料	産地・品名	記号	物性・仕様	製品例
セメント	普通ポルトランドセメント	N	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3,320cm ² /g	
	早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4,500cm ² /g	
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	BFS	密度 2.89g/cm ³ , 比表面積 4,440cm ² /g, 無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添	セラメント A エスメント
細骨材	静岡県掛川産 砂	S	硬質砂岩系, 表乾密度 2.59g/cm ³ , 吸水率 2.07%, 単位容積質量 1.72kg/L, 粗粒率 2.75	
粗骨材	茨城県笠間産 6号砕石	G1	硬質砂岩, 表乾密度 2.67g/cm ³ , 吸水率 0.46%, 単位容積質量 1.60kg/L, 粒形判定実積率 60.4%	
	茨城県笠間産 5号砕石	G2	硬質砂岩, 表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.43%, 単位容積質量 1.59kg/L, 粒形判定実積率 59.7%	
化学混和剤	高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ高含有 コンクリート用)	SP	標準形 (I 種), ポリカルボン酸系化合物, リグニンスルホン酸塩	フローリック SF500BB
	AE 減水剤 (高機能タイプ)	Ad	標準形 (I 種), リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物	フローリック SV10
			遅延形 (I 種), リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物	フローリック RV10
水	上水道水	W	研究施設内 (茨城県つくば市) で常用	

備考) 粗骨材の混合比率 G1:G2=50:50, 粗骨材の最大寸法 20mm



普通 早強
ポルトランドセメント



高炉スラグ微粉末 4000
(無水せっこうを三酸化硫黄(SO_3)
換算で 2.0%内添)



砂 (5mm~0mm)



6 号碎石 (13mm~5mm)



5 号碎石 (20mm~13mm)

写真-1 使用材料

表-2 結合材の品質

種類	項目	区分	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分 (%)			
					強熱減量 ig.loss	酸化マグネシウム MgO	三酸化硫黄 SO ₃	塩化物イオン Cl ⁻
普通ポルトランド セメント	試験値		3.16	3,320	1.89	1.41	2.22	0.020
	JIS R 5210 規格値		—	(≥2,500)	(≤5.0)	(≤5.0)	(≤3.5)	(≤0.035)
早強ポルトランド セメント	試験値		3.14	4,500	0.88	1.68	3.05	0.006
	JIS R 5210 規格値		—	(≥3,300)	(≤5.0)	(≤5.0)	(≤3.5)	(≤0.02)
高炉スラグ微粉末 4000	試験値		2.89	4,440	0.14	6.25	2.08	0.004
	JIS A 6206 規格値		(≥2.80)	(3,500~ 5,000)	(≤3.0)	(≤10.0)	(≤4.0)	(≤0.02)

表-3 骨材の物理的性質

項 目	細骨材(S)	粗骨材(G1)	粗骨材(G2)
種 類	砂 5mm~0mm	6号碎石 13mm~5mm	5号碎石 20mm~13mm
産 地	静岡県掛川産	茨城県笠間産	茨城県笠間産
表乾密度 (g/cm ³)	2.59	2.67	2.66
吸水率 (%)	2.07	0.46	0.43
微粒分量 (%)	1.0	0.1	0.1
粗粒率 (F.M.)	2.75	6.16	7.12
単位容積質量 (kg/L)	1.72	1.60	1.59
粒形判定実積率 (%)	67.5	60.4	59.7

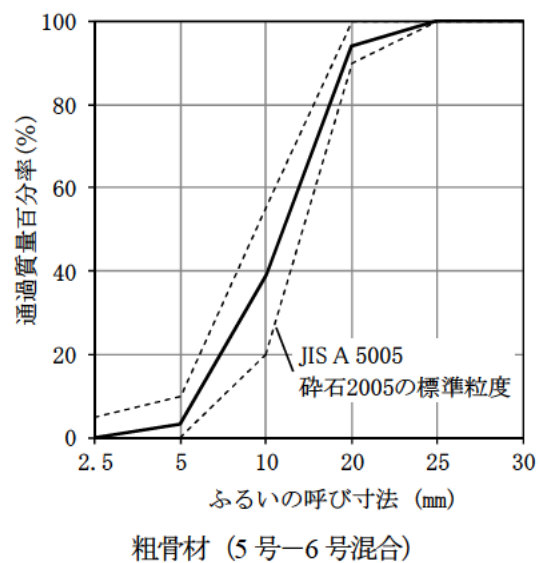
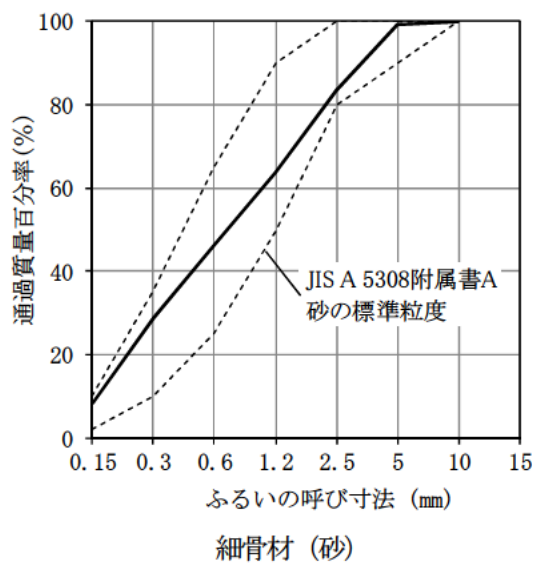


図-1 骨材の粒度分布

表-4 化学混和剤の主成分及び物性（例）

種 類	区 分		主成分	外観	塩化物 イオン量 (%)	アルカリ 量 (%)	密度 (g/cm ³)
フローリック SF500BB	高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ 高含有用)	標準形 (I 種)	ポリカルボン酸系化 合物, リグニンスル ホン酸塩	黒褐色 液体	0.03	0.7	1.07～ 1.15
フローリック SV10	AE 減水剤 (高機能タイプ)	標準形 (I 種)	リグニンスルホン酸 塩, オキシカルボン 酸塩とポリカルボン 酸系化合物	黒褐色 液体	0.04	1.1	1.04～ 1.12
フローリック RV10		遅延形 (I 種)		黒褐色 液体	0.05	1.4	1.05～ 1.13

備考) 塩化物イオン量, アルカリ量, 密度の値は分析値例である。

2. コンクリート配合

2.1 標準配合例

本書において、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（スラグリート）の配合タイプは、Ⅰ）中流動コンクリート相当（スランプフロー配合）及びⅡ）一般的な土木系配合（スランプ配合）の2種類とした（表－5）。表－6 に各々の標準配合例、写真－2 にスランプまたはスランプフロー試験結果例を示す。水結合材比は35%と50%で、いずれの配合も高炉スラグ微粉末4000（無水せっこうを三酸化硫黄（SO₃）換算で2.0%内添）をJIS R 5211：「高炉セメント」の高炉セメントC種上限分量（70質量%）以上使用している。

表－5 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（スラグリート）の配合タイプ

配合タイプ	フレッシュコンクリート性状	スランプまたはスランプフロー	呼び強度 (強度管理材齢28日)
Ⅰ)	中流動コンクリート相当 (スランプフロー配合)	スランプフロー 35～50cm (42.5±7.5cm)	27N/mm ² 相当
Ⅱ)	一般的な土木系配合 (スランプ配合)	スランプ 12.0±2.5cm	24N/mm ² 相当

表－6 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（スラグリート）の標準配合例

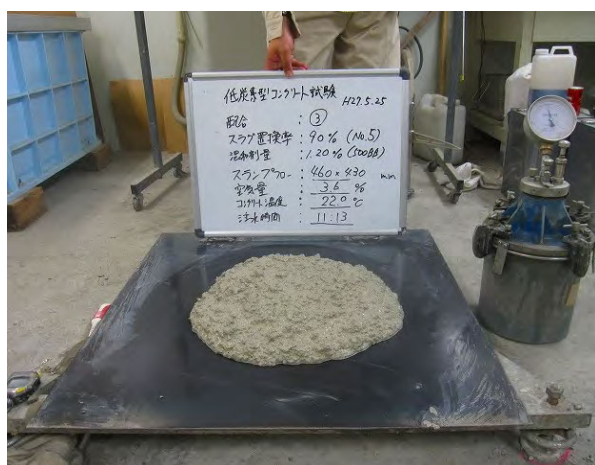
配合タイプ	水結合材比 W/B (%)	高炉スラグ微粉末の置換率 BFS/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	結合材 B		細骨材 S	粗骨材 G
					セメント C	高炉スラグ微粉末 BFS		
Ⅰ)	35	90	50.0	165	47	424	835	835
Ⅱ)	50	70	45.9	163	98	228	811	982

備考) W/B=35%, BFS/B=90%の時, スランプフロー42.5±7.5cm (中流動コンクリート相当 35～50cm), 空気量4.5±1.5%

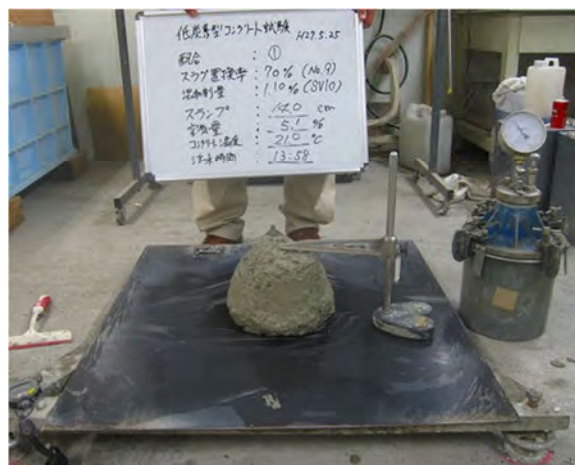
W/B=50%, BFS/B=70%の時, スランプ 12.0±2.5cm, 空気量4.5±1.5%

化学混和剤の種類: W/B=35%の場合 (高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ高含有用))

W/B=50%の場合 (AE 減水剤 (高機能タイプ))



スランプフロー配合 (W/B=35%, BFS/B=90%)



スランプ配合 (W/B=50%, BFS/B=70%)

写真－2 低炭素型コンクリート（スラグリート）標準配合のスランプまたはスランプフロー試験結果

2.2 検討配合

表-7 高炉スラグ微粉末の置換率と化学混和剤の使用量 (例)

環境 温度 (°C)	水結合材比 W/B (%)	スランプまたは スランプフロー (cm)	セメント 種類	細骨材率 s/a (%)	単位水量 W (kg/m ³)	結合材 B (kg/m ³)	高炉スラグ微粉末の置換率 BFS/B (%)	化学混和剤 (B×%)	
								SP	Ad
20	35	スランプフロー 42.5±7.5	早強(H)	50.0	165	471	0	1.40	—
							30	1.35	
							50	1.30	
							70	1.25	
							90	1.20	
20	50	スランプ 12.0±2.5	普通(N)	45.9	163	326	0	—	1.50
							30		1.30
							50		1.20
							70		1.10
							90		1.00

- 備考) ➤ 水結合材比(W/B)、細骨材率(s/a)と単位水量(W)は一定として高炉スラグ微粉末(BFS)の置換率を変化させ、化学混和剤の使用量でスランプまたはスランプフロー及び空気量(4.5±1.5%)を調整した。
- 本書が対象としている低炭素型コンクリート配合は、上表中で高炉スラグ微粉末の置換率(BFS/B)が70～90%の配合である。

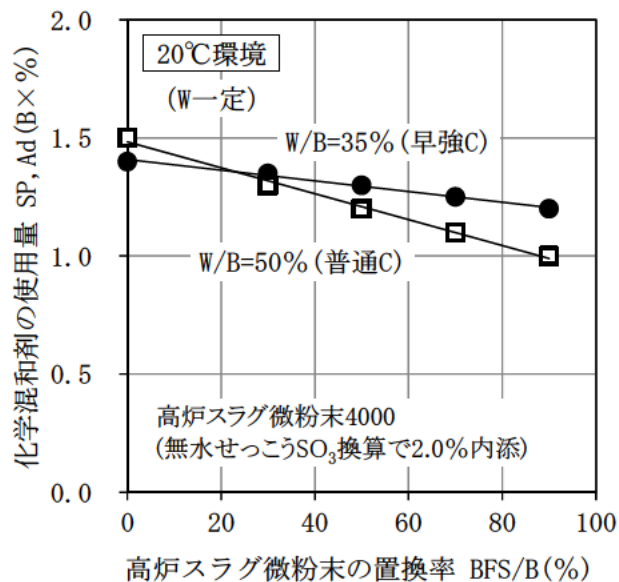


図-2 高炉スラグ微粉末の置換率と化学混和剤の使用量 (例)

3. 試験項目及び試験方法

表一8 試験項目及び試験方法

試験項目		試験方法	
フレッシュコンクリート性状	スランプ	JIS A 1101:「コンクリートのスランプ試験方法」	
	スランプフロー	JIS A 1150:「コンクリートのスランプフロー試験方法」	
	空気量	JIS A 1128:「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」	
	コンクリート温度	JIS A 1156:「フレッシュコンクリートの温度測定方法」	
	凝結	JIS A 1147:「コンクリートの凝結時間試験方法」	
	ブリーディング	JIS A 1123:「コンクリートのブリーディング試験方法」	
	加圧ブリーディング	JSCE-F 502:「加圧ブリーディング試験方法（案）」	
強度特性	圧縮強度	JIS A 1108:「コンクリートの圧縮強度試験方法」	
	引張強度	JIS A 1113:「コンクリートの割裂引張強度試験方法」	
	ヤング係数	JIS A 1149:「コンクリートの静弾性係数試験方法」	
熱特性	断熱温度上昇特性	JCI-SQA3:「コンクリートの断熱温度上昇試験（案）」空気循環式	
	熱膨張係数	埋込み型ひずみ計を用いた温度サイクル負荷試験	
耐久性評価	室内試験	乾燥収縮	JIS A 1129-2:「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」
		自己収縮	JCI:「(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」を参考
		促進中性化	JIS A 1153:「コンクリートの促進中性化試験方法」
		凍結融解	JIS A 1148:「コンクリートの凍結融解試験方法」A 法
		気泡組織測定	ASTM C 457:「顕微鏡によるコンクリート中の気泡組織測定方法」
		耐硫酸性	JIS 原案:「コンクリートの溶液浸漬による耐薬品性試験方法（案）」参考
		塩分浸漬	JSCE-G572:「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」
	暴露試験	中性化	JIS A 1152:「コンクリートの中性化深さの測定方法」
		塩分浸透	JIS A 1154:「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」（硝酸銀滴定法）
			硝酸銀溶液噴霧法

4. 練混ぜ手順

(1) W/B=35%の場合

二軸強制練りミキサ（55L, 100L）を使用

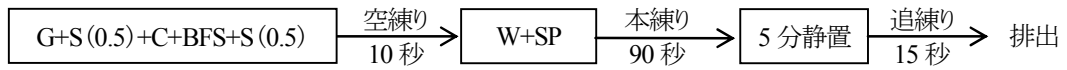


図-3 材料の練混ぜ手順 (W/B=35%)

(2) W/B=50%の場合

パン型ミキサまたは二軸強制練りミキサ（55L, 100L）を使用

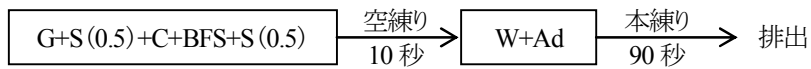


図-4 材料の練混ぜ手順 (W/B=50%)

5. 暴露試験

5.1 暴露場所

平成 24 年度末から約 2 年半の間、試験体（□100mm×200mm）を屋外（内陸部、沿岸部）及び屋内環境にそれぞれ暴露し、飛来塩分による塩化物イオンの浸透や中性化進行等の調査を実施した。屋外は3 地点（つくば、新潟、沖縄）の雨掛かり部を選定し、屋内は温度 20℃、湿度 60%RH に管理された建屋内に存置した。

表-9 暴露場所の概要

暴露環境	暴露場所			塩害 地域区分※	暴露開始	気象条件※※		
						年平均気温	年平均湿度	年平均降水量
屋 外	①	内陸部	茨城県つくば市要	—	2012/12/7	14.4℃	73.0%RH	1,361mm
	②	沿岸部	新潟県上越市名立区	B	2013/1/18	13.8℃	76.4%RH	2,925mm
	③		沖縄県国頭郡大宜味村	A	2013/12/17	22.7℃	74.2%RH	2,149mm
屋 内	④	室内(温湿度の管理された部屋)		—	2012/12/7	20.0℃	60.0%RH	—

※ 道路橋示方書IV下部構造編 塩害地域区分より

*** 気象統計情報(気象庁)から暴露場最寄りの観測地点(つくば(館野), 高田, 名護)における観測値(過去5年間)を整理して引用



①屋外暴露(内陸部:茨城県つくば市)



④屋内暴露(室内:20℃, 60%RH)



②屋外暴露(沿岸部:新潟県上越市)



③屋外暴露(沿岸部:沖縄県国頭郡)

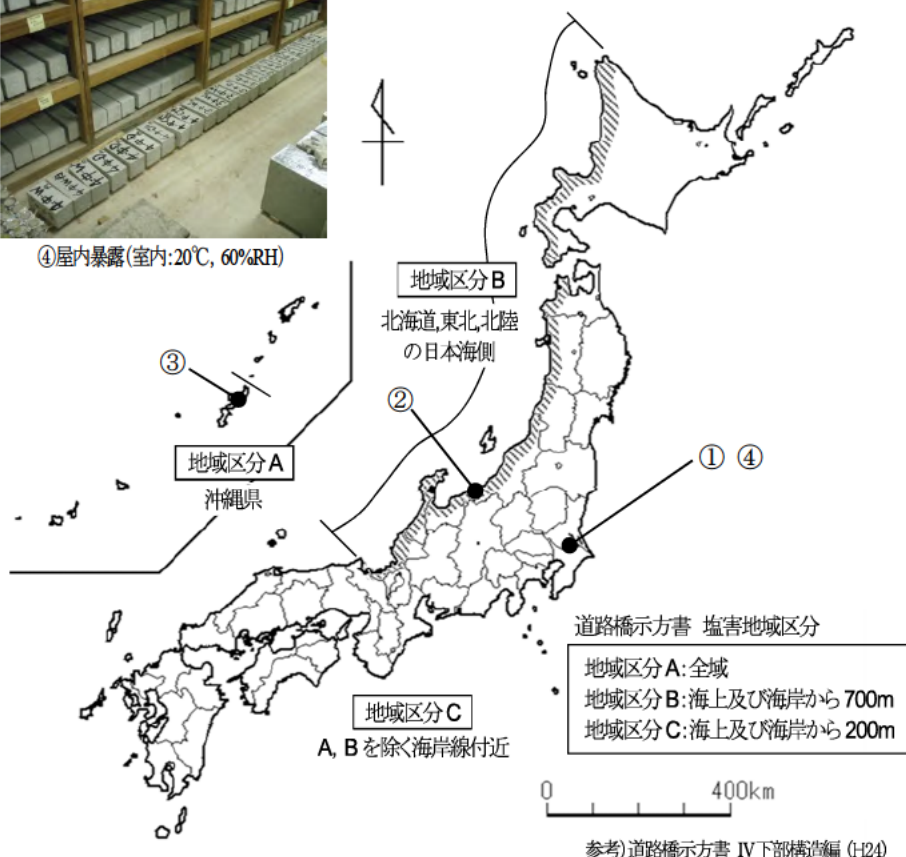
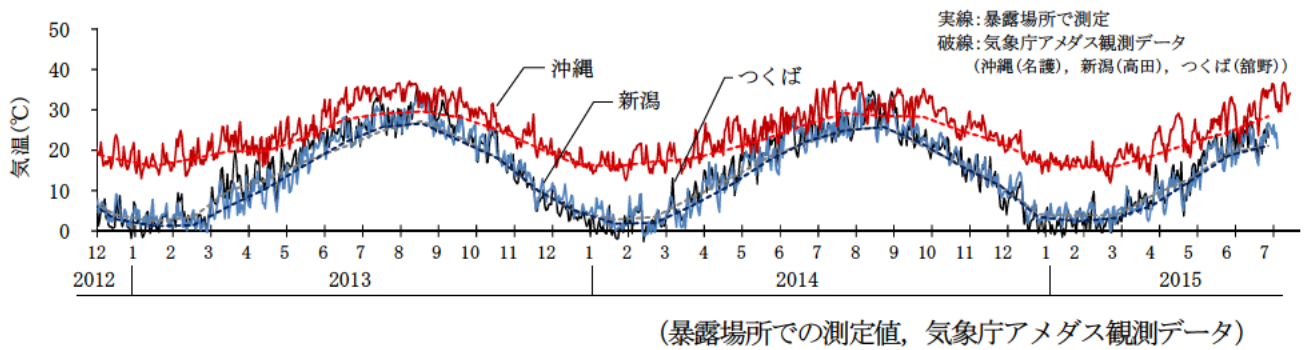


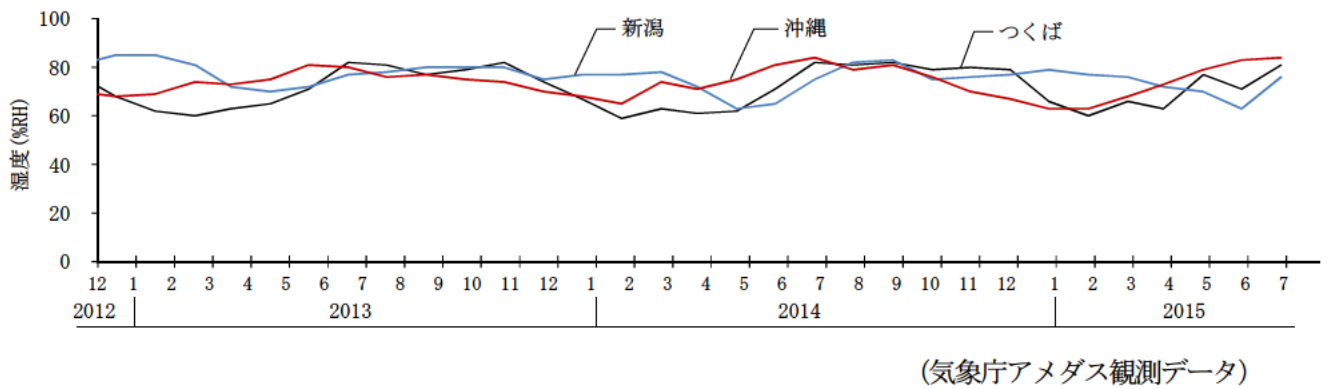
図-5 暴露試験状況

5.2 環境条件

① 気温



② 湿度



③ 降水量

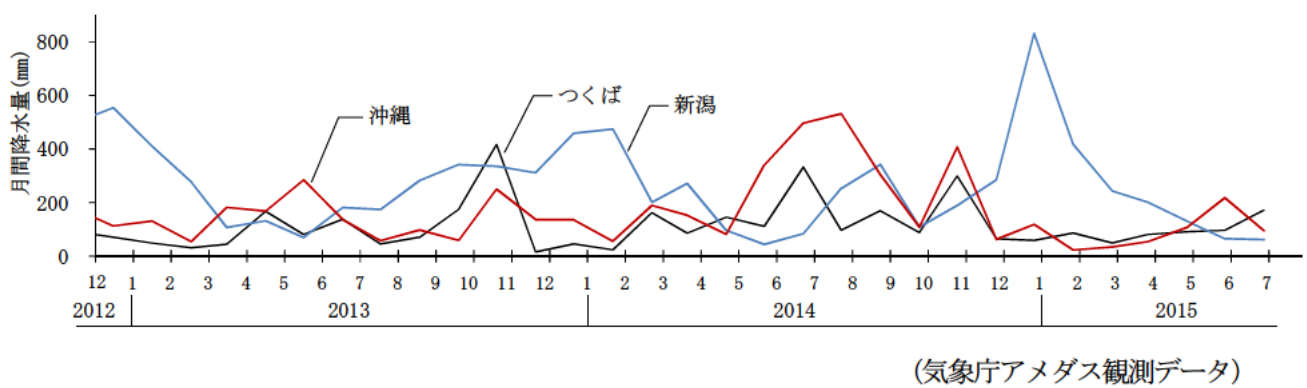


図-6 気象観測データ

5.3 暴露試験体の解体及び分析手順

試験体： □100mm×200mm（暴露観察面 100×200mm 以外の面はエポキシ樹脂系接着剤で被覆）

試験： ① 硝酸銀溶液の噴霧（塩分浸透深さの測定）

② フェノールフタレイン 1%エタノール溶液の噴霧（中性化深さの測定）

③ 塩分分析（塩化物イオン濃度分布測定）

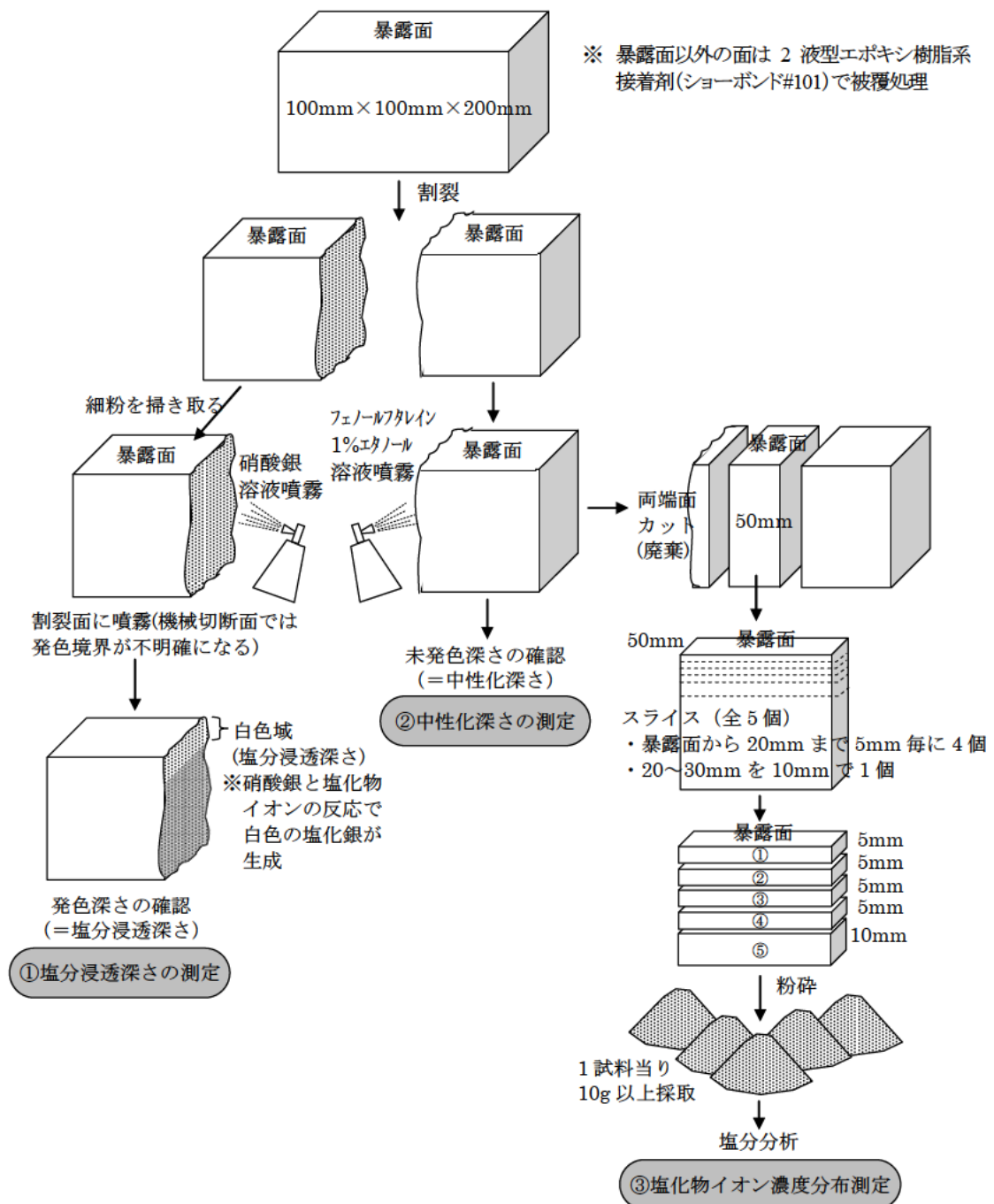


図-7 暴露試験体の解体及び分析手順

付録－2 アブサンデン現象

アブサンデン (Absanden) 現象とは、コンクリート表面が脆弱化してペースト分や細骨材が剥離していく現象のことである¹⁾²⁾。特に、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート配合で現れるといわれている。その原因として、魚本ら¹⁾は、空気中の二酸化炭素による水和反応の停止や水和生成物の分解による影響を実験結果から指摘している。一方で、普通ポルトランドセメントの割合が10%以上の場合にはアブサンデン現象は確認されなかったとも報告している。ただし、強度や中性化抵抗性を確保するには、適切な配合設計や施工計画などが求められる。

本書で検討した高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、セメント中に占める高炉スラグ微粉末(種類:4000, 無水せっこうを三酸化硫黄(SO_3)換算で2.0%内添)の量が質量比で70%以上かつ90%以下と極めて多い。このため、当初よりアブサンデン現象の発生が懸念された。しかしながら、スラグ反応を刺激する無水せっこうの使用や、実験結果に基づいた適切な使用材料の組み合わせによる最適な配合設計、さらに湿潤養生期間の確保などの対策を講じることで、フレッシュコンクリート性状や強度は普通コンクリートと同等であり、各種耐久性も確保できた。写真－1に暴露開始から2年以上経過した試験体(100×100×200mm)のコンクリート暴露面(100×200mm)の状況を示す。屋外(内陸部)及び屋内に暴露した試験体ともに表面の劣化は確認されず、本書で検討した配合や施工条件の範囲内において、アブサンデン現象は確認されなかった。



屋外暴露（内陸部）



屋内暴露

写真－1 暴露開始から2年以上経過した高炉スラグ微粉末を高含有した
コンクリートの表面状況（暴露面: 100×200mm）

参考文献

- 1) 魚本健人, 小林一輔, 星野富夫: 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの劣化, コンクリート工学年次論文集, Vol.2, pp.69-72, 1980
- 2) 魚本健人, 小林一輔: 高炉スラグ・排煙脱硫石膏系セメントを用いたコンクリートの圧縮強度, 土木学会論文報告集, Vol.302, pp.125-138, 1980

1. 概要

高炉スラグ微粉末の反応は未だ十分に解明されていないが、既往の報告¹⁾²⁾によると、以下のように考えられている。図ー1のように、高炉スラグ微粉末は、注水直後、スラグ表面に緻密で透過性の悪い水和物（膜）を形成することで、スラグ内部への水の浸透やスラグからのイオンの放出が抑制され、スラグの核となる部分まで反応しにくくなる。そこでスラグの反応を促すため、刺激剤（セメントの水和反応で生成した水酸化カルシウム等のアルカリ性物質、せっこう等）が必要になる。ただし、スラグの反応が進行すると、水和物の析出によって粒子間摩擦力が増すため、特に高炉スラグ微粉末を高含有した配合ではフレッシュコンクリートの経時安定性が著しく低下する。このような傾向は注水から 30 分以降に顕著となり、その原因として AFl 及び C₃A (C₄AF) らのアルミネート系水和物の生成に由来すると考えられている。

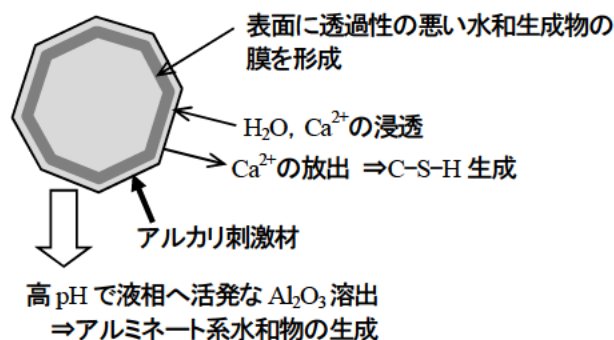
以上より、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの実用化において、経時安定性の確保に有効な対策が望まれる。

2. SF500BB の作用機構

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでは、アルミネート系水和物の生成に由来したと考えられる著しい初期ピーク発熱があり、さらに水和生成物の析出に伴って粒子間摩擦力が増加するため、スランプフローの経時安定性が低下する。そこで、初期ピーク発熱の抑制に効果のある分散剤を混合した特殊な化学混和剤 (SF500BB) を利用した。この化学混和剤は、JIS A 6204:「コンクリート用化学混和剤」に準拠した高性能 AE 減水剤としての減水効果の他に、高 pH 環境においてスラグから液相への活発な Al₂O₃ の溶出を抑制する働きを有している (図ー2)。これによりアルミネート系水和物の急激な生成が抑えられ、フレッシュコンクリート性状の経時安定性を確保することができる。

【注水直後のスラグの反応】

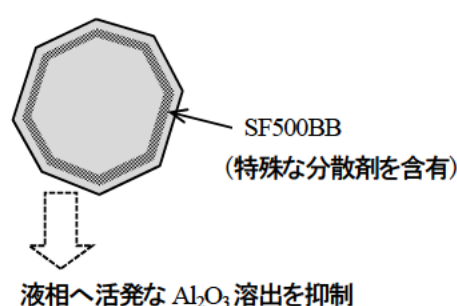
- ・透過性の悪い膜 (Pseudomorphic layer) を形成
- ・水の浸透とイオンの放出を抑制



図ー1 注水後におけるスラグ反応の模式図

【SF500BB 使用時】

- ・液相への活発な Al₂O₃ の溶出を抑制



図ー2 SF500BB 使用時の注水後スラグ反応

参考文献

- 1) 伊与田岳史：高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート，コンクリート工学，Vol.52，No.5，2014.5
- 2) 西 祐宜，小泉信一，宮川美穂，森本孝敏：各種混和材を用いたコンクリートにおける化学混和剤の適用状況と今後の課題，コンクリート工学，Vol.52，No.5，pp.480-483，2014.5
- 3) NETIS：KT-140094-A「高炉スラグ高含有コンクリート用「フローリック SF500BB・BBR」
- 4) 西 祐宜，根岸 稔，桧垣 誠，守屋健一：高炉スラグ微粉末を大量混合したコンクリートの経時安定性改善に関する一提案 その1 モルタル試験による高炉スラグ用分散剤の検討，土木学会第67回年次学術講演会，V-462，pp.923-924，2012.9
- 5) 根岸 稔，桧垣 誠，西 祐宜，守屋健一：高炉スラグ微粉末を大量混合したコンクリートの経時安定性改善に関する一提案 その2 コンクリート試験によるフレッシュ性状および耐久性，土木学会第67回年次学術講演会，V-463，pp.925-926，2012.9
- 6) (株)フローリック製品カタログ：高性能 AE 減水剤 高炉スラグ高含有コンクリート用フローリック SF500BB・BBR

付録ー4 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの基本特性（参考）

1. 単位水量の補正（減水効果）

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの配合設計において、高炉スラグ微粉末が無混入のコンクリート（普通ポルトランドセメント使用）と同程度のワーカビリティや流動性を得るための単位水量は表ー1¹⁾のような補正をするといとされる。つまり、高炉スラグ微粉末を用いた場合、単位水量を低減できる利点がある。ただし、高炉スラグ微粉末が無混入のコンクリートと同程度の空気量を確保するには、AE 剤の添加量を高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど若干多めにする必要がある。

表ー1 配合設計における単位水量の補正目安

比表面積 (cm ² /g)	置換率 (%)	単位水量	細骨材率
4,000 6,000	30	3～4%減	補正なし
	50	4～5%減	
	70	5～6%減	
8,000	30	2～3%減	
	50	3～4%減	
	70	4～5%減	

備考）化学混和剤は AE 減水剤，高性能 AE 減水剤とする。

2. ブリーディング・凝結

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのブリーディング量は、比表面積が小さく、置換率が高いほど反応が遅いため多くなる。また凝結は、比表面積が小さく、置換率が高いほど遅くなる¹⁾²⁾。

表ー2 ブリーディング量・凝結（例）（W/B=55%，スランプ 18cm）

比表面積 (cm ² /g)	置換率 (%)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)			凝結(h-m)	
		30 分	60 分	120 分	始発	終結
4,000	30	0.12	0.28	0.37	6-50	9-00
	50	0.23	0.34	0.41	7-30	9-50
	70	0.33	0.39	0.45	8-15	11-20
6,000	50	0.14	0.31	0.36	7-20	9-40
8,000	50	0.14	0.25	0.28	7-00	9-25
無混入	0	0.22	0.33	0.40	6-35	8-50

備考）本実験は、温度 20℃，湿度 80%RH の室内にて実施された結果である（参考文献 1)）。

表-3 ブリーディング量・凝結（例）（W/B=45%, W=154kg/m³固定）

置換率 (%)	ブリーディング		凝結(h-m)	
	終結時間 (h-m)	率 (%)	始発	終結
0	4-30	2.8	5-35	7-30
30	6-00	4.6	7-35	9-45
50	7-30	6.3	8-50	11-15
70	8-30	7.9	11-30	14-20

備考) 上記の数値は、参考文献2)の図から読み取った値である。

3. 断熱温度上昇特性

20℃環境下での水和熱は置換率にほぼ比例して低減する傾向がある。しかし、マスコンクリートの中心部のようにほぼ断熱状態にある環境下では、水和熱が蓄積されて高温になる。このため、断熱温度上昇量を置換率で整理することは困難となる。高炉スラグ微粉末の置換率が極めて高い場合、断熱温度上昇速度及び到達温度は著しく低減され、マスコンクリートの施工において有利となる。一方で、置換率が小さい場合では、断熱温度上昇速度は低減されるものの、最高到達温度は高炉スラグ微粉末が無混入の場合に比べて大きくなることもある。この理由として、高炉スラグ微粉末の水和反応は温度依存性が高く、高温環境下では高炉スラグ微粉末の反応が活性化するためと考えられている。つまり、セメントから生成する水酸化カルシウム(CH)と高炉スラグ微粉末の量に関係しており、置換率が50%程度（高炉セメントB種相当）では反応活性に伴って発熱量が増加する。しかし、置換率が60%を超えるとセメントから生成する水酸化カルシウムが少ないため、高炉スラグ微粉末の活性化を促す量に到達できず、スラグ自身の反応量も減少するため²⁾と言われている。

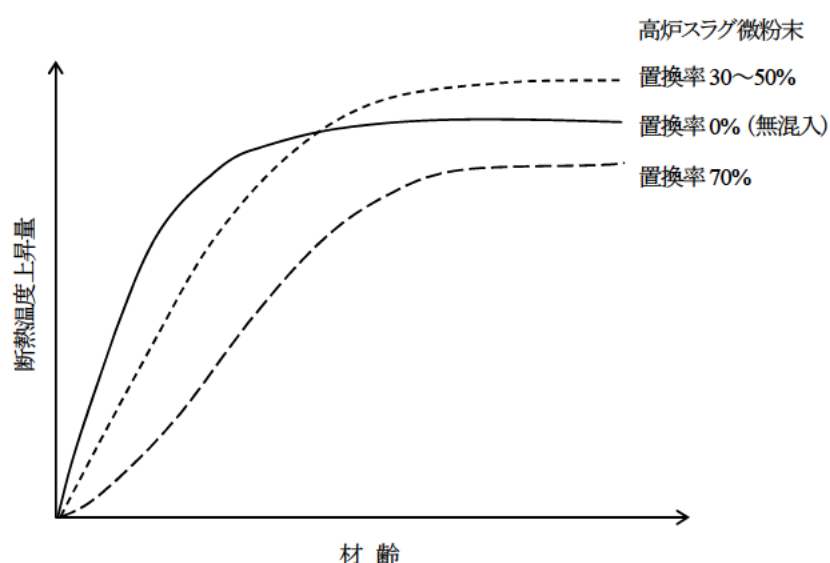


図-1 高炉スラグ微粉末の置換率と断熱温度上昇曲線の概念図（文献1)を参考）

4. 圧縮強度・ヤング係数

圧縮強度は、高炉スラグ微粉末の増加に伴って初期強度発現が低下する。これは、高炉スラグ微粉末が混入したことによるクリンカー量の減少に加え、クリンカーの水和反応ならびに高炉スラグ微粉末の水和反応によるものと考えられる²⁾。一方、長期強度については、高炉スラグ微粉末の混和が長期強度増進に寄与すると言われているが、実構造物の調査では必ずしも長期強度の増進が著しいとは言えないデータもある。

ヤング係数について、一般的に、圧縮強度と一定の関係があることが知られており、圧縮強度の増加とともにヤング係数も増加する傾向がある。また、その関係は置換率が高くなっても同程度であり、高炉スラグ微粉末を無混入のコンクリートとも差はほとんど認められない。ただし、湿潤養生期間を十分に確保していない場合にはヤング係数が小さくなるとの報告もあり、まだ未解明な点が多い。

参考文献

- 1) 依田彰彦：技術フォーラム 資源の有効利用とコンクリート 第5回高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート，コンクリート工学，Vol.34，No.4，pp.72-82，1996.4
- 2) 伊与田岳史：高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート，コンクリート工学，Vol.52，No.5，2014.5
- 3) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現状，1992.6

付録ー5 フレッシュコンクリート性状

■ 目的

高炉スラグ微粉末を 70%置換 (W/B=35%) 及び 90%置換 (W/B=50%) で用いたコンクリートを対象に、環境温度の違いがフレッシュコンクリートの性状に与える影響を確認

■ 試験条件及び要因

【試験条件】	混和材料：高炉スラグ微粉末 4000 (無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添)
	経時試験：3～4 回 (練直 (0 または 5 分), 注水から 30 分, 60 分, (90 分))
【要 因】	環境温度：3 水準 10℃, 20℃, 30℃
	高炉スラグ微粉末の置換率：2 水準 70%, 90% (質量比)
	水結合材比 (セメント種類)：3 水準 35% (H:早強), 50% (N:普通), 50% (H:早強)

表ー1 及び表ー2 に高炉スラグ微粉末を 70%置換及び 90%置換で用いたコンクリートを対象に、環境温度の異なる条件下でのフレッシュコンクリート性状の経時変化 (練直～90 分後) をまとめて示す。

1. スランプまたはスランプフロー

図ー1 にスランプまたはスランプフローの経時変化及び経時変化量 (練直を 0 として) を示す。同図より、W/B=35%の場合、環境温度の違いによらず、練直から注水 30 分後にかけてやや大きくなり、以降は低下する傾向がみられた。一方、W/B=50%の場合、セメント種類によらず、練混ぜ直後から緩やかに小さくなる傾向がみられた。なお 30℃の時には遅延形の化学混和剤を使用しており、N セメント配合ではその効果が認められた。

2. 空気量

図ー2 に空気量の経時変化及び経時変化量 (練直を 0 として) を示す。同図より、W/B=35%の場合、全ての環境温度で、練直後から増加する傾向がみられた。一方、W/B=50%の場合、セメント種類によらず、練混ぜ直後から緩やかに小さくなる傾向がみられた。

以上より、高炉スラグ微粉末を高含有した配合でも、環境温度の違いによらず、スランプまたはスランプフロー及び空気量は、注水から 60 分後または 90 分後の間でも所定の性状を保持していた。

表-1 環境温度の異なる条件下でのフレッシュコンクリート性状の経時変化 (90%置換)

水結 合材比 (%)	スラグ 置換率 (%)	セメン ト種 類	環境 温度 (℃)	スランブフロー(cm) (42.5±7.5cm)			
				空気量(%) (4.5±1.5%)			
				コンクリート温度(℃)			
				練直(5分後)	30分後	60分後	90分後
35	90	H	10	40.0	42.5	37.0	35.5
				4.5	5.2	5.5	5.1
				11.7	11.8	11.4	11.4
			20	44.0	46.0	41.0	40.0
				4.0	4.7	5.0	5.1
				21.0	21.0	21.0	21.0
			30	48.5	50.0	46.0	47.0
				3.2	4.0	4.2	4.3
				31.0	30.0	30.0	29.0

備考) 化学混和剤: 高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ高含有用) の標準形のみ使用

H: 早強ポルトランドセメント

表-2 環境温度の異なる条件下でのフレッシュコンクリート性状の経時変化 (70%置換)

水結 合材比 (%)	スラグ 置換率 (%)	セメン ト種 類	環境 温度 (℃)	スランブ(cm) (12.0±2.5cm)			
				空気量(%) (4.5±1.5%)			
				コンクリート温度(℃)			
				練直(0分後)	30分後	60分後	90分後
50	70	N	10	14.5	13.5	11.5	—
				4.8	4.7	4.5	—
				10.9	10.6	10.4	—
			20	14.5	13.5	12.0	—
				5.3	5.1	4.9	—
				20.0	20.0	19.0	—
			30	14.0	14.5	13.0	13.0
				4.6	4.8	4.3	4.2
				29.0	29.0	29.0	29.0
		H	10	12.0	11.0	10.0	—
				4.1	3.7	3.5	—
				11.0	10.9	10.7	—
			20	14.5	13.5	12.0	—
				5.7	5.4	4.8	—
				20.0	20.0	20.0	—
			30	14.0	13.5	11.5	11.5
				4.7	4.8	4.2	4.1
				29.0	29.0	29.0	29.0

備考) 化学混和剤: AE 減水剤 (高機能タイプ) を使用し, 10~20℃ (標準形), 30℃ (遅延形) を使用

N (普通ポルトランドセメント), H (早強ポルトランドセメント)

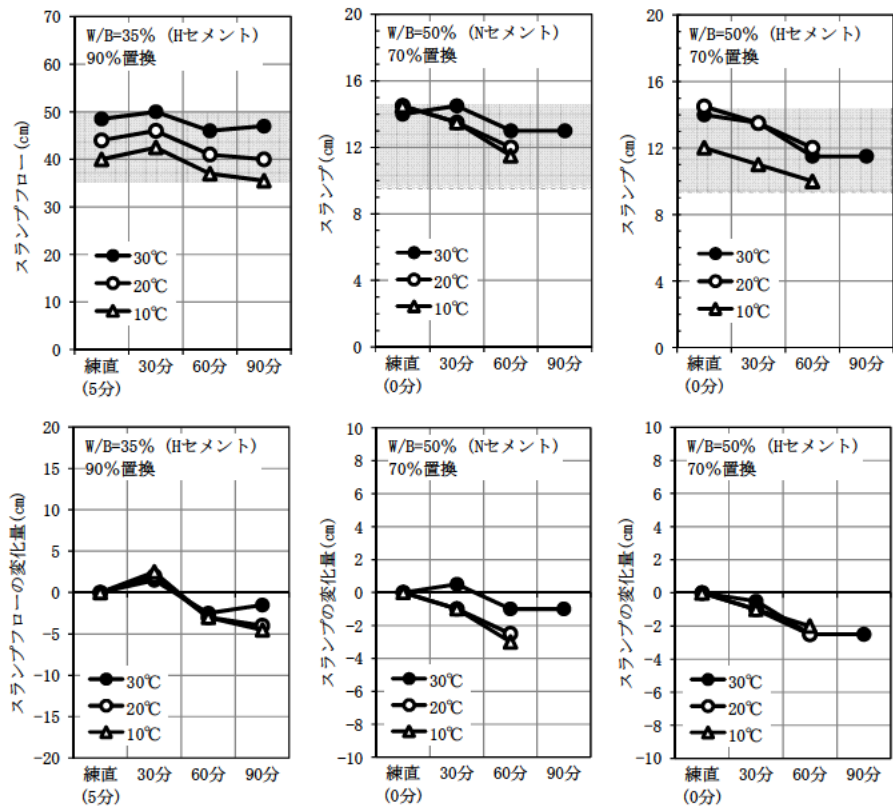


図-1 スランプ (またはスランプフロー)
(上段: 経時変化, 下段: 経時変化量 (練直を0として))

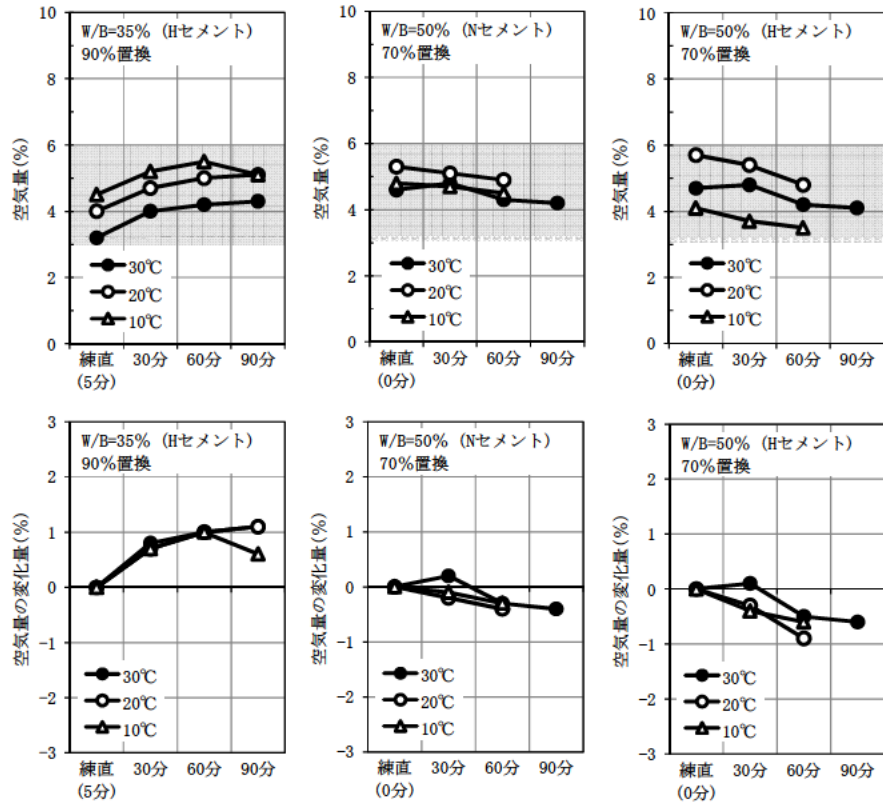


図-2 空気量
(上段: 経時変化, 下段: 経時変化量 (練直を0として))



練直（静置 5 分後）： 44.0cm



30 分後：46.0cm



60 分後：41.0cm



90 分後：40.0cm

写真-1 コンクリートのスランプフロー経時変化 (20℃, W/B=35%, 90%置換, 早強セメント)



練直（0 分後）： 14.5cm



練直（0 分後）： 14.5cm



30 分後：13.5cm



30 分後：13.5cm



60 分後：12.0cm

写真-2 コンクリートのスランプ経時変化 (20℃, W/B=50%, 70%置換, 普通セメント)



60 分後：12.0cm

写真-3 コンクリートのスランプ経時変化 (20℃, W/B=50%, 70%置換, 早強セメント)

付録－6 化学混和剤の選定

■ 目的

化学混和剤の種類の違いが高炉スラグ微粉末を高含有したフレッシュコンクリート性状（スランプ，空気量）の経時保持性に与える影響を確認し，適切な化学混和剤の種類を選定

■ 試験条件及び要因

【試験条件】	水結合材比	：	50%
	高炉スラグ微粉末の置換率	：	70%（質量比）
	混和材料	：	高炉スラグ微粉末4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で2.0%内添）
	経時試験	：	3～4回（練直（0または5分後），注水から30分，60分，（90分後））
【要 因】	化学混和剤	：	5種類 AE 減水剤 標準形（I 種）（主成分の異なる2種類） AE 減水剤 遅延形（I 種） AE 減水剤（高機能タイプ）標準形（I 種） AE 減水剤（高機能タイプ）遅延形（I 種）
	環境温度	：	3水準 10℃，20℃，30℃
	セメント種類	：	2種類 N:普通，H:早強

表－1 各種化学混和剤の主成分及び物性

名 称	区 分		主成分	外観	塩化物 イオン量 (%)	アルカリ 量 (%)	密度 (g/cm ³)
AE 減(標)①	AE 減水剤	標準形 (Ⅰ種)	リグニンスルホン酸塩と オキシカルボン酸塩	黒褐色 液体	0.04	0.56	1.04～ 1.10
AE 減(標)②			リグニンスルホン酸化合物とポリオール の複合体	暗褐色 液体	0.03	1.0	1.04～ 1.08
AE 減(遅)		遅延形 (Ⅰ種)	リグニンスルホン酸塩と オキシカルボン酸塩	黒褐色 液体	0.05	0.68	1.04～ 1.10
AE 減(高機能)(標)	AE 減水剤 (高機能タイプ)	標準形 (Ⅰ種)	リグニンスルホン酸塩、オ キシカルボン酸塩とポリ カルボン酸系化合物	黒褐色 液体	0.04	1.1	1.04～ 1.12
AE 減(高機能)(遅)		遅延形 (Ⅰ種)		黒褐色 液体	0.05	1.4	1.05～ 1.13

備考) 塩化物イオン量，アルカリ量，密度の値は分析値例である。

1. 環境温度

表－2 に各種混和剤を用いた時のフレッシュコンクリート性状（スランプ、空気量）の経時変化量を環境温度（10℃、20℃、30℃）ごとに示す。また図－1 及び図－2 にスランプ及び空気量の経時変化量を図示した。

1.1 10℃（冬期相当）～20℃（標準期）の場合

一般的な AE 減水剤（標準形）ではスランプの低下がやや大きく、注水 60 分後には 4cm 以上ロスした。一方、高機能タイプ（標準形）を用いた場合、スランプ及び空気量ともに経時保持性が改善されており、実用的に問題ないことがわかった。

1.2 30℃（夏期相当）の場合

5 種類の化学混和剤を用いてそれぞれでのフレッシュコンクリート性状の経時変化を確認した。その結果、一般的な AE 減水剤（標準形）では、主成分の違いでやや傾向は異なるものの、スランプ及び空気量ともに注水から 30 分以降で大きなロスが確認された。次に、AE 減水剤の遅延形を用いた場合、標準形よりもやや性状保持機能が高いものの、注水 60 分後には 5cm 程度もロスしてワーカビリティが失われた。そこで、AE 減水剤と高性能 AE 減水剤の中間的な性能を有する高機能タイプ（標準形）を用いた結果、空気量の変化量は小さいものの、スランプの低下は注水 60 分後で 4cm とやや大きな結果となった。最後に、AE 減水剤（高機能タイプ）の遅延形を使用した所、スランプ及び空気量ともに注水から 90 分経過時点でも所要のワーカビリティを保持しており、施工上、問題ないレベルにあることがわかった。

以上より、水結合材比 50%で高炉スラグ微粉末の置換率 70%の場合、化学混和剤は「AE 減水剤（高機能タイプ）」を使用し、性能による区分は環境温度が 10～20℃では「標準形」、30℃では「遅延形」を基本とする。

表-2 化学混和剤の違いによるフレッシュコンクリート性状経時変化量

水結合材比(%)	スラグ置換率(%)	セメント種類	環境温度(℃)	化学混和剤の名称	スランブの経時変化量 (cm)			
					空気量の経時変化量 (%)			
					練直 (0 分後)	30 分後	60 分後	90 分後
50	70	N	10	AE 減(標)①	0	-2.5	-4.5	—
					0	-0.3	-0.5	—
				AE 減(標) (高機能)	0	-1.0	-3.0	—
					0	-0.1	-0.3	—
			20	AE 減(標)①	0	-1.5	-4.0	—
					0	-0.4	-0.7	—
				AE 減(標) (高機能)	0	-1.0	-2.5	—
					0	-0.2	-0.4	—
			30	AE 減(標)①	0	-1.5	-7.5	—
					0	-0.8	-1.8	—
				AE 減(標)②	0	-7.0	-10.5	—
					0	-0.8	-2.3	—
				AE 減(遅)	0	-2.0	-5.5	—
					0	-0.6	-1.1	—
				AE 減(高機能) (標)	0	-1.5	-4.0	—
					0	-0.2	-0.7	—
				AE 減(高機能) (遅)	0	0.5	-1.0	-1.0
					0	0.2	-0.3	-0.4

備考) 目標スランブ : 12.0±2.5cm, 目標空気量 : 4.5±1.5%

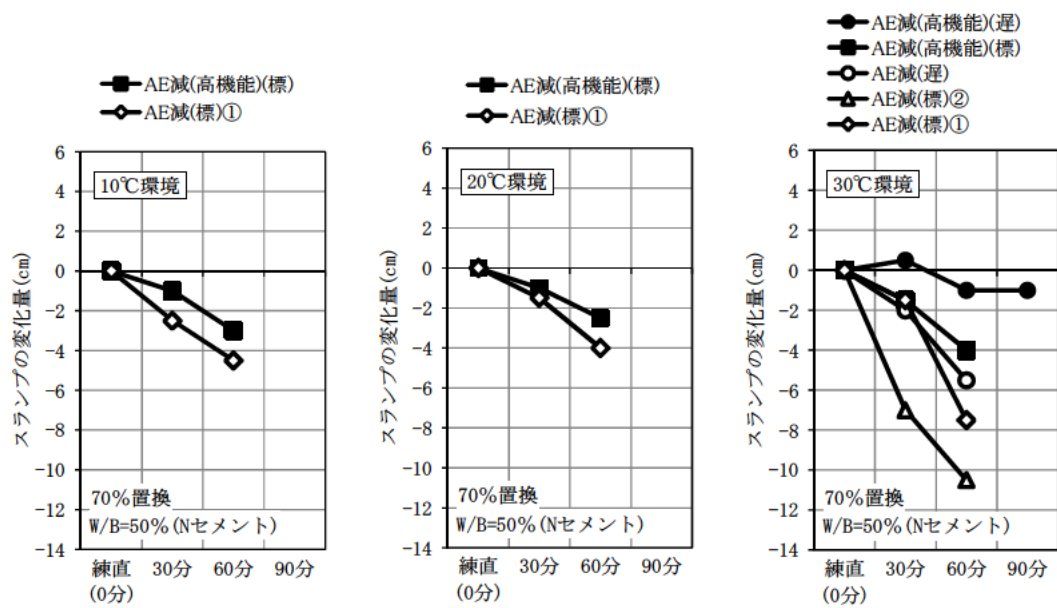


図-1 各種化学混和剤を用いた時のスランプの経時変化量

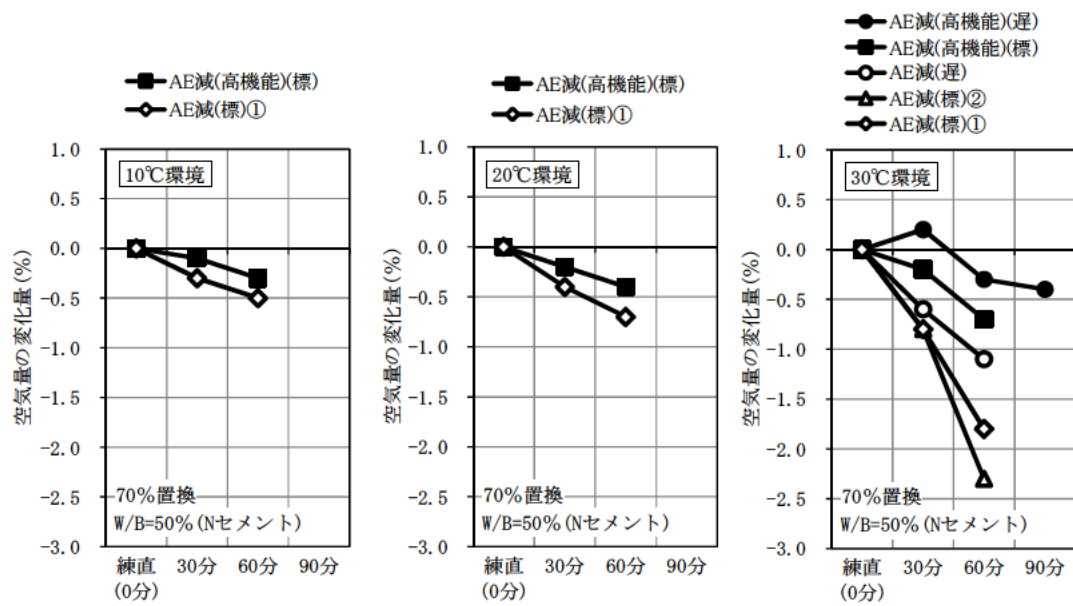


図-2 各種化学混和剤を用いた時の空気量の変化量

2. セメント種類

表-3 に環境温度 20℃及び 30℃の条件下で、セメント種類 (N:普通, H:早強) の違いによるフレッシュコンクリート性状 (スランプ, 空気量) の経時変化量をそれぞれ示す。また, 図-3 にスランプ及び空気量の経時変化量を図示した。なお, 使用した化学混和剤の種類は 20℃及び 30℃ともに AE 減水剤 (高機能タイプ) で, 20℃の時は標準形, 30℃の時は遅延形を使用した。

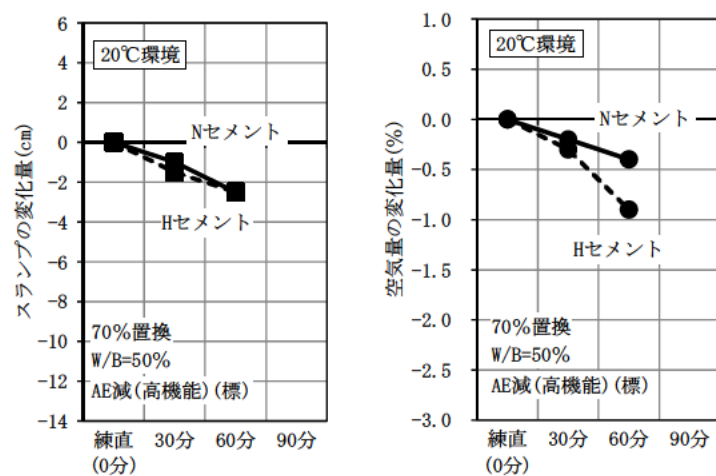
試験の結果, 20℃の時, N 及び H の両セメントは時間の経過とともにスランプ及び空気量が低下する傾向が確認された。特に, H セメントでは空気量が注水から 60 分後にやや小さくなったが, 変化量自体は所要性能を逸脱するような値ではなかった。また, 30℃の時も, N セメント及び H セメントともに所要性能の範囲内で結果は良好であった。ただし, H セメントは, N セメントと比較して, 遅延形の化学混和剤を使用しても経時保持性がやや劣った。

以上より, (本検討配合の範囲内において), 環境温度 20℃及び 30℃の条件で, 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート (高炉スラグ微粉末 70%置換) におけるフレッシュコンクリート性状の経時保持性を確保する観点から, セメント種類は N または H のどちらでも問題ないことがわかった。なお, セメント種類の決定においては, コンクリートの凝結特性や硬化体の強度発現性, 施工時の環境温度 (特に低温時) 等について十分に配慮することが望ましい。

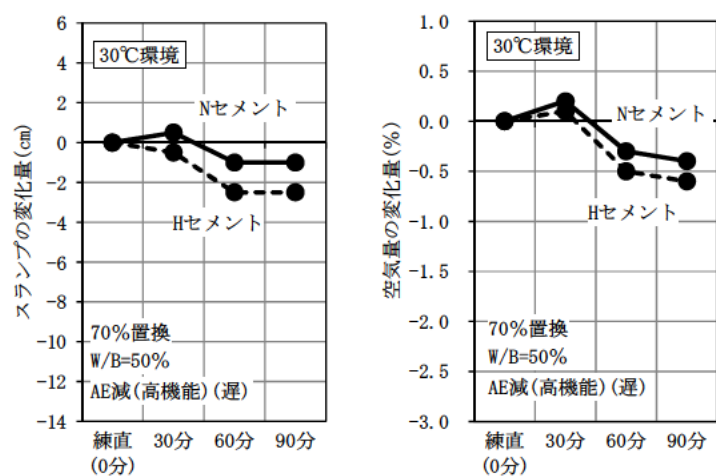
表-3 セメント種類及び環境温度の違いによるフレッシュコンクリート性状の経時変化量

水結材比(%)	スラグ置換率(%)	セメント種類	環境温度(℃)	化学混和剤の名称	スランプの経時変化量 (cm)			
					空気量の経時変化量 (%)			
					練直 (0分後)	30分後	60分後	90分後
50	70	N	20	AE 減(高機能) (標)	0	-1.0	-2.5	
					0	-0.2	-0.4	
		H			0	-1.5	-2.5	
					0	-0.3	-0.9	
		N	30	AE 減(高機能) (遅)	0	0.5	-1.0	-1.0
					0	0.2	-0.3	-0.4
		H			0	-0.5	-2.5	-2.5
					0	0.1	-0.5	-0.6

備考) 目標スランプ : $12.0 \pm 2.5\text{cm}$, 目標空気量 : $4.5 \pm 1.5\%$



(a) 20℃の場合



(b) 30℃の場合

図-3 セメント種類の違いがスランプ及び空気量の経時変化量に与える影響

付録ー7 化学混和剤（SF500BB）の上限使用量

■ 目的

化学混和剤（高炉スラグ高含有用：SF500BB）の使用量の違いが高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの凝結特性に与える影響の確認

■ 試験条件及び要因

【試験条件】	水結合材比	： 35%
	セメント種類	： 早強ポルトランドセメント
	混和材料	： 高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添)
	高炉スラグ微粉末の置換率	： 90%（質量比）
	結合材量(B)	： 471kg/m ³ (=C+BFS)
	化学混和剤	： 高性能 AE 減水剤 標準形（Ⅰ種）（高炉スラグ高含有用: SF500BB）
【要 因】	化学混和剤の使用量	： 4 水準 B×0.9%, 1.2%, 1.3%, 1.4%

高炉スラグ微粉末の置換率 90%のコンクリート配合において、化学混和剤に高炉スラグ高含有用の高性能 AE 減水剤（SF500BB）を用いた場合、混和剤の使用量（B×%）の違いがコンクリートの凝結特性に与える影響を試験で確認した。表ー1 及び図ー1 に試験結果を示す。同図より、B=471kg/m³の時、SF500BB の使用量が B に対して 1.3%以上になると凝結の始発・終結時間が急激に遅延する傾向が確認された。

次に、図ー2 に 20℃環境でのコンクリート 1m³あたりの混和剤の絶対量と凝結始発時間との関係を示す。同図より、混和剤の絶対量が 6.0kg/m³ 以上になると凝結の始発が遅延する傾向が認められた。この理由について、混和剤中に含まれている特殊変性リグニンの成分による影響と推定されるが現時点では不明である。

以上より、SF500BB の使用量と凝結特性との間には相関性が認められ、20℃環境でコンクリート 1m³あたりの混和剤の絶対量は 6.0kg 未満（B=471kg/m³の時、B×1.3%未満）がスラグリート配合における適正量と考える。なお、温度条件が変わると混和材量による凝結特性への影響も異なるため、特に低温条件では事前に凝結特性を確認することが望ましい。

表-1 化学混和剤 SF500BB の使用量と凝結特性

環境温度 (°C)	W/B (%)	B (kg/m ³)	高炉スラグ微 粉末の置換率 BFS/B(%)	化学混和剤 SF500BB 使用量 (B×%)	凝結時間(h-min)	
					始発	終結
20	35	471	90	0.9	8-20	14-05
				1.2	9-00	14-55
				1.3	11-55	18-40
				1.4	13-30	21-05

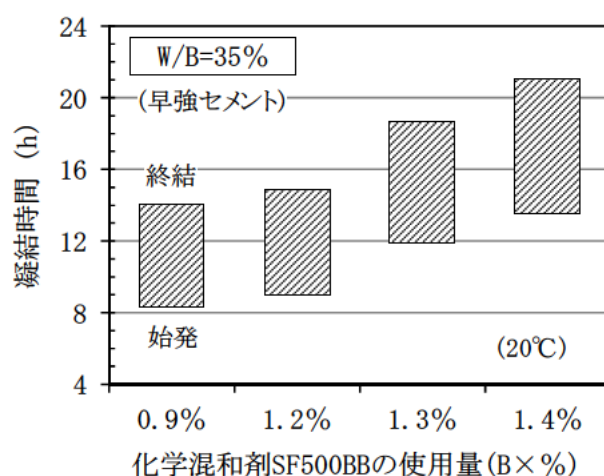


図-1 化学混和剤 SF500BB の使用量と凝結特性

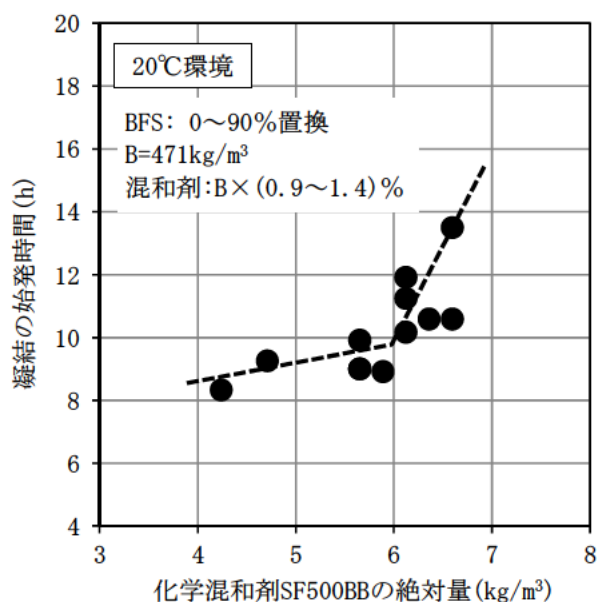


図-2 化学混和剤 SF500BB の絶対量と凝結始発時間

付録ー8 化学混和剤（主剤）の使用量

■ 目的

コンクリートの練上がり温度や配合条件の違いが化学混和剤（主剤）の使用量に与える影響の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験条件】	セメント種類：	H:早強, N:普通
	混和材料	： 高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添)
	化学混和剤（主剤）：	3 種類
		AE 減水剤（高機能タイプ）標準形（I 種）SV10
		AE 減水剤（高機能タイプ）遅延形（I 種）RV10（30℃のみ）
		高性能 AE 減水剤 標準形（I 種）（高炉スラグ高含有用）SF500BB
【要 因】	コンクリートの練上がり温度：	10～30℃程度
	高炉スラグ微粉末の置換率	： 5 水準 0%, 30%, 50%, 70%, 90%（質量比）
	結合材水比（B/W）	： 90%置換の時 3 水準 2.22, 2.86, 3.33
		： 70%置換の時 3 水準 1.67, 2.00, 2.50

1. コンクリートの練上がり温度

コンクリートの練上がり温度と化学混和剤の使用量との関係について、図ー1 に化学混和剤の種類が高性能 AE 減水剤（SF500BB）及び AE 減水剤（高機能タイプ）（SV10, RV10）を用いた配合での結果を示す。なお、高炉スラグ微粉末の置換率は、SF500BB 配合で 90%置換、SV10, RV10 配合で 70%置換である。同図より、練上がり温度と化学混和剤の使用量との間には正の相関が認められ、練上がり温度が高いほど化学混和剤の使用量が増加した。これは一般的な知見と同じである。なお、双方の関係近似式は図中に示したとおりである。

次に、上記の関係近似式を用いて、練上がり温度 5～35℃での各種混和剤の使用量を計算し、高性能 AE 減水剤（SF500BB）及び AE 減水剤（高機能タイプ）（SV10, RV10）の使用量（目安）を求めた。結果は表ー1 に示したとおりである。同表より、化学混和剤の使用量（目安）は、本配合の範囲内において、SF500BB の場合、 $B \times 0.7 \sim 1.3\%$ （約 3～6kg/m³）、SV10, RV10 の場合、 $B \times 0.6 \sim 1.5\%$ （約 2～5kg/m³）であった。

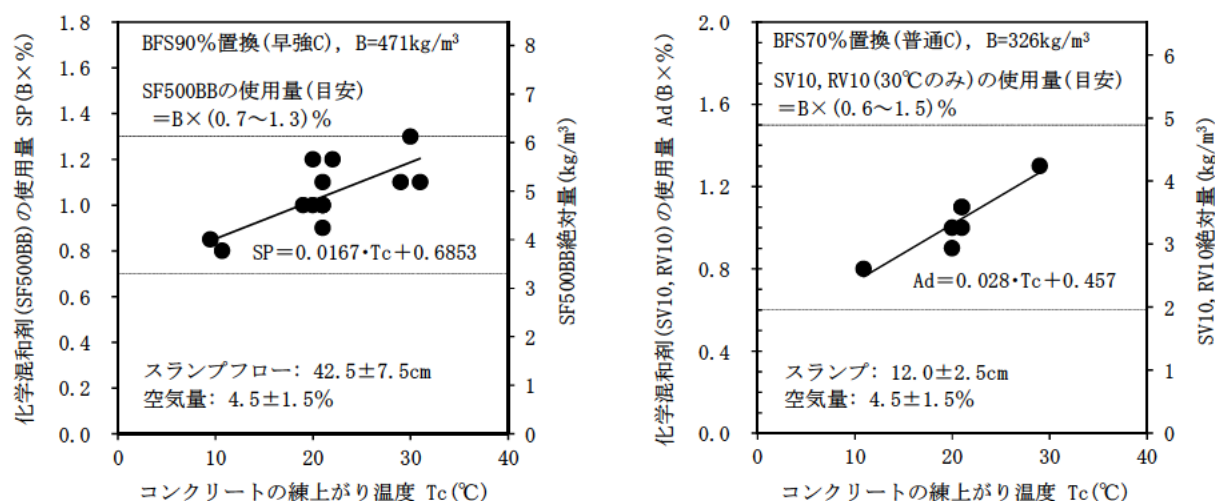


図-1 コンクリートの練上がり温度と化学混和剤の使用量との関係

表-1 化学混和剤の使用量 (目安)

		化学混和剤の使用量 (計算値) ($B \times \%$) (換算絶対量: kg/m^3)			
化学混和剤の種類		高性能 AE 減水剤 標準形 (I 種) (高炉スラグ高含有用) SF500BB		AE 減水剤 標準形 遅延形 (I 種) (高機能タイプ) SV10, RV10 (30℃のみ)	
配合条件	スランプまたはスランプフロー	スランプフロー $42.5 \pm 7.5\text{cm}$		スランプ 12.0 ± 2.5	
	水結合材比 W/B(%)	35		50	
	結合材量 $B(\text{kg/m}^3)$	471		326	
	セメント種類	H (早強)		N (普通)	
	高炉スラグ微粉末の置換率 BFS/B(%)	90		70	
練上がり温度と混和剤量との関係近似式*		$SP=0.0167 \times Tc+0.6853$		$Ad=0.028 \times Tc+0.457$	
コンクリートの練上がり温度	5℃	0.77 (3.6)	使用量 (目安) $B \times 0.7 \sim 1.3\%$ (約 $3 \sim 6\text{kg/m}^3$)	0.60 (1.9)	使用量 (目安) $B \times 0.6 \sim 1.5\%$ (約 $2 \sim 5\text{kg/m}^3$)
	10℃	0.85 (4.0)		0.74 (2.4)	
	20℃	1.02 (4.8)		1.02 (3.3)	
	30℃	1.19 (5.6)		1.30 (4.2)	
	35℃	1.27 (6.0)		1.44 (4.7)	

※SP, Ad: 化学混和剤の使用量 ($B \times \%$), Tc: コンクリートの練上がり温度 (℃)

2. 結合材水比 (B/W)

20℃環境で単位水量 (W) 一定として結合材水比 (B/W) の値を変化させた場合の化学混和剤の使用量を図-2 に示す。同図より、結合材水比の値が大きくなると化学混和剤の使用量も線形的に増加した。このため、本検討配合において、結合材水比から化学混和剤量を概ね設定できると考える。

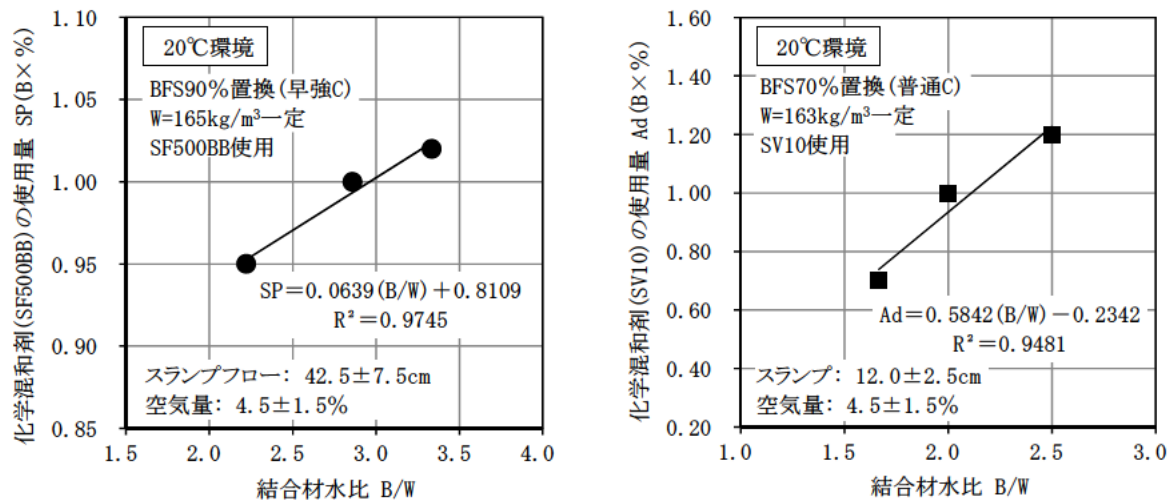


図-2 結合材水比 (B/W) と化学混和剤の使用量との関係

3. 高炉スラグ微粉末の置換率 (BFS/B)

高炉スラグ微粉末の置換率 (BFS/B) と化学混和剤の使用量との関係を図-3 に示す。なお、高炉スラグ微粉末の置換率は全 5 水準 (0%, 30%, 50%, 70%, 90%) で、図中の配合は W/B=35% (H:早強) と 50% (N:普通) の 2 配合、単位水量 (W) はそれぞれの配合で一定とした。同図より、高炉スラグ微粉末の置換率が多いほど、化学混和剤の使用量は一次近似的に減少した。これは、高炉スラグ微粉末の使用による減水効果によるものである。

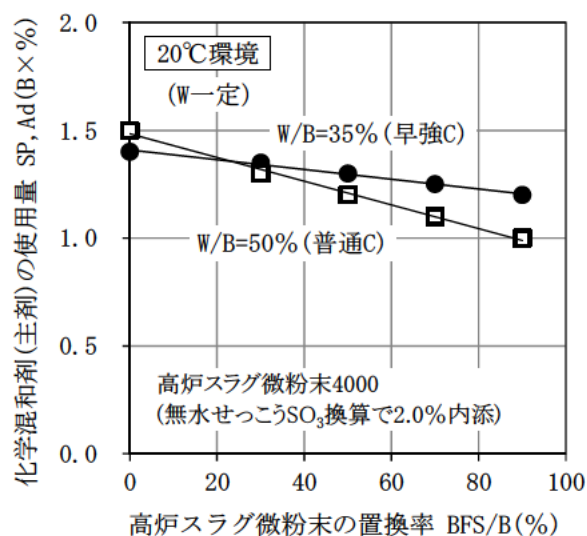


図-3 高炉スラグ微粉末の置換率と化学混和剤の使用量との関係

付録－9 化学混和剤（助剤）の使用量

■ 目的

高炉スラグ微粉末の置換率の違いがAE剤の使用量に与える影響の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験条件】 環境温度：20℃

混和材料：高炉スラグ微粉末4000(無水せっこうを三酸化硫黄(SO_3)換算で2.0%内添)

化学混和剤（主剤）：2種類 AE減水剤（高機能タイプ）標準形（I種）

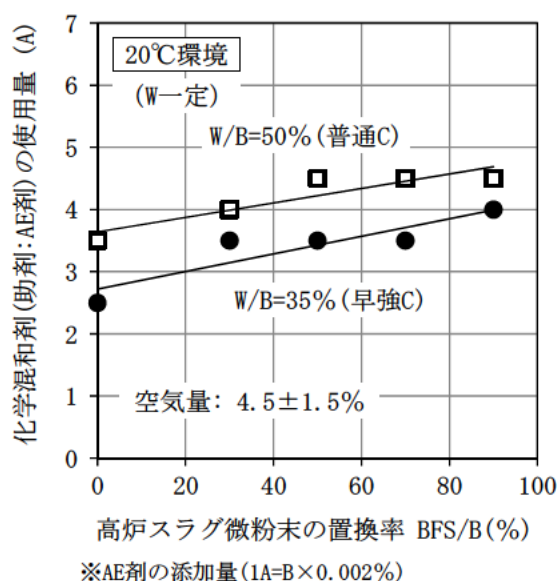
高性能AE減水剤 標準形（I種）（高炉スラグ高含有用）

化学混和剤（助剤）：1種類 AE剤（主成分：樹脂酸塩系界面活性剤）

【要因】 高炉スラグ微粉末の置換率：5水準 0%，30%，50%，70%，90%（質量比）

水結合材比（セメント種類）：2水準 35%（H：早強），50%（N：普通）

図－1 に高炉スラグ微粉末の置換率（BFS/B）とAE剤の使用量との関係を示す。空気量はすべて $4.5 \pm 1.5\%$ である。なお、図中には水結合材比（W/B）35%と50%配合の結果を併記し、前者は高性能AE減水剤、後者はAE減水剤（高機能タイプ）の化学混和剤を使用した。同図より、水結合材比の値によらず、空気量を同程度確保するため、AE剤の使用量は高炉スラグ微粉末の置換率が高いほどやや多めに添加する必要があった。これは、粉体中に占める高炉スラグ微粉末の比率が高いほど、空気連行性が低下するためと考える。



図－1 高炉スラグ微粉末の置換率とAE剤の使用量との関係

付録ー10 ブリーディング

■ 目的

環境温度が高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートのブリーディングに与える影響の確認

■ 試験方法, 試験条件及び要因

【試験方法】	JIS A 1123:「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠		
【試験条件】	混和材料 : 高炉スラグ微粉末4000(無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で2.0%内添)		
	水結合材比(セメント種類) : 35%(H:早強), 50%(N:普通)		
	高炉スラグ微粉末の置換率 : 70%, 90%(質量比)		
【要 因】	環境温度	: 3水準	10℃, 20℃, 30℃
	セメント種類	: 2種類	普通(N), 早強(H)
	化学混和剤の性能による区分	: 2種類	標準形, 遅延形

1. 環境温度

表ー1, 図ー1 に水結合材比(W/B) 35%, 高炉スラグ微粉末 90%置換の条件で, 環境温度 10℃, 20℃, 30℃におけるブリーディング試験結果を示す。同図表より, 全ての環境温度でブリーディングの発生が測定開始から 60 分以上経過してからとやや遅く, また発生終了は環境温度 10℃及び 20℃では約 8 時間(450~480 分), 環境温度 30℃でも 6 時間(360 分)を要しており, 一般的なコンクリートに比べて発生終了までに時間を要した。一方, ブリーディング率は環境温度の違いによらず概ね 1%程度と極めて小さく, 一般的な粉体量の多い配合と同程度の結果であった。

2. セメント種類

図ー2 に水結合材比(W/B) 50%, 高炉スラグ微粉末 70%置換の条件で, セメント種類 N または H でのブリーディング試験結果を環境温度別に示す。同図より, 20℃及び 30℃ではセメント種類によらず概ね同程度の傾向を示したが, 10℃では N よりも H の方がやや少なく, その量は 20℃と同程度であった。

表-1 ブリーディング率 (W/B=35%, W=165kg/m³ 固定)

環境温度 (°C)	ブリーディング発生時間		ブリーディング率 (%)
	始発 (分)	終結 (分)	
10	90	480	0.96
20	120	450	0.91
30	60	360	1.15

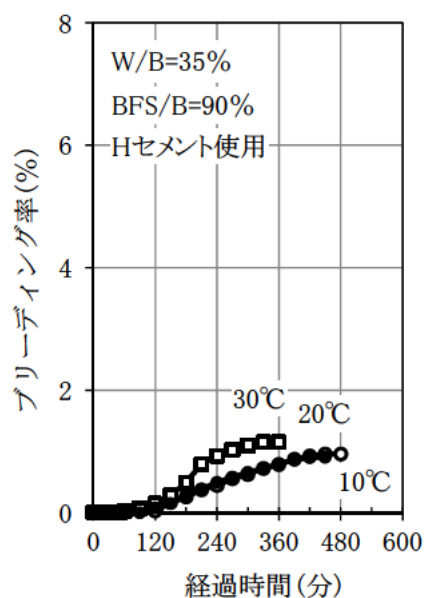


図-1 環境温度の違いによるブリーディング率 (W/B=35%, BFS/B=90%)

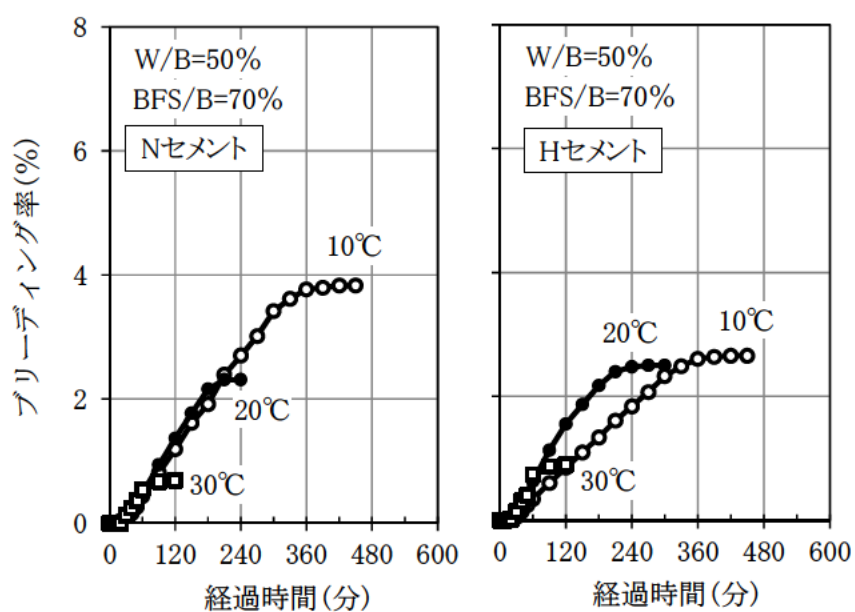


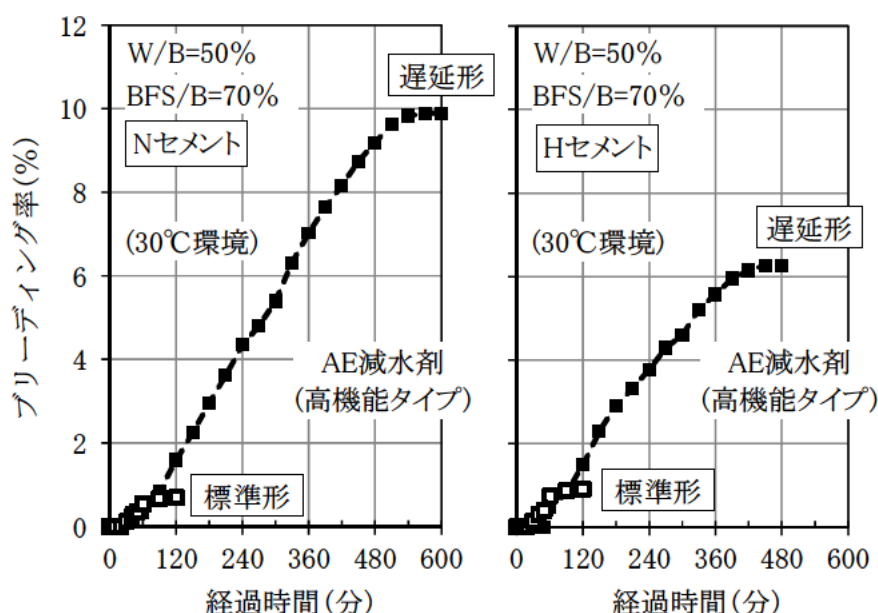
図-2 セメント種類の違いによるブリーディング率 (W/B=50%, BFS/B=70%)

3. 化学混和剤の性能による区分

表－2、図－3 に 30℃環境で水結合材比 (W/B) 50%, 高炉スラグ微粉末 70%置換の条件において、化学混和剤の性能による区分 (標準形, 遅延形) の違いがブリーディング率に与える影響を示す。化学混和剤の性能による区分を施工性確保のため標準形から遅延形に変更した場合、ブリーディングの発生量は大幅に増え、終結時間も遅くなる結果となった。しかしながら、セメント種類が H ではブリーディング率は N に比べて約 4%低減し、終結時間も 120 分程度早くなることがわかった。このため、本配合の範囲内において、気温の高い条件では H セメントをベースとして、化学混和剤には遅延形を用いることが望ましい結果となった。

表－2 ブリーディング率 (W/B=50%, W=163kg/m³ 固定)

環境温度 (℃)	セメント 種類	高炉スラグ微粉末 の置換率 BFS/B (%)	AE 減水剤 (高機能タイプ) の性能による区分	発生時間	
				終結時間 (分)	ブリーディング率 (%)
30	N	70	標準形	120	0.69
			遅延形	600	9.90
	H	70	標準形	120	0.90
			遅延形	480	6.26



図－3 化学混和剤の性能による区分の違いがブリーディング率に与える影響

【参考】

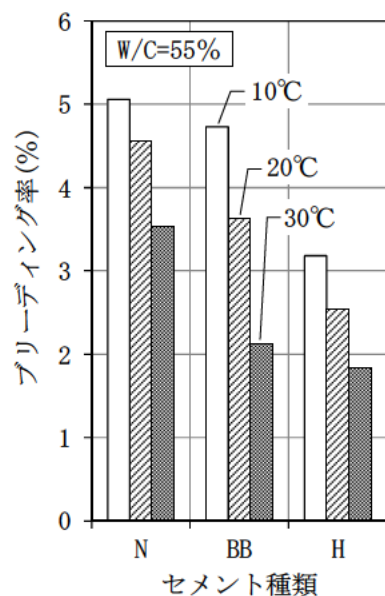


図-4 参考値

(太平洋セメント総合技術資料¹⁾ より)

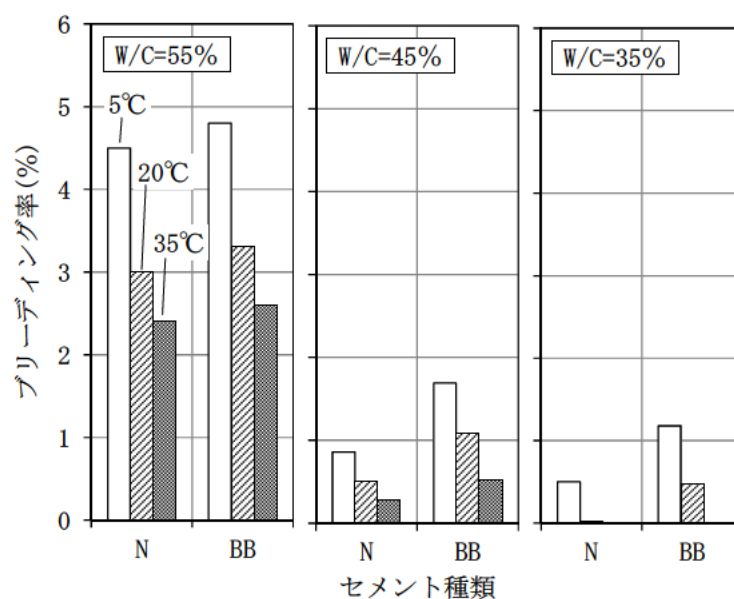


図-5 参考値

(宇部三菱セメント技術資料²⁾ より)

参考文献

- 1) 太平洋セメント株式会社：セメント総合技術資料
- 2) 宇部三菱セメント株式会社：技術資料 第6版, 2013.4

付録－11 凝結特性

■ 目的

各種要因がコンクリートの凝結特性に与える影響の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験方法】 JIS A 1147:「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠

【試験条件】 混和材料: 高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO₃)換算で 2.0%内添)
化学混和剤（主剤）： 3 種類

AE 減水剤（高機能タイプ）標準形（I 種）

AE 減水剤（高機能タイプ）遅延形（I 種）

高性能 AE 減水剤 標準形（I 種）（高炉スラグ高含有用）

【要 因】 高炉スラグ微粉末の置換率 ： 5 水準 0%, 30%, 50%, 70%, 90%（質量比）
水結合材比 ： 2 水準 35%, 50%
環境温度 ： 3 水準 10℃, 20℃, 30℃
セメント種類 ： 2 種類 N:普通, H:早強
化学混和剤（SF500BB）使用量 ： 4 水準 B×0.9%, 1.2%, 1.3%, 1.4%

1. 高炉スラグ微粉末の置換率

表－1、図－1 及び図－2 に 20℃環境で、水結合材比（W/B）が 35%及び 50%の 2 配合について、高炉スラグ微粉末の置換率が 0～90%でのコンクリートの凝結試験結果を示す。同図より、W/B=35%の場合、高炉スラグ微粉末の置換率が 50%置換（高炉セメント B 種相当）までは概ね同じ挙動を示したが、70%置換（高炉セメント C 種上限）では凝結の始発・終結ともにやや早くなり、90%置換（JIS 上限超過）では始発は 70%置換と同程度だが終結が大幅に遅延した。一方、W/B=50%の場合、高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに凝結の始発・終結が遅くなり、特に 70%及び 90%置換では 0～50%置換に比べて凝結遅延がやや大きい傾向にあった。

それぞれの配合で使用している化学混和剤の種類が異なっており、特に、W/B=35%では高炉スラグ高含有用の化学混和剤を使用しており、化学混和剤に含まれる特殊変性リグニン成分等の作用による凝結特性への影響も考えられる。

表-1 高炉スラグ微粉末の置換率の違いによる凝結特性 (20℃)

環境 温度 (℃)	置換率 (%)	W/B (%)	セメント 種類	W (kg/m ³)	s/a (%)	凝結(h-m)	
						始発	終結
20	0	35	H	165	50.0	10-35	11-55
	30					10-35	12-15
	50					10-10	11-50
	70					08-55	11-15
	90					09-00	14-55
20	0	50	N	163	45.9	07-35	09-10
	30					07-40	09-55
	50					07-55	10-40
	70					08-25	13-45
	90					08-10	12-20

備考) 単位水量及び細骨材率は一定とし混和剤量で性状確保

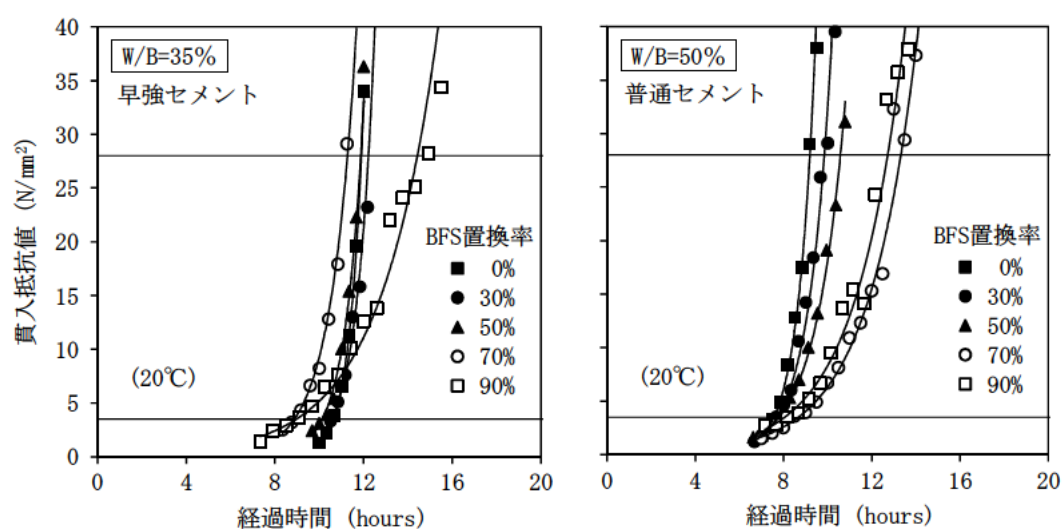


図-1 高炉スラグ微粉末の置換率の違いによる凝結特性

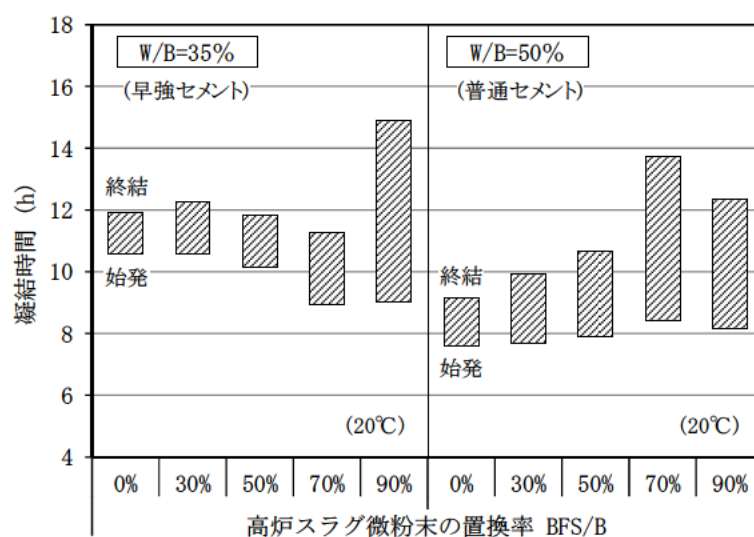


図-2 高炉スラグ微粉末の置換率の違いによる凝結特性

2. 環境温度

図-3 に早強セメントを使用し、水結合材比 (W/B) が 35% (90%置換) 及び 50% (70%置換) の 2 配合において、環境温度 10℃, 20℃, 30℃での凝結の始発及び終結時間を示す。同図より、W/B が 35%及び 50%ともに環境温度が高いほど凝結の始発・終結は早くなり、線形相関性が認められた。ただし、W/B=50%で 30℃環境では、凝結時間が極めて早く、実用的ではないことがわかった。

そこで、W/B=50% (70%置換) の配合で 30℃環境の時、施工可能な凝結時間まで遅らせるため、化学混和剤 (区分) を標準形から「遅延形」に変更して凝結試験を実施した (図-4)。その結果、凝結の始発・終結時間ともに 20℃環境での値と同程度かやや遅い凝結時間を確保することができ、実用的な範疇に収まった。

以上より、環境温度が高いほど凝結時間は早くなるが、凝結時間が極めて早く施工性の確保が困難と判断された場合、化学混和剤 (区分) に遅延形を採用する対策が効果的な場合がある。

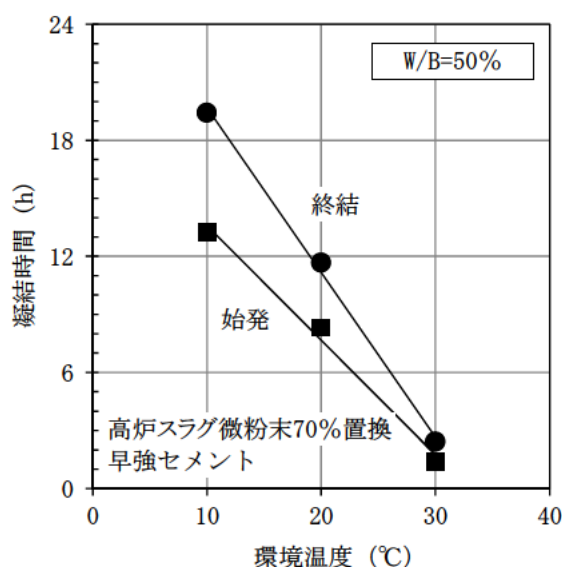
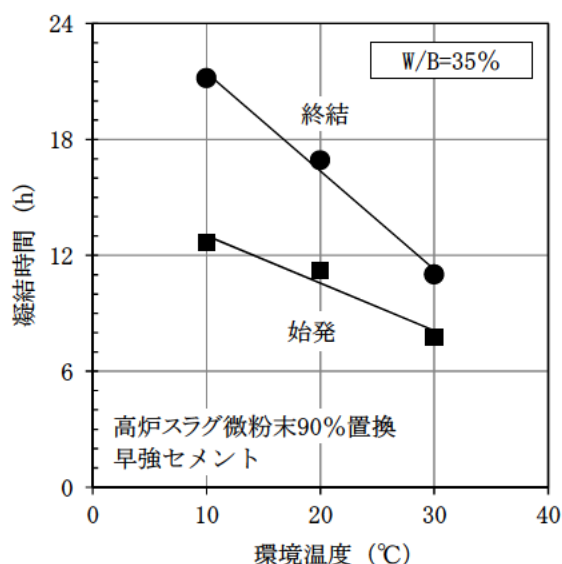


図-3 環境温度の違いによる凝結時間

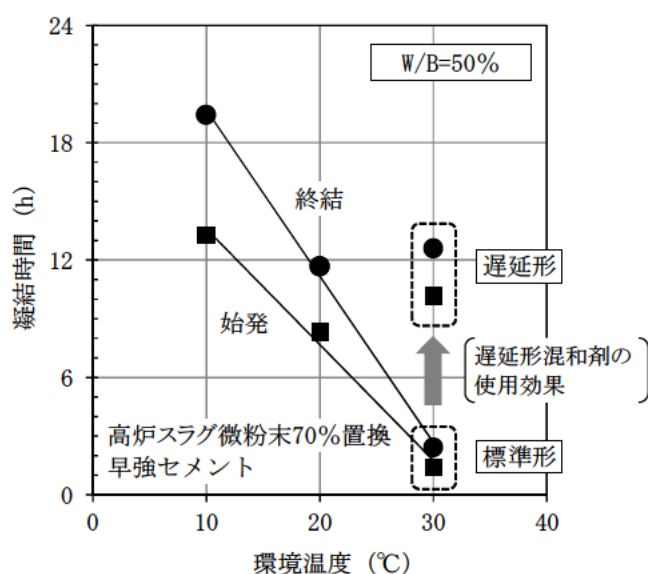


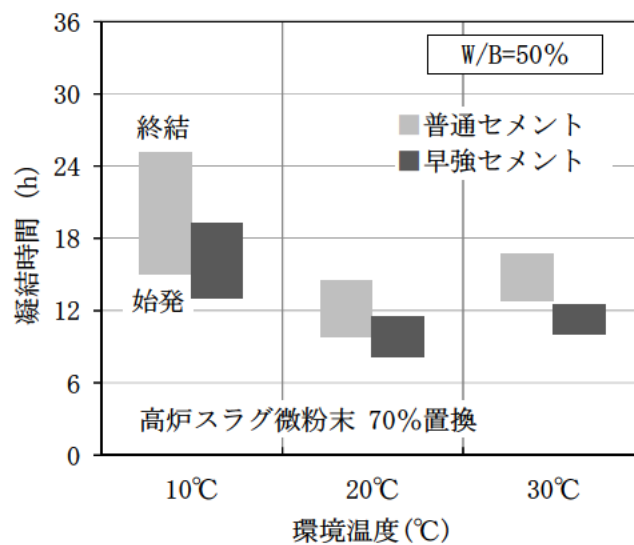
図-4 30℃環境で遅延形混和剤を使用した場合

3.セメント種類

表－2 及び図－5 に水結合材比（W/B）50%，高炉スラグ微粉末の置換率 70%の配合において，環境温度 10℃，20℃，30℃の条件で，セメント種類を N または H とした時の凝結時間を示す。なお，化学混和剤は 10～20℃環境では標準形，30℃環境では遅延形を使用した。同図より，セメント種類を N から H に変更することで凝結の始発・終結時間ともに大幅に短縮できることがわかった。特に，10℃環境では終結時間が 6 時間ほど早くなり，所要の施工性を確保できると考える。

表－2 高炉スラグ微粉末の置換率の違いによる凝結特性（20℃）

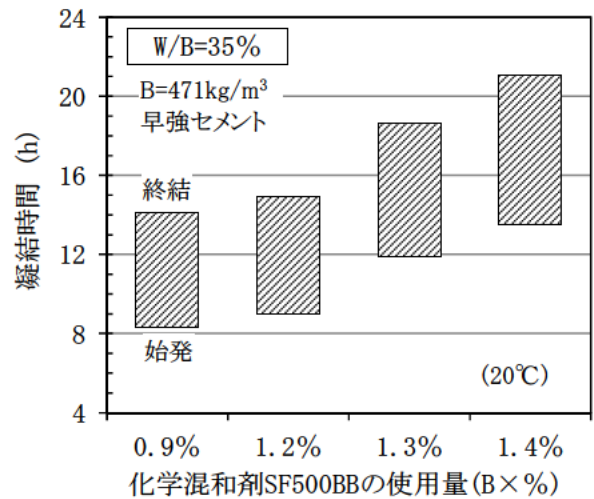
セメント 種類	水結合材比 W/B (%)	高炉スラグ微粉末 の置換率 BFS/B (%)	環境温度 (℃)	凝結時間(h-m)	
				始発	終結
N	50	70	10	15-10	25-15
			20	10-00	14-40
			30	13-05	16-50
H			10	13-15	19-25
			20	8-20	11-40
			30	10-10	12-35



図－5 セメント種類の違いによる凝結時間

4.化学混和剤（SF500BB）の使用量

図－6 に水結合材比（W/B）が 35%（早強セメント），高炉スラグ微粉末 90%置換の配合において，環境温度 20℃の条件で，化学混和剤（SF500BB）の使用量を $B \times 0.9 \sim 1.4\%$ とした時の凝結時間を示す。同図より，本配合の範囲内において，凝結時間は SF500BB の使用量が 1.3%以上になると凝結遅延の傾向がみられた。このため，SF500BB を使用する場合，特に夏期配合等で化学混和剤の使用量が多い場合には，試し練り時に凝結特性を確認しておくことが望ましい。



図－6 化学混和剤（SF500BB）の使用量と凝結特性

【参考】

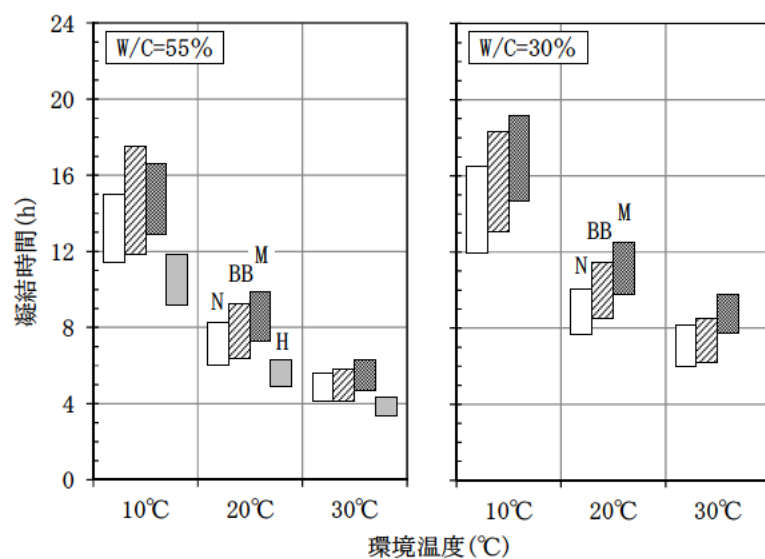


図-7 参考値

(太平洋セメント総合技術資料¹⁾ より)

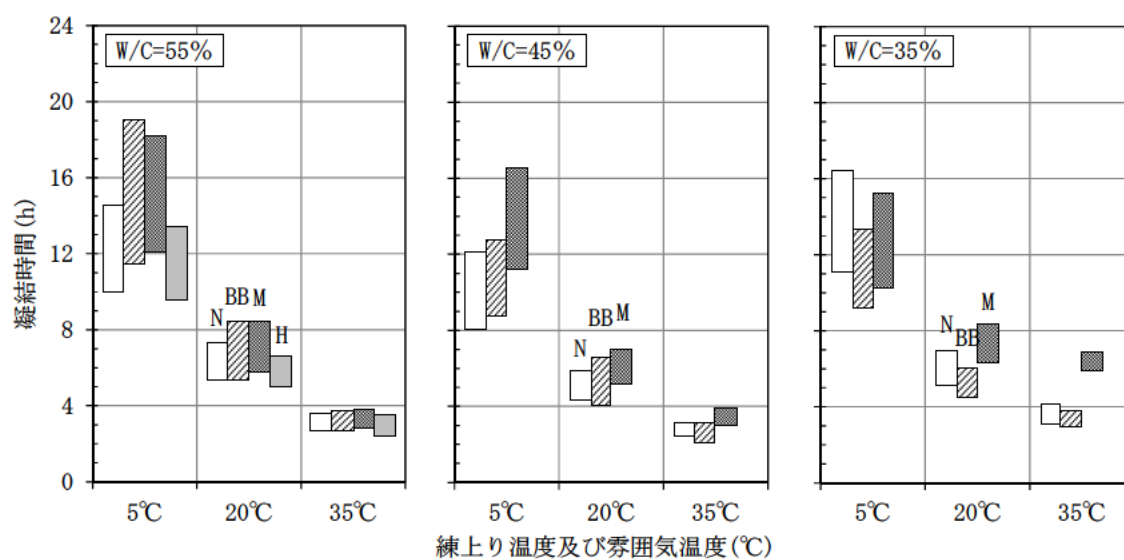


図-8 参考値

(宇部三菱セメント技術資料²⁾ より)

参考文献

- 1) 太平洋セメント株式会社：セメント総合技術資料
- 2) 宇部三菱セメント株式会社：技術資料 第6版, 2013.4

付録－12 断熱温度上昇特性

■ 目的

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート配合の断熱温度上昇特性の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験方法】 JCI-SQA3:「コンクリートの断熱温度上昇試験（案）」空気循環式 に準拠

【試験条件】 試験装置：空気循環式、 $\phi 40\text{cm} \times 40\text{cm}$ （容量 50L）

混和材料：高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO_3)換算で 2.0%内添）

化学混和剤（主剤）： 2 種類

AE 減水剤（高機能タイプ）標準形（I 種）

高性能 AE 減水剤 標準形（I 種）（高炉スラグ高含有用）

【要 因】	高炉スラグ微粉末の置換率	： 3 水準	0%, 70%, 90%（質量比）
	水結合材比	： 2 水準	35%, 50%
	環境温度	： 3 水準	10℃, 20℃, 30℃
	セメント種類	： 3 種類	N:普通, M:中庸熱, H:早強

1. セメント種類

表－1 に、温度 20℃で、単位水量（W）163kg/m³、水結合材比（W/B）50%の配合条件で、普通ポルトランドセメント（N）をベースに高炉スラグ微粉末を 70%置換して用いた低炭素型コンクリート（B70）の配合仕様を示す。また、同配合と単位水量（W）163kg/m³と同じで、呼び強度 24～27N/mm²相当で同程度の実強度となる普通ポルトランドセメント（N）及び中庸熱ポルトランドセメント（M）をそれぞれ単味で用いた配合（W/B=55%）も併記した。表－2 及び図－1 にそれぞれの配合における断熱温度上昇試験結果を示す。同図表より、本試験で用いた高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの配合（B70）の断熱温度上昇量は、普通ポルトランドセメント単味の配合（N）よりも 11.2℃低く、また中庸熱ポルトランドセメントを単味で用いた配合（M）よりも 5.8℃小さい結果であった。以上より、高炉スラグ微粉末を高含有した配合は同程度の実強度を有するセメント単味の配合よりも断熱温度上昇量が極めて小さく、一般的な低発熱系セメントと同様に、マスコンクリート構造物の施工に有効といえる。

表-1 コンクリート配合仕様

環境 温度 (°C)	配合名	水 W (kg/m ³)	水結合 材比 W/B (%)	スラグ 置換率 BFS/B (%)	粉体(mass%)			圧縮強度 (N/mm ²)	
					普通 N	中庸熱 M	高炉スラグ 微粉末 BFS	7 日	28 日
20	B70	163	50.0	70	30	—	70	19.9	31.6
	N		55.0	0	100	—	—	26.8	37.9
	M				—	100	—	17.9	31.6

表-2 断熱温度上昇量

環境 温度 (°C)	配合名	断熱温度上昇量 (°C)											
		材齢 (日)											
		0.083	0.174	0.25	0.5	1	1.5	2	3	4	5	7	10
20	B70	0.7	1.5	2.0	5.1	18.5	25.7	28.3	30.2	30.9	31.2	31.2	31.2
	N	1.1	2.0	4.1	16.8	30.5	34.9	37.1	39.7	41.2	42.4	42.4	42.4
	M	1.0	1.7	3.7	14.2	22.2	26.9	29.5	32.5	34.2	35.3	36.6	37.0

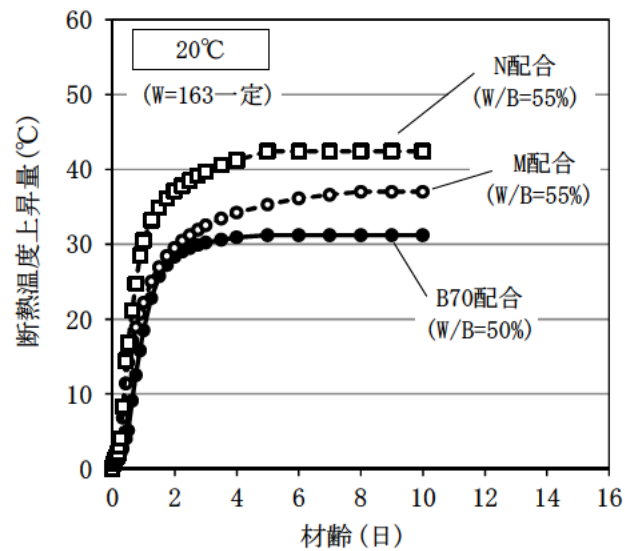


図-1 断熱温度上昇量 (20°C)

2. 環境温度

表-3 及び図-2 に、温度 10℃、20℃、30℃の条件のもと、水結合材比 (W/B) 35%で、早強ポルトランドセメント (H) をベースに高炉スラグ微粉末を 90%置換で用いた高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの断熱温度上昇量の試験結果を示す。同図表より、温度が高いほど初期材齢時の温度上昇は早いものの、終局断熱温度上昇量は低くなる傾向が確認された。

表-3 断熱温度上昇量

温度 (℃)	セメント 種類	スラグ 置換率 BFS/B (%)	水結合 材比 W/B (%)	断熱温度上昇量 (℃)											
				材齢 (日)											
				0.083	0.174	0.25	0.5	1	1.5	2	3	4	5	7	10
10	H	90	35	0.6	0.9	1.0	2.1	4.3	13.2	23.0	26.3	27.1	27.5	27.6	27.6
20				0.4	0.7	1.1	2.5	14.6	24.0	25.3	26.1	26.3	26.3	26.3	26.3
30				0.2	0.5	1.1	4.5	21.8	23.2	23.7	24.1	24.1	24.1	24.1	24.1

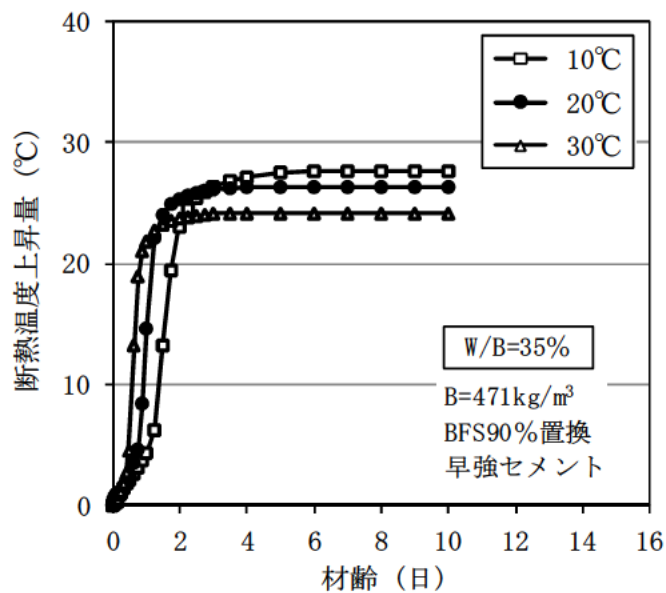


図-2 断熱温度上昇量 (W/B=35%, B=471kg/m³, BF90%置換 10, 20, 30℃)

3. 断熱温度上昇式における係数

一般的に、コンクリートの断熱温度上昇量は、式(1)で表すことができる。また、低熱ポルトランドセメントのような初期材齢時の温度上昇が緩やかな場合は、式(2)が採用されている。本試験で検討した低炭素型コンクリート（高炉スラグ微粉末 70～90%置換）の配合は、セメント単味の使用量が極めて少なく、初期材齢時の温度上昇が小さいため、式(2)を採用した。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e(-\gamma t)) \quad \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e(-\gamma t^s)) \quad \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

ここで、 $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量(°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量(°C)

γ, s : 温度上昇速度に関する定数

t : 材齢(日)

3.1 高炉スラグ微粉末 70%置換の配合

高炉スラグ微粉末 70%置換の配合 (B70) 及び同程度の実強度を有する比較配合 (普通配合, 中庸熱配合) について、20°C環境での断熱温度上昇試験の結果から断熱温度上昇式における定数 (Q_{∞} , γ , s) を同定し比較した。表-4 及び図-3 に同定した定数と同定結果を示す。同図表より、B70 の温度上昇速度に関する定数 (γ) 0.812 は、同程度の実強度を有する中庸熱ポルトランドセメント単味配合 (中庸熱配合) の当該定数 (γ) 0.855 と同等であり、水和発熱に伴う温度の上昇速度が緩やかであるといえる。また、終局断熱温度上昇量 (Q_{∞}) も 5°C程度低い結果であり、発熱特性は低熱系セメントと同等以上といえる。

3.2 高炉スラグ微粉末 90%置換の配合

高炉スラグ微粉末 90%置換の配合について、10, 20, 30°Cでの断熱温度上昇試験の結果からそれぞれの温度での断熱温度上昇式における定数 (Q_{∞} , γ , s) を同定した。表-5, 図-4 及び図-5 に同定した定数と同定結果を示す。同図表より、温度が高いほど終局断熱温度上昇量 (Q_{∞}) は小さくなる一方で、温度上昇速度定数 (γ) は大きくなった。また、温度上昇速度定数(s)は温度の違いによらず概ね等しい結果であった。

表-4 断熱温度上昇式における定数（高炉スラグ微粉末 70%置換，比較用:普通配合,中庸熱配合）

環境 温度 (°C)	粉体(mass%)			水結合材比 W/B (%)	単位水量 W (kg/m ³)	式	断熱温度上昇式 における定数		
	普通 N	中庸熱 M	スラグ BFS				Q_{∞} (°C)	γ	s
20	30	—	70	50	163	(2)	31.0	0.812	1.805
	100	—	—	55		(1)	42.5	1.018	—
	—	100	—	55		(1)	36.3	0.855	—

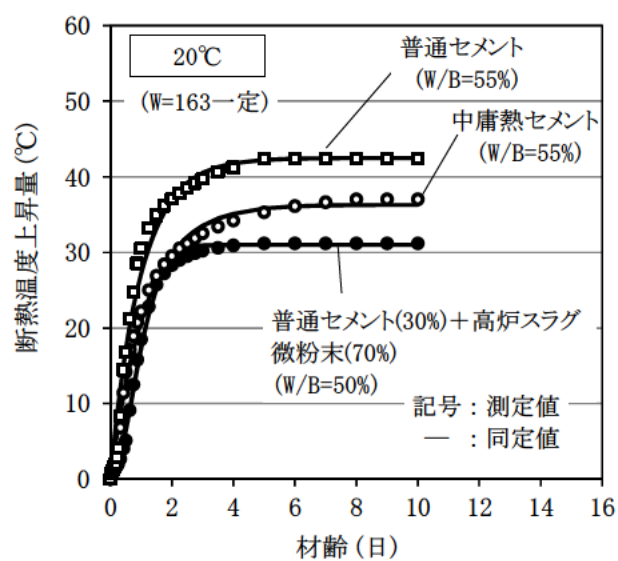


図-3 断熱温度上昇量の同定結果 (20°C)

表-5 断熱温度上昇式における定数（高炉スラグ微粉末 90%置換）

環境 温度 (°C)	粉体(mass%)		水結合材比 W/B (%)	単位水量 W (kg/m ³)	式	断熱温度上昇式における定数		
	早強 H	スラグ BFS				Q_{∞} (°C)	γ	s
10	10	90	35	165	(2)	27.3	0.186	3.277
20					(2)	26.3	0.725	3.385
30					(2)	24.0	3.235	3.455

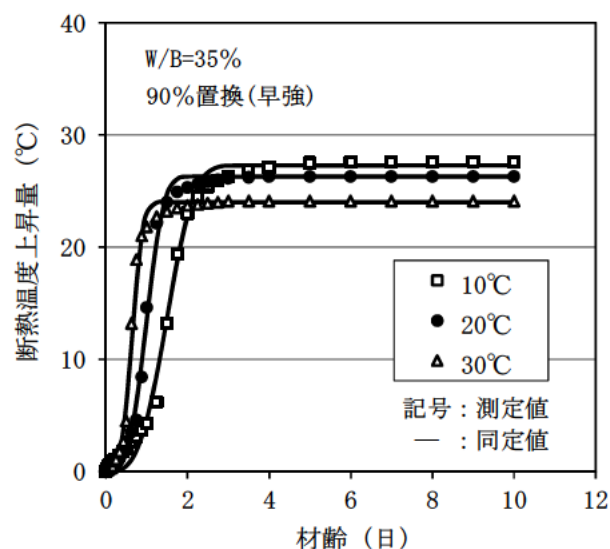


図-4 断熱温度上昇量の同定結果（高炉スラグ微粉末 90%置換, 10～30°C）

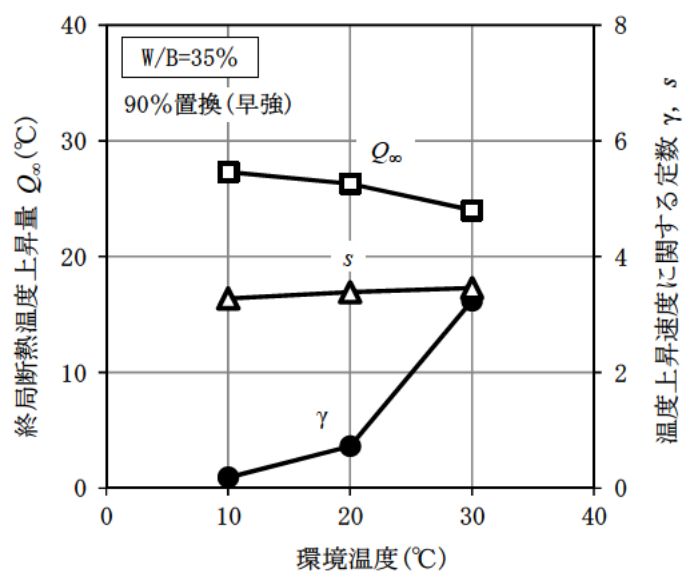


図-5 環境温度と断熱温度上昇特性値との関係

（高炉スラグ微粉末 90%置換, 10～30°C）

【参考】

高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートに関する文献¹⁾²⁾では、コンクリートの断熱温度上昇特性について次のように述べられている。

一般的な構造物（マスコンクリートではない）を 20℃環境で施工した場合、コンクリートの水和熱は高炉スラグ微粉末の置換率にほぼ比例して低減する。一方で、マスコンクリート構造物の躯体中心部のように、断熱状態に近い環境では、置換率だけで水和熱特性を整理できないとされる。

高炉スラグ微粉末を高含有（高炉セメント C 種上限以上）に用いた配合、温度上昇速度ならびに最高到達温度は無混入に比べて著しく低減される。一方で、高炉スラグ微粉末の置換率が 50%程度（高炉セメント B 種相当）までは、置換率の増加とともに水和初期での温度上昇速度は小さくなるものの、最高到達温度は無混入の場合に比べて大きくなることがあると指摘されている。これは、高温環境になると高炉スラグ微粉末の反応が活性化することに起因しており、スラグ反応の温度依存性が高いことを意味している。

つまり、置換率が高炉セメント B 種相当までは粉体中のクリンカー鉱物も多く存在し、その水和反応による発熱量が多いため高温となり、さらに水和によって生成される水酸化カルシウム量も多いため、高炉スラグ微粉末の反応も活発となり、温度上昇量は増加する。しかし、置換率が 60%を超えると、クリンカー鉱物の量が少なく発熱量が少ないため温度が上がらず、さらに水和で生成される水酸化カルシウムの量が少ないため、高炉スラグ微粉末の反応量も減少することから温度上昇量が小さくなる。

参考文献

- 1) 依田彰彦：技術フォーラム 資源の有効利用とコンクリート 第 5 回高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート，コンクリート工学，Vol.34，No.4，pp.72-82，1996.4
- 2) 伊与田岳史：高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート，コンクリート工学，Vol.52，No.5，2014.5

付録－13 熱膨張係数

■ 目的

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの熱膨張係数の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験方法】 埋込み型ひずみ計を用いた温度サイクル負荷試験

【試験条件】 水結合材比： 35%

混和材料: 高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO₃)換算で 2.0%内添)

試験方法: 中心部に埋込み型ひずみ計を埋設した試験体（φ100×200mm）にコンクリートを打込み、20℃環境下で材齢 3 日まで湿潤養生した後、脱型し材齢 28 日まで同環境下で封緘養生を実施。その後、恒温恒湿器内にて温度履歴（20～60℃、4 サイクル、温度変化: 2.0℃/hr）を与えてひずみを測定。
2～4 サイクル目のデータで熱膨張係数を算出。

試験体：試験体は濡れウエスで包んでからビニール袋 2 重で覆って封緘養生

使用機器: プログラム温湿度調節器（HP-103）（いすゞ製作所）

図－1 に、熱膨張試験時における温度履歴設定を示す。また表－1 に試験結果を示す。試験の結果、高炉スラグ微粉末を 90%置換で用いたコンクリートの熱膨張係数は $12.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ （2～4 サイクルの平均）であった。一般的に、高炉セメント B 種の熱膨張係数は表－2 のとおり $12.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と言われており、概ね等しい値であった。

測定サイクルが多くなるほど、熱膨張係数の値が若干大きくなっている。この理由として、試験開始材齢が約 32 日（2 サイクル目）とやや早かったことや、高炉スラグ微粉末を高含有した配合であることから、自己収縮ひずみの影響が考えられた。そこで、本試験と同じ配合コンクリートで自己収縮ひずみ試験を実施した結果、材齢約 32 日（熱膨張試験 2 サイクル目開始）～約 42 日（熱膨張試験 4 サイクル目終了）の間における自己収縮ひずみの変化量はわずか 9.9×10^{-6} であり、各測定サイクル中での変化量は平均 2.8×10^{-6} とごく小さい値であった。以上より、熱膨張試験の結果に対する自己収縮ひずみの影響は無視できる程度であり、今回の熱膨張係数の増加原因は、測定誤差やその他の影響したと推定される。

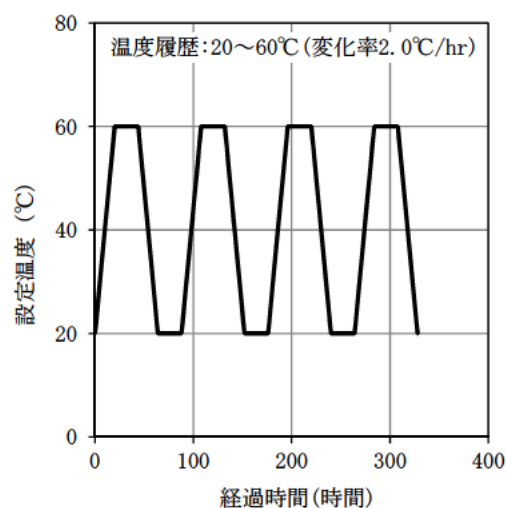


図-1 熱膨張試験時における温度履歴設定

表-1 熱膨張係数の測定結果¹⁾

測定 サイクル	熱膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
	温度上昇時	温度下降時	平均
2回目	12.1	12.7	12.8
3回目	12.8	12.9	
4回目	13.0	13.1	

表-2 高炉セメントB種の熱膨張係数 (JCIのひび割れ制御指針2008²⁾より)

W/B (%)	熱膨張係数($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	
	高炉セメント B 種	養生条件
55	10.3~12.2	20℃封緘 3 か月以上
45	10.7~13.0	
30	11.0~12.0	
標準 : $12.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$		

参考文献

- 1) 土師康一, 田中 徹, 佐藤幸三, 椎名貴快, 小池晶子, 中村英佑: 高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの温度特性に関する検討, 土木学会第70回年次学術講演会, V-486, pp.971-972, 2015.9
- 2) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針2008

付録－14 圧縮強度

■ 目的

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの圧縮強度特性の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験方法】	JIS A 1108:「コンクリートの圧縮強度試験方法」 に準拠		
【試験条件】	混和材料：高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添)		
	化学混和剤(主剤)：	2 種類	AE 減水剤（高機能タイプ）標準形（I 種） 高性能 AE 減水剤 標準形（I 種）（高炉スラグ高含有用）
	セメント種類	： 2 種類	N:普通, H:早強
【要 因】	高炉スラグ微粉末の置換率	： 5 水準	0%, 30%, 50%, 70%, 90%（質量比）
	結合材水比	： 3 水準	1.67, 2.00, 2.50 （70%置換の場合）
		： 3 水準	2.22, 2.86, 3.33 （90%置換の場合）
	環境温度	： 3 水準	10℃, 20℃, 30℃
	養生条件（湿潤養生期間）	： 5 水準	3 日, 7 日, 10 日, 14 日, 28 日

1. 高炉スラグ微粉末の置換率

表－1 及び図－1 に、20℃環境（水中養生）において、水結合材比が 35%（H:早強）及び 50%（N:普通）でそれぞれ単位水量（W）一定として、高炉スラグ微粉末をセメント内割 0～90%置換で混和したコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。同図表より、高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに強度発現性が低下する傾向がみられた。これは、高炉スラグ微粉末の混和によってクリンカー量が減少したことで、クリンカーの水和反応で生成される水酸化カルシウムが減少し、それによってさらに高炉スラグ微粉末の反応も低下したためと考える。材齢 7 日強度は、水結合材比の違いによらず、高炉スラグ微粉末の置換率の増加とともに線形的に低下した。一方、28 日強度は、高炉スラグ微粉末 70%置換までは 7 日強度と同様に線形近似的に低下したが、90%置換では急激に強度発現性が低下した。

次に、図－2 に 28 日材齢強度を 100 とした時の 7 日強度の比率を図示した。同図より、水結合材比によらず、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど材齢 7 日から 28 日にかけての強度増進が大きくなった。これは高炉スラグ微粉末の水和反応による働きである。しかし、90%置換では強度の増進が鈍化し、W/B=35%では 30%置換と同程度、W/B=50%ではセメント単味（0%置換）の場合よりも強度の伸びが小さい結果であった。

以上より、特に W/B=50%では、強度発現性を考慮して、70%置換での利用上限が良いと考える。

表-1 高炉スラグ微粉末の置換率の異なる配合の圧縮強度

環境温度 (°C)	水結合材比 W/B (%)	セメント 種類	スラグ置換率 BFS/B (%)	圧縮強度(N/mm ²)	
				材齢 7 日	28 日
20	35	H (早強)	0	70.1	78.0
			30	58.1	75.3
			50	46.3	67.9
			70	44.9	65.6
			90	38.7	49.6
20	50	N (普通)	0	35.7	50.9
			30	30.6	47.8
			50	27.4	42.3
			70	23.3	38.5
			90	15.7	20.7

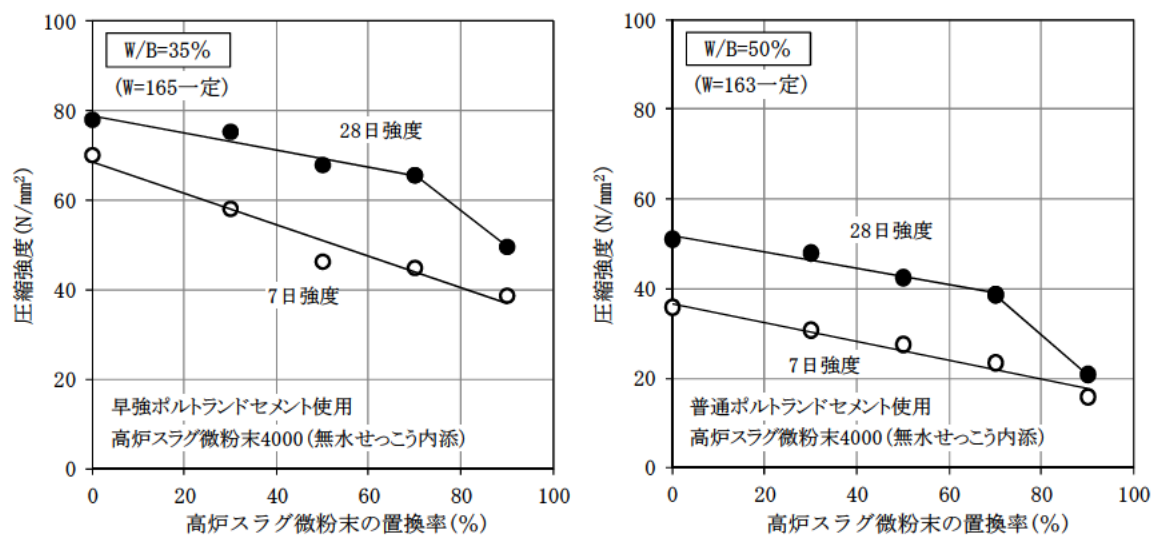


図-1 高炉スラグ微粉末の置換率と圧縮強度との関係

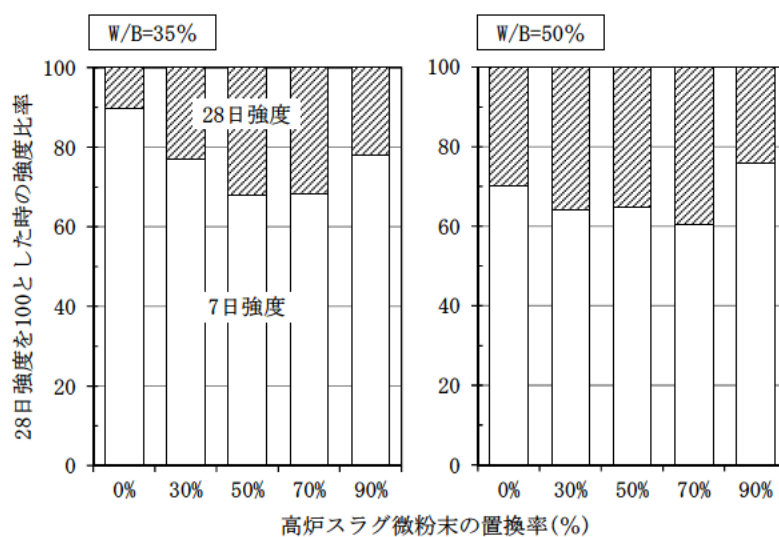


図-2 28日強度を100とした時の強度比率

表-2 及び図-3 に、水結合材比 (W/B) が 35% 及び 50% における高炉スラグ微粉末の置換率 x (%) と圧縮強度: σ (N/mm²) との関係式を線形近似で求めて示した。材齢 7 日強度は、高炉スラグ微粉末の違いに寄らず一次近似式から求めることができる。一方で、28 日強度は、高炉スラグ微粉末 90% 置換での強度発現性の低下を考慮して、70% 置換を境として近似式を 2 種類とした。

表-2 高炉スラグ微粉末の置換率と圧縮強度との関係式

環境 温度 (°C)	水結合材比 W/B (%)	強度 材齢	$\sigma = a \cdot x + b$ (a, b: 定数) 圧縮強度: σ (N/mm ²), スラグ置換率: x (%)	
			高炉スラグ微粉末の置換率	
			0~70%置換	70~90%置換
20	35	7 日	$\sigma_7 = -0.309x + 63.5$	
		28 日	$\sigma_{28} = -0.0652x + 73.2$	$\sigma_{28} = -0.941x + 132$
20	50	7 日	$\sigma_7 = -0.219x + 33.5$	
		28 日	$\sigma_{28} = -0.158x + 43.5$	$\sigma_{28} = -0.580x + 72.3$

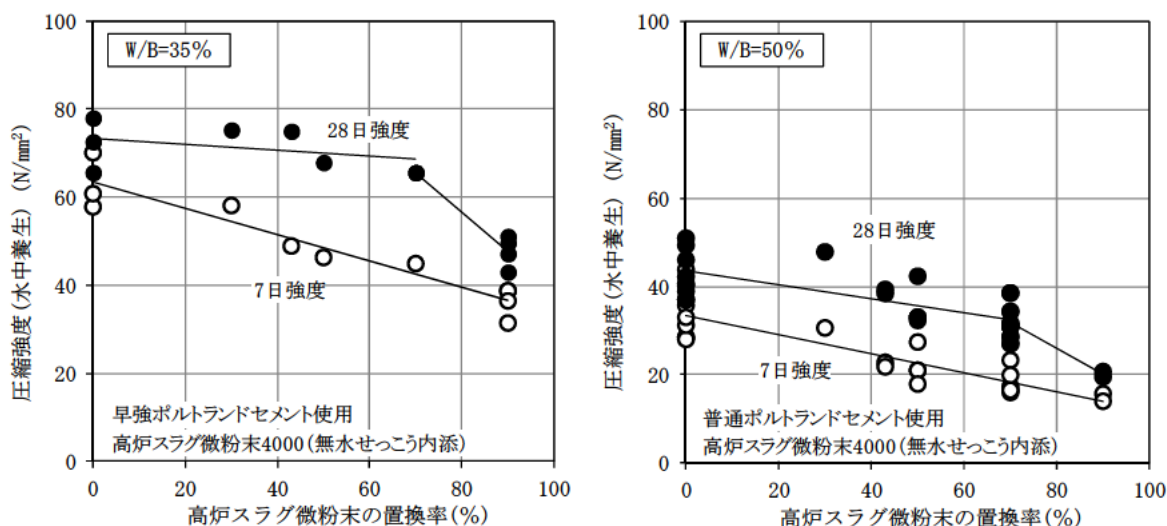


図-3 高炉スラグ微粉末の置換率と圧縮強度との関係

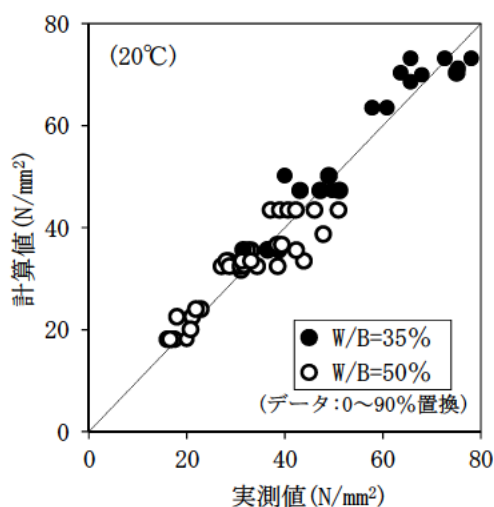


図-4 圧縮強度の実測値と計算値との比較

2. 結合材水比

表-3、表-4 及び図-5 に 20℃環境（水中養生）で、高炉スラグ微粉末を 90%置換（H:早強）及び 70%置換（N:普通）で用いた配合において、結合材水比と圧縮強度の関係を示す。

表-3 結合材水比と圧縮強度（90%置換）

環境 温度 (℃)	スラグ 置換率 (%)	単位水量 W (kg/m ³)	材齢 (日)	圧縮強度(N/mm ²)			結合材水比: B/W と 圧縮強度: σ (N/mm ²) の関係式
				B/W (W/B)			
				2.22 (0.45)	2.86 (0.35)	3.33 (0.30)	
20	90	165	3	18.0	25.0	30.5	σ ₃ =11.2 (B/W)－ 7.0
			7	27.0	38.7	49.2	σ ₇ =19.9 (B/W)－17.5
			28	35.0	51.1	56.5	σ ₂₈ =19.7 (B/W)－ 7.6
			91	36.3	56.4	66.8	σ ₉₁ =27.7 (B/W)－24.4

表-4 結合材水比と圧縮強度（70%置換）

環境 温度 (℃)	スラグ 置換率 (%)	単位水量 W (kg/m ³)	材齢 (日)	圧縮強度(N/mm ²)			結合材水比: B/W と 圧縮強度: σ (N/mm ²) の関係式
				B/W (W/B)			
				1.67 (0.60)	2.00 (0.50)	2.50 (0.40)	
20	70	163	3	8.4	11.1	15.5	$\sigma_3=8.5$ (B/W)－ 5.9
			7	16.0	22.0	31.5	$\sigma_7=18.6$ (B/W)－15.1
			28	28.8	36.9	50.8	$\sigma_{28}=26.5$ (B/W)－15.7
			91	34.7	43.6	59.1	$\sigma_{91}=29.4$ (B/W)－14.7

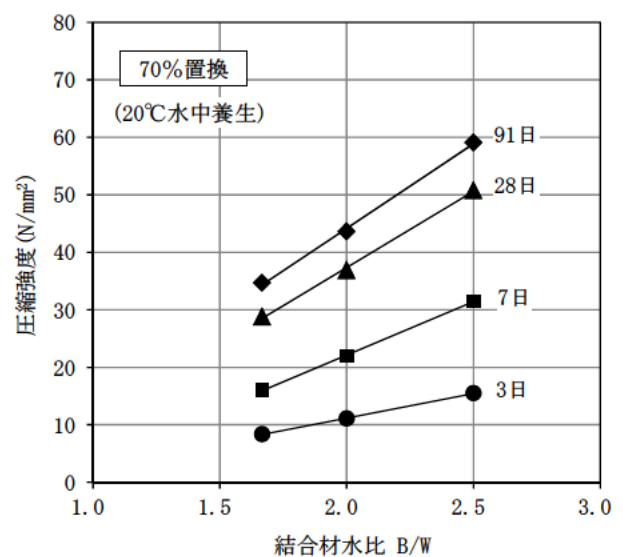
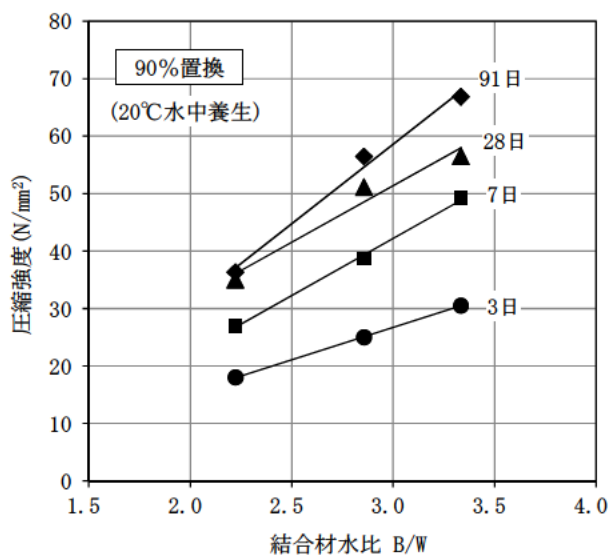


図-5 結合材水比と圧縮強度の関係

図-6 に 91 日強度を 100 とした各材齢での強度増分を比率で示す。同図より、高炉スラグ微粉末 90%置換の場合、セメントに H:早強を使用しているため、結合材水比 (B/W) によらず材齢初期の強度発現性が高い。材齢 3 日で 40~50% (91 日強度比)、材齢 7 日で約 70% (91 日強度比) まで強度発現が進行した。しかしながら、長期強度発現性については B/W が小さくなるほど低下し、特に B/W=2.22 では材齢 28 日から 91 日にかけての強度増進がほとんどみられなかった。

一方で、高炉スラグ微粉末 70%置換の場合、セメントに N:普通を使用しており、セメント単味で粉体中に 30%含まれているため、材齢の進行とともに順調に強度発現は進み、長期強度発現性も B/W によらず材齢 28 日から 91 日にかけて 10%以上も伸びた。

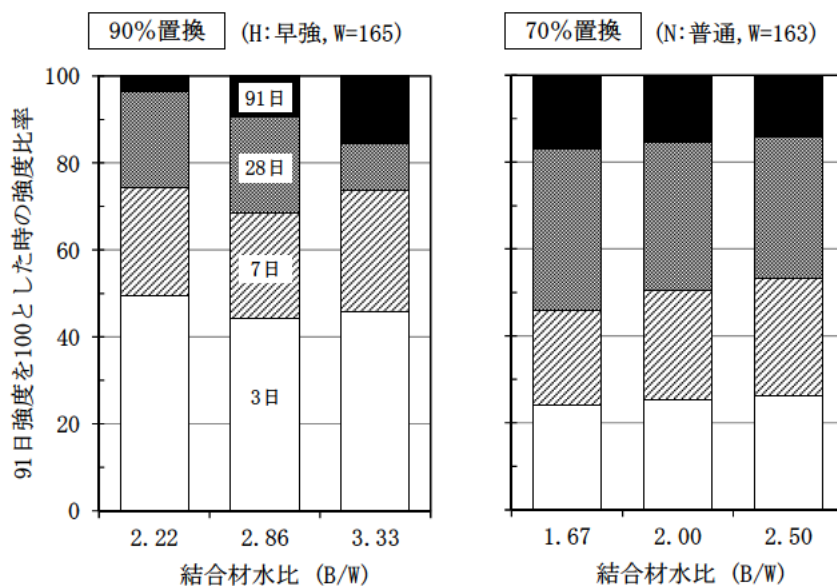


図-6 91 日強度を 100 とした時の各材齢強度増分比 (結合材水比別)

3. 単位結合材量

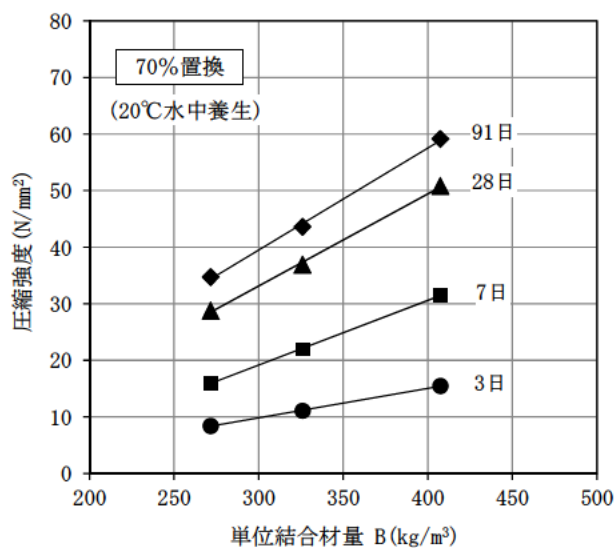
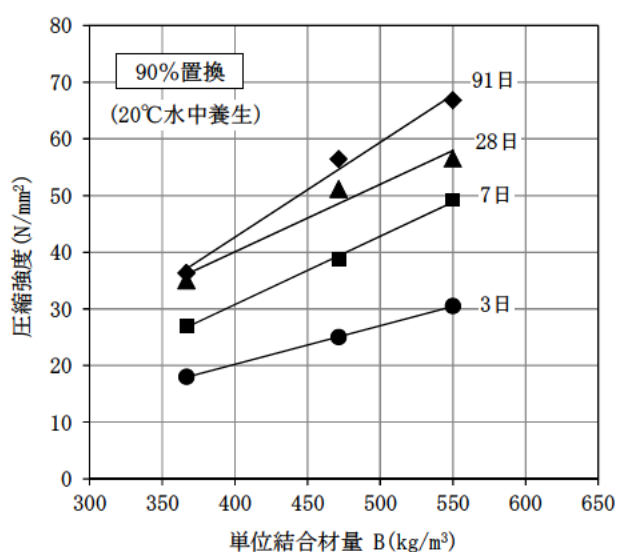
表－5, 表－6 及び図－7 に, 20℃環境 (水中養生) で, 高炉スラグ微粉末を 90%置換 (H:早強) 及び 70%置換 (N:普通) で用いた配合において, 単位結合材量と圧縮強度の関係を示す。

表－5 単位結合材量と圧縮強度 (90%置換)

環境 温度 (℃)	スラグ 置換率 (%)	単位水量 W (kg/m ³)	材齢 (日)	圧縮強度(N/mm ²)			単位結合材量:B(kg/m ³)と 圧縮強度: σ (N/mm ²) の関係式
				単位結合材量 B(kg/m ³)			
				367	471	550	
20	90	165	3	18.0	25.0	30.5	σ ₃ =0.068・B－7.0
			7	27.0	38.7	49.2	σ ₇ =0.121・B－17.5
			28	35.0	51.1	56.5	σ ₂₈ =0.119・B－7.6
			91	36.3	56.4	66.8	σ ₉₁ =0.168・B－24.4

表－6 単位結合材量と圧縮強度 (70%置換)

環境 温度 (℃)	スラグ 置換率 (%)	単位水量 W (kg/m ³)	材齢 (日)	圧縮強度(N/mm ²)			単位結合材量:B(kg/m ³)と 圧縮強度: σ (N/mm ²) の関係式
				単位結合材量 B(kg/m ³)			
				272	326	408	
20	70	163	3	8.4	11.1	15.5	σ ₃ =0.052・B－ 5.9
			7	16.0	22.0	31.5	σ ₇ =0.114・B－15.1
			28	28.8	36.9	50.8	σ ₂₈ =0.163・B－15.7
			91	34.7	43.6	59.1	σ ₉₁ =0.181・B－14.7



図－7 単位結合材量と圧縮強度の関係

図-8 に 91 日強度を 100 として各材齢での強度増分を比率で示す。同図より、高炉スラグ微粉末 90%置換の場合、セメントに H:早強を使用しているため短期強度発現性に優れているが、材齢 28 日から 91 日にかけての長期強度増進は特に単位結合材量が 367kg/m^3 ではほとんどみられなかった。一方、高炉スラグ微粉末 70%置換の場合、単位結合材量が $272\sim 408\text{kg/m}^3$ の範囲では概ね強度発現性は等しく、安定した長期強度の増進も確認できた。

以上より、単位結合材量 (B) は、特に高炉スラグ微粉末の置換率が 90%と高い場合、材齢 28 日以降の強度発現性を確保する観点から 470kg/m^3 以上は必要であると考ええる。

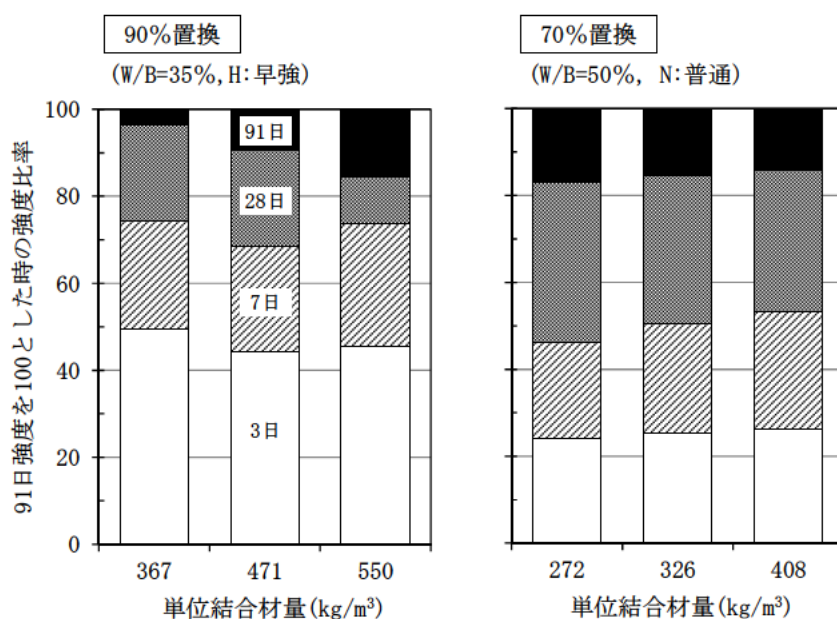


図-8 91 日強度を 100 とした時の各材齢強度増分比 (単位結合材量別)

4. 環境温度

4.1 環境温度別の材齢と圧縮強度の関係

表－7 及び図－9 に、水結合材比（W/B）が 35%及び 50%で、それぞれ高炉スラグ微粉末を 90%置換及び 70%置換で用いた配合において、環境温度 10℃、20℃、30℃での圧縮強度の値を示す。なお、各配合におけるセメント種類は、高炉スラグ微粉末が 90%置換では H:早強、70%置換では N:普通及び H:早強の 2 種類とした。また、それぞれの環境温度は材齢 28 日まで継続した後、以降は 20℃とした。

同図表より、W/B=35%（90%置換）の場合、10℃に比べて、30℃では材齢初期の強度発現性が高いものの、材齢 91 日以降では 10℃と同等かやや小さい値であった。一方、20℃での圧縮強度は、10℃や 30℃よりも強度発現性が高い結果であった。これは高炉スラグ微粉末の水和反応が温度依存性を有していることと関係している可能性があるが、現時点では確認できていない。今後、データの補間が求められる。

次に、W/B=50%（70%置換）の場合、セメント種類が N:普通または H:早強の違いによらず、10℃、20℃、30℃と温度が高いほど、材齢初期の強度発現性が高くなる傾向がみられた。なお、セメントが N:普通の場合、材齢 91 日以降の強度増進もわずかながら確認できた。

表－7 環境温度別の材齢と圧縮強度

スラグ 置換率 (%)	水結合材比 W/B (%)	セメント 種類	環境 温度 (℃)	圧縮強度(N/mm ²)				
				3 日	7 日	28 日	91 日	365 日
90	35	H (早強)	10	7.5	24.3	36.2	46.4	49.5
			20	25.0	38.7	51.1	56.4	58.8
			30	27.0	31.6	39.8	44.4	46.3
70	50	N (普通)	10	5.1	14.1	28.5	39.9	41.8
			20	11.1	22.0	36.9	43.6	45.8
			30	17.0	31.7	40.1	45.6	48.0
		H (早強)	10	5.8	13.6	29.8	42.1	44.7
			20	10.6	18.8	34.3	46.3	46.3
			30	16.2	28.1	40.5	45.3	45.6

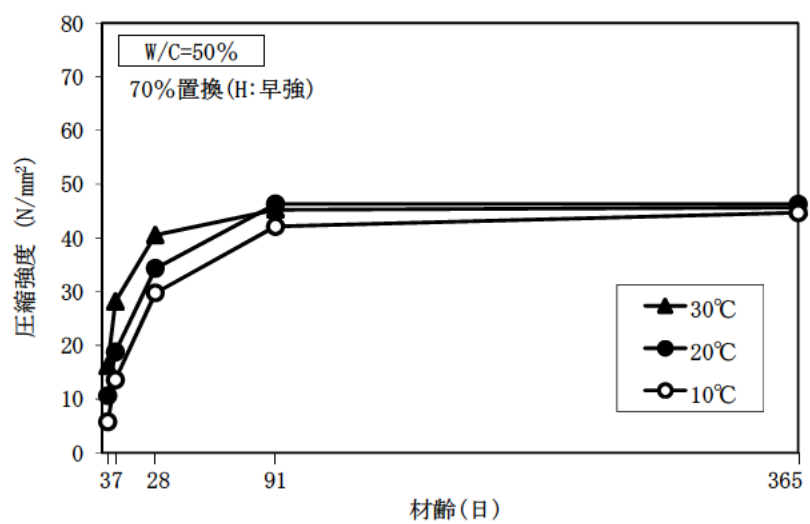
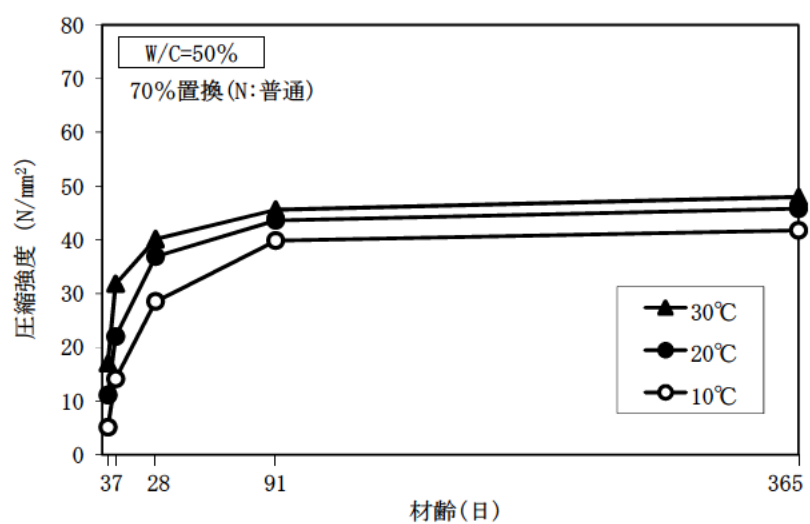
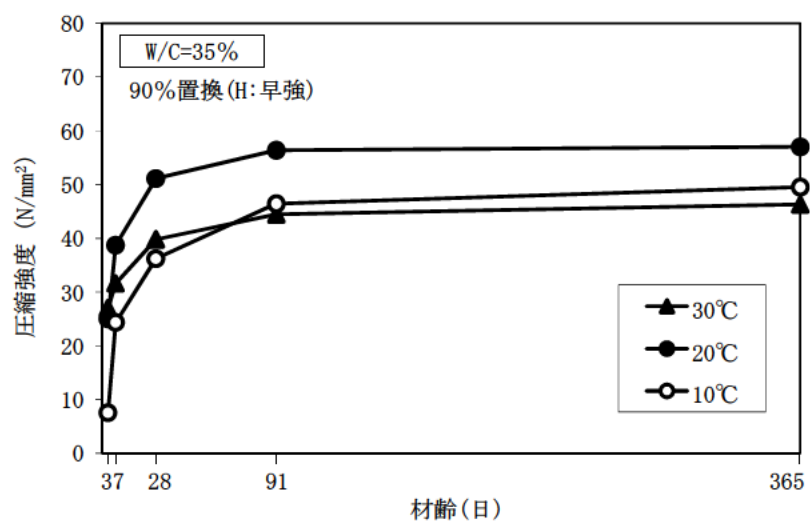


図-9 環境温度別の材齢と圧縮強度の関係

4.2 環境温度と材齢強度

図-10 に、水結合材比 (W/B) が 35% 及び 50% で、それぞれ高炉スラグ微粉末を 90% 置換及び 70% 置換で用いた配合において、環境温度 10℃、20℃、30℃での各材齢時 (3 日、7 日、28 日、91 日、365 日) での圧縮強度の値を示す。なお、各配合におけるセメント種類は、高炉スラグ微粉末が 90% 置換では H: 早強、70% 置換では N: 普通及び H: 早強の 2 種類とした。また、それぞれの環境温度は材齢 28 日まで継続した後、以降は 20℃とした。

同図より、W/B=35% (90% 置換) の場合、温度 20℃の時、10℃や 30℃に比べて強度の増進が大きい傾向が確認された。一方、W/B=50% (70% 置換) の場合、セメント種類が N: 普通または H: 早強でも、温度が高いほど強度が増進する傾向がみられた。ただし、材齢 91 日以降では、N: 普通ではやや強度が増加したものの、H: 早強ではほとんど増加しなかった。なお、H: 早強では温度の違いによる長期強度の差はほとんどなく、概ね同程度になった。

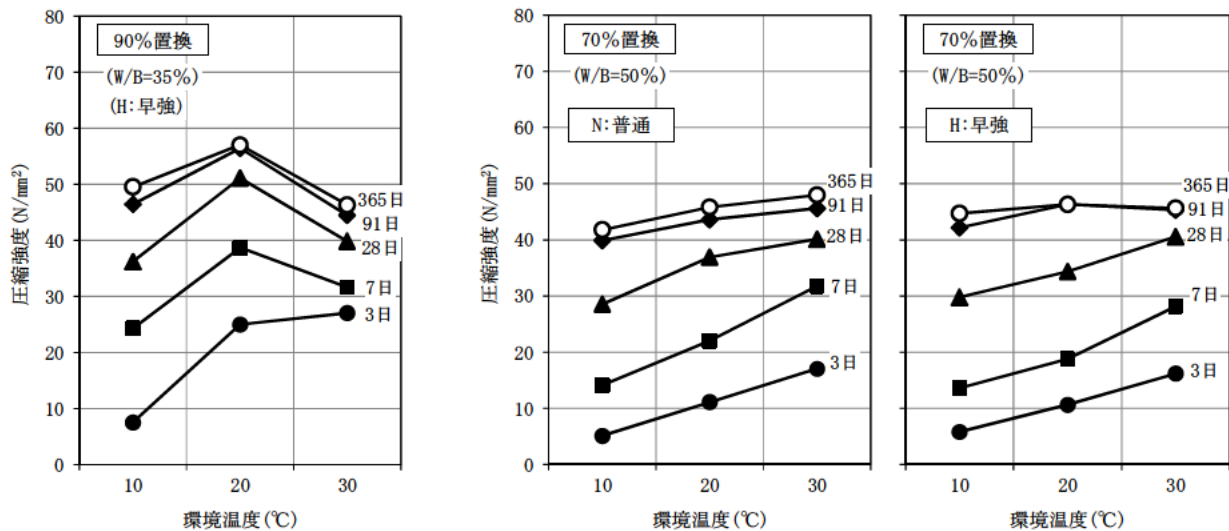


図-10 環境温度と材齢強度の関係

4.3 セメント種類

図-11 に、水結合材比 (W/B) が 50%, 高炉スラグ微粉末 70%置換の配合で、セメント種類が N:普通または H:早強の時の圧縮強度を環境温度 10℃, 20℃, 30℃ごとに比較して示す。同図より、本配合 (W/B=50%, 70%置換) において、温度 10℃, 20℃, 30℃でもセメント種類の違いによらず概ね強度発現性は一致していた。特に強度発現の低下が懸念される低温 10℃においても、N:普通と H:早強で優位な差はなかった。これはセメント単味の絶対量が少ないためと推定される。

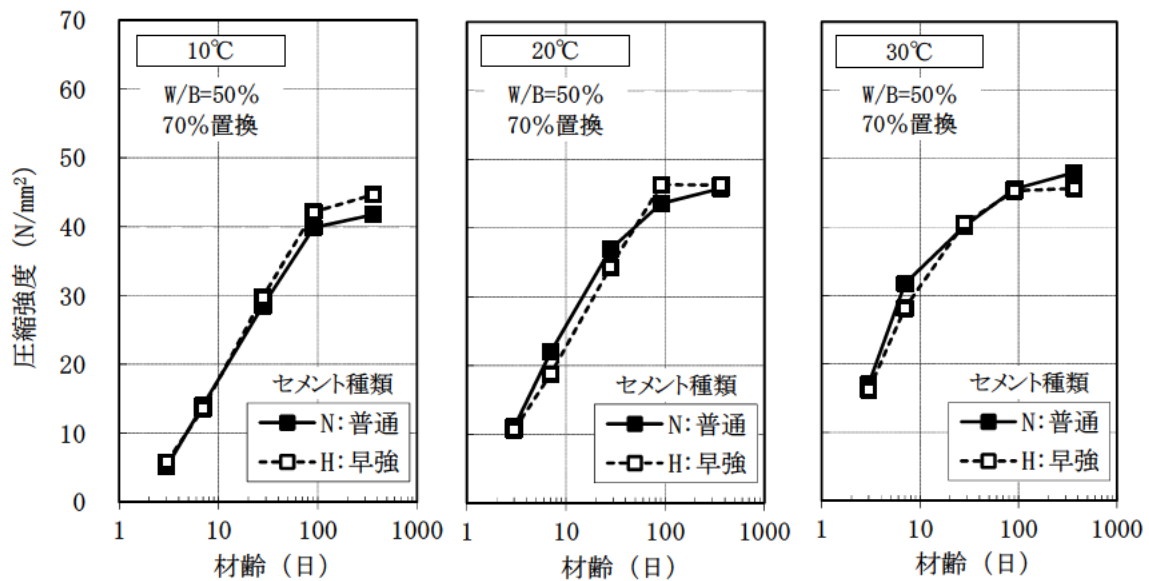


図-11 セメント種類の違いによる圧縮強度発現性の比較 (W/B=50%, 70%置換)

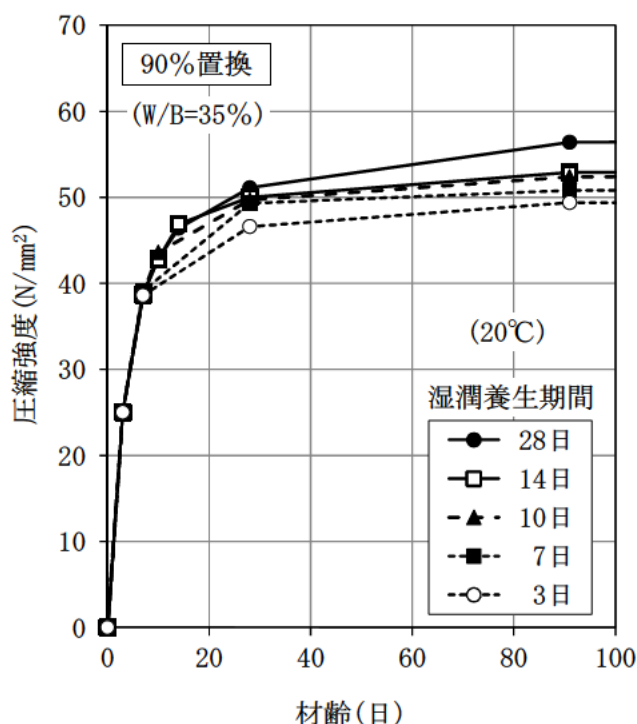
5. 養生条件（湿潤養生期間）

表－8 及び図－12 に、20℃環境で、水結合材比（W/B）35%、高炉スラグ微粉末 90%置換の配合において、湿潤養生期間を 3 日、7 日、10 日、14 日、28 日とした時の圧縮強度を示す。ここでの養生期間とは、打込み完了後、材齢 3 日で脱型し、その後、室温 20℃、湿度 60%RH の室内で実施する湿潤養生期間（打込み完了後からの材齢）のことである。例えば、湿潤養生期間 7 日とは、脱型した後、4 日間（材齢 7 日まで）湿潤養生を実施した。なお、所定の養生期間に達したら、それ以降は 20℃気中に存置した。試験の結果、湿潤養生期間が長いほど圧縮強度が大きくなる傾向があった。

表－8 湿潤養生期間の違いによる圧縮強度

環境 温度 (℃)	水結合 材比 W/B (%)	スラグ 置換率 BFS/B (%)	材齢 (日)	圧縮強度(N/mm ²)				
				湿潤養生期間(日)				
				3	7	10	14	28
20	35	90	3	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
			7	38.6	39.1	38.7	38.7	38.7
			10	—	—	43.6	42.8	42.8
			14	—	—	—	46.9	46.4
			28	46.6	49.3	49.7	50.0	51.1
			91	49.4	50.8	52.4	52.9	56.4
			365	48.5	51.0	52.5	53.2	57.0

備考) 養生期間：材齢 3 日で脱型し、その後、室温 20℃、湿度 60%RH の室内で実施した湿潤養生期間のこと。
所定の養生期間に達した後は室温 20℃、湿度 60%RH の室内気中に存置。



図－12 湿潤養生期間の違いによる圧縮強度

図-13 に、材齢 28 日及び 91 日での圧縮強度について、湿潤養生期間 28 日での圧縮強度を 1.0 とした時の強度比率を湿潤養生期間ごとに示した。同図より、28 日強度は湿潤養生期間 3 日では 28 日間養生した場合と比較して 10%程度低いものの、7 日以上実施すれば概ね等しい結果であった。一方、91 日強度は湿潤養生期間 7 日でも 28 日養生強度に比べて 10%程度低く、10～14 日養生しても 6～7%低い結果であった。

以上より、湿潤養生期間が長いほど強度発現には有利に作用し、特に長期強度発現性を確保するには極めて長い養生期間を要するが、実際の工事を想定した場合、強度管理材齢を 28 日とすると、湿潤養生期間は 7 日以上で十分に所要強度を確保できると考えられる。

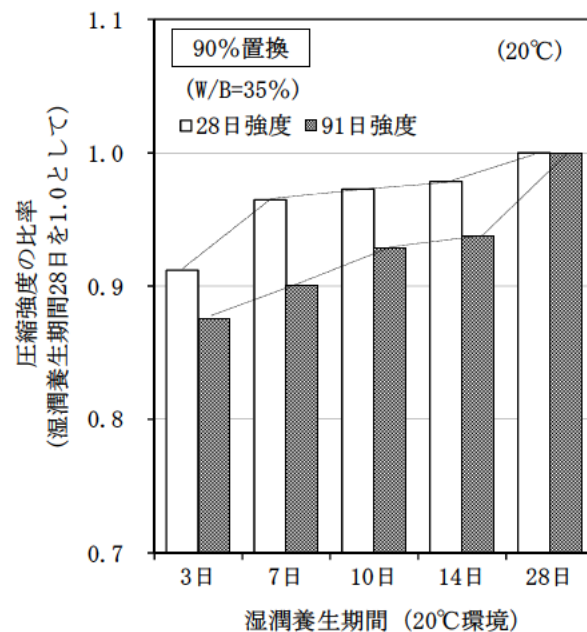


図-13 湿潤養生期間の違いが材齢 28 日及び 91 日での強度発現性に与える影響

6. 材齢と圧縮強度

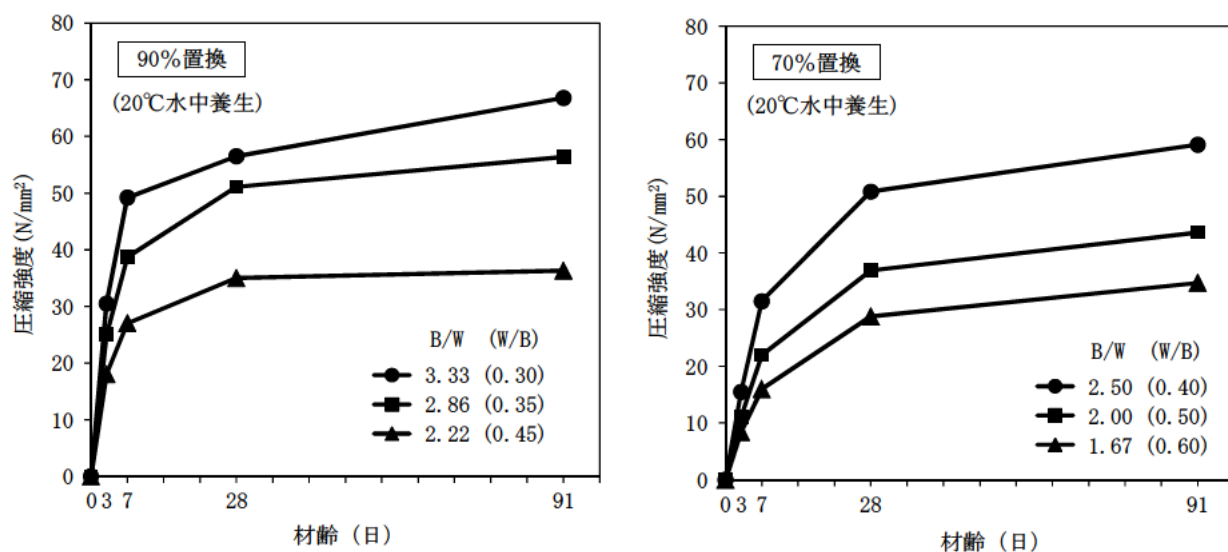
6.1 材齢と圧縮強度の関係

表－9 及び図－14 に、20℃環境で、高炉スラグ微粉末を90%置換（H:早強）及び70%置換（N:普通）で用いた配合において、それぞれ単位水量一定とした時、結合材水比の違いが圧縮強度に与える影響を示す。同図表より、結合材水比の増加とともに強度が増加傾向を示している。

表－9 結合材水比と圧縮強度

環境 温度 (℃)	スラグ 置換率 BFS/B (%)	単位水量 W (kg/m ³)	結合材水比 B/W (W/B)	圧縮強度(N/mm ²)			
				3 日	7 日	28 日	91 日
20	90	165	2.22 (0.45)	18.0	27.0	35.0	36.3
			2.86 (0.35)	25.0	38.7	51.1	56.4
			3.33 (0.30)	30.5	49.2	56.5	66.8
20	70	163	1.67 (0.6)	8.4	16.0	28.8	34.7
			2.00 (0.50)	11.1	22.0	36.9	43.6
			2.50 (0.40)	15.5	31.5	50.8	59.1

備考) 結合材量 B=(C+BFS) (C:ポルトランドセメント, BFS: 高炉スラグ微粉末 4000)
養生方法: 20℃水中養生



図－14 材齢と圧縮強度の関係

6.2 材齢と圧縮強度の関係式

図-15 に、20℃環境（水中養生）で、高炉スラグ微粉末を90%置換（H:早強）及び70%置換（N:普通）で用いた配合において、材齢と圧縮強度の関係式を結合材水比ごとに示す。なお関係式は土木学会コンクリート標準示方書（平成 11 年版〔施工編〕）を参考に以下の式(1)の形式とした。表-10 に示方書中に記載されたセメント種類ごとの標準値と本試験の結果を併記した。高炉スラグ微粉末70%置換は高炉セメント B 種相当、90%置換は早強ポルトランドセメントに近い定数であった。

$$\sigma_c(t) = \{t/(a + b \times t)\} \times d \cdot \sigma_c(i) \quad \dots \dots \text{式(1)}$$

- ここで、 $\sigma_c(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm²)
 $\sigma_c(i)$: 材齢 i 日におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm²)
 i : 設計基準強度で対象とする材齢(日), $i=28$ または 91
 a, b : 粉体に関する定数 (材齢 91 日の圧縮強度をもとに定められた値)
 d : 材齢 28 日に対する材齢 91 日の強度の増加率, $i=91$ の場合は $d=1$ とする。
 t : 材齢(日)

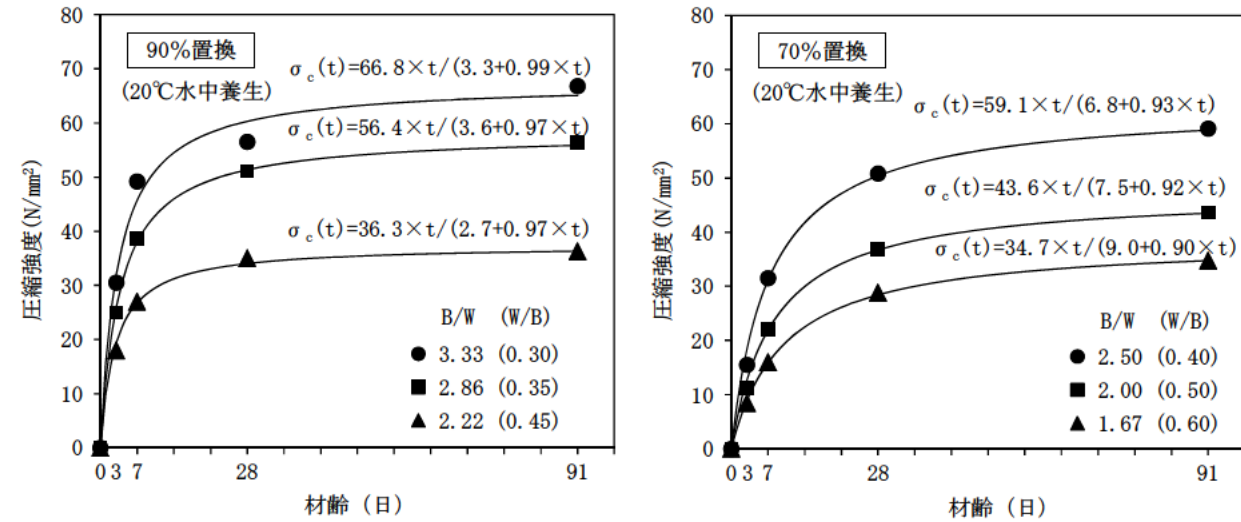


図-15 材齢と圧縮強度の関係式

表-10 式(1)内の定数（標準値）と本試験の結果

	セメント種類	結合材水比	定数		
			a	b	d
土木学会 コンクリート 標準示方書	普通ポルトランドセメント	—	4.5	0.95	1.11
	高炉セメント B 種	—	6.2	0.93	1.15
	中庸熱ポルトランドセメント	—	2.9	0.97	1.07
	早強ポルトランドセメント	—	2.9	0.97	1.07
本試験の結果	高炉スラグ微粉末 70%置換	1.67	9.0	0.90	1.20
		2.00	7.5	0.92	1.18
		2.50	6.8	0.93	1.16
	高炉スラグ微粉末 90%置換	2.22	2.7	0.97	1.04
		2.86	3.6	0.97	1.10
		3.33	3.3	0.99	1.18

7. 積算温度と圧縮強度の関係

一般的に、積算温度と圧縮強度との間には高い相関性があり、温度の違いによらず対数近似式で整理できる。表-11 及び図-16 に、水結合材比 (W/B) 35%で高炉スラグ微粉末を90%置換 (H:早強) で用いた配合での積算温度と圧縮強度との関係を示す。なお、練混ぜから材齢28日まではそれぞれ所定の温度を保持し、それ以降は20℃気中に存置している。また、積算温度と圧縮強度との関係式は、20℃7日間に相当する積算温度210(°D・D)を境界として対数近似式で定めた。

本試験の結果、高炉スラグ微粉末90%置換の場合、強度データのばらつきはやや大きいものの、積算温度と圧縮強度との間には相関性が認められ、対数近似式を得た。

表-11 積算温度と圧縮強度との関係 (90%置換, W/B=35%)

スラグ 置換率 (%)	水結合材比 W/B (%)	セメント 種類	温度 範囲 (°C)	積算温度 範囲 (°D・D)	圧縮強度※ (N/mm ²)
90	35	H:早強	10~30	60~210	$\sigma_c = 41.6 \cdot \log_{10}(M) - 62.4$
				210~3010	$\sigma_c = 13.3 \cdot \log_{10}(M) + 3.9$

※ 圧縮強度: σ_c (N/mm²), 積算温度: M (°D・D)

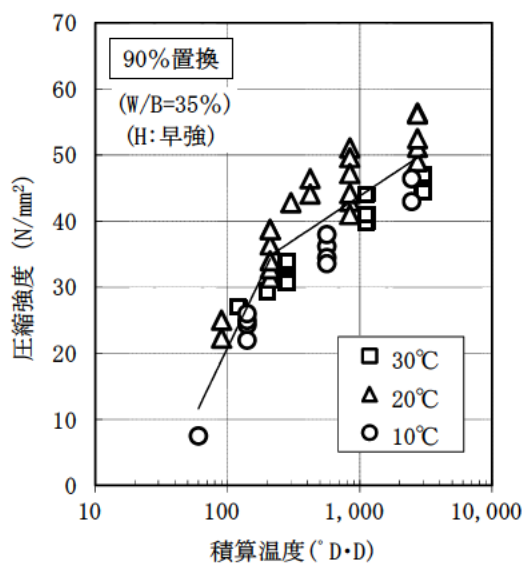


図-16 積算温度と圧縮強度との関係 (90%置換, W/B=35%)

表-12 及び図-17 に、W/B=50%，高炉スラグ微粉末 70%置換で、セメントに N:普通または H:早強を用いた配合における積算温度と圧縮強度との関係を示す。なお、練混ぜから材齢 28 日まではそれぞれ所定の温度を保持し、それ以降は 20℃気中に存置している。試験の結果、70%置換の場合、強度データのばらつきも小さく、温度やセメント種類の違いによらず積算温度から圧縮強度を一義的に求めることが概ね可能であった。

以上より、高炉スラグ微粉末の置換率が 70～90%において、積算温度と圧縮強度との間に関係式を整理できた。ただし、高炉スラグ微粉末の置換率が極めて多い配合（90%置換）では、強度のばらつきがやや大きくなったため、さらなるデータ収集が求められる。

表-12 積算温度と圧縮強度との関係（90%置換，W/B=35%）

スラグ置換率 (%)	水結合材比 W/B (%)	セメント種類	温度範囲 (°C)	積算温度範囲 (°D・D)	圧縮強度※ (N/mm ²)
70	50	N (普通)	10～30	60～210	$\sigma_c = 26.2 \cdot \log_{10}(M) - 41.4$
				210～3010	$\sigma_c = 19.3 \cdot \log_{10}(M) - 23.9$
		H (早強)	10～30	60～210	$\sigma_c = 26.5 \cdot \log_{10}(M) - 41.1$
				210～3010	$\sigma_c = 20.8 \cdot \log_{10}(M) - 26.3$

※ 圧縮強度: σ_c (N/mm²)，積算温度: M(°D・D)

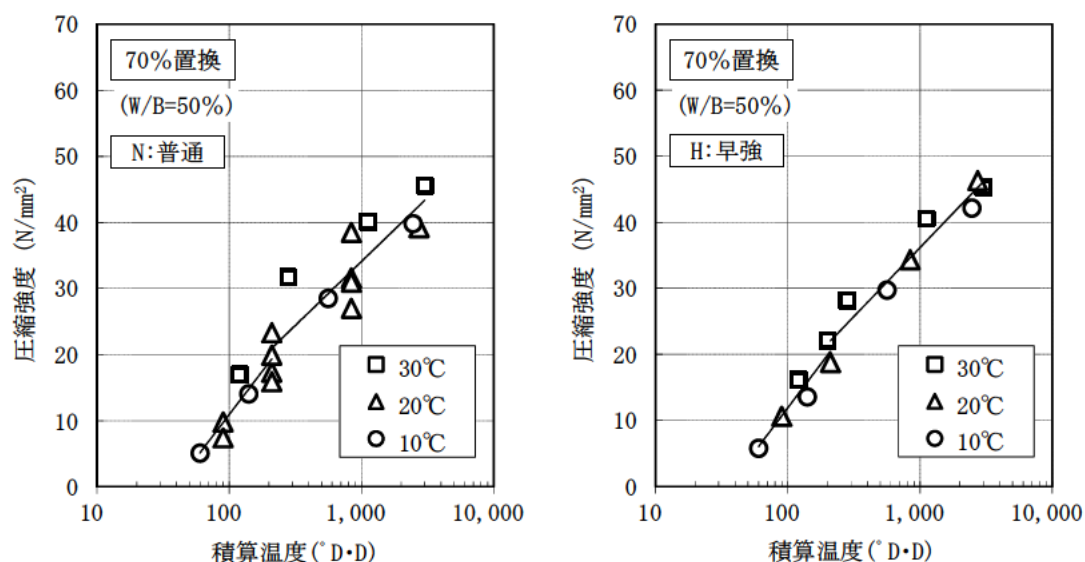


図-17 積算温度と圧縮強度との関係（70%置換，W/B=50%）

【参考】

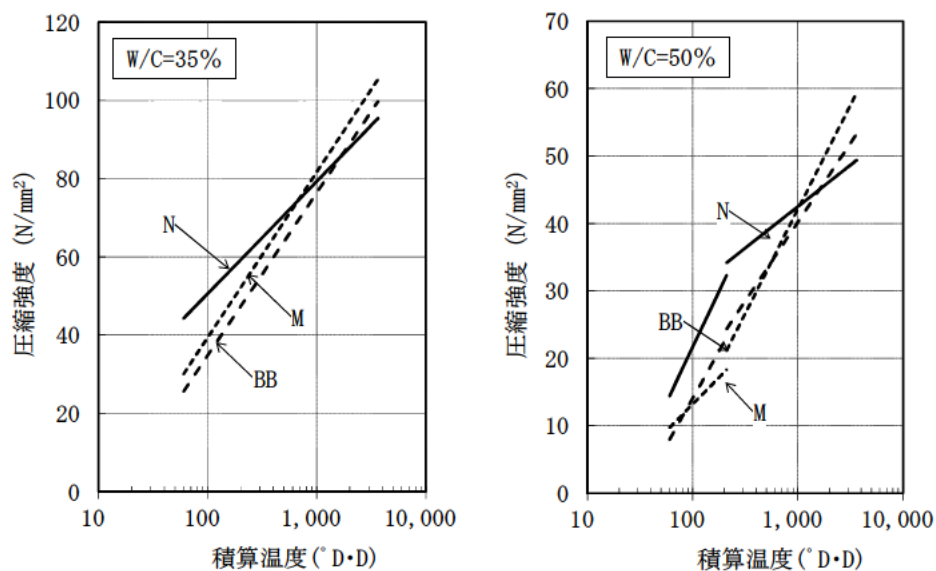


図-18 参考値

(太平洋セメント総合技術資料¹⁾ より)

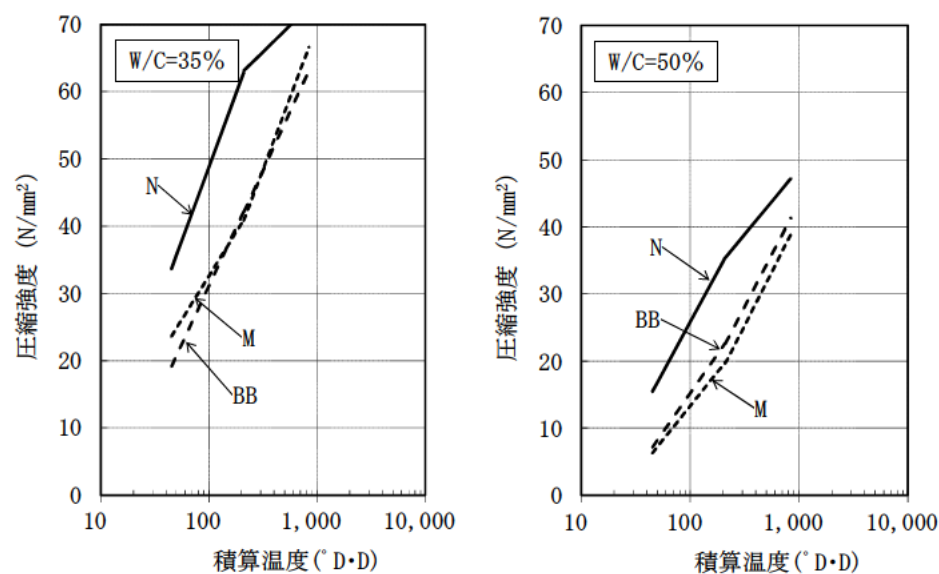


図-19 参考値

(宇部三菱セメント技術資料²⁾ より)

参考文献

- 1) 太平洋セメント株式会社：セメント総合技術資料
- 2) 宇部三菱セメント株式会社：技術資料 第6版, 2013.4

8. 有効材齢と圧縮強度の関係

一般的に、圧縮強度の発現は有効材齢を用いて下式(2)のように表すことができる。また、有効材齢は式(3)より求めることができる。

<圧縮強度発現式>

$$f'_c(t_e) = \frac{(t_e - S_f)}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_n) \quad \dots \dots \text{式(2)}$$

ここで、 $f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

$f'_c(t_n)$: 管理材齢 t_n (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t_n : 設計基準強度の管理材齢 (日)

t_e : 有効材齢 (日)

S_f : セメントの種類に応じた硬化原点 (凝結始発) に対応する有効材齢 (日)

a, b : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す係数

<有効材齢>

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad \dots \dots \text{式(3)}$$

ここで、 t_e : 有効材齢 (日)

Δt_i : ある一定のコンクリート温度が継続する期間 (日)

$T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度 (°C)

T_0 : 1(°C)

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2013

【補足】

「有効材齢」とは、アレニウスの反応速度則を用いて温度による反応速度の促進・遅延を材齢に考慮したものであり、コンクリート 20°C の時の反応速度を基準反応速度、活性化エネルギーを 4000 として、絶対温度を用いている。

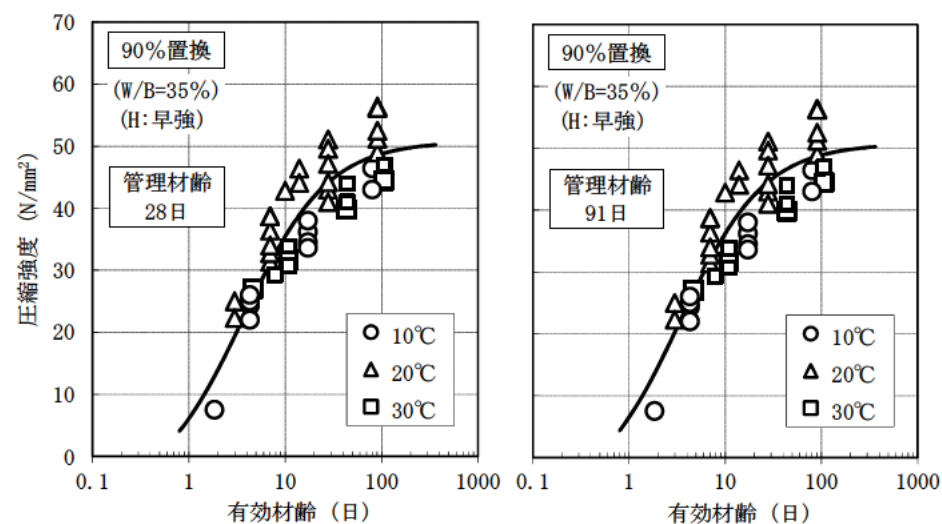
8.1 圧縮強度発現式の各係数

表一13 に、高炉スラグ微粉末を 90%置換（H:早強）及び 70%置換（N:普通または H:早強）で用いた配合において、試験結果から同定した圧縮強度発現式の各係数を示す。また、図一20 に、同定した各係数を用いて算出した圧縮強度と試験結果とを比較して示す。なお、圧縮強度の管理材齢は 28 日と 91 日の 2 ケースとし、係数 S_f と $f'_c(t_n)$ の値には試験結果の値を用いた。

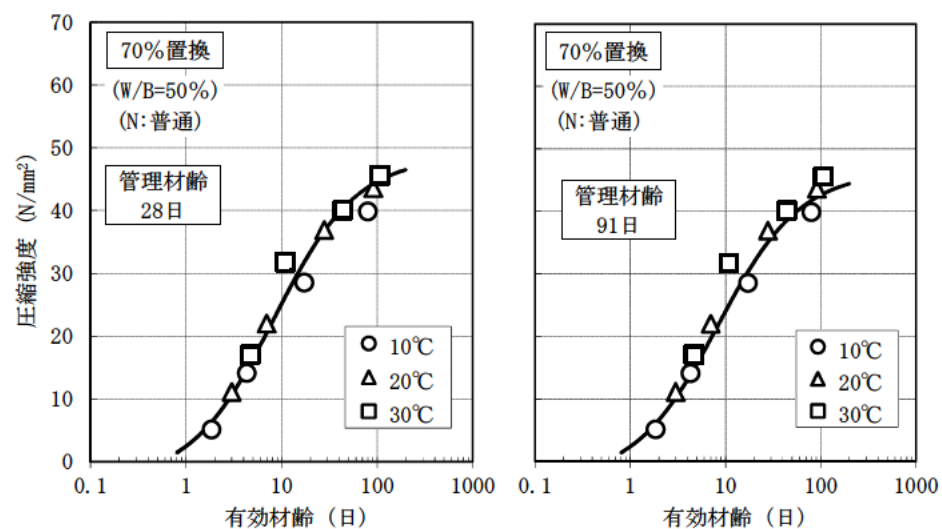
同図表より、W/B=35%（90%置換）の場合、強度データのばらつきはあるものの、圧縮強度発現式によって有効材齢と圧縮強度との関係傾向を概ね再現できた。また、W/B=50%（70%置換）の場合も、有効材齢と圧縮強度との関係は一義的に求めることができ、セメント種類の違いによらず係数 a 、 b は同程度であった。

表一13 圧縮強度発現式（式(2)）における各係数

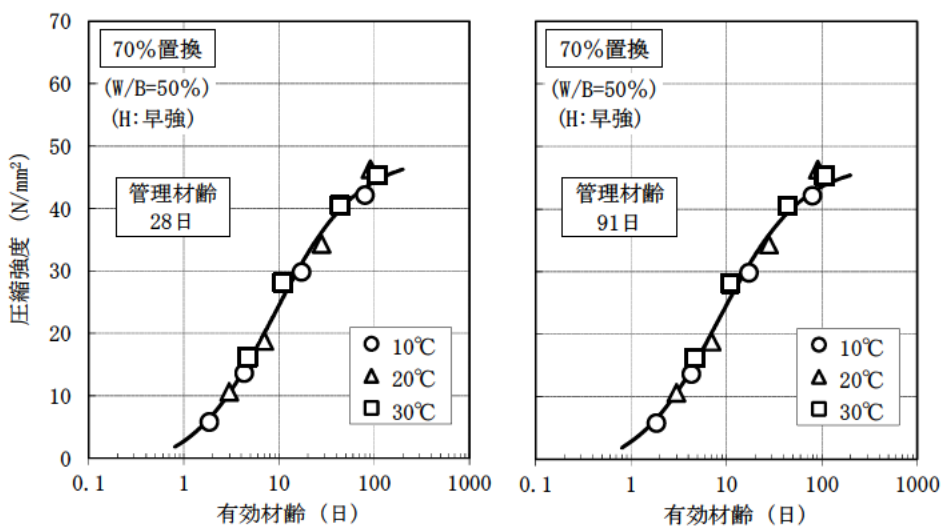
水結合材比 W/B (%)	スラグ 置換率 (%)	セメント 種類	データ 温度範囲	式(2)中の各係数				
				a	b	S_f (日)	$f'_c(t_n)$ (N/mm ²)	
							$t_n=28$ (日)	$t_n=91$ (日)
35	90	H (早強)	10～30℃	3.7	0.96	0.44	—	48.7
				3.4	0.82	0.44	41.7	—
50	70	N (普通)	10～30℃	8.3	0.94	0.53	—	43.6
				6.7	0.76	0.53	36.9	—
		H (早強)	10～30℃	8.3	0.94	0.44	—	44.6
				6.7	0.72	0.44	34.9	—



W/B=35%, 高炉スラグ微粉末 90%置換, H:早強の場合



W/B=50%, 高炉スラグ微粉末 70%置換, N:普通の場合



W/B=50%, 高炉スラグ微粉末 70%置換, H:早強の場合

図-20 有効材齢と圧縮強度との関係

8.2 日本コンクリート工学会の強度発現式との比較

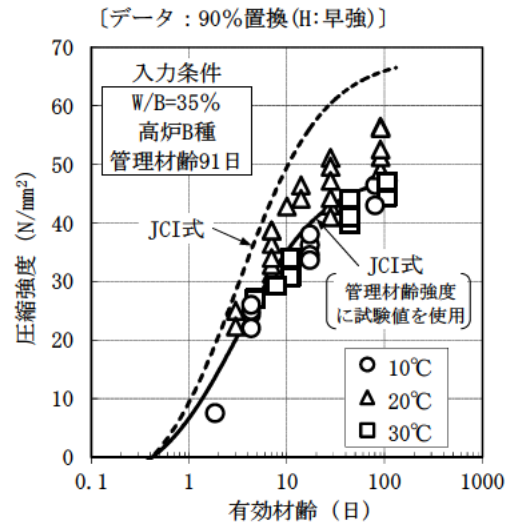
日本コンクリート工学協会（以下、JCI）の「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」に掲載されている圧縮強度発現式の各係数（ a , b , S_f ）及び各管理材齢での圧縮強度（ $f'_c(t_n)$ ）（ $t_n=28, 91$ ）から有効材齢と圧縮強度との関係を求め、本試験の結果と比較した。求めた各係数を表－14 に、計算結果と試験結果を比較して図－21 に示す。なお図中には、管理材齢強度に試験結果の値を用いた場合も併記した。

比較の結果、高炉スラグ微粉末 70%置換の圧縮強度は、ひび割れ制御指針に記載された高炉セメント B 種の各係数（ a , b , S_f , $f'_c(t_n)$ ）を用いて算出した圧縮強度と概ね一致する結果を得られた。また、管理材齢強度に実際の試験値を用いて再計算すると、計算結果は試験値と良く一致することがわかった。つまり、高炉スラグ微粉末を JIS R 5211 規格の高炉セメント C 種上限（70%置換）で用いた配合でも、現行の高炉セメント B 種の強度発現式及び各係数で概ね圧縮強度の推定ができると考える。

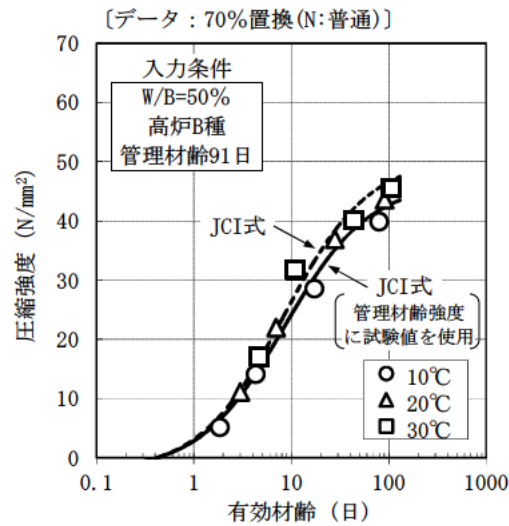
一方、高炉スラグ微粉末 90%置換の場合、JCI の強度発現式で、高炉セメント B 種の値を用いて計算すると、圧縮強度が試験結果よりも大きく算定された。そこで、管理材齢強度に試験値を用いて再度計算すると、計算値は試験結果と概ね一致した。つまり、高炉スラグ微粉末の置換率が極めて多い配合では、JCI の強度発現式における各係数は高炉セメント B 種の係数で概ね良いが、管理材齢強度の値には適切な設定が求められる。

表－14 日本コンクリート工学協会 圧縮強度発現式の各係数

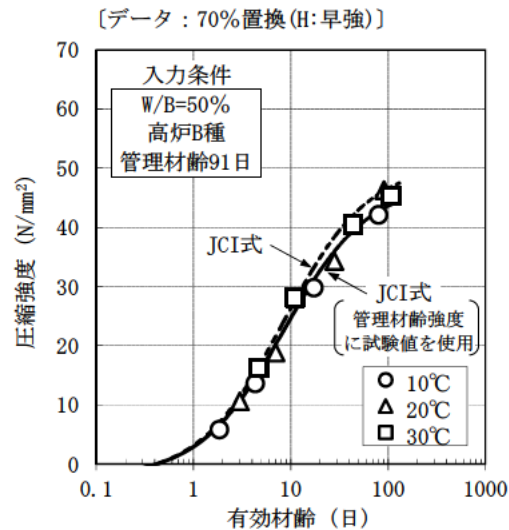
水結合材比 W/B (%) (B/W)	セメント 種類	式(2)の各係数				
		a	b	S_f (日)	$f'_c(t_n)$ (N/mm ²)	
					$t_n=28$ (日)	$t_n=91$ (日)
35 (2.86)	高炉セメント B 種	3.66	1.00	0.42	—	68.6
		3.37	0.88	0.42	59.2	—
50 (2.00)	高炉セメント B 種	8.32	0.94	0.42	—	47.6
		6.68	0.76	0.42	38.4	—



W/B=35%, 高炉スラグ微粉末 90%置換, H:早強の場合



W/B=50%, 高炉スラグ微粉末 70%置換, N:普通の場合



W/B=50%, 高炉スラグ微粉末 70%置換, H:早強の場合

図-21 圧縮強度発現式による計算結果と試験結果の比較

付録－15 引張強度

■ 目的

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの引張強度特性の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験方法】	JIS A 1113:「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠		
【試験条件】	混和材料：高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添)		
	セメント種類	： 2 種類	N:普通, H:早強
	養生方法	： 湿潤養生	(水中養生を含む)
【要 因】	高炉スラグ微粉末の置換率	： 4 水準	0%, 50%, 70%, 90% (質量比)
	水結合材比	： 2 水準	35%, 50%
	環境温度	： 3 水準	10℃, 20℃, 30℃

一般的に圧縮強度と引張強度の関係は式(1)のように表すことができる。図－1 に試験結果から得られた圧縮強度と引張強度の関係を示す。また、土木学会¹⁾²⁾及び日本コンクリート工学協会³⁾（以下、JCI）での引張強度式も併記し、係数を表－1 に本試験結果とともに比較して示す。なお、各学会から示されている係数は、基本的に水中養生された供試体に基づいて定められている。このため、水中養生と同等の養生を実施できない場合には、適切に係数を修正する必要がある。

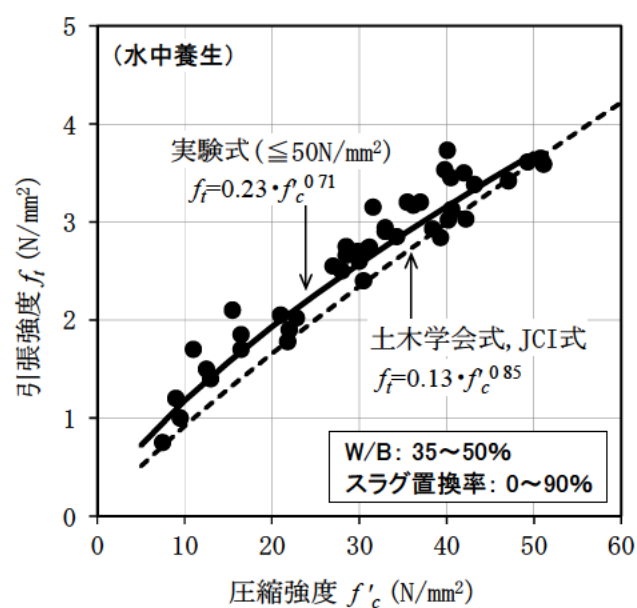
$$f_t(t_e) = C_1 \times f'_c(t_e)^{C_2} \quad \dots \dots \text{式(1)}$$

ここで、 $f_t(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの引張強度 (N/mm²)

$f'_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t_e ：有効材齢 (日)

C_1, C_2 ：係数



図ー1 圧縮強度と引張強度の関係

表ー1 引張強度式の係数比較

機関名	制定年	引張強度式の係数	
		C_1	C_2
土木学会	2007	0.44	0.50
	2012	0.13	0.85
JCI	2008	0.13	0.85
本試験の結果		0.23	0.71

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2008
- 2) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008

付録－16 ヤング係数

■ 目的

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートのヤング係数の確認

■ 試験方法, 試験条件及び要因

【試験方法】 JIS A 1149:「コンクリートの静弾性係数試験方法」 に準拠

【試験条件】 混和材料：高炉スラグ微粉末 4000（無水せつこうを三酸化硫黄(SO₃)換算で 2.0%内添)
養生方法：20℃湿潤養生（水中養生を含む）

【要 因】 高炉スラグ微粉末の置換率 ： 3 水準 50%, 70%, 90%（質量比）
セメント種類 ： 2 種類 N:普通, H:早強
水結合材比 ： 6 水準 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 60%

1. 圧縮強度とヤング係数の関係

一般的に圧縮強度とヤング係数の関係は式(1)のように表すことができる。図－1 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。また、表－1 に土木学会¹⁾²⁾ 及び日本コンクリート工学協会³⁾（以下、JCI）でのヤング係数式の係数を比較して示す。

$$E_c(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4} \quad \dots \dots \text{式(1)}$$

ここで、 $E_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートのヤング係数 (N/mm²)

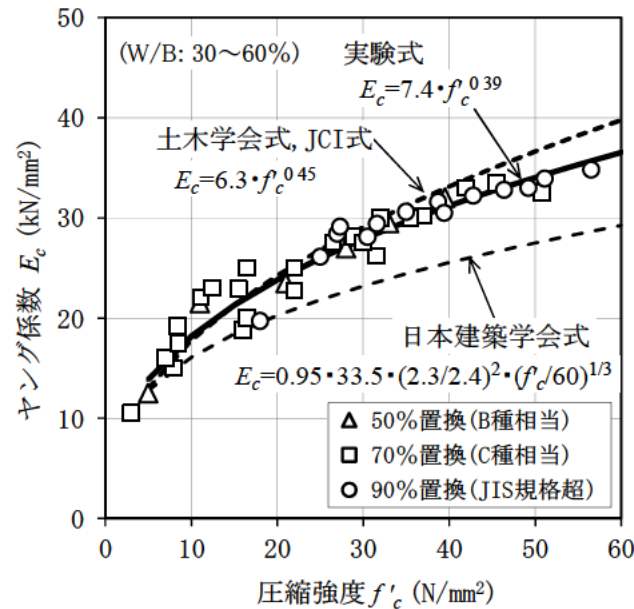
$f'_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t_e ：有効材齢 (日)

C_3, C_4 ：係数

<凡例>

- ・ 土木学会式(最新版)は、2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編:標準]p 316 に示された式。温度応力の計算に用いられる材齢や乾燥状態等を考慮した値(有効ヤング係数)であり、ここではクリープの影響項目を 1.0 として無視した。
- ・ JCI 式は、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 年の p.52 に示された式。
- ・ 日本建築学会式は、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015」の p 192 に示された式。1978～1992 年の 3,000 以上の実験データに基づく統計分析で求められた式。



図ー1 圧縮強度とヤング係数の関係

表ー1 ヤング係数式の係数比較

機関名	制定年	ヤング係数式の係数	
		C ₃	C ₄
土木学会	2007	4.7×10^3	0.50
	2012	6.3×10^3	0.45
JCI	2008	6.3×10^3	0.45
本試験の結果		7.4×10^3	0.39

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2008
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2013
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2015

2. 養生の影響

図-2 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。なお、図中の記号について、白塗り部は強度試験材齢時まで最長 28 日間 20℃環境下で湿潤養生したケース、黒塗り部は脱型後に気中存置（気中養生）したケースを表している。同図より、気中養生の場合、湿潤養生した場合に比べて、ヤング係数の値が小さくなる傾向があった。このため、所要のヤング係数を確保するには、適切な湿潤養生の実施が重要となる。

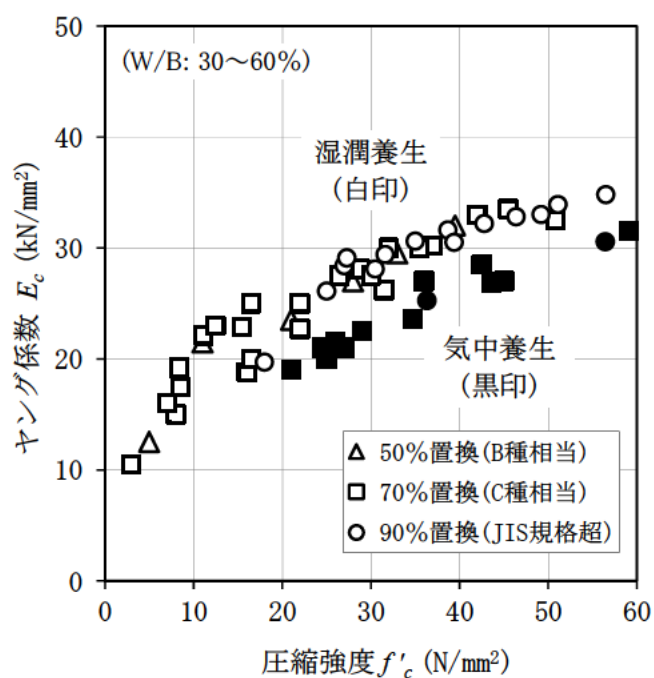


図-2 ヤング係数に与える養生の影響

参考文献

- 1) 椎名貴快, 佐藤幸三, 田中 徹, 土師康一, 小池晶子, 中村英佑: 高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの強度と耐久性に着目した湿潤養生期間, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-487, pp.973-974, 2015.9

付録－17 塩化物イオン浸透抵抗性

■ 目的

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験方法】	JIS A 1154:「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠 JSCE-G572:「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数 試験方法（案）」を参考 硝酸銀溶液噴霧法		
【試験条件】	養生条件：打込み後3日で脱型し、20℃ 60%RH環境で所定期間まで湿潤養生 混和材料：高炉スラグ微粉末4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で2.0%内添) 水結合材比（セメント種類）：35%（H:早強） 高炉スラグ微粉末の置換率：90%（質量比）		
【要因】	湿潤養生期間	： 5水準	3日、7日、10日、14日、28日
	暴露環境	： 2水準	屋外（暴露：新潟県、沖縄県）、屋内（浸せき）

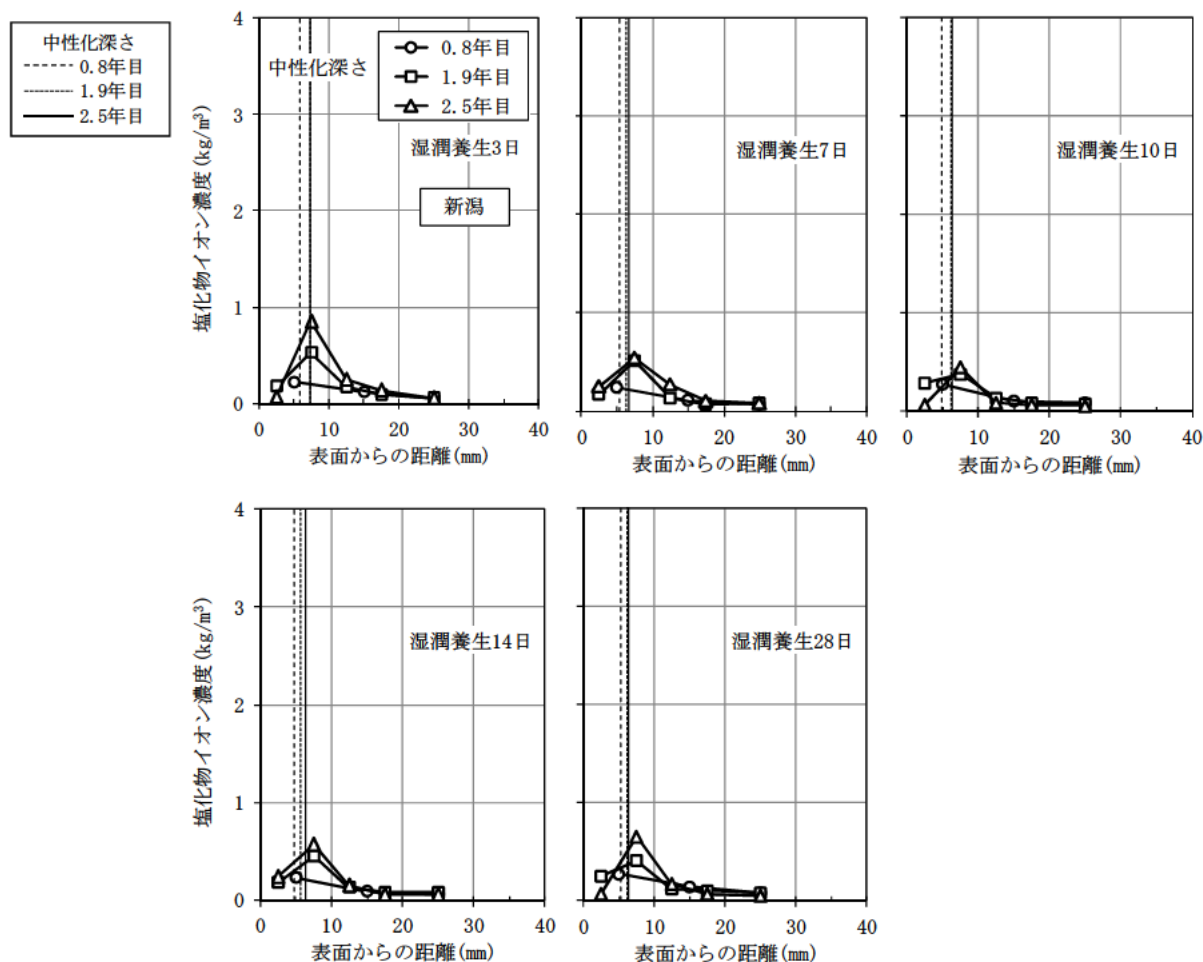
1. 暴露試験

高炉スラグ微粉末をポルトランドセメントの90%置換で用いたコンクリート（W/B=35%）を実環境下に暴露し、塩化物イオン浸透に対する抵抗性について検討した。暴露環境は、塩害地域区分Bの新潟県沿岸部及び塩害地域区分Aの沖縄県沿岸部の2箇所である。中性化深さの測定は、フェノールフタレイン溶液噴霧法による。（「塩害地域区分」とは、道路橋示方書において塩害対策が必要な地域をエリアごとに3段階で分けた区分（付録－1の図－5参照））

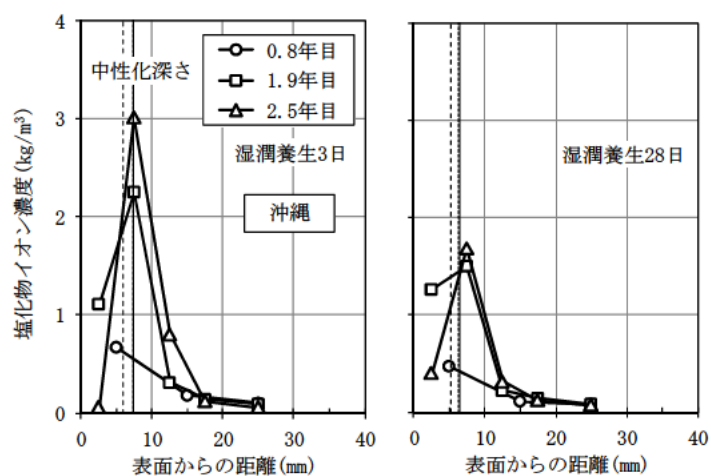
(1) 湿潤養生期間

打込み後の湿潤養生期間を3日、7日、10日、14日、28日としたコンクリートの塩化物イオン濃度分布を確認した。新潟及び沖縄での暴露試験結果をそれぞれ図－1及び図－2に示す。同図より、すべてのケースにおいて、外部から浸透した塩化物イオン濃度が中性化深さで深くなる傾向であった。これは、中性化進行によって外部から浸透した塩化物イオンが内部に移動し濃縮したためである。また、湿潤養生期間が長いほど、コンクリート内部の塩化物イオン濃度が小さく、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上することを確認できた。この理由として、湿潤養生期間が長いほど、表層コンクリートが緻密になったためと考える。

以上より、塩化物イオンが外部から供給され、さらに中性化の進行が同時に起こる環境条件下では、中性化によって内部へ移動・濃縮する塩化物イオンに起因した鋼材腐食の発生を防止するため、中性化残りを大きく設定することや湿潤養生期間を長く確保するなどの対策が必要である。



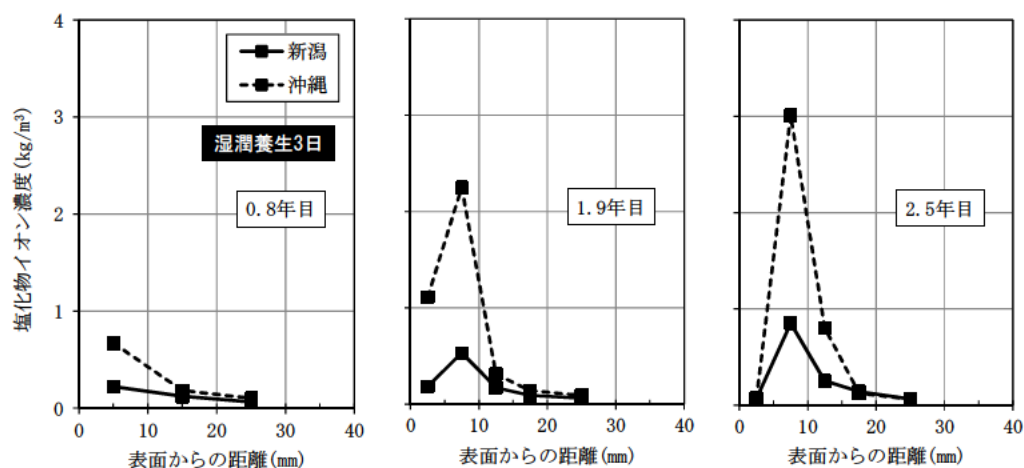
図ー1 湿潤養生期間の異なるコンクリートの時系列塩化物イオン濃度分布（新潟）



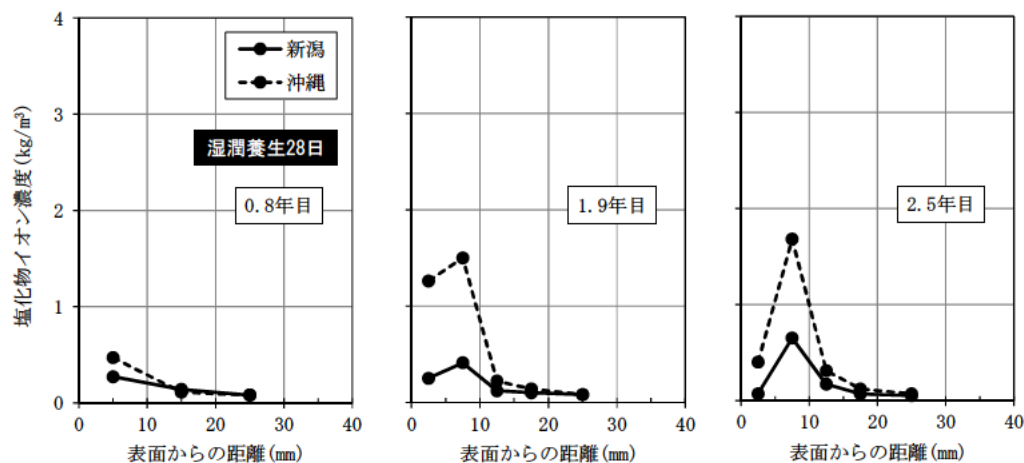
図ー2 湿潤養生期間の異なるコンクリートの時系列塩化物イオン濃度分布（沖縄）

(2) 暴露場所

暴露環境を新潟及び沖縄とした時の塩化物イオン濃度分布の比較結果を図-3に示す。なお、コンクリートの湿潤養生期間は3日及び28日の2水準で比較した。同図より、飛来塩分量の多い沖縄では、新潟に比べて塩化物イオン濃度が高く、中性化進行による塩化物イオン濃度の内部濃縮が顕著にみられた。また、湿潤養生期間の長い28日の方が、3日より塩化物イオン濃度が低く、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上する結果であった。



(a) 湿潤養生期間 3 日



(b) 湿潤養生期間 28 日

図-3 湿潤養生期間の異なるコンクリートの時系列塩化物イオン濃度分布（新潟と沖縄の比較）

(3) 硝酸銀溶液噴霧法

新潟県沿岸部に1.9年間暴露した試験体の割裂面に硝酸銀溶液を噴霧し、硝酸銀と塩化物イオンが反応して白色の塩化銀が生成される性質を利用した硝酸銀溶液噴霧法を用いて、コンクリート中の塩化物イオンの浸透深さを確認した。図-4に試験結果を示す。なお、試験体の湿潤養生期間は3日、7日、10日、14日、28日の5水準である。試験の結果、湿潤養生期間の違いによらず、中性化によって内部濃縮した塩化物イオン濃度の分布域まで硝酸銀溶液噴霧法によって簡易に推定できることがわかった。

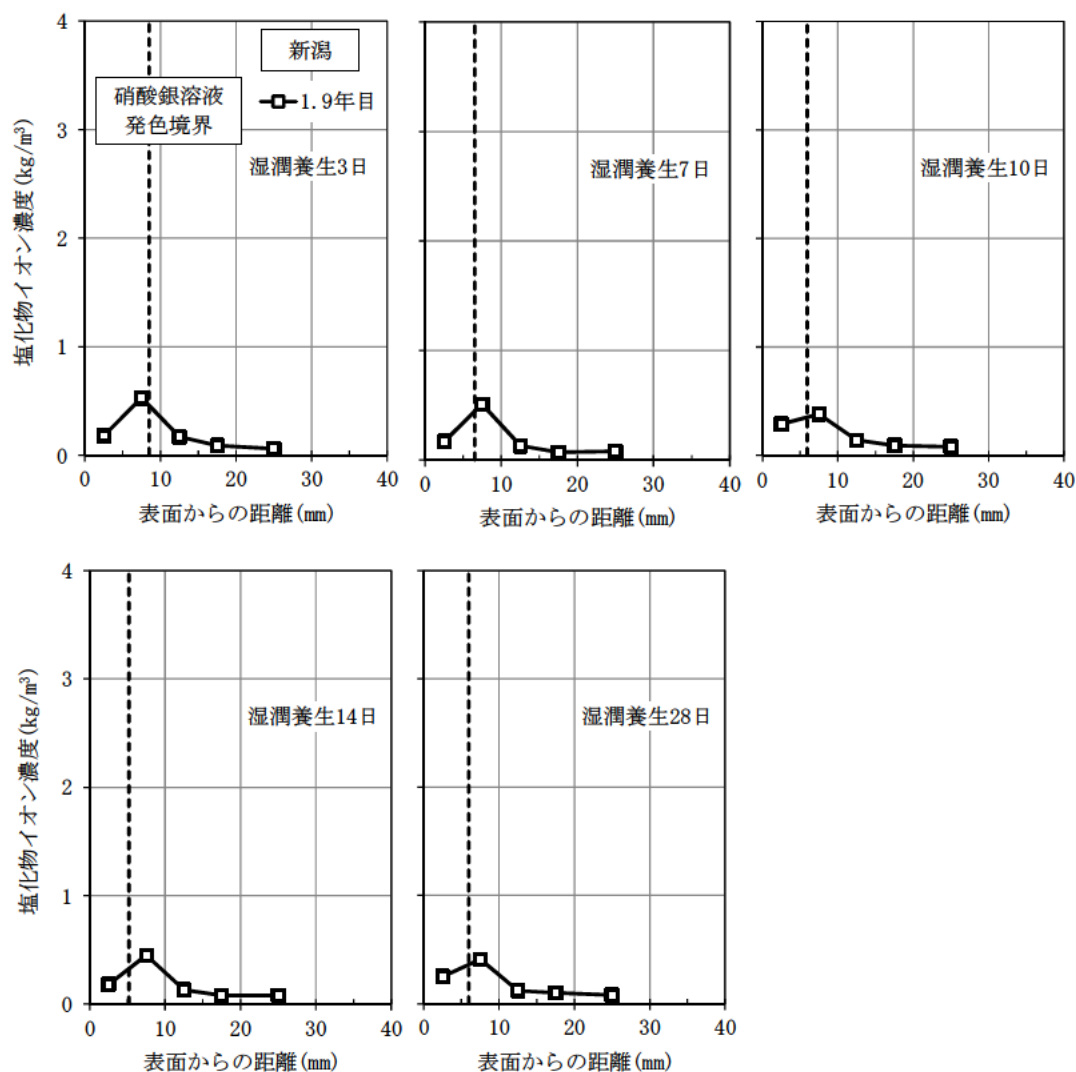
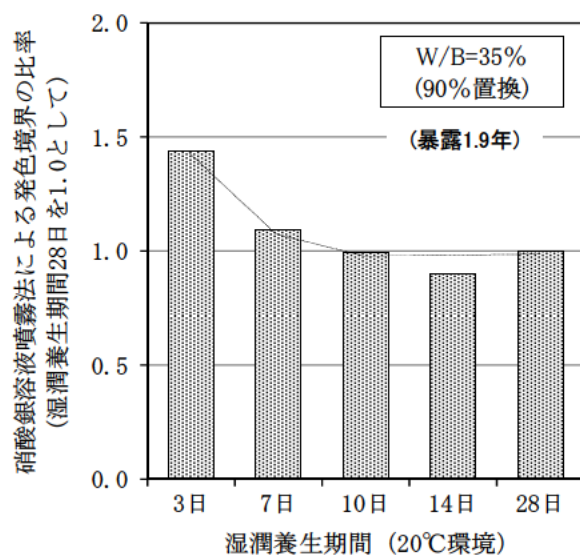


図-4 塩化物イオン濃度分布と硝酸銀溶液発色境界

図一5 に硝酸銀溶液噴霧法によって得られた発色境界までの深さ（＝塩化物イオン浸透深さ）を，湿潤養生期間28日での値を1.0とした時の比率で湿潤養生期間ごとに示す。同図より，湿潤養生を7日以上実施した場合，塩化物イオン浸透深さ，すなわち，塩化物イオン浸透に対する抵抗性は概ね同程度であった。



図一5 塩化物イオン濃度分布と硝酸銀溶液発色境界

2. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

コンクリート中での塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めるため、土木学会の浸せき試験法（JSCE-G 572）に準拠して試験を行った。試験に用いたコンクリートは、水結合材比 35%、高炉スラグ微粉末の置換率 90%、湿潤養生期間は 28 日である。浸せき試験に用いた供試体は、円柱供試体（直径 ϕ 100mm×高さ 200mm）の上下 25mm を切断して切り出したものを使用した。また、供試体の試験面以外の面（側面と底面）はエポキシ樹脂塗料で被覆した。

供試体を塩化ナトリウム水溶液（濃度 10%）に浸せきし、浸せき期間は 3 ヶ月、6 ヶ月、9 か月、12 か月とした。浸せき終了後、円柱供試体を厚さ方向に 10mm 間隔で 5 試料を切断して粉碎し、JIS A 1154（電位差滴定法）に準拠して塩化物イオン濃度を測定した。その後、式(1)を用いて、塩化物イオンの見掛けの拡散係数と表面塩化物イオン濃度を求めた。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad \dots \dots \text{式(1)}$$

ここで、 x : コンクリート暴露面からの距離(mm)

t : 浸せき期間(year)

$C(x,t)$: 距離 x (mm)、浸せき期間 t (year)において測定された塩化物イオン濃度(kg/m³)

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度(kg/m³)

C_i : 初期含有塩化物イオン濃度(kg/m³)

D_d : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm²/year)

erf : 誤差関数

[補足]

土木学会の浸せき試験法 (JSCE-G572) で用いる浸せき溶液は、塩化ナトリウム水溶液の濃度が 10%と高濃度で、実際の海水中の塩化物イオン濃度の約 3 倍に相当する。このため、海水環境をそのまま再現したものとはならない。しかしながら、飛沫帯などの乾湿繰返しを受ける環境では、コンクリート表層部の細孔溶液中の塩化物イオンは 10%の塩化ナトリウム溶液相当に濃縮されている状態も確認されている。このため、本試験では、コンクリート表層部での塩化物イオンの濃縮現象がコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布に与える影響をあらかじめ考慮したものとなっている。また、浸せき溶液の温度が高いことにより、コンクリート中への塩化物イオンの浸透量が大きくなり、ある程度緻密なコンクリートでも比較的短時間で塩化物イオン濃度分布を測定できる利点もある。

参考文献

- 1) コンクリート委員会・規準関連小委員会：【委員会報告】土木学会規準「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）（JSCE-G 572-2003）」の制定，土木学会論文集 No.767/IV-64, pp.11-16, 2003.8

図-6 に浸せき試験によるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を示す。また表-1 及び図-7 に浸せき試験の結果から得られたコンクリート表面の塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を示す。

同図表より、浸せき期間が長いほど、表面塩化物イオン濃度は増加し、見掛けの拡散係数は小さくなる傾向がみられ、特に、浸せき期間 12 ヶ月の見掛けの拡散係数は極めて小さい値であった。なお、実際の環境では中性化も複合的に作用して内部濃縮現象が起こるため、ここで示したような塩化物イオン浸透に対する抵抗性は確保できない可能性があるので注意が必要である。

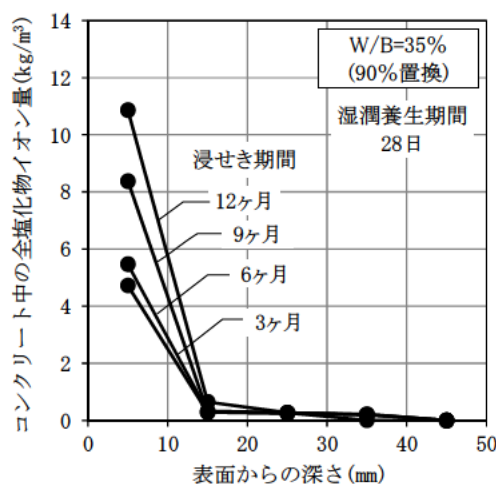


図-6 浸せき試験によるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布

表-1 浸せき試験による表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数

浸せき期間 (ヶ月)	表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	見掛けの拡散係数 (cm ² /year)
3	12.5	0.70
6	15.6	0.60
9	23.8	0.25
12	24.5	0.17

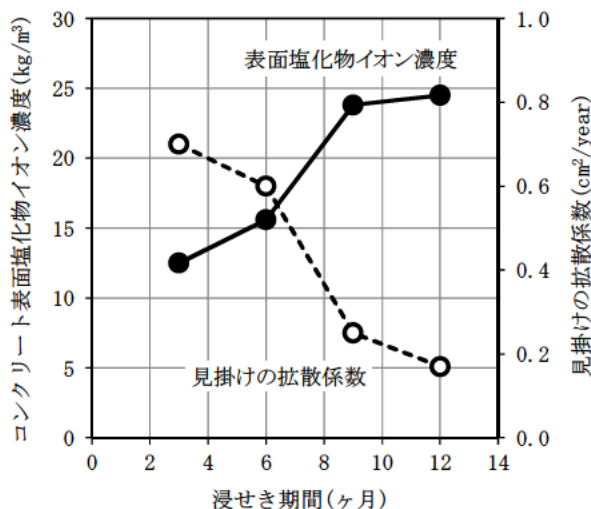


図-7 浸せき期間と表面塩化物イオン濃度及び見掛けの拡散係数との関係

【参考】

表-2 見掛けの拡散係数

参考 文献	セメント 種類	水結合材比 W/B (%)	高炉スラグ微粉末 の置換率 (%)	試験方法	見掛けの 拡散係数 (cm ² /year)	備考
1)	N	55	0	浸せき (26 週)	5.9	図より読み取り
	H		0		7.8	
	BB		30～60		1.5	
2)	N	55	0	海中暴露 (365 日)	2.25	
		45			1.45	
		35			0.67	
	BB	55	30～60		0.52	
		45			0.27	
		35			0.24	
	N	55	0	干満帯暴露 (365 日)	2.41	
		45			1.10	
		35			0.50	
	BB	55	30～60		0.76	
		45			0.58	
		35			0.32	
	N	55	0	浸せき (365 日)	2.96	
		45			1.63	
		35			0.87	
	BB	55	30～60		0.83	
		45			0.63	
		35			0.29	
3)	N	50	0		1.49	
	BB		30～60		0.57	

参考文献

- 1) セメント協会：コンクリート専門委員会委員会報告ダイジェスト版，第7章塩害
- 2) 石中正人，中永秀彦，松嶋信行，鈴木 勝，鳴瀬浩康，大西利勝：各種セメントを用いたコンクリートの塩化物イオンの拡散係数に関する研究，宇部三菱セメント研究報告，No.7，2006
- 3) 住友大阪セメント：ベータセメントL技術資料，2003.9

付録－18 中性化抵抗性

■ 目的

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの中性化抵抗性の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

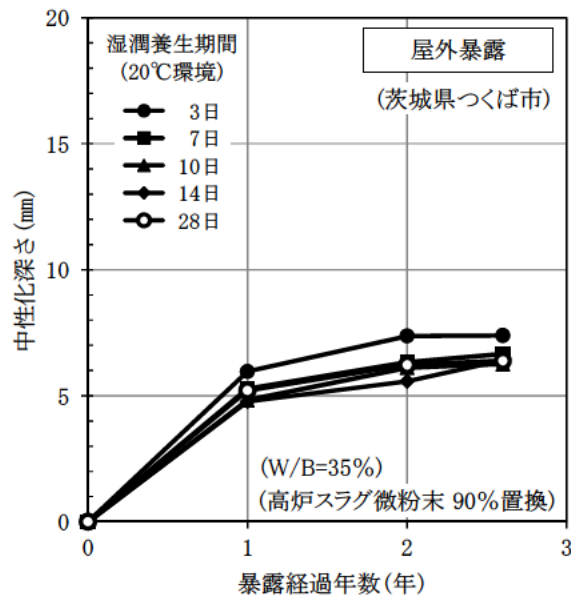
【試験方法】	JIS A 1152:「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠 JIS A 1153:「コンクリートの促進中性化試験方法」
【試験条件】	混和材料: 高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添) 水結合材比（セメント種類）： 35%（H:早強） 高炉スラグ微粉末の置換率： 90%（質量比） 屋外暴露試験体：□100mm×200mm（暴露面以外は全てエポキシ樹脂系材料で被覆） 促進中性化試験体: □100mm×400mm
【要 因】	湿潤養生期間： 5 水準 3 日, 7 日, 10 日, 14 日, 28 日 表面塗布工： 3 水準 無塗布 塗布剤 A（塗布型収縮低減剤） 塗布剤 B（耐久性向上養生剤） 暴露環境： 2 水準 屋 内（室温 20℃, 湿度 60%RH 環境） 屋 外（内陸部：茨城県, 沿岸部：新潟県, 沖縄県）

1. 湿潤養生期間

(1) 中性化深さ

水結合材 35%, 高炉スラグ微粉末 90%置換のコンクリートについて、打込み後の湿潤養生期間を 5 水準（3 日, 7 日, 10 日, 14 日, 28 日）とし、それぞれを屋外環境（内陸部：茨城県つくば市）に暴露した試験体の中性化深さを図－1 に示す。なお、暴露期間は最長 2.6 年で、中性化深さの測定は 1 年目, 2 年目, 2.6 年目の計 3 回実施した。

同図より、湿潤養生期間を 7 日以上行った試験体では、中性化の進行は概ね同傾向であった。なお、暴露開始から 1 年でおおよそ 5mm まで中性化深さが進行したものの、その後の進行は緩やかであった。



図ー1 湿潤養生期間の異なる試験体の中性化深さの推移

(2) 中性化速度係数

表ー1 及び図ー2 に屋外環境に暴露した試験体の中性化速度係数を示す。なお、中性化速度係数の算出は、中性化が時間の平方根に比例して進行する、すなわち $\sqrt{t}$ 則に従うと仮定して、暴露1年、2年、2.6年での中性化深さの測定値をそれぞれ暴露期間の平方根で除してを求めた。中性化深さと中性化速度係数の関係は、式(1)のように $\sqrt{t}$ 則として定式化される。

$$y = a \cdot \sqrt{t} \quad \dots \dots \text{式(1)}$$

ここで、 y : 中性化深さ(mm)

a : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$)

t : 暴露期間(year)

同図より、暴露期間が長くなると中性化速度係数が小さくなる傾向を確認できた。これは、雨水等がコンクリート中に浸透したことで、結合材の反応が暴露後も継続したため、中性化抵抗性が材齢の経過とともに向上したと考えられる。さらに、表層コンクリート中の含水率が高いため、二酸化炭素の侵入が抑制されたこと等が理由として考えられる。

次に、図ー3 に暴露2.6年目での中性化速度係数の結果を湿潤養生期間別に示す。なお、中性化速度係数の値は湿潤養生期間28日での値を1.0とした時の比率で表した。同図より、湿潤養生期間3日では、28日間養生した場合に比べて、中性化速度係数が1.16倍と大きくなるが、湿潤養生期間を7日以上実施した場合、28日間養生した結果と概ね同程度になることがわかった。これより、本配合における中性化速度係数の値は、湿潤養生期間7日から28日での平均値と考え、2.6年目の3.99 mm/ $\sqrt{\text{year}}$ を代表値とした。

表-1 湿潤養生期間の異なる試験体の中性化速度係数

暴露期間	中性化速度係数(mm/√ year)					備 考
	湿潤養生期間					
	3 日	7 日	10 日	14 日	28 日	
1 年	5.96	5.28	4.83	4.77	5.21	平均 5.02 (7～28 日)
2 年	5.21	4.48	4.32	3.94	4.40	平均 4.29 (7～28 日)
2.6 年	4.58	4.13	3.88	3.98	3.96	平均 3.99 (7～28 日)

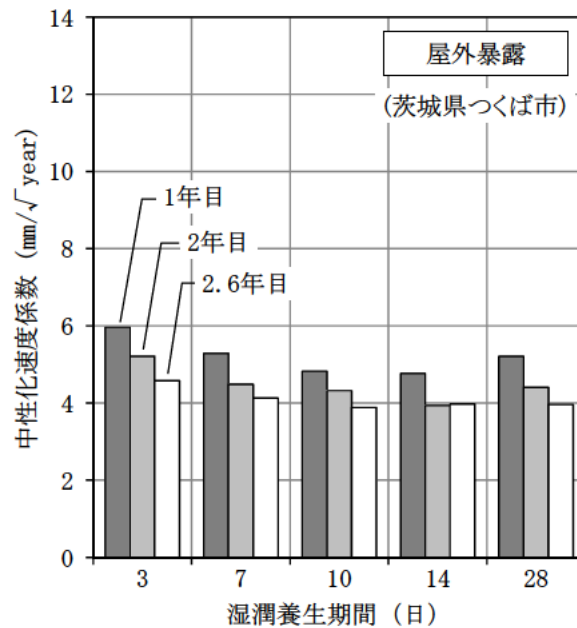


図-2 湿潤養生期間の異なる試験体の中性化速度係数

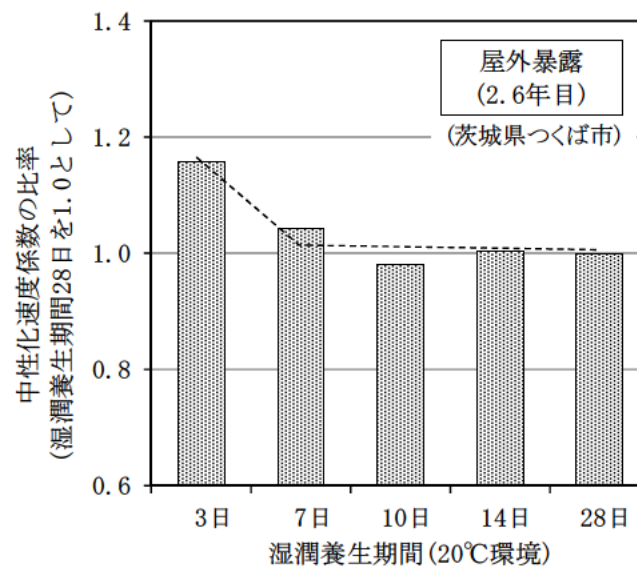


図-3 中性化速度係数の比較 (湿潤養生期間別)

2. 環境条件

2.1 屋内、屋外

中性化に影響を及ぼす環境因子には、炭酸ガス濃度や温度、湿度などが挙げられ、実際の構造物ではこれらの環境因子が複合的に作用した条件に曝されている。例えば、屋内と屋外で比較すると、屋内の場合は炭酸ガス濃度が高く、湿度も比較的低いため、屋外に比べて中性化の進行が速いといわれている。

そこで、環境条件を屋外及び屋内とした時の中性化進行の違いを試験で確認した。暴露場所は、屋外が内陸域（茨城県つくば市）、屋内が室温20℃湿度60%RHの室内である。試験で評価したコンクリートは、水結合材35%、高炉スラグ微粉末90%置換の配合で、湿潤養生期間を5水準（3日、7日、10日、14日、28日）とした。暴露期間は最長2.6年で、中性化深さの測定は1年目、2年目、2.6年目の計3回実施した。

(1) 中性化深さ

図-4に屋外及び屋内に暴露した試験体の中性化深さをそれぞれ時系列に示す。屋外の場合、暴露開始から1年でおおよそ5mmまで中性化深さが進行したものの、その後の進行は緩やかであった。一方、屋内の場合、暴露開始から1年で中性化深さが約7～10mmに達し、過去の知見¹⁾と同様に、屋外に比べて中性化の進行が速い結果であった。

図-5に屋外及び屋内に暴露した試験体の中性化深さの関係を示す。同図より、両者の間には相関性が認められた。なお、ここで示した傾向は、本試験の条件範囲内での結果であり、特に屋内の温度や湿度、炭酸ガス濃度の条件などによって関係性は異なるので留意する必要がある。

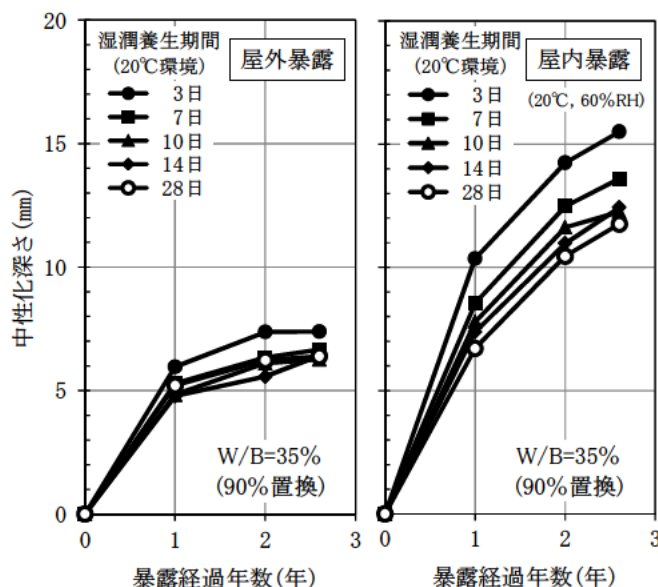


図-4 中性化深さの推移（屋外、屋内）

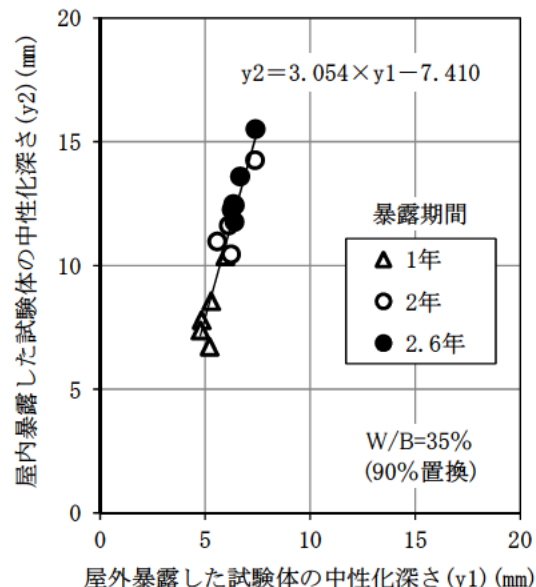


図-5 屋外及び屋内暴露の中性化深さの関係

(2) 中性化速度係数

図-6 に屋外及び屋内環境に暴露した試験体の中性化速度係数を示す。屋外の場合，暴露期間が長くなると中性化速度係数が小さくなる傾向がある。一方，屋内の場合，暴露1年目から2年目にかけて若干増加する傾向がみられたものの，それ以降では屋外暴露と同様に，やや小さくなるか同程度の結果となった。

次に，図-7 に屋外及び屋内に暴露した試験体の中性化速度係数の関係を示す。同図より，屋内の中性化速度は屋外の約1.9倍であった。和泉らの既存建物の実態調査¹⁾によると，屋内の中性化速度は屋外の1.7倍程度であったと報告しており，その比率は概ね近い値であった。

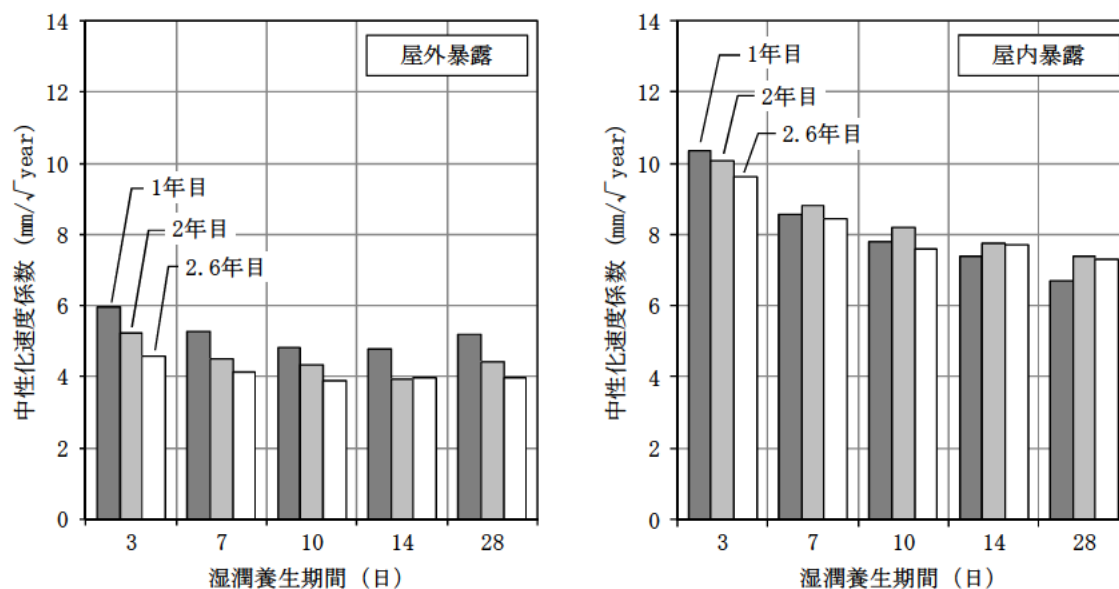


図-6 中性化速度係数（屋外，屋内）

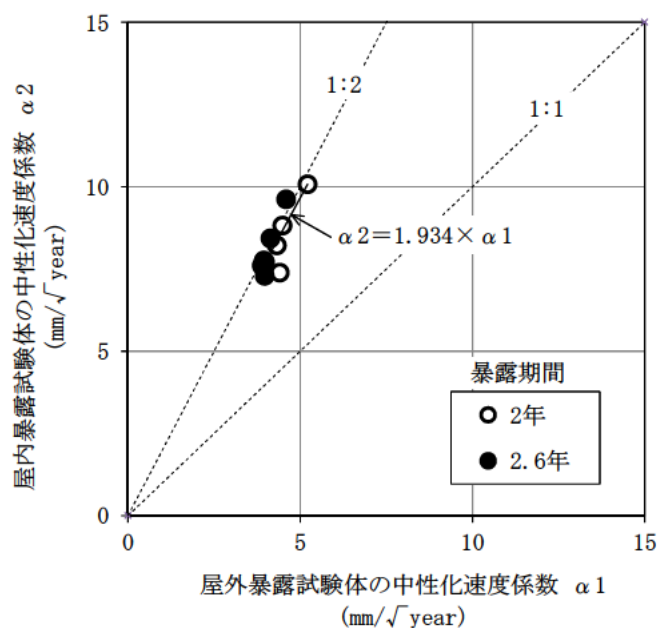


図-7 屋外及び屋内暴露したコンクリートの中性化速度係数の関係

2.2 暴露地域（つくば、新潟、沖縄）

図-8に全国3箇所（つくば、新潟、沖縄）の屋外に2年間暴露したコンクリート試験体の中性化深さ測定結果を示す。同図より、気温や湿度、降水量といった気象条件の異なる環境に暴露したコンクリートの中性化深さを比較すると、概ね同じ値と傾向を示しており、湿潤養生期間3日が最も中性化が進行し、7日以上湿潤養生した場合はほぼ同程度の値であった。福島の研究⁴⁾によると、温度が高いほど中性化速度が速くなるが、20～50℃の間では大きな差はないとしている。また、湿度の影響については、湿度50～70%RHで中性化速度が最大となり、70%RH以上では湿度が高くなるに従って中性化速度が小さくなるとされる⁵⁾。今回、屋外暴露試験を行なった3箇所の気温と湿度の条件は、中性化の進行に対して有意な差を生むほどの違いではなかったといえる。

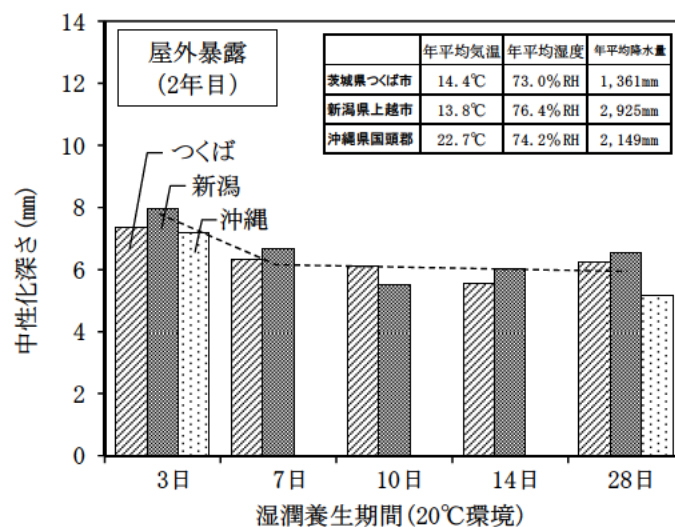


図-8 中性化深さ（つくば、新潟、沖縄）

3. 中性化速度係数と有効水結合材比の関係（土木学会式との比較）

土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕²⁾では、コンクリートの中性化速度係数の設定について、有効水結合材比と結合材の種類から予測するものとし、以下の式(2)より求めることになっている。

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0 \frac{W}{B} \quad \dots \dots \text{式(2)}$$

ここで、 α_k : コンクリートの中性化速度係数の特性値(mm/√year)

W/B : 有効水結合材比

$$\frac{W}{B} = \frac{W}{C_p + k \cdot A_d} \quad \dots \dots \text{式(3)}$$

W : 単位体積あたりの水の質量(kg/m³)

B : 単位体積あたりの有効結合材の質量(kg/m³)

C_p : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量(kg/m³)

A_d : 単位体積あたりの混和材の質量(kg/m³)

k : 混和材の種類により定まる定数（高炉スラグ微粉末の場合、 $k=0.7$ ）

上記の式(2)を用いて、本書で検討している低炭素型コンクリート（水結合材比 35%, 高炉スラグ微粉末 90% 置換, $W=165\text{kg/m}^3$, $C_p=47\text{kg/m}^3$, $A_d=424\text{kg/m}^3$ ）の中性化速度係数の特性値（ α_k ）を計算すると、 $0.749\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ であった。一方、中性化暴露試験の結果から求めた中性化速度係数は $3.99\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ （屋外暴露 2.6 年、湿潤養生期間 7～28 日での平均）で、土木学会の式から求めた値を大きく上回る結果であった。この理由として、土木学会の式(2)は、フライアッシュの置換率を 30%までとした屋外暴露試験の結果から導出したことや、高炉スラグ微粉末を用いた時の k 値の設定に原因があると考えられる。

4. 表面塗布剤の効果

コンクリート表面塗布剤による中性化抵抗性を確認するため、成分や性能の異なる塗布剤2種類（A：塗布型収縮低減剤，B：耐久性向上養生剤）を選定し、さらに比較のため無塗布を加えた全3水準で比較試験を実施した。表-2に本試験で用いた塗布剤の材料仕様を示す。塗布剤は、暴露開始直前（コンクリート打込みから約1ヶ月後）に試験体の暴露観察面（乾燥状態）に所定量を塗布した。なおコンクリートは、水結合材比（W/B）35%，高炉スラグ微粉末90%置換で、材齢3日で脱型し、材齢28日まで湿潤養生を行った。

図-9に示した試験の結果から、塗布剤を使用した場合の中性化速度係数は、無塗布に対して、塗布剤Aでは8%，塗布剤Bは17%低減し、特に塗布剤Bは高い効果が確認された。この結果から、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートでも、適切な塗布剤を用いることで中性化の進行を抑制することが可能と考えられる。

表-2 表面塗布剤の材料仕様

表面塗布剤	塗布剤 A	塗布剤 B
種 類	塗布型収縮低減剤	耐久性向上養生剤
作用機構	コンクリート内部の水分逸散を抑制	コンクリート内部の水分逸散を抑制
期待される効果	初期の乾燥収縮を抑制，強度増加	初期ひび割れの抑制，強度増加，乾燥収縮の低減，外部からの塩化物や炭酸ガスなどの侵入を抑制
主成分	グリコールエーテル系誘導体	特殊シラン系化合物 アルケニル系エステル化合物
物 性	外観： 褐色液体 密度： 0.99～1.05	外観： 淡黄色液体 密度： 0.90
塗布量	150 g/m ²	150 g/m ²

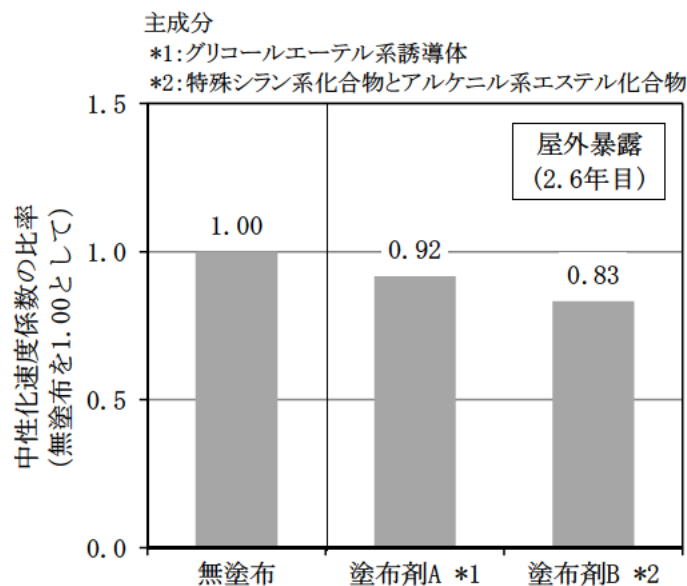


図-9 表面塗布剤の違いによる中性化抵抗性の比較

5. 促進試験

(1) 促進材齢と中性化深さ、中性化速度係数との関係

水結合材 35%、高炉スラグ微粉末 90%置換のコンクリートの促進中性化試験（JIS A 1153）を実施した。なお、コンクリートの湿潤養生期間は全 5 水準（3 日、7 日、10 日、14 日、28 日）とした。図-10 に促進材齢と中性化深さとの関係を示す。同図より、湿潤養生期間が 7 日以上では、促進材齢（week）と中性化深さとの関係は概ね同じ傾向であった。また、促進材齢の平方根（ $\sqrt{\text{week}}$ ）と中性化深さとの間には高い線形相関性が確認できた。

表-3 に促進中性化試験の結果から得られた中性化速度係数を湿潤養生期間ごとに示す。なお、中性化速度係数の値は、促進材齢と中性化深さの近似式より求めた。同表より、中性化速度係数は湿潤養生期間が 7 日以上では概ね近い値であった。

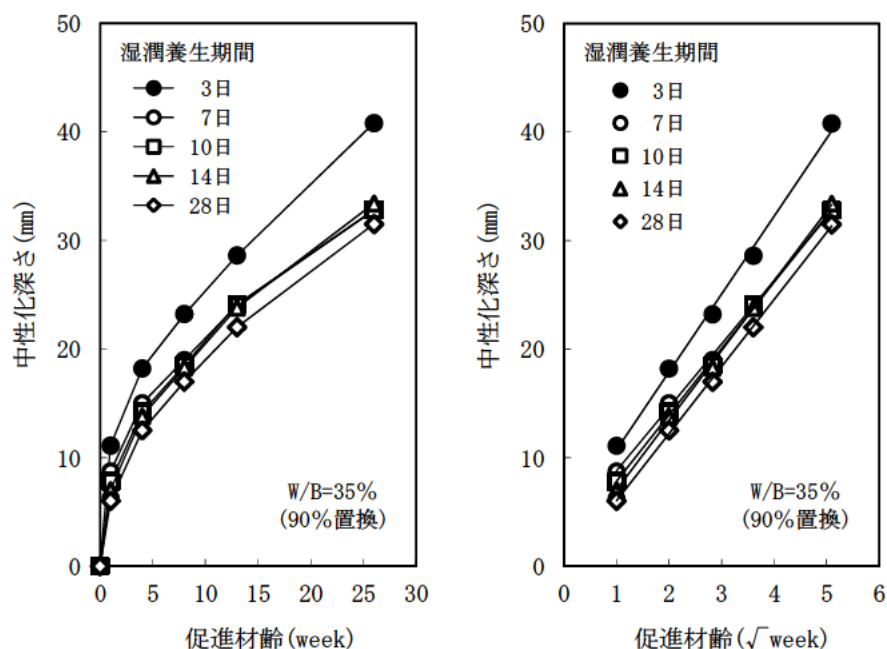


図-10 促進材齢と中性化深さとの関係

表-3 中性化速度係数（促進中性化試験）

		促進中性化試験
		中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{week}}$)
湿潤養生期間	3 日	7.17
	7 日	5.84
	10 日	6.10
	14 日	6.41
	28 日	6.18

(2) 促進中性化試験と暴露試験結果との関係

促進中性化試験では、試験時における二酸化炭素濃度が $5.0 \pm 0.2\%$ に設定されており、通常の大気中の二酸化炭素濃度（約 0.04% ⁶⁾）よりも大幅に高い。このため、促進試験の結果のままでは実際の中性化進行を予測し評価することはできない。

一般的に、コンクリートの中性化の進行が二酸化炭素濃度の平方根及び材齢の平方根に比例する⁷⁾⁸⁾とされており、式(4)のように表される。

$$C = A \cdot \sqrt{CO_2 / CO_{2TEST}} \times \sqrt{t} \quad \dots \text{式(4)}$$

ここで、 C : 中性化深さの推定値(mm)

A : 促進中性化試験から得られる中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{week}}$)

CO_2 : 実環境の二酸化炭素濃度(%)（屋外 $\approx 0.04\%$ ⁶⁾，屋内 $= 0.2\%$ ⁷⁾）

CO_{2TEST} : 促進中性化試験の二酸化炭素濃度(%)（ $= 5.0\%$ ）

t : 材齢(week)

そこで、式(4)を用いて、暴露試験と促進中性化試験の二酸化炭素濃度の差を補正し、促進中性化試験から得られた中性化速度係数をもとに屋外と屋内の暴露試験による中性化深さを推定した。表-4 及び図-11 に促進試験による中性化深さ推定値と暴露試験（屋外，屋内）による中性化深さ実測値を比較して示す。

促進試験結果による推定の結果、データ数は少ないが、屋外及び屋内暴露ともに中性化深さの実測値と促進中性化試験による推定値は概ね等しい結果であった。なお、一部では、推定値よりも実測値がやや小さいデータが認められた。この理由として、材齢とともに強度が若干増加したことや、二酸化炭素濃度の設定値などによる影響が考えられるが、安全側に評価されている。

以上より、促進中性化試験の結果を用いて、実際の屋外及び屋内環境における中性化進行予測をある程度の予測精度で推定できる可能性がある。

表-4 中性化深さ推定結果（屋外，屋内）

暴露場所	水結合材比 W/B (%)	高炉スラグ微粉末の置換率 BFS/B (%)	促進中性化試験		暴露試験		推定結果		
			26 週目 中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√week)	測定時期 (暴露から) (year)	中性化深さ (mm)	中性化速度係数 (mm/√year)	中性化深さ (mm)	促進 26 週目の推定材齢 (year)
屋外	35	0	0	0	1.66	0	0	0	—
		50	8.2	1.66	1.66	1.10	1.07	1.38	58.5
		90	31.5	6.18	2.60	6.39	3.99	6.44	62.3
	50	0	9.4	1.99	1.66	1.50	1.29	1.66	53.5
		50	16.9	3.45	1.66	2.80	2.23	2.87	57.5
		70	34.8	7.03	1.66	5.00	4.54	5.85	58.7
屋内	35	0	上記と同様		1.66	0.8	0	0	—
		50			1.66	2.5	2.40	3.09	11.7
		90			2.60	11.8	8.93	14.39	12.5
	50	0			1.66	3.00	2.87	3.70	10.7
		50			1.66	7.00	4.98	6.42	11.5
		70			1.66	12.8	10.2	13.08	11.7

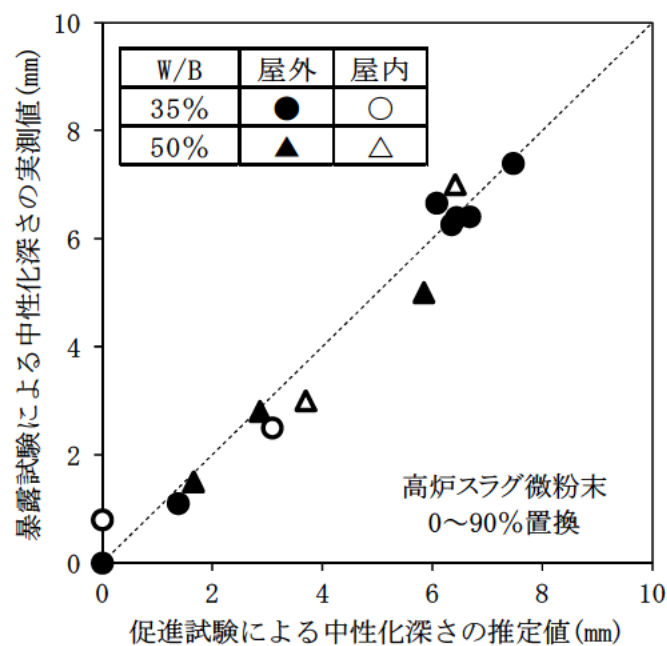


図-11 促進試験による中性化深さ推定値と暴露試験による中性化深さ実測値の比較

6. 必要な最小かぶりの設定

屋外及び屋内での暴露試験及び促進中性化試験の結果から求めた中性化速度係数の値を用いて、設計耐用年数と必要な最小かぶり（安全率は考慮せず）の関係を図-12に示す。コンクリートの配合は、水結合材比（W/B）35%及び50%で、高炉スラグ微粉末の置換率は90%及び70%である。中性化残りは、通常環境下で10mm、塩分環境下で25mmとした。

同図より、例えば、W/B=35%（高炉スラグ微粉末90%置換）で通常環境下では、設計耐用年数100年とした場合、必要な最小かぶりは、屋外構造物では50mm以上、屋内では100mm以上となる。

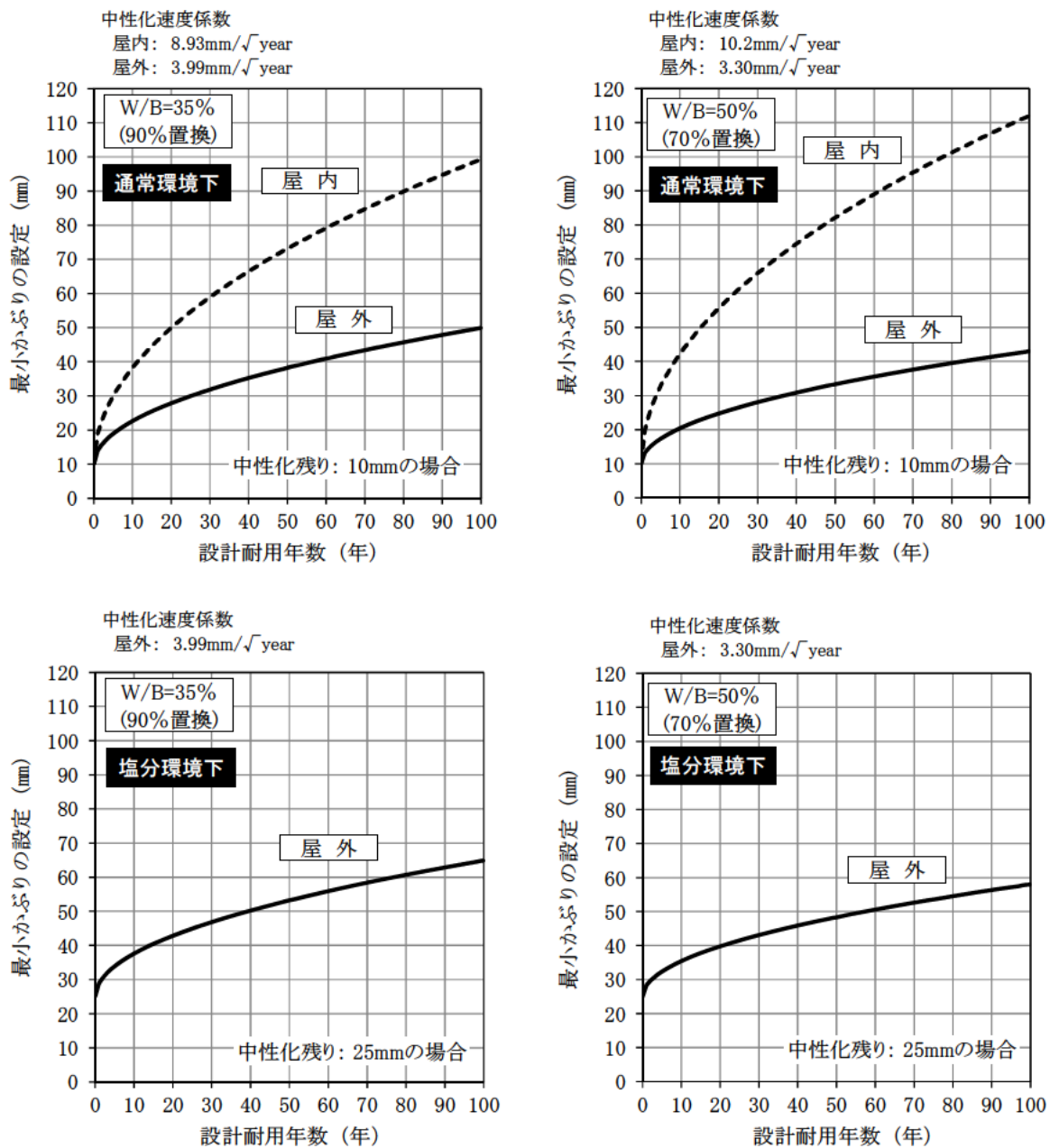


図-12 設計耐用年数と最小かぶりの関係（W/B=35%, 50%）

参考文献

- 1) 岸谷孝一，西澤紀昭 他著：コンクリート構造物の耐久性シリーズ 中性化，技報堂出版，1986
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013
- 3) 嵩英雄，和泉意登志ほか：既存 RC 構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食について（その 1 ～その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集，1983.9
- 4) 福島敏夫：コンクリートの中性化の経時進行に関する基礎的考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.199-200，1983.9
- 5) 近藤連一訳：コンクリートの炭酸化 ―鉄筋の防食に対する影響と作用―，セメント・コンクリート，No.314，1973.4
- 6) 気象庁ホームページ：二酸化炭素濃度の経年変化，http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004
- 8) 日本建築学会：高耐久性コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，1991

付録－19 化学的抵抗性（耐硫酸性）

■ 目的

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの化学的抵抗性（耐硫酸性）の確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験方法】 JIS 原案:「コンクリートの溶液浸漬による耐薬品性試験方法（案）」を参考

【試験条件】 水結合材比 : 35%

混和材料 : 高炉スラグ微粉末4000(無水せっこうを三酸化硫黄(SO_3)換算で2.0%内添)

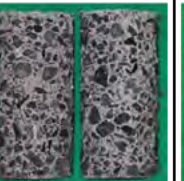
作業手順 : 材齢 28 日まで水中養生後, 20℃硫酸溶液(濃度 5%, pH=1.0 程度)に浸漬

【要 因】 高炉スラグ微粉末の置換率(セメント種類) : 2 水準 0% (N:普通), 90% (H:早強)

高炉スラグ微粉末の置換率の異なるコンクリートで作製した円柱試験体($\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$)を希硫酸(濃度 5%, pH=1%程度)の中に浸漬し, コンクリートの耐硫酸性を確認した。表－1 に試験体の外観状況, 表－2 及び図－1 に質量減少率を示す。試験の結果, pH の極めて低い希硫酸中に浸漬した場合, 水結合材比が 35%と小さい配合でも, 高炉スラグ微粉末が無混入では浸漬材齢の進行とともに水酸化カルシウムを多量に含んだ表層モルタル分が次第に失われ, 質量減少率も浸漬材齢 40 週目で 27.7%と大きな値となった。一方, 高炉スラグ微粉末を 90%置換で用いたコンクリートは, 浸漬材齢 13 週まではほとんど表面の損傷は見られなかった。ただし, 13 週を超えたあたりから質量減少が急激に進行した。浸漬材齢 40 週目での質量減少率は 13.6%で, 高炉スラグ微粉末が無混入(0%置換)のコンクリートのおよそ半分であった。

以上より, 高炉スラグ微粉末を多量に用いた場合, 耐硫酸性は向上するものの, 浸漬期間が長期に及んだ場合, 急激に酸劣化が進行する可能性がある。なお, 高濃度の硫酸溶液に浸漬したセメント硬化体は, 水セメント比が低い密実なものほど劣化生成物の膨張圧を受容できずに早期に侵食が激しくなるため, 促進試験について議論が必要との指摘もある¹⁾。また, 一般的に硫酸による劣化現象が認められるコンクリート表面の pH は, 脆弱化や剥落等の激しい劣化が見られる部位では概ね pH=4 以下, 細骨材が露出して微細なひび割れ等の比較的軽微な劣化が見られる部位では概ね pH=4~6 を示す事例が多いと報告されている²⁾。つまり, 本試験で用いた硫酸溶液の pH は実環境と比較すると極めて厳しい試験条件であったと言える。

表-1 試験体の外観状況

浸漬材齢		1 週	4 週	8 週	13 週	40 週
高炉スラグ微粉末の置換率	0%					
	90%					

備考) 試験体の形状は円柱 (直径φ100mm×高さ200mm)

表-2 試験体の質量減少率

		質量減少率(%)								
浸漬材齢(週)		1	2	3	4	5	7	8	13	40
高炉スラグ微粉末 の置換率(%)	0%	0.26	0.63	0.82	0.86	0.93	1.08	1.56	11.2	27.7
	90%	0.22	0.33	0.39	0.50	0.60	0.71	0.83	1.52	13.6

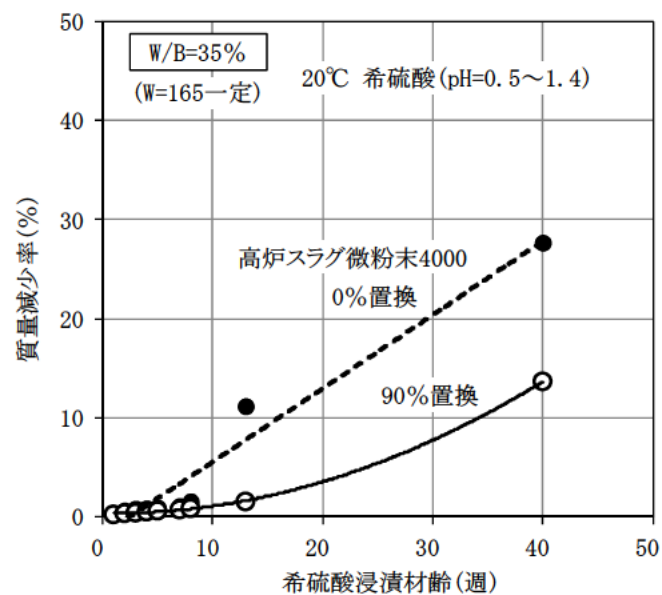


図-1 試験体の質量変化率

参考文献

- 1) 蔵重 勲, 魚本健人: コンクリート中の水和物および微細構造が耐硫酸性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.469-474, 2001
- 2) 東京都下水道局: コンクリート改修技術マニュアル (処理施設編), 2005

付録－20 自己収縮特性

■ 目的

高炉スラグ微粉末の置換率の違いがコンクリートの自己収縮特性に与える影響の確認

■ 試験方法, 試験条件及び要因

【試験方法】 JCI:「(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法」を参考

【試験条件】 養生条件: 打込み後 24 時間後に脱型し, ポリエチレンシート及びセメント袋で密封
存置条件: 恒温恒湿室 (温度 20℃, 湿度 60%RH)

混和材料: 高炉スラグ微粉末 4000 (無水せっこうを三酸化硫黄(SO_3)換算で 2.0%内添)

【要 因】 高炉スラグ微粉末の置換率 : 3 水準 50%, 70%, 90% (質量比)

水結合材比 (セメント種類) : 2 水準 35% (H:早強), 50% (N:普通)

1. 高炉スラグ微粉末の置換率

図－1 に高炉スラグ微粉末 4000 (無水せっこうを三酸化硫黄(SO_3)換算で 2.0%内添) をセメント内割 50～90%置換で混和したコンクリートの自己収縮試験結果を水結合比別に示す。また図－2 に材齢初期の自己収縮挙動を拡大して示す。なお、両図とも横軸の材齢は凝結始発からの有効材齢である。一般的に、高炉スラグ微粉末 (せっこう無添加) を用いた場合、セメントに対する置換率が高いほど自己収縮ひずみは増大するといわれている。しかし、本試験の結果では、W/B=35%の場合、高炉スラグ微粉末 (無水せっこう内添) の置換率が 50% (高炉セメント B 種相当) 及び 70% (高炉セメント C 種相当) は概ね同傾向であり、対して 90%置換 (JIS 規格超) では値が小さくなった。この原因の 1 つとして、材齢初期 (凝結始発後) に確認された膨張方向へのひずみ進展による影響が挙げられる。この膨張ひずみは、高炉スラグ微粉末に内添した無水せっこう成分の反応によって生成されたエトリンガイトの影響と考えられる。なお、90%置換の自己収縮ひずみは有効材齢 91 日時点でおおよそ 150μ 程度で、まだ収束しておらず、これ以降 50%置換や 70%置換の自己収縮ひずみに近い値となる可能性がある。

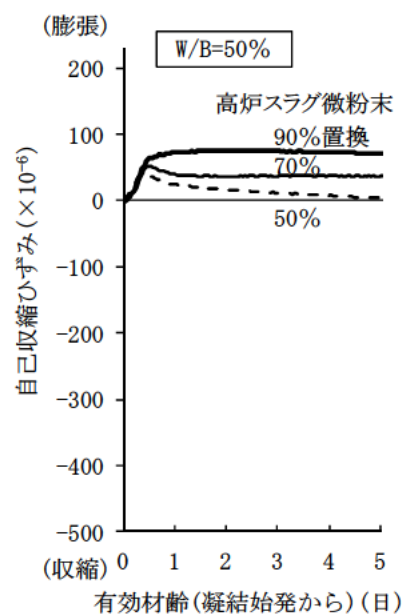
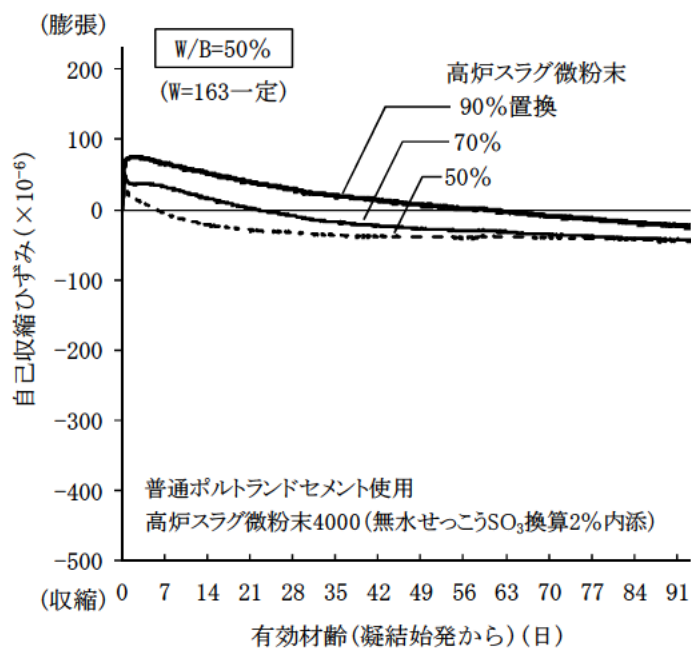
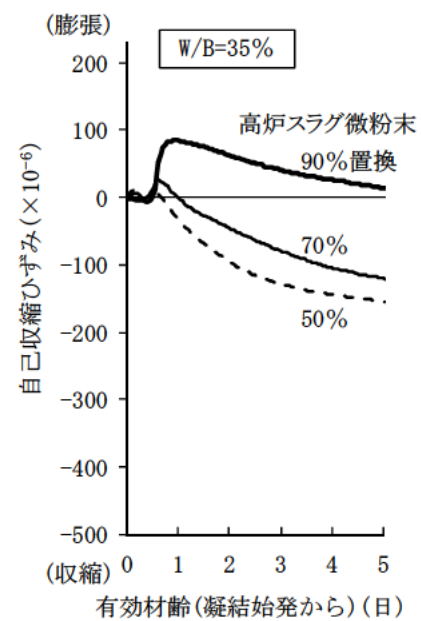
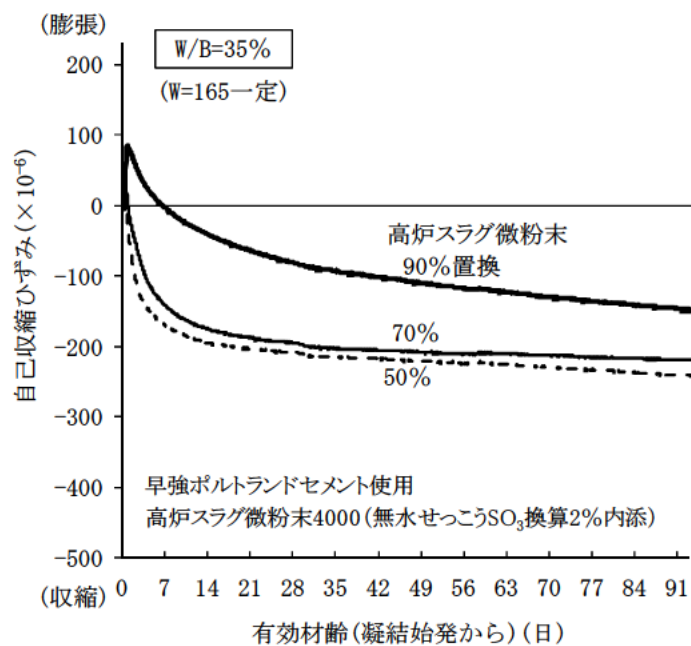


図-1 コンクリートの自己収縮試験結果

図-2 有効材齢初期の自己収縮挙動

2. 水結合材比

図-4 に、水結合材比 (W/B) が 35% (H:早強) 及び 50% (N:普通) で、高炉スラグ微粉末の置換率が 50%, 70%, 90%の時の有効材齢 91 日における自己収縮ひずみを示す。同図より、W/B が 35%と 50%の自己収縮ひずみの測定結果を比較すると、35%の方が相対的に大きい傾向にあった。この理由として、粉体量やセメントの比表面積の違い等が影響していると推察される。なお、W/B=50%では、高炉スラグ微粉末の置換率の違いによらず、自己収縮ひずみは無視できる程度に小さい値であった。

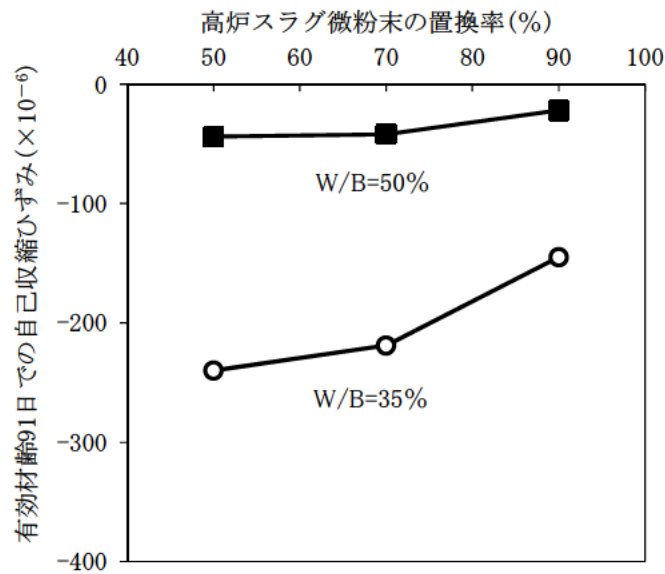


図-3 有効材齢初期の自己収縮挙動

3. 自己収縮ひずみの推定式

一般的に、コンクリートの自己収縮ひずみは、使用するセメントの種類や水結合材比、温度依存性等を考慮して、式(1)から求めることができる。また膨張コンクリートの膨張ひずみは、式(2)より予測されている。

<自己収縮ひずみ式>¹⁾

$$\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \times \varepsilon_{sh,\infty} \times \left(1 - e^{-a_{sh}(t_e - t_{e,set})^{b_{sh}}} \right) \quad \dots \dots \text{式(1)}$$

ここで、 $\varepsilon_{sh}(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t_e : 有効材齢 (日)

η_c : セメントの種類が自己収縮ひずみの終局値に及ぼす影響を表す係数

$\varepsilon_{sh,\infty}$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

a_{sh}, b_{sh} : 自己収縮ひずみの進行特性を表す係数

$t_{e,set}$: 凝結の始発 (有効材齢) (日)

<膨張ひずみ式>¹⁾

$$\varepsilon_{ex}(t_e) = \varepsilon_{ex,\infty} \times \left(1 - e^{-a_{ex}(t_e - t_{ex,0})^{b_{ex}}} \right) \quad \dots \dots \text{式(2)}$$

ここで、 $\varepsilon_{ex}(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)における膨張コンクリートの膨張ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t_e : 有効材齢 (日)

$\varepsilon_{ex,\infty}$: 膨張ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

a_{ex}, b_{ex} : セメントの種類が膨張ひずみの進行特性に及ぼす影響を表す係数

$t_{ex,0}$: 膨張開始時点の有効材齢 (日) ($= t_{e,set}$)

先に示したように、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの配合における自己収縮試験の結果、初期材齢時において、高炉スラグ微粉末に内添した無水せっこう成分の反応によって生成されたエトリンガイトの作用により、適度な膨張ひずみが付与されることがわかった。このため、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの配合では、初期材齢時に発生する膨張ひずみを再現するため、上記の自己収縮ひずみ式(式(1))¹⁾と膨張ひずみ式(式(2))¹⁾の組み合わせ式により自己収縮ひずみ挙動を再現する。図-4に、水結合材比(W/B) 35%、高炉スラグ微粉末 90%置換での有効材齢と自己収縮ひずみの関係を示し、表-1に、同定した自己収縮ひずみ式及び膨張ひずみ式の係数を示す。

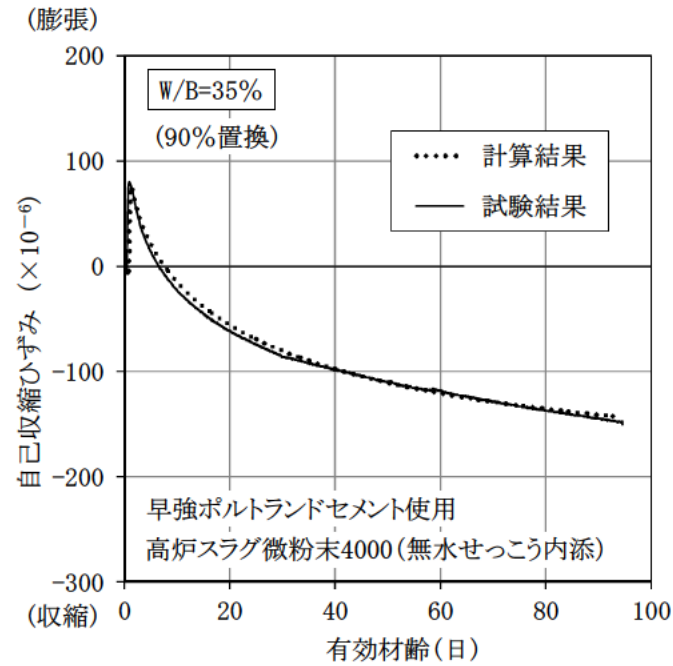


図-4 有効材齢と自己収縮ひずみの関係

表-1 自己収縮ひずみ及び膨張ひずみの係数

自己収縮ひずみ式の係数 (式(1)より)					膨張ひずみ式の係数 (式(2)より)			
η_c	$\varepsilon_{sh,\infty}$ ($\times 10^{-6}$)	a_{sh}	b_{sh}	$t_{e,set}$ (日)	$\varepsilon_{ex,\infty}$ ($\times 10^{-6}$)	a_{ex}	b_{ex}	$t_{ex,0}$ (日)
1.0	300	0.17	0.54	0.70	115	14	2.5	0.70

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2013

付録ー21 乾燥収縮特性

■ 目的

高炉スラグ微粉末の置換率の違いがコンクリートの乾燥収縮特性に与える影響の確認

■ 試験方法, 試験条件及び要因

- 【試験方法】 JIS A 1129:「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法」に準拠
- 【試験条件】 養生条件: 打込み後 24 時間で脱型し, 直ちに水中養生を材齢 7 日まで実施
存置条件: 恒温恒湿室 (温度 20℃, 湿度 60%RH)
混和材料: 高炉スラグ微粉末 4000 (無水せっこうを三酸化硫黄(SO₃)換算で 2.0%内添)
- 【要 因】 高炉スラグ微粉末の置換率 : 5 水準 0%, 30%, 50%, 70%, 90% (質量比)
水結合材比 (セメント種類) : 2 水準 35% (H:早強), 50% (N:普通)

図ー1 及び図ー2 に高炉スラグ微粉末 4000 (無水せっこうを三酸化硫黄(SO₃)換算で 2.0%内添) をセメント内割 0~90%置換で混和したコンクリートの長さ変化試験結果を示す。横軸の材齢 7 日を基準とした乾燥材齢である。

同図より, W/B=35%の場合, 高炉スラグ微粉末の置換率の違いによる長さ変化率への影響は小さく, 乾燥材齢 13 週目で 500×10^{-6} 程度であった。一方, W/B=50%の場合, 高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど長さ変化率の値は小さくなり, 特に 90%置換は材齢 13 週目で約 390×10^{-6} となり, 日本建築学会の「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」で提案された乾燥収縮ひずみの早期判定係数を用いると, 26 週目での推定値は約 440×10^{-6} ($=390 \times 1.13$) で極めて小さい可能性がある。

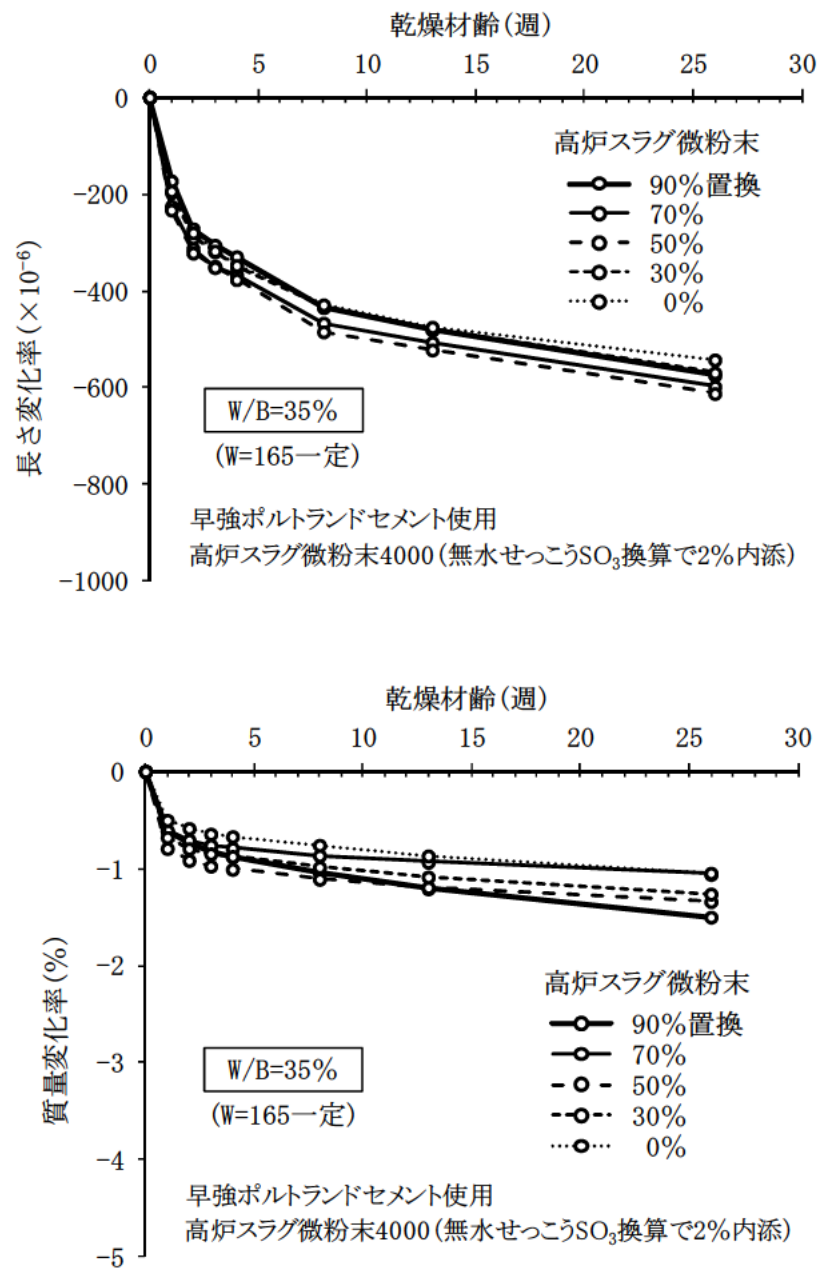


図-1 コンクリートの長さ変化試験結果 (W/B=35%)

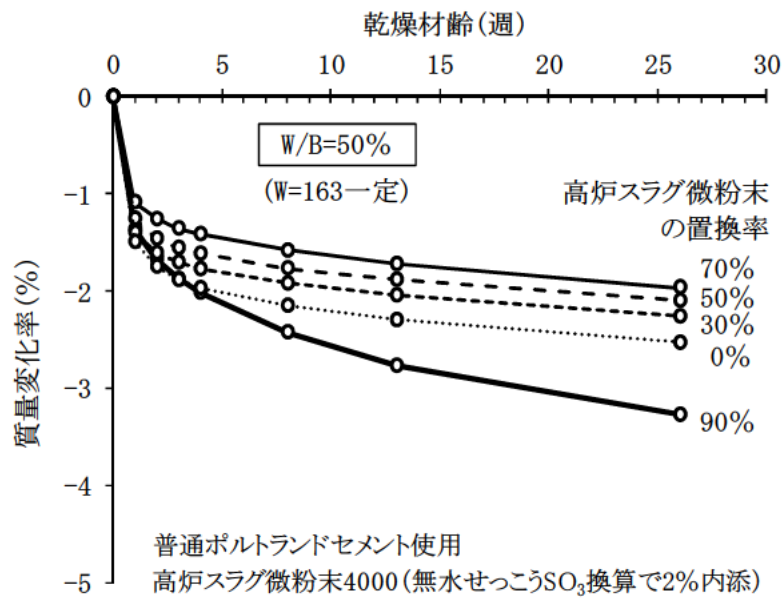
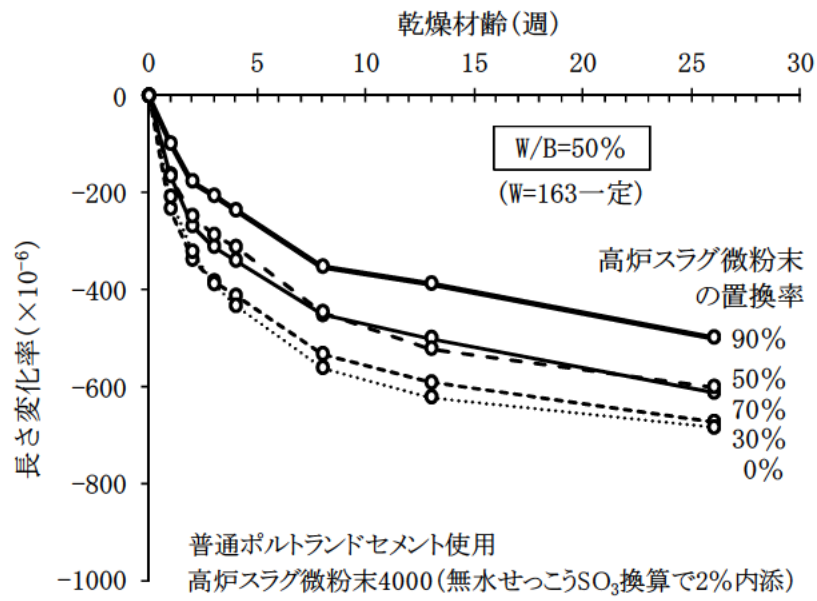


図-2 コンクリートの長さ変化試験結果 (W/B=50%)

付録ー22 凍結融解抵抗性

■ 目的

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの凍結融解抵抗性に与える養生期間と空気量の影響を確認

■ 試験方法、試験条件及び要因

【試験方法】 JIS A 1148:「コンクリートの凍結融解試験方法」A 法 に準拠

ASTM C 457:「顕微鏡によるコンクリート中の気泡組織測定方法」

【試験条件】 凍結融解サイクル数 : 300 回

混和材料 : 高炉スラグ微粉末 4000 (無水せっこうを三酸化硫黄(SO_3)換算で 2.0%内添)

水結合材比 (セメント種類) : 35% (H:早強)

高炉スラグ微粉末の置換率 : 90% (質量比)

【要 因】 湿潤養生期間 : 5 水準 3 日, 7 日, 10 日, 14 日, 28 日

空気量 (目標) : 2 水準 4.5%, 5.5%

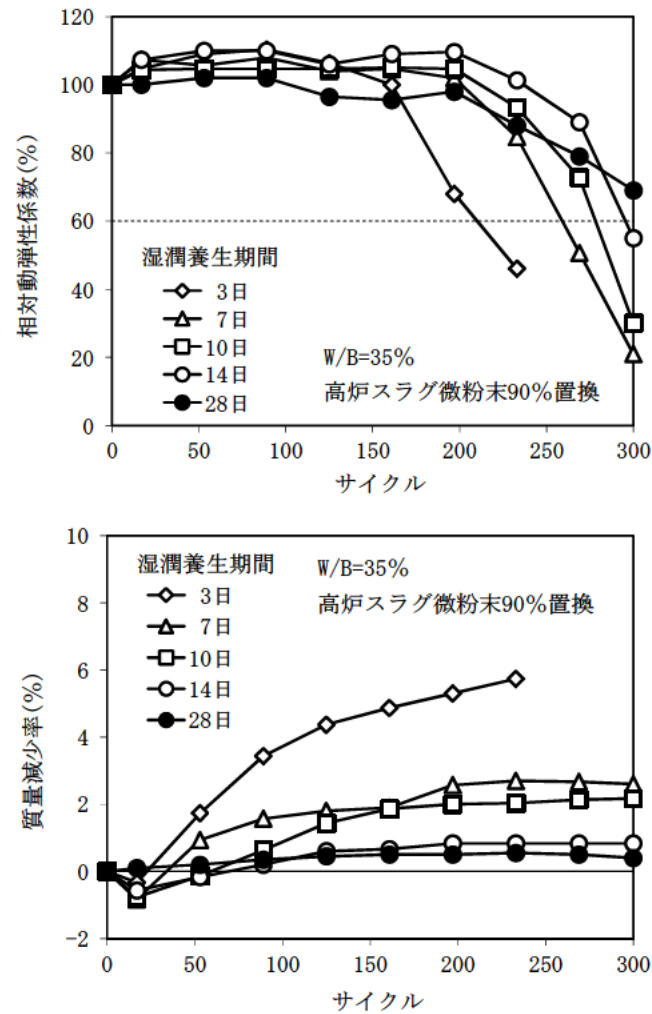
1. 湿潤養生期間

図ー1 に、水結合材比 (W/B) 35%、高炉スラグ微粉末 90%置換の高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートにおいて、湿潤養生期間を 3 日, 7 日, 10 日, 14 日, 28 日とした時の凍結融解試験の結果を示す。同図より、湿潤養生期間が長いほど、凍結融解抵抗性が向上した。しかしながら、凍結融解 300 サイクルで所要の性能 (相対動弾性係数 60%以上) を満足したのは湿潤養生期間 28 日のみであった。

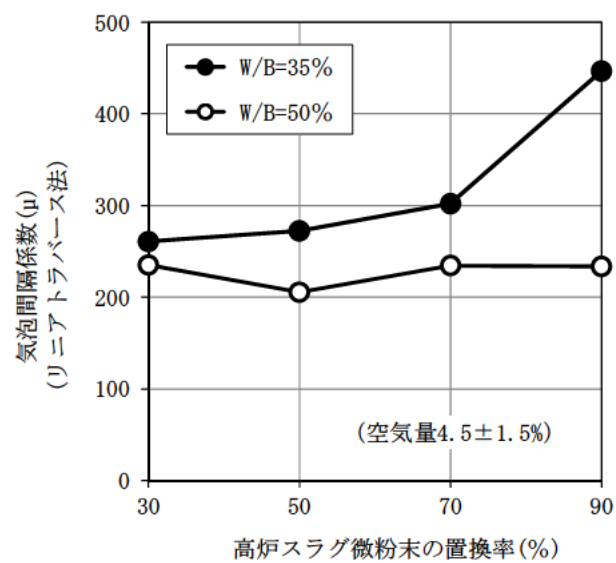
2. 高炉スラグ微粉末の置換率と気泡間隔係数の関係

図ー2 に、フレッシュコンクリート中の目標空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ の条件で、高炉スラグ微粉末の置換率と気泡間隔係数 (ASTM C 457 : リニアトラバース法) の測定結果の関係を示す。同図より、W/B が 50% の場合、高炉スラグ微粉末の置換率の違いによらず、気泡間隔係数の値は同程度で 250μ 以下となり、耐凍害性を確保する上で問題のない範囲であった。一方、W/B が 35% の場合、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほど気泡間隔係数の値は緩やかに増加し、特に 90%置換では急激に大きくなった。

以上より、W/B が小さく、高炉スラグ微粉末を高含有した配合の場合、一般的な目標空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ を導入しても、気泡間隔係数の値は大きく、耐凍害性を確保することは難しいと推定される。



図ー1 湿潤養生期間の異なるコンクリートの凍結融解試験結果



図ー2 高炉スラグ微粉末の置換率とリニアトラバース法による気泡間隔係数の測定結果の関係

3. 目標空気量の増量

図-3に、空気量（目標）を4.5%及び5.5%とした時の高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（W/B=35%，高炉スラグ微粉末90%置換，湿潤養生期間28日）の凍結融解試験結果を示す。同図より、空気量を一般的な4.5%から5.5%に増量することで、凍結融解抵抗性が大幅に改善した。また、空気量5.5%としたコンクリートの気泡間隔係数は 250μ 以下で、こちらも同様に改善効果がみられた。

以上より、粉体中に占める高炉スラグ微粉末の比率が高いほど空気連行性が低下し、その影響で凍結融解抵抗性も低下している可能性がある。凍結融解抵抗性を確保する上で、フレッシュコンクリート中の空気量を増やすことが有効であると考えられる。

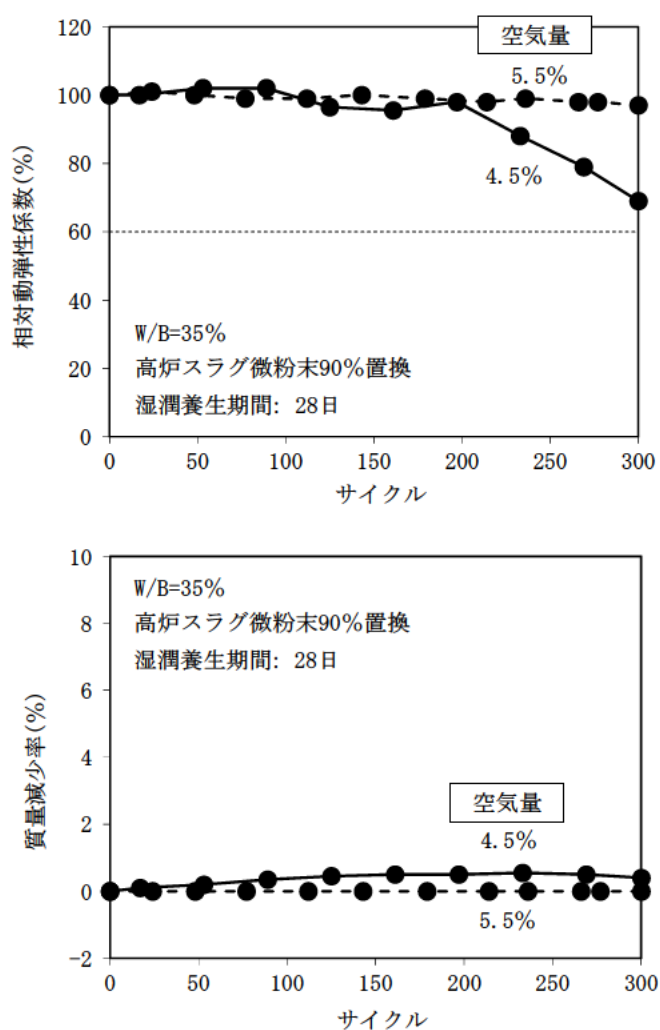


図-3 空気量の増量による凍結融解抵抗性の改善効果

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、従来のコンクリートと比較して水和発熱量が抑制される。このため、大断面のマスコンクリート構造物等への適用が期待できる。ここでは、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの各種試験データを用いて橋梁下部構造を対象とした温度応力解析を実施し、温度ひび割れ抑制効果について解析事例を紹介する。

1. 解析事例 ①（打込み温度 20℃一定条件下におけるセメント種別による比較）

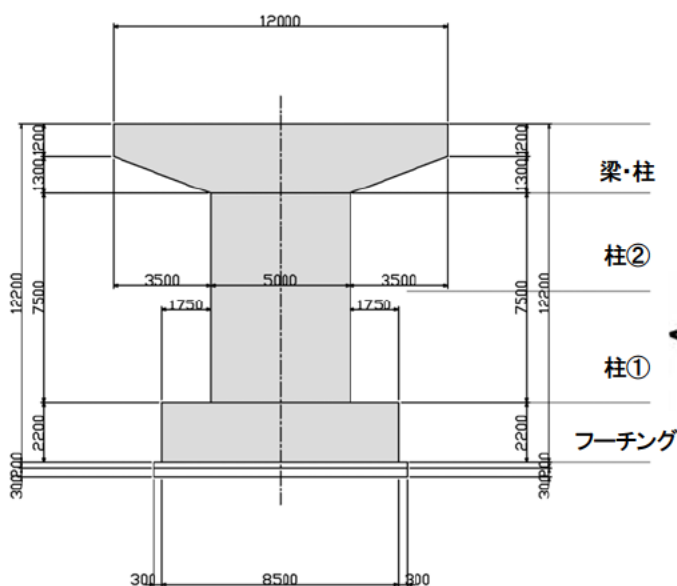
1.1 解析総括

(1) 概要

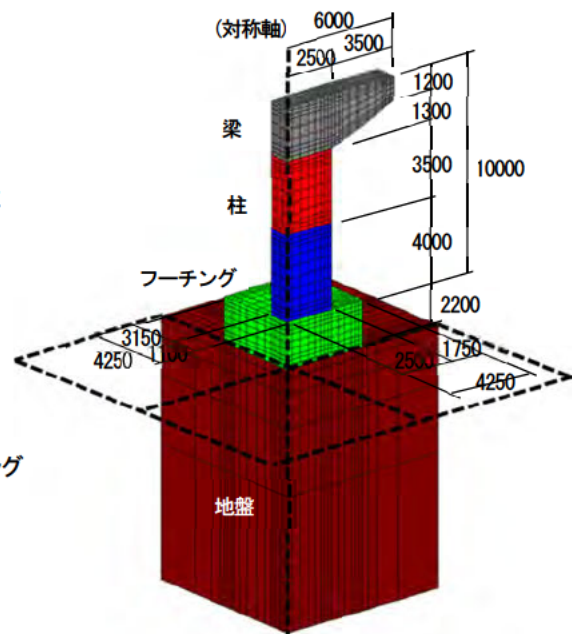
打込み温度 20℃一定で、橋梁下部構造（橋脚）を対象とした同一モデルを用いて、コンクリート種別を 1) 普通ポルトランドセメントを用いた配合（以下、普通配合）(24-12-20N)，2) 中庸熱ポルトランドセメントを用いた配合（以下、中庸熱配合）(24-12-20M)，3) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート配合（以下、低炭素型配合）(24-12-20BFS70，BFS 置換率 70%置換）の 3 種類とした場合の温度ひび割れ照査を実施する。照査方法は、部材着目点におけるコンクリートの最高温度及び最小ひび割れ指数の比較である。

(2) 解析条件

- 〔対象構造物〕 橋梁下部構造(橋脚) (図－1，図－2 参照)
 〔リフト割〕 フーチング → 柱 (2 回) → 梁・柱
 〔解析手法〕 3 次元 FEM 温度応力解析 (解析ソフト : ASTEA-MACS (計算力学研究センター))



図－1 対象構造物モデル

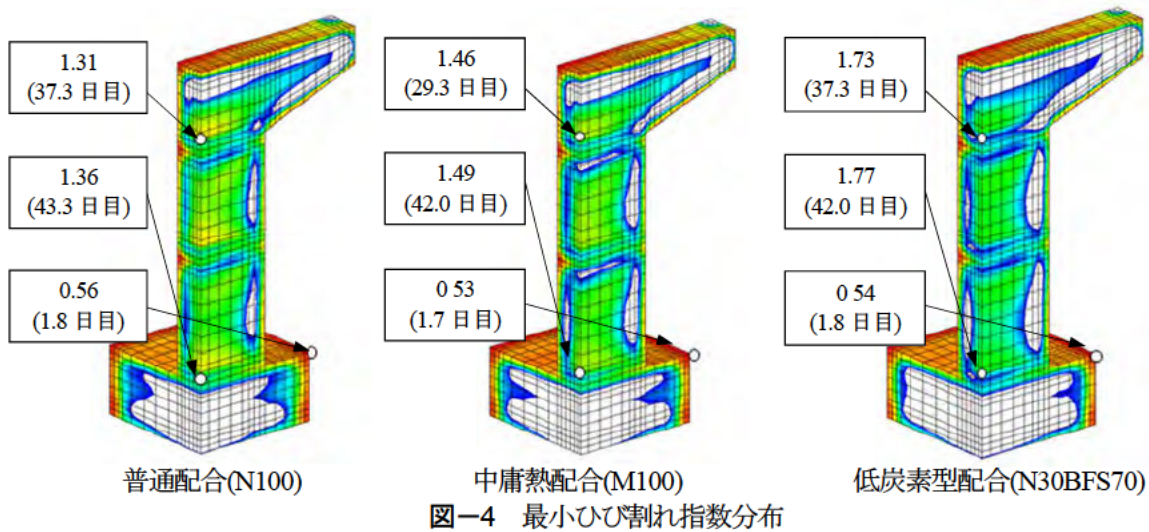
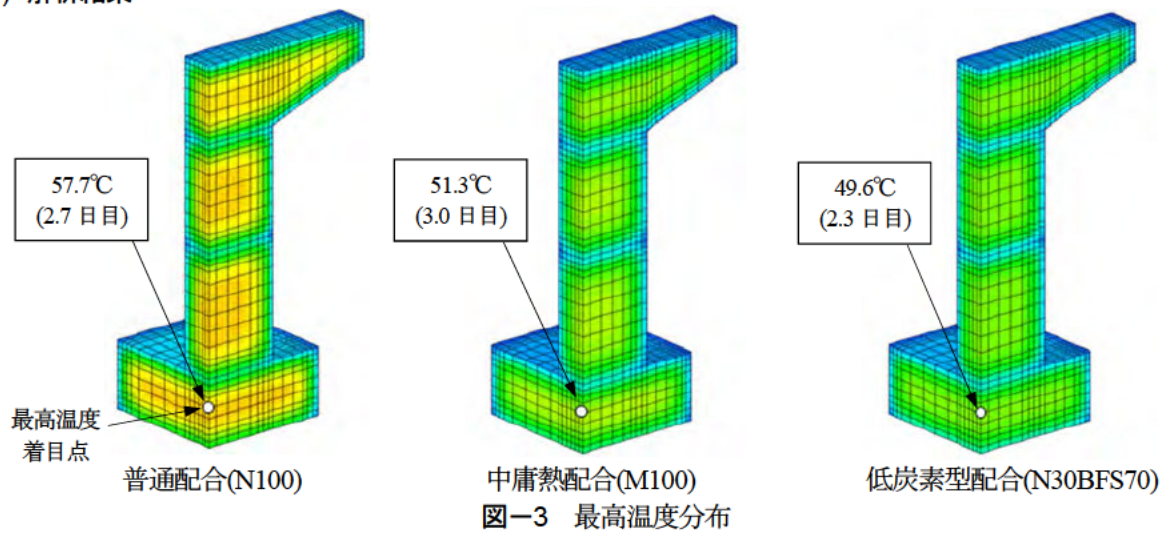


図－2 解析モデル (1/4 軸対象モデル)

表-1 解析条件

項 目		単位	解析検討ケース		
			当初配合 (普通配合: N100)	対策① (中庸熱配合: M100)	対策② (低炭素型配合: N30BFS70)
配 合	梁・柱 フーチング	—	24-12-20N (W/C=55%)	24-12-20M (W/C=55%)	24-12-20BFS70 (W/B=50%)
単位 結合材量	梁・柱 フーチング	kg/m ³	296	296	326 (=HPC(30%)+BFS(70%))
断熱温度上昇式		—	試験結果		
気 温		℃	20(一定)		
打込み温度		℃	20		
熱伝導率	コンクリート	W/m℃	2.7		
	地 盤		1.7		
比熱	コンクリート	kJ/kg℃	1.15		
	地 盤		1.40		
熱膨張係数	コンクリート	/℃	10.0×10 ⁻⁶		12.0×10 ⁻⁶
	地 盤		10×10 ⁻⁶		
圧縮強度発現式		N/mm ²	示方書式		試験式
引張強度発現式		N/mm ²	示方書式		試験式
ヤング係数式		kN/mm ²	示方書式		試験式
自己収縮ひずみ式		—	考慮しない		
乾燥収縮		—	考慮しない		

(3) 解析結果



1.2 解析詳細

(1) 対象構造物

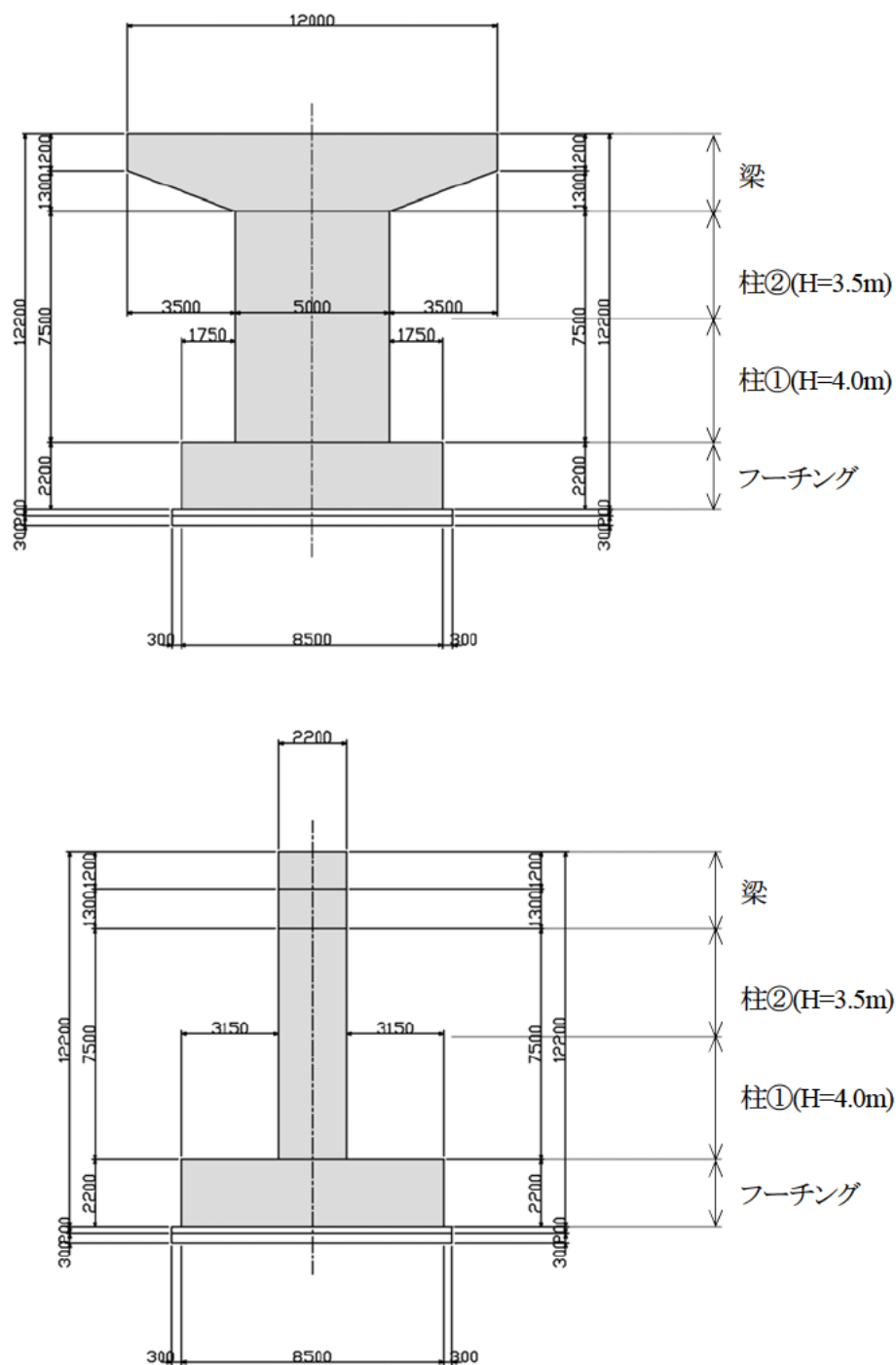


図-5 橋脚仕様及び打設リフト（上:正面図, 下:側面図）

(2) 解析モデル

図-6 に橋梁下部構造（橋脚）の解析モデル及び打設リフトを示す。解析モデルは橋軸方向，橋軸直角方向の橋脚中心を対称軸とした 1/4 モデルとし，3 次元温度応力解析を行う。

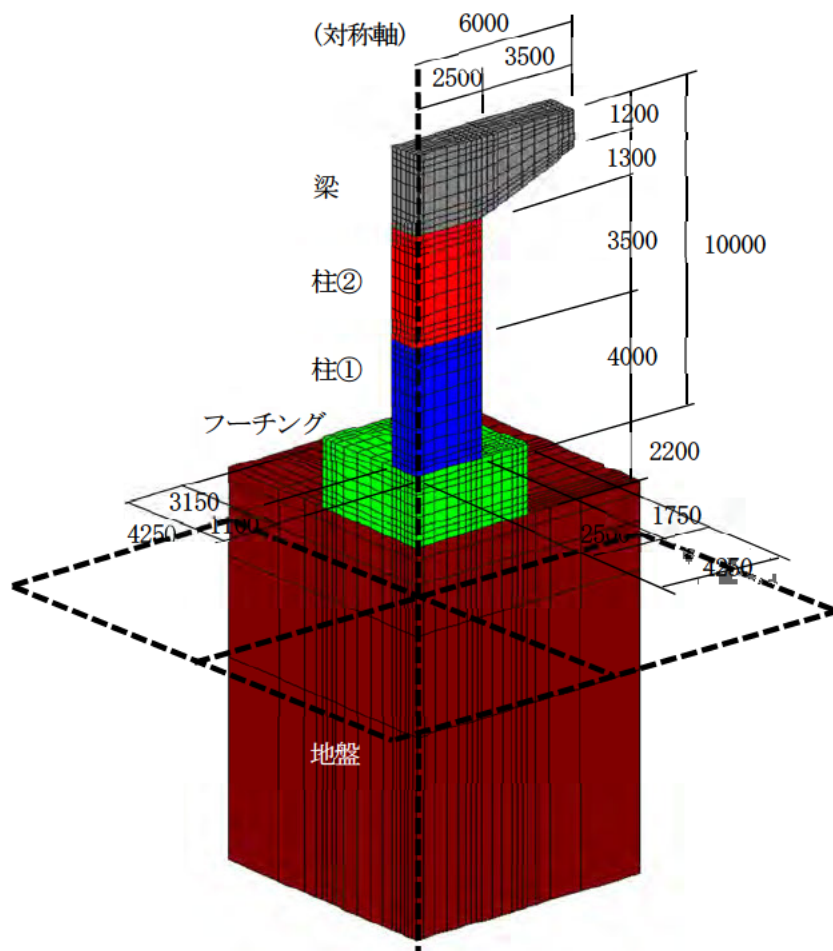


図-6 解析モデル（1/4 軸対象モデル）

(3) 解析方法

解析手法 : 3 次元 FEM 温度応力解析

解析ソフト : ASTEA-MACS (計算力学研究センター)

(4) コンクリート配合

表－2に本検討で用いた3種類のコンクリート配合を示す。当該配合は管理材齢28日における実強度を同程度とした。

表－2 解析に用いたコンクリート配合

配合名	スラグ 置換率 BFS/B (%)	水結合材 比 W/B (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	B			S	G
					N	M	BFS		
N100	0	55	45.0	163	296	0	0	804	1018
M100	0	55	45.0	163	0	296	0	806	1020
N30BFS70	70	50	45.9	163	98	0	228	801	978

(5) 使用材料の設計用値

本解析で使用する材料の特性値は材料試験結果を使用することを基本とした。なお，以降に記載のない項目については下記の指針類に準じて設定した（ここでは主にN30BFS70配合の設計用値について記載）。

<指針類>

日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008

土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013

① 断熱温度上昇特性

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e(-\gamma t)) \quad \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e(-\gamma t^s)) \quad \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

ここで， $Q(t)$ ：材齢 t 日における断熱温度上昇量(°C)

Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量(°C)

γ, s ：温度上昇速度に関する定数

t ：材齢(日)

表－3 コンクリートの断熱温度上昇特性

配合名	打込み温度 (°C)	式	断熱温度上昇式における定数		
			Q_{∞} (°C)	γ	s
N100	20	(1)	42.5	1.018	—
M100	20	(1)	36.3	0.855	—
N30BFS70	20	(2)	31.0	0.812	1.805

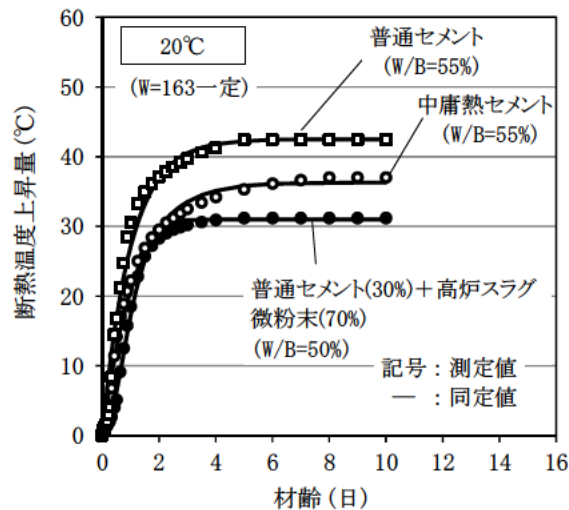


図-7 コンクリートの断熱温度上昇特性

② 圧縮強度

圧縮強度の発現式は、有効材齢を用いた式(3)とし、表-4 にN30BFS70 配合における強度発現式の各係数を示す。有効材齢は式(4)より求める。

<圧縮強度発現式>

$$f'_c(t_e) = \frac{(t_e - S_f)}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_n) \quad \dots \dots \text{式(3)}$$

ここで、 $f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

$f'_c(t_n)$: 管理材齢 t_n (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

t_n : 設計基準強度の管理材齢 (日)

t_e : 有効材齢 (日)

S_f : セメントの種類に応じた硬化原点(凝結始発)に対応する有効材齢 (日)

a, b : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す係数

<有効材齢>

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad \dots \dots \text{式(4)}$$

ここで、 t_e : 有効材齢 (日)

Δt_i : ある一定のコンクリート温度が継続する期間 (日)

$T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 : $1(^{\circ}\text{C})$

表-4 圧縮強度発現式における各係数

配合名	圧縮強度発現式における各係数			
	a	b	S_f (日)	$f'_c(t_n)$ (N/mm ²)
				$t_n=28$ (日)
N30BFS70	6.7	0.76	0.53	36.7

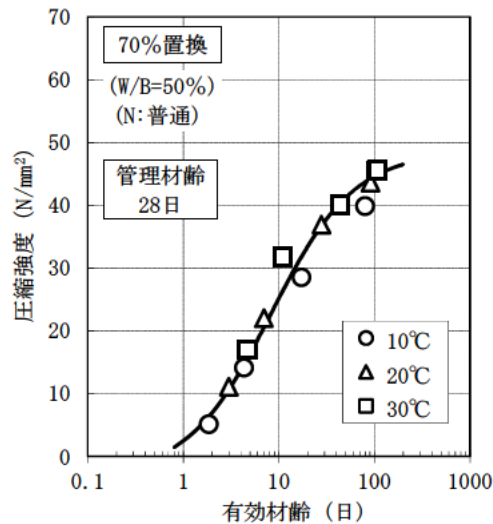


図-8 有効材齢と圧縮強度の関係 (N30BFS70 配合)

③ ヤング係数

ヤング係数は、図-9 に示す試験結果から圧縮強度との関係式(5)により定める。

$$E_c(t_e) = 7,400 \times f'_c(t_e)^{0.39} \quad \dots \dots \text{式(5)}$$

ここで、 $E_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートのヤング係数 (N/mm²)

$f'_c(t_e)$ ：有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t_e ：有効材齢 (日)

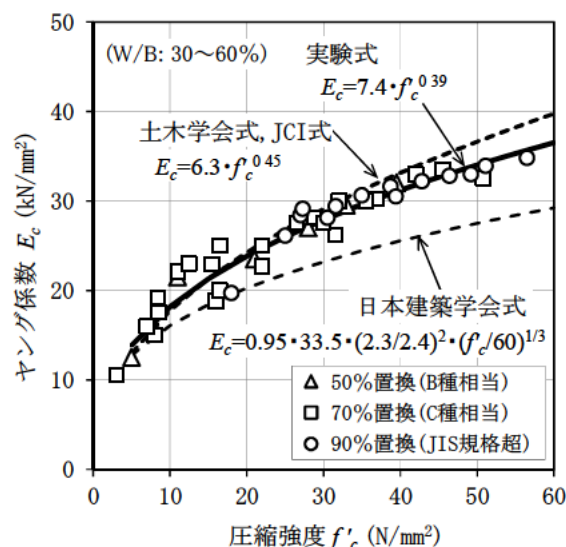


図-9 圧縮強度とヤング係数の関係 (N30BFS70 配合)

④ 引張強度

引張強度は、図-10 に示す試験結果から圧縮強度との関係式(6)により定める。

$$f_t(t_e) = 0.23 \times f'_c(t_e)^{0.71} \quad \dots \text{式(6)}$$

ここで、 $f_t(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの引張強度 (N/mm²)

$f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t_e : 有効材齢 (日)

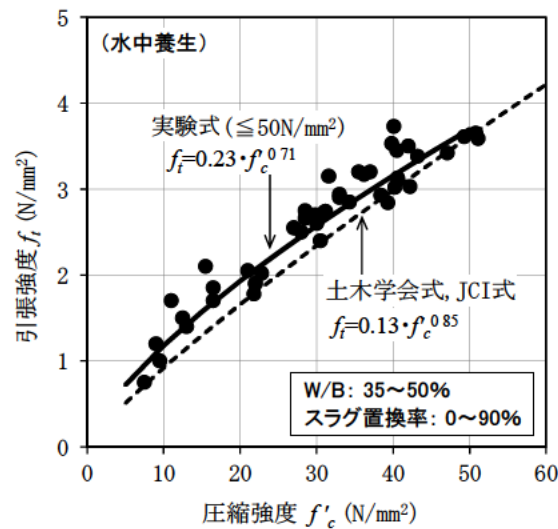


図-10 圧縮強度と引張強度の関係 (N30BFS70 配合)

⑤ その他

解析上設定したその他の解析条件について以下に列挙する。

- ・コンクリートの打設は全4ロットとし、打設は28日間隔とする。
- ・解析期間中の気温は20℃一定とする。
- ・境界部の熱伝達係数は、型枠存置中が8(W/m²℃)、それ以外は14(W/m²℃)とし、
型枠存置期間はN30BFS70配合で7日間、普通配合及び中庸熱配合で5日間とする。

なお、本検討では試験データを基とした材料特性による差を明確にするため、解析期間における気温は20℃一定とした。

(6) 解析結果

① 最高温度

図-11 に各ケースでの最高温度分布を示す。普通配合 (N100) の最高温度 57.7℃に対して、中庸熱配合 (M100) では 6.4℃低く、低炭素型配合 (N30BFS70) では 49.6℃で中庸熱配合と同程度であった。

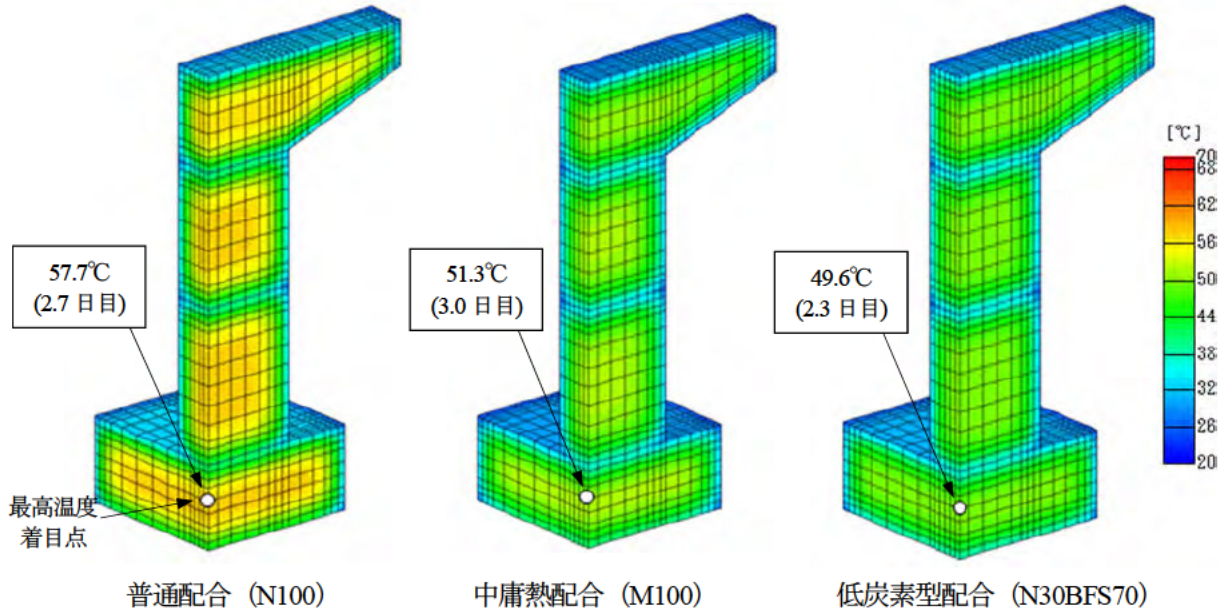


図-11 最高温度分布

② 最小ひび割れ指数

図-12 に各ケースでの最小ひび割れ指数分布を示す。フーチングでは概ね等しい指数であったが、柱及び梁部では、普通配合 (N100) に比べて、中庸熱配合 (M100) が 10%程度、低炭素型配合 (N30BFS70) が 30%程度最小ひび割れ指数が改善した。

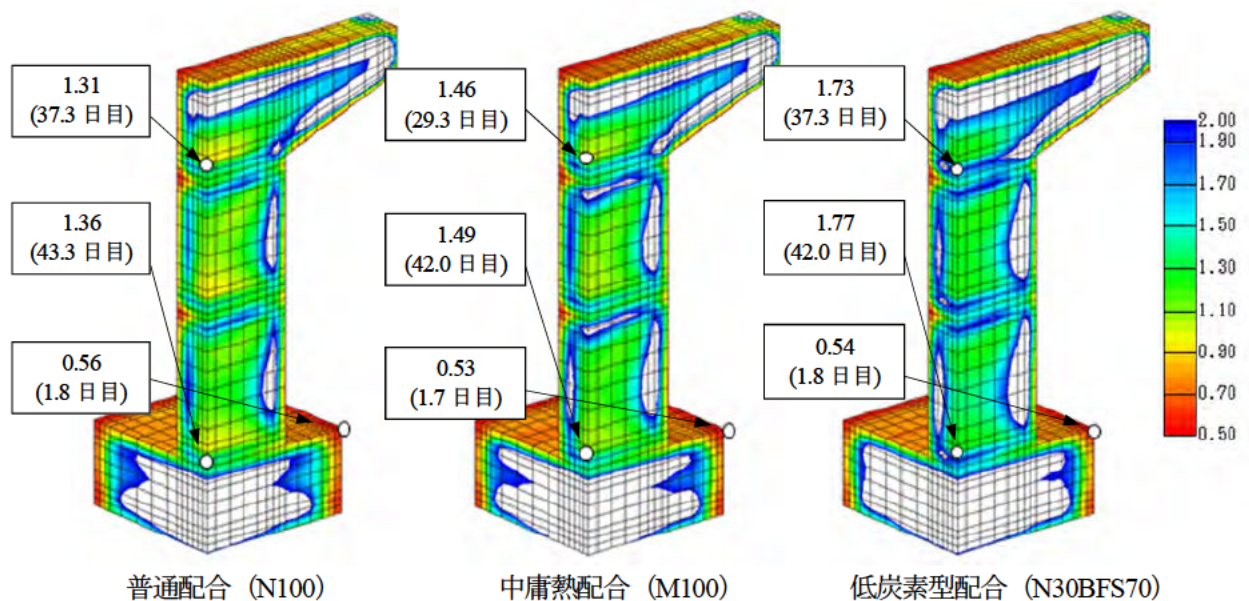


図-12 最小ひび割れ指数分布

(7) 結果評価

構造物の形状や最小ひび割れ指数の発生時期等から、各部位における温度ひび割れの主な発生原因は、梁と柱部では外部拘束、フーチング部では内部拘束に起因したものである。表―5に検討配合での各部位における最小ひび割れ指数を整理して示す。

同表のデータから、梁及び柱部では、最小ひび割れ指数の値が低炭素型配合の場合に最も高く、外部拘束型のひび割れに有効であることがわかった。一方、フーチング部では、低炭素型配合は発熱量が小さいにも係らず、ひび割れ指数は普通配合と同程度であった。これは、初期材齢時におけるコンクリートの強度発現が緩やかで小さいこと等が影響していると考えられ、内部拘束型のひび割れに対して大幅な改善には至らず、中庸熱配合と同程度といえる。このことから、低炭素型配合の使用において、内部拘束型ひび割れの発生が懸念される場合には、表面ひび割れの抑制を目的とした養生方法や養生期間の設定、ひび割れ用心鉄筋の配置等が必要と考えられる。

表―5 検討配合での各部位における最小ひび割れ指数

部 位	ひび割れ指数 (材齢(日))			備 考
	普通配合 (N100)	中庸熱配合 (M100)	低炭素型配合 (N30BFS70)	
梁	1.31 (37.3)	1.46 (29.3)	1.73 (37.3)	外部拘束型
柱	1.36 (43.3)	1.49 (42.0)	1.77 (42.0)	外部拘束型
フーチング	0.56 (1.8)	0.53 (1.7)	0.54 (1.8)	内部拘束型

2. 解析事例 ②（打込み温度を変化させた場合での低炭素型配合での比較）

2.1 解析総括

(1) 概要

橋梁下部構造（橋脚）を対象に温度ひび割れ照査を実施する。コンクリート配合は、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート配合（以下、低炭素型配合）（27-42.5-20BFS90，BFS 置換率 90%）の 1 種類である。打込み温度を 10℃，20℃，30℃と変化させた場合に温度応力解析を実施し，部材着目点におけるコンクリートの最高温度及び最小ひび割れ指数を比較する。

(2) 解析条件

表-6 解析条件

項 目		単位	解析検討ケース 低炭素型配合
配 合	梁・柱 フーチング	—	27-42.5-20BFS90 (W/B=35%)
単位 結合材量	梁・柱 フーチング	kg/m ³	417 (=HPC(10%)+BFS(90%))
断熱温度上昇式		—	試験結果
気 温		℃	10, 20, 30
打設温度		℃	10, 20, 30
熱伝導率	コンクリート	W/m℃	2.7
	地 盤		1.7
比熱	コンクリート	kJ/kg℃	1.15
	地 盤		1.40
熱膨張係数	コンクリート	/℃	12.8×10 ⁻⁶ (試験値)
	地 盤		10×10 ⁻⁶
圧縮強度発現式		N/mm ²	試験式
引張強度発現式		N/mm ²	試験式
ヤング係数式		kN/mm ²	試験式
自己収縮		—	試験式
乾燥収縮		—	考慮しない

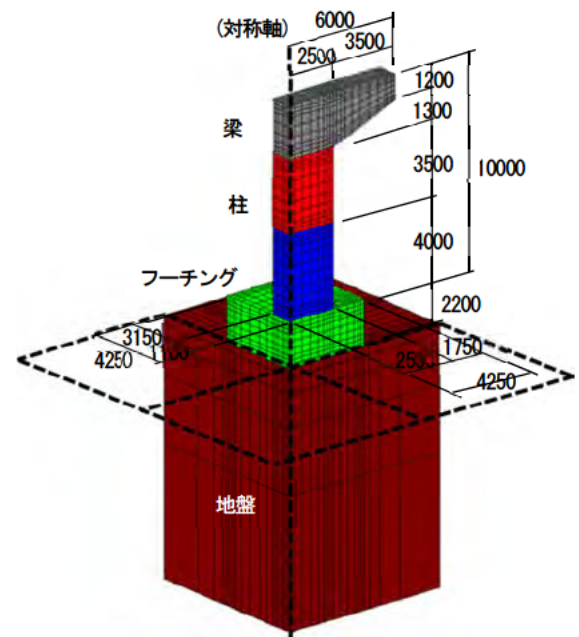


図-13 解析モデル（1/4 モデル）

(3) 解析結果

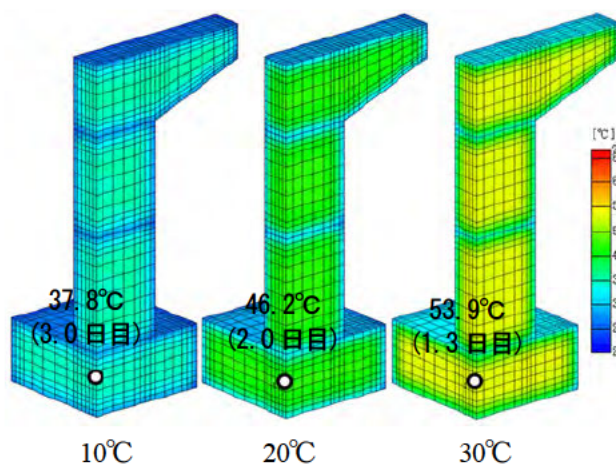


図-14 最高温度分布

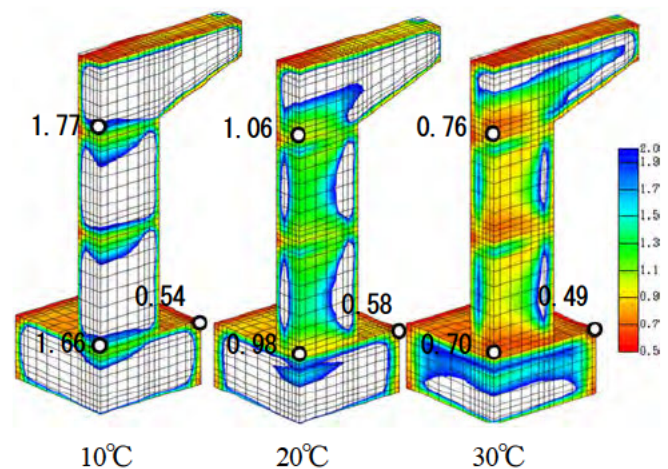


図-15 最小ひび割れ指数分布

2.2 解析詳細

(1) 対象構造物

解析事例 ①と同じ

(2) 解析モデル

解析事例 ①と同じ

(3) 解析方法

解析事例 ①と同じ

(4) コンクリート配合

表－7 に本検討で用いた解析配合を示す。本配合は、水結合材比（W/B）35%，セメント種類はH:早強をベースに、高炉スラグ微粉末を90%置換で用いた。

表－7 解析に用いたコンクリート配合

配合名	スラグ 置換率 BFS/B (%)	水結合材 比 W/B (%)	細骨材 率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	B		S	G
					H	BFS		
H10BFS90	90	35	50.0	165	47	424	835	835

備考) W/B=35%, BFS/B=90%の時, スランプフロー42.5±7.5cm (中流動コンクリート相当 35～50cm)
空気量 4.5±1.5%, 化学混和剤の種類: 高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ高含有用)

(5) 使用材料の設計用値

① 断熱温度上昇特性

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-\gamma t^s}) \quad \dots \dots \text{式(7)}$$

ここで、 $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量(°C)

Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量(°C)

γ, s : 温度上昇速度に関する定数

t : 材齢(日)

表－8 コンクリートの断熱温度上昇特性

配合名	打込み温度 (°C)	断熱温度上昇式における定数		
		Q_{∞} (°C)	γ	s
H10BFS90	10	27.3	0.186	3.277
	20	26.3	0.725	3.385
	30	24.0	3.235	3.455

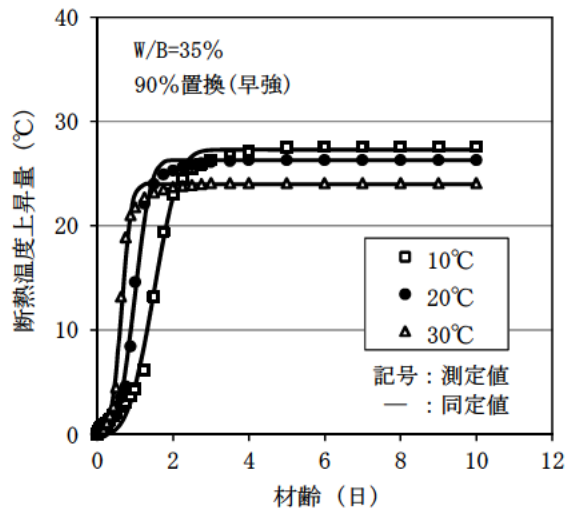


図-16 コンクリートの断熱温度上昇量の同定結果

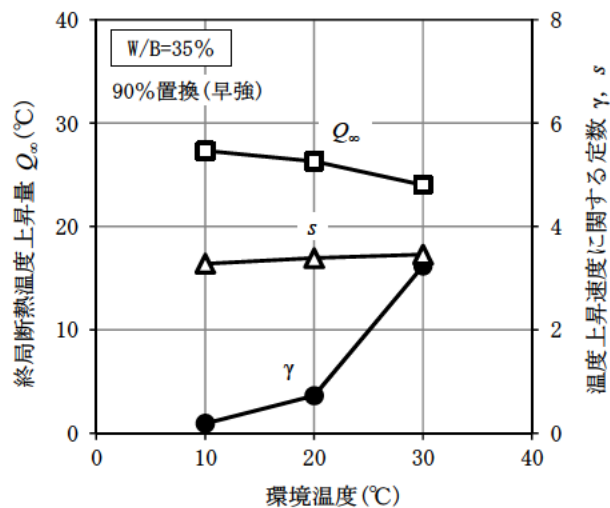


図-17 環境温度と断熱温度上昇特性値との関係

② 圧縮強度

圧縮強度の発現式は、有効材齢を用いた式(8)とし、表-9 に強度発現式の各係数を示す。

$$f'_c(t_e) = \frac{(t_e - S_f)}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_n) \quad \dots \dots \text{式(8)}$$

ここで、 $f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

$f'_c(t_n)$: 管理材齢 t_n (日)におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

t_n : 設計基準強度の管理材齢 (日)

t_e : 有効材齢 (日)

S_f : セメントの種類に応じた硬化原点(凝結始発)に対応する有効材齢 (日)

a, b : セメントの種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す係数

表-9 圧縮強度発現式における各係数

配合名	圧縮強度発現式における各係数			
	a	b	S_f (日)	$f'_c(t_n)$ (N/mm ²)
				$t_n=28$ (日)
H10BFS90	3.4	0.82	0.44	41.7

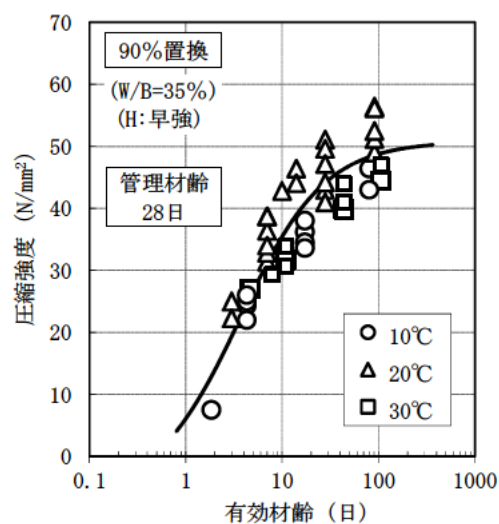


図-18 有効材齢と圧縮強度の関係 (H10BFS90 配合)

③ ヤング係数

解析事例 ①と同じ

④ 引張強度

解析事例 ①と同じ

⑤ 熱膨張係数

表-10 に試験結果から得られた熱膨張係数の値を示す。

表-10 熱膨張係数の測定結果 (実験値)

測定 サイクル	熱膨張係数($\times 10^{-6}$)		
	温度上昇時	温度下降時	平均
2 回目	12.1	12.7	12.8
3 回目	12.8	12.9	
4 回目	13.0	13.1	

⑥ 自己収縮ひずみ

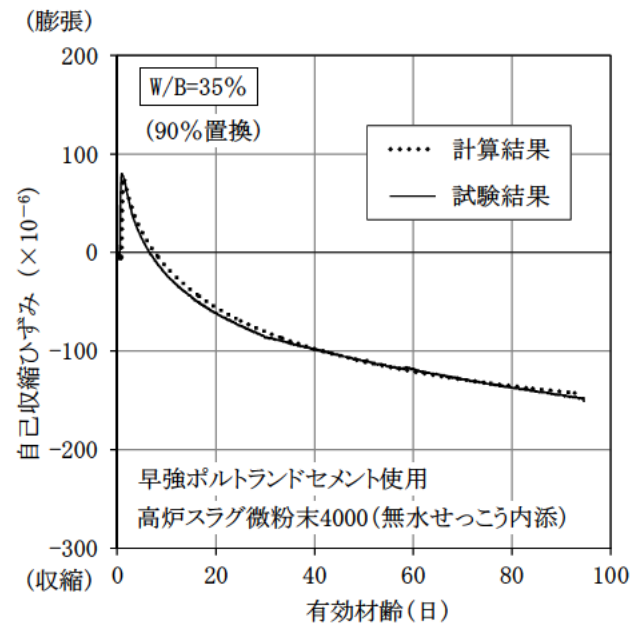


図-19 有効材齢と自己収縮ひずみの関係

<自己収縮ひずみ式>

$$\varepsilon_{sh}(t_e) = \eta_c \times \varepsilon_{sh-\infty} \times \left(1 - e^{-a_{sh}(t_e - t_{e,set})^{b_{sh}}} \right) \quad \dots \dots \text{式(9)}$$

ここで, $\varepsilon_{sh}(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)におけるコンクリートの自己収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t_e : 有効材齢 (日)

η_c : セメントの種類が自己収縮ひずみの終局値に及ぼす影響を表す係数

$\varepsilon_{sh-\infty}$: 自己収縮ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

a_{sh}, b_{sh} : 自己収縮ひずみの進行特性を表す係数

$t_{e,set}$: 凝結の始発 (有効材齢) (日)

<膨張ひずみ式>

$$\varepsilon_{ex}(t_e) = \varepsilon_{ex-\infty} \times \left(1 - e^{-a_{ex}(t_e - t_{ex,0})^{b_{ex}}} \right) \quad \dots \dots \text{式(10)}$$

ここで, $\varepsilon_{ex}(t_e)$: 有効材齢 t_e (日)における膨張コンクリートの膨張ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t_e : 有効材齢 (日)

$\varepsilon_{ex-\infty}$: 膨張ひずみの終局値 ($\times 10^{-6}$)

a_{ex}, b_{ex} : セメントの種類が膨張ひずみの進行特性に及ぼす影響を表す係数

$t_{ex,0}$: 膨張開始時点の有効材齢 (日) ($= t_{e,set}$)

表-11 自己収縮ひずみ及び膨張ひずみの係数

自己収縮ひずみ式の係数 (式(9)より)					膨張ひずみ式の係数 (式(10)より)			
η_c	$\varepsilon_{sh,\infty}$ ($\times 10^{-6}$)	a_{sh}	b_{sh}	$t_{e,set}$ (日)	$\varepsilon_{ex,\infty}$ ($\times 10^{-6}$)	a_{ex}	b_{ex}	$t_{ex,0}$ (日)
1.0	300	0.17	0.54	0.70	115	14	2.5	0.70

⑦ その他

解析上設定したその他の解析条件について以下に列挙する。

- ・コンクリートの打設は全4ロットとし、打設は28日間隔とする。
- ・境界部の熱伝達係数は、型枠存置中が8(W/m²C)、それ以外は14(W/m²C)とし、型枠存置期間は7日間とする。

(6) 解析結果

① 最高温度

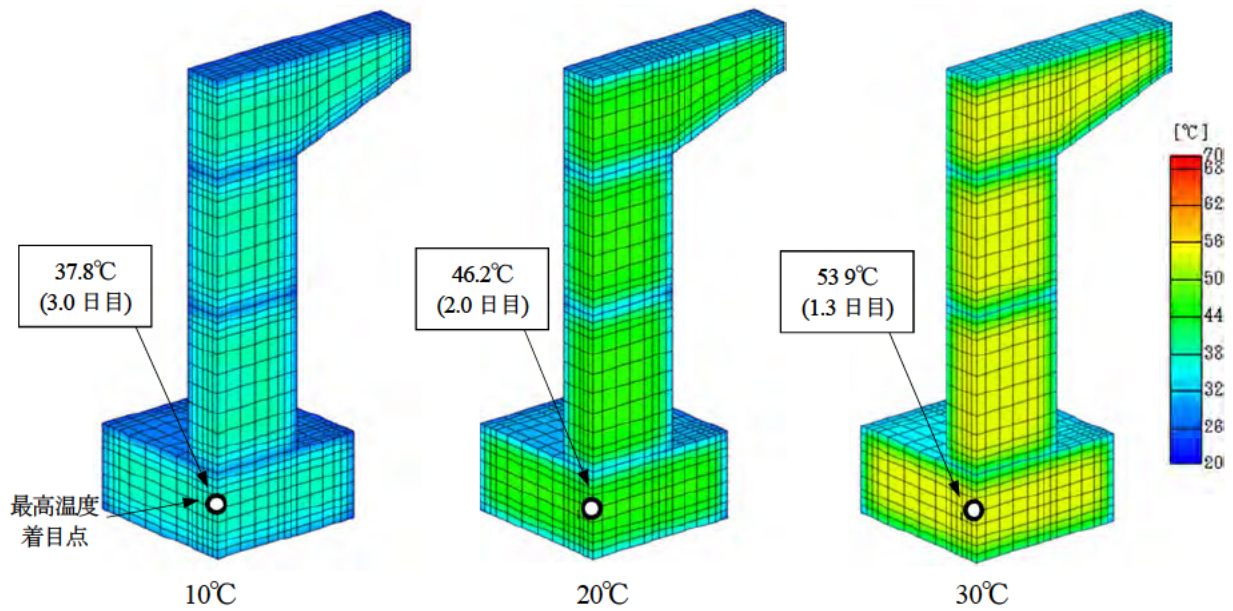


図-20 最高温度分布

② 最小ひび割れ指数

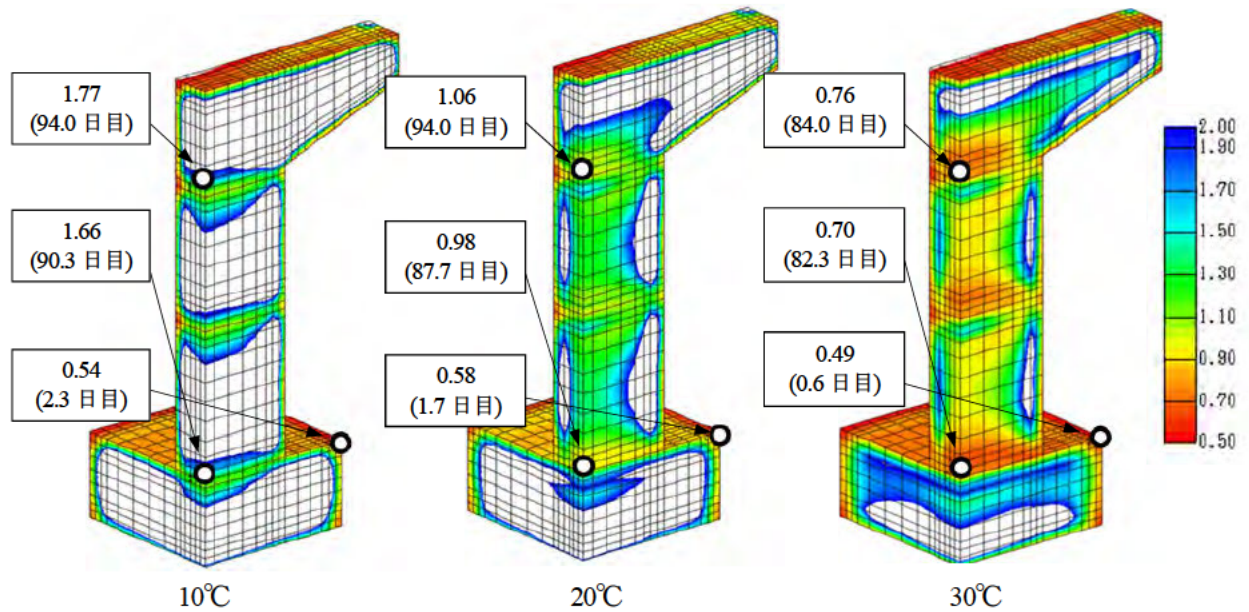


図-21 最小ひび割れ指数分布

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2013

■ 目的

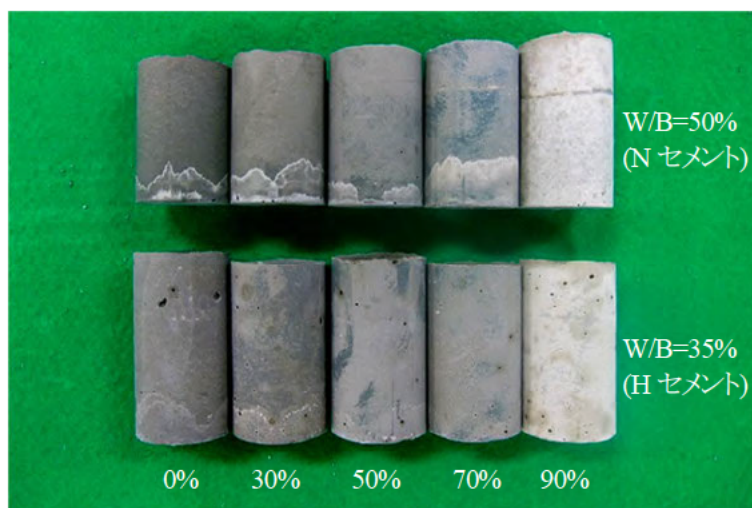
高炉スラグ微粉末の置換率の違いがモルタル及びコンクリートの色調に与える影響の確認

■ 試験条件及び要因

- | | |
|--------|---|
| 【試験条件】 | 養生条件: 打込み後 24 時間で脱型し、直ちに水中養生を実施
存置条件: 恒温恒湿室 (温度 20℃, 湿度 60%RH)
混和材料: 高炉スラグ微粉末 4000 (無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添) |
| 【要 因】 | 高炉スラグ微粉末の置換率 : 5 水準 0%, 30%, 50%, 70%, 90% (質量比)
水結合材比 (セメント種類) : 2 水準 35% (H:早強), 50% (N:普通) |

1. モルタル

写真－1 にモルタル (円柱 : 直径 ϕ 50mm) の材齢 31 日目における外観状況を示す。同写真より, W/B やセメント種類によらず, 高炉スラグ微粉末の置換率が高いほどモルタル表面の色調は白色を帯びており, 特に 90%置換で白色度が際立っていた。なお, 供試体下方の白色シミは型枠剥離剤の影響である。



写真－1 モルタル表面の色調 (撮影:材齢 31 日目, ϕ 50mm)

2. コンクリート

写真-2 にスランプフロー試験時におけるフレッシュコンクリートの外観状況を高炉スラグ微粉末の置換率別に示す。同写真より、W/B の違いによらず、高炉スラグ微粉末の置換率が多いほどフレッシュコンクリートの表面色調はやや白っぽくなる。

次に、**写真-3** 及び**写真-4** にコンクリート（直方体：100×100×400mm）の材齢 88 日目における表面及び断面の観察結果を示す。同写真より、高炉スラグ微粉末の置換率の違いによる表面色調の明確な差は確認できなかった。しかし、断面の色は、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほどやや白っぽくまた青緑色を呈しており、特に W/B の値が小さい 35%では顕著な差を確認できた。断面色が青緑色を呈している理由は、高炉スラグ微粉末中にわずかに含まれている硫化鉄の色である。

写真-5 に高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（90%置換）及び普通コンクリート（27-12-20N）でそれぞれ作製した 1m 角ブロック体の材齢 2 日目（型枠脱型直後）と材齢 28 日目における外観状況を示す。型枠脱型直後、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは普通コンクリートに比べて白っぽく、また表面の一部は青緑色を呈していた。しかし、材齢 28 日目では、両者の表面色調の差はほとんどなくなった。ただし、**写真-6** に示したコア供試体表面の観察結果から、コンクリート内部の色は両者で明確な色調の差を確認できた。



0%

30%

50%

70%

90%

W/B=35%, 早強ポルトランドセメント, スランプフロー 42.5 ± 7.5 cm



0%

30%

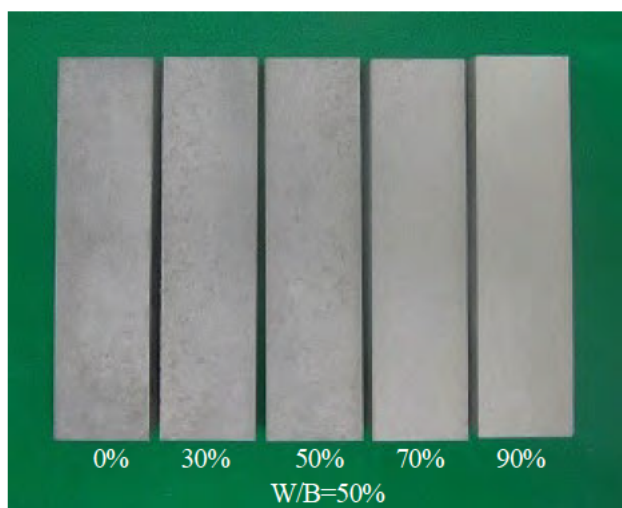
50%

70%

90%

W/B=50%, 普通ポルトランドセメント, スランプ 12.0 ± 2.5 cm

写真-2 スランプフロー試験時におけるフレッシュコンクリートの表面色調



0%

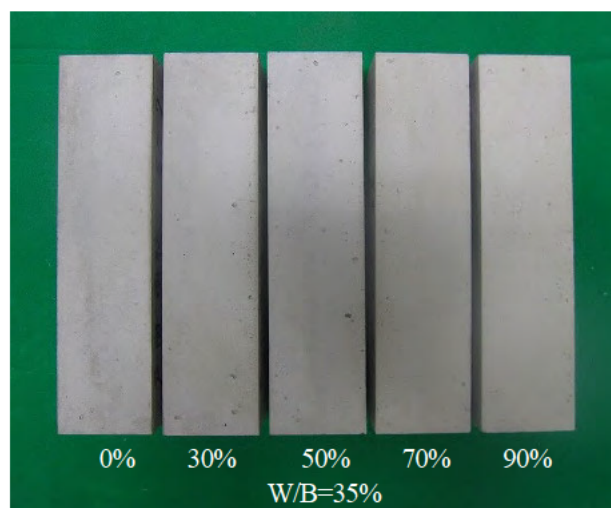
30%

50%

70%

90%

W/B=50%



0%

30%

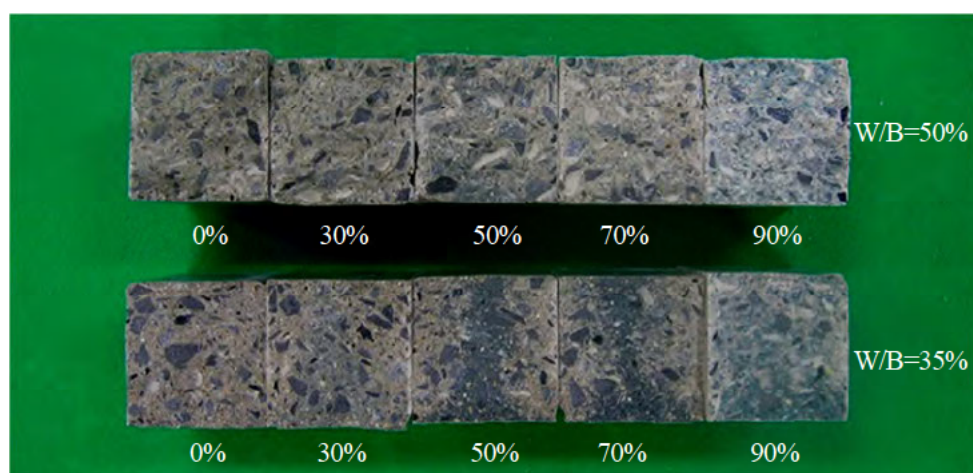
50%

70%

90%

W/B=35%

写真-3 コンクリート表面の色調 (撮影:材齢 88 日目, 100×100×400mm)



0%

30%

50%

70%

90%

W/B=50%

0%

30%

50%

70%

90%

W/B=35%

写真-4 コンクリート断面の色調 (撮影:材齢 88 日目, 100×100mm, 試験体下辺: 打設面)



撮影: 材齢 2 日目 (型枠脱型直後)



撮影: 材齢 28 日目 (コア採取時)

(左: 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート (90%置換), 右: 普通コンクリート (27-12-20N))

写真-5 1m 角ブロック



(上: 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート (90%置換), 下: 普通コンクリート (27-12-20N))

写真-6 1m 角ブロックから採取したコア供試体 $\phi 100\text{mm} \times 1,000\text{mm}$ 長 (撮影: 材齢 28 日目)

付録ー25 材料製造時における二酸化炭素の排出量削減効果（試算例）

■ 目的

高炉スラグ微粉末をポルトランドセメントに置き換えて用いたコンクリートの構成材料の製造時における二酸化炭素排出量削減効果の試算

■ 試験条件及び要因

【試験条件】	混和材料: 高炉スラグ微粉末 4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添)
	二酸化炭素排出原単位: 土木学会「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試算）」
	水結合材比（セメント種類）： 2 水準 35%（H:早強），50%（N:普通）
	高炉スラグ微粉末の置換率 ： 5 水準 0%，30%，50%，70%，90%（質量比）

表ー1 及び図ー1 に代表的なコンクリート構成材料の二酸化炭素排出原単位（インベントリデータ）を示す。なお表中の値は、土木学会：「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試算）」の解説表 3.2.3 を参考にした。コンクリートは、セメント、水、骨材、化学混和剤を基本構成材料としており、このうち、最も二酸化炭素排出原単位が多いのは製造時に高温で燃焼して生産されるセメントである。土木分野では、水和熱の抑制や耐久性向上、施工性改善などの観点から、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどを混和材としてポルトランドセメントの一部に置き換えて利用してきた。これらの産業副産物は、二酸化炭素排出原単位がポルトランドセメントに比べてかなり小さく、例えば、ポルトランドセメントを 1t 製造するのに 766.6kg の二酸化炭素量を排出するのに対して、高炉スラグ微粉末は 26.5kg でポルトランドセメントの約 3.5%と極めて少ない。このため、産業副産物（高炉スラグ微粉末、フライアッシュ等）を混和材としてポルトランドセメントに置き換えて用いることで、コンクリートの構成材料の製造時における二酸化炭素排出量を大幅に削減することが可能となる。

表ー2 及び図ー2 に、水結合材比 35%（W=165kg/m³一定）及び 50%（W=163kg/m³一定）の配合において、結合材中の高炉スラグ微粉末の量（置換率）を 0%，30%，50%，70%，90%とした時の材料製造時の二酸化炭素排出量の試算結果を示す。同図表より、結合材に占める高炉スラグ微粉末の量が多いほど、材料製造時の二酸化炭素排出量は減少し、本書で対象としている高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート（高炉スラグ微粉末の置換率 70%以上かつ 90%以下）の配合では、普通コンクリート（高炉スラグ微粉末を未使用（0%置換））の配合に対して、材料製造時の二酸化炭素排出量を約 34%以下（削減効果 66%以上）と試算でき、二酸化炭素排出削減効果が高い。

表-1 代表的なコンクリート構成材料の二酸化炭素排出原単位

大分類	中分類	小分類	細目分類	単位	二酸化炭素排出量 (kg-CO ₂ /t)
構成材料	セメント	ポルトランドセメント		t	766.6
		高炉セメントB種		t	458.7
		フライアッシュセメントB種		t	624.0
	骨材	天然細骨材	砕砂	t	3.7
		天然粗骨材	砕石	t	2.9
		石灰石骨材		t	2.9
	混和材	高炉スラグ微粉末		t	26.5
		フライアッシュ		t	19.6

備考) 表中の数値は、土木学会：「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」（コンクリートライブラリー125）より

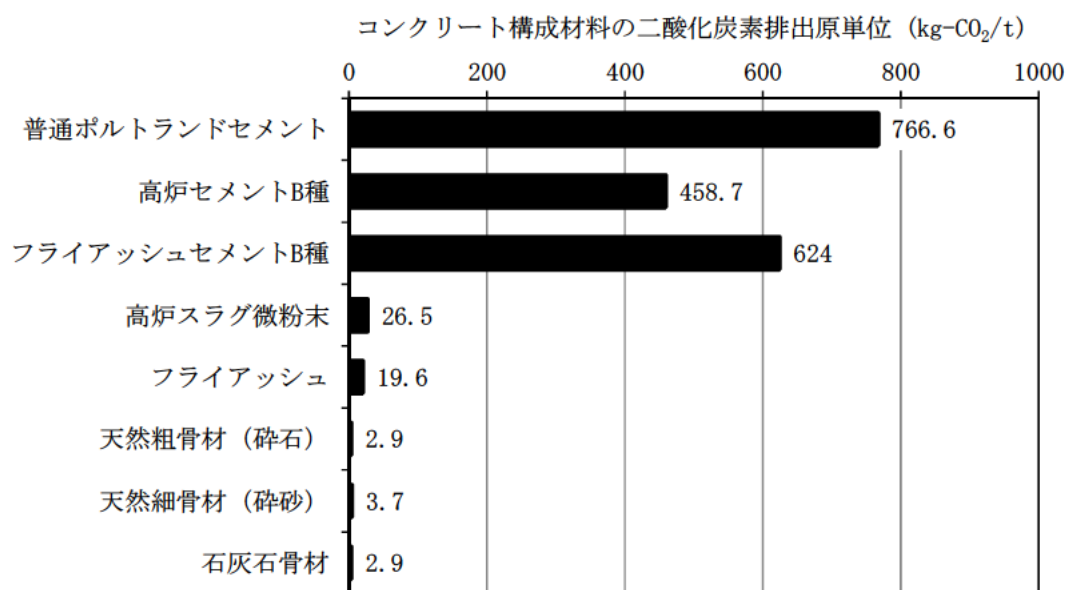


図-1 コンクリート構成材料の二酸化炭素排出原単位

表-2 コンクリート構成材料の製造時における二酸化炭素排出量の試算結果

材 料		二酸化炭素 排出 原単位 (kg-CO ₂ /t)	材料製造時の二酸化炭素排出量(kg-CO ₂ /m ³)									
			コンクリート中の単用量(kg/m ³)									
中分類	小分類		W/B=35%					W/B=50%				
			高炉スラグ微粉末の置換率(%)					高炉スラグ微粉末の置換率(%)				
			0	30	50	70	90	0	30	50	70	90
セメント	ポルトランド セメント	766.6	361	253	181	108	36	250	175	125	75	25
			471	330	236	141	47	326	228	163	98	33
混和材	高炉スラグ 微粉末	26.5	0.00	3.74	6.25	8.75	11.2	0.00	2.60	4.32	6.04	7.76
			0	141	236	330	424	0	98	163	228	293
骨 材	細骨材	3.7	3.2	3.1	3.1	3.1	3.1	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
			851	846	842	839	835	819	815	813	811	809
	粗骨材	2.9	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.9	2.9	2.9	2.9	2.8
			851	846	842	839	835	991	987	984	982	979
合 計 (置換率 0%を 100 とした比)			367 (100)	262 (71.5)	193 (52.6)	122 (33.4)	53 (14.4)	256 (100)	183 (71.6)	135 (52.8)	87 (34.0)	39 (15.2)

備考) ポルトランドセメント及び高炉スラグ微粉末は、それぞれの種類の違いによるインベントリデータの値が不明確なため、ここでは特に分別していない。また、化学混和剤は他の材料に比べて使用量が少ないため試算対象から除いた。

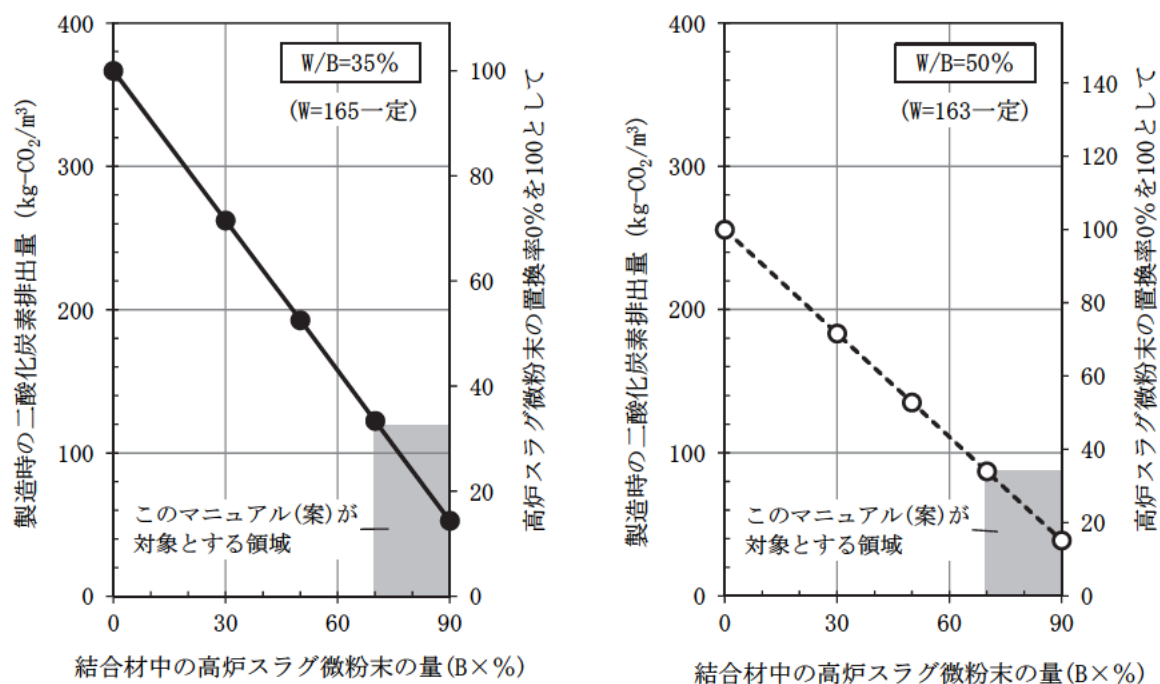


図-2 コンクリート構成材料製造時における二酸化炭素排出量試算結果 (コンクリート 1m³あたり)

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005

1. 試験概要

1.1 目的

実機製造設備を用いて、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの製造性能及び施工性を確認することを主たる目的とした。具体的には、製造時における材料の練混ぜ性能やトラックアジテータによる運搬時のフレッシュ性状の経時変化、ポンプ車による打込み性能及びコンクリートの強度特性等を確認した。また比較用のため、レディーミクストコンクリート工場（現場まで約2km、車移動4分程度）から出荷された呼び強度が同程度の普通コンクリート（27-12-20N）の打込みも行った。

1.2 実施時期と実験場所

【実施時期】 平成26年4月末

【実験場所】 戸田建設株式会社 成田PC工場内
(千葉県成田市) (写真ー1)

1.3 使用設備

① ミキサ

ミキサ型式: 二軸強制型ミキサ×1基

製造能力 : 1.75m³/バッチ

② トラックアジテータ

大型10t車（最大積載量5.0m³）×1台

③ コンクリートポンプ車

M型4段屈折式（極東開発工業）×1台



写真ー1 戸田建設株式会社 成田PC工場内
コンクリート製造設備

1.4 使用材料とコンクリート配合

使用材料及びコンクリート配合を表ー1 及び表ー2 に示す。本配合は、過去の実績や事前の試し練りの結果を参考に決定した。結合材は早強ポルトランドセメントをベースに高炉スラグ微粉末4000（無水せっこうを三酸化硫黄(SO₃)換算で2.0%内添）を90%置換で使用し、水結合材比35%で中流動コンクリート相当（スランプフロー:35～50cm）の配合仕様とした。骨材は実験を実施したPC工場内で日常的に使用されている購入骨材を使用した。また、比較に用いた普通コンクリート配合（27-12-20N）の配合仕様についても同表に併記した。

表-1 コンクリートの使用材料

	高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート配合 (27-42.5-25BFS90)	普通コンクリート配合(比較用) (27-12-20N)
セメント	早強ポルトランドセメント 密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4,490cm ² /g (太平洋セメント(株)製)	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3,320cm ² /g (三菱マテリアル(株)製)
混和材	高炉スラグ微粉末 密度 2.89g/cm ³ , 比表面積 4,300cm ² /g, 無水せつ こうを三酸化硫黄(SO ₃)換算で 2.0%内添 (エスメント関東(株)製)	(未使用)
水	上水道水 (工場内で常用)	上水道水以外の水 (地下水)
細骨材	茨城県神栖産陸砂 表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.68%, F.M2.09	茨城県行方市麻生産砂(陸砂) 表乾密度 2.56g/cm ³ , F.M2.60
	茨城県桜川産砕砂(硬質砂岩) 表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 0.97%, F.M2.72	
粗骨材	茨城県笠間産砕石(硬質砂岩) 表乾密度 2.74g/cm ³ , 吸水率 0.50%, 実積率 59.7%	茨城県笠間市片庭産砕石(砂岩) 表乾密度 2.65g/cm ³ , F.M6.60
化学混和剤	高性能 AE 減水剤 標準形(I 種) ポリカルボン酸系化合物とリグニンスルホン酸 塩, 高炉スラグ高含有品(SF500BB) (株フローリック製)	AE 減水剤 標準形(I 種) 変性リグニンスルホン酸化合物 (マスターポゾリス 78S) (BASF ジャパン(株)製)

表-2 コンクリート配合

配合名	G _{max} (mm)	スランブ フロー (mm)	空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						W	B		S		G	Ad
							C	BFS	S1	S2		
高炉スラグ微粉末 を高含有したコン クリート配合	25	42.5 ±75	4.5 ±1.5	35.0	50.0	165	HPC 47	424	410	413	860	B× 0.95%
普通コンクリート 配合 (比較用)	20	12 ±2.5	4.5 ±1.5	55.0	46.5	167	OPC 304	—	824		981	C× 1.0%

1.5 作業項目

表－3 作業項目

分類		作業項目	概 要
I	製造	練混ぜ性能	実機ミキサでの製造時における練混ぜ性能を確認
II	出荷品質	フレッシュコンクリート性状	コンクリートの練上がり性状と品質の確認
III	運搬	運搬時の性状変化	トラックアジテータでの運搬によるフレッシュコンクリート性状の経時変化等を確認
IV	施工	ポンプ圧送性	ポンプ車での圧送に伴う性状変化の確認
		打込み作業性	コンクリート打込み時の作業性の確認
V	硬化体品質	コンクリート硬化体品質	温度変化や出来形、各種強度の確認

1.6 試験内容

表－4 試験内容

分類	試験内容	試験方法	試験時期	基準値 規格値	備考
I	材料の練混ぜ性状	目視確認	練混ぜ中 ミキサ排出後	材料分離なし	
		ミキサ電流	練混ぜ時	電流値の安定	練混ぜ完了までに 要する時間の確認
II	スランプフロー	JIS A 1150	荷卸し時	42.5±7.5cm	
	空気量	JIS A 1128		4.5±1.5%	
	コンクリート温度	JIS A 1156		(35℃以下)	
	塩化物含有量	JIS A 1144		0.30kg/m ³ 以下	カンタブで測定
	ブリーディング試験	JIS A 1123		(1.5%以下)	
III	スランプフロー	JIS A 1150	経時変化 (30・60・90 分)	42.5±7.5cm	アジテータから採取
	空気量	JIS A 1128		4.5±1.5%	
	コンクリート温度	JIS A 1156		—	
IV	加圧ブリーディング試験	JSCE-F502	ミキサ排出後	図解より	
	ポンプ圧送負荷	目視確認	圧送中	—	
	スランプフロー	JIS A 1150	ポンプ圧送前後	42.5±7.5cm	
	空気量	JIS A 1128		4.5±1.5%	
V	圧縮強度	JIS A 1108	2,4,14,28,91,365 日	$\sigma 28 \geq 27\text{N/mm}^2$	
	中性化深さ(暴露 1 年後)	JIS A 1152	暴露 1 年後	—	千葉→茨城に暴露

※表中の分類 I ～Vは前記表を参照のこと

2. 試験結果

2.1 製造

実機ミキサを用いた製造時における練混ぜ性能を、練混ぜ中及びミキサ排出後に目視で確認した。本試験では、粘性によるミキサの過負荷を考慮し、1バッチあたりの製造量を最大 1.0m^3 とし、材料一括投入練りにより製造した。なお、高炉スラグ微粉末と早強ポルトランドセメントの投入は、人力により風袋重量換算でミキサに直接投入した。

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの練混ぜ中及び排出後のフレッシュコンクリート性状を目視確認した結果、材料の分離や不均質な状態は確認されず、製造に問題はなかった。また、練混ぜ中のミキサ電流値は、特に異常値を示すことなく製造できた。ただし、通常の普通コンクリートの練混ぜ時間は一般的に30～60秒程度で完了し排出することができるが、本試験で用いたコンクリートは粉体量が多く粘性が若干高い配合のため、練混ぜ時間が90秒以上と普通コンクリートに比べて（製造工程上、問題とはならないレベルではあるが）やや時間を要した。このため、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートを製造する場合、その配合に応じて、製造（材料投入から練混ぜ、排出まで）に要する時間を事前に確認し、実出荷時に考慮する必要がある。

2.2 出荷品質

表-5及び写真-2に、荷卸し時のフレッシュコンクリート性状を示す。フレッシュ性状はすべて所定の基準内であった。またブリーディング率は1.0%であった（図-1）。

表-5 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートのフレッシュ性状（荷卸し時）

	スランプフロー値 (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ($^{\circ}\text{C}$)	塩化物含有量 (kg/m^3)	ブリーディング率 (%)
基 準	42.5 ± 7.5	4.5 ± 1.5	(35 以下)	0.30 以下	(1.5 以下)
試験結果	$46.0 \times 44.0 (45.0)$	5.0	21	0.01	1.0



写真-2 コンクリートのフレッシュ性状

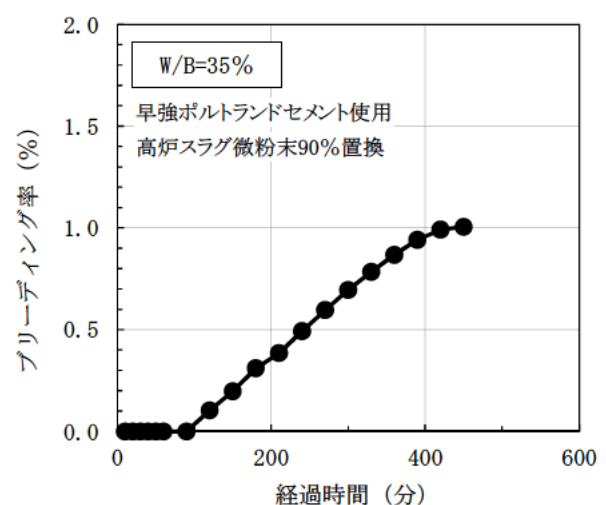


図-1 ブリーディング試験結果

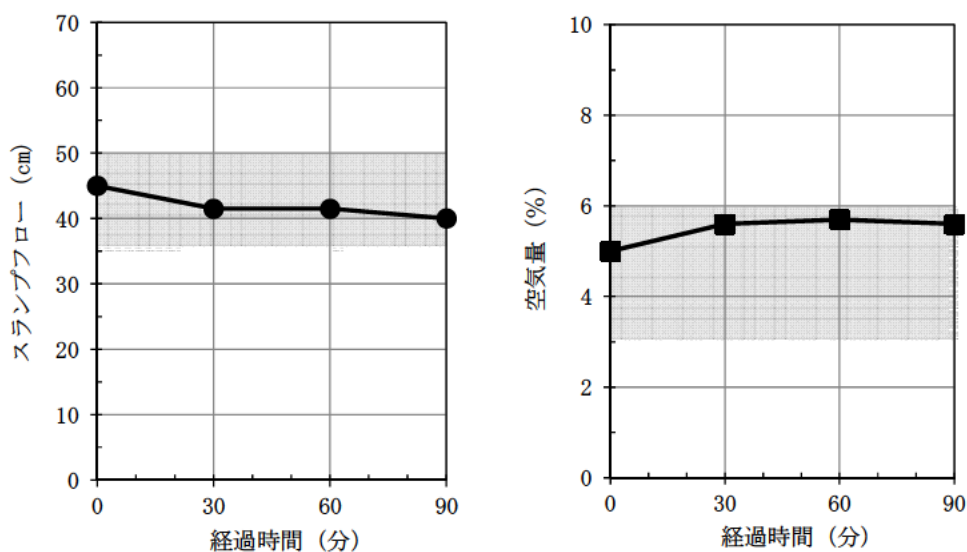
2.3 運搬

トラックアジテータでの運搬によるフレッシュコンクリート性状の経時変化を確認した。試験では、練り上りの完了したコンクリートをミキサからホッパーに卸し、これをトラックアジテータ（大型 10t 車）に荷移しし終わった時点を経過時間 0 分として、ドラムを通常の運搬時と同様に低速回転させ、30 分、60 分、90 分経過時に試料を採取し性状を確認した（写真－3）。試験項目は、コンクリートのスランプフロー、空気量、コンクリート温度の 3 項目である。

試験の結果を表－6、図－2 及び写真－4 に示す。スランプフローは経過時間とともにやや小さくなり、一方で空気量はやや増加する傾向がみられた。JIS A 5308 では練混ぜを開始してから 1.5 時間（90 分）以内に荷卸しができるように運搬しなければならないとしている。本試験の結果、トラックアジテータでの模擬運搬中に排出したコンクリートは、（トラックアジテータのドラム内にコンクリートを荷移してから）30 分後、60 分後、90 分後においても性状は良好で、所要の規定範囲内であった。つまり、運搬時の性状変化には特に問題はなかった。

表－6 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートのフレッシュ性状の経時変化

経過時間 (分)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	備 考
	42.5±7.5	4.5±1.5	(35 以下)	
0	46.0×44.0 (45.0)	5.0	21	トラックアジテータに荷移した時点
30	43.0×40.0 (41.5)	5.6	22	
60	43.0×40.0 (41.5)	5.7	22	
90	41.0×39.0 (40.0)	5.6	22	



図－2 フレッシュコンクリート性状の経時変化



写真-3 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートのトラックアジテータからの荷卸し状況



30 分後



60 分後



90 分後

写真-4 フレッシュコンクリート性状の経時変化

2.4 施工

施工は、トラックアジテータ（大型 10t 車）からコンクリートポンプ車（M 型 4 段屈折式）のホッパーにコンクリートを卸した後、1m 角の鋼製型枠内にポンプ車で打ち込んだ。写真-5 に打込み状況、写真-6 に試験に用いた鋼製型枠を示す。型枠内には熱電対があらかじめ設置されており、コンクリート打込み後のコンクリート温度の変化を自動計測した。



写真-5 コンクリートの打込み状況



写真-6 試験に用いた鋼製型枠（1m 角）

(1) 加圧ブリーディング試験

コンクリートのポンプ圧送性を評価するため、事前にJSCE-F502：「加圧ブリーディング試験方法（案）」に準拠して加圧ブリーディング試験を行い、材料の適正を把握した。写真-7及び図-3に加圧ブリーディング試験の状況及び試験結果を示す。同図より、本試験に用いたコンクリートの脱水量は圧送可能な範囲内にあることを確認した。



写真-7 加圧ブリーディング試験状況

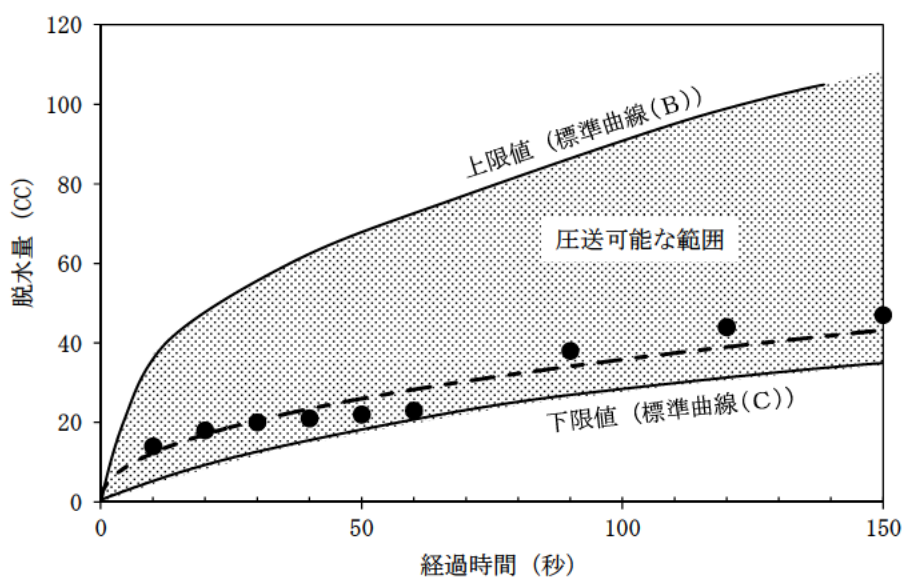


図-3 コンクリートの加圧ブリーディング試験結果

(2) ポンプ圧送性及び打込み状況

コンクリートポンプ車を用いた打込みにおいて、コンクリート圧送時の負荷を目視で確認した。その結果、比較用に施工した普通コンクリート（27-12-20N）と比べて、特に大きな圧送負荷がかかることもなく、良好なポンプ圧送性を有していた（写真－8）。

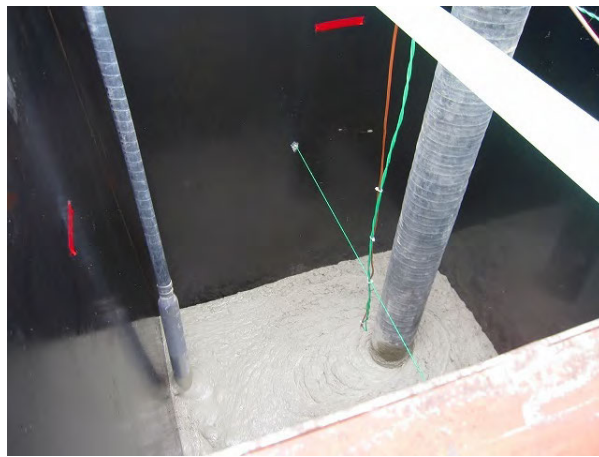
次に、写真－9 にポンプ筒先でのコンクリート性状を普通コンクリートと、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートで比較して示す。普通コンクリートは、荷卸し時のスランプが13cmであったが、筒先で9.5cmまでロスしたため、比較的硬めの性状であった。一方、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、筒先でスランプフローが圧送前に比べて5cm低下したものの、中流動コンクリート相当のスランプフローを有しているため、打込み時の流動性も高く、良好な打込み性状を得られた。



写真－8 コンクリートポンプ車による打込み状況



普通コンクリート（筒先スランプ9.5cm）



高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート

写真－9 ポンプ筒先でのコンクリートの性状比較

2.5 硬化体品質

(1) コンクリート温度

写真-10 にコンクリート 1m 角ブロックの脱型直後の外観を示す。また、図-4 にコンクリート中に設置した熱電対で自動計測したコンクリート温度の変化を示す。高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの中心部の最高温度は、同程度の強度を有する普通コンクリートよりも約 11℃低く、最高温度材齢は 6 時間ほど遅れて現れた。



(左：高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート，右：普通コンクリート)

写真-10 コンクリート 1m 角ブロック（脱型直後）

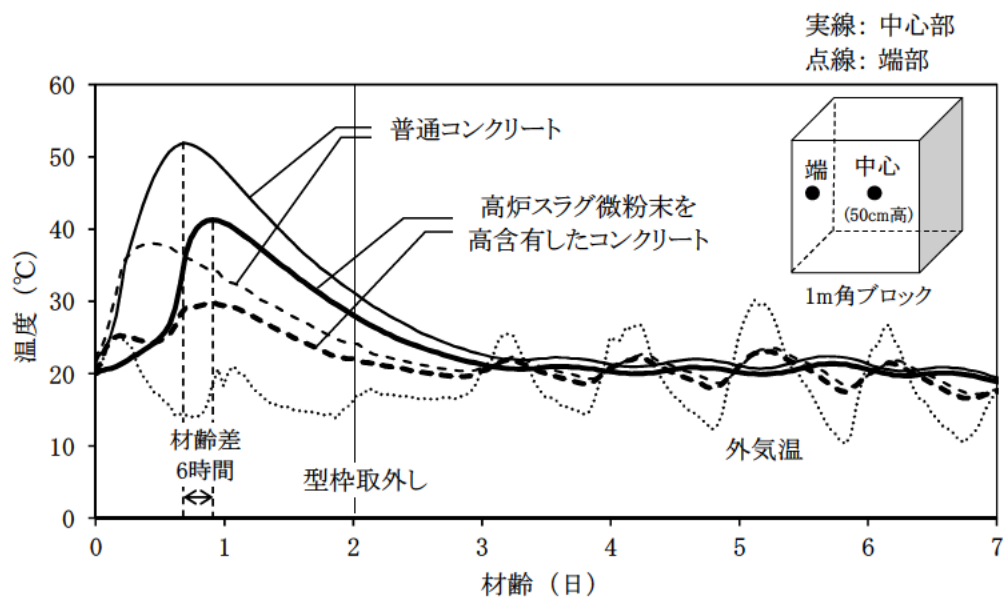


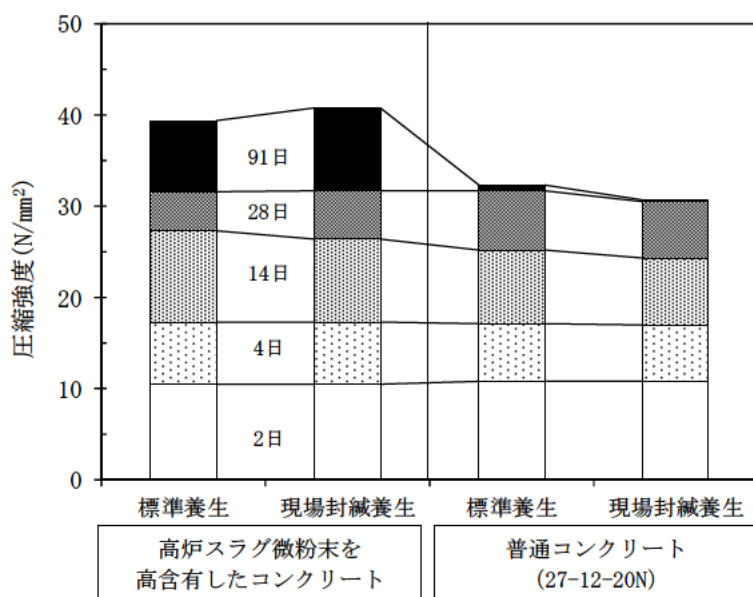
図-4 コンクリート温度

(2) 強度特性（圧縮強度、ヤング係数、引張強度）

表－7 及び図－5 に圧縮強度，表－8 及び図－6 にヤング係数，表－9 及び図－7 に引張強度の試験結果を示す。高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの場合，圧縮強度は材齢 28 日から 91 日にかけても強度増進した。圧縮強度とヤング係数及び引張強度との関係は，事前の室内試験で求めた実験式で概ね再現できると考える。

表－7 圧縮強度

材齢 (日)	圧縮強度(N/mm ²)					
	高炉スラグ微粉末を 高含有したコンクリート			普通コンクリート		
	標準 養生	現場 封緘	コア	標準 養生	現場 封緘	コア
2	10.5	10.5	—	10.8	10.8	—
4	17.3	17.3	—	17.1	17.0	—
14	27.3	26.4	—	25.2	24.3	—
28	31.6	31.7	30.8	31.7	30.5	27.4
91	39.4	40.8	—	32.3	30.7	—
365	—	—	41.8	—	—	33.3



図－5 圧縮強度

表-8 ヤング係数

材齢 (日)	ヤング係数(kN/mm ²)					
	高炉スラグ微粉末を 高含有したコンクリート			普通コンクリート		
	標準 養生	現場 封緘	コア	標準 養生	現場 封緘	コア
14	29.1	27.7	—	29.4	27.8	—
28	29.4	30.0	33.6	29.4	28.7	29.5
91	30.5	31.0	—	29.9	30.5	—
365	—	—	39.6	—	—	32.4

表-9 引張強度

材齢 (日)	引張強度(N/mm ²)			
	高炉スラグ微粉末を 高含有したコンクリート		普通コンクリート	
	標準養生	現場封緘	標準養生	現場封緘
28	2.91	2.45	2.22	2.45

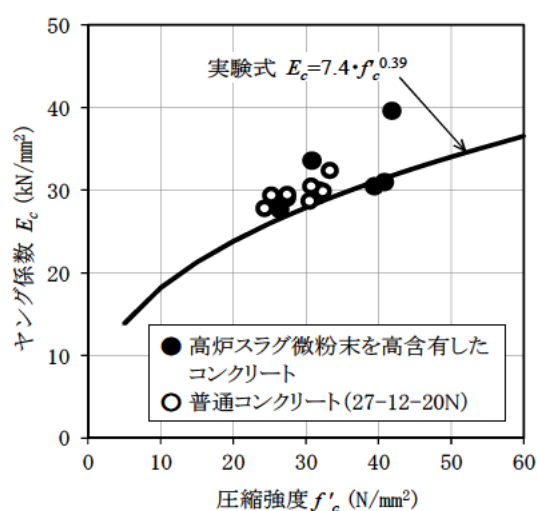


図-6 ヤング係数

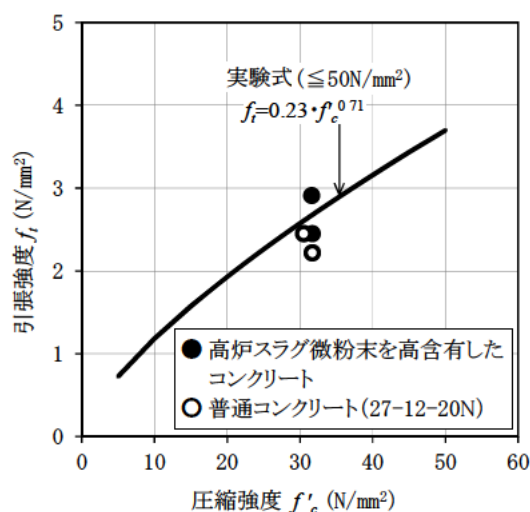


図-7 引張強度

(3) 中性化深さ

1m角のブロックを屋外環境に暴露してから1年後、直径φ100mmのコアを水平方向に採取し、コア割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを確認した。試験の結果、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリート(W/B=35%, 高炉スラグ微粉末90%置換)の中性化深さは平均6.0mmで、比較用の普通コンクリート(W/B=55%)の平均5.0mmよりも2割大きい値であった。この理由は、ポルトランドセメントの替わりに混和材(高炉スラグ微粉末)を高含有しているため、コンクリート中の水酸化カルシウムの含有量が減少していることが影響していると考えられる。なお、別途実施した暴露試験結果(付録-18)から、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの暴露1年目での中性化深さは約5~6mmで、今回の試験結果と概ね等しい値であった。

付録－27 材料コスト試算例

■ 目的

普通コンクリートと高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの材料コストを試算し比較

■ 条件

【試算条件】 比較ケース（Ⅰ）： 発熱量の小さいコンクリート配合（マスコンクリート対応）
（ $\sigma 28=30\text{N/mm}^2$ 程度，スランプ 12cm）
比較ケース（Ⅱ）： ワーカブルなコンクリート配合
（ $\sigma 28=35\sim 40\text{N/mm}^2$ 程度，スランプ 21cm）

表－1 に比較ケース一覧を示す。比較ケース（Ⅰ）は、マスコンクリートへの適用を想定した発熱量の小さいコンクリート配合，比較ケース（Ⅱ）はワーカビリティに優れたコンクリート配合を対象としている。それぞれのケースでは，同程度の強度（28 日強度）とスランプ特性を有する普通コンクリート及び高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートを比較している。比較ケースのコンクリート配合は表－2 に示したとおりである。また表－3 に，材料コストを算出するために必要なコンクリート構成材料の原料単価設定を示す。

表－4 及び図－1 にコンクリート材料単価試算結果を示す。試算にあたり，原材料費のほか、その他経費つまり製造関係費として、「＝製造労務費＋輸送関係費（輸送費＋輸送労務費＋輸送諸経費）＋販売経費（協同組合手数料等）」を計上した。また，それぞれの比率は，原材料費（40%），製造労務費（10%），輸送関係費（30%），販売経費（20%）と仮定した。

同図表より，比較ケース（Ⅰ）（発熱量の小さいコンクリート配合）では，中庸熱ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート（M100）と高炉スラグ微粉末を 70%置換で用いたコンクリート（N30BFS70）の材料単価は概ね等しい結果であった。

一方，比較ケース（Ⅱ）（ワーカブルなコンクリート配合）では，普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリート（N100）に対して，高炉スラグ微粉末を 90%置換で用いたコンクリート（H10BFS90）は 15% 高い試算結果となった。この理由として，使用した特殊な化学混和剤の単価が一般的に市販されている高性能 AE 減水剤に比べて約 1.2 倍と高価であることが挙げられる。また，施工性を確保するため，配合上，粉体量が多く設計されているため，粉体コストが高くなることも要因の 1 つであると考えられる。なお，ここで示した試算条件や価格はすべて仮定条件のもとで簡易的に試算した結果であり，実際の市場流通価格ではない。

表-1 比較ケース

比較 ケース	配合の特長	配合分類	配合名	結合材 (比率)	28 日強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)
(Ⅰ)	発熱量の小さいコン クリート配合	普通コンクリート	M100	M(100%)	30 程度	12
		高炉スラグ微粉末を 高含有したコンクリート	N30BFS70	N(30%) +BFS(70%)		
(Ⅱ)	ワーカブルなコンク リート配合	普通コンクリート	N100	N(100%)	35～40 程度	21
		高炉スラグ微粉末を 高含有したコンクリート	H10BFS90	H(10%) +BFS(90%)		

備考) M：中庸熱ポルトランドセメント，N：普通ポルトランドセメント，BFS：高炉スラグ微粉末

表-2 比較ケースのコンクリート配合

比較 ケース	配合名	W/B (%)	単位量(kg/m ³)										
			W	結合材 B				骨材		化学混和剤			
				N	H	M	BFS	S	G	AE1	AE2	SP1	SP2
(Ⅰ)	M100	55	163	—	—	296	—	806	1020	3.26	—	—	—
	N30BFS70	50	163	98	—	—	228	811	982	—	3.59	—	—
(Ⅱ)	N100	50	170	340	—	—	—	978	930	—	—	3.91	—
	H10BFS90	35	165	—	47	—	424	835	835	—	—	—	5.65

表-3 コンクリート構成材料の原料単価設定

分類	項 目	記号	単位	単価	備考
セメント	普通ポルトランドセメント	N	円/t	10,000	バラ
	早強ポルトランドセメント	H	円/t	12,000	バラ
	中庸熱ポルトランドセメント	M	円/t	10,000	バラ
水	水道水	W	円/L	0.22	
骨材	細骨材(砕砂)	S	円/m ³	4,500	密度 2.56g/cm ³
	粗骨材(砕石)	G	円/m ³	4,000	密度 2.65g/cm ³
化学混和剤	AE 減水剤	AE1	円/kg	80	
	AE 減水剤(高機能タイプ)	AE2	円/kg	150	
	高性能 AE 減水剤 (一般市販品)	SP1	円/kg	385	
	高性能 AE 減水剤 (高炉スラグ高含有用)	SP2	円/kg	450	
混和材	高炉スラグ微粉末	BFS	円/kg	8	

備考) 化学混和剤の性能による区分はすべて「標準形」

表-4 コンクリート材料単価試算結果

比較 ケース	配合名	コンクリート材料単価の内訳 (円/m³)					比率		
		原材料費	その他経費(製造関係費)					合 計	
			製造 労務費	輸送関係費					販売経費 (協同組合 手数料等)
				輸送費	輸送 労務費	輸送 諸経費			
		40%	10%	30%		20%			
(Ⅰ)	M100	6,213	1,553	4,660		3,107	15,533	1.00	
	N30BFS70	6,286	1,571	4,714		3,143	15,714	1.01	
(Ⅱ)	N100	8,066	2,016	6,049		4,033	20,164	1.00	
	H10BFS90	9,264	2,316	6,948		4,632	23,160	1.15	

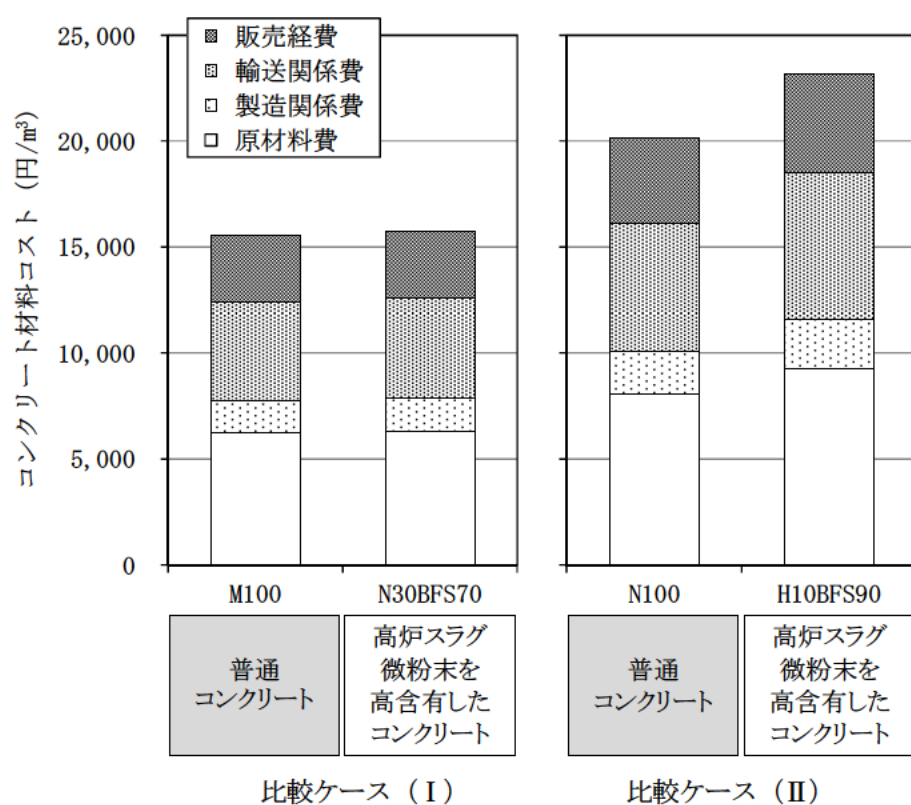


図-1 コンクリート材料単価試算結果

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.475 January 2016

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754