

# 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)－

平成 28 年 1 月

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

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(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) —

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  
総括主任研究員 森濱 和正  
主任研究員 中村 英佑  
交流研究員 栗原 勇樹

一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

委員長	手塚 正道	委員	武部 行男
副委員長	鈴木 雅博	〃	長谷川 剛
委員	小林 崇	〃	藤森 信一
〃	松山 高広	〃	天谷 公彦
〃	國富 康志	〃	高橋 健
〃	石井 豪	〃	徳光 卓
〃	俵 道和	〃	正木 守
〃	北野 勇一	〃	松下 拓樹
〃	鈴木 聡	〃	藤田 学
〃	河金 甲	〃	諸橋 明
〃	坂 哲	〃	斯波 明宏
〃	伊吹 真一	〃	佐々木 亘

### 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、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「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)」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<sup>1)</sup>、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<sup>2)</sup>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）、「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）」（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 CO<sub>2</sub> 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 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)

1章 総則.....	39
1.1 適用の範囲.....	39
1.2 用語の定義.....	42
2章 設計値.....	43
2.1 一般.....	43
2.2 コンクリートの強度及びヤング係数.....	43
2.3 コンクリートのクリープ.....	46
2.4 コンクリートの乾燥収縮.....	47
3章 耐久性の検討.....	49
3.1 一般.....	49
3.2 中性化に対する抵抗性.....	49
3.3 塩化物イオン浸透に対する抵抗性.....	51
3.4 凍結融解に対する抵抗性.....	53
4章 温度ひび割れ抵抗性の検討.....	55
4.1 一般.....	55
4.2 温度応力解析による検討方法.....	55
4.3 温度応力解析に用いるコンクリートの物性値.....	56
5章 施工.....	63
5.1 一般.....	63
5.2 材料.....	63
5.3 配合.....	65
5.4 運搬・打込み・締固め.....	67
5.5 湿潤養生期間.....	68
5.6 プレストレス力を導入する時のコンクリートの強度.....	71
6章 二酸化炭素排出削減効果の検討.....	72

### 第Ⅲ部 付録資料

付録ー1	混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の実績.....	75
付録ー2	混和材を用いたコンクリートの材料特性.....	86
付録ー3	混和材を用いたコンクリートの耐久性.....	94
付録ー4	混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ解析に用いる物性値.....	108
付録ー5	混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性.....	122
付録ー6	混和材を用いたコンクリートの養生.....	141
付録ー7	混和材を用いたコンクリートの二酸化炭素排出削減効果.....	152
付録ー8	混和材を用いたプレテンション部材の載荷試験事例.....	159

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）。

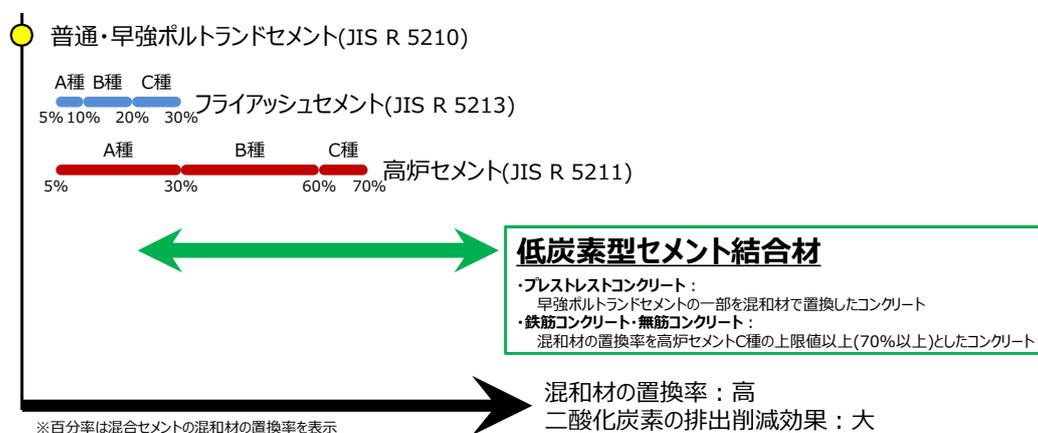


図-1.1 低炭素型セメント結合材の位置づけ

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、次の文献を参考にするとよい。

- ・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、次の文献を参考にするとよい。

- ・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, 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。

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種の上限値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ことが多いが、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もある。
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JIS A 6206に適合する高炉スラグ微粉末4000、フライアッシュにはJIS A 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ズ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/m<sup>3</sup>)、 $B$ ：単位結合材量(kg/m<sup>3</sup>)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/m<sup>3</sup>)、 $SCMs$ ：単位混和材量(kg/m<sup>3</sup>)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：エトリングタイトの遅延生成）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、シリカフェーム、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もあり、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)， $\alpha$ ：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、 $\alpha_{ACT}$ ：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<sup>4)</sup>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<sup>5)</sup>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<sup>5)</sup>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、 $\alpha_{JSCE}$ ：中性化速度係数の予測値(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )、 $W$ ：単位体積あたりの水の質量(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_p$ ：単位体積あたりのポルトランドセメントの質量(kg/m<sup>3</sup>)、 $A_d$ ：単位体積あたりの混和材の質量(kg/m<sup>3</sup>)、 $k$ ：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( $\text{kg/m}^3$ )、 $x$  : コンクリート表面からの距離( $\text{cm}$ )、 $t$  : 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( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_i$  : 初期含有塩化物イオン濃度( $\text{kg/m}^3$ )、 $D_{ap}$  : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{year}$ )、 $\operatorname{erf}$  : 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<sup>5)</sup>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<sup>9)</sup>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<sup>5)</sup>あるいはマスコンクリートのひび割れ制御指針<sup>6)</sup>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<sup>5)</sup>とマスコンクリートのひび割れ制御指針<sup>6)</sup>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](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お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 CO<sub>2</sub> 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、化学混和剤の種類を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可能性があるため、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ぼりを防ぐとよい。

## 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<sup>1)</sup>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<sup>1)</sup>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するとよい。

### **(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もある。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みを行うとよい。

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。

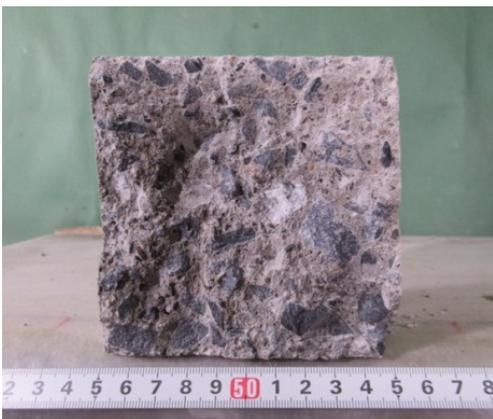
### 【解説】

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。

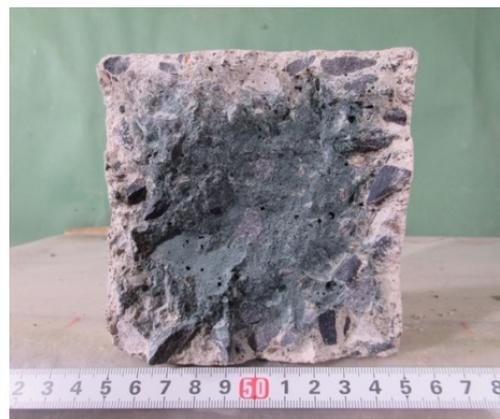
低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの検査は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質の特徴を適切に把握した上で、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様の方法で行ってよい。

### 【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  
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)

担当：一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会



# 1 章 総則

## 1.1 適用の範囲

- (1) 「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）（以下、このマニュアル（案）という）」は、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（以下、混和材を用いたコンクリートという）を用いた現場打ちプレストレストコンクリート橋の設計及び施工の標準的な方法を示したものである。
- (2) このマニュアル（案）に示されていない事項については、解説に記載する基準類によるものとする。

### 【解説】

#### (1)について

プレストレストコンクリート橋の高耐久化と建設時の環境負荷低減を目的として、早強ポルトランドセメントの一部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たコンクリートの積極的な活用が望まれている。混和材の使用は、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上やアルカリシリカ反応の抑制等によって耐久性の向上に寄与し、プレストレストコンクリート橋の長寿命化によるライフサイクルコストの低減につながる。また、産業副産物である混和材は早強ポルトランドセメントと比較して製造時の二酸化炭素排出量が非常に小さいため、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換することによって、プレストレストコンクリート橋の建設に伴って発生する二酸化炭素排出量を削減することができる。

プレストレストコンクリート橋では早強ポルトランドセメントを用いた比較的高い強度域のコンクリートが多用されるが、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の特性については統一的な見解が得られておらず、設計及び施工の標準的な方法が定められていないのが現状である。既存の基準類における混和材の使用に関する規定は、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートを対象としたものであり、無筋または鉄筋コンクリート構造への適用を想定したものと考えられる。したがって、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をプレストレストコンクリート橋に適用する際には、クリープ係数や乾燥収縮ひずみ等の設計値、耐久性や温度ひび割れ抵抗性の検討方法、施工時に留意すべき事項等を明確に規定することが不可欠である。また、混和材の使用による環境負荷低減効果を適切に評価するためには、二酸化炭素排出削減効果を定量的に算出できる方法を確立する必要がある。

これらのことを踏まえて、このマニュアル（案）では、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を設計基準強度  $30\sim 80\text{N/mm}^2$  の現場打ちプレストレストコンクリート橋に適用することを念頭に、実験や解析等で得られた知見を参考として、混和材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の標準的な方法を示した。

このマニュアル（案）では、表-1.1 に示す結合材の組合せのコンクリートを用いることを標準とした。プレストレストコンクリート橋では比較的初期の材齢でプレストレス力を導入することが多く、早期の強度発現が求められるため、早強ポルトランドセメントを用い、この一部を3種類の混和材とその置換率（質量%）で置換することとした。すなわち、高炉スラグ微粉末4000の置換率を30%、高炉スラグ微粉末6000の置換率を50%、フライアッシュⅡ種の置換率を20%とした。これらの混和材の置換率は、プレストレストコンクリート橋の施工実績（第Ⅲ部付録-1 参照）等も参考として、比較的初期の材齢で十分な強度発現を確保できるように設定したものである。

表-1.1 このマニュアル（案）で標準とする結合材の組合せ

セメントの種類	混和材の種類	混和材の置換率（質量%）
早強ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末4000	30
	高炉スラグ微粉末6000	50
	フライアッシュⅡ種	20

このマニュアル（案）で示す事項は、表-1.1 に示す結合材の組合せを標準として、現場打ちプレストレストコンクリート橋に多く適用されている設計基準強度  $40\text{N/mm}^2$  を想定した水結合材比 35~40%のコンクリートでの実験や解析等の結果に基づいて規定されたものである。結合材の組合せを表-1.1 に示すもの以外とする場合には、設計値、耐久性、温度ひび割れ抵抗性、施工性等について、実験や解析、実績等に基づき、技術的検討を行って確認する必要がある。例えば、二酸化炭素排出削減効果をさらに高めるために、水結合材比を小さくすることなく、混和材の置換率を高めて早強ポルトランドセメントの使用量をさらに抑制する場合等が想定される。このような場合に実験と解析による検討を行う際には、「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、以下、ガイドライン（案）という）」、このマニュアル（案）及び付録資料（第Ⅲ部）を参考にするとよい。

なお、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をプレキャスト部材に適用する場合に、設計値、耐久性、温度ひび割れ抵抗性、施工性等について技術的検討を行う際には、このマニュアル（案）及び付録資料（第Ⅲ部）を参考にするとよい。

このマニュアル（案）の構成を図-1.1、2章以降の概要を次に示す。

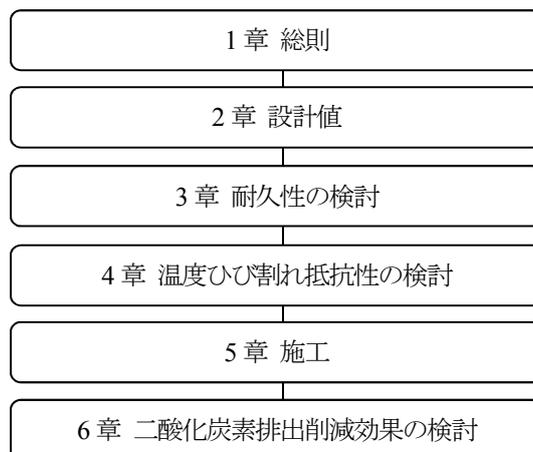


図-1.1 このマニュアル（案）の構成

## 2章 設計値について

強度やクリープ係数，乾燥収縮ひずみ等，混和材を用いたコンクリートの設計値を示した。クリープ係数と乾燥収縮ひずみの設計値が定められていなかったことが，混和材を用いたコンクリートをプレストレストコンクリート橋に適用する際の課題となっていたため，これらの設計値を示した。

## 3章 耐久性の検討について

中性化や塩化物イオン浸透，凍結融解に対する抵抗性等，混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の耐久性の確保及び向上を実現するために検討すべき事項を示した。混和材の使用は，塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上に効果的であるが，中性化に対する抵抗性を低下させることが課題となるため，屋外暴露試験の結果に基づき中性化に対する抵抗性の検討方法を示した。

## 4章 温度ひび割れ抵抗性の検討について

若材齢のコンクリートの強度特性や自己収縮ひずみ，断熱温度上昇量の推定式等，混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の温度ひび割れの発生リスクを検討する際に必要となる物性値を示した。また，マスコンクリートにおける高温履歴が自己収縮ひずみに与える影響や膨張材を併用した際の膨張ひずみの設定等，FEM解析による検討を行う際に配慮すべき事項を示した。

## 5章 施工について

配合や運搬，打込み，締固め，養生等，混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の施工を適切に行うために配慮すべき事項を示した。混和材を用いたコンクリートの品質は施工時の気象条件や湿潤養生期間の影響を受けるため，施工や湿潤養生期間の設定において配慮すべき事項を示した。

## 6章 二酸化炭素排出削減効果の検討について

混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価するための標準的な方法を示した。

### (2)について

混和材を用いたコンクリートの品質には、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの品質とは異なる傾向を示すものがある。このため、このマニュアル（案）では、混和材を用いたコンクリートを現場打ちプレストレストコンクリート橋に適用するにあたって特に配慮すべき事項を重点的に示した。このマニュアル（案）に示されていない事項については、次の既存の基準類を参考にするるとよい。これらの基準類は、このマニュアル（案）の発刊時（2016年1月）で最新のものであり、今後これらの基準類の改訂があった場合には、改訂による影響を適切に考慮した上で、最新の基準類を参考にしてよい。

- ・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  
（以下，道路橋示方書という）
- ・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  
（以下，コンクリート標準示方書という）

なお、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換したコンクリートの品質については、次の文献を参考にするるとよい。

- ・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

### 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。

- ・ **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。このマニュアル（案）では、高炉スラグ微粉末4000、高炉スラグ微粉末6000及びフライアッシュⅡ種を指す。
- ・ **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、早強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。
- ・ **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。

## 2章 設計値

### 2.1 一般

混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計においては、混和材の種類及び置換率に応じて適切な設計値を用いるものとする。

#### 【解説】

混和材を用いたコンクリートの強度発現やクリープ係数、乾燥収縮ひずみは、混和材の種類及び置換率によって異なるため、混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計においては、使用する混和材の種類及び置換率に応じた特性を試験等によって確認し、適切な設計値を設定する必要がある。

このマニュアル（案）では、混和材を用いたコンクリートにおいて明確でなかったクリープ係数及び乾燥収縮ひずみの設計値を示した。表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合は、この章に示す設計値を用いてよい。

### 2.2 コンクリートの強度及びヤング係数

- (1) 混和材を用いたコンクリートの設計基準強度は、原則として、 $30\sim 80\text{N/mm}^2$  とする。また、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度、引張強度及びヤング係数は、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。
- (2) 表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合のコンクリートの引張強度及びヤング係数は、コンクリート標準示方書あるいは道路橋示方書に示される圧縮強度との関係式を用いて求めてよい。

#### 【解説】

#### (1)について

プレストレス力を導入するプレストレストコンクリート橋においては、高い圧縮強度を有するコンクリートを用いる必要があるため、設計基準強度を原則として $30\sim 80\text{N/mm}^2$  とすることとした。ただし、プレストレス力が比較的小さく、定着部を有しない横桁の現場打ちコンクリート等については、耐久性を考慮した上で、設計基準強度の下限を $24\text{N/mm}^2$  としてよい。

混和材を用いたコンクリートの圧縮強度、引張強度及びヤング係数は、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を原則とした。試験強度のばらつきを考慮して、大部分がその値を下回らない強度をそのコンクリートが保証する強度とし、プレストレストコンクリート橋に求められる所要の強度を有することを確認する必要がある。なお、圧縮強度、引張強度及びヤング係数は、次の試験方法によって定めることとする。

- ・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

**(2)について**

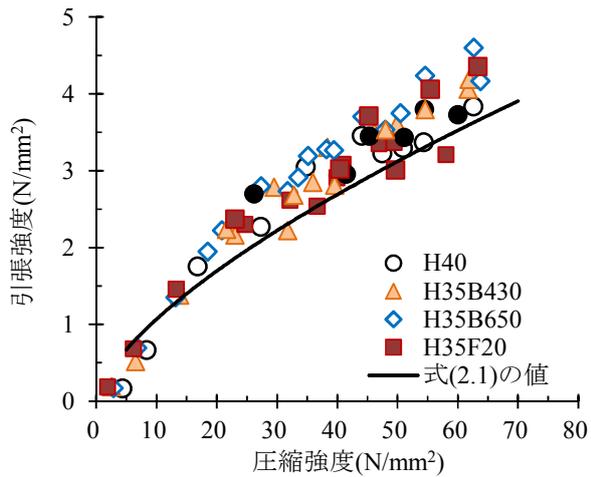
混和材を用いたコンクリートの引張強度 ( $f_{tk}$ ) は、設計基準強度 ( $f'_{ck}$ ) に基づき、コンクリート標準示方書に示される式(2.1)を用いて求めてよい。また、混和材を用いたコンクリートのヤング係数 ( $E_c$ ) については、コンクリート標準示方書に示される式(2.2)を用いて求めた値あるいは道路橋示方書に示される表-2.1 の値を用いてよい。表-1.1 に示す結合材の組合せを用いたコンクリートの圧縮強度と引張強度及びヤング係数の関係は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様の傾向を示すことが確認されている(図-2.1, 2.2)。

$$f_{tk} = 0.23 f'_{ck}{}^{2/3} \quad (2.1)$$

$$E_c = \begin{cases} \left[ 2.2 + \frac{f'_{ck} - 18}{20} \right] \times 10^4 & f'_{ck} < 30 \text{ (N/mm}^2\text{)} \\ \left[ 2.8 + \frac{f'_{ck} - 30}{33} \right] \times 10^4 & 30 \leq f'_{ck} < 40 \text{ (N/mm}^2\text{)} \\ \left[ 3.1 + \frac{f'_{ck} - 40}{50} \right] \times 10^4 & 40 \leq f'_{ck} < 70 \text{ (N/mm}^2\text{)} \\ \left[ 3.7 + \frac{f'_{ck} - 70}{100} \right] \times 10^4 & 70 \leq f'_{ck} < 80 \text{ (N/mm}^2\text{)} \end{cases} \quad (2.2)$$

表-2.1 混和材を用いたコンクリートのヤング係数

$f'_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	30	40	50	60	70	80
$E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$2.8 \times 10^4$	$3.1 \times 10^4$	$3.3 \times 10^4$	$3.5 \times 10^4$	$3.7 \times 10^4$	$3.8 \times 10^4$



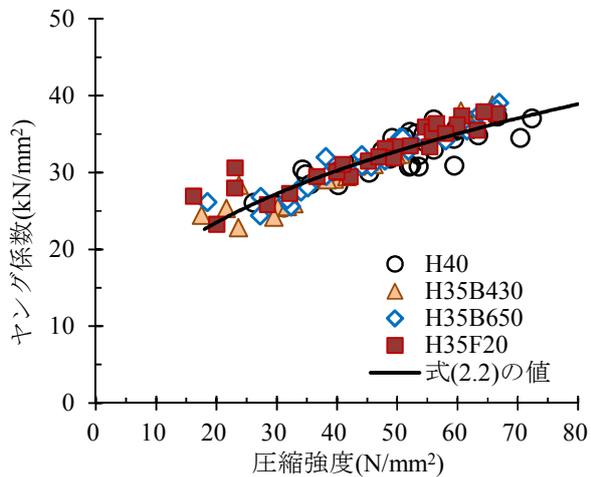
H40 :  
 早強ポルトランドセメント単味  
 (W/B=40%, W=165kg/m<sup>3</sup>)

H35B430 :  
 早強ポルトランドセメントの30%を  
 高炉スラグ微粉末4000で置換  
 (W/B=35%, W=165kg/m<sup>3</sup>)

H35B650 :  
 早強ポルトランドセメントの50%を  
 高炉スラグ微粉末6000で置換  
 (W/B=35%, W=165kg/m<sup>3</sup>)

H35F20 :  
 早強ポルトランドセメントの20%を  
 フライアッシュII種で置換  
 (W/B=35%, W=165kg/m<sup>3</sup>)

図-2.1 混和材を用いたコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係



H40 :  
 早強ポルトランドセメント単味  
 (W/B=40%, W=165kg/m<sup>3</sup>)

H35B430 :  
 早強ポルトランドセメントの30%を  
 高炉スラグ微粉末4000で置換  
 (W/B=35%, W=165kg/m<sup>3</sup>)

H35B650 :  
 早強ポルトランドセメントの50%を  
 高炉スラグ微粉末6000で置換  
 (W/B=35%, W=165kg/m<sup>3</sup>)

H35F20 :  
 早強ポルトランドセメントの20%を  
 フライアッシュII種で置換  
 (W/B=35%, W=165kg/m<sup>3</sup>)

図-2.2 混和材を用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係

### 2.3 コンクリートのクリープ

- (1) 混和材を用いたコンクリートのクリープひずみは、作用する応力度による弾性ひずみに比例するととして、式(2.3)によって求めてよい。

$$\varepsilon'_{cc} = \frac{\sigma'_{cp}}{E_{c28}} \varphi \quad (2.3)$$

ここに、 $\varepsilon'_{cc}$ ：コンクリートのクリープひずみ、 $\varphi$ ：クリープ係数、 $\sigma'_{cp}$ ：作用する応力度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $E_{c28}$ ：材齢 28 日のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>) である。

- (2) 混和材を用いたコンクリートのクリープ係数は、構造物の周辺の湿度、部材断面の形状寸法、コンクリートの配合、混和材の種類や置換率、応力度が作用する時のコンクリートの材齢等の影響を考慮して定めるものとする。
- (3) プレストレス力の減少量及び不静定力の算出に用いるコンクリートのクリープ係数は、表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合、表-2.2 の値としてよい。

表-2.2 混和材を用いたコンクリートのクリープ係数

持続荷重を載荷する時のコンクリートの材齢 (日)	4~7	14	28	90	365
早強ポルトランドセメントの 30%を高炉スラグ微粉末 4000 で置換	2.6	2.3	2.0	1.7	1.2
早強ポルトランドセメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換					
早強ポルトランドセメントの 20%をフライアッシュ II 種で置換					

#### 【解説】

##### (1)について

コンクリートのクリープひずみは、コンクリートに作用する応力度が圧縮強度の 40%以下であれば、作用する応力度に概ね比例することから、式(2.3)を用いて求めてよいこととした。道路橋示方書に示されるコンクリートのヤング係数が設計基準強度に基づく値とされていることから、このマニュアル (案) ではコンクリートのクリープひずみを算出する際に用いるヤング係数は標準養生を行った供試体の材齢 28 日における試験値とした。

##### (2)について

混和材を用いたコンクリートのクリープ性状は、混和材の種類や置換率、部材寸法、環境条件等に影響されるため、これらを考慮したコンクリートのクリープ試験や実績によって設計値を定める必要がある。

##### (3)について

表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合には、道路橋示方書に示される早強ポルトランドセメント使用時のクリープ係数と同じ値を用いてよいこととした。表-1.1 に示す結合材の組合せを用いたコンクリー

トのクリープ試験を材齢 910 日まで実施し、得られた試験データから道路橋示方書で想定されている材齢 10,000 日までのクリープ係数の推定値を求めた。この結果、混和材の種類や載荷材齢の違いにかかわらず、混和材を用いたコンクリートのクリープ係数は道路橋示方書による設計値と比較して同程度か小さくなることが確認されている (図-2.3)。

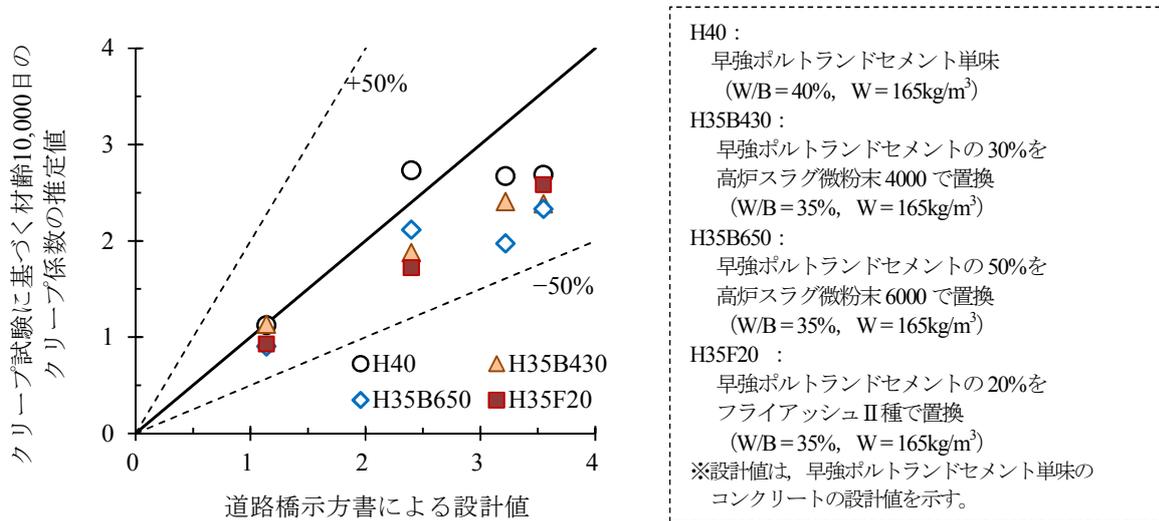


図-2.3 混和材を用いたコンクリートのクリープ係数の推定値と道路橋示方書による設計値との比較

## 2.4 コンクリートの乾燥収縮

- (1) 混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、構造物の周辺の湿度、部材断面の形状寸法、使用骨材、セメントの種類、混和材の種類や置換率、コンクリートの配合等の影響を考慮して定めるものとする。
- (2) プレストレス力の減少量及び不静定力の算出に用いるコンクリートの乾燥収縮ひずみは、表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合、表-2.3 の値としてよい。

表-2.3 混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

プレストレスを導入する時のコンクリートの材齢 (日)	4~7	28	90	365
早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末 4000 で置換	200	180	160	120
早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換				
早強ポルトランドセメントの20%をフライアッシュ II 種で置換				

### 【解説】

#### (1)について

混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性は、混和材の種類や置換率、部材寸法、環境条件等に影響されるため、これらを考慮したコンクリートの乾燥収縮試験や実績によって設計値を定める必要がある。

## (2)について

表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合には、道路橋示方書に示される早強ポルトランドセメント使用時の乾燥収縮度と同じ値を用いてよいこととした。表-1.1 に示す結合材の組合せを用いたコンクリートの乾燥収縮試験を材齢 910 日まで実施した。この結果、乾燥収縮ひずみは、圧縮強度が同程度である早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して同程度か小さくなることが確認されている (図-2.4)。

なお、ここでいう乾燥収縮ひずみは道路橋示方書に準拠して自己収縮ひずみを含めたひずみである。

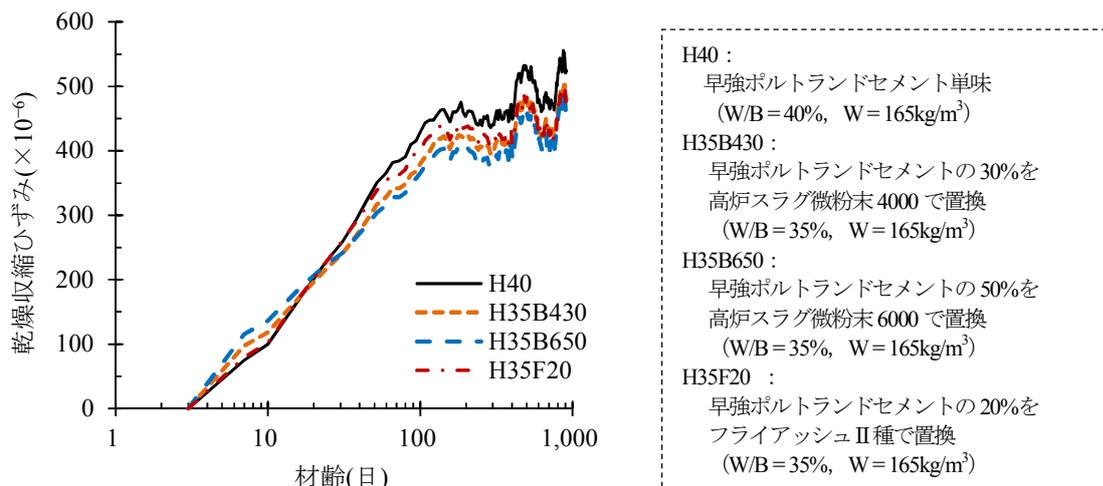


図-2.4 混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮試験結果

## 3 章 耐久性の検討

### 3.1 一般

- (1) 混和材を用いたプレストレストコンクリート橋は、供用期間中に、所要の耐久性が損なわれないようにするものとする。
- (2) 混和材を用いたコンクリートの耐久性は湿潤養生期間や養生温度の影響を受けるため、打込み後の養生を適切に行うものとする。

#### 【解説】

##### (1)について

混和材を用いたコンクリートでは、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上やアルカリシリカ反応の抑制効果等が期待できるが、中性化に対する抵抗性は低下する可能性が高い。混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の耐久性の確保及び向上を図るためには、混和材を用いたコンクリートの中性化、塩化物イオン浸透及び凍結融解に対する抵抗性を適切に検討する必要がある。アルカリシリカ反応の抑制については、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様に骨材の品質にかかわるものであることから、5章5.2節(7)を参考にするとよい。

##### (2)について

混和材を用いたコンクリートの耐久性は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、湿潤養生期間や養生温度の影響を受けるため、5章5.5節に準拠して打込み後の養生を適切に行う必要がある。

### 3.2 中性化に対する抵抗性

- (1) 混和材を用いたコンクリートの中性化に対する抵抗性は、十分な信頼性を有する試験等の結果に基づいて検討することとする。
- (2) 混和材を用いたコンクリートのうち、水結合材比40%以下で表-1.1に示す結合材の組合せを用いた場合は、かぶりの最小値を35mm以上とすることで、中性化に対する抵抗性の検討を省略してよい。

#### 【解説】

##### (1)について

プレストレストコンクリート部材において中性化の進行が顕著にみられた事例はほとんどないが、混和材を用いたコンクリートでは中性化の進行速度が早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して速くなる可能性があるため、十分な信頼性を有する試験等の結果に基づいて中性化に対する抵抗性を検討する必要がある。中性化に対する抵抗性の検討は、中性化の進行速度が混和材の種類や置換率、環境条件等の影

響を受けることから、実環境での暴露試験を行って確認することが望ましいが、暴露試験の実施が困難な場合には、コンクリート標準示方書に示される式(3.1)を用いて中性化速度係数を求め、中性化に対する抵抗性の検討を行ってよい。表-1.1 に示す結合材の組合せを用いたコンクリートの場合、式(3.1)から得られた中性化速度係数の推定値は、暴露試験の結果から得られた中性化速度係数を安全側に評価することが確認されている (図-3.1)。

$$\alpha = -3.57 + 9.0(W/B') \quad (3.1)$$

$$B' = C + k \cdot A_d \quad (3.2)$$

ここに、 $\alpha$  : 中性化速度係数 (mm/√年),  $W/B'$  : 有効水結合材比,  $C$  : 単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>),  $k$  : 混和材の種類によって定まる定数 (高炉スラグ微粉末 :  $k=0.7$ , フライアッシュ :  $k=0$ ),  $A_d$  : 単位混和材量 (kg/m<sup>3</sup>) である。

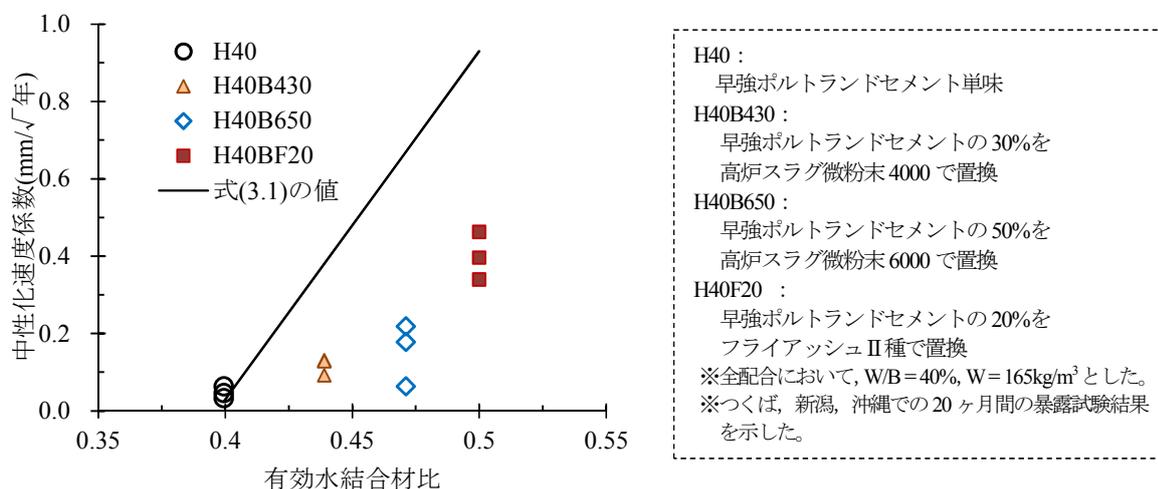


図-3.1 有効水結合材比と中性化速度係数

## (2)について

水結合材比が40%以下で、表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合には、かぶりの最小値を35mm以上とすることで、中性化に対して十分な抵抗性を有するとみなし、中性化に対する抵抗性の検討を省略してよいこととした。

表-1.1 に示す結合材の組合せで水結合材比を40%としたコンクリートを屋外に20ヶ月間暴露し、中性化深さを測定した。この結果、混和材を用いたコンクリートの中性化深さは早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも大きくなったが、コンクリートの中性化が材齢の平方根に比例して進行すると仮定して求めた100年後の中性化深さは最大でも5mm以下となり、道路橋示方書のかぶりの最小値である35mmよりも小さくなることが確認されている (図-3.2)。

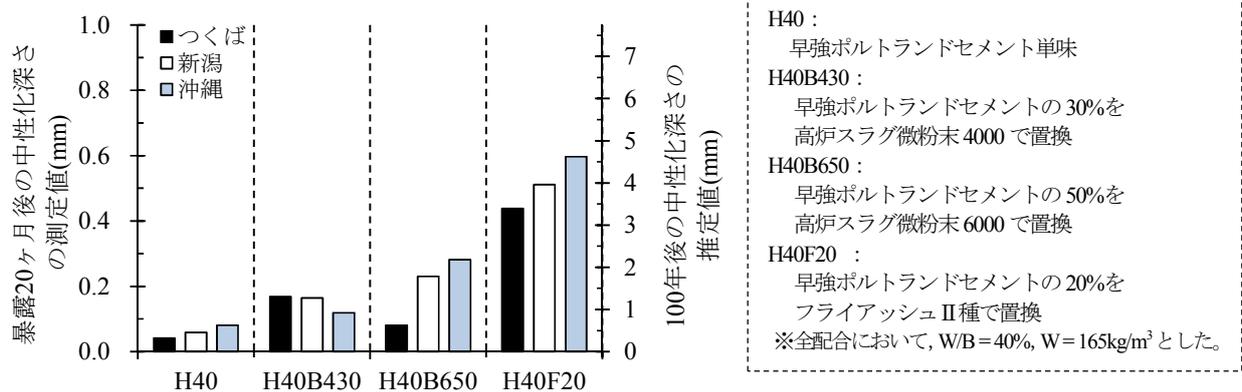


図-3.2 混和材を用いたコンクリートの中性化深さ（暴露試験）

### 3.3 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

- (1) 混和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、十分な信頼性を有する試験等の結果に基づいて検討することとする。
- (2) 混和材を用いたコンクリートのうち、水結合材比40%以下で表-1.1に示す結合材の組合せを用いた場合は、かぶりの最小値を表-3.1に示す値以上とする等の対策を行うことで、塩化物イオン浸透に対して十分な抵抗性を有するものとみなしてよい。

表-3.1 塩害の影響度合いと混和材を用いたコンクリートのかぶりの最小値

塩害の影響度合い	影響が激しい		影響を受ける	
	S	I	II	III
かぶりの最小値 (mm)	70	70	50	35

※塩害対策区分は道路橋示方書を参照。

※塩害対策区分Sについては、塗装鉄筋の使用またはコンクリート塗装を併用。

#### 【解説】

##### (1)について

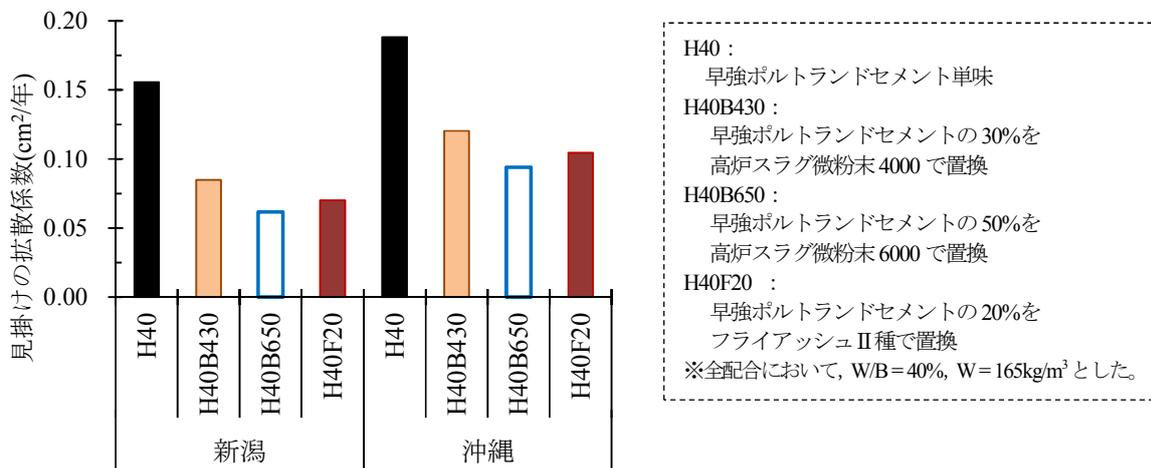
混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して向上するが、混和材の種類や置換率によって傾向が異なるため、十分な信頼性を有する試験等の結果に基づいて塩化物イオン浸透に対する抵抗性を検討する必要がある。塩化物イオンの供給量が地理条件によって大幅に異なること等を勘案し、実環境での暴露試験を行って塩化物イオン浸透に対する抵抗性を検討することが望ましいが、暴露試験の実施が困難な場合には、浸せき試験（JSCE-G 572）の結果に基づいて検討を行ってよい。暴露試験と浸せき試験のいずれの結果においても、混和材を用いたコンクリー

トの見掛けの拡散係数は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも小さくなることが確認されている（第Ⅲ部付録—3 参照）。

**(2)について**

水結合材比が40%以下で、表—1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合には、かぶりの最小値を表—3.1 に示す値以上とする等の対策を行うことで塩化物イオン浸透に対して十分な抵抗性を有するものとみなしてよいこととした。

表—1.1 に示す結合材の組合せで水結合材比を40%としたコンクリートを新潟と沖縄の沿岸部に20ヶ月間暴露し、塩化物イオン濃度を測定して見掛けの拡散係数を算出した。この結果、混和材を用いたコンクリートの見掛けの拡散係数は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも小さくなることが確認されている（図—3.3）。



図—3.3 混和材を用いたコンクリートの見掛けの拡散係数（暴露試験）

図—3.3 の見掛けの拡散係数に基づき、コンクリート表面から70mmの位置で100年後の塩化物イオン濃度を推定した結果、混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン濃度は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの45~60%になった（図—3.4）。また、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの暴露試験結果に基づく計算式<sup>1)</sup>と暴露試験から得られた見掛けの拡散係数を比較した結果、混和材を用いたコンクリートの見掛けの拡散係数は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの計算値よりも小さくなった（図—3.5）。このように、混和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、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも向上することが確認されている。ただし、現時点では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の鋼材腐食発生限界濃度が明確でないこと、長期的な暴露試験の結果が十分に蓄積されていないこと等を勘案し、かぶりの最小値については表—3.1 に示す道路橋示方書の規定値に準拠することとした。

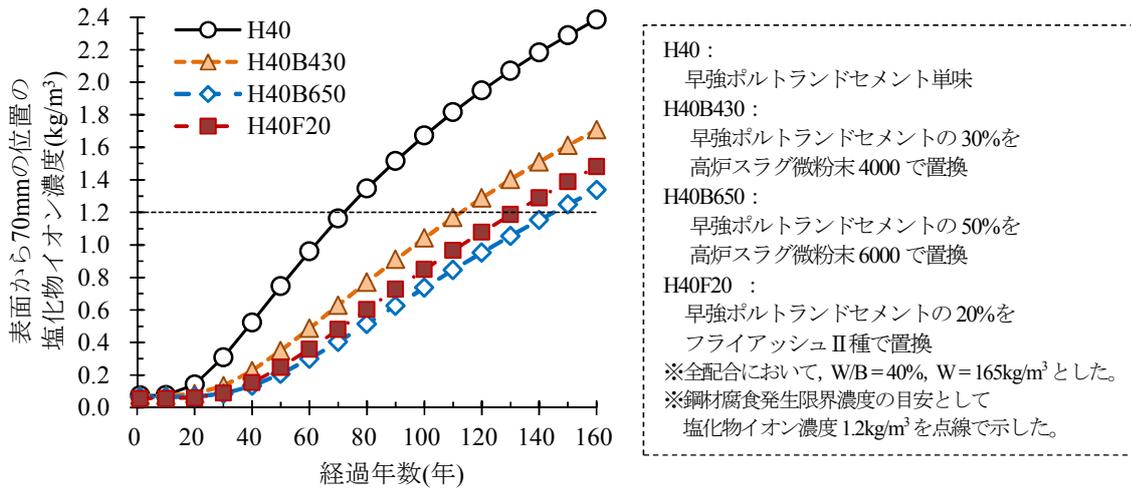


図-3.4 混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン濃度の推定結果

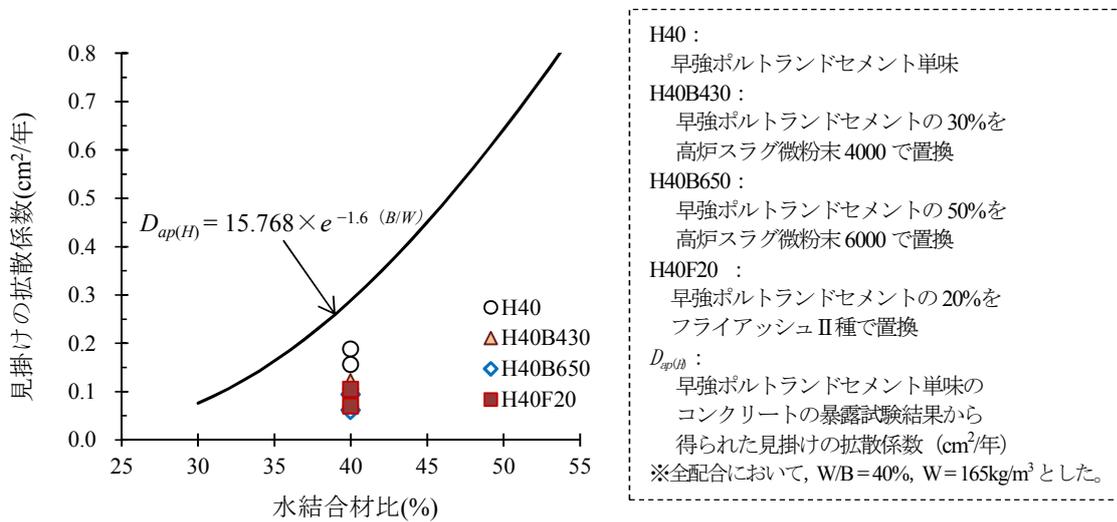


図-3.5 水結合材比と見掛けの拡散係数

### 3.4 凍結融解に対する抵抗性

- (1) 混和材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性は、十分な信頼性を有する試験等の結果に基づいて検討することとする。
- (2) 混和材を用いたコンクリートのうち、水結合材比40%以下で表-1.1に示す結合材の組合せを用いた場合は、空気量4.5%のAEコンクリートとすることで、凍結融解に対する抵抗性の検討を省略してよい。

#### 【解説】

#### (1)について

混和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、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等の凍結融解に対する抵抗性を確保できることが多いが、混和材

の種類や置換率によって凍結融解に対する抵抗性の傾向が異なる場合があるため、凍結融解試験（JIS A 1148 の A 法）等の結果に基づいて凍結融解に対する抵抗性を検討する必要がある。

**(2)について**

水結合材比が 40%以下で、表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合には、化学混和剤の使用によって空気量を 4.5%とすることで、凍結融解に対する抵抗性の検討を省略してよいこととした。

表-1.1 に示す結合材の組合せで水結合材比を 40%とし、空気量の目標値を 4.0~4.5%としたコンクリートの凍結融解試験（JIS A 1148 の A 法）を実施した。この結果、混和材を用いたコンクリートの相対動弾性係数の低下はみられず、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等の凍結融解に対する抵抗性を有することが確認されている（図-3.6）。

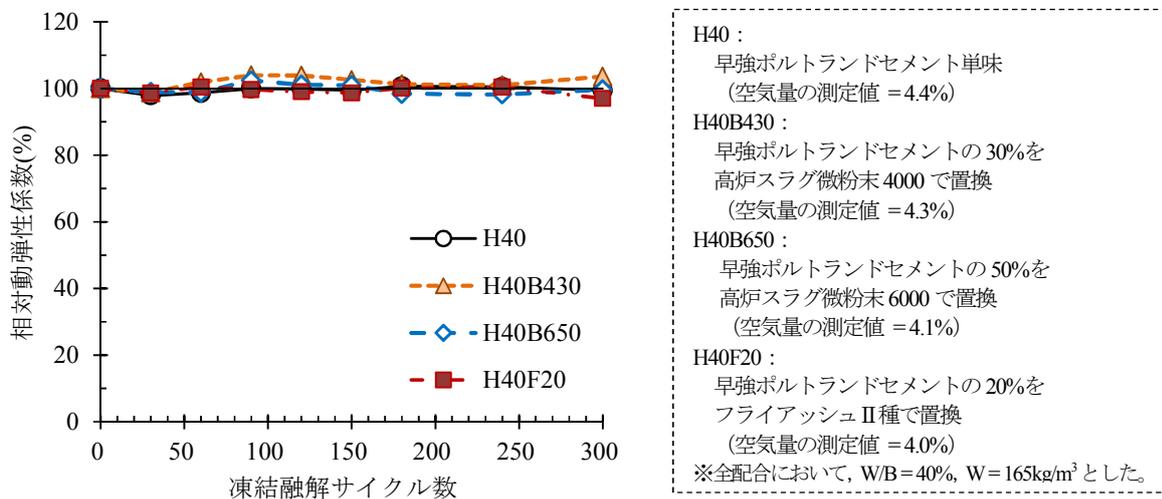


図-3.6 混和材を用いたコンクリートの相対動弾性係数（凍結融解試験）

**参考文献**

- 1) 国土交通省土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(Ⅲ)－PC 橋の塩害対策に関する検討－，共同研究報告書第 270 号，pp.9-47，2001

## 4章 温度ひび割れ抵抗性の検討

### 4.1 一般

混和材を用いたプレストレストコンクリート橋において温度ひび割れの発生が懸念される場合には、実績による評価または温度応力解析による評価のいずれかの方法によって温度ひび割れに対する抵抗性を検討することとする。

#### 【解説】

混和材を用いたコンクリートは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、結合材の硬化過程における発熱や自己収縮による体積変化の傾向が異なるため、必要に応じて温度ひび割れに対する抵抗性を検討する必要がある。

温度ひび割れ抵抗性の検討方法には、既往の実績による評価と温度応力解析による評価の2つの方法がある。例えば、プレキャスト部材のように同一の工場と同種の形状のものが数多く製作される場合には、既往の実績に基づいて温度ひび割れの発生の有無を判断できる。また、蒸気養生中の温度管理や追加養生等のひび割れ抑制対策の効果も同様に既往の実績に基づいて判断できる。実績による評価が難しい現場打ちのプレストレストコンクリート橋等で温度応力解析によって検討を行う場合には、解析の精度向上を図るために、工事に用いるコンクリートの物性値を定めることが望ましい。実測値を用いない場合には、信頼できるデータに基づいてコンクリートの物性値を定めてよい。

### 4.2 温度応力解析による検討方法

- (1) 温度応力解析による検討は、温度解析によって算定される初期状態からの温度変化と自己収縮によるコンクリートの体積変化を求め、これらを取り入れた応力解析によって算定されたコンクリートの応力に基づいて行うものとする。
- (2) 温度ひび割れに対する抵抗性の検討は、ひび割れ発生確率の限界値から定められるひび割れ指数を用いて行うものとする。

#### 【解説】

##### (1)について

温度解析、応力解析の具体的な方法は、コンクリート標準示方書に従うものとする。温度応力解析に用いるコンクリート物性値は4.3節に示すものを用いるものとする。

##### (2)について

温度ひび割れに対する抵抗性の検討は、ひび割れ発生確率の限界値から定められるひび割れ指数を用いて

行うこととした。ひび割れ指数は、コンクリート供試体の引張強度と構造物中の最大主引張応力度の比として式(4.1)のように定義される。

$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma(t) \geq \gamma_{cr} \tag{4.1}$$

ここに、 $I_{cr}(t)$  : ひび割れ指数、 $f_{tk}(t)$  : 材齢 $t$ 日におけるコンクリート引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma(t)$  : 材齢 $t$ 日におけるコンクリート最大主引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\gamma_{cr}$  : ひび割れ発生確率に関する安全係数である。

ひび割れに対する対策レベルに応じて表-4.1 に示すコンクリート標準示方書に準じたひび割れ発生確率と安全係数を目標値として定める。ひび割れの発生が予測される場合は補強鉄筋を配置するのが望ましい。表-1.1 に示す結合材の組合せを用いたコンクリートの温度ひび割れに対する抵抗性の試験を実施した結果、ひび割れ指数とひび割れ発生状況が概ね対応することが確認されている (第Ⅲ部付録-5 参照)。

表-4.1 ひび割れ発生確率と安全係数 ( $\gamma_{cr}$ )

対策レベル	ひび割れ発生確率 (%)	安全係数
ひび割れを防止したい場合	5	1.85 以上
ひび割れの発生をできる限り制限したい場合	15	1.40 以上
ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合	50	1.0 以上

#### 4.3 温度応力解析に用いるコンクリートの物性値

- (1) コンクリートの熱物性は、使用材料や配合に基づいて定めるものとする。
- (2) コンクリートの引張強度は、供試体を用いた割裂引張強度試験によって定めるものとする。
- (3) コンクリートの有効ヤング係数は、材齢や乾燥状態等の影響を考慮して定めるものとする。
- (4) コンクリートの断熱温度上昇特性は、コンクリートの構成材料、配合、打込み温度等を考慮して定めるものとする。
- (5) 自己収縮が無視できない場合は、水和発熱による体積変化と自己収縮の両者を考慮して応力を算定することとする。自己収縮ひずみは、試験あるいは適用範囲と精度が検証されている推定式を用いて定めるものとする。
- (6) 膨張コンクリートの膨張ひずみは、温度依存性や養生方法等を考慮して定めるものとする。

#### 【解説】

##### (1)について

混和材を用いたコンクリートの熱物性は、骨材に用いられる岩石の種類、結合材の種類、材齢等の影響を受ける。表-1.1 に示す結合材の組合せを用いたコンクリートの熱膨張係数は、早強ポルトランドセメント

単味のコンクリートと同程度であることが確認されているため(第Ⅲ部付録-4, 5 参照),  $10\sim 12(\times 10^6/^\circ\text{C})$  を標準としてよい。また, 骨材に用いる岩石の種類の影響を考慮する必要がある場合には, 文献1)を参考として, コンクリートの熱物性を定めてよい。

## (2)について

温度応力解析に用いるコンクリートの引張強度には, 供試体から得られる割裂引張強度 (JIS A 1113) を用いることとする。供試体の引張強度の発現は, 表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合, 圧縮強度から式(4.2)を用いて求めてよい (第Ⅲ部付録-4 参照)。

$$f_{tk}(t') = c_1 f'_c(t')^{c_2} \quad (4.2)$$

ここに,  $f_{tk}(t')$ : 有効材齢  $t'$  日におけるコンクリートの引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $f'_c(t')$ : 有効材齢  $t'$  日におけるコンクリートの圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $c_1, c_2$ : 養生方法等によって定まる定数で,  $c_1 = 0.13, c_2 = 0.85$  を標準とする。

有効材齢  $t'$  (日) は, 温度の影響を等価な材齢として評価する式(4.3)を用いて求めてよい。

$$t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (4.3)$$

ここに,  $T$ : 温度 ( $^\circ\text{C}$ ),  $\Delta t_i$ : 温度が  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) である期間の日数 (日),  $T_0$ :  $1$  ( $^\circ\text{C}$ ) である。

圧縮強度は, 有効材齢を用い, 式(4.4)を用いて求めてよい。

$$f'_c(t') = \frac{t' - S_f}{a + b(t' - S_f)} f'_c(i) \quad (4.4)$$

ここに,  $f'_c(i)$ : 基準材齢  $i$  日におけるコンクリートの圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $i$ : 設計基準強度の基準材齢 (日),  $a, b$ : 結合材の組合せ及び基準材齢に応じた定数,  $S_f$ : 結合材の組合せに応じた硬化原点に対応する有効材齢 (日) である。

基準材齢  $i$  日におけるコンクリートの圧縮強度, 定数  $a, b$  及び  $S_f$  は, 表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合, 表-4.2, 4.3 の値を用いて求めてよい。

表-1.1 に示す結合材の組合せを用いたコンクリートの圧縮強度の発現は, コンクリート標準示方書に示される早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの評価式に基づいて, 強度発現特性に関する混和材の寄与率を加味した修正評価式 (式(4.4), 表-4.2, 4.3) によって推定できることが確認されている (第Ⅲ部付録-4 参照)。

表-4.2 混和材を用いたコンクリートの圧縮強度の推定式

結合材の組合せ	基準材齢 <i>i</i> (日)	$f'_c(i) = p_1 + p_2(B_s/W)$		$B_s = C + k_s SCM$
		$p_1$	$p_2$	$k_s$
早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換	28	-14.9	30.9	0.40
早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換				0.63
早強ポルトランドセメントの20%をフライアッシュII種で置換				0.17

※ $C$ : 単位セメント量 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $B_s$ : 強度発現特性に関する混和材の寄与率を加味した単位結合材量 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $250 \leq B_s \leq 600 \text{kg/m}^3$ ,  $SCM$ : 単位混和材量 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $k_s$ : 強度発現特性に関する混和材の寄与率

表-4.3 混和材を用いたコンクリートの圧縮強度発現式の各定数

結合材の組合せ	$a = \alpha_1 + \beta_1(B_s/W)$		$b = \alpha_2 + \beta_2(B_s/W)$		$S_f$ (日)
	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$	
早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換	4.39	-1.19	0.841	0.0428	0.30
早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換					
早強ポルトランドセメントの20%をフライアッシュII種で置換					

※ $B_s$ : 強度発現特性に関する混和材の寄与率を加味した単位結合材量 ( $\text{kg/m}^3$ ) で、表-4.2による。

### (3)について

温度応力解析に用いるコンクリートの有効ヤング係数を試験によらないで簡便に求める場合には、式(4.5)を用いて求めてよい。

表-1.1 に示す結合材の組合せを用いたコンクリートの鉄筋拘束試験を実施した結果、コンクリートの各物性値の試験値と式(4.5)の有効ヤング係数を用いて得られた自己収縮応力と温度応力の推定値は実測値と概ね合致することが確認されている (第III部付録-5 参照)。

$$E_c(t') = \varphi_e(t') \times 6.3 \times 10^3 f'_c(t')^{0.45} \quad (4.5)$$

ここに、 $E_c(t')$ : 有効材齢  $t'$  日における有効ヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $f'_c(t')$ : 式(4.4)による有効材齢  $t'$  日の圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $\varphi_e(t')$ : クリープの影響を考慮するためのヤング係数の低減係数である。

最高温度に達する有効材齢まで:  $\varphi_e(t') = 0.42$

最高温度に達する有効材齢+1 (日) 以降:  $\varphi_e(t') = 0.65$

最高温度に達する有効材齢+1 (日) までは直線補間する。

**(4)について**

混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇特性は、セメントと混和材の種類や置換率、配合等、様々な要因で変化する。このため、実際に用いるコンクリートと同材料、同配合の断熱温度上昇特性の試験値や実績をもとに定める必要がある。

混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇量は、表-1.1に示す結合材の組合せを用いた場合、表-4.4の断熱温度上昇特性の値から、式(4.6)を用いて求めてよい（第Ⅲ部付録-4 参照）。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \tag{4.6}$$

ここに、 $Q(t)$ ：材齢 $t$ 日における断熱温度上昇量（℃）、 $Q_{\infty}$ ：終局断熱温度上昇量（℃）、 $r$ ：温度上昇速度に関する定数でいずれも実験によって定まる定数、 $t$ ：材齢（日）である。

表-4.4 混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇特性 $Q_{\infty}$ 、 $r$ の値

結合材の組合せ	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$		
	$Q_{\infty} = a + b \times T_a$	$r = g + h \times T_a$	$B_T = C + k_T SCM$
早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換	$a = 15.9 + 0.135B_T$ $b = -0.106 + 0.0000257B_T$	$g = -0.601 + 0.0031B_T$ $h = 0.0989 + 0.0000688B_T$	$k_T = 0.8 \sim 1.0$
早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換			$k_T = 0.9 \sim 1.0$
早強ポルトランドセメントの20%をフライアッシュⅡ種で置換			$k_T = 0.9 \sim 1.0$

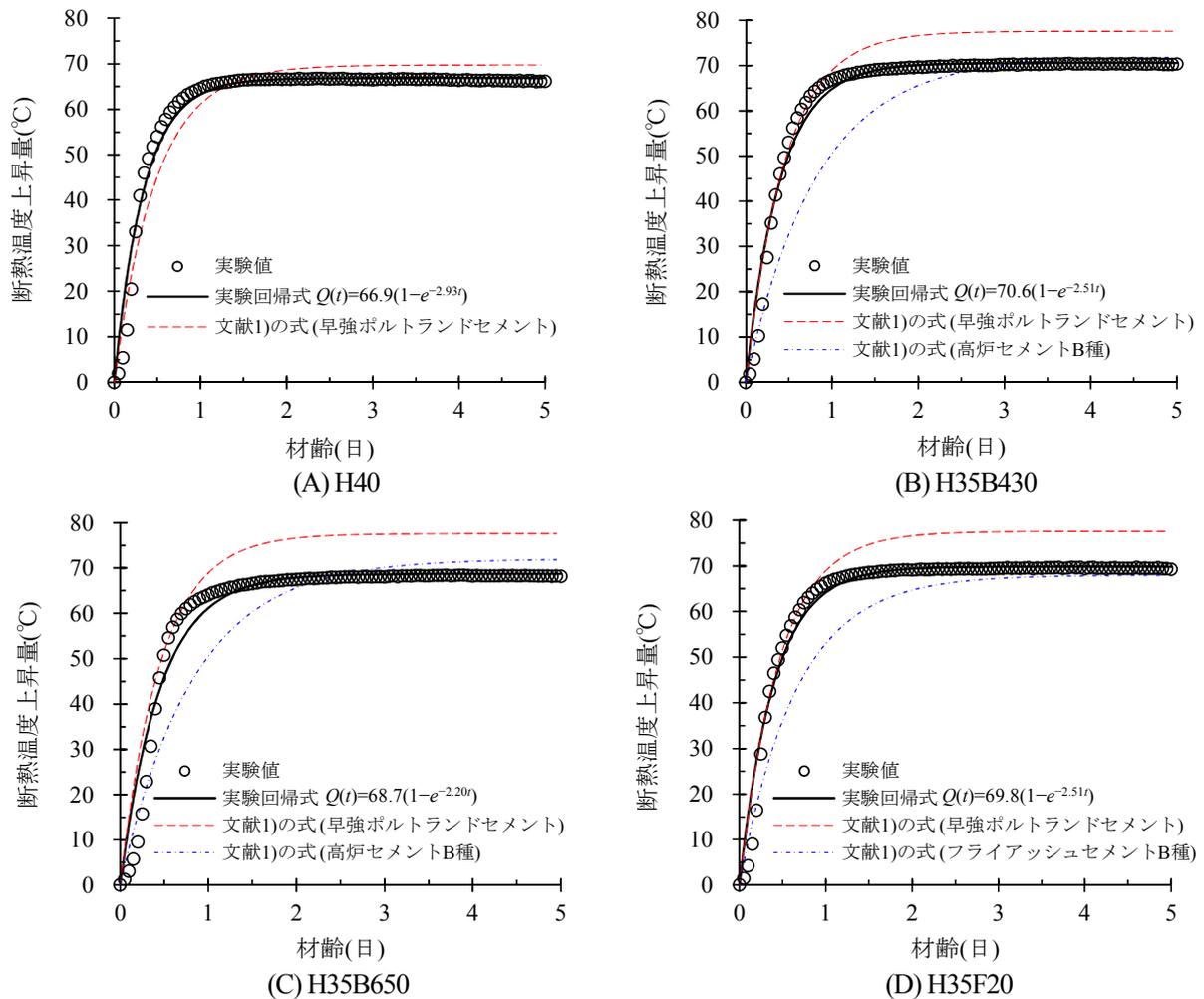
※ $Q_{\infty}$ ：終局断熱温度上昇量（℃）、 $T_a$ ：打込み時の温度（℃）、 $C$ ：単位セメント量（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $250 \leq C \leq 400 \text{kg}/\text{m}^3$ 、 $B_T$ ：断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率を加味した単位結合材量（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $250 \leq B_T \leq 600 \text{kg}/\text{m}^3$ 、 $SCM$ ：単位混和材量（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $k_T$ ：断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率

ただし、表-4.4に示した混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇特性（ $Q_{\infty}$ 、 $r$ ）の値は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの断熱温度上昇特性に近似しており（図-4.1）、安全側の検討としては断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率 $k_T$ を1.0とすることが望ましい。

また、単位セメント量が $400 \text{kg}/\text{m}^3$ を超える場合では、終局断熱温度上昇量は単位セメント量の一次式で推定される値よりも小さくなるとの指摘がある<sup>2)</sup>。このため、式(4.6)の $Q_{\infty}$ については、文献2)に示される早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの終局断熱温度上昇量に関する試験結果から得られた単位セメント量の累乗式を断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率を加味して改良した式(4.7)を用いて求めてよい。この際、温度上昇速度に関する定数 $r$ については、表-4.4を用いて求めてよい。混和材の寄与率 $k_T$ を1.0として式(4.7)から得られた $Q_{\infty}$ の値（72.1℃）は、図-4.1に示す実験回帰式の $Q_{\infty}$ の値（68.7～70.6℃）よりも若干高くなることが確認されている（第Ⅲ部付録-4参照）。

$$Q_{\infty} = 1.49B_T^{0.63} \quad (4.7)$$

ここに、 $B_T$  : 断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率を加味した単位結合材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) である (表-4.4)。



H40 : 早強ポルトランドセメント単味 (W/B=40%, W=165 $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 H35B430 : 早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換 (W/B=35%, W=165 $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 H35B650 : 早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換 (W/B=35%, W=165 $\text{kg}/\text{m}^3$ )  
 H35F20 : 早強ポルトランドセメントの20%をフライアッシュII種で置換 (W/B=35%, W=165 $\text{kg}/\text{m}^3$ )

図-4.1 混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇試験結果 (練上がり温度20°Cの例)

### (5)について

自己収縮ひずみは、水結合材比、セメントの種類、混和材の種類や置換率、温度等の影響を受ける。特に、プレストレストコンクリート橋に用いるコンクリートは水結合材比が小さくなる傾向にあり、混和材の使用方法によっては、水和発熱に伴う温度ひずみに対して無視できない自己収縮ひずみを生じる場合がある。一方、養生方法によっても自己収縮ひずみは影響を受けるため、施工条件に応じて試験あるいは推定式のいずれかの方法によって自己収縮ひずみを考慮する必要がある。

自己収縮ひずみの推定値は、表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合、式(4.8)~(4.12)及び表-4.5 を用いて求めてよい。表-1.1 に示す結合材の組合せを用いたコンクリートの自己収縮試験を実施した結果、自己収縮ひずみの測定値と式(4.8)~(4.12)による推定値は概ね一致したことが確認されている（第Ⅲ部付録-4 参照）。ただし、これらの自己収縮ひずみの推定式の適用範囲は、 $35 \leq W/B \leq 55\%$ 、 $20 \leq T_{max} \leq 90^\circ\text{C}$ とする。

$$\varepsilon_{ag} = -\beta \varepsilon'_{as\infty} \left[ 1 - \exp\left\{-a(t'-t_s)^b\right\} \right] \quad (4.8)$$

$$\varepsilon'_{as\infty} = c_1 \exp\left\{c_2 \left(\frac{W}{B}\right)\right\} + \varepsilon'_{asT} \quad (4.9)$$

$$\varepsilon'_{asT} = \varepsilon'_{asT\infty} \left[ 1 - \exp\left\{-1.2 \times 10^6 (T_{max} - 20)\right\} \right] \quad (4.10)$$

$$a = 3.7 \times \exp\left\{-6.8 \left(\frac{W}{B}\right)\right\} (0.030 T_{max} + 0.40) \quad (4.11)$$

$$b = 0.25 \times \exp\left\{2.5 \left(\frac{W}{B}\right)\right\} (0.0025 T_{max} + 0.95) \quad (4.12)$$

ここに、 $\varepsilon_{ag}$ ：自己収縮ひずみの推定値（ $\times 10^{-6}$ ）、 $\varepsilon'_{as\infty}$ ：自己収縮ひずみの最終値（ $\times 10^{-6}$ ）、 $\beta$ ：配合補正係数（表-4.5）、 $t'$ ：有効材齢（日）、 $t_s$ ：凝結の始発（表-4.5）、 $\varepsilon'_{asT\infty}$ ：高温履歴による自己収縮ひずみの増加量の最終値（ $\times 10^{-6}$ ）（表-4.5）、 $c_1$ 、 $c_2$ ：係数（表-4.5）、 $W$ ：単位水量（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $B$ ：単位結合材量（ $\text{kg}/\text{m}^3$ ）、 $\varepsilon'_{asT}$ ：高温履歴による自己収縮ひずみの増加量（ $\times 10^{-6}$ ）、 $T_{max}$ ：温度解析によって求めるコンクリートの最高温度（ $^\circ\text{C}$ ）、 $a$ 、 $b$ ：自己収縮の進行特性を表す係数である。

表-4.5 混和材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみ推定式における各係数

結合材の組合せ	式(4.8)の係数	式(4.9)の係数	式(4.10)の係数
早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換	$\beta = 1.0$ $t_s = 0.2$	$c_1 = 2350$	$\varepsilon'_{asT\infty} = 80$
早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換		$c_2 = -5.8$	
早強ポルトランドセメントの20%をフライアッシュⅡ種で置換	$\beta = 1.2$ $t_s = 0.2$	$c_1 = 3070$ $c_2 = -7.2$	$\varepsilon'_{asT\infty} = 50$

## (6)について

設計値として用いる膨張コンクリートの膨張ひずみは、拘束条件下において得られたものとする。試験によって膨張ひずみを求める場合は、温度履歴を与えた封緘養生の供試体を用いて標準的な拘束膨張試験（JIS A 6202 附属書2）によって求めるか、JIS A 6202 附属書2に準拠して標準養生を行った供試体のひずみと温度履歴を与えた膨張材を用いない供試体の自己収縮ひずみを重ね合わせて求めるのがよい。

膨張ひずみは、標準的な使用量  $20\text{kg}/\text{m}^3$  の膨張材を用いる場合、式(4.13)を用いて求めてよい。式(4.13)を用いて求めた膨張ひずみは、式(4.8)~(4.12)の自己収縮ひずみの推定式と重ね合わせて求めてよい。

$$\varepsilon_{ex}(t') = \varepsilon_{ex,\infty} \left[ 1 - \exp\left\{-a_{ex}(t' - t_{ex,0})^{b_{ex}}\right\} \right] \quad (4.13)$$

ここに、 $\varepsilon_{ex}(t')$ ：有効材齢 $t'$ 日における膨張ひずみ（ $\times 10^{-6}$ ）、 $\varepsilon_{ex,\infty}$ ：膨張ひずみの終局値（ $\times 10^{-6}$ ）（ $\varepsilon_{ex,\infty} = 165$ ）、 $a_{ex}$ 、 $b_{ex}$ ：膨張ひずみの進行特性に及ぼす影響を表す係数（ $a_{ex} = 1.45$ 、 $b_{ex} = 1.38$ ）、 $t_{ex,0}$ ：膨張開始時点の有効材齢（日）（ $t_{ex,\infty} = 0.20$ ）である。

膨張材を用いた場合の温度応力低減効果の評価方法の妥当性は、高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートに標準的な使用量  $20\text{kg/m}^3$  の膨張材を併用した試験によって確認されている（第Ⅲ部付録－5 参照）。なお、膨張材を用いたコンクリートの圧縮強度の発現、引張強度及びヤング係数は、水結合材比の等しい膨張材を用いないコンクリートと同一としてよい（第Ⅲ部付録－5 参照）。

#### 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, pp.48-50, 2008
- 2) 国土交通省土木研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法の開発に関する共同研究報告書－現場打ち高強度コンクリート施工マニュアル（案）－, 共同研究報告書第 266 号, pp.119-122, 2001

## 5章 施工

### 5.1 一般

混和材を用いたプレストレストコンクリート橋におけるコンクリートの施工は、構造物が所要の性能を有するよう、あらかじめ適切な施工計画を立案して実施するものとする。

#### 【解説】

混和材を用いたコンクリートのワーカビリティや強度発現特性は、混和材の種類及び置換率によって異なる。このため、混和材を用いたプレストレストコンクリート橋におけるコンクリートの施工は、構造物が所要の特性を有するよう、事前の試験等に基づき、あらかじめ適切な施工計画を立案して実施する必要がある。

### 5.2 材料

- (1) 材料は、品質の確かめられたものでなければならない。
- (2) JIS 及び土木学会基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。
- (3) セメントは、JIS R 5210 に適合したもののうち、早強ポルトランドセメントを標準とする。
- (4) 高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206 に適合したもののうち、高炉スラグ微粉末 4000 あるいは高炉スラグ微粉末 6000 を標準とする。
- (5) 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 II 種を標準とする。
- (6) 化学混和剤は、JIS A 6204 に適合したものを標準とする。
- (7) 細骨材及び粗骨材は、所要の品質を有するものでなければならない。
- (8) (3)～(7)以外の材料については、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】

#### (3)、(4)及び(5)について

プレストレストコンクリート橋の施工においては、比較的初期の材齢でプレストレス力を導入することが多く、早期の強度発現が求められるため、早強ポルトランドセメントが多用される。このマニュアル（案）では、過去の施工実績及び強度発現特性を考慮し、表-1.1 に示すようにセメントとして早強ポルトランドセメント、混和材として高炉スラグ微粉末 4000、高炉スラグ微粉末 6000、フライアッシュ II 種を用いることを標準とした。その他のセメント及び混和材を用いる場合には、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する必要がある。

高炉スラグ微粉末に含まれる三酸化硫黄 (SO<sub>3</sub>) について、JIS A 6206 では4.0%以下に規定されている。

高炉スラグ微粉末の原料である高炉水砕スラグの三酸化硫黄含有率は0.3%程度以下であるため、これを超える分の三酸化硫黄はせつこうの添加によるものである。せつこうの添加は凝結や水和反応に影響を与えるため、コンクリートに求められる品質や使用する高炉スラグ微粉末の組合せによっては、せつこうを高炉スラグ微粉末とは別に添加する必要がある場合もある。市販の高炉スラグ微粉末には、せつこうを添加しているものと添加していないものがあるため、試験成績表に示される三酸化硫黄の含有率によって、せつこうの添加の有無及びその量を確認しておく必要がある。

#### (6)について

混和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置換率によって大きく異なる場合がある。特に、フライアッシュの品質によっては、未燃カーボンの存在によって空気連行性が低下することが知られている。未燃カーボンは、AE 剤等の化学混和剤を吸着する性質があるため、通常の AE 剤では所定の空気量を確保するための使用量が増加する場合や、空気量の経時変化が大きくなる場合がある。このため、フライアッシュ用の AE 剤や混和材を多量に用いたコンクリートに特化した化学混和剤等が開発されているが、化学混和剤の選定と使用量の調整においては、なるべく実際の施工条件に近い条件で試し練りを行い、フレッシュ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。

#### (7)について

骨材は、清浄、堅硬、耐久性を持ち化学的あるいは物理的に安定し、適切な粒度を持ち、ごみ、どろ、有機不純物、塩化物等を有害量含まないものを使用する。

骨材の化学安定性に関する事項としてアルカリシリカ反応があるが、一般に、混和材を用いたコンクリートは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの反応によって細孔溶液中の水酸化物イオンの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効果が高いとされている。

コンクリート標準示方書では、アルカリシリカ反応対策として、(i)アルカリ総量の抑制、(ii)アルカリシリカ反応抑制効果を持つ混合セメントの使用、(iii)アルカリシリカ反応性試験で「無害」と判定される骨材の使用のうちいずれかを採ることと定めている。混合セメント等を使用する抑制対策では、JIS R 5211 に適合する高炉セメント B 種（スラグ混合率40%以上）または C 種、JIS R 5213 に適合するフライアッシュセメント B 種（フライアッシュ混合率15%以上）または C 種、あるいは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材をポルトランドセメントに混入した結合材でアルカリシリカ反応抑制効果の確認された結合材を使用することとしており、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」においても附属書で同様の方法が規定されている。表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合には、混和材の使用によるアルカリシリカ反応抑制効果が期待できる事例が多くあったが（第Ⅲ部付録-3 参照）、使用する骨材やその他の条件によって効果が異なる可能性もあるため、混和材の使用によるアルカリシリカ反応の抑制効果を期待する場合には、事前の試験等によってその効果を確認しておくことが望ましい。

### 5.3 配合

- (1) 混和材を用いたコンクリートの配合は、作業に適するワーカビリティ、所要の強度、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性及び鋼材を保護する性能をもつ範囲で、単位水量をできるだけ小さくし、かつ、品質のばらつきが小さくなるように定めるものとする。
- (2) 混和材を用いたコンクリートのセメント及び混和材の種類、混和材の置換率並びに水結合材比は、フレッシュコンクリートのワーカビリティを確保し、打込み後のコンクリートが所要の品質を有するように定めるものとする。
- (3) 混和材を用いたコンクリートは、空気量4.5%のAEコンクリートとすることを標準とする。

#### 【解説】

#### (1)について

混和材を用いたコンクリートに求められる品質は、部材の断面形状、寸法、鋼材の配置状況、環境条件及び施工時期、並びに運搬、打込み、締固め等の施工方法によって異なるので、所要の品質を有するようにコンクリートの配合を定める必要がある。

コンクリートの配合とスランプ及び空気量の試験結果の一例を表-5.1に示す。一般に、混和材の使用によってフレッシュコンクリートの流動性は向上し、同程度のスランプを得るために必要な単位水量は減少する。プレストレストコンクリート橋に用いるコンクリートのように比較的水結合材比が小さい範囲で、単位水量及び単位粗骨材絶対容積を一定としても、高性能AE減水剤等の化学混和剤の使用量を調整することで、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同程度のスランプが得られることが確認されている。

表-5.1 コンクリートの配合及び試験結果の一例

水結合材比 <i>W/B</i> (%)	細骨材率 <i>s/a</i> (%)	空気量 (%)	置換率 <i>SCM/B</i> (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						試験結果		
				水 <i>W</i>	結合材 <i>B</i>			細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	スランプ (cm)	空気量 (%)	
					セメント <i>HPC</i>	混和材 <i>SCM</i>						
					<i>BS4</i>	<i>BS6</i>	<i>FA</i>					
40	45.0	4.5	0	165	413	—	—	—	758	968	13.0	5.3
	44.7		30		289	124	—	—	749		12.0	4.4
	44.5		50		206	—	206	—	745		11.5	4.5
	44.2		20		330	—	—	83	734		9.5	4.4

※ *HPC*: 早強ポルトランドセメント (密度 = 3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,580cm<sup>2</sup>/g), *BS4*: 高炉スラグ微粉末 4000 (密度 = 2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,440cm<sup>2</sup>/g), *BS6*: 高炉スラグ微粉末 6000 (密度 = 2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 5,970cm<sup>2</sup>/g), *FA*: フライアッシュ II 種 (密度 = 2.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 3,810cm<sup>2</sup>/g)

※ 化学混和剤: 高性能 AE 減水剤及び AE 剤。ただし、フライアッシュを用いた配合で使用した AE 剤はフライアッシュ用 AE 剤として市販されているもの。

## (2)について

セメント及び混和材の種類、混和材の置換率並びに水結合材比は、混和材を用いたコンクリートの品質に多大な影響を与えるため、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適切に定める必要がある。圧縮強度については、水結合材比が一定の条件では、混和材の置換率を高めると、初期材齢の強度発現が遅くなることが確認されている（図-5.1）。したがって、混和材を用いたコンクリートを適用する際に早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様の工程でプレストレスを導入するためには、プレストレス力の導入に必要な圧縮強度を得るため、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも水結合材比を低減することが必要となる場合がある。

このマニュアル（案）では、プレストレスコンクリート橋の施工実績等（第Ⅲ部付録-1 参照）も参考として、比較的初期の材齢で十分な強度発現を確保できるように、表-1.1 に示す結合材の組合せを標準した。また、現場打ちプレストレスコンクリート橋に多く適用されている設計規準強度  $40\text{N/mm}^2$  のコンクリートとするため、表-1.1 に示す結合材の組合せで、水結合材比を 35~40%としたコンクリートの実験や解析等の結果に基づいて、設計値、耐久性及び温度ひび割れ抵抗性の検討方法を示した。

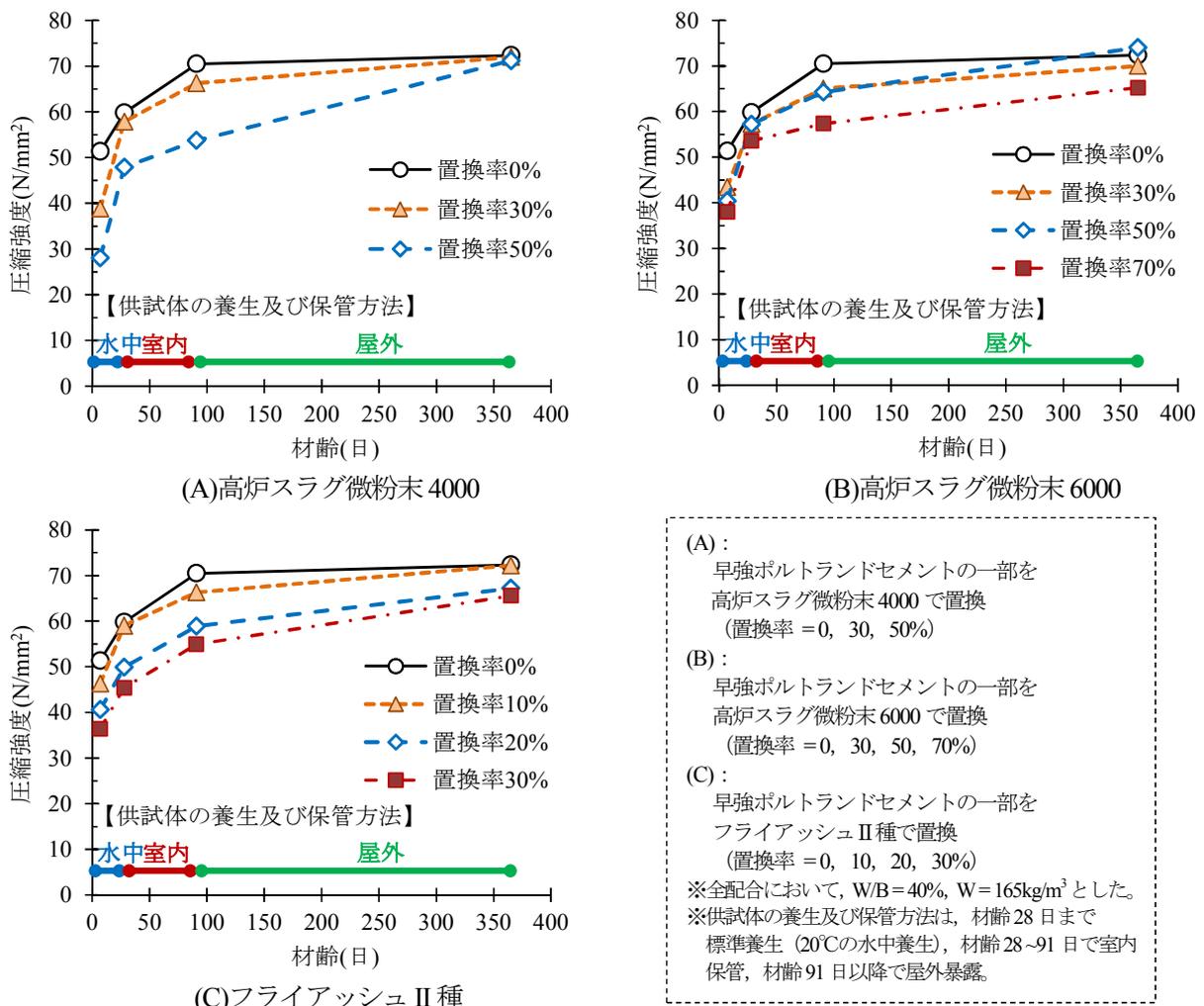


図-5.1 混和材を用いたコンクリートの圧縮強度の発現

### (3)について

このマニュアル（案）では現場打ちのプレストレストコンクリート橋を対象とし、凍結融解に対する抵抗性を確保するため、空気量は4.5%とすることを標準とした。なお、プレキャスト部材（JIS げた）の空気量に関してはJIS A 5373によるものとする。

## 5.4 運搬・打込み・締固め

- (1) 混和材を用いたコンクリートは、練り混ぜた後速やかに運搬し、直ちに打ち込み、十分に締め固めなければならない。練り混ぜてから打ち終わるまでの時間は、原則として、外気温が25℃を超える時で1.5時間、25℃以下の時で2時間を超えないようにするものとする。
- (2) 混和材を用いたコンクリートの打込み時の温度は、原則として、10℃以上とする。

### **【解説】**

#### (1)について

混和材を用いたコンクリートの運搬、打込み及び締固めは、通常のコンクリートと同様に行えばよい。ただし、混和材を用いたコンクリートは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して粘性が高くなる場合があるため、コンクリートの運搬において圧送を行う場合には、圧力損失が大きくなる可能性がある。また、配合や使用材料、温度、運搬条件等の違いが圧送前後でのスランプの低下や経時変化に伴うスランプの低下に与える影響は、混和材を用いることで大きくなる場合がある。このため、混和材を用いたコンクリートを用いる場合は、運搬時のコンクリートの品質の変化に留意する必要がある。

なお、圧送が困難と予想される場合には、試験圧送を行うか、必要に応じて事前に圧送性評価試験を行って閉塞に対する安全性を評価するとよい。

#### (2)について

混和材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の温度の影響を大きく受ける。特に低温環境では強度発現が遅れ、管理材齢での強度を得ることが困難となる場合もある。このマニュアル（案）では、打込み時のコンクリートの温度を原則として10℃以上とした。表-1.1 に示す結合材の組合せで打込み時及び養生中のコンクリートの温度を10℃以上とした場合、強度発現に問題がないことが確認されている（第Ⅲ部付録-4 参照）。また、スラブ、壁等の薄い部材の場合には、打込み時のコンクリートの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の温度が低くなり、長期の強度発現にも悪影響を及ぼすため、寒冷時には運搬中のコンクリートの温度低下にも留意する必要がある。

## 5.5 湿潤養生期間

- (1) 混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間は、所要の強度と耐久性が得られるよう、試験によって定めるものとする。
- (2) 混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間は、表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合、日平均気温が 15°C 以上では 3 日を標準とする。
- (3) 混和材を用いたコンクリートの強度発現は養生温度が低いと早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して遅れることがあるため、原則として、養生温度は 10°C 以上とする。
- (4) コンクリートにひび割れの発生が懸念される場合には、必要に応じて型枠を存置する期間を別途定めることが望ましい。

### 【解説】

#### (1)について

混和材を用いたコンクリートの強度発現と耐久性は、混和材の種類や置換率、湿潤養生期間、養生温度の影響を受けるため、所要の強度と耐久性が得られることを試験によって確認した上で、適切な湿潤養生期間を定める必要がある。

#### (2)について

混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間は試験によって定めることとしたが、混和材を用いたコンクリートを適用する全ての工事において個々に湿潤養生期間を試験によって設定することは難しい。このため、表-1.1 に示す結合材の組合せを用いた場合、日平均気温が 15°C 以上では、湿潤養生期間の標準を 3 日とした。これは、十分な給水養生を行った場合において、コンクリートの強度発現と耐久性に湿潤養生期間が与える影響を検討した室内試験と暴露試験の結果に基づいて定めた湿潤養生期間の標準である。

圧縮強度については、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様に、湿潤養生終了時の圧縮強度が標準養生を行った供試体の材齢 28 日における圧縮強度の 50% 以上となる日数とした (図-5.2)。中性化については、暴露試験の結果から推定した 100 年後の中性化深さが 25mm 以下 (道路橋示方書に示されるかぶりの最小値 35mm からコンクリート標準示方書に示される中性化残り 10mm を差し引いた値以下) となる日数とした (図-5.3)。塩害については、電気泳動試験 (非定常法) による塩化物イオン浸透深さが早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも小さくなる日数、すなわち、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等以上となる日数とした (図-5.4)。凍害については、凍結融解試験による相対動弾性係数が早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等となる日数とした (図-5.5)。

また、このマニュアル (案) では混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間の標準を 3 日としたが、湿潤養生期間の延長は脱型後の強度増加や耐久性の向上に寄与するため、施工の効率性や経済性等に悪影響を及ぼさない範囲で湿潤養生期間を長く設定することが望ましい。給水養生を長期間持続することが難しい場合には、型枠の存置やシートによる被膜等によって水分の逸散を抑制する養生を組み合わせることも混

和材を用いたコンクリートの耐久性を向上させるための一つの方法である。

なお、蒸気養生等の促進養生を行うプレキャスト部材については、試験等によって適切な湿潤養生期間を別途定める必要がある。

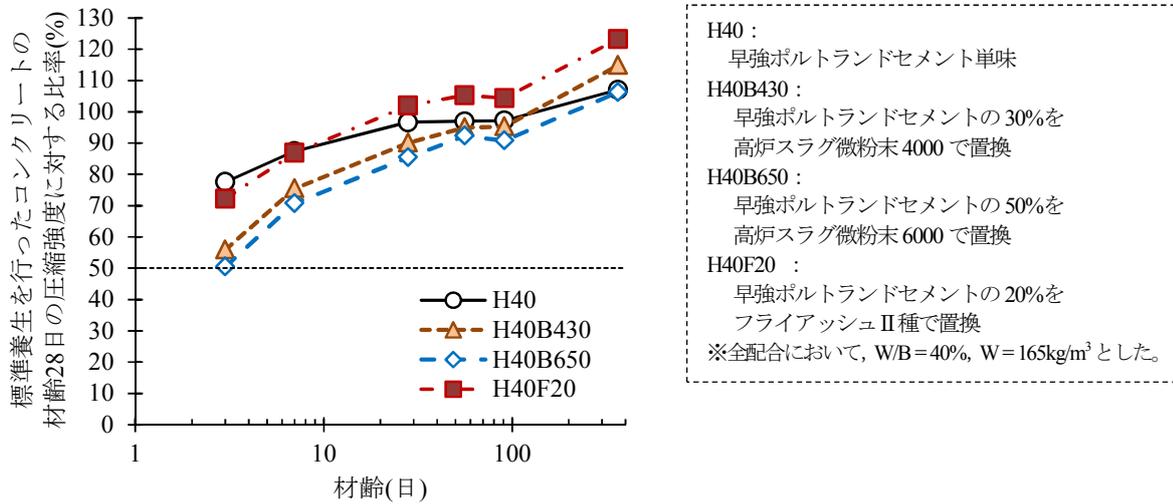


図-5.2 材齢3日まで湿潤養生を行ったコンクリートの圧縮強度の発現

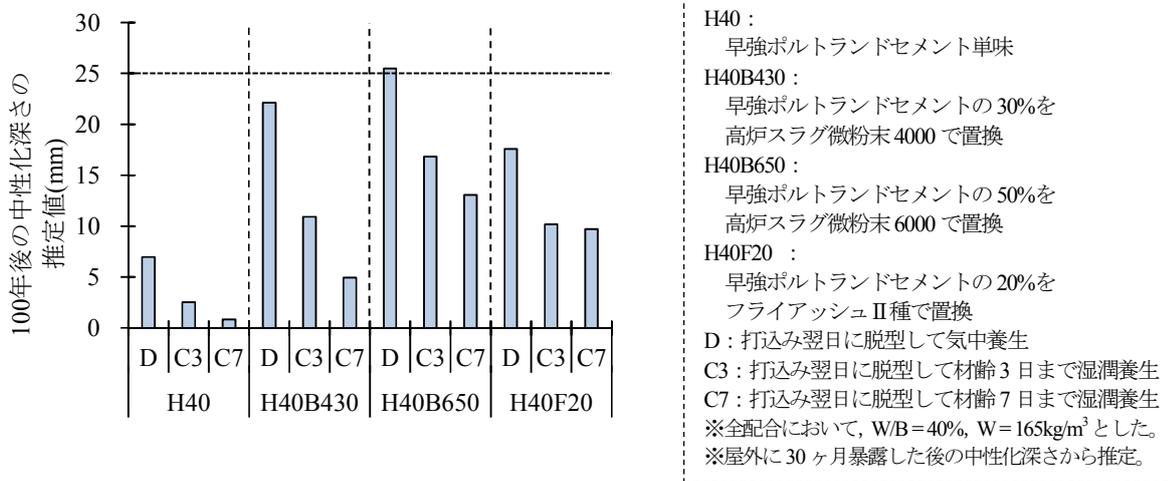
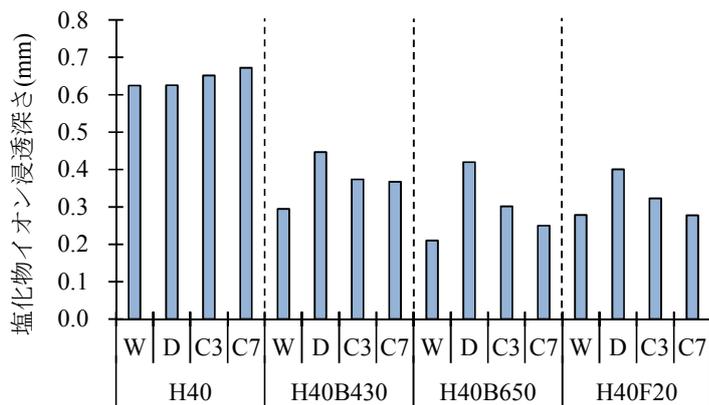


図-5.3 養生条件の異なるコンクリートの100年後の中性化深さの推定値



H40 :  
早強ポルトランドセメント単味

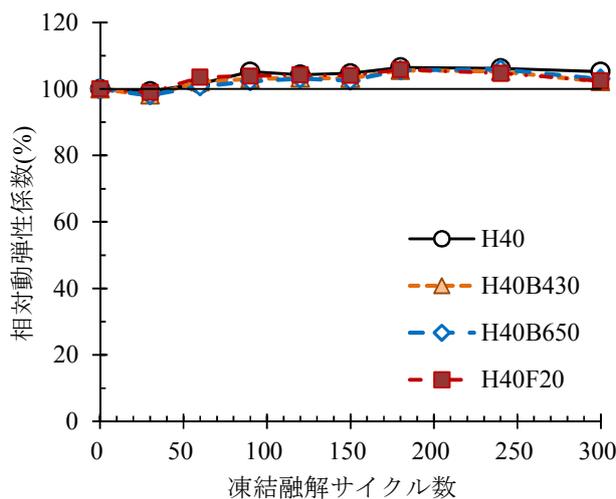
H40B430 :  
早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換

H40B650 :  
早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換

H40F20 :  
早強ポルトランドセメントの20%をフライアッシュⅡ種で置換

W : 標準養生  
D : 打込み翌日に脱型して気中養生  
C3 : 打込み翌日に脱型して材齢3日まで湿潤養生  
C7 : 打込み翌日に脱型して材齢7日まで湿潤養生  
※全配合において、W/B=40%、W=165kg/m<sup>3</sup>とした。  
※屋外に30ヶ月暴露した後に実施。

図-5.4 養生条件の異なるコンクリートの電気泳動試験（非定常法）による塩化物イオン浸透深さ



H40 :  
早強ポルトランドセメント単味  
(空気量の測定値 = 4.4%)

H40B430 :  
早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換  
(空気量の測定値 = 4.3%)

H40B650 :  
早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換  
(空気量の測定値 = 4.1%)

H40F20 :  
早強ポルトランドセメントの20%をフライアッシュⅡ種で置換  
(空気量の測定値 = 4.0%)

※全配合において、W/B=40%、W=165kg/m<sup>3</sup>とした。  
※材齢3日まで湿潤養生を行い、材齢28日まで気中養生を行った後、凍結融解試験を開始。

図-5.5 材齢3日まで湿潤養生を行ったコンクリートの相対動弾性係数（凍結融解試験）

### (3)について

混和材を用いたコンクリートでは、養生温度が低いと早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して強度発現が遅れることがあるため、原則として、養生温度を10℃以上とすることとした。日平均気温が10～15℃では、湿潤養生期間を3日よりも延長することが望ましい。ただし、給熱養生や保温養生によって養生温度を15℃以上とすることができる場合には、湿潤養生期間を3日としてよい。

#### **(4)について**

このマニュアル（案）では混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間の標準を3日としたが、拘束条件や温度履歴等によってコンクリートにひび割れの発生が懸念される場合には、必要に応じて型枠を存置する期間を別途定めることが望ましい。

#### **5.6 プレストレス力を導入する時のコンクリートの強度**

プレストレス力を導入する時のコンクリートの強度は、実際の部材と同様の条件で養生を行った供試体の試験強度に基づいて確認するものとする。

#### **【解説】**

混和材を用いたコンクリートの強度発現は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、打込み後の温度履歴や養生方法の影響を受けるため、プレストレス力を導入する時のコンクリートの強度は実際の部材と同様の条件で養生を行った供試体の試験強度に基づいて確認することとした。

## 6章 二酸化炭素排出削減効果の検討

- (1) 混和材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果は、定量的かつ客観的な方法を用いて評価するものとする。
- (2) 二酸化炭素排出量は、評価の目的に応じて対象項目を設定し、十分な信頼性を有する二酸化炭素排出原単位を用いて算出するものとする。

### 【解説】

#### (1)について

混和材の使用によって得られるプレストレストコンクリート橋の二酸化炭素排出削減効果は、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比較する方法やライフサイクルにおいて発生する二酸化炭素排出量を比較する方法等、定量的かつ客観的な方法を用いて評価する必要がある。

#### (2)について

二酸化炭素排出量を算出する際には、評価の目的に応じて対象項目を設定し、十分な信頼性を有する二酸化炭素排出原単位を用いて算出することとした。対象項目の設定においては、表-6.1を参考にするとよい。

表-6.1 二酸化炭素排出削減効果の評価の対象項目

ステージ	対象項目
建設	仮設資材の運搬 使用材料（コンクリート、PC鋼材、鉄筋等）の製造、運搬 施工機械の運搬、運転
維持補修	舗装修繕時の使用材料の製造、運搬 舗装修繕時の施工機械の運搬、運転
解体・廃棄	解体機械の運搬、運転 コンクリート塊の運搬

プレストレストコンクリート橋のライフサイクルにおいて発生する二酸化炭素排出量は、特にコンクリートに用いる材料の製造時に発生するものの割合が大きい。このため、混和材を用いたコンクリートをプレストレストコンクリート橋に適用する場合に、建設、維持補修及び解体・廃棄の方法が早強ポルトランドセメント単味のコンクリートを適用する場合と同様であれば、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比較することで、混和材の使用による二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価することができる。材料製造時の二酸化炭素排出量については、各材料の使用量に二酸化炭素排出原単位を乗じて算出してよい。

結合材として用いられる材料の二酸化炭素排出原単位の例として、文献1)に示される値を表-6.2に示す。高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの二酸化炭素排出原単位は、セメントと比較して非常に小さい。このため、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て、セメントの使用量を抑制することによって、材料製造時の二酸化炭素排出量を削減することができる。なお、二酸化炭素排出原単位については、文献1), 2)のほか、各種機関から公開されているデータを参考にするとよい。

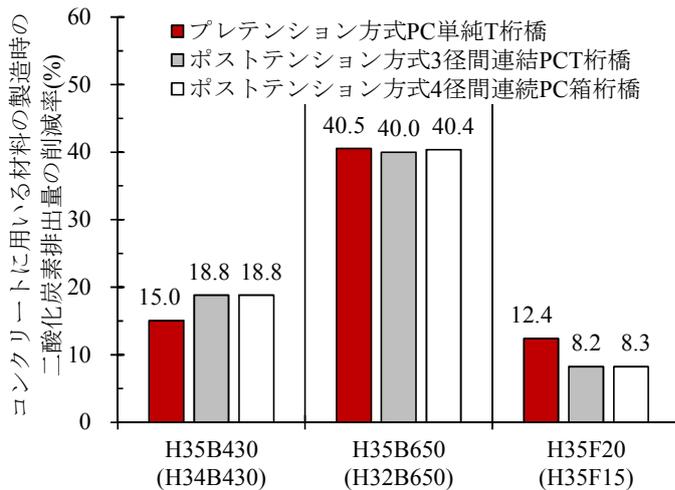
表-6.2 結合材の二酸化炭素排出原単位

結合材	二酸化炭素排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /t)
セメント	766.6
高炉スラグ微粉末	26.5
フライアッシュ	19.6

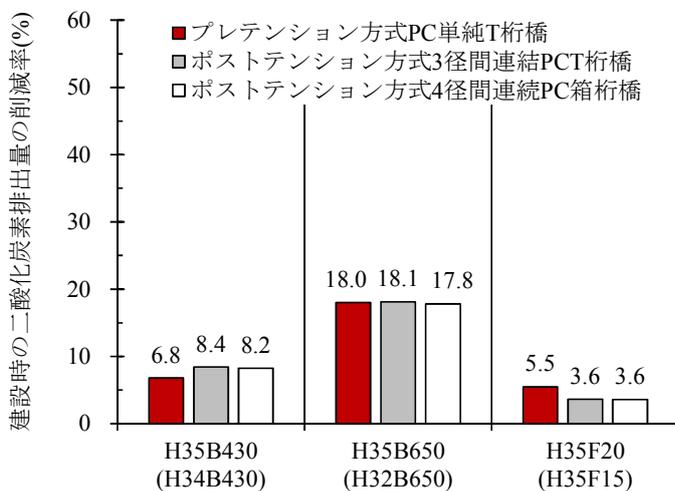
※文献1)を参照して作成。産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュの二酸化炭素排出原単位は、生産時の二酸化炭素排出量を加算せず、加工時に要したエネルギー消費とこれに伴う二酸化炭素排出量のみを考慮して算出した値。

一方、建設、維持補修及び解体・廃棄の方法が早強ポルトランドセメント単味のコンクリートを適用する場合と大幅に異なる際には、ライフサイクル全体における二酸化炭素排出量を算出して、二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価することが望ましい。プレストレストコンクリート橋のライフサイクル全体における二酸化炭素排出量の算出にあたっては、文献3)に詳細な方法が示されているので、参考にするとよい。

プレストレストコンクリート橋の代表的な構造形式（プレテンション方式PC単純T桁橋，ポストテンション方式3径間連結PCT桁橋，ポストテンション方式4径間連続PC箱桁橋）を対象として、混和材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果を定量化した結果を図-6.1に示す。コンクリートに用いる材料の製造時の二酸化炭素排出量（図-6.1(A)）と表-6.1の建設時における二酸化炭素排出量（図-6.1(B)）を評価の対象とした。混和材を用いたコンクリートでは、プレストレス力の導入に必要となる初期材齢の圧縮強度を確保するため、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも水結合材比を小さく設定した。また、二酸化炭素排出原単位については、表-6.2の値を用いた。この結果、混和材を用いたコンクリートでは、構造形式にかかわらず、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、材料製造時の二酸化炭素排出量を対象とした場合に最大で約40%、建設時の二酸化炭素排出量を対象とした場合に最大で約18%の二酸化炭素排出削減効果が得られることが確認されている（第III部付録-7参照）。



(A)コンクリートに用いる材料の製造時の二酸化炭素排出量の削減率



(B)建設時の二酸化炭素排出量の削減率

図-6.1 混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の二酸化炭素排出削減効果

H40 (H36) :

早強ポルトランドセメント単味,  
W/B=40% (W/B=36%),  
W=165kg/m<sup>3</sup> (W=151kg/m<sup>3</sup>)

H35B430 (H34B430) :

早強ポルトランドセメントの30%を  
高炉スラグ微粉末4000で置換,  
W/B=35% (W/B=34%),  
W=165kg/m<sup>3</sup> (W=170kg/m<sup>3</sup>)

H35B650 (H32B650) :

早強ポルトランドセメントの50%を  
高炉スラグ微粉末6000で置換,  
W/B=35% (W/B=32%),  
W=165kg/m<sup>3</sup> (W=153kg/m<sup>3</sup>)

H35F20 (H35F15) :

早強ポルトランドセメントの20 (15) %を  
フライアッシュII種で置換,  
W/B=35% (W/B=35%),  
W=165kg/m<sup>3</sup> (W=150kg/m<sup>3</sup>)

※ ()内はプレテンション方式PC単純T桁橋の配合のデータを示す。

※図の縦軸は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに対する混和材を用いたコンクリートの二酸化炭素排出量の削減率を示す。

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Vol.125，2005
- 2) 日本コンクリート工学会：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委員会報告書，2010
- 3) 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の取組み—PC構造物の建設に伴うCO<sub>2</sub>排出量の見える化—，2011

## 第Ⅲ部 付録資料

担当：一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会



## 付録ー1 混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の実績

### 1. 概要

混和材を用いたプレストレストコンクリート橋は1990年代の終わり頃から本格的に建設され始め、近年では数百橋の実績がある。このマニュアル（案）では、混和材を用いた現場打ちプレストレストコンクリート橋を対象としていることから、本来であれば、現場打ちプレストレストコンクリート橋の実績を示すべきであるが、実績の多くはプレキャスト部材であった。このことから、この付録では、混和材を用いたプレキャスト部材と現場打ちプレストレストコンクリート橋の代表的な実績を示す。また、混和材を用いた現場打ちプレストレストコンクリート橋の施工事例をあわせて示す。

実績の調査は、以下を対象範囲とした。

- ・高炉スラグ微粉末 4000  
環境負荷軽減コンクリート（EFC）研究会の実績
- ・高炉スラグ微粉末 6000  
高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物（BSPC）研究会の実績
- ・フライアッシュⅡ種  
土木学会，日本コンクリート工学会，セメント協会及びプレストレストコンクリート工学会から  
2001年以降に公開された文献

### 2. 実績の調査結果

実績の調査結果の一覧を表ー1～3に示す。ここでは、それぞれの混和材を初めて採用した橋に加えて、施工数量が比較的多く各構造形式が網羅されるように実績を選定した。

表-1 高炉スラグ微粉末 4000 を用いたプレレストレストコンクリート橋の実績一覧表 (主な橋梁)

No.	橋梁名	適用年	橋種	構造データ		圧縮強度		配合データ						施工データ		現場打ちコンクリートの打込み方法		
				構造形式	橋長 (m)	全幅員 (m)	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	導入時強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スラップ*** (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (W/B) (%)	置換率 (%)	水 (W) (kg/m <sup>3</sup> )	セメント** (kg/m <sup>3</sup> )	結合材 (B) 混和材 (kg/m <sup>3</sup> )		施工数量 (m <sup>3</sup> )	養生
1	長桜架道橋	2004	鉄道橋	PPC単純T桁橋	25.0	21.7	40	34	15	4.5	35	30	157	315 (H)	135	130	現場散水	ポンプによる打込み
2	猿投高架橋	2003	道路橋	3径間連続非合成PC床版桁橋	290.0	10.8	50	35	65	3.0	34	30	172	350 (H)	150	1536	蒸気	—
3	潮田高架橋	2006	道路橋	2径間連続PC合成桁(コンボ)橋	69.0	12.8	50	35	60	3.0	33	30	164	350 (H)	150	367	蒸気	—
4	川島連続高架橋	2007	道路橋	9径間連続PC2主版桁橋	315.0	10.5	50	35	60	4.5	32	30	160	350 (H)	150	1963	蒸気	—
5	高田橋	2008	道路橋	4径間連続PC T桁橋	143.0	12.0	50	35	50	2.0	34	30	170	350 (H)	150	713	蒸気	—
6	川尻高架橋	2010	道路橋	5径間連続PC合成桁(コンボ)橋	180.0	11.2	50	35	60	3.0	33	30	164	350 (H)	150	367	蒸気	—
7	筑紫野大橋	2012	道路橋	5径間連続PC T桁橋	119.0	8.0	50	35	50	2.0	34	30	170	350 (H)	150	439	蒸気	—
8	相模原ICランプ橋	2014	道路橋	PC単純合成桁(コンボ)橋	29.7	38.8	50	35	60	3.0	33	30	164	350 (H)	150	367	蒸気	—
9	小佐川橋	2013	道路橋	7径間連続PC合成桁(コンボ)橋	267.0	11.2	50	35	60	3.0	33	30	164	350 (H)	150	367	蒸気	—

※H：早強ポルトランドセメント

※※No.2～9の橋梁のスラップは、スラップフロー値を示す。

表-2 高炉スラッグ微粉末6000を用いたプレストレストコンクリート橋の実績一覧表 (主な橋梁)

No.	橋梁名	適用年	橋種	構造データ			圧縮強度			配合データ						施工データ		現場打ちコンクリートの打込み方法	
				橋長 (m)	全幅員 (m)	構造形式	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	導入時強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スラップ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (W/B) (%)	置換率 (%)	水 (W) (kg/m <sup>3</sup> )	セメント** (kg/m <sup>3</sup> )	結合材 (B) (kg/m <sup>3</sup> )	施工数量 (m <sup>3</sup> )	養生		
1	屋敷比橋	1998	道路橋	プレテン	59.8	10.8	2径間単純PC中空版橋 (1径間のみ対象)	50	10	10	2.0	35	50	160	229 (H)	229	204	蒸気	—
2	青柳橋	2001	道路橋	ポストテン	37.8	16.5	PC単純合成桁 (コンボ) 橋	50	10	10	4.5	37	50	142	192 (H)	192	295	蒸気	—
3	恩納バイパス6号橋	2002	道路橋	プレテン	147.0	12.9	3+3径間連続PCT桁橋	50	10	10	2.0	35	50	160	229 (H)	229	858	蒸気	—
4	隣松寺高架橋	2002	道路橋	プレテン	467.0	16.0	鋼12径間連続非合成3主級桁橋 (PC床版)	50	12	12	4.5	34	50	142	209 (H)	209	2035	蒸気	—
5	平内滝岸川尻川水門管理橋	2004	水門管理橋	ポストテン	25.4	5.2	PC単純中空床版橋	36	12	12	4.5	40	50	170	213 (H)	213	85	蒸気	ポンプによる打込み
6	徳首川橋	2008	道路橋	プレテン	533.0	10.7	3+6径間連続PC中空床版橋	60	12	12	4.5	32	50	150	235 (H)	235	1437	蒸気	—
								40	18	18	4.5	39***	50	158	193 (N)	193	113	現場敷水	ポンプによる打込み
								36	12	12	4.5	42***	50	155	173 (N)	173	262	現場敷水	ポンプによる打込み
7	諏訪公園橋 (P7-P13)	2010	道路橋	ポストテン	172.0	10.2	6径間連続PC中空床版橋	36	18	18	4.5	41	50	165	202 (H)	201	1345	現場敷水	ポンプによる打込み
8	吹矢谷橋床版補修工事	2011	道路橋	プレテン	243.0	14.0	鋼3径間連続桁橋	50	12	12	4.5	35	50	160	232 (H)	232	692	蒸気+水中	—
								50	18	18	4.5	43***	50	160	171 (H)	171	222	現場潤滑	ポンプによる打込み
								30	18	18	4.5	50***	50	160	145 (H)	145	194	現場潤滑	ポンプによる打込み
9	野黒沢高架橋床版工事	2014	道路橋	プレテン	598.0	11.3	鋼10+4径間連続桁橋	50	12	12	4.5	33	50	150	227 (H)	227	1383	蒸気	—

※H：早強ポルトランドセメント，N：普通ポルトランドセメント  
 ※※水結合材比は、膨張材を含めて計算した値である。

表-3 フライアッシュII種を用いたプレストレストコンクリート橋の実績一覧表 (主な橋梁)

No.	橋梁名	適用年	橋種	構造データ			圧縮強度			配合データ						施工データ		現場打ちコンクリートの打込み方法
				橋長 (m)	全幅員 (m)	構造形式	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	導入時強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スラップ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (W/B) (%)	置換率 (%)	水 (W) (kg/m <sup>3</sup> )	セメント** (kg/m <sup>3</sup> )	結合材 (B) (kg/m <sup>3</sup> )	施工数量 (m <sup>3</sup> )	養生	
1	伊良部大橋	2008~2014	道路橋	2185.0+935.0	9.7	32+14径間PC連続桁橋	50	18	18	4.5	34***	—	156	436 (N)	22***	19,834	湿潤	フレキヤストセグメントブロック
2	宮坂橋	2015	歩道橋	22.7	3.3	単純PCT桁橋	50	18	18	4.5	35	15	150	366 (H)	65	—	蒸気+ミスト	—

※H：早強ポルトランドセメント，N：普通ポルトランドセメント  
 ※※細骨材の一部をフライアッシュII種で置換したため、水結合材比と置換率の計算に含まれていない。  
 ※※※水結合材比は、膨張材を含めて計算した値である。

### 3. プレストレストコンクリート橋の施工事例

#### 3.1 高炉スラグ微粉末 4000 を用いた施工事例

##### 3.1.1 長桜架道橋

長桜架道橋は、富山県朝日町の海岸線から約 4.5km に位置するポストテンション方式 PPC 単純 T 桁橋である。高炉スラグ微粉末 4000 を用いたコンクリートは、環境負荷低減及び耐久性の向上を目的として使用されている。主桁は架橋位置近傍の主桁製作ヤードにて製作されている。適用にあたって事前に試し練りを実施し、プレストレス力導入時の強度とポンプ圧送性を確保できる最適な結合材量及び高炉スラグ微粉末の置換率が決定されている。

初期材齢における養生を確実に行うことが耐久性の確保につながることから、打込み後 7 日間の散水による湿潤養生が実施されている。

また、同時期に早強ポルトランドセメント単味のコンクリートを用いて施工された同形式のプレストレストコンクリート橋と比較して、コンクリートに用いる材料の製造時の二酸化炭素排出量を 23%削減できたことが報告されている。

構造概要を図-1, 2 に、主桁に使用したコンクリート配合を表-4 に示す。

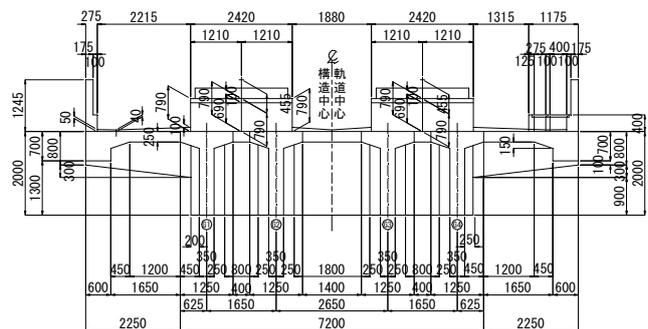


図-1 長桜架道橋の構造概要図（断面図）

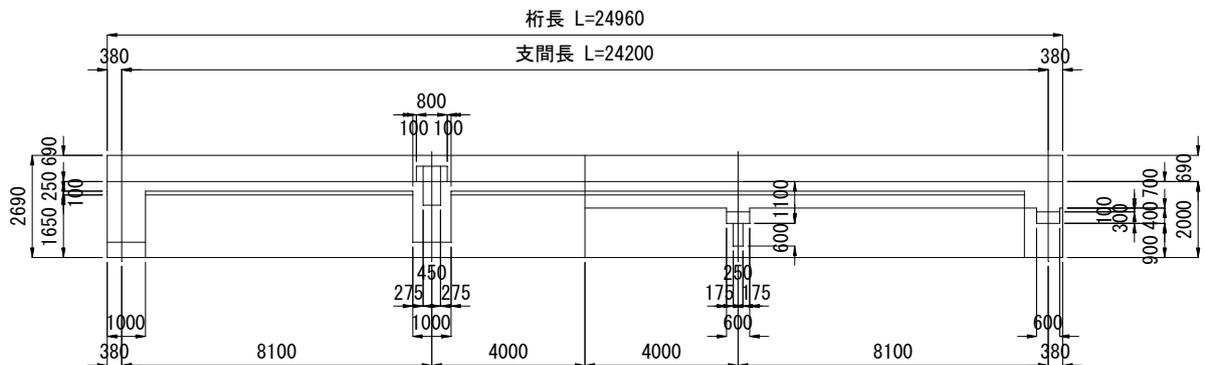


図-2 長桜架道橋の構造概要図（側面図）

表-4 長桜架道橋のコンクリート配合

設計 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スラブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の 置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水	結合材		細骨材	粗骨材
						早強ポルトランド セメント	高炉スラグ 微粉末 4000		
40	15	4.5	35	30	157	315	135	735	1005

### 3.2 高炉スラグ微粉末 6000 を用いた施工事例

#### 3.2.1 平内海岸川尻川水門管理橋<sup>1)</sup>

岩手県の沿岸部の河口付近に位置する平内海岸川尻川水門管理橋は、ポストテンション方式 PC 単純中空床版橋である。高炉スラグ微粉末 6000 を用いた現場打ちのプレストレストコンクリート橋として初めての施工である。高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートは、塩害対策を目的として使用されている。コンクリートの打込み時期は 11 月であり、最低気温が $-5^{\circ}\text{C}$ になることが予測されたため、寒中コンクリートとしての対応が行われている。橋全体を上屋で覆い外気の影響を受けにくくするとともに、スチームボイラー及びジェットファーンネスを用いて給熱と加湿を行い、外気温が $-5^{\circ}\text{C}$ であっても上屋内雰囲気温度を $20^{\circ}\text{C}$ に保つようにしている。材齢 3 日まで給熱養生、材齢 7 日まで上屋設備を存置した養生が実施されている。

コンクリートの打込みはポンプ車（ブームによる打込み）を用いて実施されており、運搬・打込みを考慮してスランブを 12cm としている。

構造概要を図-3 に、主桁に使用したコンクリート配合を表-5 に示す。

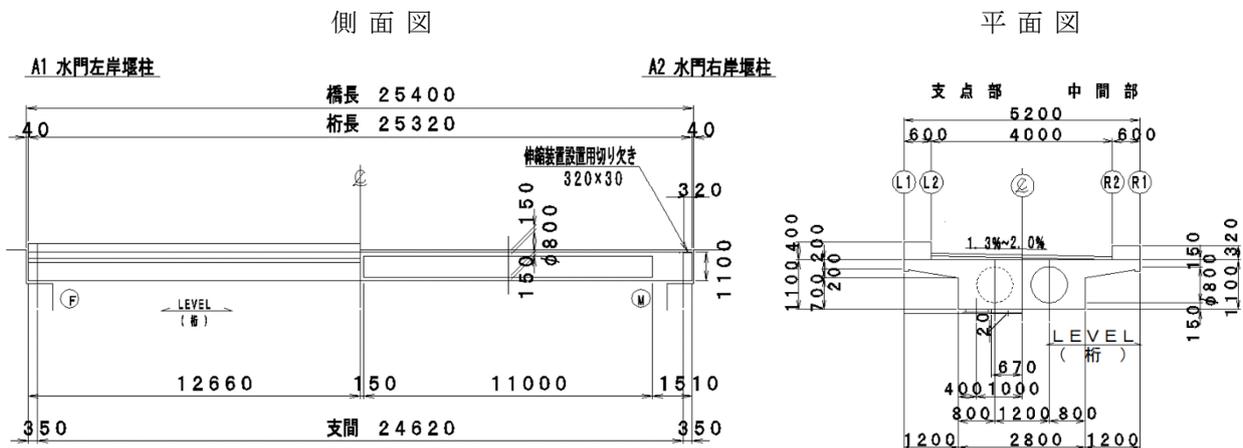


図-3 平内海岸川尻川水門管理橋の構造概要図

表-5 平内海岸川尻川水門管理橋のコンクリート配合

設計 基準強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	スランブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の 置換率 (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					
					水	結合材		細骨材	粗骨材	混和剤
						早強ポルトランド セメント	高炉スラグ 微粉末 6000			
36	12	4.5	40	50	170	213	213	621	1107	4.25

### 3.2.2 沖縄自動車道 億首川橋<sup>2)</sup>

沖縄県の沿岸部に位置する億首川橋は、プレテンション方式3+6径間連結PC中空床版橋である。鋼桁橋、鋼トラス橋及びRC中空床版橋で構成されており、そのうちのRC中空床版橋を取替える工事である。設計耐用年数100年を満足するための予防保全として、全てのプレキャスト部材及び現場打ち連結部、地覆、壁高欄のコンクリートに高炉スラグ微粉末6000を用いたコンクリートが使用されている。高炉スラグ微粉末6000を用いたコンクリートは、耐久性向上（塩化物イオン浸透の抑制、アルカリシリカ反応の抑制）の他、環境に配慮した二酸化炭素排出削減を目的として使用されている。現場打ちのコンクリートの打込みは、ポンプ車（ブームによる打込み）を用いて実施されている。

構造概要を図-4に、コンクリート配合を表-6に示す。

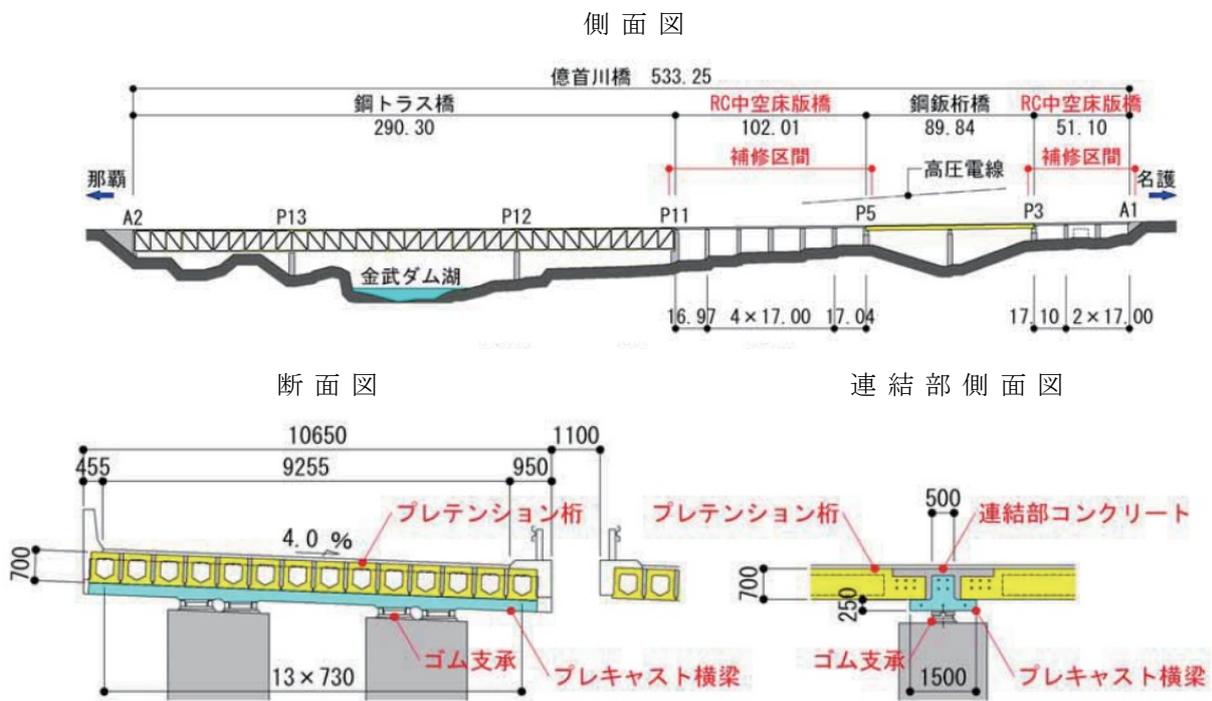


図-4 億首川橋の構造概要図

表-6 億首川橋のコンクリート配合

設計 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合 材比 (%)	混和材の 置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							コンクリートの 打込み箇所	
					水	セメント		高炉スラグ 微粉末6000	膨脹材	細骨材	粗骨材		混和剤
						HPC	OPC						
60	12	4.5	32	50	150	235	—	235	—	778	1094	4.47	主桁・横梁
40	18	4.5	39	50	158	—	203	203	—	961	808	2.44	間詰め
40	18	4.5	39	50	158	—	193	193	20	961	808	2.23	連結・鋼橋床版
36	12	4.5	42	50	155	—	173	173	20	837	975	1.83	地覆・壁高欄

※HPC：早強ポルトランドセメント， OPC：普通ポルトランドセメント

### 3.2.3 福岡 208 号 諏訪公園橋

福岡県の有明海側沿岸部の河口付近に位置する諏訪公園橋は、ポストテンション方式 6 径間連続 PC 中空床版橋である。高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートは耐久性の向上を目的として使用されている。コンクリートの打込みは、ポンプ車（ブームによる打込み・一部配管）を用いて実施されている。コンクリート打込み後は湿潤マット及び農業用穴あきホースを用い、7 日間の連続散水養生が実施されている。

構造概要を図-5 に、主桁に使用したコンクリート配合を表-7 に示す。

下り線 (標準部)

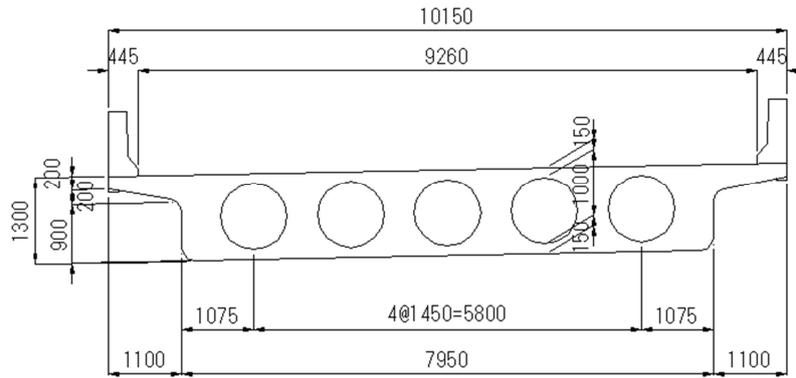


図-5 諏訪公園橋の構造概要図

表-7 諏訪公園橋のコンクリート配合

設計 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の 置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					水	結合材		細骨材	粗骨材	混和剤
						早強ポルトランド セメント	高炉スラグ 微粉末 6000			
36	18	4.5	41	50	165	202	201	830	1066	2.42

### 3.2.4 中国自動車道 吹矢谷橋<sup>3)</sup>

広島県の山間部に位置する吹矢谷橋は、鋼3径間連続鉄桁橋である。RC床版に凍結防止剤による塩害劣化が発生したため、LCCの最小化を目指してプレキャストPC床版に取り替える全面補修が行われている。高炉スラグ微粉末6000を用いたコンクリートは凍結防止剤による塩害対策を目的として使用されている。コンクリートの打込みは、ポンプ車（ブームによる打込み・一部配管）を用いて実施している。また、コンクリート圧送試験を実施し、コンクリートの施工性能を確認している。プレキャストPC床版は養生プールにて3日間の水中養生を実施し、現場打ちPC床版、間詰め部のコンクリートは養生マットと不透水性のシートを用いて7日間の散水養生が実施されている。

構造概要を図-6に、主桁に使用したコンクリート配合を表-8に示す。

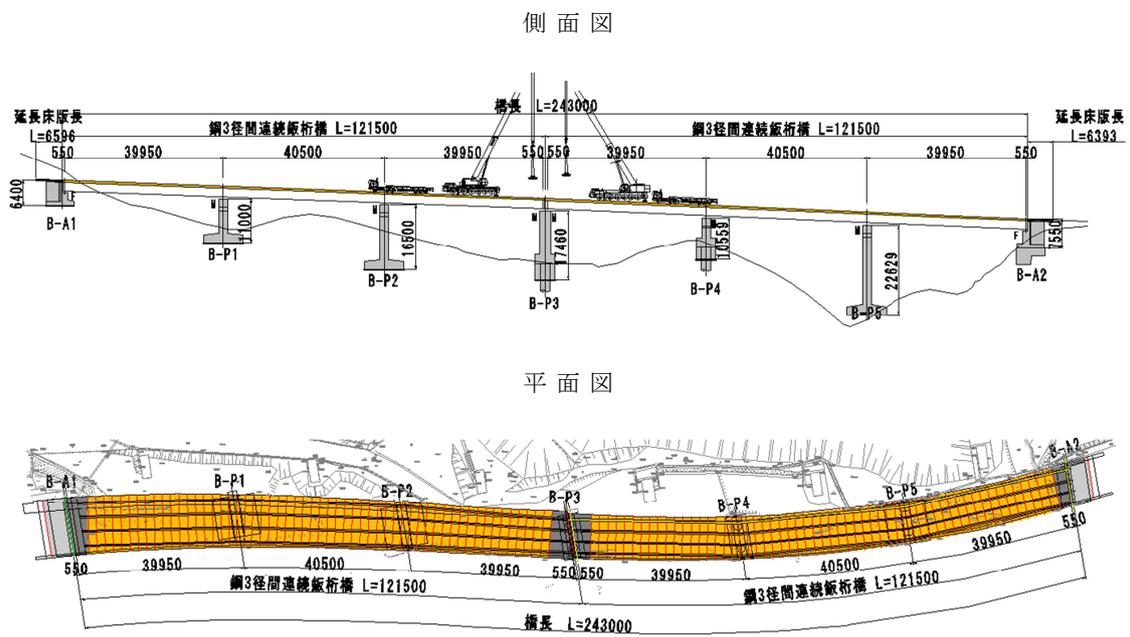


図-6 吹矢谷橋の構造概要図

表-8 吹矢谷橋のコンクリート配合

設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							コンクリートの打込み箇所
					水	結合材			細骨材	粗骨材	混和剤	
						早強ボルトランドセメント	高炉スラグ微粉末6000	膨張材				
50	12	4.5	35*	50	160	232	232	—	683	991	0.45	プレキャストPC床版
50	18	4.5	43*	50	160	171	171	30	803	969	0.80	現場打ちPC床版・間詰め
30	18	4.5	50	50	160	145	145	30	850	966	0.75	地覆・壁高欄

※設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup>において水結合材比が異なる理由は、プレキャスト部材では初期材齢での強度の発現が得られるように水結合材比を低減したためである。

### 3.3 フライアッシュⅡ種を用いた施工事例

#### 3.3.1 伊良部大橋<sup>4)</sup>

沖縄県の宮古島と伊良部島をつなぐ伊良部大橋は、プレキャストセグメント工法による32+14径間連続PC箱桁橋で、ショートラインマッチキャスト方式によるセグメントの製作、バランスドカンチレバー工法による架設が行われている。海上橋であり、塩害環境で100年間の供用を目指した「ミニマムメンテナンス橋梁」である。アルカリシリカ反応抑制のために石灰石砕砂を用いており、その粒度調整によるワーカビリティの向上を図るため、細骨材の一部をフライアッシュⅡ種で置換したコンクリートが使用されている。

構造概要を図-7に、主桁に使用したコンクリート配合を表-9に示す。

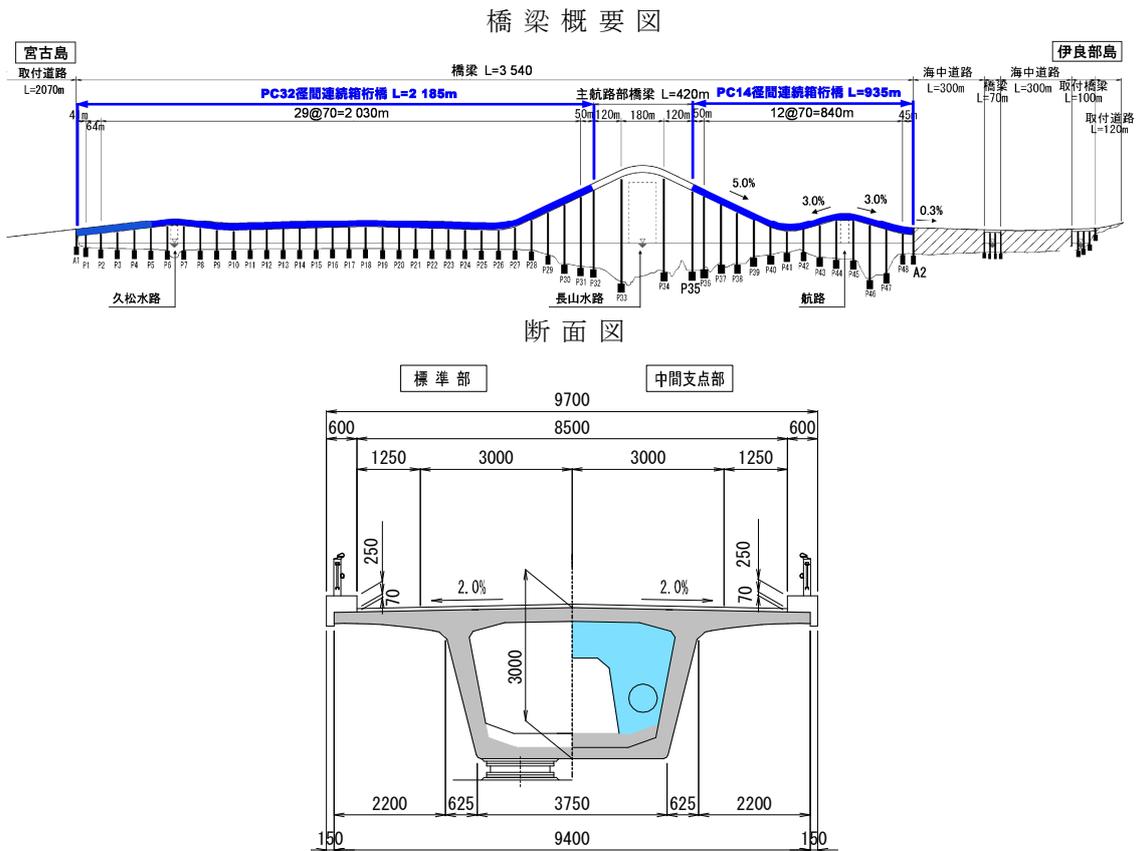


図-7 伊良部大橋の構造概要図

表-9 伊良部大橋のコンクリート配合

設計 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
				水	結合材		細骨材		粗骨材	混和剤
					普通ポルトランド セメント	膨脹材	砕砂	フライアッシュ Ⅱ種		
50	18	4.5	34	156	436	30	723	22 <sup>**</sup>	1004	3.96

※細骨材の一部をフライアッシュⅡ種で置換したため、水結合材比の計算に含めていない。

### 3.3.2 宮坂橋歩道橋<sup>5)</sup>

石川県の山間部に位置する宮坂橋歩道橋は、プレテンション方式PC単純T桁橋である。フライアッシュⅡ種を用いたコンクリートは、凍結防止剤による塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上を目的として使用されている。蒸気養生終了後に5日間のミスト養生が実施されている。

構造概要を図-8に、主桁に使用したコンクリート配合を表-10に示す。

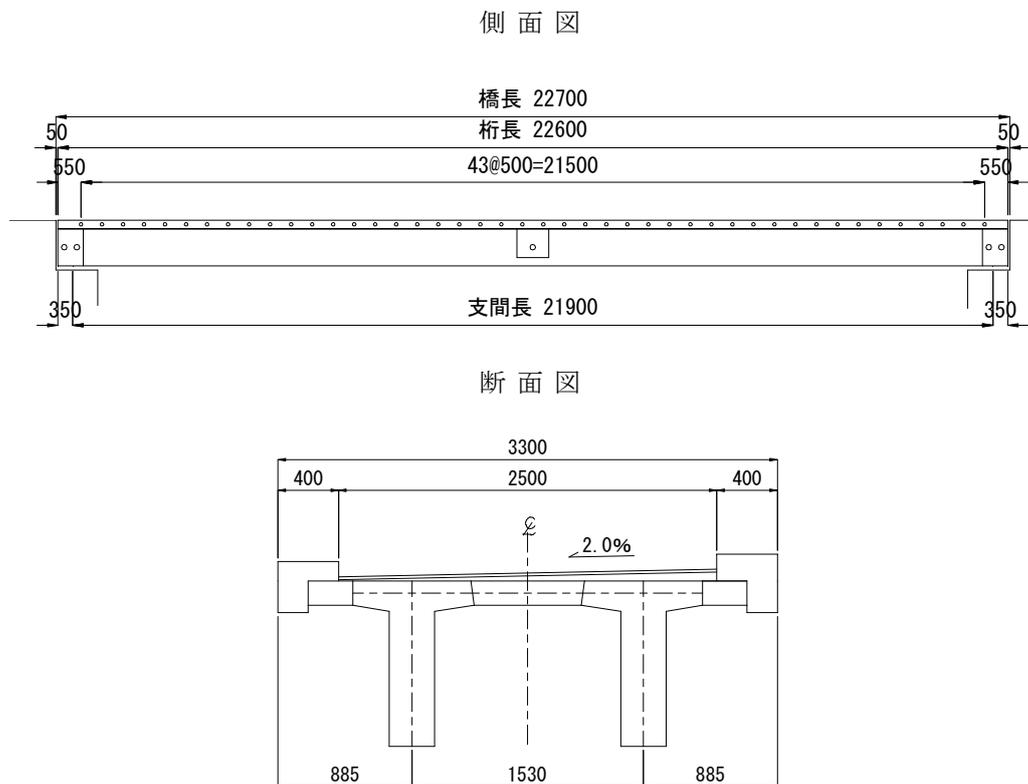


図-8 宮坂橋歩道橋の構造概要図

表-10 宮坂橋歩道橋のコンクリート配合

設計 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の 置換率 (%)	単位数 (kg/m <sup>3</sup> )				
					水	結合材		細骨材	粗骨材
						早強ポルトランド セメント	フライアッシュ Ⅱ種		
50	18	4.5	35	15	150	366	65	762	958

## 4. まとめ

混和材を用いたコンクリートをプレストレストコンクリート橋に適用した実績の調査を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 混和材を用いたコンクリートは、塩化物イオン浸透に対する抵抗性等の耐久性の向上と環境負荷の低減を目的として、プレストレストコンクリート橋に適用されていた。
- (2) 混和材を用いたコンクリートの耐久性は、初期材齢の養生を確実に行うことによって確保されることから、散水養生や水中養生等の湿潤養生が実施されていた。
- (3) 混和材を用いた現場打ちのプレストレストコンクリート橋では、ポンプ車を用いた施工事例が多く報告されていた。これらの事例では、ポンプ圧送への影響を配慮し、スランブが大きく設定されていた。高炉スラグ微粉末 4000 を用いたコンクリートではスランブが 15cm、高炉スラグ微粉末 6000 あるいはフライアッシュⅡ種を用いたコンクリートの多くではスランブが 18cm に設定されていた。

### 参考文献

- 1) 蓑田理希, 塩谷由明, 和田晃一, 古川柳太郎: 高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートの現場打ち検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.153-158, 2004
- 2) 下村憲一郎, 佐々木佑介, 江口光昭, 石塚純: 沖縄自動車道 億首川橋中空床版橋部の架替え工事, 第 17 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.131-134, 2008
- 3) 本荘清司, 福井誠司, 田中寛規, 桐川潔: 高耐久化を目指した床版取替え (中国自動車道 吹矢谷橋), 第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.251-254, 2012
- 4) 白石哲, 山口健市, 麻生修司, 金城裕樹: 伊良部大橋上部工の施工一塩害地区における 100 年対応の橋梁を目指して一, 第 21 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.199-202, 2012
- 5) 桜田道博, 山村智, 鳥居和之, 山中章平: フライアッシュを用いたプレテンション PCT 桁橋 (宮坂橋歩道橋) の施工, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.315-318, 2015

## 付録ー2 混和材を用いたコンクリートの材料特性

### 1. 概要

早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末 4000、高炉スラグ微粉末 6000 及びフライアッシュ II 種で置換したコンクリートの圧縮強度、引張強度、ヤング係数、クリープ係数及び乾燥収縮ひずみの特性について、シリーズ I とシリーズ II の 2 つの実験を行って検討した。

シリーズ I では、混和材の種類及び置換率が圧縮強度の発現に与える影響について検討した。シリーズ II では、早強ポルトランドセメント単味のコンクリート (H40) と同等の初期材齢の圧縮強度の発現を確保した早強ポルトランドセメントの 30%を高炉スラグ微粉末 4000 で置換したコンクリート (H35B430)、50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換したコンクリート (H35B650)、20%をフライアッシュ II 種で置換したコンクリート (H35F20) の強度、ヤング係数、クリープ係数及び乾燥収縮ひずみの特性について検討した<sup>1), 2)</sup>。

コンクリートに用いた材料を表-1、混和材の種類及び置換率の影響を検討したシリーズ I の配合を表-2、コンクリートの各種特性を検討したシリーズ II の配合を表-3 に示す。シリーズ I の水結合材比は 40%とした。シリーズ II の水結合材比は、設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup> と材齢 3 日における圧縮強度 30N/mm<sup>2</sup> が得られるように、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートで 40%、混和材を用いたコンクリートで 35%とした。全配合において、単位水量 (W) を 165kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量 (G) を 968kg/m<sup>3</sup> に統一した。

表-1 コンクリートに用いた材料

使用材料	種類	品質*	記号
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm <sup>3</sup> 、比表面積 4,470cm <sup>2</sup> /g	HPC
混和材	高炉スラグ微粉末 4000	密度 2.89g/cm <sup>3</sup> 、比表面積 4,460cm <sup>2</sup> /g、 SO <sub>3</sub> =2.05% (無水せっこう添加)	BS4
	高炉スラグ微粉末 6000	密度 2.91g/cm <sup>3</sup> 、比表面積 6,020cm <sup>2</sup> /g、 SO <sub>3</sub> =2.96% (無水せっこう添加)	BS6
	フライアッシュ II 種	密度 2.30g/cm <sup>3</sup> 、比表面積 4,280cm <sup>2</sup> /g	FA
細骨材	静岡県掛川産陸砂	表乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 2.23%	S
粗骨材**	茨城県笠間産 5 号碎石	表乾密度 2.67g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.43%	G
	茨城県笠間産 6 号碎石	表乾密度 2.67g/cm <sup>3</sup> 、吸水率 0.46%	
混和剤***	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	SP
	AE 剤	変性ロジン酸化合物系	AE1
		高アルキルカルボン酸系	AE2

\*品質はロットによって異なるため、H40、H35B430、H35B650、H35F20 で実施したクリープ・収縮試験に用いた材料のデータを参考値として示す。

\*\*粗骨材の 5 号碎石と 6 号碎石は 1 : 1 で混合

\*\*\*AE1 は早強ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートで使用、  
AE2 はフライアッシュ II 種を用いたコンクリートで使用

表-2 コンクリートの配合（シリーズⅠ：置換率の影響）

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S	G
			HPC	BS4	BS6	FA		
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968
H40B430			289 (70%)	124 (30%)	—	—	749	
H40B450			206 (50%)	206 (50%)	—	—	744	
H40B630			289 (70%)	—	124 (30%)	—	750	
H40B650			206 (50%)	—	206 (50%)	—	745	
H40B670			124 (30%)	—	289 (70%)	—	740	
H40F10			371 (90%)	—	—	41 (10%)	746	
H40F20			330 (80%)	—	—	83 (20%)	734	
H40F30			289 (70%)	—	—	124 (30%)	721	

※単位量の（）内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示

表-3 コンクリートの配合（シリーズⅡ：コンクリートの特性）

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S	G
			HPC	BS4	BS6	FA		
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	700	
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	695	
H35F20			377 (80%)	—	—	94 (20%)	682	

※単位量の（）内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示

## 2. 強度及びヤング係数

### 2.1 実験方法

圧縮強度を JIS A 1108, 引張強度を JIS A 1113, ヤング係数を JIS A 1149 に準拠して測定した。

### 2.2 実験結果

#### 2.2.1 混和材の種類及び置換率が圧縮強度の発現に与える影響（シリーズⅠ）

コンクリート打込み直後から封緘状態に保ち、翌日に脱型して、材齢 28 日まで標準養生を行い、材齢 91 日まで室内に保管し、その後、屋外に暴露した混和材を用いたコンクリートの圧縮強度の発現を図-1 に示す。混和材の種類にかかわらず置換率が高いほど初期材齢の圧縮強度が小さくなったが、材齢 365 日では同等の強度となった。ポルトランドセメントの一部を混和材で置換した場合、置換率を高くすると単位セメント量の減少によってコンクリートの初期材齢の強度発現が遅くなるが長期材齢における圧縮強度はポルトラ

ンドセメント単味のコンクリートと同等になることが知られており、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換した場合でも同様の傾向が認められた。高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートでは、高炉スラグ微粉末 4000 を用いたコンクリートと比較して置換率に対する初期材齢の圧縮強度の低下が抑えられており、比表面積の大きい高炉スラグ微粉末を使用することで初期材齢の圧縮強度の低下を抑制できることが認められた。

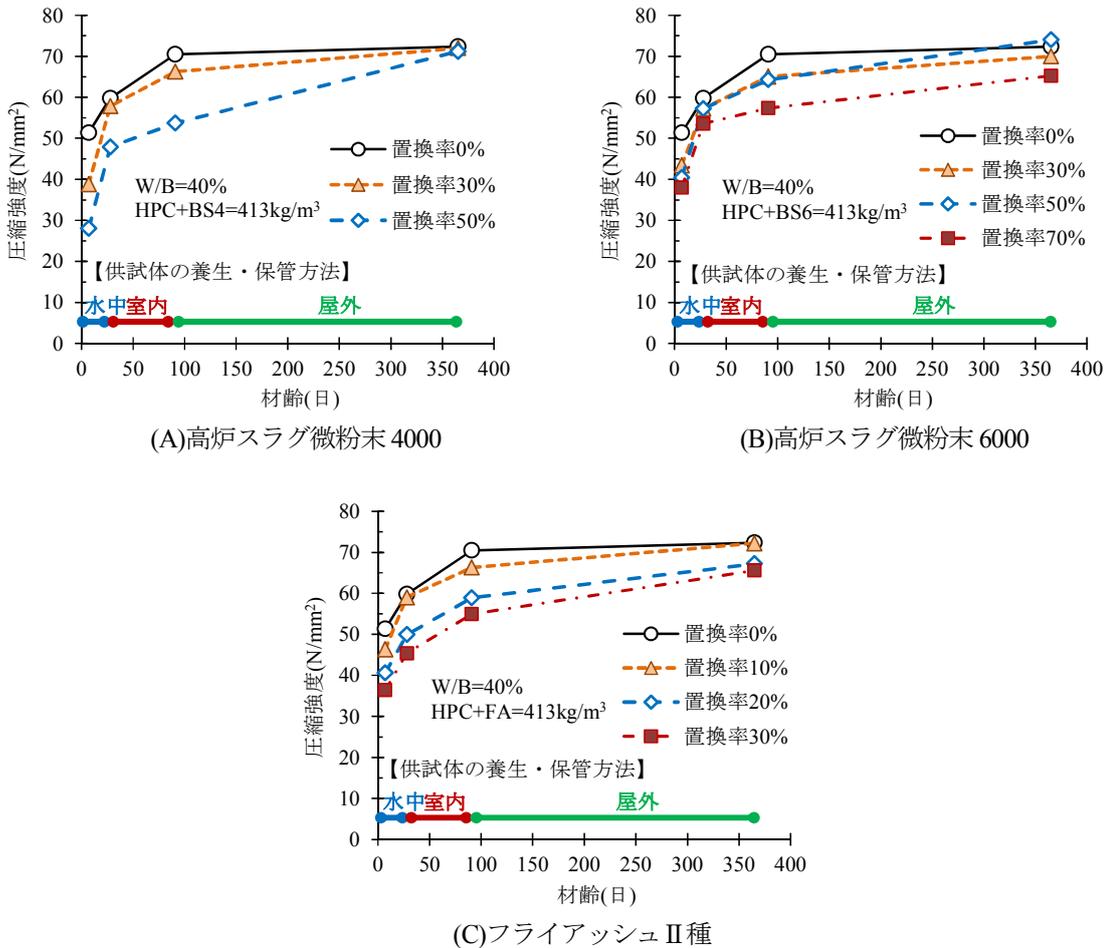


図-1 混和材を用いたコンクリートの圧縮強度の発現

### 2.2.2 初期材齢の強度発現を確保した混和材を用いたコンクリートの圧縮強度（シリーズⅡ）

20°Cの封緘養生条件下で得られた H40, H35B430, H35B650 及び H35F20 の圧縮強度の発現を図-2 に示す。材齢3日の圧縮強度は、全ての配合において目標値の 30N/mm<sup>2</sup>を満足した。混和材を用いたコンクリートの水結合材比を40%から35%に低減することによってH40と同等の強度発現を確保できることが認められた。また、水結合材比の低減によって、長期材齢における圧縮強度も増加することが認められた。

### 2.2.3 引張強度（シリーズⅡ）

20℃の封緘養生条件下で得られた H40, H35B430, H35B650 及び H35F20 の引張強度の発現を図-3に、圧縮強度と引張強度の関係を図-4に示す。混和材を用いたコンクリートの引張強度は、圧縮強度と同様に水結合材比を低減することによってH40と同等の引張強度となることが認められた。圧縮強度と引張強度の関係は、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に示されるコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係式の値と同様の傾向を示すことが認められた。

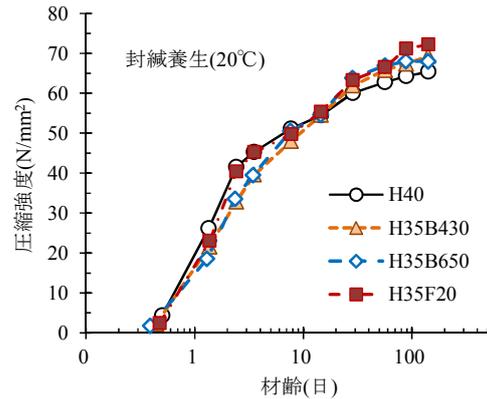
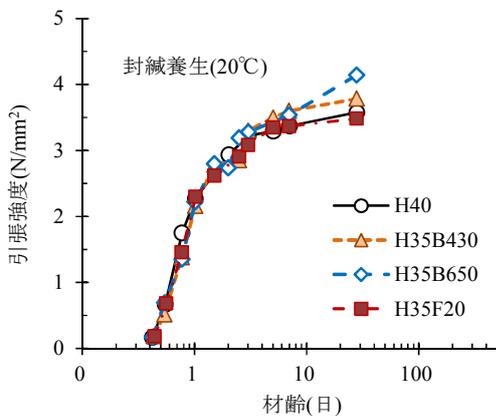
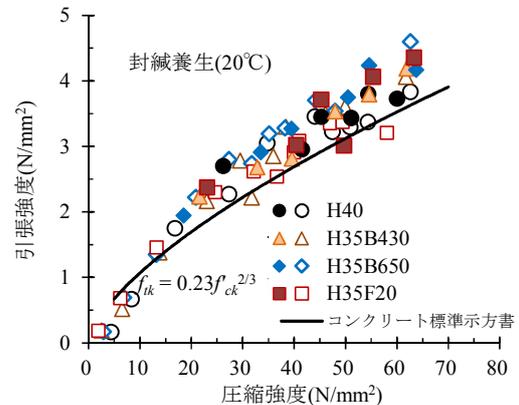


図-2 圧縮強度の発現



※φ150×150mm 供試体による割裂引張試験強度

図-3 引張強度の発現



※塗りつぶしはφ100×200mm 供試体、白抜きはφ150×150mm 供試体による割裂引張試験強度

図-4 圧縮強度と引張強度の関係

### 2.2.4 ヤング係数（シリーズⅡ）

室温 20℃の封緘養生条件下で得られた H40, H35B430, H35B650 及び H35F20 のヤング係数の発現を図-5に、圧縮強度とヤング係数の関係を図-6に示す。混和材を用いたコンクリートのヤング係数の発現は、同等の強度発現を有する早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様の傾向を示し、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係も、混和材の種類及び置換率にかかわらず同様の傾向を示すことが認められた。また、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>に示されるコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係式の値と概ね一致し、±15%の範囲に収まることことが認められた。

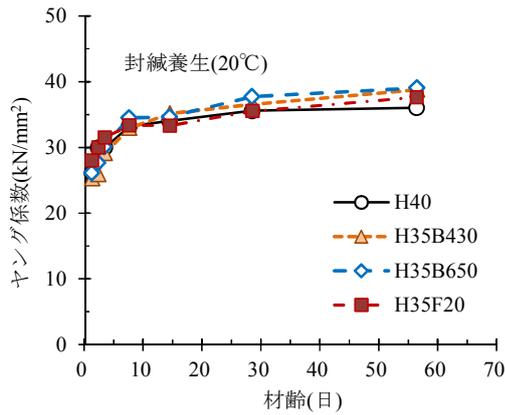


図-5 ヤング係数の発現

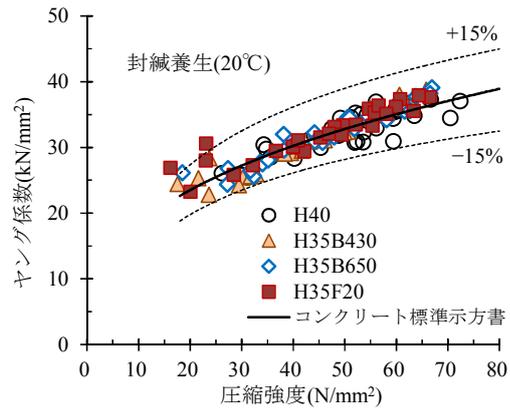


図-6 圧縮強度とヤング係数の関係

### 3. クリープ係数 (シリーズII)

#### 3.1 実験方法

クリープ試験の実施状況を図-7に示す。供試体は150×150×500mmの角柱供試体である。供試体の養生は材齢3日まで湿潤養生とし、その後、4面(150×500mm)を気中乾燥させた。クリープ試験は、2体の供試体を貫通して連結したPC鋼棒を緊張することによって所定のプレストレス力を材齢3, 7, 28及び365日に導入し、材齢910日までコンクリートひずみを測定した。実験中は、コンクリートの応力度がプレストレス力を導入する時の圧縮強度の30±3% (材齢3日は20±3%)となるようにPC鋼棒を再緊張した。プレストレス力を導入した供試体のコンクリートひずみの測定値からクリープひずみを抽出するため、同一形状でプレストレス力を導入しない供試体を別途製作し、材齢3日以降の乾燥収縮ひずみを測定した。クリープひずみは、プレストレス力を導入した供試体のコンクリートひずみからプレストレス力を導入しない供試体のコンクリートひずみを差し引くことによって求めた。実験室の温度は平均18.5°C、湿度は平均55.8%であった。

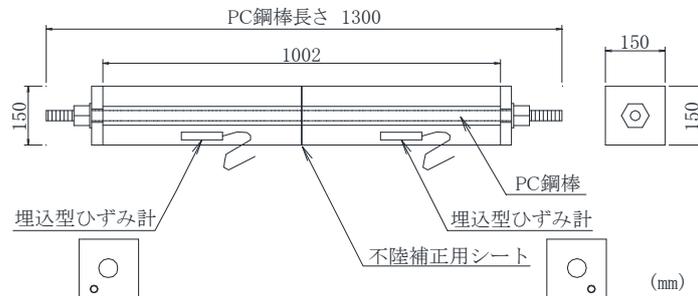


図-7 クリープ試験の実施状況

### 3.2 実験結果

材齢910日までの単位クリープひずみを図-8に示す。H35B430, H35B650及びH35F20の単位クリープひずみは、載荷材齢の違いにかかわらず、H40と比較して同程度か小さくなる傾向が認められた。

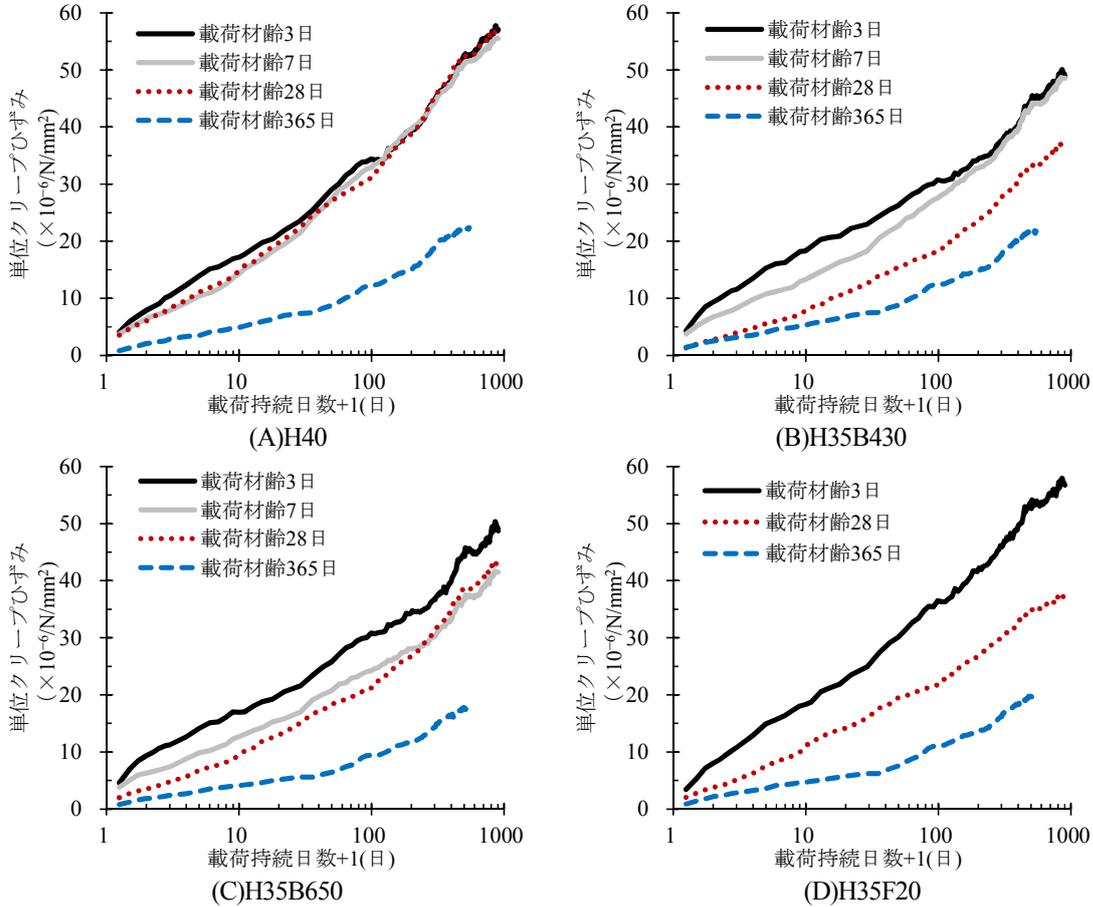


図-8 単位クリープひずみ

次に、式(1)を用いてクリープ試験で得られたクリープひずみの測定値からクリープ係数を求め、式(2)によって回帰することでクリープ曲線式の定数を推定した。

$$\phi_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\sigma} E_{c28} \quad (1)$$

$$\phi_t = A \log_e (t - t' + 1) + B \quad (2)$$

ここに、 $\phi_t$  : クリープ係数、 $\varepsilon_{ct}$  : クリープひずみの測定値、 $\sigma$  : 載荷応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )、 $E_{c28}$  : 材齢28日まで標準養生した円柱供試体のヤング係数 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ) で、H40 :  $3.54 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ 、H35B430 :  $3.77 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ 、H35B650 :  $3.69 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ 、H35F20 :  $3.37 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ 、 $t$  : クリープひずみ測定時の材齢 (日)、 $t'$  : 載荷材齢 (日)、 $A$ 、 $B$  : 実験から得られた定数である。

表-4 クリープ曲線式の定数及び材齢10,000日のクリープ係数の推定値

配合名	荷重 材齢	クリープ曲線式*		材齢10,000日の クリープ係数 推定値
		定数A	定数B	
H40	3日	0.299	-0.068	2.69
	7日	0.306	-0.144	2.67
	28日	0.315	-0.171	2.73
	365日	0.135	-0.113	1.13
H35B430	3日	0.250	0.077	2.38
	7日	0.273	-0.103	2.41
	28日	0.226	-0.205	1.88
	365日	0.133	-0.086	1.14
H35B650	3日	0.248	0.048	2.33
	7日	0.218	-0.035	1.97
	28日	0.254	-0.221	2.12
	365日	0.108	-0.086	0.91
H35F20	3日	0.283	-0.020	2.58
	28日	0.195	-0.079	1.72
	365日	0.110	-0.079	0.93

※相関係数Rは、最小0.959、最大0.994であった。

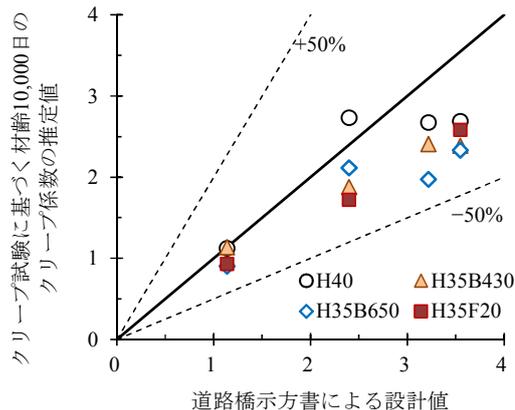


図-9 クリープ試験結果と道路橋示方書による設計値

クリープ曲線式の定数の推定結果を表-4に示す。また、クリープ曲線式によって求められる材齢10,000日のクリープ係数の推定値と道路橋示方書<sup>4)</sup>に示されるクリープ係数の設計値の関係を図-9に示す。ここでは、クリープ係数の推定値の材齢を道路橋示方書で想定されている日数(10,000日)とした。混和材を用いたコンクリートのクリープ係数は、混和材の種類や荷重材齢の違いにかかわらず、道路橋示方書に示されるクリープ係数の設計値と比較して同程度か小さくなることが認められた。

なお、道路橋示方書に示される道路橋の供用年数は一般に100年とされており、材齢100年におけるクリープ係数の推定値を試算すると材齢10,000日のクリープ係数よりも14~16%大きくなった。

## 4. 乾燥収縮ひずみ (シリーズII)

### 4.1 実験方法

乾燥収縮ひずみに関する実験は、100×100×400mmの供試体を材齢7日から気中乾燥するJIS A 1129に準拠した試験と、150×150×500mmの供試体を材齢3日から気中乾燥し、材齢910日まで実施した乾燥収縮試験の2つの方法で行った。

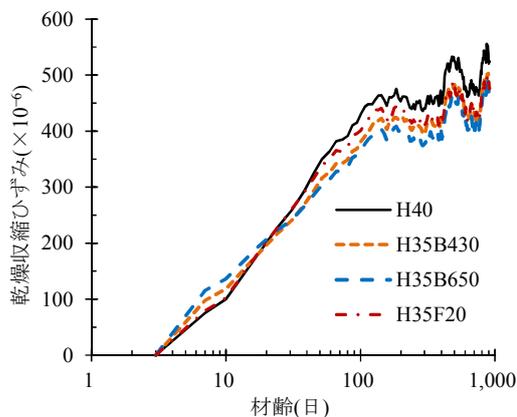


図-10 乾燥収縮試験によって得られた乾燥収縮ひずみ

## 4.2 実験結果

JIS A 1129 による 6 ヶ月乾燥後の収縮ひずみは、H40 において  $742 \times 10^{-6}$ 、H35B430 において  $649 \times 10^{-6}$ 、H35B650 において  $631 \times 10^{-6}$ 、H35F20 において  $589 \times 10^{-6}$  であった。H35B430、H35B650 及び H35F20 の乾燥収縮ひずみは、H40 と比較して同程度か小さくなることが認められた。

150×150×500mm の乾燥収縮試験によって得られた材齢 910 日までの乾燥収縮ひずみを図-10 に示す。この結果、H35B430、H35B650 及び H35F20 の乾燥収縮ひずみは、H40 と比較して同程度か小さくなることが認められた。

## 5. まとめ

水結合材比を 35～40% とし、早強ポルトランドセメントの 30% を高炉スラグ微粉末 4000 で、50% を高炉スラグ微粉末 6000 で、20% をフライアッシュⅡ種で置換したコンクリートの材料特性を把握するための実験を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 混和材を用いたコンクリートは、水結合材比が同一の場合、混和材の置換率が高いほど初期材齢の圧縮強度は低下したが、長期材齢では早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等の圧縮強度となることが認められた。
- (2) 混和材を用いたコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係、圧縮強度とヤング係数の関係は、コンクリート標準示方書に示される関係式の値と同様の傾向が認められた。
- (3) 混和材を用いたコンクリートのクリープ試験を材齢 910 日まで実施し、得られたクリープひずみから求めた材齢 10,000 日までのクリープ係数の推定値は、混和材の種類や載荷材齢の違いにかかわらず、道路橋示方書に示されるクリープ係数の設計値と比較して同程度か小さくなる傾向が認められた。
- (4) 混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみは、初期材齢の圧縮強度が同程度の早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して同程度か小さくなる傾向が認められた。

## 参考文献

- 1) 石井豪, 中村英佑, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートの強度発現と自己収縮特性への温度履歴の影響, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.59-64, 2014
- 2) 中村英佑, 石井豪, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートのクリープ・収縮に関する実験的研究, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.3, pp.54-60, 2014
- 3) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.34-45, 2013
- 4) 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), pp.36-44, 2012

## 付録－3 混和材を用いたコンクリートの耐久性

### 1. 概要

混和材を用いたコンクリートの耐久性のうち、中性化、塩化物イオン浸透及び凍結融解に対する抵抗性について、各種試験を行って検討した。また、混和材の使用によるアルカリシリカ反応の抑制効果について、既往文献の調査を行った。

### 2. 中性化に対する抵抗性

混和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、暴露試験を行って検討した<sup>1)</sup>。つくば、新潟、沖縄にコンクリート供試体を暴露して20ヶ月後に回収し、中性化深さを測定した。また、暴露試験の結果をもとに100年後の中性化深さを推定し、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと混和材を用いたコンクリートの推定結果を比較した。

早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末6000で置換したコンクリートの中性化に対する抵抗性については、過去にも暴露試験を行って検討した結果が報告されている。文献2)では、新潟県の海岸線付近にコンクリート供試体を10年間暴露し、中性化深さの測定を行っている。この結果、高炉スラグ微粉末6000を用いたコンクリートの中性化深さは暴露10年後でも1mm程度に留まったことが報告されている。この付録では、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末4000、高炉スラグ微粉末6000、フライアッシュⅡ種で置換した3種類の混和材を用いたコンクリートと早強ポルトランドセメント単味のコンクリートを対象として、暴露試験によって中性化に対する抵抗性について検討した結果を示す。

#### 2.1 実験方法

##### 2.1.1 コンクリートの配合と基礎物性

コンクリートの配合と基礎物性を表－1 に示す。配合は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリート (H40)、早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換したコンクリート (H40B430)、50%を高炉スラグ微粉末6000で置換したコンクリート (H40B650)、20%をフライアッシュⅡ種で置換したコンクリート (H40F20) の4種類とした。混和材の使用が耐久性に与える影響を検討することを目的としたため、全配合において、水結合材比 (W/B) を40%、単位水量 (W) を165kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量 (G) を968kg/m<sup>3</sup>に統一した。

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 材齢 28 日 (N/mm <sup>2</sup> )		
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA								S	G
			HPC	BS4	BS6	FA						
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	11.5	4.6	22.9	59.8
H40B430			289 (70%)	124 (30%)	—	—	749		10.5	3.8	23.7	57.9
H40B650			206 (50%)	—	206 (50%)	—	745		14.5	4.8	23.2	57.2
H40F20			330 (80%)	—	—	83 (20%)	734		14.0	4.5	21.6	49.9

※HPC: 早強ポルトランドセメント (密度 = 3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,490cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000 (密度 = 2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,440cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub> = 2.19% (無水せつこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000 (密度 = 2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 5,950cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub> = 2.85% (無水せつこう添加)), FA: フライアッシュ II 種 (密度 = 2.30g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,280cm<sup>2</sup>/g), 単位量の ( ) 内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示

※S: 細骨材 (静岡県掛川産陸砂, 密度 = 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 2.23%), G: 粗骨材 (茨城県笠間産砕石 6 号 (密度 = 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 0.43%) と 5 号 (密度 = 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 0.46%) を均等に混合)

※化学混和剤: スランプ 12 ± 2.5cm, 空気量 4.5 ± 1.5%となるよう高性能 AE 減水剤と空気連行剤の使用量を調整

### 2.1.2 暴露試験の概要

供試体の形状を図-1 に示す。同図には、中性化深さの測定位置もあわせて示す。供試体は 100×100×200mm の角柱供試体である。コンクリート打込み直後から封緘状態に保ち、翌日に脱型して、材齢 28 日まで標準養生を行った。その後、材齢 44~69 日で、つくば、新潟、沖縄の各暴露場に供試体を移設して暴露試験を開始した。供試体の暴露面は実際のコンクリート構造物の脱型後の状態を模擬するため、コンクリート打込み方向に対して片側の側面とした。暴露面以外の供試体表面を塗装材料でシールし、暴露面以外からの中性化の進行を防止した。

暴露 20 ヶ月後に供試体を回収して、中性化深さを測定した。中性化深さは、JIS A 1152 を参考に、端部から 40mm の位置で供試体を割裂して割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、供試体の表面から赤紫色を呈した位置までの距離を等間隔に 9 点で測定して得られた平均値とした。

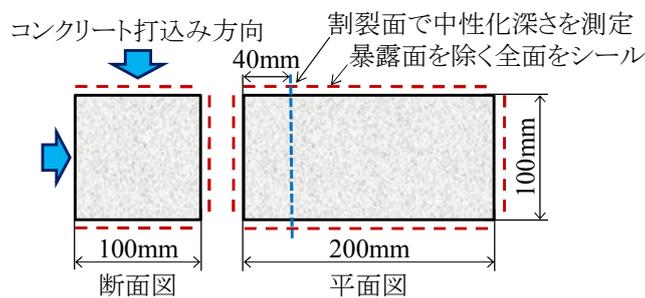


図-1 供試体の形状

つくば、新潟、沖縄の暴露試験の実施状況と各暴露場付近の気象データ<sup>3)</sup>を表-2に示す。つくばの暴露場は内陸部に位置するため塩害環境にはないが、新潟と沖縄の暴露場は海岸線近くの厳しい塩害環境下にある。また、新潟の暴露場は海中の消波ブロックや波打ち際で生成された海水の飛沫のみで飛来塩分が供給される環境であるが、沖縄の暴露場は天候によっては海水が供試体に直接降りかかる場合もある環境である。

表-2 暴露試験の実施状況と気象データ

つくば	新潟	沖縄
平均気温 : 15.5℃ 平均湿度 : 72.9% 積算降水量 : 2,580mm	平均気温 : 14.8℃ 平均湿度 : 77.3% 積算降水量 : 4,830mm	平均気温 : 23.3℃ 平均湿度 : 75.5% 積算降水量 : 4,085mm
		

※気象データは暴露場の最寄りの気象観測地点（つくば（館野）、高田、名護）の暴露期間（2012年2月～2013年10月）の値<sup>3)</sup>を記載

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 暴露試験による中性化深さの測定結果と将来予測

暴露20ヶ月後の中性化深さの測定値と、この測定値を用いて求めた100年後の中性化深さの推定値を図-2に示す。100年後の中性化深さの推定値は、コンクリートの中性化が暴露試験の実施期間の平方根に比例して進行すると仮定して、暴露20ヶ月後の中性化深さの測定値から式(1)を用いて求めた。

$$C_{estimated} = C_{measured} \sqrt{\frac{t_{estimated}}{t_{test}}} \quad (1)$$

ここに、 $C_{estimated}$  : 100年後の中性化深さの推定値 (mm),  $C_{measured}$  : 暴露20ヶ月後の中性化深さの測定値 (mm),  $t_{estimated}$  : 中性化深さを推定するコンクリートの材齢 (= 100年),  $t_{test}$  : 暴露試験の実施期間 (= 20/12年) である。

暴露20ヶ月後の中性化深さの測定値は、いずれの暴露環境においても、H40よりもH40B430, H40B650, H40F20で大きくなった。中性化深さの測定値は特にH40F20で大きくなったが最大でも0.6mm程度であり、100年後の中性化深さの推定値は5mm以下であった。混和材を用いたコンクリートでは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも中性化深さが大きくなるが、適切なかぶり確保することによって、中性化による鋼材腐食の発生を防止することができると考えられる。

また、暴露環境の違いと中性化深さの測定値には必ずしも明確な関係はみられず、同一配合の供試体での

中性化深さの測定値の差は最大でも 0.2mm 程度であった。いずれの暴露環境も雨掛かりのある屋外であったこと、中性化深さの測定値自体が小さかったこと等から、今回の暴露試験の結果の範囲内では、暴露環境の違いによる中性化深さの差が明確には現れなかったと考えられる。

次に、今回の暴露試験で得られた中性化速度係数をコンクリート標準示方書<sup>4)</sup>の式(2)、(3)を用いて求めた推定値と比較した。

$$\alpha_k = -3.57 + 9.0(W/B') \quad (2)$$

$$B' = C_p + k \cdot A_d \quad (3)$$

ここに、 $\alpha$  : 中性化速度係数 (mm/√年),  $W/B'$  : 有効水結合材比,  $C$  : 単位セメント量 (kg/m<sup>3</sup>),  $k$  : 混和材の種類によって定まる定数 (高炉スラグ微粉末 :  $k=0.7$ , フライアッシュ :  $k=0$ ),  $A_d$  : 単位混和材量 (kg/m<sup>3</sup>) である。

暴露試験と式(2)から得られた中性化速度係数を図-3 に示す。混和材を用いたコンクリートでは、暴露試験の中性化速度係数が式(2)の推定値を下回った。表-1 の配合のコンクリートにおいては、式(2)によって実環境における中性化速度係数を安全側に評価できると考えられる。ただし、混和材の置換率を大きくした場合に、暴露試験の結果が式(2)の推定値を上回る結果となったことが報告されており<sup>5)</sup>、混和材の置換率の高いコンクリートでは式(2)の結果を適用できない場合があることに留意する必要がある。

### 3. 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

混和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、暴露試験と室内試験を行って検討した。暴露試験では、新潟と沖縄の沿岸部にコンクリート供試体を暴露して20ヶ月後に回収し、塩化物イオン濃度を測定した<sup>1)</sup>。また、暴露試験の結果をもとにコンクリート内部の塩化物イオンの浸透量を推定し、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン濃度を

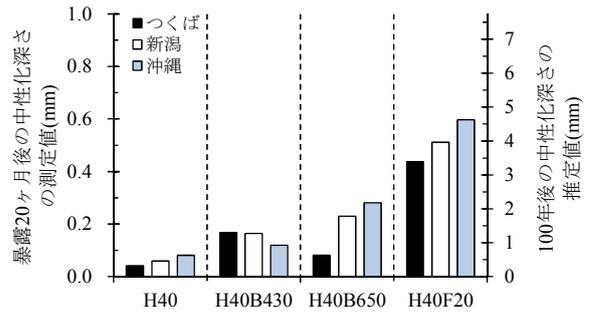


図-2 暴露 20 ヶ月後の中性化深さの測定値と 100 年後の中性化深さの推定値

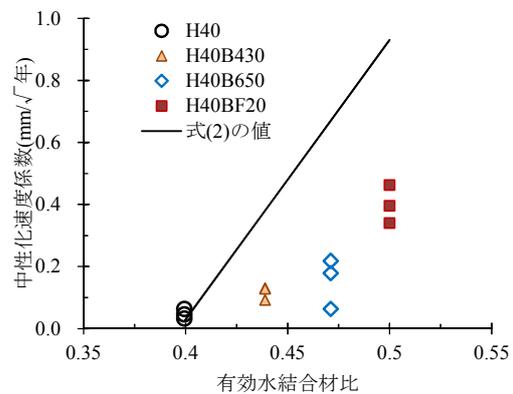


図-3 有効水結合材比と中性化速度係数

比較した。室内試験では、暴露試験用の供試体と同時に製作した室内試験用の供試体を用いて、浸せき試験（JSCE-G 572）を行った。

高炉スラグ微粉末6000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、過去にも暴露試験を行って検討した結果が報告されている<sup>2), 6)</sup>。文献2)では、新潟県の海岸線付近に、コンクリート供試体を10年間暴露し、塩化物イオン濃度の測定を行っている。また、文献6)では、沖縄県の海岸線付近に、コンクリート供試体を5年間暴露し、塩化物イオン濃度の測定を行っている。これらの結果、高炉スラグ微粉末6000を用いたコンクリートの塩化物イオンの浸透深さは早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも小さくなったことが報告されている。この付録では、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末4000、高炉スラグ微粉末6000、フライアッシュⅡ種で置換した3種類のコンクリートと早強ポルトランドセメント単味のコンクリートを対象として、暴露試験と室内試験によって塩化物イオン浸透に対する抵抗性について検討した結果を示す。

### 3.1 実験方法

#### 3.1.1 暴露試験の概要

供試体は、中性化に対する抵抗性の検討に用いた供試体と同一のものである。中性化深さの測定に用いなかった部分において塩化物イオン濃度を測定した。塩化物イオン濃度の測定に用いた試料の採取位置を図-4に示す。

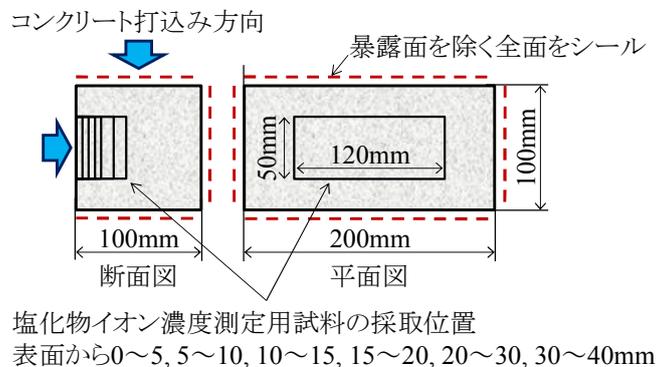


図-4 塩化物イオン濃度の測定に用いた試料の採取位置

暴露 20 ヶ月後に供試体を回収して、塩化物イオン濃度を測定した。塩化物イオン濃度の測定は、新潟と沖縄に暴露した供試体の表面から 0～5, 5～10, 10～15, 15～20, 20～30, 30～40mm の位置で試料を採取し、JIS A 1154（電位差滴定法）に準拠して行った。

#### 3.1.2 浸せき試験の概要

浸せき試験に用いた供試体は、 $\phi 100 \times 150\text{mm}$  の円柱供試体である。 $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の円柱供試体を暴露

試験用の供試体と同様に材齢 28 日まで標準養生した後、両端部を切断して高さ 150mm とした。その後、片側の切断面を試験面として試験面以外の供試体表面をエポキシ樹脂塗料でシールし、JSCE-G 572 に準拠して濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液に 20 ヶ月間浸せきした。塩化物イオン濃度の測定は、供試体の表面から厚さ 10mm ごとに試料を採取し、JIS A 1154（電位差滴定法）に準拠して行った。

## 3.2 実験結果

### 3.2.1 暴露試験の結果と塩化物イオン濃度の将来予測

新潟と沖縄に 20 ヶ月間暴露した供試体の塩化物イオン濃度の分布を図-5, 6 に示す。供試体の表面付近（表面からの距離が 0~5mm の位置）の塩化物イオン濃度は、H40 よりも H40B430 と H40B650 で大きく、H40F20 で同等か小さくなった。H40B430 と H40B650 では、高炉スラグ微粉末を用いることによって塩化物イオンの固定化能力が高まり、供試体の表面付近の塩化物イオン濃度が高くなったためと考えられる。一方、表面からの距離が 5~20mm の位置の塩化物イオン濃度は、H40 よりも H40B430, H40B650, H40F20 で小さくなった。混和材を用いることによってコンクリート内部への塩化物イオンの浸透が抑制されたためと考えられる。

また、新潟と沖縄で供試体内部の塩化物イオン濃度を比較すると、全ての配合において沖縄で供試体内部の塩化物イオン濃度が大きくなった。この傾向は過去に同暴露場で行われた暴露試験結果<sup>7)</sup>でも確認されており、新潟と沖縄の暴露場で塩化物イオンの供給量に差が生じたためではないかと推察される。

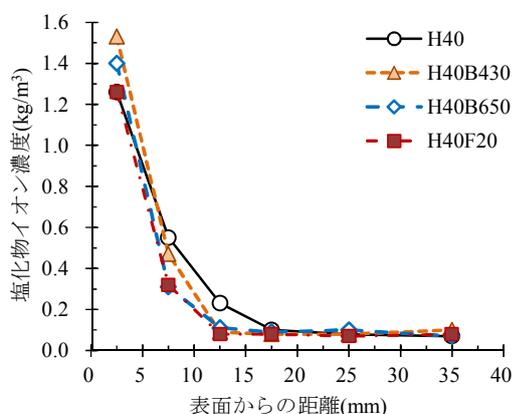


図-5 塩化物イオン濃度の分布（新潟）

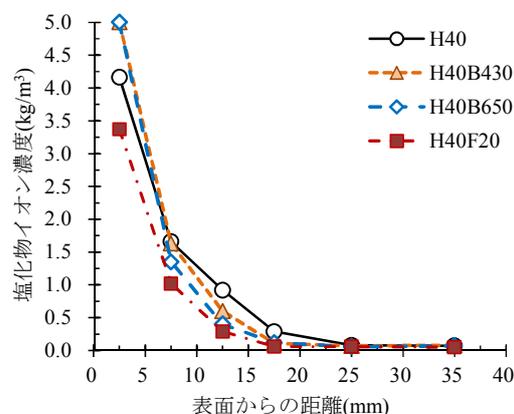
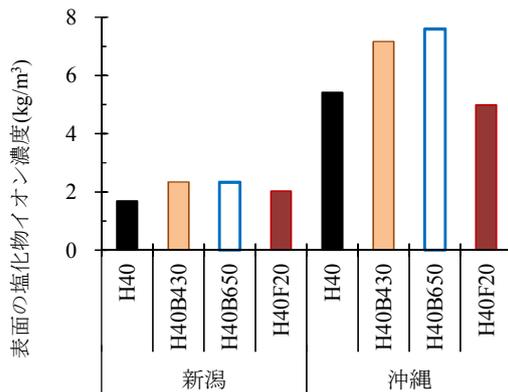


図-6 塩化物イオン濃度の分布（沖縄）

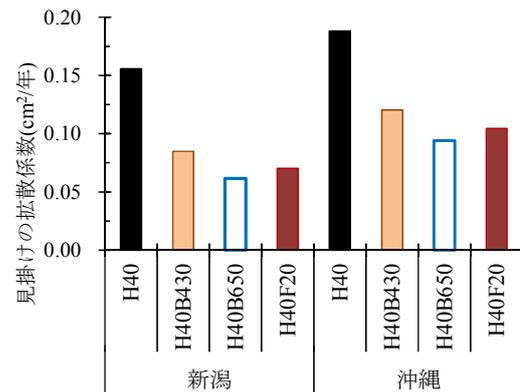
図-5, 6 の塩化物イオン濃度の分布と式(4)を用いて求めた供試体の表面の塩化物イオン濃度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数を図-7, 8 に示す。

$$C(x,t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right\} + C_i \quad (4)$$

ここに、 $x$ ：供試体の表面からの距離 (mm)、 $t$ ：暴露試験期間 (年)、 $C(x,t)$ ：距離 $x$ と暴露試験期間 $t$ での塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $C_0$ ：供試体の表面の塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $C_i$ ：初期含有塩化物イオン濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $D_{ap}$ ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $\operatorname{erf}$ ：誤差関数である。



図一七 表面の塩化物イオン濃度 (暴露試験)



図一八 見掛けの拡散係数 (暴露試験)

供試体の表面の塩化物イオン濃度は、H40 よりも H40B430, H40B650 で大きく、新潟と沖縄で比較すると、全ての配合において沖縄で塩化物イオン濃度が大きくなった。この傾向は、図一五、六に示した塩化物イオン濃度の分布とも同傾向であった。また、見掛けの拡散係数は、暴露環境の違いにかかわらず、H40 よりも混和材を用いた供試体で小さく、H40B650 で最も小さくなった。混和材を用いることによって塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上したことが認められた。

次に、見掛けの拡散係数と式(4)を用いて、コンクリート内部の塩化物イオンの浸透量を推定した。道路橋示方書<sup>8)</sup>では、沖縄県や日本海側沿岸部等の塩害の影響を受ける地域のかぶりの最小値を 70mm 以上とすることとしているため、ここではコンクリート表面から 70mm の位置の塩化物イオン濃度を推定した。見掛けの拡散係数については、混和材の使用の有無による大小関係が新潟と沖縄で同傾向であり、沖縄で若干小さくなったため、ここでは安全側の評価とするため沖縄に暴露した供試体から得られた値を用いることとした。また、供試体の表面の塩化物イオン濃度については、新潟と沖縄に暴露した供試体で大幅に異なり、環境条件や暴露期間によって差が生じる可能性が高いと考えられたため、国内の飛来塩分量の測定結果<sup>9)</sup>から得られた式(5)を用いて求めた。

$$C_0 = 1.2C_{air}^{0.4} = 1.2(C_1 d^{-0.6})^{0.4} \quad (5)$$

ここに、 $C_0$  : 供試体の表面の塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $C_{air}$  : 飛来塩分量 ( $\text{mdd} = \text{mg/dm}^2/\text{day}$ )、 $C_1$  : 1km 換算飛来塩分量 (=  $1.0\text{mdd} \cdot \text{NaCl}$ , 地域区分 A (沖縄) で台風の頻度が高いことを考慮して設定した値)、 $d$  : 海岸線からの距離 (=  $0.001\text{km}$ , 海岸線上の場合) である。

コンクリート表面から 70mm の位置の塩化物イオン濃度の推定結果を図-9 に示す。ここでは、鋼材腐食発生限界濃度の目安として塩化物イオン濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  を点線で示した。

塩化物イオン濃度の推定値は、H40 よりも混和材を用いたコンクリートで小さくなり、特に H40B650 で最も小さくなった。100 年後の塩化物イオン濃度を比較すると、混和材を用いたコンクリートでは、H40 の 45 ~ 60% になった。見掛けの拡散係数の傾向と同様に、混和材を用いることによって塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上したためと考えられる。

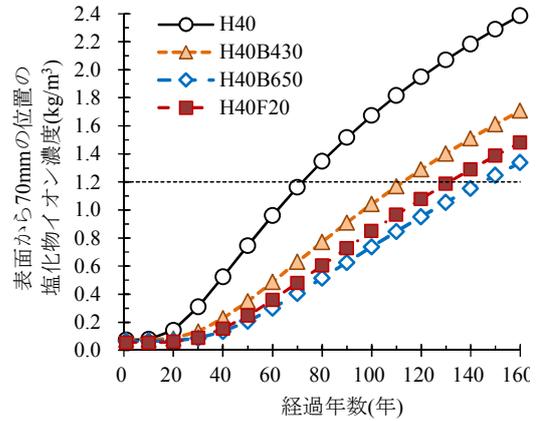


図-9 塩化物イオン濃度の推定結果

次に、この暴露試験で得られた見掛けの拡散係数を既存の提案式を用いて求めた推定値と比較した。提案式は、文献 10) の普通ポルトランドセメントを用いた場合の式(6)、高炉セメント B 種相当を用いた場合の式(7)、フライアッシュセメント B 種相当を用いた場合の式(8)、文献 11) の早強ポルトランドセメント単味のコンクリート供試体の暴露試験結果から得られた式(9)とした。ただし、いずれの提案式においても、ここでは水セメント比を水結合材比に読み替えて見掛けの拡散係数を求めた。

$$\log_{10} D_{ap(N)} = 3.0(W/B) - 1.8 \quad (6)$$

$$\log_{10} D_{ap(BB)} = 3.2(W/B) - 2.4 \quad (7)$$

$$\log_{10} D_{ap(FB)} = 3.0(W/B) - 1.9 \quad (8)$$

$$D_{ap(H)} = 15.768 \cdot e^{-1.6(B/W)} \quad (9)$$

ここに、 $W/B$  : 水結合材比、 $D_{ap(N)}$  : 普通ポルトランドセメントを用いた場合の見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $D_{ap(BB)}$  : 高炉セメント B 種相当を用いた場合の見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $D_{ap(FB)}$  : フライアッシュセメント B 種相当を用いた場合の見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $D_{ap(H)}$  : 早強ポルトランドセメント単味のコンクリート供試体の暴露試験結果から得られた見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ ) である。

暴露試験及び既存の提案式から得られた見掛けの拡散係数を図-10 に示す。前述したように、暴露試験から得られた見掛けの拡散係数は混和材を用いたコンクリートで小さくなる傾向にあり、H40B430、H40B650、H40F20 の見掛けの拡散係数は式(7)の高炉セメント B 種相当を用いた場合の見掛けの拡散係数の推定値と同

程度となった。また、見掛けの拡散係数の推定値に着目すると、高炉セメントB種相当あるいはフライアッシュセメントB種相当を用いた場合の見掛けの拡散係数は、早強ポルトランドセメントあるいは普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも小さくなる傾向にあった。暴露試験の結果と既存の提案式のいずれも混和材の使用によって塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上したことが認められた。

### 3.2.2 浸せき試験の結果

濃度 10%の塩化ナトリウム水溶液に 20 ヶ月間浸せきした供試体の塩化物イオン濃度の分布を図-11 に示す。暴露試験の結果と同様に、浸せき試験の結果においても、表面からの距離が 10~40mm の位置の塩化物イオン濃度は H40 よりも H40B430, H40B650, H40F20 で小さくなり、混和材の使用によって塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上したことが認められた。

また、浸せき試験を行った供試体の塩化物イオン濃度は、新潟と沖縄に暴露した供試体よりも大幅に大きくなった。この原因は、この浸せき試験で用いた塩化ナトリウム水溶液の濃度が海水よりも高かったこと、浸せき試験では塩水中に供試体を常時浸せきして塩化物イオンを浸透させたこと等から、供試体内部への塩化物イオンの浸透量が増加したためと考えられる。

図-11 の塩化物イオン濃度の分布と式(4)を用いて求めた塩化物イオンの見掛けの拡散係数を図-12 に示す。

いずれの結果も新潟と沖縄に暴露した供試体と同様の傾向が認められた。すなわち、混和材を用いたコンクリートでは、見掛けの拡散係数が早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも小さくなった。浸せき試験でも、暴露試験と同様に、混和材の使用の有無による塩化物イオン浸透に対する抵抗性の差を評価することができると思われる。

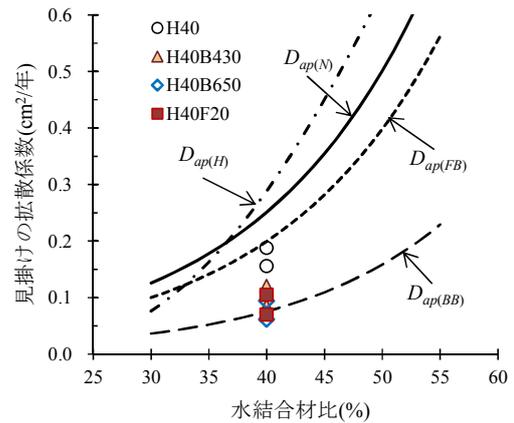


図-10 水結合材比と見掛けの拡散係数

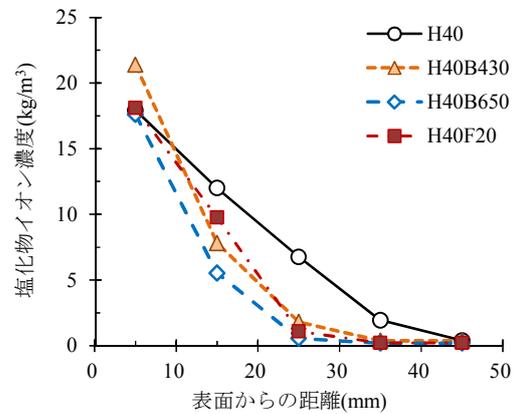


図-11 塩化物イオン濃度の分布 (浸せき試験)

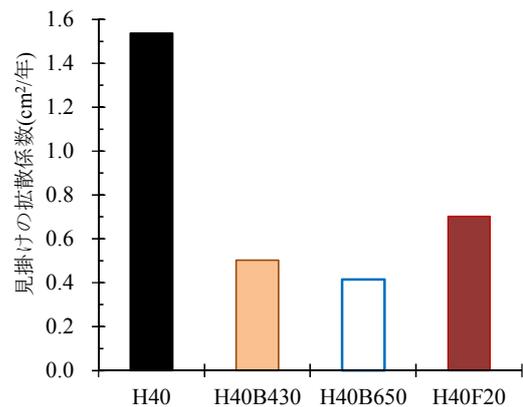


図-12 見掛けの拡散係数 (浸せき試験)

## 4. 凍結融解に対する抵抗性

### 4.1 実験方法

混和材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性を把握するため、凍結融解試験（JIS A 1148 の A 法）を行った。コンクリートの配合と基礎物性を表-3 に示す。配合は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリート（H40）、早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換したコンクリート（H40B430）、50%を高炉スラグ微粉末6000で置換したコンクリート（H40B650）、20%をフライアッシュII種で置換したコンクリート（H40F20）の4種類とした。混和材の使用が耐久性に与える影響を検討することを目的としたため、全配合において、水結合材比（W/B）を40%、単位水量（W）を165kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量（G）を968kg/m<sup>3</sup>に統一した。練上がり直後のフレッシュコンクリートの空気量は4.0～4.4%の範囲にあった。

コンクリート打込み直後から封緘状態に保ち、翌日に脱型して、材齢28日まで標準養生した後、凍結融解試験を開始した。

表-3 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 材齢28日 (N/mm <sup>2</sup> )	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S					G
			HPC	BS4	BS6	FA						
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	11.5	4.4	21.0	66.4
H40B430			289 (70%)	124 (30%)	—	—	749		11.5	4.3	21.0	61.9
H40B650			206 (50%)	—	206 (50%)	—	745		9.0	4.1	20.9	66.3
H40F20			330 (80%)	—	—	83 (20%)	734		8.5	4.0	21.3	57.2

※HPC: 早強ポルトランドセメント (密度 = 3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,450cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末4000 (密度 = 2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,340cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub> = 2.05% (無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末6000 (密度 = 2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 5,940cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub> = 2.96% (無水せっこう添加)), FA: フライアッシュII種 (密度 = 2.30g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,190cm<sup>2</sup>/g), 単位量の ( ) 内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示

※S: 細骨材 (静岡県掛川産陸砂, 密度 = 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 2.23%), G: 粗骨材 (茨城県笠間産砕石6号 (密度 = 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 0.43%) と5号 (密度 = 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 0.46%) を均等に混合)

※化学混和剤: 空気量4.0～4.5%となるよう高性能AE減水剤と空気連行剤の使用量を調整

### 4.2 実験結果

凍結融解試験による相対動弾性係数と質量変化率を図-13に、凍結融解300サイクル後の供試体の状況を写真-1に示す。混和材を用いたコンクリートの相対動弾性係数と質量変化率は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等であった。また、相対動弾性係数は100%前後で推移しており、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、凍結融解に対して十分な抵抗性を確保できることが認められた。

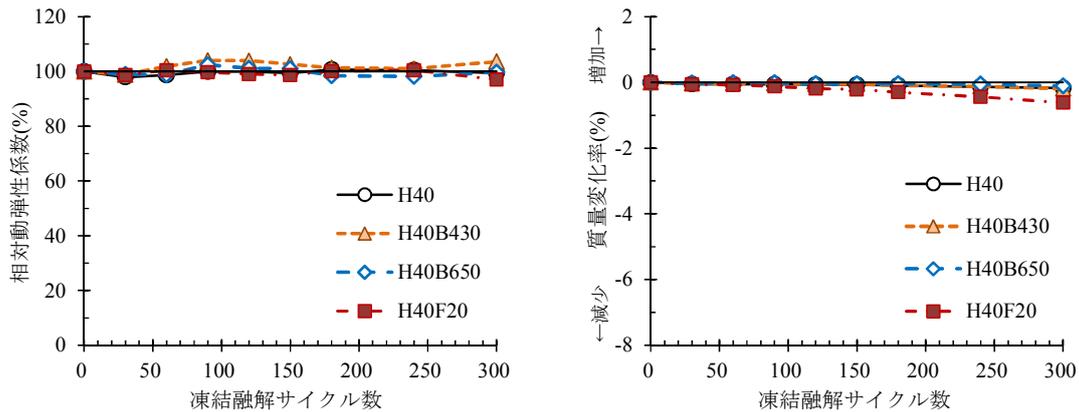


図-13 相対動弾性係数と質量変化率

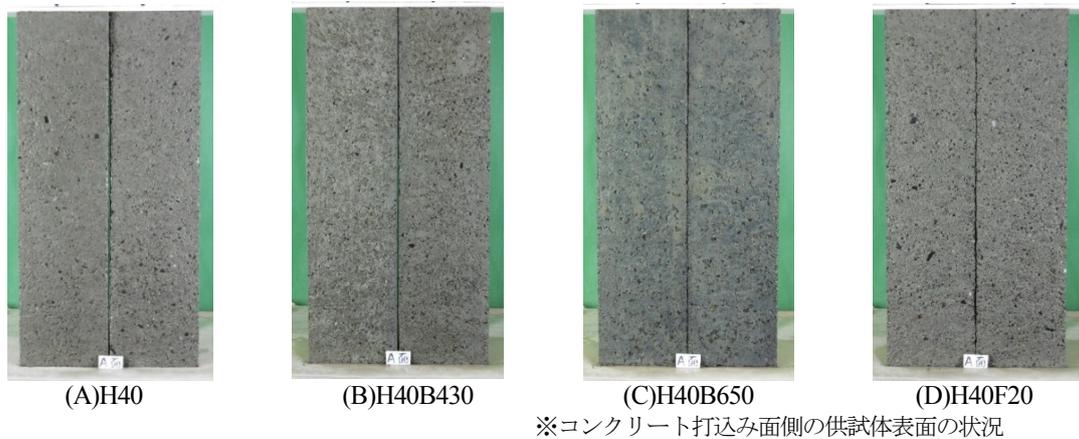


写真-1 凍結融解 300 サイクル後の供試体の状況

## 5. アルカリシリカ反応の抑制効果に関する検討事例

混和材の使用によるアルカリシリカ反応の抑制効果について、既往文献の調査を行って得られた知見を整理した。文献調査の範囲は、過去 10 年間の土木学会、日本コンクリート工学会及びプレストレストコンクリート工学会より刊行された文献とした。

文献調査結果の一覧を表-4, 5 に示す。混和材を用いたコンクリートは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの反応によって細孔溶液中の水酸化物イオンの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効果が高いことが報告されている。

文献調査の結果によると、混和材を用いることでアルカリシリカ反応の抑制効果が得られるとの事例が多く報告されていたが、試験条件によってはアルカリシリカ反応を抑制できない事例も報告されていた。したがって、使用する骨材やその他の条件によって効果が異なる可能性もあるため、混和材の使用によるアルカリシリカ反応の抑制効果を期待する場合には、事前の試験等によってその効果を確認する必要がある。

表一4 高炉スラグ微粉末の使用によるアルカリシリカ反応の抑制効果に関する文献調査結果一覧

研究事例	内容	結果
事例1 松村ほか <sup>12)</sup>	普通及び早強ポルトランドセメントの25, 50%を高炉スラグ微粉末6000で置換し、2種類の反応性骨材（札幌近郊産安山岩砕石、常願寺川産川砂利）を使用した試験体を用いて、デンマーク法による促進膨張試験を行っている。	促進膨張試験の結果、反応性骨材及びセメントの種類に関係なく、高炉スラグ微粉末の置換率が高いほどモルタルの膨張量は減少し、置換率50%の試験体ではアルカリシリカ反応を完全に抑制できた。
事例2 吉田ほか <sup>13)</sup>	水結合材比を35, 50%とし、早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換し、反応性骨材（札幌近郊産安山岩砕砂）を使用した試験体を用いて、3種類の促進モルタルバー法試験（JIS A 1146, デンマーク法, ASTM C 1260）による膨張量の測定を行っている。	3種類の促進モルタルバー法試験の結果、高炉スラグ微粉末の置換率50%の試験体では、膨張量が低減され、アルカリシリカ反応を効果的に抑制できた。
事例3 石井ほか <sup>14), 15)</sup>	早強ポルトランドセメントの50%を高炉スラグ微粉末6000で置換し、NaClを等価Na <sub>2</sub> O量で10kg/m <sup>3</sup> を添加した反応性骨材を使用したプレテンションけたを用いて、屋外暴露試験を行い、膨張量や桁のそり量等の測定を行っている。	暴露試験の結果、暴露期間8年8ヶ月後のけたの側面上部の膨張率及びけたのそり量は、高炉スラグ微粉末の置換率50%のけたでは早強ポルトランドセメント単味のけたと比較して1/3程度であった。
事例4 松元ほか <sup>16), 17)</sup>	普通ポルトランドセメントの30, 50, 70%を高炉スラグ微粉末4000で置換し、反応性骨材（鹿児島産砕石）の混入率やNaClの添加率を変えた試験体を用いて、モルタルバー法試験（JIS A 1146）を行っている。	モルタルバー法試験の結果、普通ポルトランドセメント単味の試験体では、13週目の膨張率が0.3%であったが、高炉スラグ4000で置換した試験体では、いずれも0.02%程度であった。高炉スラグ微粉末の置換率30%でアルカリシリカ反応を抑制できた。
事例5 小山田ほか <sup>18)</sup>	水結合材比を25, 35, 45%とし、早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末の4000で置換し、パイレックスガラスを骨材に使用した試験体を用いて、モルタルバー法試験（JIS A 1146）を行っている。	モルタルバー法試験の結果、早強ポルトランドセメント単味の試験体では、13週目の膨張率が0.02程度であったが、高炉スラグ微粉末4000で置換した試験体では膨張を示すことがなく、アルカリシリカ反応を抑制できた。
事例6 中島ほか <sup>19)</sup>	普通ポルトランドセメントの42%を高炉スラグ微粉末4000で置換し、北陸地方の代表的な7種類の骨材を使用した試験体を用いて、モルタルバー法試験（JIS A 1146, ASTM C 1260）を行っている。	モルタルバー法試験（JIS A 1146）の結果、高炉スラグ微粉末4000で置換した試験体では、一部の骨材で6ヶ月目の膨張率が0.171%となり、「無害でない」と判定された。

表一5 フライアッシュの使用によるアルカリシリカ反応の抑制効果に関する文献調査結果一覧

研究事例	内容	結果
事例1 吉田ほか <sup>13)</sup>	水結合材比を35, 50%とし、早強ポルトランドセメントの10, 20%を分級フライアッシュ（JIS I 種灰相当品）で置換し、反応性骨材（札幌近郊産安山岩砕砂）を使用した試験体を用いて、3種類の促進モルタルバー法（JIS A 1146, デンマーク法, ASTM C 1260）による膨張量の測定を行っている。	3種類の促進モルタルバー法試験の結果、フライアッシュの置換率20%の試験体では、膨張量の低減効果が明確に認められ、アルカリシリカ反応を効果的に抑制できた。
事例2 西澤ほか <sup>20)</sup>	普通ポルトランドセメントの5, 10, 15, 20%を分級フライアッシュ（JIS I 種灰相当品）で置換し、2種類の反応性骨材（能登半島産安山岩砕石、常願寺川産川砂利）を使用した試験体を用いて、デンマーク法による促進膨張試験を行っている。	促進膨張試験の結果、反応性骨材の種類にかかわらず、フライアッシュの置換率10, 15%の試験体では、遅れて膨張が発生したが、20%の試験体では膨張が完全に抑制され、アルカリシリカ反応を抑制できた。
事例3 宮野ほか <sup>21)</sup>	水結合材比を45%とし、普通ポルトランドセメントの20%をフライアッシュ（JIS II 種相当品）で置換し、反応性骨材を使用した供試体を製作して、蒸気養生を行った後、材齢14日に促進環境（40℃, 100%R.H.）に静置し、膨張量の測定を行っている。	膨張量を測定した結果、等価アルカリ量8kg/m <sup>3</sup> において普通ポルトランドセメント単味の供試体では、材齢200日で0.4%の膨張がみられたが、フライアッシュの置換率20%の供試体では、膨張を抑制できた。

## 6. まとめ

混和材を用いたコンクリートの耐久性のうち、中性化、塩化物イオン浸透及び凍結融解に対する抵抗性について、暴露試験や室内試験を行って検討した。また、混和材の使用によるアルカリシリカ反応の抑制効果について、既往文献の調査を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 混和材を用いたコンクリートの中性化深さは、暴露環境の違いにかかわらず、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも大きくなった。ただし、暴露試験の結果から算出した 100 年後の中性化深さの推定値は最大でも 5mm 以下であり、適切なかぶりを確保することによって中性化による鋼材腐食の発生を防止することができることが明らかになった。また、コンクリート標準示方書に示される推定式から求めた中性化速度係数の計算値は暴露試験の結果よりも大きく、今回の暴露試験の範囲内では中性化速度係数を安全側に評価できることが認められた。
- (2) 暴露試験及び浸せき試験において、混和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は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも小さくなり、混和材の使用によって塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上することが認められた。また、暴露試験から得られた見掛けの拡散係数を用いてコンクリート内部の塩化物イオンの浸透量を推定した結果、混和材を用いたコンクリートの塩化物イオンの浸透量は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも小さくなることが認められた。
- (3) 凍結融解試験の結果、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、混和材を用いたコンクリートは早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等の凍結融解に対する抵抗性を有することが認められた。
- (4) アルカリシリカ反応の抑制効果に関する文献調査の結果、混和材の使用によってアルカリシリカ反応の抑制効果が得られるとの事例が多くあったが、試験条件によってはアルカリシリカ反応を抑制できない事例もあった。

## 参考文献

- 1) 中村英佑, 石井豪, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に関する実験的研究, 第 23 回プレストレストコンクリート構造物の発展に関するシンポジウム論文集, pp.53-58, 2014
- 2) 谷口秀明, 渡辺博志, 手塚正道, 藤田学: 塩害暴露試験によるコンクリートの塩分浸透性の評価—その 2: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート—, プレストレストコンクリート, vol.55, No.1, pp.45-51, 2013
- 3) 気象庁ホームページ: 気象統計情報, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 4) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], pp.147-148, 2013
- 5) 中村英佑, 石井豪, 渡辺博志: 暴露試験と促進試験による混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.202-207, 2014
- 6) 松山高広, 石井豪: 高炉スラグ微粉末を用いた PC 構造物の耐久性向上技術 —高炉スラグ微粉末 6000

- の適用例一，プレストレストコンクリート，vol.52，No.2，pp.72-79，2010
- 7) 中村英佑，鈴木聡，古賀裕久，渡辺博志：5年間暴露したコンクリートのひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.871-876，2013
  - 8) 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），p.364，2012
  - 9) 建設省土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(II)ーコンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討ー，共同研究報告書第 258号，pp.11-16，2000
  - 10) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.154-156，2013
  - 11) 国土交通省土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(III)ーPC 橋の塩害対策に関する検討ー，共同研究報告書第 270号，pp.9-47，2001
  - 12) 松村将充，蔡云峰，養田理希，古川柳太郎：塩化ナトリウム溶液浸漬法による高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果の評価，土木学会第 60 回年次学術講演会，V-432，pp. 863-864，2005
  - 13) 吉田匠吾，板坂匠，Irfan PRASETIA，鳥居和之：PC 桁・PCa 製品の ASR 抑制対策としての分級フライアッシュの効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.985-990，2013
  - 14) 石井豪，宮島朗，松山高広，鳥居和之：高炉スラグ微粉末 6000 を用いた PC 梁の ASR 劣化抑制効果の報告，第 18 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.189-192，2009
  - 15) 國富康志，石井豪，辛軍青，鳥居和之：高炉スラグ微粉末 6000 を混和した PC 梁部材の ASR 劣化に対する耐荷力特性，第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.323-326，2015
  - 16) 松元淳一，武若耕司，樫原弘貴，前田聡：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの塩害と ASR の複合劣化に関する研究，土木学会第 60 回年次学術講演会，V-378，pp. 755-756，2005
  - 17) 松元淳一，武若耕司，山口明伸，梅木真理：塩害と ASR の複合劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp. 639-644，2008
  - 18) 小山田邦弘，藤原浩己，丸岡正知：各種リサイクル材料のコンクリートへの有効活用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp. 1915-1920，2009
  - 19) 中島隆甫，山戸博晃，久司成利，広野真一：北陸地方の代表的骨材に対するフライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果の比較検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1090-1095，2013
  - 20) 西澤彩，蟹谷真生，広野真一，鳥居和之：安山岩骨材のアルカリシリカ反応性の評価とフライアッシュによる ASR 抑制対策，土木学会第 67 回年次学術講演会，V-173，pp.345-346，2012
  - 21) 宮野暢紘，久保善司，坪倉幹浩：蒸気養生を施したフライアッシュ含有コンクリートの ASR 抑制効果の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1291-1296，2009

## 付録－4 混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ解析に用いる物性値

### 1. 概要

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の断熱温度上昇量や自己収縮ひび割れに関する調査事例は少なく、既往の技術指針<sup>1), 2)</sup>には温度ひび割れ解析に用いる物性値が示されていない。そこで、温度ひび割れ解析に用いる物性値を明らかにするため、各種実験<sup>3)~6)</sup>を行って検討した。

コンクリートの配合を表－1に示す。配合は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリート (H40)、早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換したコンクリート (H35B430)、50%を高炉スラグ微粉末6000で置換したコンクリート (H35B650)、20%をフライアッシュII種で置換したコンクリート (H35F20) の4種類とした。水結合材比は、現場打ちプレストレストコンクリート橋への適用を想定し、設計基準強度40N/mm<sup>2</sup>と材齢3日のプレストレス導入時強度30N/mm<sup>2</sup>が得られるように、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートで40%、混和材を用いたコンクリートで35%とした。また、混和材の使用が諸物性に与える影響を検討するため、全配合において、単位水量 (W) を165kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量 (G) を968kg/m<sup>3</sup>に統一し、スランプ12±2.5cm、空気量4.5±1.5%が概ね得られるように化学混和剤 (ポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤 (練上がり温度10℃と20℃は標準形、30℃は遅延形) 及びAE剤) の使用量を調整した。

表－1 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S	G
			HPC	BS4	BS6	FA		
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	700	
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	695	
H35F20			377 (80%)	—	—	94 (20%)	682	

※HPC: 早強ポルトランドセメント (密度 = 3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,580cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末4000 (密度 = 2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 3,810cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub> = 2.08% (無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末6000 (密度 = 2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 6,170cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub> = 2.51% (無水せっこう添加)), FA: フライアッシュII種 (密度 = 2.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 3,810cm<sup>2</sup>/g), 単位量の ( ) 内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示

※S: 細骨材 (静岡県掛川産陸砂, 密度 = 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 2.23%), G: 粗骨材 (茨城県笠間産砕石6号 (密度 = 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 0.43%) と5号 (密度 = 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 0.46%) を均等に混合)

※化学混和剤: 高性能AE減水剤と空気連行剤を使用

実験水準を表－2に示す。ここでは、強度発現、自己収縮、断熱温度上昇の特性について、シリーズIからシリーズIIIの3つの実験を行って検討した。コンクリート打込み後の養生は、シリーズIでは、練上がり

温度及び打込み後の温度が約 10℃、20℃、30℃に保たれるように封緘状態とした。シリーズIIでは、供試体の外面を発泡スチロールで覆い簡易的な断熱を行って、打込み後にマスコンクリートの水和発熱に起因したコンクリートを模擬した温度履歴（以下、高温履歴という）を与えた。シリーズIIIでは、オイル循環式の断熱温度上昇試験装置を用いて、打込み後に完全な断熱状態とした。

表-2 実験水準

シリーズ	練上がり温度	打込み後の養生	強度発現	自己収縮	断熱温度上昇
I	10℃	封緘 (10℃)	○		
	20℃	封緘 (20℃)	○	○	
	30℃	封緘 (30℃)	○		
II	10℃	簡易断熱 (高温履歴)		○	○
	20℃		○	○	○
	30℃			○	○
III	20℃	完全断熱			○

## 2. 強度発現

### 2.1 実験方法

圧縮強度をJIS A 1108, 引張強度をJIS A 1113, ヤング係数をJIS A 1149に準拠して測定した。供試体はφ100×200mm（圧縮強度, ヤング係数）及びφ150×150mm（引張強度）の円柱供試体である。供試体の製作はJIS A 1132に従うものとし、シリーズIIの養生方法についてはJASS 5 T-606に準拠して簡易断熱を行った。また、供試体の中心温度を測定し、式(1)を用いて求めた有効材齢から温度履歴が異なる場合の強度発現を検討した。さらに、硬化原点を把握するため、凝結時間試験をJIS A 1147に準拠して行った。

$$t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (1)$$

ここに、 $t'$  : 有効材齢 (日),  $\Delta t_i$  : 温度が  $T$  (°C) である期間の日数 (日),  $T_0$  : 1 (°C) である。

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 フレッシュ性状及び凝結特性

フレッシュ性状及び凝結特性の試験結果を表-3に示す。フレッシュ性状は空気量の調整を優先したため、一部の配合で所定のスランプ (12±2.5cm) を確保できない結果となった。また、H35F20の練上がり温度30℃では空気量が2.8%となり、所定の空気量 (4.5±1.5%) を確保することができなかった。凝結特性については、凝結時間の早い順にH35B650, H40, H35B430, H35F20となった。

表-3 フレッシュ性状及び凝結時間

配合	目標温度	スランブ (cm)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)	始発時間 (日)	終結時間 (日)
H40	10°C	11.0	4.4	11.7	0.35	0.52
	20°C	15.5	5.7	20.1	0.25	0.33
	30°C	14.5	5.7	31.6	0.21	0.25
H35B430	10°C	9.5	4.2	12.6	0.38	0.52
	20°C	12.0	4.5	21.0	0.25	0.33
	30°C	13.0	5.1	32.7	0.21	0.25
H35B650	10°C	13.5	3.7	12.8	0.31	0.48
	20°C	12.0	4.0	21.0	0.21	0.29
	30°C	12.5	3.0	32.5	0.15	0.21
H35F20	10°C	8.8	5.0	12.5	0.40	0.56
	20°C	14.0	3.8	20.8	0.27	0.38
	30°C	11.0	2.8	32.5	0.21	0.26

### 2.2.2 圧縮強度の発現

圧縮強度の発現を図-1に示す。各配合とも有効材齢3日で30N/mm<sup>2</sup>を上回るとともに、有効材齢28日までであれば、試験結果が概ね同一曲線上の単調増加を描くことが認められた。このことから、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度の発現は、有効材齢を用いた単一の式で評価できるといえる。また、図には現在一般に使用されている式(2)の評価式<sup>1)</sup>（以下、現評価式という）を用いて求めた圧縮強度の推定値を破線で示した。

$$f'_c(t) = \frac{t - S_f}{a + b(t - S_f)} f'_c(28) \quad (2)$$

ここに、 $f'_c(t)$ ：有効材齢 $t$ 日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $S_f$ ：セメントの種類に応じた硬化原点に対する有効材齢 (日)、 $f'_c(28)$ ：基準材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $a$ 、 $b$ ：セメントの種類及び基準材齢に応じた定数である。

この現評価式と実験結果を比較すると、H40の実験値は早強ポルトランドセメントの現評価式に概ね一致するが、H35B430及びH35B650の実験値と高炉セメントB種の現評価式、H35F20の実験値とフライアッシュセメントB種の現評価式では大きく乖離し、混和材を用いたコンクリートの実験値は高炉セメントB種あるいはフライアッシュセメントB種のコンクリートの現評価式と比較して明らかに強度発現が早まることが認められた。これは、高炉セメントB種及びフライアッシュセメントB種のコンクリートの現評価式が普通ポルトランドセメントを用いた場合の推定式であることが理由として考えられる。

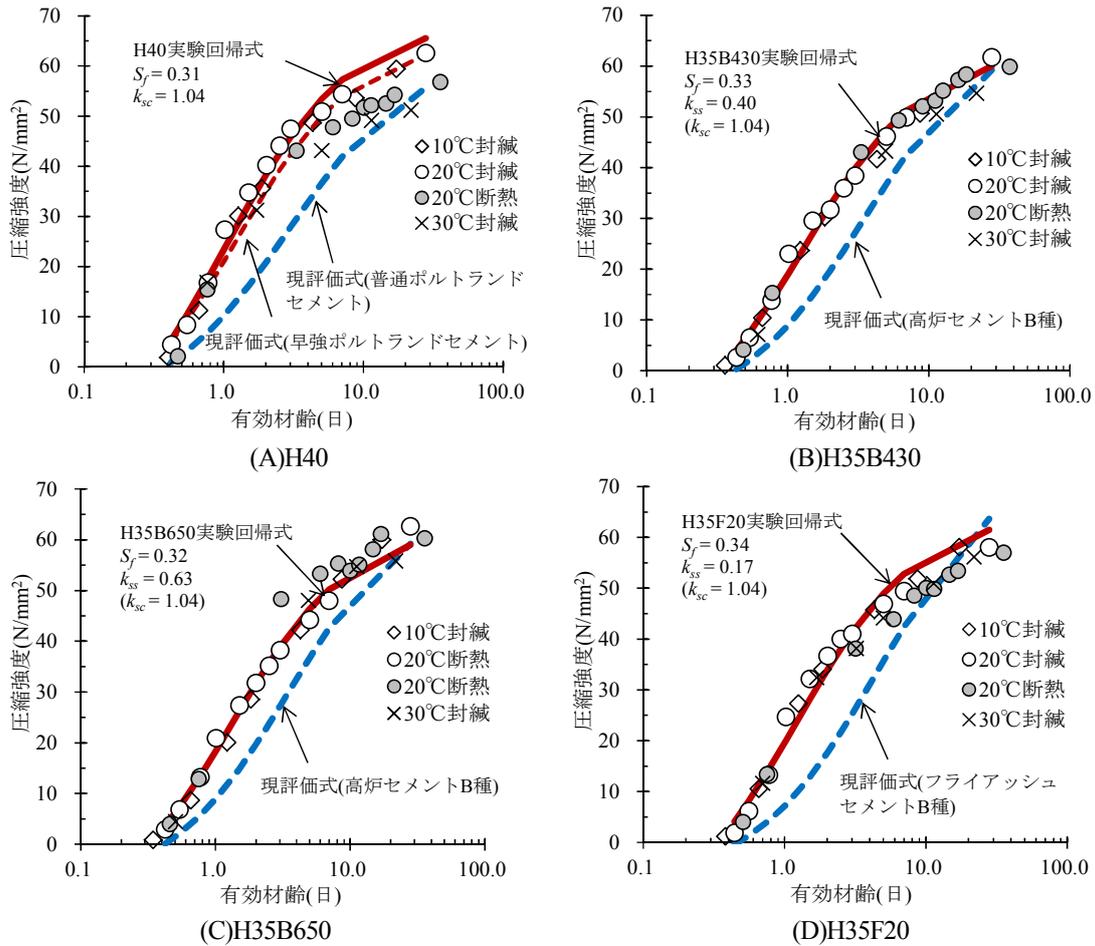


図-1 圧縮強度の発現

そこで、早強ポルトランドセメントの現評価式を混和材を用いたコンクリートに対応させるため、混和材の寄与率を考慮して修正した式(3)~(6)（以下、修正評価式という）を用いて検討を行った。

$$f'_c(28) = -14.9 + 30.9(B_s / W) \quad (3)$$

$$a = 4.39 - 1.19(B_s / W) \quad (4)$$

$$b = 0.841 + 0.0428(B_s / W) \quad (5)$$

$$B_s = k_{sc}C + k_{ss}SCM \quad (6)$$

ここに、 $B_s$ ：強度発現に関する混和材の寄与率を加味した単位結合材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $W$ ：単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $k_{sc}$ ：強度発現に関するセメントの寄与率、 $k_{ss}$ ：強度発現に関する混和材の寄与率、 $C$ ：単位セメント量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $SCM$ ：単位混和材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) である。

上記の修正評価式を用い、まず、H40の20°C封緘供試体の実験結果に基づいて式(2)の $S_f$ と式(6)の $k_{sc}$ を未知数 ( $SCM = 0$ のため、 $k_{ss}$ は未知数とならない)として回帰分析を行った。この結果、 $k_{sc} = 1.04$ （現評価式1.00）、 $S_f = 0.31$ （現評価式0.30）となった。

次に、 $k_{sc}=1.04$ を用いて、混和材を用いたコンクリートの20℃封緘供試体の実験結果に基づいて $S_f$ と $k_{ss}$ を未知数として回帰分析を行った。凝結時間と $S_f$ の関係を図-2に示す。混和材を用いたコンクリートの $S_f$ は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等の0.31~0.34日となり、凝結の終結に概ね一致することが認められた。また、別途実施した水結合材比を40%として、混和材の置換率を変化させた供試体の材齢7日における圧縮強度試験結果を図-3に示す。図には上記の回帰分析によって得られた $k_{ss}$  (図-1の値、H35B430 :  $k_{ss} = 0.40$ , H35B650 :  $k_{ss} = 0.63$ , H35F20 :  $k_{ss} = 0.17$ ) の値を用いて修正評価式から求めた圧縮強度の推定値をあわせて示した。この結果、今回の配合であれば混和材の置換率が $k_{ss}$ に与える影響は大きくないことが認められた。

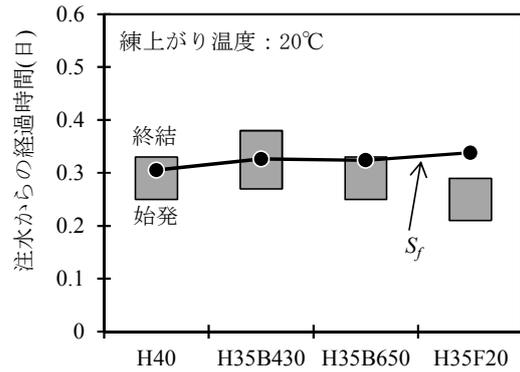
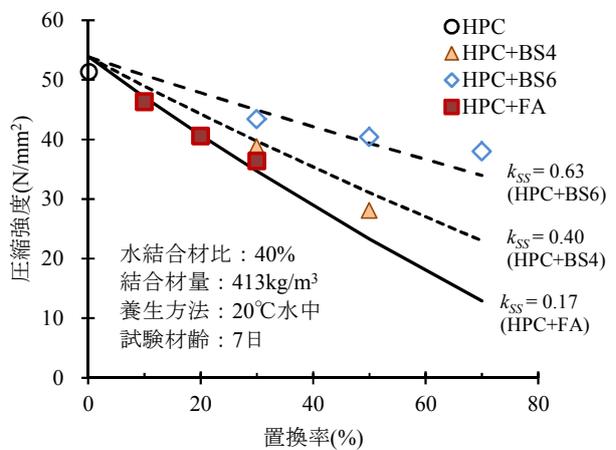


図-2 凝結時間と $S_f$ の関係 (20℃封緘)

### 2.2.3 引張強度及びヤング係数の発現

圧縮強度と引張強度の関係を図-4に、圧縮強度とヤング係数の関係を図-5に示す。混和材を用いたコンクリートの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、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様の傾向を示し、コンクリート標準示方書に示される関係式<sup>1)</sup>の値に概ね合致する結果が得られた。



※HPC：早強ポルトランドセメント，BS4：高炉スラグ微粉末4000，BS6：高炉スラグ微粉末6000，FA：フライアッシュⅡ種である。

図-3 置換率が $k_{ss}$ に与える影響

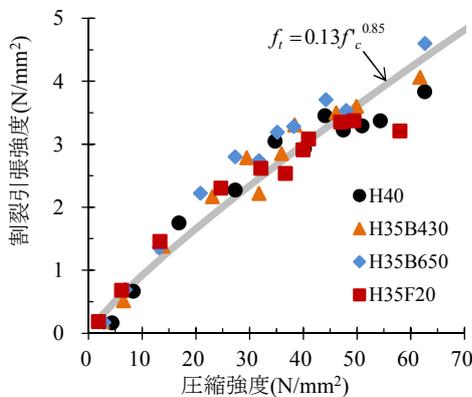


図-4 圧縮強度と引張強度の関係

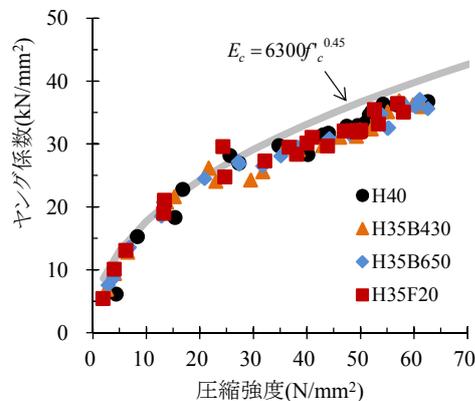


図-5 圧縮強度とヤング係数の関係

### 3. 断熱温度上昇

#### 3.1 実験方法

シリーズⅡでは、一辺400mmのマスブロック供試体の中心温度と外気温を測定し、逆解析によって断熱温度上昇量を求めた<sup>7)</sup>。また、シリーズⅢでは、オイル循環式断熱温度上昇試験装置を用い、コンクリート試料を完全な断熱状態に保ち断熱温度上昇量を測定した<sup>8)</sup>。

逆解析による断熱温度上昇量は、コンクリート中の熱伝導速度が供試体表面からの熱の逸散速度と比較して遥かに大きくなるため、マスブロック供試体の熱収支が式(7)によって表すことができることから求めた。また、式(7)の熱伝達率 ( $h$ ) は、シリーズⅡの供試体温度の実測値 ( $T_{mass}$ ) と外気温の実測値 ( $T_{out}$ ) を用いて算出される断熱温度上昇量 ( $Q(t)$ ) の計算値とシリーズⅢから得られる断熱温度上昇量の差が最小となるように最小二乗法によって求めた。

$$\rho c V \frac{dQ(t)}{dt} - Sh(T_{mass} - T_{out}) = \rho c V \frac{dT_{mass}}{dt} \quad (7)$$

ここに、 $Q(t)$  : 断熱温度上昇量 (°C)、 $\rho$  : コンクリートの密度 (= 2300kg/m<sup>3</sup>)、 $c$  : コンクリートの比熱 (= 1.05kJ/kg°C)、 $V$  : 供試体の体積 (= 0.064m<sup>3</sup>)、 $S$  : 供試体表面積 (= 0.96m<sup>2</sup>)、 $h$  : 熱伝達率 (W/m°C)、 $T_{mass}$  : 供試体温度 (°C)、 $T_{out}$  : 外気温 (°C)、 $t$  : 材齢 (日) である。

#### 3.2 実験結果

コンクリートの打込み後に断熱養生、簡易断熱養生を行ったコンクリートの温度測定結果の一例 (H35F20) を図-6に示す。図にはシリーズⅡの温度測定値に基づいて式(7)を用いて逆解析した断熱温度上昇量を (熱伝達率  $h = 0.36\text{W/m}^2\text{°C}$ ) を示した。この結果、シリーズⅢの完全断熱の測定値と精度良く一致した。

シリーズⅡの温度測定値に基づいて逆解析した断熱温度上昇量の結果を図-7に示す。図には現在使用されている式(8)の推定式<sup>1)</sup> (以下、現推定式という) を用いて求めた断熱温度上昇量の推定値を破線で示した。

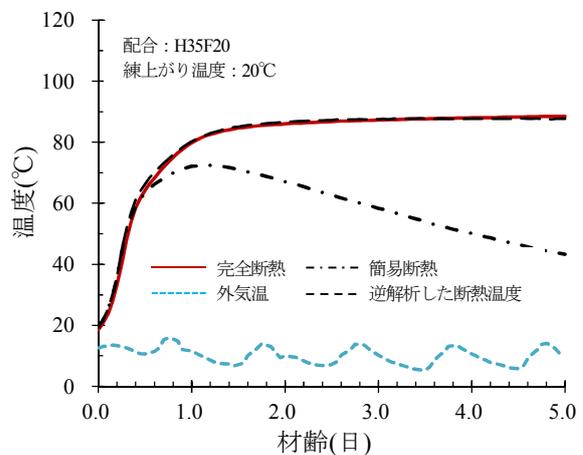


図-6 断熱温度上昇試験の結果

$$Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-rt}) \quad (8)$$

ここに、 $Q(t)$  : 材齢  $t$  日における断熱温度上昇量 (°C)、 $Q_{\infty}$  : 終局断熱温度上昇量 (°C)、 $r$  : 断熱温度上昇速度に関する定数、 $t$  : 材齢 (日) である。

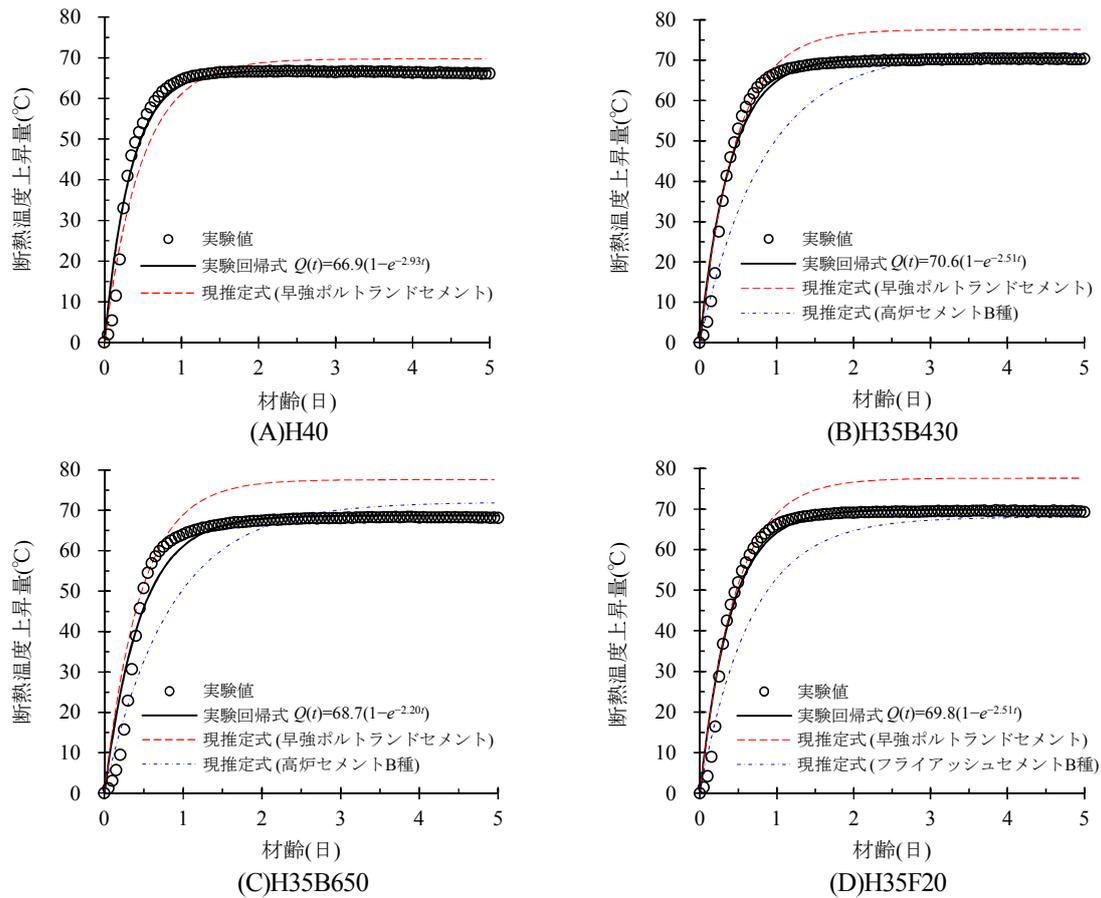


図-7 断熱温度上昇試験結果（練上がり温度20°Cの例）

図-7の現推定式と実験値を比較すると、H40の実験値は早強ポルトランドセメントの現推定式と概ね相似形となったが、混和材を用いたコンクリートの実験値は高炉セメントB種あるいはフライアッシュセメントB種の現推定式よりも断熱温度上昇速度が明らかに速まっている。これは、混合セメントの現推定式が普通ポルトランドセメントをベースとした複合水和発熱モデルから定式化されていること<sup>2)</sup>が理由として考えられる。また、図中の実線に示す実験値に基づいて式(8)を用いて回帰した混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇速度は、水結合材比を同一とした早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの現推定式と概ね相似形となることがわかる。つまり、早強ポルトランドセメントの現推定式を改良することで、混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇量を推定できると考えられる。

### 3.3 断熱温度上昇特性に関する改良式の提案

現推定式の終局断熱温度上昇量 $Q_{\infty}$ は単位セメント量の一次式として表される。しかし、単位セメント量が $400\text{kg/m}^3$ を超えると、 $Q_{\infty}$ は単位セメント量の一次式で推定されるよりも小さくなるとの指摘がある<sup>7)</sup>。そこで、文献7)に示される早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの $Q_{\infty}$ に関する実験結果に基づいて、式(9)に示す単位セメント量の累乗式によって回帰して実験定数を求めた。

$$Q_{\infty} = a' C^{b'} \quad (9)$$

ここに、 $a'$ 、 $b'$ ：実験定数、 $C$ ：単位セメント量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) である。

式(9)の回帰結果 ( $a' = 1.49$ ,  $b' = 0.63$ ) と今回の実験結果を図-8に示す。H40では式(9)の $Q_{\infty}$ と実験値が良く一致するが、混和材を用いたコンクリートでは式(9)の $Q_{\infty}$ よりも実験値が若干小さくなっている。

このことから、式(9)の累乗式を、混和材を用いたコンクリートに対応させるため、混和材の寄与率を考慮して修正した式(10) (以下、改良式という)を用いて検討を行った。

$$Q_{\infty} = 1.49(C + k_T \cdot \text{SCM})^{0.63} \quad (10)$$

ここに、 $k_T$ ：断熱温度上昇特性に関する混和材の寄与率、 $C$ ：単位セメント量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\text{SCM}$ ：単位混和材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) である。

式(10)中の $k_T$ はH35B430で0.82~0.96、H35B650で0.83~0.98、H35F20で0.70~0.79と推定された。練上がり温度が終局断熱温度上昇量や温度上昇速度に与える影響を図-9に示す。終局断熱温度上昇量は、混和材の有無によらず練上がり温度の影響がほとんど認められなかった。また、温度上昇速度は、混和材を用いたコンクリートにおいても早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様に練上がり温度が高くなるにつれ定数 $r$ が増大することが確認された。なお、定数 $r$ の実験値が現推定式を上回る傾向にあったが、練上がり温度が最大 $3^{\circ}\text{C}$ ほど高いこと等が影響したためと考えられる。

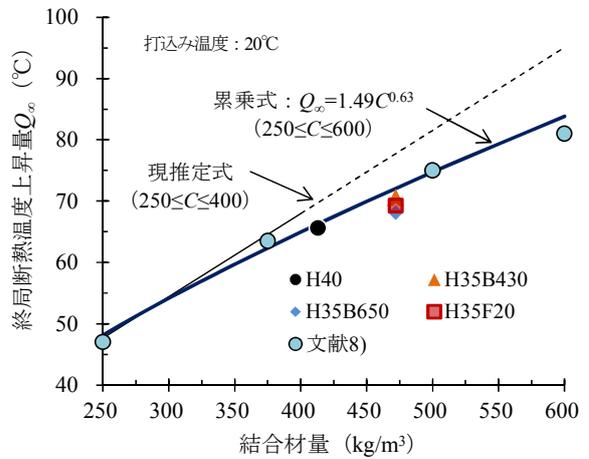


図-8 結合材量と $Q_{\infty}$ の関係

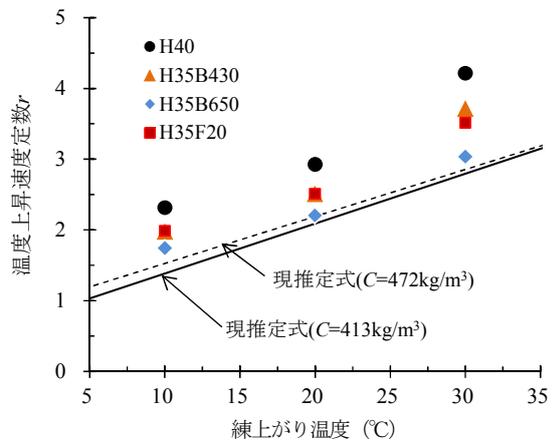
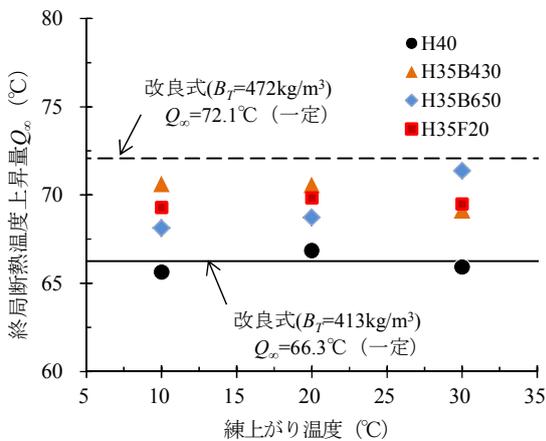


図-9 練上がり温度が $Q_{\infty}$ や $r$ に与える影響

## 4. 自己収縮

### 4.1 実験方法

自己収縮試験に用いた供試体の形状を図-10に示す。シリーズIでは、「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法<sup>9)</sup>を参考に100×100×400mmの角柱供試体を製作し、封緘状態でコンクリート温度を概ね20℃に保持した。シリーズIIでは、所定の温度の練上がりコンクリートを用いて400×400×400mmのマスブロック供試体を製作し、外周6面を厚さ200mmで発泡倍率90倍の発泡スチロールで覆い、簡易断熱養生を行った。各供試体の中心部に低弾性タイプの埋込型ひずみ計と熱電対を設置し、供試体中心部に生じる全ひずみとコンクリート温度を材齢56日まで測定した。

また、シリーズIの小型供試体を用い、材齢56日以降に温度範囲を20～55℃に可変させた際のひずみを測定して熱膨張係数を求めた。

これらの実験結果に基づいて、式(11)を用いて自己収縮ひずみを求めた。

$$\varepsilon_{as} = \varepsilon - \alpha \Delta T \quad (11)$$

ここに、 $\varepsilon_{as}$ ：自己収縮ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、 $\varepsilon$ ：全ひずみ (埋込型ひずみ計による) ( $\times 10^{-6}$ )、 $\alpha$ ：熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )、 $\Delta T$ ：供試体中心温度と練上がり温度との差 ( $^{\circ}\text{C}$ ) である。

### 4.2 実験結果

コンクリートの最高温度と熱膨張係数の測定結果を表-4に示す。シリーズIでは最大5℃、シリーズIIでは60℃を超える温度上昇が認められた。また、熱膨張係数は11.4～12.0×10<sup>-6</sup>/℃であり、混和材の使用による影響は小さいことが認められた。

練上がり温度 20℃の自己収縮ひずみの経時変化を図-11、12に示す。同図には、後述する提案式による計算値も併記した。シリーズIでは、混和材の使用によって自己収縮ひずみの経時変化が生じる時期、増加速度、最大値が異なることがわ

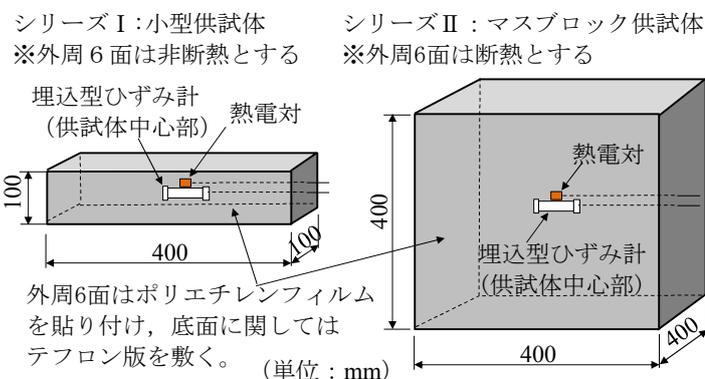
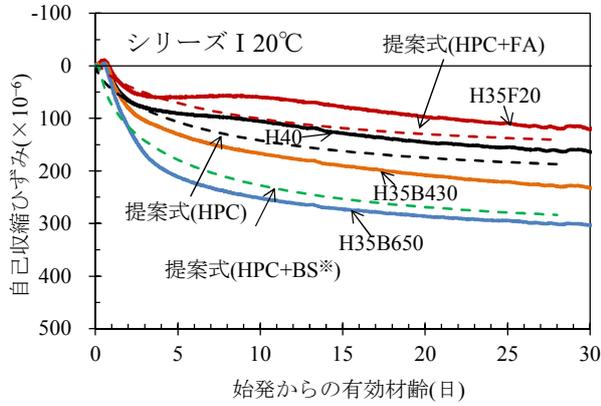


図-10 自己収縮試験用供試体

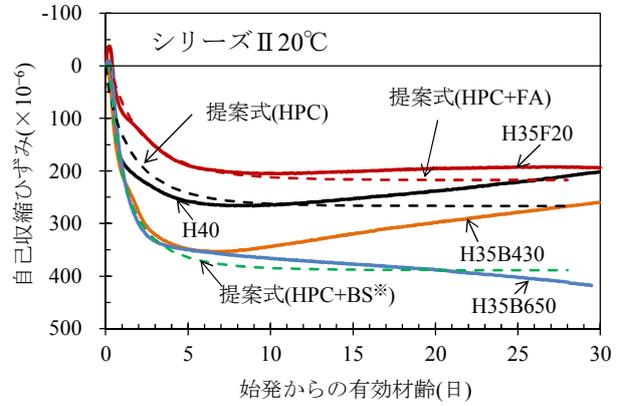
表-4 コンクリート最高温度と熱膨張係数

配合	最高温度(℃)			熱膨張係数 ( $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	
	シリーズI	シリーズII			
		10℃	20℃		30℃
H40	25.2	71.0	81.0	89.8	11.8
H35B430	24.5	74.6	83.3	92.0	12.0
H35B650	25.0	70.9	79.9	89.8	11.9
H35F20	25.1	72.4	82.4	91.4	11.4

かる。また、シリーズIIでは、自己収縮ひずみの増加速度は、20℃一定のシリーズIと比較して、有効材齢で整理しても大幅に早まることが認められた。この現象は、混和材を用いたコンクリート、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートのいずれについても認められた。



※BS : BS4またはBS6



※BS : BS4またはBS6

図-11 自己収縮ひずみの経時変化 (シリーズI) 図-12 自己収縮ひずみの経時変化 (シリーズII)

### 4.3 自己収縮ひずみの予測

#### 4.3.1 予測式の提案

現在使用されている自己収縮ひずみの予測式<sup>1)</sup>(以下、現予測式という)を、混和材を用いたコンクリートに対応させるため、混和材の寄与率を考慮して現予測式を修正した式(12)~(16)(以下、提案式という)を用いて検討を行った。ここでは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートをHPC、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートをHPC+BS、フライアッシュを用いたコンクリートをHPC+FAの記号で示す。

$$\varepsilon_{ag} = -\beta \varepsilon'_{as\infty} \left[ 1 - \exp \left\{ -a(t' - t_s - t_d)^b \right\} \right] \quad (12)$$

$$\varepsilon'_{as\infty} = c_1 \exp \left\{ c_2 \left( \frac{W}{C + k_A SCM} \right) \right\} + \varepsilon'_{asT} \quad (13)$$

$$\varepsilon'_{asT} = \varepsilon'_{asT\infty} \left[ 1 - \exp \left\{ -1.2 \times 10^{-6} (T_{max} - 20) \right\} \right] \quad (14)$$

$$a = 3.7 \exp \left\{ -6.8 \left( \frac{W}{C + k_A SCM} \right) \right\} g \quad (15)$$

$$b = 0.25 \exp \left\{ 2.5 \left( \frac{W}{C + k_A SCM} \right) \right\} h \quad (16)$$

ここに、 $\varepsilon_{ag}$  : 自己収縮ひずみの推定値 ( $\times 10^{-6}$ )、 $\beta$  : 配合補正係数、 $t'$  : 有効材齢 (日)、 $t_s$  : 凝結の始発 (日)、 $t_d$  : 自己収縮ひずみの経時変化が生じる時期の遅れ、 $\varepsilon'_{as\infty}$  : 自己収縮ひずみの最終値 ( $\times 10^{-6}$ )、

$c_1, c_2$  : 係数 (HPCとHPC+FAは $c_1=3070, c_2=-7.2$ , HPC+BSは $c_1=2350, c_2=-5.8$ と仮定する),  $W$  : 単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C$  : 単位セメント量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $SCM$  : 単位混和材量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $k_A$  : 混和材の寄与率,  $\varepsilon'_{asT}$  : 高温履歴による自己収縮ひずみの増加量 ( $\times 10^{-6}$ ),  $\varepsilon'_{asT_{\infty}}$  : 高温履歴による自己収縮ひずみの増加量の最終値 ( $\times 10^{-6}$ ) (HPCとHPC+FA : 50, HPC+BS : 80と仮定する),  $T_{max}$  : 温度解析によって求めるコンクリートの最高温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $a, b$  : 自己収縮ひずみの進行特性を表す係数,  $g, h$  : 高温履歴による影響を表す係数 (HPCとHPC+FAは $g=h=1.0$ , HPC+BSは $g=0.060T_{max}-0.20, h=-0.0075T_{max}+1.15$ と仮定する) である。

#### 4.3.2 $t_s$ と $t_d$ について

凝結の始発は混和材の影響があまり大きくないことから (表-3), HPC+BS, HPC+FA いずれも現予測式の $t_s=0.2$ 日とする。また, 混和材の使用によって自己収縮ひずみの経時変化が生じる時期の遅れが認められるものの, 顕著な遅れではないことから,  $t_d=0$ 日とする。

#### 4.3.3 $\beta$ と $k_A$ について

混和材を用いたコンクリートの温度 $20^{\circ}\text{C}$ , 材齢28日時点の自己収縮ひずみの既往のデータ<sup>10)~13)</sup>に基づいて, 図-13の提案式の $\beta$ と $k_A$ を変化させた。この結果, HPC+BSは $\beta=1.0, k_A=1.0$ , HPC+FAは $\beta=1.2, k_A=0$ に近づくことが認められた。

#### 4.3.4 $\varepsilon'_{asT_{\infty}}$ について

コンクリート最高温度と今回の実験で得られた有効材齢28日までの自己収縮ひずみの最大値と提案式の予測値の結果を図-14に示す。コンクリート最高温度にかかわらず, H35B650, H35B430, H40, H35F20の順に大きくなっており, 予測値はこの傾向と概ね一致することが認められた。

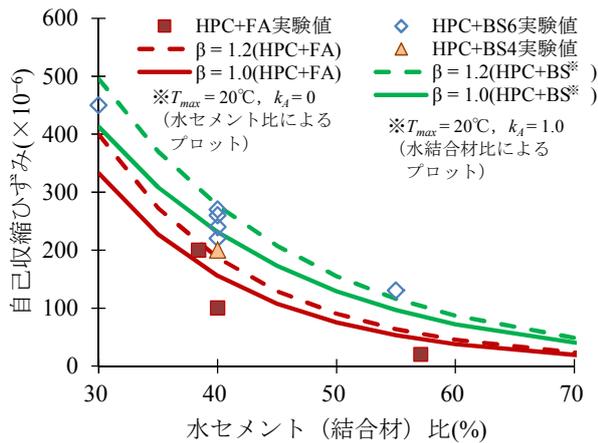


図-13 提案式の $\beta$ と $k_A$ の検証

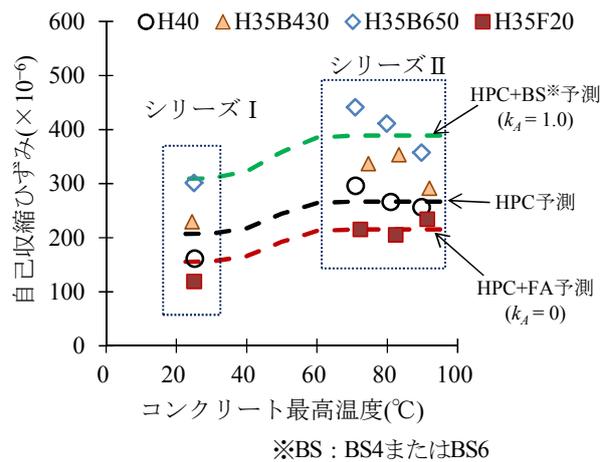


図-14 提案式の $\varepsilon'_{asT_{\infty}}$ の検証

### 4.3.5 $g$ と $h$ について

自己収縮ひずみの進行特性のうち、高温履歴の影響を表す係数  $g$  と  $h$  を現予測式（以下、現  $g$ 、 $h$  という）のまま用いた場合の自己収縮ひずみの予測値と実験値の関係を図-15 に示す。シリーズ I の 20°C 一定の場合では実験値が予測値の±40%の範囲に入ったが、シリーズ II の高温履歴を受ける場合では予測精度が十分に得られなかった。

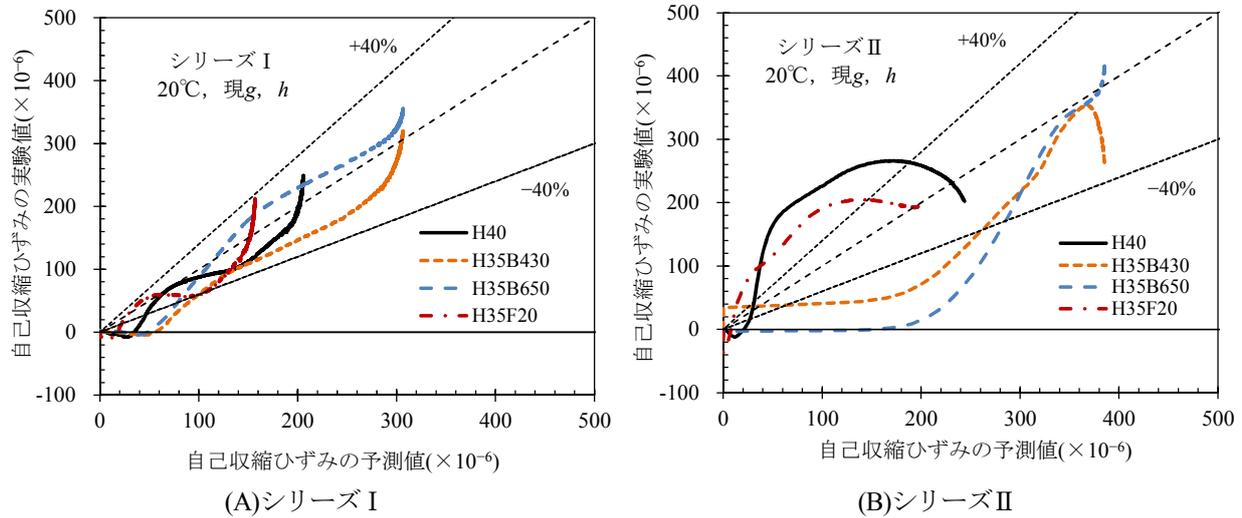


図-15 現  $g$ 、 $h$  による自己収縮ひずみの予測精度

この要因として、H40 と H35F20 では高温履歴の影響が考慮されていないこと、H35B430 と H35B650 では高温履歴の影響が過大に評価されていることが考えられる。そこで、現  $g$ 、 $h$  を全配合に対応させるため、式(17)及び式(18)に改良した（以下、改良  $g$ 、 $h$  という）。

$$g = 0.030T_{max} + 0.40 \quad (17)$$

$$h = 0.025T_{max} + 0.95 \quad (18)$$

表-5 自己収縮ひずみの設計値

	HPC, HPC+FA	HPC+BS***
$\epsilon_{ag}$	式(12)を用い、 $t_s = 0.2$ 日、 $t_d = 0$ 日とする	
$\beta$	1.2	1.0
$\epsilon'_{as\infty}$	式(13)を使用 ( $c_1 = 3070$ , $c_2 = -7.2$ )	式(13)を使用 ( $c_1 = 2350$ , $c_2 = -5.8$ )
$k_A$	1.0	1.0
$\epsilon'_{asT\infty}$	50	80
$g, h$	式(17), 式(18)の改良 $g, h$ による	

※適用範囲：  $35 \leq W/B \leq 55\%$ ,  $20 \leq T_{max} \leq 90^\circ\text{C}$

\*\*\*BS：BS4 または BS6

改良  $g$ 、 $h$  を用いた予測値と今回の実験値を比較した結果を図-11、12の提案式として示した。提案式の予測値は実験値に良く一致していることがわかる。

なお、フライアッシュの化学特性によっては自己収縮ひずみ（混和材の寄与率  $k_A$ ）が大幅に変動する<sup>14)</sup> おそれがあるため、ここでの混和材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみの設計値は、表-5 に示す値を用いるのがよいと考えられる。

## 5. まとめ

混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ解析に用いる物性値を明らかにするため、各種実験を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 混和材を用いたコンクリートの圧縮強度発現は、練上がり温度 10~30℃の範囲でかつ有効材齢 28 日程度までであれば有効材齢を用いた単一の式で評価可能であり、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの現評価式をもとに単位結合材量に関して混和材の初期強度の発現への寄与率を加味した修正評価式を用いて推定することができた。
- (2) 混和材を用いたコンクリートの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、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様の傾向が認められた。
- (3) 混和材を用いたコンクリートの断熱温度上昇量は、強度発現が同程度の早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと概ね相似形となり、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの現推定式をもとに単位結合材量に関する混和材の断熱温度上昇特性への寄与率を加味した改良式を用いて推定できた。
- (4) 混和材を用いたコンクリートは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、自己収縮ひずみの経時変化が生じる時期、増加速度、最大値が異なるとともに、高温履歴を受ける場合の自己収縮ひずみの増加速度は、20℃一定の場合と比較して、有効材齢で整理しても大幅に速まった。これらの実験結果及び既往のデータに基づいて現在使用されている予測式に改良を加えることで、混和材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみを精度良く推定できた。

## 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：標準〕，pp.314-318，2013
- 2) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008，pp.46-56，2008
- 3) 石井豪，中村英佑，鈴木雅博，渡辺博志：混和材を用いたコンクリートの強度発現と自己収縮特性への温度履歴の影響，第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.59-64，2014
- 4) 北野勇一，鈴木雅博，石井豪，中村英佑：混和材利用早強コンクリートの自己収縮特性とその予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.355-360，2015
- 5) 長谷川剛，北野勇一，石井豪，中村英佑：混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇特性について，第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.507-510，2015
- 6) 北野勇一，長谷川剛，石井豪，中村英佑：混和材利用早強コンクリートの断熱温度上昇量の予測，第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.511-514，2015
- 7) 国土交通省土木研究所・プレストレスト・コンクリート建設業協会：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法の開発に関する共同研究報告書—現場打ち高強度コンクリート施工マニュアル（案）—，共同研究報告書第266号，pp.119-122，2001

- 8) 日本コンクリート工学会：品質評価試験方法研究委員会報告書，pp.71-72，1998
- 9) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），pp.209-210，1994
- 10) 斯波明宏，谷口秀明，樋口正典：早強セメントを用いた環境負荷低減型コンクリートの諸特性，三井住友建設技術開発センター報告，第11号，pp.37-42，2013
- 11) 山村智，鈴木雅博，桜田道博，小林和弘：分級フライアッシュを用いたコンクリートのプレテンションPC桁への適用に関する検討，株式会社ピーエス三菱技報，第11号，2013
- 12) 北野勇一，中山良直，塩井健太，堀池一男：コンクリート中のセシウム拡散性試験（続），川田技報 Vol.34，2015
- 13) 谷口秀明，藤田学，渡辺博志，葛西康幸：高炉スラグ微粉末を用いたPC用コンクリートの収縮特性，土木学会第58回年次学術講演会，V-160，2003
- 14) 堀田智明，名和豊春：モルタル硬化体の自己収縮に及ぼすフライアッシュ品質の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.165-170，2002

## 付録ー5 混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性

### 1. 概要

混和材を用いたコンクリートにおいて、付録ー4 では、マスコンクリートの水和発熱に起因した温度履歴（以下、高温履歴という）を模擬したコンクリート供試体の自己収縮ひずみを測定した。この結果、特に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの場合に自己収縮ひずみとその進展速度が大幅に大きくなることが認められた<sup>1)</sup>。温度ひび割れの発生リスクの評価は、高温履歴の影響を考慮した自己収縮ひずみの挙動に加えて、コンクリートの温度変化、クリープによる応力緩和、ヤング係数の発現等の影響を適切に考慮して、若材齢時のコンクリートに発生する応力を推定する必要がある。しかしながら、混和材を用いたコンクリートの温度応力の発生メカニズム及び温度応力の推定手法は必ずしも明確ではない。

そこで、まず、発泡スチロール製の型枠を用いてマスコンクリートの高温履歴を模擬したコンクリート供試体の拘束試験を行い、混和材を用いたコンクリートの温度応力の発生メカニズムと膨張材による温度ひび割れ抑制効果を検討した<sup>2)</sup>。次に、混和材を用いたコンクリートの有効ヤング係数法を用いたクリープ解析の結果に基づいて温度応力の推定手法の適用性を検証するとともに、温度ひび割れ抑制対策として膨張材を併用して温度応力低減を図った場合の応力の推定手法についても検討した<sup>3)</sup>。さらに、混和材を用いたコンクリートをプレストレストコンクリート橋に適用する場合に、温度ひび割れに対する抵抗性及び自己収縮ひずみの高温履歴の影響を把握するため、ラーメン箱桁橋を一例とした解析的検討を行った<sup>4)</sup>。

### 2. 拘束試験による温度ひび割れに対する抵抗性の検討

#### 2.1 実験方法

##### 2.1.1 コンクリートの配合と基礎物性

コンクリートの配合と基礎物性を表ー1 に示す。配合は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリート（H40）、早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換したコンクリート（H35B430）、50%を高炉スラグ微粉末6000で置換したコンクリート（H35B650）、H35B650で結合材の一部を膨張材で置換したコンクリート（H35B650EX）、20%をフライアッシュⅡ種で置換したコンクリート（H35F20）の5種類とした。高温履歴を受ける場合に特に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートで自己収縮ひずみが大幅に大きくなることが認められたため<sup>1)</sup>、膨張材を併用したH35B650EXを追加して膨張材による温度ひび割れの抑制効果も検討した。水結合材比は、設計基準強度40N/mm<sup>2</sup>と材齢3日のプレストレス導入時強度30N/mm<sup>2</sup>が得られるように、H40で40%、混和材を用いたコンクリートで35%とし、全配合において、単位水量（W）を165kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量（G）を968kg/m<sup>3</sup>に統一した。

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							スランプ (cm)	空気量 (%)	凝結時間		熱膨張係数 (×10 <sup>-6</sup> /°C)	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + EX + FA					S			G	始発 (min)		終結 (min)
			HPC	BS4	BS6	EX	FA							
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	—	758	968	12.0	4.2	345	464	12.1
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	—	700		13.5	4.4	344	448	12.8
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	—	695		12.5	3.7	304	416	12.6
H35B650EX			226 (48%)	—	226 (48%)	20 (4%)	—	696		13.5	3.0	316	448	12.5
H35F20			377 (80%)	—	—	—	94 (20%)	682		17.0	4.9	396	509	11.0

※HPC: 早強ポルトランドセメント(密度 = 3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,600cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度 = 2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,440cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub> = 2.1%(無水せつこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度 = 2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 5,970cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub> = 3.1%(無水せつこう添加)), EX: 膨張材(石灰系, 単位量 20kg/m<sup>3</sup>となるよう HPC と BS6 を均等に置換), FA: フライアッシュ II 種(密度 = 2.31g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 = 4,000cm<sup>2</sup>/g), 単位量の( )内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示  
 ※S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度 = 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 2.23%), G: 粗骨材(茨城県空閑産砕石 6 号(密度 = 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 0.43%)と 5 号(密度 = 2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 = 0.46%)を均等に混合), 化学混和剤: 高性能 AE 減水剤と空気連行剤を使用  
 ※熱膨張係数: 封緘養生した角柱供試体(100×100×400mm)を用いて材齢 91 日以降に温度範囲 15~55°Cで測定

2.1.2 拘束試験及び強度試験の方法

供試体の形状を図-1 に、実験の実施状況を写真-1 に示す。供試体は拘束供試体と無拘束供試体の 2 種類とした。拘束供試体では、既往文献<sup>5)</sup>を参考に、拘束用鋼材として異形鉄筋 (D32, ゲージ貼付部断面積 701mm<sup>2</sup>, ヤング係数 202kN/mm<sup>2</sup>) を用いてコンクリートの自己収縮ひずみに起因する拘束応力を測定し、熱膨張係数の小さいインバー鋼材(φ 30, ゲージ貼付部断面積 599mm<sup>2</sup>, ヤング係数 136kN/mm<sup>2</sup>, 熱膨張係数 0.7×10<sup>-6</sup>/°C) を用いてコンクリートの自己収縮ひずみと温度変化に起因する拘束応力を測定した。インバー鋼材は、コンクリート温度が下降する際の温度応力に対する抵抗性を把握する目的で使用した。コンクリートの拘束応力は、事前に測定した拘束用鋼材の荷重とひずみの関係を用い、拘束用鋼材のひずみの測定値から荷重を推定し、この荷重をコンクリートの断面積で除して求めた。一方、無拘束供試体では、埋込型ひずみ計と熱電対を供試体中心部に設置してコンクリートのひずみと温度を測定した。

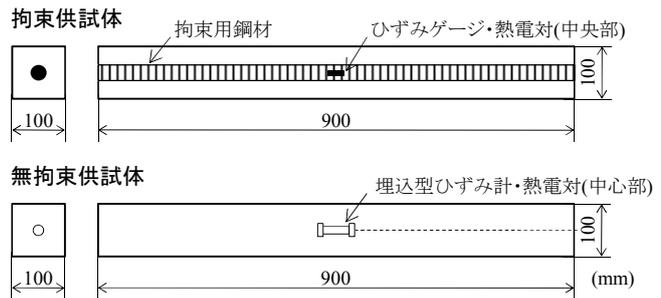


図-1 拘束供試体と無拘束供試体の形状



(A)打込み前の状況 (B)測定時の状況

写真-1 実験の実施状況

マスコンクリートの高温履歴を模擬するため、厚さ 200mm の発泡スチロール製 (発泡倍率 90 倍) の型枠

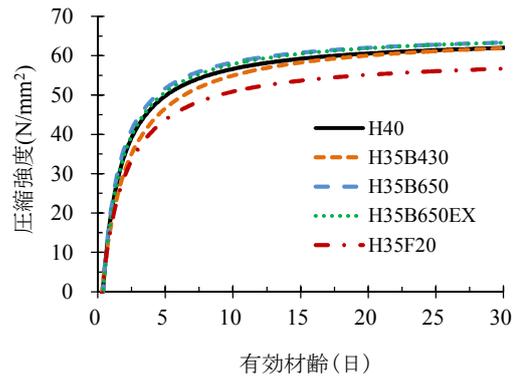
にコンクリートを打込み、直ちに封緘状態として測定を開始した。

圧縮強度、ヤング係数及び割裂引張強度を終結直後、注水から材齢 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 7, 28 日の 11 時点で測定した。圧縮強度とヤング係数の測定は、コンクリート打込み直後から室温約 20°C の実験室で封緘養生を行った円柱供試体 (φ100×200mm) と JASS 5 T-606 に準拠して発泡スチロール製の容器で簡易断熱養生を行った円柱供試体 (φ100×200mm) を用い、JIS A 1108 と JIS A 1149 に準拠して行った。割裂引張強度の測定は、室温約 20°C の実験室で封緘養生を行った円柱供試体 (φ150×150mm) を用い、JIS A 1113 に準拠して行った。

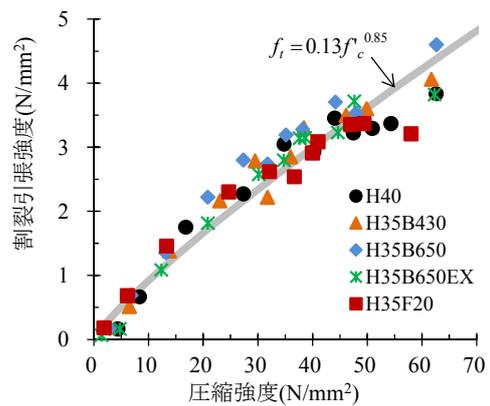
## 2.2 実験結果

### 2.2.1 強度試験の結果

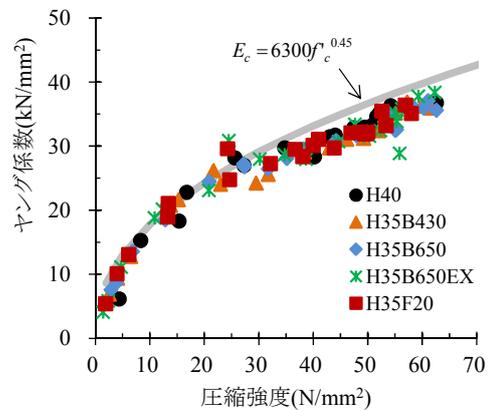
各配合の圧縮強度の発現を図-2(A)に、圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-2(B)に、圧縮強度とヤング係数の関係を図-2(C)に示す。無拘束供試体と簡易断熱養生を行った円柱供試体の最高温度が同程度であったため、図-2(A)では簡易断熱養生を行った円柱供試体の圧縮強度を用いて日本コンクリート工学会マスコンクリートのひび割れ制御指針<sup>6)</sup>(以下、JCI 指針)の圧縮強度発現式で回帰分析して求めた結果を示す。なお、20°C封緘養生を行った供試体と簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度は、有効材齢で整理すると、初期材齢では温度履歴にかかわらず同様の傾向で増加した<sup>2)</sup>。H35F20の圧縮強度が若干小さくなったが、圧縮強度と割裂引張強度、圧縮強度とヤング係数の関係は、混和材や膨張材の使用の有無にかかわらず、同様の傾向が認められた。



(A) 圧縮強度の発現



(B) 割裂引張強度と圧縮強度



(C) ヤング係数と圧縮強度

図-2 強度試験の結果

## 2.2.2 拘束試験（異形鉄筋）の結果

無拘束供試体の自己収縮ひずみを図-3に、異形鉄筋を用いた拘束供試体のコンクリート温度と拘束応力を図-4, 5に示す。材齢7日の拘束応力は、H40と比較すると、H35F20で同程度、H35B430とH35B650で大きく、特にH35B650では突出して大きくなるのが認められた。また、拘束応力の大小関係と増加開始時の材齢は自己収縮ひずみの傾向と概ね一致した。コンクリート温度は混和材の置換率が高いほど上昇時の勾配が小さくなったが拘束応力への影響はほとんどなく、自己収縮ひずみが大きいほどコンクリートに発生した拘束応力も大きくなる傾向が認められた。一方、H35B650EXの拘束応力はH40よりも小さく、膨張材の使用による拘束応力の低減効果が認められた。

次に、拘束応力と自己収縮ひずみの関係を図-6に示す。H35B650EX以外の供試体では、混和材の使用の有無にかかわらず、自己収縮ひずみと拘束応力の関係の勾配が概ね等しく、自己収縮ひずみの進展とともに拘束応力が増加した。図-3の自己収縮ひずみは、材齢7日の値が各配合で異なるものの、増加開始時の材齢や増加時の勾配は概ね一致した。すなわち、混和材の使用の有無にかかわらず、若材齢の自己収縮ひずみの進展と拘束応力の増加は同様の傾向を示し、若材齢クリープによる応力緩和の影響も同程度であったと考えられる。一方、H35B650EXでは、始発直後に膨張ひずみが急速に発生したが、その際の圧縮応力の増加量は必ずしも大きくならないことが認められた。

## 2.2.3 拘束試験（インバー鋼材）の結果

インバー鋼材を用いた場合の拘束応力を図-7に示す。なお、コンクリート温度は異形鉄筋を用

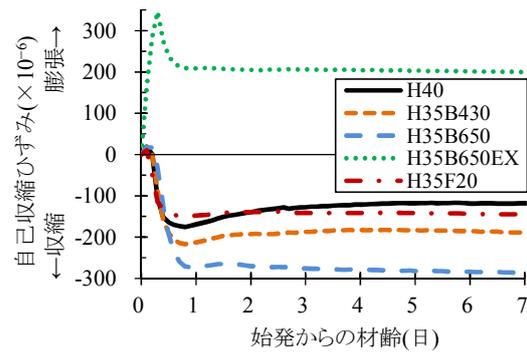


図-3 自己収縮ひずみ（無拘束供試体）

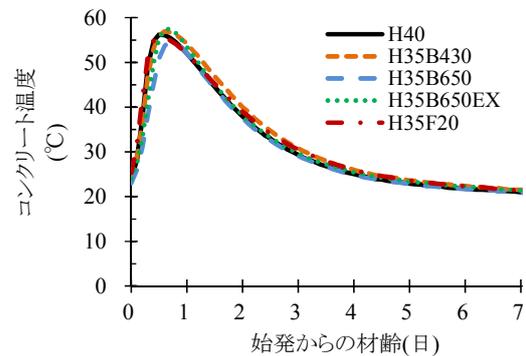


図-4 コンクリート温度（拘束供試体，异形鉄筋）

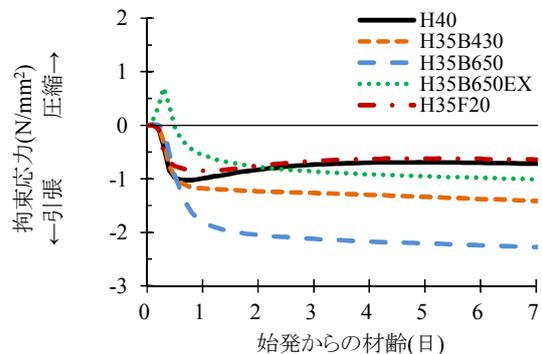


図-5 拘束応力（异形鉄筋）

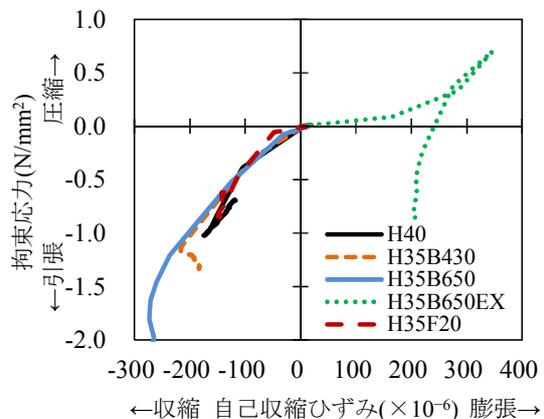


図-6 拘束応力と自己収縮ひずみ（异形鉄筋）

いた場合と同様であった。材齢 7 日の拘束応力は、H40 と比較すると、異形鉄筋を用いた供試体と同様に、H35F20 で同程度、H35B430 と H35B650 で大きくなった。また、材齢 3 日の圧縮強度を同等とするために水結合材比を調整したことによって、**図-4** に示すようにコンクリートの最高温度から材齢 7 日までに低下する温度は配合間でほとんど差がなく、温度降下時の温度ひずみに起因して発生した拘束応力は同程度となったと考えられる。

この結果、異形鉄筋を用いた供試体と同様に、自己収縮ひずみが大きいほど拘束応力も大きくなったと考えられる。一方、有効材齢 7 日の H35B650EX の拘束応力は H40 よりも若干大きくなったが H35B650 よりも小さく、膨張材の使用による拘束応力低減効果が認められた。

次に、拘束応力とコンクリート温度の関係を**図-8** に示す。若干のばらつきはあるが、コンクリート温度が最高温度に達した後に拘束応力がゼロとなる時点の温度が低いほどその後の引張応力が小さくなった。既往文献<sup>7)</sup>では、コンクリート温

度が最高温度に達した後に拘束応力がゼロとなる時点の温度を指標として温度ひび割れ抵抗性を定性的に評価する方法が提案されている。自己収縮ひずみが大きくなった H35B430 と H35B650 では拘束応力がゼロとなる材齢が早くなり、この時点のコンクリート温度も高くなる傾向にあった。このため、拘束応力がゼロとなる時点のコンクリートの温度を比較することによって、自己収縮ひずみの傾向が異なる場合にも引張応力の発生量の違いを定性的に評価できる可能性があると考えられる。

## 2.2.4 ひび割れ発生状況とひび割れ指数

材齢 91 日までの拘束試験の結果を**図-9** に、材齢 91 日に確認したひび割れの発生状況を**図-10** に、材齢 91 日までのひび割れ指数の最小値を**図-11** に示す。ひび割れ指数は、コンクリートの拘束応力を割裂引張強度で除して求めた。割裂引張強度 (**図-9(A)**) は、配合ごとに JCI 指針に示される圧縮強度と割裂引張強度の関係式の各係数を回帰し、**図-2(A)**の圧縮強度を用いて求めた。

発泡スチロール製の型枠を用いたため、ひび割れ発生材齢を目視で特定することが困難であったが、**図-9(C)**において拘束応力が大きく変動した材齢に着目すると、インバー鋼材を用いた H35B430 では材齢 61 日、H35B650 では材齢 57 日、H35F20 では材齢 73 日に拘束供試体の中央付近にひび割れが発生したと推測される。この 3 体は、**図-10** に示すように他の供試体と比較してひび割れ幅が大きく、ひび割れ本数が多い。同

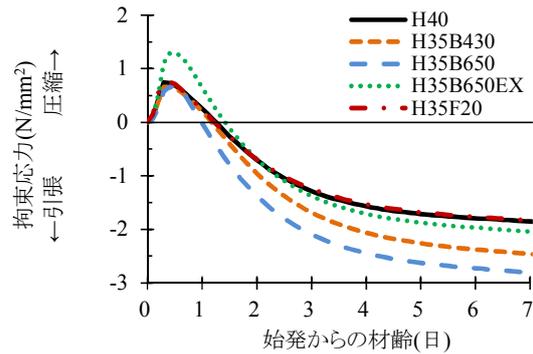


図-7 拘束応力 (インバー鋼材)

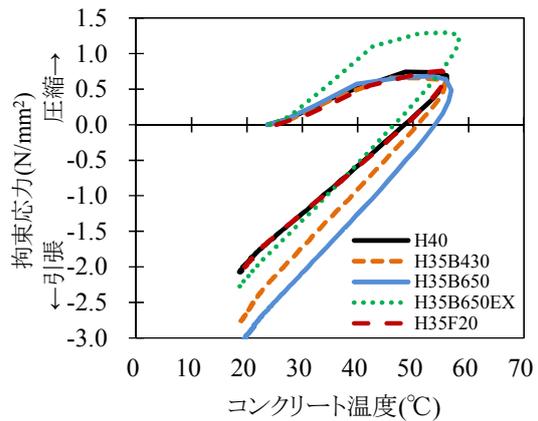
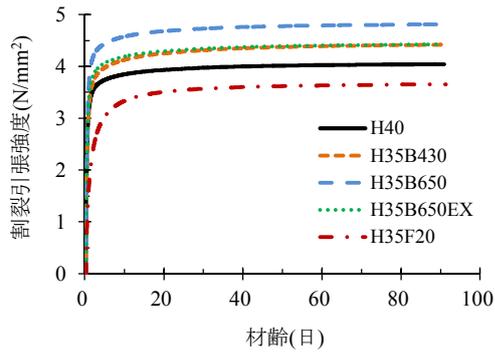
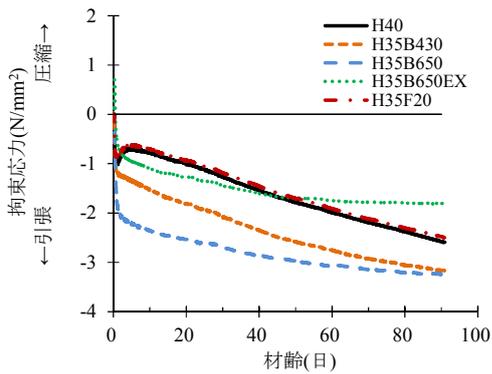


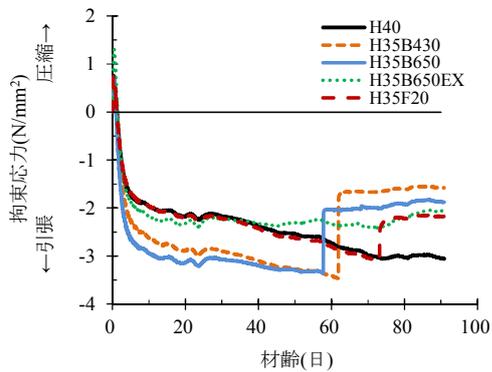
図-8 拘束応力とコンクリート温度 (インバー鋼材)



(A) 割裂引張強度 (推定)

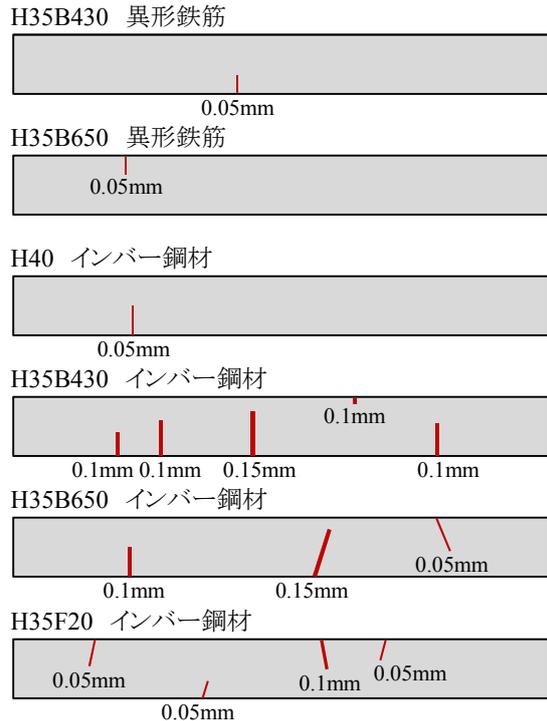


(B) 拘束応力 (異形鉄筋)



(C) 拘束応力 (インバー鋼材)

図-9 拘束試験の結果 (材齢 91 日まで)



※クラックゲージによるひび割れ幅の測定値を併記

図-10 供試体上面のひび割れ発生状況

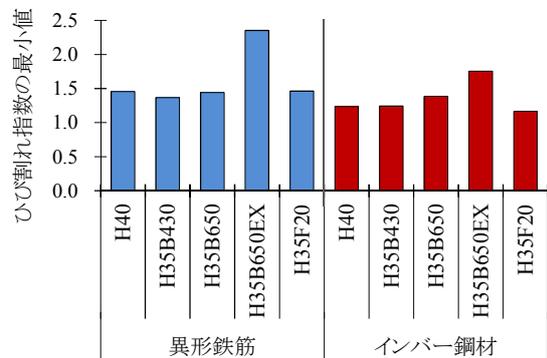


図-11 ひび割れ指数の最小値

様に、インバー鋼材を用いた H40 と比較すると、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは自己収縮ひずみの増大に伴い拘束応力が大きかったこと、フライアッシュ II 種を用いたコンクリートは拘束応力が H40 と同等であるものの、割裂引張強度が小さかったことがひび割れの増加した理由として考えられる。さらに、ひび割れ発生状況とひび割れ指数は概ね対応している。このように、コンクリートの拘束応力と割裂引張強度を考慮して求めたひび割れ指数によって混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れに対する抵抗性を評価できると考えられる。

一方、H35B650EX ではひび割れの発生は認められず、自己収縮ひずみの大きい高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートにおいても膨張材の併用によって、ひび割れ発生リスクの低減に寄与すると考えられる。

### 3. FEM 解析による温度応力推定と膨張材の応力低減効果の評価

#### 3.1 解析概要

##### 3.1.1 解析モデル

コンクリート温度応力解析プログラム (ASTEAMACS) を用いて 3 次元 FEM 解析によって拘束応力を求めた。解析モデルを図-12 に示す。解析モデルは、対称性を考慮し 1/8 モデルで解析を行い、拘束用鋼材 (鉄筋とインバー鋼材) も 3 次元要素によって断面積が実測値と同一となるようモデル化した。解析期間はコンクリート打込み後 28 日間とした。

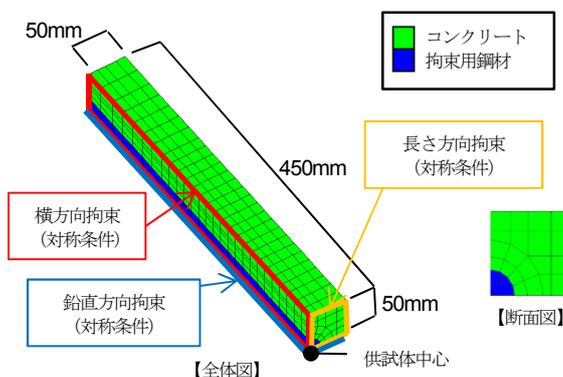


図-12 解析モデル

##### 3.1.2 解析方法及び解析に用いた材料の物性値

解析に用いたコンクリートの物性値を表-2 に示す。ここでは混和材を用いたコンクリートの拘束応力を推定する際の有効ヤング係数法を用いたクリープ解析の適用性を検討することを目的とし、解析を行う際の各供試体の温度履歴やコンクリートの物性値は、可能な限り実測値を用いた。クリープによる応力緩和の影響は、JCI 指針に準拠した有効ヤング係数法を用いて評価した。自己収縮においては、高温履歴下の自己収縮ひずみの増加挙動の考慮が拘束応力の推定精度に与える影響を検討するため、2.1.2 項で述べた拘束供試体と同一養生である発泡スチロール製の型枠を用いて高温履歴を与えた自己収縮ひずみと、JCI 試験法<sup>8)</sup>に準拠して 20°C 一定の環境下で封緘養生した角柱供試体 (100×100×400mm) の自己収縮ひずみを解析に用いた。これらの自己収縮ひずみの経時変化を図-13 に示す。

### 3.1.3 解析に用いた膨張ひずみ

膨張材を用いた場合の拘束応力の推定には膨張ひずみの設定方法やクリープによる応力緩和の考慮方法が重要となる。ここでは、クリープによる応力緩和は JCI 指針に準拠した有効ヤング係数法を用いて考慮し、膨張ひずみの設定方法を変化させた場合の応力の推定精度を検討した。

表-1 の H35B650EX において、JCI 指針で推奨している膨張ひずみ測定方法に準拠して、標準的な拘束膨張試験 (JIS A 6202 附属書 2) の PC 鋼棒 (φ11) を用いた拘束供試体 (100×100×900mm) に解析対象の拘束供試体と同一の簡易断熱による高温履歴を与えた封緘養生の供試体と、JIS A 6202 附属書 2 に準拠して材齢 1 日で脱型を行い、材齢 7 日まで標準養生 (20°C 水中) を行った供試体 (100×100×400mm) を製作し、膨張ひずみを測定した。

JIS A 6202 附属書 2 に準拠して標準養生を行った H35B650EX の膨張ひずみ (以下、JIS 膨張という) の経時変化を図-14 に示す。図には、JCI 指針の早強ポルトランドセメントの膨張ひずみの近似式 (以下、JCI 膨張式という) である式(1)の値と、比較対象の H35B650 の同一試験の結果をあわせて示している。

$$\varepsilon_{ex}(t') = \varepsilon_{ex,\infty} \left[ 1 - \exp\left\{-a_{ex}(t'-t_{ex,0})^{b_{ex}}\right\} \right] \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{ex}(t')$  : 有効材齢  $t'$  日における膨張ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、 $\varepsilon_{ex,\infty}$  : 膨張ひずみの終局値 ( $\times 10^{-6}$ )、 $\varepsilon_{ex,\infty} = 165 \times 10^{-6}$ 、 $a_{ex}$  及び  $b_{ex}$  : 膨張ひずみの進行特性に及ぼす影響を表す係数、 $a_{ex} = 1.45$ 、 $b_{ex} = 1.38$ 、 $t_{ex,0}$  : 膨張開始時点の有効材齢 (日)、 $t_{ex,0} = 0.20$  日である。

表-2 解析に用いたコンクリート物性値

コンクリート温度履歴	各供試体の中央位置でのコンクリート温度の実測値
圧縮強度 $f'_d(t_e)$	各配合の実測値を用いて JCI 指針式の係数を回帰
ヤング係数 $E_d(t_e)$	各配合の実測値を用いて JCI 指針式の係数を回帰
有効ヤング係数 $E_d(t_e)$	$E_e(t_e) = \varphi(t_e)E_c(t_e)$ (ピーク温度時まで $\varphi(t_e) = 0.42$ 、最高温度に達する有効材齢+1 日以降 $\varphi(t_e) = 0.65$ )
自己収縮	各配合の無拘束供試体での実測値 (A)高温履歴考慮 (B)20°C一定
熱膨張係数	各配合の実測値 (付録-4 表-4 参照)
ポアソン比	0.2

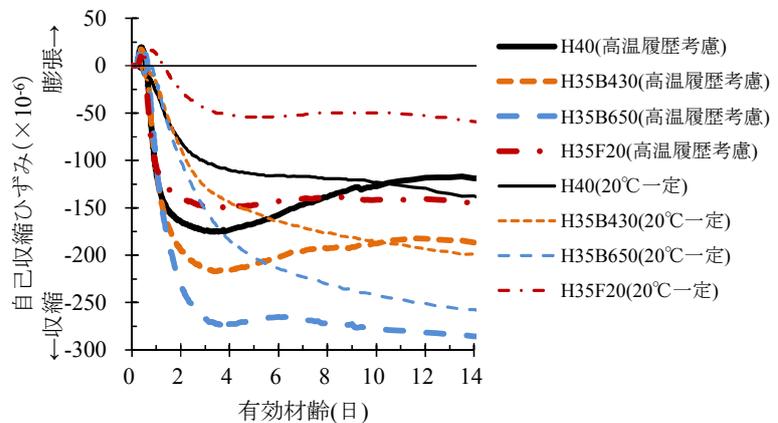


図-13 自己収縮ひずみの経時変化

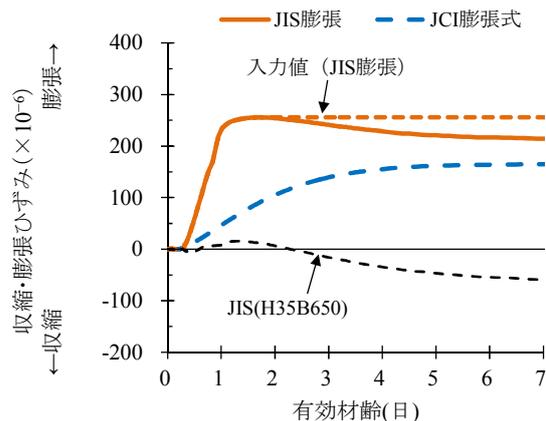


図-14 膨張ひずみの経時変化 (標準養生)

さらに、膨張材を用いた場合の検討ケース一覧を表-3 に、各検討ケースの膨張ひずみの経時変化を図-15 に示す。

検討は、H35B650EX の無拘束供試体で得られたひずみ（無拘束膨張）、PC 鋼棒φ11 を拘束鋼材として用いて応力推定する拘束供試体と同一養生を行った供試体で得られたひずみ（拘束φ11 膨張）、「JIS 膨張」と「JCI 膨張式」には自己収縮ひずみの影響を含んでいないため、H35B650 の同一の簡易断熱養生を行った無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみと重ね合わせたひずみ（収縮+JIS 膨張、収縮+JCI 膨張式）の4種類で比較した。なお、図-14 に示すように「JIS 膨張」のひずみでは有効材齢1.5日以降で収縮側に推移しているが、膨張材を用いないH35B650の場合においても水中養生中に同様に収縮した。「JIS 膨張」の膨張ひずみでは、自己収縮を二重に考慮しないように最大値のまま一定として自己収縮ひずみと重ね合わせた。

鋼材のヤング係数は実測値を用い、熱膨張係数は異形鉄筋で  $10.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、インバー鋼材で  $0.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  とし、ポアソン比はどちらの鋼材も 0.3 とした。

### 3.2 解析結果

#### 3.2.1 コンクリート応力分布

FEM 解析結果の一例として H35B650 の長さ方向の応力分布を図-16 に示す。

コンクリートと鋼材の境界部及び長さ方向端部を除くとコンクリート応力は概ね一様に分布した。ひずみゲージを用いて拘束応力を実測した供試体中央断面において、表面の長さ方向の応力を平均して実験結果と比較した。

表-3 膨張材効果の検討ケース

ケース	自己収縮ひずみ	膨張材効果
無拘束膨張	無拘束供試体 【H35B650EX (簡易断熱)】	
拘束φ11 膨張	拘束供試体 (PC 鋼棒φ11) 【H35B650EX (簡易断熱)】	
収縮+JIS 膨張	無拘束供試体 【H35B650EX (簡易断熱)】	JIS A 6202 【H35B650EX (標準養生)】
収縮+JCI 膨張式	無拘束供試体 【H35B650EX (簡易断熱)】	JCI 指針膨張 ひずみ近似式 【早強】

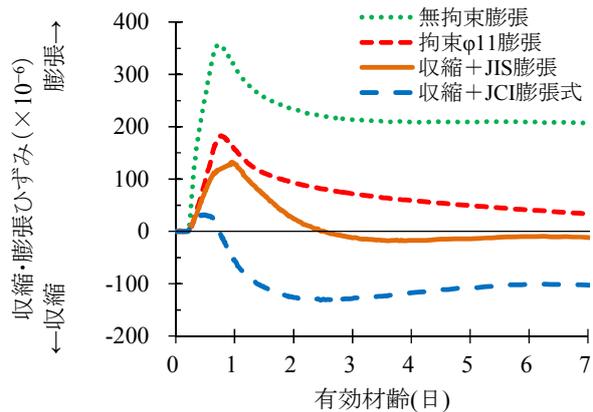


図-15 解析に用いた膨張ひずみの経時変化

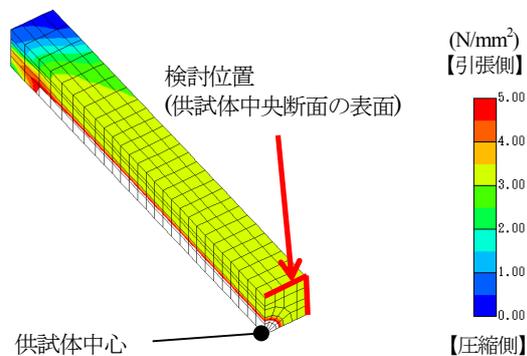


図-16 応力分布 (H35B650, インバー鋼材)

### 3.2.2 拘束応力の推定（膨張材を用いない場合）

膨張材を用いない4配合の異形鉄筋とインバー鋼材による拘束応力の実測値と、高温履歴を考慮した自己収縮ひずみを用いて解析した結果（以下、高温履歴考慮という）及び20℃一定の場合の自己収縮ひずみを用いて解析した結果（以下、20℃一定という）を図-17, 18に示す。また、これらの材齢28日までの最大引張応力の実測値と解析値の関係を図-19に示す。

拘束供試体と同一養生の高温履歴を考慮した場合に着目すると、図-17の異形鉄筋を用いた場合では混和材の有無によらず材齢3日までは実測値を過小評価することが多い。これは、クリープによる応力緩和の影響を簡易的に考慮していることが原因と考えられる。しかしながら、その後、材齢7日までには実測値と解析値は概ね同等になり、図-19に示すように最大引張応力の実測値と解析値は概ね同等となった。したがって、混和材を用いたコンクリートでは、自己収縮応力が卓越する異形鉄筋による拘束応力、自己収縮応力と温度応力が複合したインバー鋼材による拘束応力のいずれの場合でも、コンクリートの材料特性が把握できればJCI指針の有効ヤング係数法に基づいた既存の応力解析手法によって概ね推定できると考えられる。

次に、自己収縮ひずみの高温履歴の考慮の有無が温度解析結果に及ぼす影響を検討した。自己収縮応力が卓越する異形鉄筋を用いた図-17で特にみられるように、混和材の有無にかかわらず材齢時の応力の推定精度は明らかに20℃一定の場合より高温履歴考慮の場合の方が向上した。さらに、図-19をみると最大引張応力の実測値と解析値の相関係数も高温履歴を考慮した方が大きい。このことから、混和材の有無にかかわらず、自己収縮ひずみの高温履歴を考慮することによって温度応力の解析精度を向上できることが認められた。

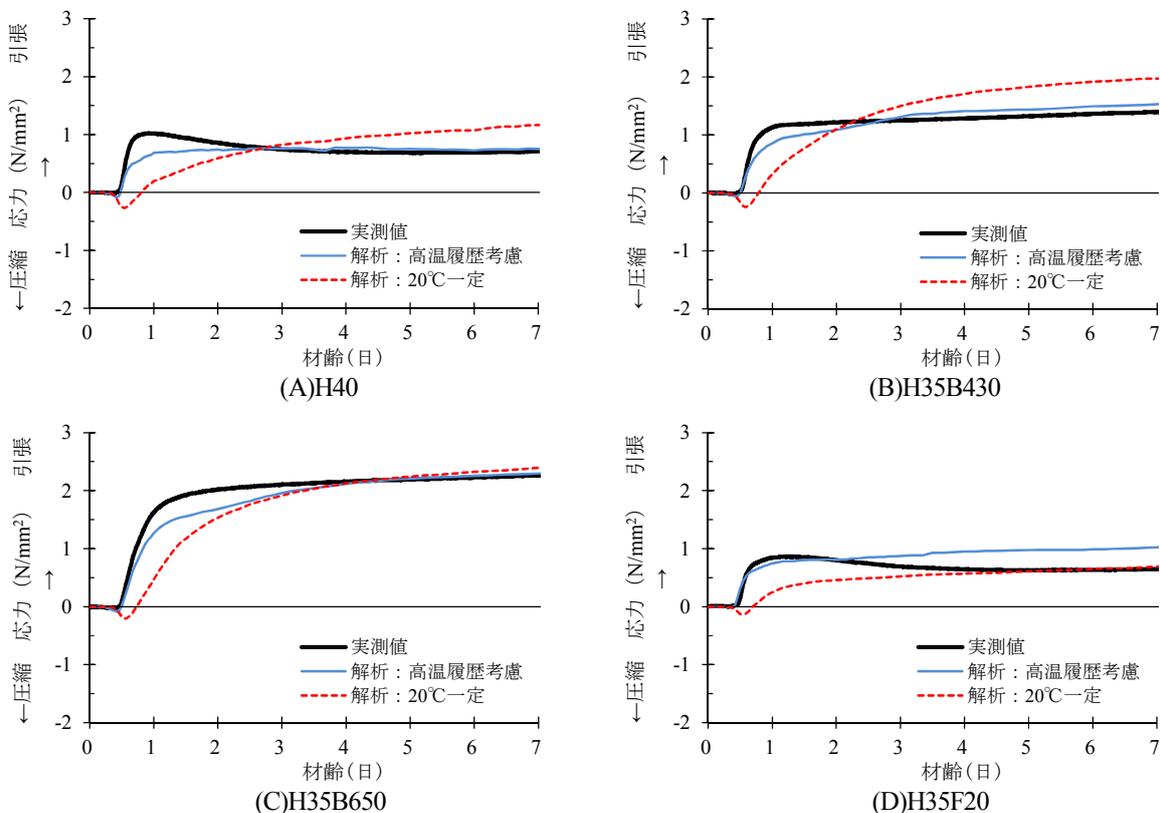


図-17 拘束応力の経時変化（異形鉄筋，膨張材を用いない場合）

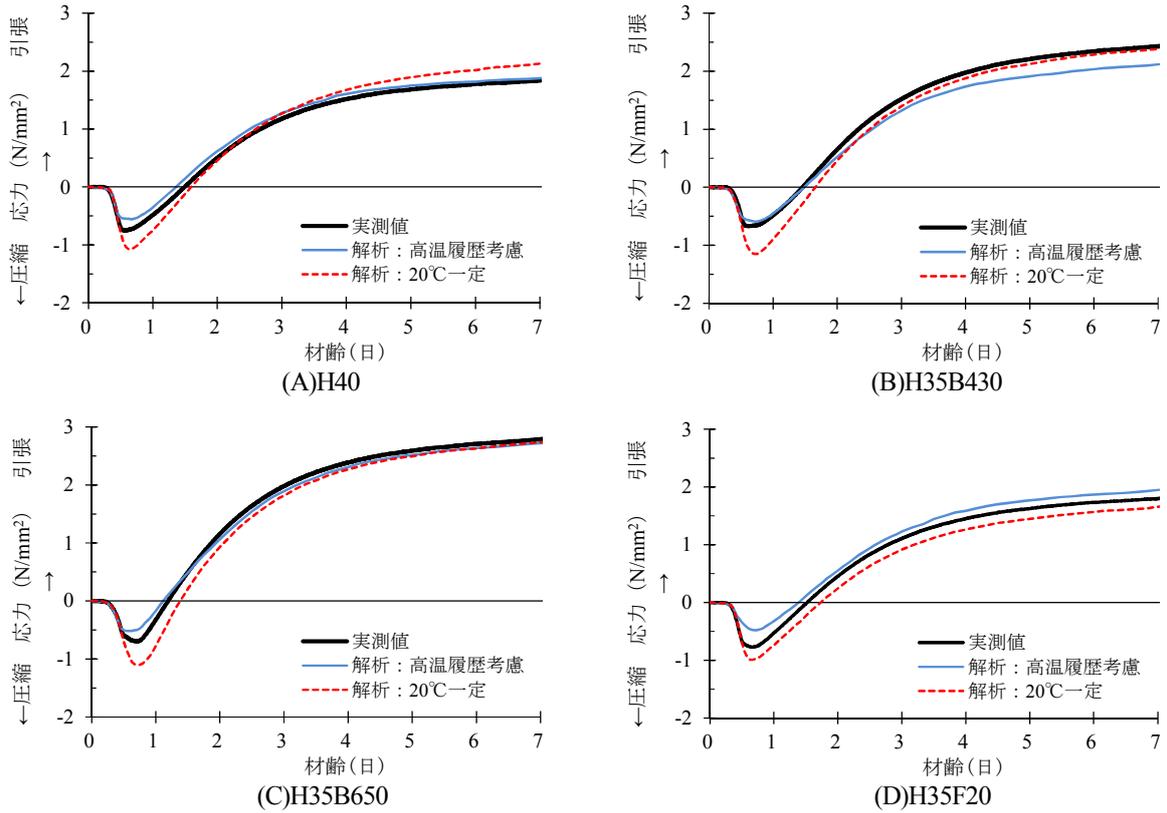


図-18 拘束応力の経時変化（インバー鋼材，膨張材を用いない場合）

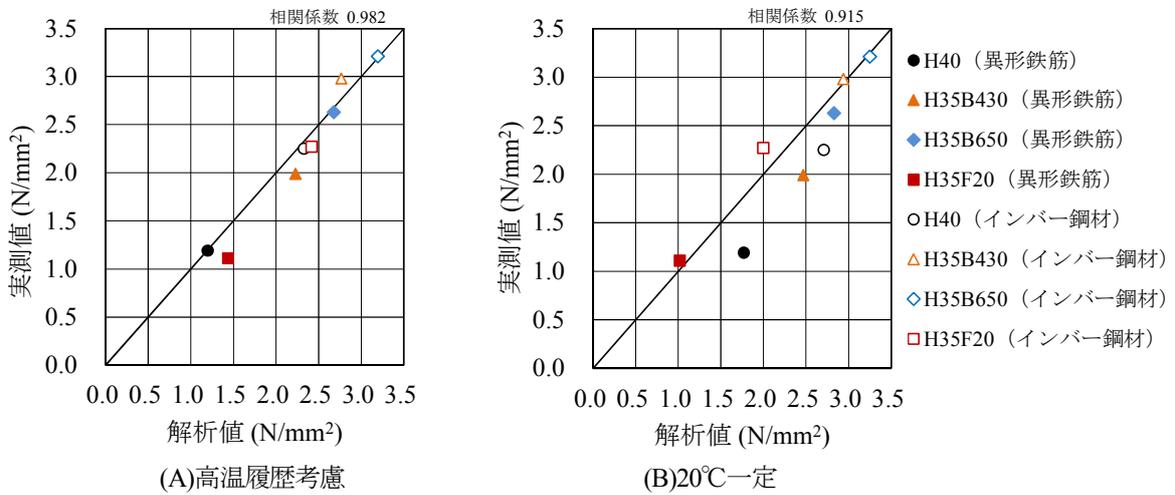


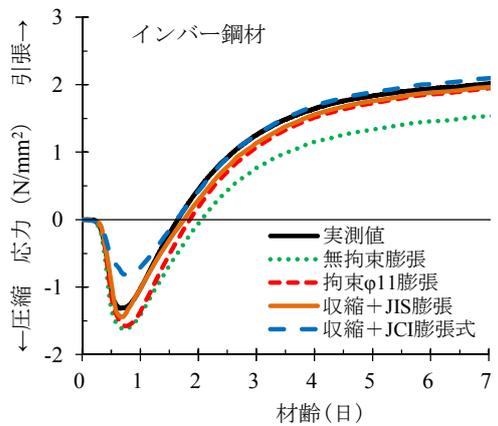
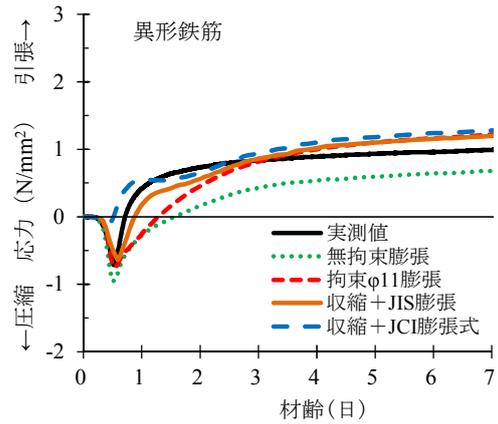
図-19 最大引張応力（膨張材を用いない場合）

### 3.2.3 拘束応力の推定（膨張材を用いる場合）

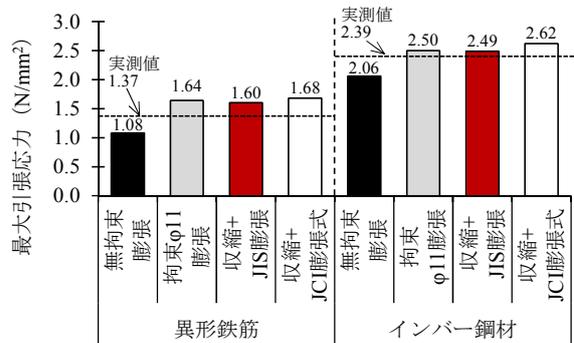
膨張材を用いる表-3の4ケースについて、異形鉄筋とインバー鋼材による拘束応力の実測値と解析値の経時変化を図-20に示す。さらに、材齢28日までの引張応力の最大値を図-21に示す。

「無拘束膨張」のケースに着目すると、異形鉄筋とインバー鋼材のいずれも若材齢の圧縮応力を過大評価し、引張側に応力が推移した場合には、実測値を過小評価した。無拘束供試体によって得られたひずみを用いて拘束応力を推定した場合、膨張材を用いないケースでは拘束応力を概ね評価できたが、膨張材を用いるケースではひび割れ発生に対し危険側の評価を与える結果となった。JCI 指針においても拘束下での膨張ひずみを用いて膨張材の効果を考慮しているが、**図-15**に示したように若材齢の無拘束の膨張ひずみでは、他のケースより急激に増加するため、クリープによる応力緩和の影響を有効ヤング係数法のような簡易的な方法では評価できないと考えられる。一方、**図-20**の他の3ケースでは、異形鉄筋とインバー鋼材による拘束応力どちらも「収縮+JIS 膨張」のケースが若材齢からの応力の経時変化を最も適切に評価できている。ただし、膨張材による応力低減効果を示すと考えられる**図-21**の最大引張応力に着目すると「収縮+JIS 膨張」に対して「拘束φ11 膨張」もほとんど差はみられず、これらと比較して「収縮+JCI 膨張式」でも  $0.1\text{N/mm}^2$  程度の過大評価となった。

これらのことから、高炉スラグ微粉末と膨張材を併用した場合の応力低減効果は、JCI 指針で推奨している PC 鋼棒 (φ11) を用いて温度履歴を与えて封緘養生を行った供試体のひずみ、あるいは JIS A 6202 附属書 2 に準拠して標準養生を行った供試体のひずみと膨張材を用いない温度履歴を考慮した自己収縮ひずみを重ね合わせたひずみを用いることで概ね評価できると考えられる。なお、膨張ひずみの実測値が得られない場合、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの JCI 膨張式を用いても多少安全側ではあるが最大引張応力は概ね推定できると考えられる。



**図-20** 拘束応力の経時変化 (膨張材を用いた場合)



**図-21** 最大引張応力 (膨張材を用いた場合)

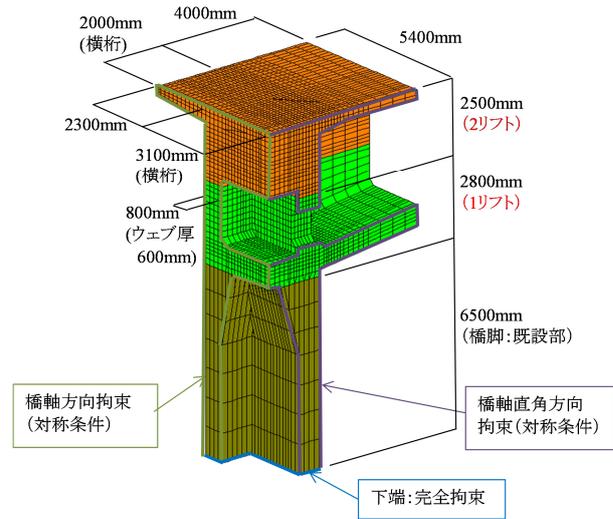
## 4. ラーメン箱桁橋における温度ひび割れ抵抗性の検討例

### 4.1 解析概要

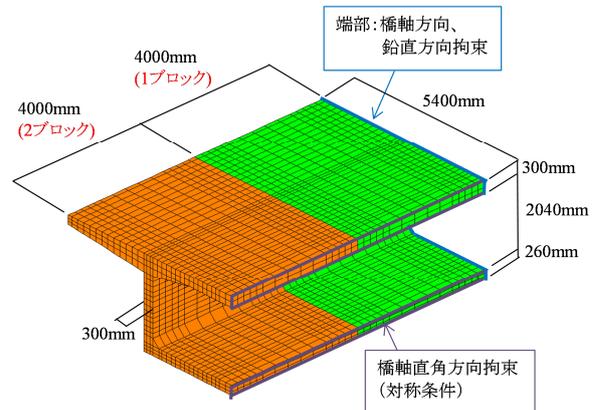
#### 4.1.1 解析対象

コンクリート温度応力解析プログラム (ASTEAMACS) を用いて 3 次元 FEM 解析によるプレストレストコンクリート橋の温度ひび割れに対する抵抗性の検討を行った。解析モデルを図-22 に示す。解析対象は、片持張出架設によって施工する PC ラーメン箱桁橋の柱頭部と張出部とした。

柱頭部はマスコンクリートとなるため、内部拘束による温度応力が卓越する場合、2 リフトが 1 リフトの外部拘束によって拘束応力が生じる場合を想定している。2 リフトに分けてコンクリートの打込みを行い、打込み間隔は 16 日間とした。一方、部材が柱頭部と比較すると薄い張出部は、2 ブロックのコンクリートの初期材齢の自己収縮ひずみが 1 ブロックに拘束する外部拘束によって拘束応力が生じる場合を想定している。1 ブロックと 2 ブロックの打込み間隔は 10 日間とした。解析は、2 ブロックのコンクリートの打込み後、材齢 28 日まで行った。



(A)柱頭部



(B)張出部

図-22 解析モデル

#### 4.1.2 解析に用いたコンクリートの特性

付録-4 の 4 配合 (H40, H35B430, H35B650, H35F20)

の実験結果に基づいて検討した。解析に用いた圧縮強度の発現を図-23 に、自己収縮ひずみの経時変化を図-24 に示す。自己収縮ひずみは、温度履歴の異なる小型供試体 (100×100×400mm) と厚さ 200mm の発泡

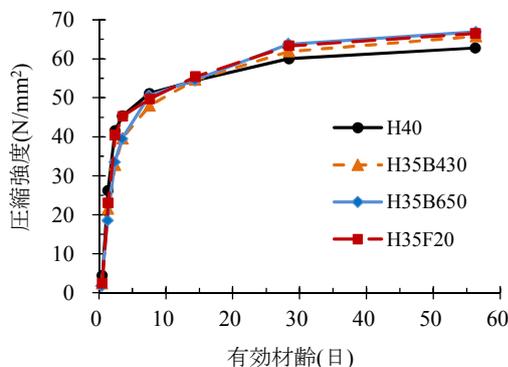


図-23 圧縮強度の発現

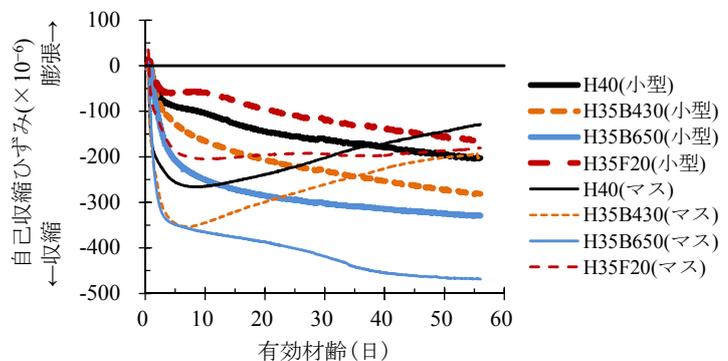


図-24 自己収縮ひずみの経時変化

スチロールによって全面を覆って簡易的な断熱を行ったマスブロック（400×400×400mm）を用いて測定した。図-23 から混和材の使用が圧縮強度発現に及ぼす影響は小さいことが認められた。一方、図-24 に示した自己収縮ひずみの経時変化をみると、全ての配合で小型供試体よりもマスブロックの方が自己収縮ひずみの増加速度が速く、また最大値も大きくなっており、高温履歴の影響が認められた。配合間の比較では、H40を基準にすると、自己収縮ひずみの最大値は、H35F20では小さいが、H35B430とH35B650では明らかに大きくなることが認められた。

一方、この試験の範囲内では、温度ひび割れに対する抵抗性に及ぼす要因のうち、熱膨張係数、クリープ係数、ヤング係数は同様であった<sup>1)9)</sup>。また、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係も早強単味のコンクリートと概ね同様の傾向が認められた<sup>10)</sup>。

#### 4.1.3 解析条件

圧縮強度と自己収縮ひずみ以外の物性値は、コンクリート標準示方書<sup>11)</sup>に準拠した早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの値を用いて解析を行った。自己収縮ひずみの高温履歴を考慮した影響を確認するため、小型供試体とマスブロックの自己収縮ひずみの実験結果に基づいて比較した。熱伝達率は、養生マットで5W/m<sup>2</sup>°C、木製型枠で8W/m<sup>2</sup>°C、鋼製型枠（張出部に使用）で14W/m<sup>2</sup>°C、コンクリート露出面で13W/m<sup>2</sup>°Cとした。なお、養生期間は、柱頭部で7日間、張出部で3日間とした。

### 4.2 解析結果

#### 4.2.1 コンクリート温度

柱頭部と張出部のコンクリートの最高温度分布を図-25に示す。最高温度は、柱頭部では横桁中央の92°C、張出部では上縁から150mmのウェブ内部の67°Cであった。マスブロックのコンクリート最高温度と比較すると、柱頭部では約10°C高く、張出部では約15°C低い。しかしながら、現段階では温度履歴と自己収縮ひずみのデータが蓄積されていないため、マスブロックの自己収縮ひずみを用いて温度履歴考慮の影響を検討した。

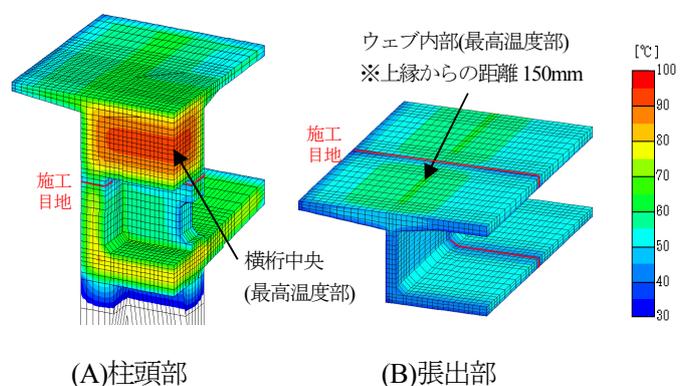


図-25 最高温度分布

#### 4.2.2 ひび割れ指数

##### (1) 検討箇所

ひび割れに対する抵抗性は、式(2)に示すひび割れ指数 ( $I_{cr}(t)$ ) によって検討した。すなわち、ひび割れ指数が小さいほど、ひび割れが発生しやすいことを示す。

$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t) \quad (2)$$

ここに、 $f_{tk}(t)$  : 材齢  $t$  日におけるコンクリート引張強度、 $\sigma_t(t)$  : 材齢  $t$  日におけるコンクリート最大主引張応力度である。

最小ひび割れ指数分布の一例として、マスブロックの自己収縮ひずみを用いた場合の H35B650 の結果を図-26 に示す。ひび割れ指数は、全てのケースにおいて、柱頭部では横桁付近のウェブ、張出部では上床版の上縁で最小となった。さらにマスコンとなっている柱頭部では、図-26(A)に示すように横桁表面のひび割れ指数も小さかった。このため、図-26 の3箇所(ウェブ、横桁表面、上床版)でひび割れ指数を比較した。この3箇所と図-25 に示した最高温度部のコンクリート温度履歴を図-27 に示す。

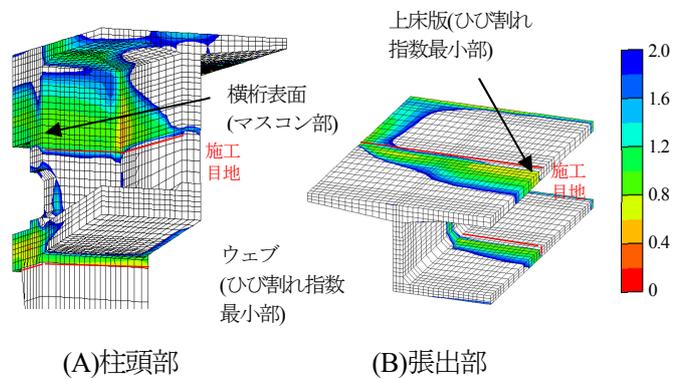


図-26 最小ひび割れ指数分布  
(H35B650 (マスブロック))

## (2) 混和材及び自己収縮ひずみの高温履歴考慮の影響

小型供試体から得られた 20°C一定の自己収縮ひずみを用いた場合 (以下、20°C一定という) と、マスブロックから得られた高温履歴を考慮した自己収縮ひずみを用いた場合 (以下、高温履歴考慮という) のひび割れ指数の経時変化を図-28, 29 に示す。図中には、自己収縮の影響を検討するため H40 の自己収縮未考慮の場合 (以下、収縮未考慮という) の結果もあわせて示す。

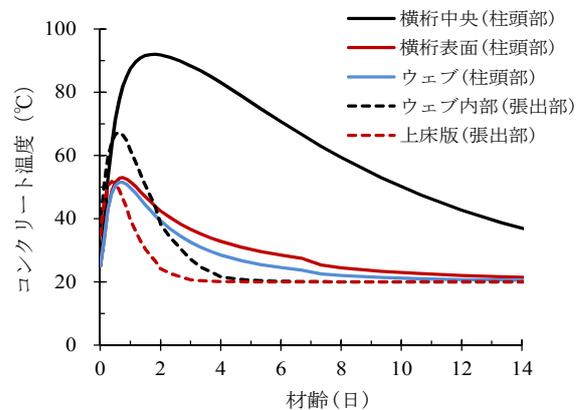


図-27 コンクリート温度履歴  
(ひび割れ指数検討箇所)

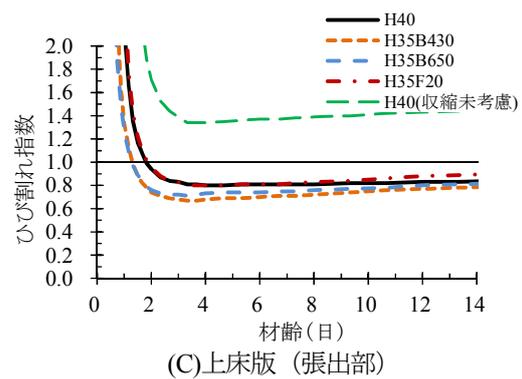
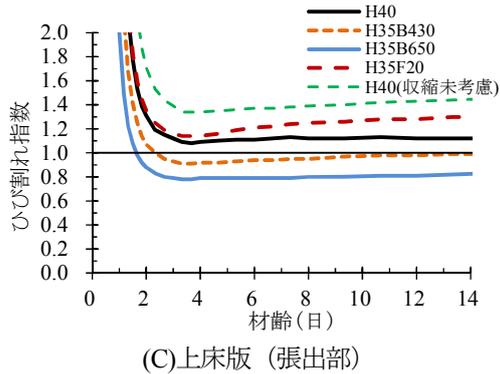
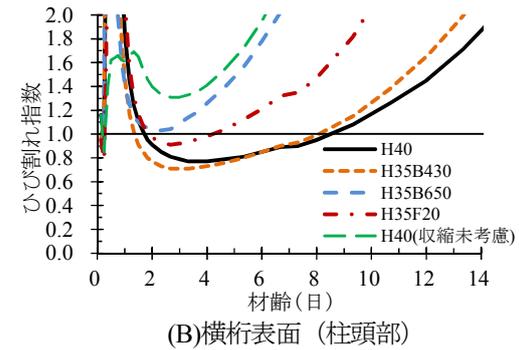
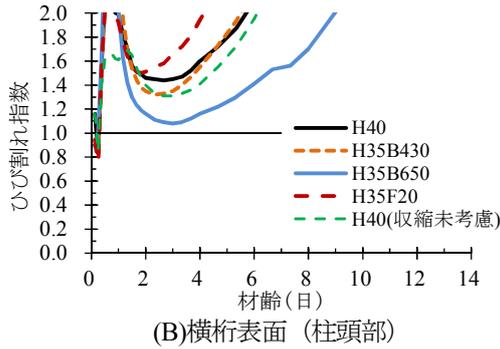
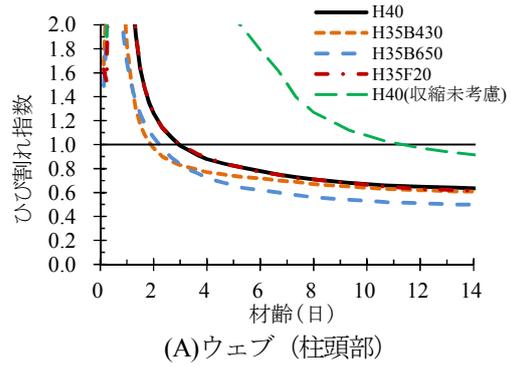
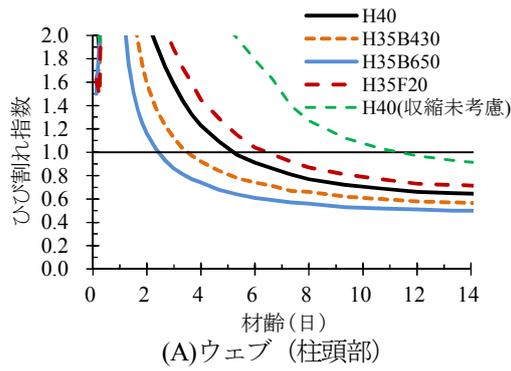


図-28 ひび割れ指数の経時変化  
(自己収縮：小型供試体)

図-29 ひび割れ指数の経時変化  
(自己収縮：マスブロック)

ひび割れ指数が最小となった柱頭部のウェブと張出部の上床版は、収縮未考慮の場合のひび割れ指数の経時変化や図-27の温度履歴からもみられるように、温度降下に伴い（柱頭部では材齢1～5日、張出部では材齢1～3日）、ひび割れ指数が低下した。コンクリート温度が低下するまでひび割れ指数の低下が継続している。このことから、これらの箇所では既設部の外部拘束が卓越していると考えられる。

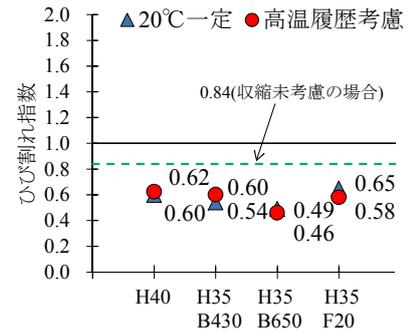
一方、マスコンとなった柱頭部の横桁表面では、材齢0.5日以前は温度上昇時、材齢3日までは温度降下時の急激な温度変化に伴いひび割れ指数が低下しているが、すぐに増加に転じた。柱頭部の横桁表面は既設部に近いこと外部拘束の影響もあるが、ひび割れ指数の低下は一時的なものであり、外部拘束よりも内部拘束が卓越していると考えられる。

3箇所での最小ひび割れ指数の比較を図-30に示す。なお、図-28(B)、29(B)の材齢0.5日以前でみられ

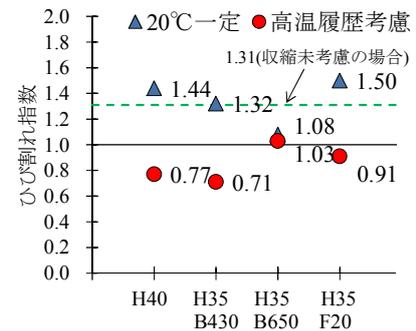
る温度上昇時の一時的なひび割れ指数の低下は、コンクリート引張強度が極めて小さい段階で生じたものであり、発生応力も小さく部材への影響は少ないと考えられるため検討から除外した。

ひび割れ指数が最小であった箇所に着目すると、部材厚は柱頭部のウェブが600mm、張出部の上床版が300mmと2倍異なり、**図-30(A)**、**30(C)**から両者の収縮未考慮の場合のひび割れ指数の差も0.50であり、柱頭部のウェブの方が温度応力によるひび割れ指数低下の影響が大きい。温度応力の影響が大きい柱頭部のウェブでは、混和材の使用による20°C一定と高温履歴考慮の結果にほとんど差がみられなかった。自己収縮ひずみが大きかった高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでも、H40と比較して、H35B430で平均0.05、H35B650で平均0.14程度のひび割れ指数低下であった。このように、**図-24**では小型供試体とマスブロックの自己収縮ひずみの進行速度や大きさは異なるものの、柱頭部のウェブにおける最小ひび割れ指数の差は小さかった。しかし、温度応力が小さく自己収縮が卓越すると考えられる張出部上床版においては、20°C一定と高温履歴考慮のひび割れ指数に明確な差が認められ、高温履歴考慮の場合では、混和材の使用の有無によらず自己収縮によるひび割れ指数の低下が顕著にみられた。また、20°C一定では、混和材の使用による差も顕著であったが、高温履歴考慮では最大でも差は0.13と小さく傾向が異なった。これらのことから、張出部上床版のように部材が薄く温度応力が小さい部材では、自己収縮ひずみの高温履歴考慮がひび割れ抵抗性の評価に影響することが認められた。

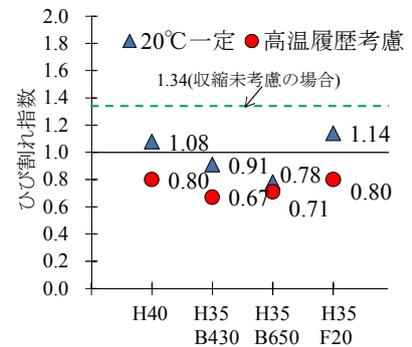
一方、**図-30(B)**の内部拘束が卓越する柱頭部の横桁表面では、20°C一定の場合のひび割れ指数が、収縮未考慮の場合に対して大きいものもみられた。また、高温履歴考慮の場合は最も自己収縮ひずみが大きいH35B650が他の3配合よりひび割れ指数が大きくなった。これらは、内部の高温部において自己収縮が進行し、内外のひずみ差が減少したことが要因として考えられる。このように内部拘束が卓越する場合には、ひび割れ指数が改善される場合もある。ただし、高温履歴考慮の自己収縮ひずみを用いた場合には、明らかに収縮未考慮の場合よりひび割れ指数が小さくなった。



(A)ウェブ (柱頭部)



(B)横桁表面 (柱頭部)



(C)上床版 (張出部)

図-30 最小ひび割れ指数の比較

## 5. まとめ

マスコンクリートの高温履歴を模擬した拘束試験によってコンクリートの拘束応力の発生メカニズムを検討し、FEM 解析による拘束応力の推定精度を検証した。また、PC ラーメン箱桁橋の柱頭部と張出部を対象として、混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れに対する抵抗性及び自己収縮の高温履歴考慮の影響をFEM 解析によって試算した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) マスコンクリートの高温履歴を模擬した供試体の材料試験の結果、混和材や膨張材の使用有無にかかわらず、圧縮強度と割裂引張強度及びヤング係数の関係は同様の傾向となることがわかった。
- (2) マスコンクリートの高温履歴を模擬した拘束試験の結果、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは自己収縮ひずみが増大し、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して拘束応力が大きく、ひび割れが多く発生した。また、混和材を用いたコンクリートにおいてもひび割れ指数の大小とひび割れ発生状況の関係が概ね一致すること、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートにおいても膨張材を併用することによってひび割れの発生を抑制できること等がわかった。
- (3) FEM解析によるコンクリートの拘束応力の推定精度を検証した結果、混和材を用いたコンクリートにおいても、コンクリートの材料特性を把握できていれば、自己収縮応力や温度応力は有効ヤング係数法を用いた既存のクリープ解析手法で概ね推定できることがわかった。また、混和材の使用有無にかかわらず、自己収縮ひずみの高温履歴を考慮することによって温度応力の解析精度が向上することがわかった。
- (4) 高炉スラグ微粉末と膨張材を併用したコンクリートの拘束応力の推定方法を検討した結果、有効ヤング係数法に基づいた拘束応力の推定方法に、PC鋼棒φ11の拘束下で温度履歴を与えた封緘養生の供試体のひずみ、あるいは、JIS A 6202附属書2に準拠して標準養生を行った供試体のひずみと膨張材を用いない温度履歴を考慮した自己収縮ひずみを重ね合わせたひずみを用いると、膨張材による応力低減効果を概ね評価できることがわかった。また、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートを対象とした既存の膨張ひずみの近似式を用いても多少安全側ではあるが最大引張応力を推定できることがわかった。
- (5) PCラーメン箱桁橋を対象としたFEM解析の結果、外部拘束が卓越する部材においては、部材が厚い柱頭部のウェブでは混和材の使用有無や自己収縮ひずみの高温履歴考慮がひび割れ指数に及ぼす影響は小さいことがわかった。ただし、部材が薄い張出部の上床版においては、自己収縮ひずみの高温履歴考慮が解析結果に及ぼす影響は顕著になり、高温履歴を考慮するとひび割れ指数に及ぼす混和材の使用有無の影響は小さくなった。一方、内部拘束が卓越する柱頭部の横桁表面においては、自己収縮ひずみを考慮するとひび割れ指数が改善される場合があることがわかった。ただし、高温履歴を受けた自己収縮ひずみを用いると自己収縮を考慮しない場合よりひび割れ指数は低下した。

## 参考文献

- 1) 石井豪, 中村英佑, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートの強度発現と自己収縮特性への温度履歴の影響, 第23回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.59-64,

2014

- 2) 中村英佑, 鈴木雅博, 石井豪, 古賀裕久: 混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する実験的研究, 第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.515-520, 2015
- 3) 河金甲, 中村英佑, 鈴木雅博, 石井豪: 混和材を用いたコンクリートの初期応力推定に関する検討, 第24回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.521-526, 2015
- 4) 河金甲, 小林崇, 長谷川剛, 鈴木雅博: 混和材を用いた PC 構造物の初期ひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 385-390, 2015
- 5) 佐藤重一, 河野広隆, 渡辺博志, 丁海文: 現場打ち高強度コンクリートの初期ひび割れに関する検討, 第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.551-556, 2000
- 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) Springenschmid, P, et. al: Development of the cracking frame and the temperature-stress testing machine, Thermal cracking in concrete at early ages, RILEM Proceedings 25, E & FN Spon, , pp.137-144, 1994
- 8) 日本コンクリート工学協会: (仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法, 超流動コンクリート研究委員会報告書(II), pp.209-210, 1994
- 9) 中村英佑, 石井豪, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートのクリープ・収縮に関する実験的研究, プレストレストコンクリート, Vol. 56, No. 3, pp. 54-60, 2014
- 10) 舟橋政司, 白根勇二, 荻野正貴, 中村英佑: 低炭素型のコンクリートの配合設計手法および硬化特性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 232-237, 2014
- 11) 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6 混和材を用いたコンクリートの養生

### 1. 概要

混和材を用いたコンクリートは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、強度発現が遅く、強度発現や耐久性が初期材齢の湿潤養生期間の影響を受けやすい。混和材を用いたプレストレストコンクリート橋において、所要の強度や耐久性を確保するためには、初期材齢の湿潤養生期間の違いが強度発現と耐久性に与える影響を把握した上で、適切な湿潤養生日数を設定する必要がある。しかし、混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間の設定方法は明確でなく、現場打ちプレストレストコンクリート橋に混和材を用いたコンクリートを適用する際の課題となっていた。また、国内外の主要な基準類<sup>1)~5)</sup>を対象として、混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間に関する規定を調査した結果、次のことがわかった。

- ・ 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の湿潤養生期間については、明確な規定が定められていなかった。
- ・ 混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間については、ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも長く設定する必要があること、低温時には湿潤養生期間をさらに延長する必要があること等が示されていた。
- ・ 湿潤養生期間を検討する際に考慮すべき項目として、強度と耐久性が挙げられていた。

そこで、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の湿潤養生期間を設定するため、湿潤養生期間の異なるコンクリート供試体を製作して室内試験及び暴露試験を行い、湿潤養生期間が強度発現と耐久性に与える影響を検討した。

### 2. 実験方法

#### 2.1 コンクリートの配合と基礎物性

混和材を用いたコンクリートの初期材齢の湿潤養生期間の違いが強度発現と耐久性に与える影響を明らかにするため、湿潤養生期間の異なるコンクリート供試体を製作して室内試験及び暴露試験を行った。コンクリートの配合と基礎物性を表ー1 に示す。配合は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリート (H40)、早強ポルトランドセメントの 30%を高炉スラグ微粉末 4000 で置換したコンクリート (H40B430)、50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換したコンクリート (H40B650)、20%をフライアッシュⅡ種で置換したコンクリート (H40F20) の 4 種類とした。湿潤養生期間の違いが混和材を用いたコンクリートの強度発現と耐久性に与える影響を明らかにすることを目的としたため、全配合において、水結合材比を 40%、単位水量を 165kg/m<sup>3</sup>、

単位粗骨材量を  $968\text{kg/m}^3$  に統一した。コンクリートの練混ぜ、打込み、養生については、室温  $20^\circ\text{C}$  に管理された実験室内で行った。

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )						s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 ( $^\circ\text{C}$ )	
		W	B=HPC+BS4+BS6+FA				S					G
			HPC	BS4	BS6	FA						
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	45.0	13.0	5.3	23.0
H40B430			289 (70%)	124 (30%)	—	—	749		44.7	12.0	4.4	21.3
H40B650			206 (50%)	—	206 (50%)	—	745		42.9	11.5	4.5	21.5
H40F20			330 (80%)	—	—	83 (20%)	734		42.4	9.5	4.4	23.0

※HPC: 早強ポルトランドセメント (密度 =  $3.14\text{g/cm}^3$ , 比表面積 =  $4,490\text{cm}^2/\text{g}$ ), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000 (密度 =  $2.89\text{g/cm}^3$ , 比表面積 =  $4,440\text{cm}^2/\text{g}$ ,  $\text{SO}_3 = 2.19\%$  (無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000 (密度 =  $2.91\text{g/cm}^3$ , 比表面積 =  $5,950\text{cm}^2/\text{g}$ ,  $\text{SO}_3 = 2.85\%$  (無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種 (密度 =  $2.30\text{g/cm}^3$ , 比表面積 =  $4,280\text{cm}^2/\text{g}$ ), 単位量の ( ) 内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示

※S: 細骨材 (静岡県掛川産陸砂, 密度 =  $2.56\text{g/cm}^3$ , 吸水率 =  $2.23\%$ ), G: 粗骨材 (茨城県笠間産砕石 6 号 (密度 =  $2.67\text{g/cm}^3$ , 吸水率 =  $0.43\%$ ) と 5 号 (密度 =  $2.67\text{g/cm}^3$ , 吸水率 =  $0.46\%$ ) を均等に混合)

※化学混和剤: スランプ  $12 \pm 2.5\text{cm}$ , 空気量  $4.5 \pm 1.5\%$  となるよう高性能 AE 減水剤と空気連行剤の使用量を調整

## 2.2 養生条件

供試体の養生条件を表-2 に示す。養生条件は、標準養生 (W), 気中養生 (D), 湿潤養生 (C3, C7) とした。湿潤養生では、十分に湿らせた養生マットを用いて供試体を覆い、1 日 1 回の頻度で散水して水分を供給した。湿潤養生期間については、3 日 (C3) と 7 日 (C7) の 2 種類とした。

表-2 供試体の養生条件

養生条件	記号	養生方法
標準養生	W	コンクリート打込み翌日に脱型し、水温 $20^\circ\text{C}$ の養生槽内で材齢 28 日まで水中養生した後、室温 $20^\circ\text{C}$ , 湿度 $60\%$ の室内で試験時まで気中養生
気中養生	D	コンクリート打込み翌日に脱型した後、室温 $20^\circ\text{C}$ , 湿度 $60\%$ の室内で試験時まで気中養生
湿潤養生	C3	コンクリート打込み翌日に脱型し、材齢 3 日まで室温 $20^\circ\text{C}$ , 湿度 $60\%$ の室内で湿潤養生した後、室温 $20^\circ\text{C}$ , 湿度 $60\%$ の室内で試験時まで気中養生
	C7	コンクリート打込み翌日に脱型し、材齢 7 日まで室温 $20^\circ\text{C}$ , 湿度 $60\%$ の室内で湿潤養生した後、室温 $20^\circ\text{C}$ , 湿度 $60\%$ の室内で試験時まで気中養生

## 2.3 試験項目

試験項目を表-3 に示す。試験項目は、圧縮強度、中性化、塩化物イオン浸透、凍結融解の 4 種類とした。

圧縮強度については、円柱供試体 ( $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ) を用いて、標準養生 (W) と気中養生 (D) で材齢 3, 7, 28, 56, 91, 365 日、湿潤養生 (C3, C7) で材齢 7, 28, 56, 91, 365 日に測定した。材齢 365 日の試験

については、材齢 91 日以降に屋外暴露した円柱供試体を用いて行った。屋外暴露試験の実施場所は、土木研究所（茨城県つくば市南原）とした。供試体の暴露状況を写真-1 に示す。

表-3 試験項目

試験項目		養生条件	試験材齢
圧縮強度	圧縮強度試験 JIS A 1108	W, D, C3, C7	材齢 3, 7, 28, 56, 91, 365 日で実施 (※材齢 365 日の試験は材齢 91 日以降に屋外暴露した後で実施) (※材齢 3, 7 日の試験は養生条件 W と養生条件 D で実施)
	促進中性化試験 JIS A 1153	D, C3, C7	材齢 56 日から開始
屋外暴露試験	材齢 91 日以降に 30 ヶ月屋外暴露した後で中性化深さを測定		
塩化物イオン 浸透	電気泳動試験 (非定常法)	W, D, C3, C7	材齢 4, 8, 30 ヶ月で実施 (※材齢 8, 30 ヶ月の試験は材齢 91 日以降に屋外暴露した後で実施)
凍結融解	凍結融解試験 JIS A 1148 A 法	C3	材齢 28 日まで気中養生した後で実施

中性化に対する抵抗性については、促進中性化試験と暴露試験を行って検討した。促進中性化試験については、角柱供試体（100×100×400mm）を気中養生（D）と湿潤養生（C3, C7）で製作し、材齢 49 日以降で供試体の片側側面（100×400mm）以外をエポキシ樹脂塗料でシールした後、材齢 56 日から JIS A 1153 に準拠して開始した。暴露試験については、促進中性化試験に用いた角柱供試体と同時に角柱供試体（100×100×200mm）を製作し、材齢 49 日以降で供試体の片側側面（100×200mm）以外をエポキシ樹脂塗料でシールした後、材齢 91 日以降に写真-1 に示した場所で開始した。その後、暴露 30 ヶ月後に角柱供試体を回収し、JIS A 1152 に準拠して中性化深さを測定した。

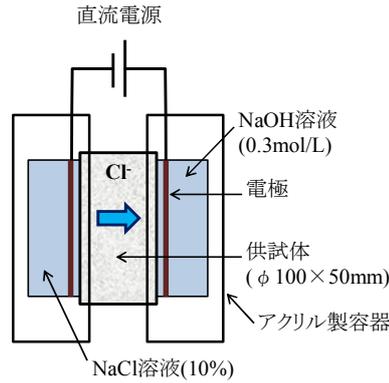
塩化物イオン浸透に対する抵抗性については、電気泳動試験（非定常法）を行って検討した。円柱供試体（φ100×100mm）を標準養生（W）、気中養生（D）、湿潤養生（C3, C7）で製作し、図-1 に示す方法を用いて材齢 4, 8, 30 ヶ月で試験を行った。材齢 8, 30 ヶ月の試験については、材齢 91 日以降に写真-1 に示した場所に暴露した円柱供試体を用いて行った。養生方法の違いが塩化物イオン浸透に対する抵抗性に与える影響を検討するため、型枠底面を試験対象面として、この面が脱型後に湿潤状態あるいは乾燥状態となるように養生を行った。養生後、型枠底面から厚さ 50mm で供試体を切断し、真空飽水処理後に印加電圧 30V で通電を行い、通電後の供試体を割裂して硝酸銀溶液（0.1mol/L）を割裂面に噴霧し、塩化物イオンの浸透深さを測定した。

凍結融解に対する抵抗性については、凍結融解試験（JIS A 1148 の A 法）を行って検討した。角柱供試体（100×100×400mm）を湿潤養生（C3）で製作し、材齢 28 日から試験を開始した。ただし、ここでは付録-3 の凍結融解試験に用いた供試体と同時に製作した供試体を用いたため、コンクリートの配合と基礎物性は付録-3 の表-3 と同一である。



場所：茨城県つくば市南原  
 平均気温：15.5℃  
 平均湿度：72.9%  
 累積降水量：2580mm  
 ※気象データは暴露場の最寄りの気象観測地点  
 (つくば(館野))の値<sup>6)</sup>を記載

写真-1 暴露試験の実施状況と気象データ



印加電圧：30V  
 通電時間：  
 9h (材齢4ヶ月)  
 18h (材齢8, 30ヶ月)

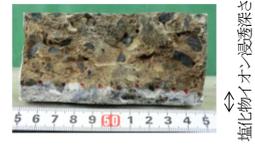


図-1 電気泳動試験(非定常法)の概要

### 3. 実験結果

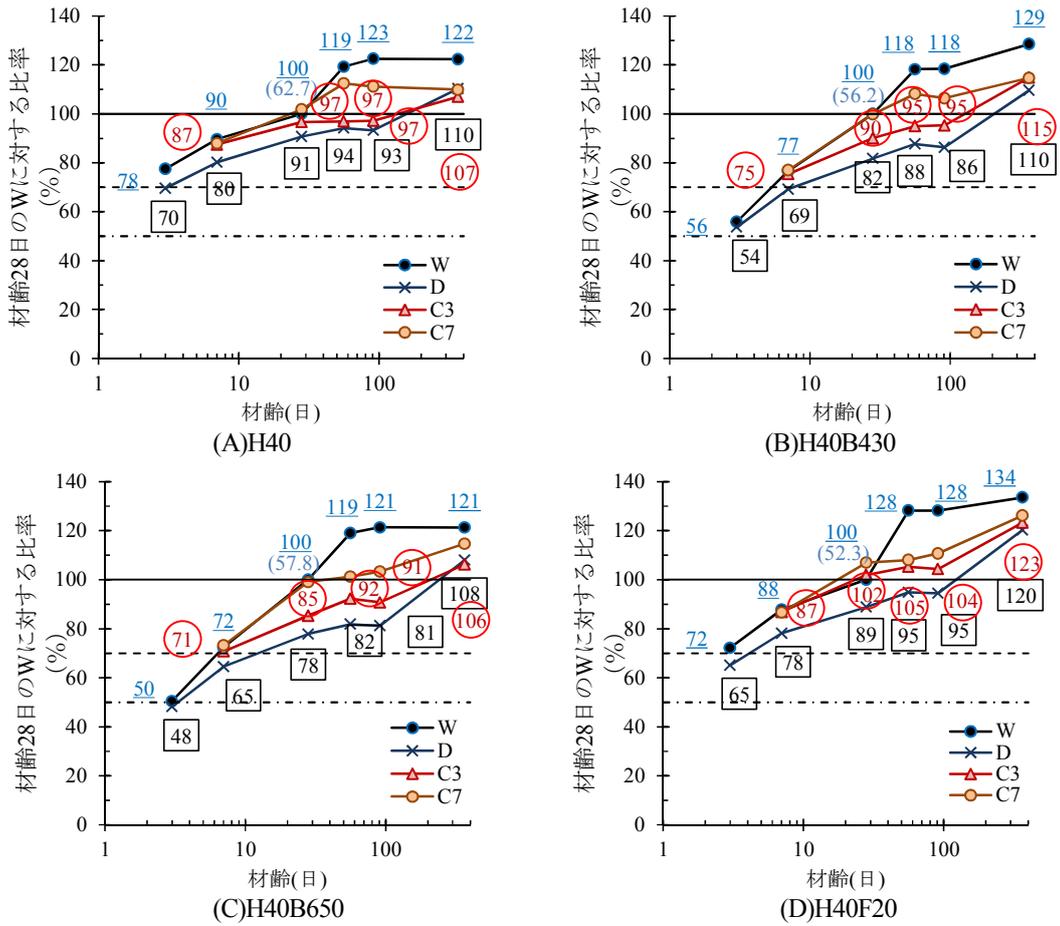
#### 3.1 圧縮強度の試験結果

標準養生を行った供試体の材齢28日の圧縮強度に対する比率で圧縮強度の発現を整理した結果を図-2に示す。混和材を用いたコンクリートでは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、湿潤養生期間の違いによる圧縮強度の差が大きくなり、この傾向は混和材の置換率が大きいものほど明確に現れた。また、標準養生を行った供試体では、材齢91日から365日までの圧縮強度の増加が小さくなったが、養生期間が短い供試体ほど材齢91日から365日までの圧縮強度の増加が大きくなった。混和材を用いたコンクリートでは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、養生の影響を受けやすいこと、長期的に強度発現が継続すること等が認められた。

#### 3.2 強度発現の観点から検討した既存の基準類における湿潤養生期間の設定方法

湿潤養生期間を設定する際には、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>の「湿潤養生」に示される「表 8.2.1 湿潤養生期間の標準」や「解説 表 12.6.2 所要の圧縮強度を得るまでの養生期間の目安」等が適用されているが、これらの設定方法は明確には示されていない。そこで、昭和61年制定コンクリート標準示方書[施工編]<sup>7)</sup>の「マスコンクリート」の「15.3.5 コンクリートの力学特性」に示される圧縮強度算定式から得られる圧縮強度と材齢の関係に基づき、湿潤養生期間の設定方法について検討した。

圧縮強度算定式である式(1)から得られた材齢28日の圧縮強度に対する強度発現率を図-3に示す。この結果によると、日平均気温15℃で、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの材齢5日あるいは早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの材齢3日の強度発現率は50%以上となることがわかる。



※図中において、下線付き数字は標準養生 (W), ○囲み数字は湿潤養生3日 (C3), □囲み数字は気中養生 (D) の値を示す。  
 ※ ( ) 内の数字は標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>) を示す。

図-2 圧縮強度の発現 (標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率)

$$f'_c(t) = \frac{t}{a + b \cdot t} f'_c(91) \quad (1)$$

ここに、 $f'_c(t)$  : 材齢  $t$  日のコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $f'_c(91)$  : 材齢 91 日のコンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>),  $a$  : 定数 (早強ポルトランドセメント = 2.9, 普通ポルトランドセメント = 4.5),  $b$  : 定数 (早強ポルトランドセメント = 0.97, 普通ポルトランドセメント = 0.95) である。

また、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>の「湿潤養生」に示される「表 8.2.1 湿潤養生期間の標準」の日平均気温 10°C 及び 5°C の湿潤養生期間についても、明確な設定方法が示されていない。そこで、昭和 61 年制定コンクリート標

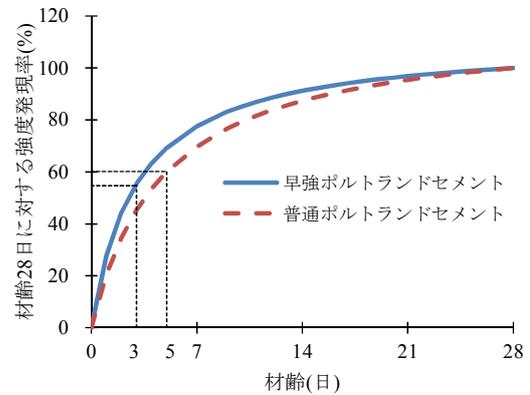


図-3 材齢 28 日の圧縮強度に対する強度発現率

準示方書〔施工編〕<sup>7)</sup>の「寒中コンクリート」の「16.8 管理」に示される日平均気温 15℃の湿潤養生期間から算出した積算温度と日平均気温 10℃及び 5℃の湿潤養生期間から算出した積算温度との関係について検討した。

早強ポルトランドセメントの積算温度は、養生温度 5℃で材齢 5 日の場合は 75℃・日、養生温度 10℃で材齢 4 日の場合は 80℃・日、養生温度 15℃で材齢 3 日の場合は 75℃・日であり、普通ポルトランドセメントの積算温度は、養生温度 5℃で材齢 9 日の場合は 135℃・日、養生温度 10℃で材齢 7 日の場合は 140℃・日、養生温度 15℃で材齢 5 日の場合は 125℃・日となった。すなわち、養生温度 15℃の湿潤養生期間で算出した積算温度と養生温度 10℃及び 5℃の湿潤養生期間で算出した積算温度は概ね一致する。したがって、日平均気温 5℃及び 10℃の湿潤養生期間については、日平均気温 15℃の湿潤養生期間から算出した積算温度と同等となる日数として設定されたものではないかと考えられる。

### 3.3 強度発現の観点から設定したプレストレストコンクリート部材の湿潤養生期間

圧縮強度試験の結果に基づき、プレストレストコンクリート部材の湿潤養生期間について検討した。前述の図-2 には、標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50%及び 70%となる位置を破線で示している。前述したように 50%はコンクリート標準示方書<sup>1)</sup>の「湿潤養生」に示される「湿潤養生期間の標準」を設定するために適用されたと考えられる値であり、70%は ACI 308 R-01 Guide to Curing Concrete<sup>5)</sup>で圧縮強度を確保するために養生を継続することが望ましいとされている値である。また、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針」<sup>2)</sup>では、標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50%程度に達する材齢を基準として湿潤養生期間の目安を定めている。これらのことを踏まえて、表-4 に標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50%以上及び 70%以上となるために必要な湿潤養生期間を示す。湿潤養生期間を 3 日とした供試体の湿潤養生終了時の圧縮強度については、標準養生を行った供試体の材齢 3 日の圧縮強度で代用した。この結果、標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50%以上となる湿潤養生期間は、全ての配合において 3 日であった。また、標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 70%以上となる湿潤養生期間は、H40 と H40F20 で 3 日、H40B430 と H40B650 で 7 日であった。したがって、混和材を用いたコンクリートにおいて、標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が 50%以上となる材齢を基準として湿潤養生期間を定める場合、日平均気温 15℃以上では、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの湿潤養生期間の標準と同一の 3 日としてよいと考えられる。

なお、日平均気温が低い場合には、混和材を用いたコンクリートでは、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して強度発現が遅くなる可能性が高い。養生温度を 10℃以上とした場合には、大幅な強度発現の遅延が生じなかったこと、有効材齢を用いて強度発現を推定できること等が確認されている（付録-4 参照）。このため、混和材を用いたコンクリートの養生温度については、10℃以上とすることが望ましいと考えられる。また、日平均気温が低い場合には、湿潤養生期間を長くすること、給熱養生や保温養生によって養生温度を管理すること等の対策を行うことが望ましいと考えられる。

表-4 強度発現の観点から設定した湿潤養生期間

判断基準	H40	H40B430	H40B650	H40F20
標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が <u>50%以上</u> となる湿潤養生期間	3 日	3 日	3 日	3 日
標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度に対する比率が <u>70%以上</u> となる湿潤養生期間	3 日	7 日	7 日	3 日

### 3.4 中性化に対する抵抗性に関する試験結果

促進中性化試験の結果を図-4 に、暴露 30 ヶ月後の中性化深さの測定値と、この測定値を用いて求めた 100 年後の中性化深さの推定値を図-5 に示す。100 年後の中性化深さの推定値は、コンクリートの中性化が暴露試験の実施期間の平方根に比例して進行すると仮定して、暴露 30 ヶ月後の中性化深さの測定値から式(2)を用いて求めた。

$$C_{estimated} = C_{measured} \sqrt{\frac{t_{estimated}}{t_{test}}} \quad (2)$$

ここに、 $C_{estimated}$  : 100 年後の中性化深さの推定値 (mm),  $C_{measured}$  : 暴露 30 ヶ月後の中性化深さの測定値 (mm),  $t_{estimated}$  : 中性化深さを推定するコンクリートの材齢 (= 100 年),  $t_{test}$  : 暴露試験の実施期間 (= 30/12 年) である。

中性化深さの測定値は、いずれの試験結果においても、湿潤養生期間が短いほど大きくなった。また、100 年後の中性化深さの推定値は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートでは湿潤養生期間の違いにかかわらず小さくなったが、混和材を用いたコンクリートでは湿潤養生期間の違いによる差が大きく、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも大きくなった。

道路橋示方書では、かぶりの最小値を 35mm としている。また、コンクリート標準示方書<sup>8)</sup>の「中性化に対する照査」ではかぶりと中性化深さの差である中性化残りを考慮した照査方法を規定しており、通常環境下での中性化残りを 10mm としている。このため、道路橋示方書に示されるかぶりの最小値 35mm から通常環境下での中性化残り 10mm を差し引くと、25mm となる。暴露試験の結果から求めた 100 年後の中性化深さの推定値は、湿潤養生期間を 3 日とした場合、全ての供試体において 25mm 以下となることが認められた。したがって、混和材を用いたコンクリートでは、湿潤養生期間を 3 日とすることによって、中性化に対して十分な抵抗性を確保できると考えられる。

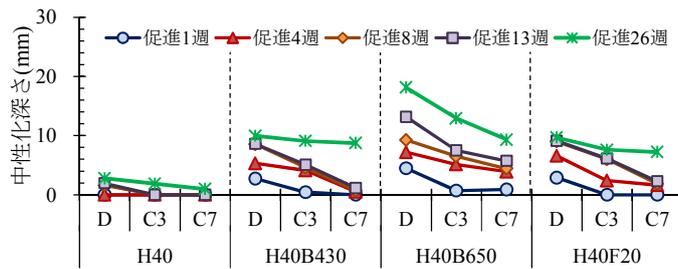


図-4 促進中性化試験の結果

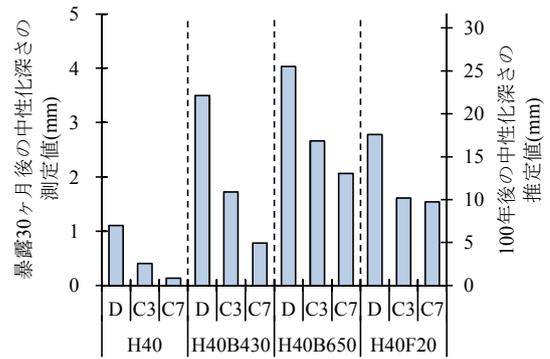


図-5 暴露30ヶ月後の中性化深さの測定値と100年後の中性化深さの推定値

### 3.5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性に関する試験結果

電気泳動試験（非定常法）による塩化物イオン浸透速度の結果を図-6に示す。試験材齢ごとに通電時間が異なったため、ここでは塩化物イオン浸透速度（mm/h）を求めて検討した。

混和材を用いたコンクリートでは、湿潤養生期間が短い場合に材齢4ヶ月では塩化物イオン浸透速度が大きくなったが、8ヶ月及び30ヶ月暴露後では塩化物イオン浸透速度が小さくなった。材齢の経過とともに塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上したためと考えられる。この傾向は、特にH40F20で明確に現れた。また、材齢の経過とともに、湿潤養生期間の違いによる塩化物イオン浸透速度の差も減少した。混和材を用いたコンクリートでは、湿潤養生期間を3日とすることによって、長期的には早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等以上の塩化物イオン浸透に対する抵抗性を確保できると考えられる。

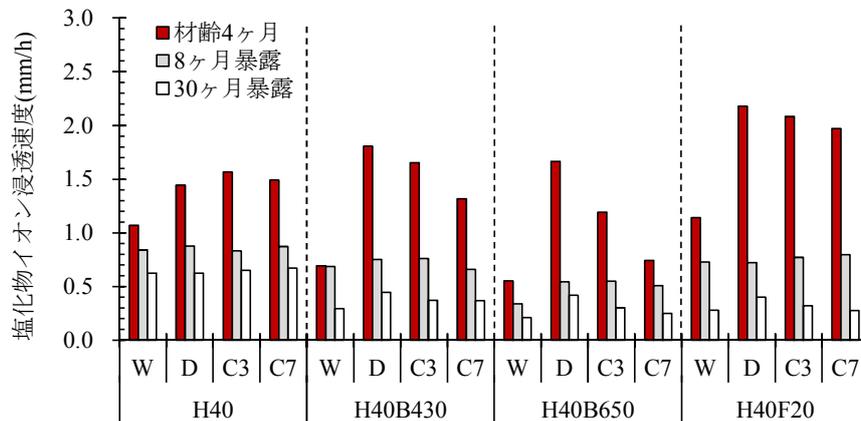
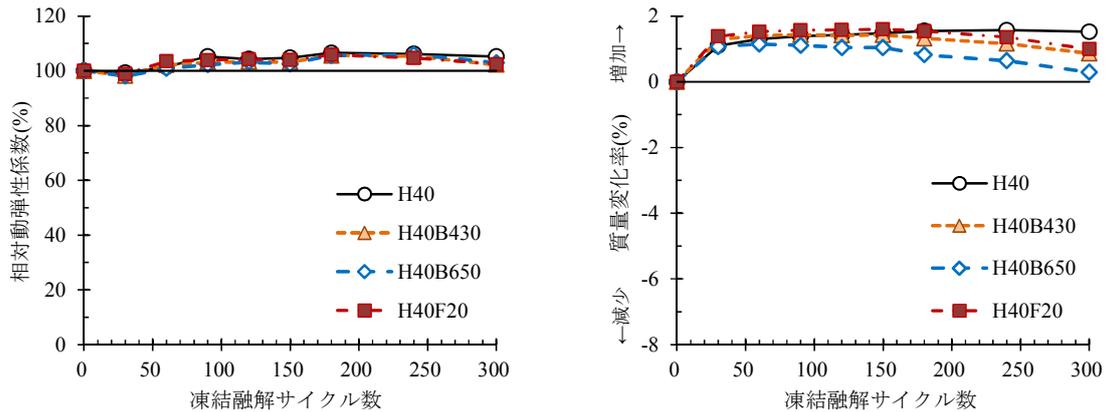


図-6 電気泳動試験（非定常法）による塩化物イオン浸透速度

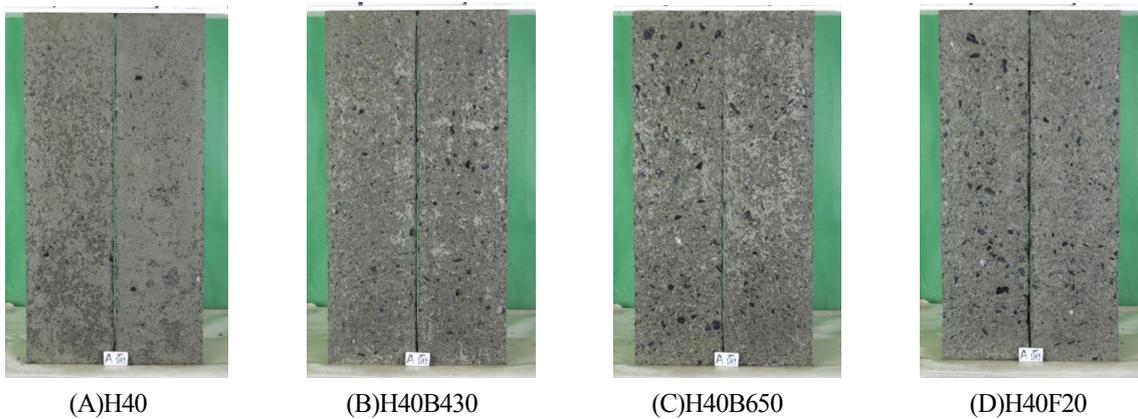
### 3.6 凍結融解に対する抵抗性に関する試験結果

凍結融解試験による相対動弾性係数と質量変化率の結果を図-7に、凍結融解300サイクル後の供試体の状況を写真-2に示す。湿潤養生期間を3日とした場合、混和材を用いたコンクリートの相対動弾性係数と

質量変化率は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等であった。また、相対動弾性係数は100%前後で推移しており、化学混和剤を用いて空気量の目標値を4.5%とすることによって、凍結融解に対して十分な抵抗性を確保できることが認められた。したがって、混和材を用いたコンクリートにおいても、湿潤養生期間を3日として、かつ、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、同様の条件で製作した早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等の凍結融解に対する抵抗性を確保できると考えられる。



図一七 相対動弾性係数と質量変化率



※コンクリート打込み面側の供試体表面の状況

写真一七 凍結融解 300 サイクル後の供試体の状況

### 3.7 耐久性の観点から設定したプレストレストコンクリート部材の湿潤養生期間

中性化、塩化物イオン浸透及び凍結融解に対する抵抗性に着目して、プレストレストコンクリート部材の湿潤養生期間について検討した。中性化に対する抵抗性については、30ヶ月の暴露試験の結果から求めた100年後の中性化深さの推定値が25mm以下となったため、湿潤養生を3日とすることで中性化に対して十分な抵抗性を確保できると考えられる。また、塩化物イオン浸透に対する抵抗性については、湿潤養生期間を3

日とすることで早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等以上の塩化物イオンに対する抵抗性を確保できると考えられる。さらに、凍結融解に対する抵抗性についても、湿潤養生期間を3日とすることで早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等の凍結融解に対する抵抗性を確保できると考えられる。このように、混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間について中性化、塩化物イオン浸透及び凍結融解に対する抵抗性に着目して検討した結果、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様に湿潤養生期間を3日とすることで、それぞれの作用に対して十分な抵抗性を確保できることが認められた。ただし、混和材を用いたコンクリートの中性化深さは早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも大きくなったため、混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間を設定する際には中性化に対して十分な抵抗性を確保できるよう配慮する必要があると考えられる。

#### 4. まとめ

混和材を用いたコンクリートの強度発現と耐久性に湿潤養生期間が与える影響について、室内試験及び暴露試験を行って検討した。これらの試験結果及び各試験項目に対する判断基準に基づき、混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間の標準については3日とすることが望ましいと考えられた。これらを整理した結果を表-5に示す。

表-5 混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間の標準

試験項目	判断基準	湿潤養生期間の標準 (日平均気温15℃以上の場合)
圧縮強度	脱型時の圧縮強度が標準養生を行った供試体の材齢28日の圧縮強度の50%以上となる湿潤養生期間	3日
中性化に対する抵抗性	屋外に30ヶ月暴露した供試体の試験結果から求めた100年後の中性化深さの推定値が25mm以下となる湿潤養生期間	
塩化物イオン浸透に対する抵抗性	電気泳動試験（非定常法）による塩化物イオン浸透深さが標準養生を行った早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも小さくなる湿潤養生期間	
凍結融解に対する抵抗性	凍結融解試験による相対動弾性係数が早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等となる湿潤養生期間	

なお、表-5 では混和材を用いたコンクリートの湿潤養生期間の標準を3日としたが、試験結果によると湿潤養生期間の延長は脱型後の強度増加や耐久性の向上に寄与することが確認されている。したがって、施工効率や経済性等に悪影響を及ぼさない範囲で湿潤養生期間を延長することができれば、混和材を用いたコンクリートの強度及び耐久性をさらに向上させることができると考えられる。

## 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
- 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，2009
- 5) ACI Committee 308：Guide to Curing Concrete，ACI 308R-01，2001
- 6) 気象庁ホームページ：気象統計情報，<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>
- 7) 土木学会：昭和61年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，1986
- 8) 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7 混和材を用いたコンクリートの二酸化炭素排出削減効果

### 1. 概要

混和材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価するためには、二酸化炭素排出量の算出方法を明確にする必要がある。プレストレストコンクリート橋の二酸化炭素排出量の算出方法は、(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会によって検討が行われており、「PC 構造物の環境負荷低減の取組み」<sup>1)</sup>に詳細が示されている。

この付録では、文献1)に基づき、混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の二酸化炭素排出量の算出方法を示すとともに、二酸化炭素排出量の試算を行い、混和材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果を検証した。ただし、このマニュアル(案)ではプレストレストコンクリート橋の上部工を対象としているため、プレストレストコンクリート橋の上部工のみを対象とした。下部工を含めた二酸化炭素排出量の算出方法については、文献1)を参考にされたい。

### 2. 試算対象橋梁の概要

#### 2.1 試算対象橋梁の構造形式

ここでは、「PC 構造物の環境負荷低減の取組み」で二酸化炭素排出量の試算が行われている構造形式の中から、プレストレストコンクリート橋の上部工において採用実績の多い「プレテンション方式 PC 単純 T 桁橋」、「ポストテンション方式 3 径間連結 PCT 桁橋」、「ポストテンション方式 4 径間連続 PC 箱桁橋」の 3 パターンの構造形式において二酸化炭素排出量の試算を行った。各構造形式の構造諸元を (1)~(3)に示す。

##### (1) プレテンション方式 PC 単純 T 桁橋

橋 長 : 20.800m                      支 間 : 20.000m

幅 員 : 9.500m                      全幅員 : 10.700m

製作方法 : 工場製作 (主桁は現場から 110km 離れた工場にて製作)

架設方法 : クレーン架設

##### (2) ポストテンション方式 3 径間連結 PC T 桁橋

橋 長 : 78.000m                      支 間 : 3@25.000m

幅 員 : 9.500m                      全幅員 : 10.700m

製作方法 : 現場製作

架設方法 : 架設桁架設

(3) ポストテンション方式4径間連続PC箱桁橋

橋長：202.000m 支間：4@50.000m

幅員：9.500m 全幅員：10.700m

製作方法：現場打ち工法

架設方法：固定支保工架設

## 2.2 試算に用いたコンクリートの配合

### 2.2.1 プレテンション橋のコンクリートの配合

プレテンション橋の試算に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。プレテンション橋に用いるコンクリートの配合は、設計基準強度 50N/mm<sup>2</sup>の混和材を用いたコンクリートの実績を参考に設定した（付録-1参照）。

早強ポルトランドセメント単味のコンクリート（H36）では水結合材比（W/B）を36%とし、早強ポルトランドセメントの30%を高炉スラグ微粉末4000で置換したコンクリート（H34B430）ではW/Bを34%、50%を高炉スラグ微粉末6000で置換したコンクリート（H32B650）ではW/Bを32%、15%をフライアッシュII種で置換したコンクリート（H35F15）ではW/Bを35%とした。なお、混和材を用いたコンクリートは、初期強度を確保するために早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも水結合材比を小さく設定している。

表-1 プレテンション橋のコンクリートの配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	B=HPC+BS4+BS6+FA				S	G
			HPC	BS4	BS6	FA		
H36	36	151	420 (100%)	—	—	—	731	1093
H34B430	34	170	350 (70%)	150 (30%)	—	—	941	845
H32B650	32	153	239 (50%)	—	239 (50%)	—	704	1104
H35F15	35	150	366 (85%)	—	—	65 (15%)	762	958

※HPC: 早強ポルトランドセメント, BS4: 高炉スラグ微粉末4000, BS6: 高炉スラグ微粉末6000, FA: フライアッシュII種, 単位量の( )内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示

### 2.2.2 ポストテンション橋のコンクリートの配合

ポストテンション橋の試算に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。ポストテンション橋に用いるコンクリートの配合は、付録-4, 5の実験で用いたコンクリートと同一とし、設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup>を想定している。早強ポルトランドセメント単味のコンクリート（H40）ではW/Bを40%とし、混和材を用いたコンクリート（H35B430, H35B650, H35F20）では早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同程度の初期材齢の強度発現を確保するためW/Bを35%とした。

表-2 ポストテンション橋のコンクリートの配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
		W	B=HPC+BS4+BS6+FA				S	G
			HPC	BS4	BS6	FA		
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	700	
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	695	
H35F20			377 (80%)	—	—	94 (20%)	682	

※HPC: 早強ポルトランドセメント, BS4: 高炉スラグ微粉末 4000, BS6: 高炉スラグ微粉末 6000, FA: フライアッシュ II 種, 単位量の ( ) 内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示

### 3. 二酸化炭素排出量の算出方法

#### 3.1 試算の範囲

プレストレストコンクリート橋のライフサイクルにおいて発生する二酸化炭素排出量は、建設時に発生するものの割合が大きく、この中でも特にコンクリートに用いる材料の製造時に発生するものの占める割合が大きい。このため、ここでは“コンクリートに用いる材料の製造時”と“プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時”の二酸化炭素排出量について試算を行った。

“コンクリートに用いる材料の製造時”の二酸化炭素排出量は、結合材（セメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ）、細骨材及び粗骨材の使用量に各材料の二酸化炭素排出原単位を乗じた値の総和で算出される。“プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時”の二酸化炭素排出量は、各工種における仮設資材、使用材料、施工機械の使用量にそれぞれの二酸化炭素排出原単位を乗じた値の総和で算出される。建設時の二酸化炭素排出量の試算にあたって考慮した項目を(1)～(3)に示す。

- (1) 仮設資材（支保工、架設桁等）の運搬に伴うもの
- (2) 使用材料（コンクリート、PC 鋼材、鉄筋等）の製造、運搬に伴うもの
- (3) 施工機械（トラック、クレーン、コンクリートポンプ等）の運転に伴うもの

運搬に伴って生じる二酸化炭素排出量は施工場所等の条件によって異なるため、ここでは次の条件で二酸化炭素排出量を算出した。

- ・ 運搬車両はディーゼルの 10t トラック
- ・ 仮設資材の運搬距離は 100 km
- ・ 使用材料のうち、生コン以外の材料の運搬距離は 100 km
- ・ 使用材料のうち、生コンの運搬距離は 20 km

### 3.2 試算に用いた二酸化炭素排出原単位

試算に用いた二酸化炭素排出原単位の一覧を表-3に示す。二酸化炭素排出原単位は文献2)に示される数値を用いた。なお、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュの二酸化炭素排出原単位は、生産時の二酸化炭素排出量を加算せず、加工時に要したエネルギー消費とこれに伴う二酸化炭素排出量のみを考慮して算出した値である。

表-3 二酸化炭素排出原単位の一覧

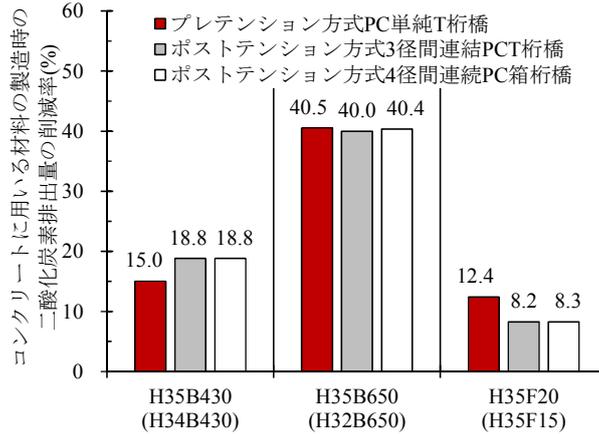
材料・使用機械	単位	二酸化炭素排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> )
セメント	t	766.6
高炉スラグ微粉末	t	26.5
フライアッシュ	t	19.6
粗骨材	t	2.9
細骨材	t	3.7
鉄筋	t	767.4
PC 鋼より線	t	1321.8
大型ブレーカ	h	24.0
ブルドーザ (15t)	h	25.0

## 4. 二酸化炭素排出量の試算結果

### 4.1 材料の製造時の二酸化炭素排出量

コンクリートに用いる材料の製造時の二酸化炭素排出削減効果を定量化した結果を図-1に示す。前述したように、混和材を用いたコンクリートでは、初期材齢の強度発現を確保するために、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも水結合材比を小さく設定した。

この試算結果によると、混和材を用いることによって、構造形式にかかわらず、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも二酸化炭素排出量を削減できることがわかる。また、二酸化炭素排出削減効果は混和材の置換率が高い場合ほど大きく、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して最大で約40%の削減効果が得られた。これは、表-3に示す高炉スラグ微粉末とフライアッシュの二酸化炭素排出原単位が早強ポルトランドセメントと比較して非常に小さく、混和材を用いることによって早強ポルトランドセメントの使用量を抑制し、二酸化炭素排出量を削減できたためである。



※（ ）内はプレテンション方式PC単純T桁橋の配合を示す。  
 ※図の縦軸は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに対する  
 混和材を用いたコンクリートの二酸化炭素排出量の削減率を示す。

図-1 コンクリートに用いる材料の製造時の二酸化炭素排出削減効果

#### 4.2 建設時の二酸化炭素排出量

構造形式ごとの二酸化炭素排出量の算出結果を表-4に、プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時の二酸化炭素排出削減効果を定量化した結果を図-2に示す。

プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時の二酸化炭素排出量においても、混和材を用いることによって、構造形式にかかわらず、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも二酸化炭素排出量を削減できることがわかる。また、二酸化炭素排出削減効果は、混和材の置換率が高い場合ほど大きく、最大で約18%となった。

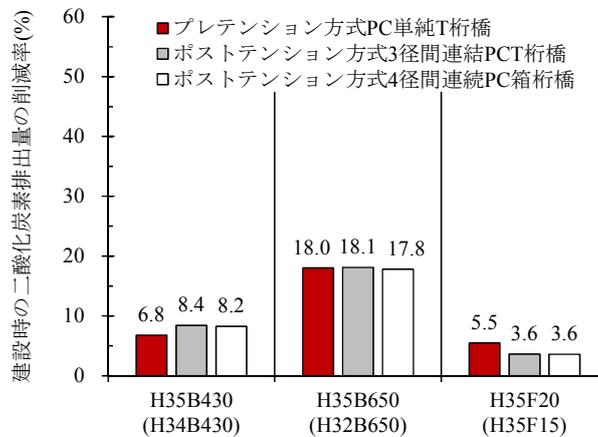
また、二酸化炭素排出量の合計に材料の製造時の二酸化炭素排出量が占める割合を比較すると、プレテンション方式PC単純T桁橋で約64~71%、ポストテンション方式3径間連結PCT桁橋で約77~80%、ポストテンション方式4径間連続PC箱桁橋で約76~80%となり、プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時に発生する二酸化炭素量の大部分を占めることがわかる。

表-4 二酸化炭素排出量の算出結果

構造形式	配合	橋面積あたりの二酸化炭素排出量 (t-CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> )					二酸化炭素排出量 (t-CO <sub>2</sub> )	早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに対する混和材を用いたコンクリートの二酸化炭素排出量の比率 (%)	
		①材料の製造時			②施工時	①+②建設時		材料製造時 (コンクリート)	建設時
		コンクリート	鋼材	計					
プレテンション方式 PC 単純 T 桁橋	H36	0.153	0.090	0.243	0.101	0.344	76.6	100.0	100.0
	H34B430	0.130		0.220		0.321	71.4	85.0	93.2
	H32B650	0.091		0.181		0.282	62.8	59.5	82.0
	H35F15	0.134		0.224		0.325	72.4	87.6	94.5
ポストテンション方式 3 径間連結 PCT 桁橋	H40	0.170	0.135	0.305	0.072	0.377	303.4	100.0	100.0
	H35B430	0.138		0.273		0.345	277.9	81.2	91.6
	H35B650	0.102		0.237		0.309	248.5	60.0	81.9
	H35F20	0.156		0.291		0.363	292.4	91.8	96.4
ポストテンション方式 4 径間連結 PC 箱桁橋	H40	0.218	0.176	0.394	0.098	0.492	1063.7	100.0	100.0
	H35B430	0.177		0.353		0.451	976.0	81.2	91.8
	H35B650	0.130		0.306		0.404	874.5	59.6	82.2
	H35F20	0.200		0.376		0.474	1025.7	91.7	96.4

※鋼材は、鉄筋と PC 鋼材を示す。

※①②③は、橋面積 1m<sup>2</sup>あたりの二酸化炭素排出量を示す。橋面積は、プレテンション方式 PC 単純 T 桁橋 222.56m<sup>2</sup>、ポストテンション方式 3 径間連結 PCT 桁橋 802.5m<sup>2</sup>、ポストテンション方式 4 径間連結 PC 箱桁橋 2161.4m<sup>2</sup>である。



※ ( ) 内はプレテンション方式 PC 単純 T 桁橋の配合を示す。  
 ※図の縦軸は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに対する混和材を用いたコンクリートの二酸化炭素排出量の削減率を示す。

図-2 プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時の二酸化炭素排出削減効果

## 5. まとめ

プレストレストコンクリート橋の上部工を対象として、コンクリートに用いる材料の製造時及び建設時に発生する二酸化炭素排出量を算出し、混和材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果を定量的に評

価した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) プレストレストコンクリート橋の上部工の建設に伴って発生する二酸化炭素排出量のうち、コンクリートに用いる材料の製造時の二酸化炭素排出量が占める割合は約 64～80%と大きいことがわかった。コンクリートに用いる材料の製造時の二酸化炭素排出量を算出した結果、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、混和材の使用によって最大で約 40%の二酸化炭素排出削減効果が得られることがわかった。
- (2) プレストレストコンクリート橋の上部工の建設時の二酸化炭素排出量を算出した結果、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較して、混和材の使用によって最大で約 18%の二酸化炭素排出削減効果が得られることがわかった。

なお、混和材を用いたコンクリートは、付録-3 に示したように早強ポルトランドセメント単味の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ため、プレストレストコンクリート橋の長寿命化にも寄与し、二酸化炭素排出量の削減効果をさらに大きくできると期待される。

#### 参考文献

- 1) 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—PC 構造物の建設に伴う CO<sub>2</sub>排出量の見える化—，2011
- 2) 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

## 付録－8 混和材を用いたプレテンション部材の載荷試験事例

### 1. 概要

混和材を用いたプレテンション部材の耐荷性能について、既往文献の調査を行った。この結果、載荷試験に用いられた供試体が JIS げた (JIS A 5373) やプレキャスト PC 床版、矩形のプレテン梁部材等、様々であったため、この付録では高炉スラグ微粉末 4000、高炉スラグ微粉末 6000 あるいはフライアッシュ II 種を用いた 3 種類のコンクリートの載荷試験が実施された JIS げたの結果を示す。載荷試験結果の一覧を表－1 に示す。全ての載荷試験において、混和材を用いた JIS げたは、早強ポルトランドセメント単味の JIS げたの規格値を満足する結果となった。また、混和材を用いた JIS げたと早強ポルトランドセメント単味の JIS げたを比較した載荷試験では、両者が同等の耐荷性能を有していたことが報告されている。

表－1 載荷試験結果の一覧

供試体概要						試験結果			
載荷試験 げた種類	載荷 方法	結合材		混和材の 置換率 (%)	水結合材比 (%)	ひび割れ発生荷重 $P_{cr}$ (kN)		終局荷重 $P_u$ (kN)	
		セメント	混和材			試験値	規格値※	試験値	規格値※
JIS げた AS14	2点曲げ 載荷	HPC	BS4	38	32	162	127	379	333
JIS げた BS15	2点曲げ 載荷	HPC	—	0	40	186	154	432	393
		HPC	BS6	50	35	211		441	
JIS げた AS09	2点曲げ 載荷	HPC	—	0	39	152	104	349	287
		HPC	FA	20	32	147		372	

※HPC：早強ポルトランドセメント，BS4：高炉スラグ微粉末 4000，BS6：高炉スラグ微粉末 6000，

FA：フライアッシュ II 種

※JIS A 5373 に規定されている曲げモーメントに相当する荷重

### 2. 試験結果

#### 2.1 高炉スラグ微粉末 4000【JIS げた AS14 の載荷試験<sup>1)</sup>】

##### 2.1.1 試験概要と目的

高炉スラグ微粉末 4000 を用いたコンクリートを実物大のプレストレストコンクリートげたに使用した場合の耐荷性能を確認することを目的として、載荷試験を実施している。試験には、早強ポルトランドセメントの 38%を高炉スラグ微粉末 4000 で置換した JIS げた (H32B438) を用いている。

### 2.1.2 試験方法

対象としたプレストレストコンクリートげたは、JIS げたのプレテンション方式スラブげた (AS14) であり、けた長 13,640mm の供試体である。使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。コンクリートの配合は、設計基強度を  $70\text{N/mm}^2$  として設定されている。載荷試験は、材齢 14 日に、支間長を 13,140mm とし、2 点曲げ載荷試験にて実施されている。

表-2 コンクリートの配合

配合	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の置換率 (%)	単体量 ( $\text{kg/m}^3$ )					
					水	結合材		細骨材	粗骨材	混和剤
						早強ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末 4000			
H32B438	60	1.5	32	38	175	340	210	922	800	5.0

### 2.1.3 試験結果

載荷試験の結果を図-1 に示す。載荷試験時のコンクリート圧縮強度は  $61.6\text{N/mm}^2$  であった。載荷試験による荷重変位曲線は、弾性域で計算値と同様の傾きを示し、ひび割れ発生荷重と終局荷重は、いずれも規格値を満足することが示されている。

載荷試験の結果と JIS 規格値との比較を表-3 に示す。ひび割れ発生曲げモーメントと破壊抵抗曲げモーメントは、いずれも JIS 規格値を満足することが報告されている。

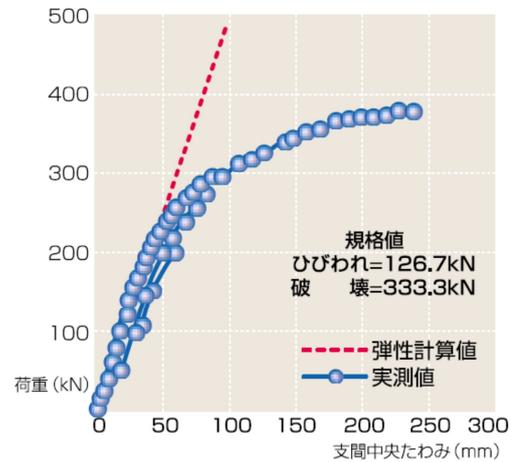


図-1 載荷試験結果 (荷重-変位)

表-3 試験結果の比較

	H32B438	JIS A 5373
ひび割れ発生荷重 $P_{cr}$ (kN)	161.8	126.7 <sup>※</sup>
終局荷重 $P_u$ (kN)	378.5	333.3 <sup>※※</sup>

※JIS A 5373 に規定されている曲げモーメントに相当する荷重

※※JIS A 5373 に規定されている破壊抵抗曲げモーメントに相当する荷重

## 2.2 高炉スラグ微粉末 6000 【JIS げた BS15 の載荷試験<sup>2)</sup>】

### 2.2.1 試験概要と目的

高炉スラグ微粉末 6000 を実物大のプレストレストコンクリートげたに使用した場合の耐荷性能を確認することを目的として、載荷試験を実施している。試験には、早強ポルトランドセメント単味の JIS げた (H40) と早強ポルトランドセメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換した JIS げた (H35B650) を用いている。

## 2.2.2 試験方法

対象としたプレストレストコンクリートげたは、JIS げたのプレテンション方式スラブげた (BS15) であり、けた長 14,910mm である。コンクリートの配合を表-4 に示す。早強ポルトランドセメント単味の配合と、高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートの配合で水結合材比が異なっている理由は、プレストレス力導入時に必要なコンクリートの圧縮強度  $35\text{N/mm}^2$  を満たすように配合が決定されたためである。載荷試験は、1年間の屋外暴露後に、支間長を 14,316mm とし、等曲げモーメントスパン 1,500mm の 2点曲げ載荷試験にて実施されている。

表-4 コンクリートの配合

配合	スランブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の置換率 (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )					
					水	結合材		細骨材	粗骨材	混和剤
						早強ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末 6000			
H40	10	2.0	40	0	160	400	—	768	1173	3.2
H35B650	10	2.0	35	50	160	229	223	732	1143	2.3

## 2.2.3 試験結果

載荷試験の結果を図-2 に示す。載荷試験時のコンクリート圧縮強度は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートでは  $59.9\text{N/mm}^2$ 、高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリートでは  $65.7\text{N/mm}^2$  であった。載荷試験による荷重変位曲線では、両配合の供試体ともに載荷試験の挙動に大差はない結果であった。高炉スラグ微粉末 6000 を用いた JIS げたで残留変位が大きくなっている理由は、高炉スラグ微粉末 6000 を用いた JIS げたのみ破壊寸前まで載荷と除荷が繰り返されたためである。また、供試体の破壊形態は、高炉スラグ微粉末 6000 の使用の有無にかかわらず、曲げひび割れ進展に伴う供試体上縁の圧縮破壊であった。

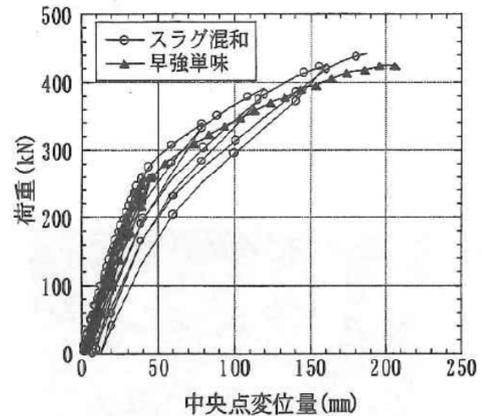


図-2 載荷試験結果 (荷重-変位) <sup>2)</sup>

載荷試験の結果と JIS 規格値との比較を表-5 に示す。ひび割れ発生荷重と終局荷重は、いずれの試験値も規格値を上回っており、高炉スラグ微粉末 6000 を用いた JIS げたにおいても JIS 規格値を満足することが報告されている。

表-5 試験結果の比較

	H40	H35B650	JIS A 5373
ひび割れ発生荷重 $P_{cr}$ (kN)	186.0	211.0	154.0*
終局荷重 $P_u$ (kN)	432.0	441.0	393.0***

※JIS A 5373 に規定されている曲げモーメントに相当する荷重

\*\*\*JIS A 5373 に規定されている破壊抵抗曲げモーメントに相当する荷重

## 2.3 フライアッシュⅡ種【JIS げた AS09 の載荷試験<sup>3)</sup>】

### 2.3.1 試験概要と目的

分級されたフライアッシュⅡ種を実物大のプレストレストコンクリートげたに使用した場合の耐荷性能を確認することを目的として、載荷試験を実施している。試験には、早強ポルトランドセメント単味の JIS げた (H39) と早強ポルトランドセメントの 20% をフライアッシュⅡ種で置換した JIS げた (H32F20) を用いている。

### 2.3.2 試験方法

対象としたプレストレストコンクリートげたは、JIS げたのプレテンション方式スラブげた (AS09) であり、げた長 9,600mm である。コンクリートの配合を表-6 に示す。早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと、フライアッシュⅡ種を用いたコンクリートで水結合材比が異なっている理由は、プレストレス力導入時に必要なコンクリートの圧縮強度  $40.6/\text{mm}^2$  と、材齢 14 日での圧縮強度  $58.0\text{N}/\text{mm}^2$  を満たすように配合が決定されたためである。載荷試験は、支間長を 9,200mm とし、等曲げモーメントスパン 1,000mm の 2 点曲げ載荷試験にて実施されている。

表-6 コンクリートの配合

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の置換率 (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					
					水	結合材		細骨材	粗骨材	混和剤
						早強ポルトランドセメント	フライアッシュⅡ種			
H39	12	4.5	39	0	150	388	—	729	1061	※高性能減水剤 +AE 剤を添加
H32F20	12	4.5	32	20	150	375	94	730	969	

### 2.3.3 試験結果

載荷試験の結果を図-3 に示す。載荷試験時のコンクリート圧縮強度は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートでは  $59.8\text{N}/\text{mm}^2$ 、フライアッシュⅡ種を用いたコンクリートでは  $67.0\text{N}/\text{mm}^2$  であった。載荷試験による荷重変位曲線の図内に示すひび割れ発生荷重と終局荷重は、実強度から算出された値である。試

験の結果、ひび割れ発生荷重と終局荷重は、両配合の JIS げたとも計算値を上回っており、両供試体の挙動は同様であった。

載荷試験の結果と JIS 規格値との比較を表-7 に示す。ひび割れ発生荷重と終局荷重は、いずれの試験値も規格値を上回っており、フライアッシュ II 種を用いた JIS げたにおいても JIS 規格値を満足することが報告されている。

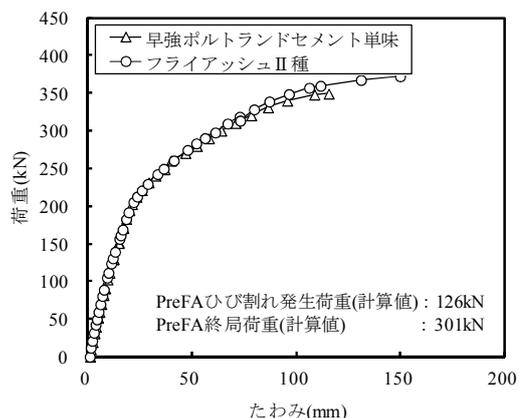


図-3 載荷試験結果 (荷重-変位)

表-7 試験結果の比較

	H39	H32F20	JIS A 5373
ひび割れ発生荷重 $P_{cr}$ (kN)	152.0	147.0	103.6*
終局荷重 $P_u$ (kN)	349.0	372.0	286.8*

※JIS A 5373 に規定されている曲げモーメントに相当する荷重

※※JIS A 5373 に規定されている破壊抵抗曲げモーメントに相当する荷重

### 3. まとめ

混和材を用いたプレキャスト部材 (プレストレストコンクリートげた) の載荷試験事例を調査した結果、混和材を用いたプレストレストコンクリートげたの耐荷性能は早強ポルトランドセメント単味のプレストレストコンクリートげたと同等であり、ひび割れ発生荷重と終局荷重は JIS 規格値を満足することが報告されていた。

#### 参考文献

- 1) 環境負荷軽減コンクリート研究会 (EFC 研究会) ホームページ: 3H-CRETE とは?, <http://www.efcs.jp/>
- 2) 村井篤, 江崎守, 前田悦孝, 松下博道: 高炉スラグ微粉末を用いたプレテンション PC 桁の性能確認, 第 11 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.81-86, 2001
- 3) 山村智, 桜田道博, 小林和弘, 鳥居和之: フライアッシュコンクリートの PC 橋梁への適用に関する実用化研究, プレストレストコンクリート, Vol.57, No.5, pp.46-53, 2015



---

共同研究報告書  
Cooperative Research Report of PWRI  
No.472 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