

新設プレストレストコンクリート橋の 品質・信頼性向上方法の構築に関する 共同研究報告書

ープレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた

混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル(案)ー

令和 4 年 3 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 © (2022) 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。

新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築 に関する共同研究報告書

—プレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた
混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル(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

上 席 研 究 員	古賀 裕久
主 任 研 究 員	中村 英佑(～2019.6)
主 任 研 究 員	櫻庭 浩樹
研 究 員	加藤 祐哉(～2019.6)
交 流 研 究 員	水戸 健介(2017.11～2019.3)
交 流 研 究 員	小田部貴憲(2019.4～2021.3)
交 流 研 究 員	角田 貴也(2021.7～)

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	鈴木 雅博
副 委 員 長	俵 道和
委 員	石井 豪
〃	大野 俊平
〃	河金 甲
〃	栗原 勇樹
〃	小林 崇
〃	佐々木 亘
〃	柴田 和典
〃	鈴木 聡
〃	藤森 信一
〃	正木 守
〃	村井 弘恭

要 旨

高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を活用することによって、コンクリート構造物の耐久性の向上を実現できることが期待されている。また、生産性の向上の観点からは、プレキャスト部材の活用が注目されている。混和材を活用したプレキャスト部材の適用を推進するためには、耐久性を確保するための評価試験方法や蒸気養生等の特有の留意点に関する検討が不可欠である。

この共同研究では、工場等で製造されるプレキャスト PC 部材の高耐久化を目的として、混和材を用いたコンクリートの設計及び製造に関する事項について検討し、「プレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル(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：プレキャスト，コンクリート，耐久性，混和材，評価試験方法

はじめに

高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を活用することによって、コンクリート構造物の耐久性の向上を実現できることが期待されている。また、近年、生産性の向上の観点からは、プレキャスト部材の活用が注目されている。プレキャスト部材は、工場等で管理された条件で製造されるため、混和材を活用しやすい、品質を高めやすい等の特徴がある。

しかし、混和材を活用したプレキャスト部材の耐久性の向上効果は十分には明確にされておらず、配合の検討や品質管理を行う際などの各プロセスで耐久性の向上効果を適切に評価できる方法も確立されていない。また、プレキャスト部材の特有の製造過程である蒸気養生や、蒸気養生後に実施される水中養生がコンクリートの品質に与える影響も明確にされていない。

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 29 年 4 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との共同研究「新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築に関する共同研究」を実施した。

この共同研究では、工場等で製造されるプレキャスト PC 部材の高耐久化を目的として、混和材を用いたコンクリートの設計及び製造に関する事項について検討し、「プレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル(案)」としてとりまとめた。

第 I 部では、プレキャスト PC 部材の高耐久化を目的として混和材を用いたコンクリートの設計及び製造に関する基本的な事項を示した。さらに、配合の検討及び品質管理において、実際に製造するコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を迅速に評価するための方法を提案するとともに、混和材を用いたコンクリートの品質を確保するための基本的な情報や留意点を示した。第 II 部では、プレキャスト PC 部材の製造過程において、塩化物イオン浸透に対する抵抗性を短期間で評価する具体的な手法を示した。第 III 部では、検討の過程で得られた知見を付録資料としてまとめた。以上の内容を実務で活用することで、プレキャスト PC 部材の高耐久化及び信頼性の向上に寄与することを期待したい。

目次

第 I 部 プレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた 混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル(案)

1 章 総則	1
1.1 適用の範囲	1
1.2 用語の定義	5
2 章 PCaPC 部材の高耐久化を実現するための基本事項	6
2.1 一般	6
2.2 ワークビリティ	6
2.3 強度	7
2.4 物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性	7
2.5 ひび割れ抵抗性	9
2.6 エトリンガイトの遅延生成(DEF)	9
2.7 環境負荷低減効果	10
3 章 設計に関する事項	12
3.1 一般	12
3.2 硬化コンクリートの力学的特性	12
3.3 中性化と水の浸透に対する抵抗性	14
3.4 塩化物イオン浸透に対する抵抗性	16
3.5 凍結融解に対する抵抗性	18
3.6 環境負荷低減効果	19
4 章 製造に関する事項	22
4.1 一般	22

4.2 材料.....	22
4.3 配合.....	27
4.4 計量.....	29
4.5 練混ぜ・打込み・締固め・仕上げ.....	30
4.6 養生方法.....	32
4.7 品質管理.....	33

第Ⅱ部 PCaPC 部材の塩化物イオン浸透に対する抵抗性の評価と品質管理

1 章 総則.....	37
2 章 電気抵抗率を用いた PCaPC 部材用コンクリートの配合の検討.....	38
3 章 電気抵抗率を用いた PCaPC 部材用コンクリートの品質管理.....	44
4 章 電気抵抗率試験の方法.....	46
5 章 電気泳動(非定常法)によるコンクリートの塩化物イオンの拡散係数試験方法(案).....	56

第Ⅲ部 付録資料

付録－1 混和材を用いた PCaPC 橋の実績.....	61
付録－2 PCaPC 部材用コンクリートの力学的特性.....	75
付録－3 物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性.....	83
付録－4 産地の異なる混和材の塩化物イオン浸透に対する抵抗性の比較.....	111
付録－5 蒸気養生及び蒸気養生後の後養生が耐久性に与える影響.....	118
付録－6 混和材を用いた PCaPC 部材の外観.....	135
付録－7 PCa 製品の製造に関するアンケート調査結果.....	144

第 I 部
プレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた
混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル(案)

1 章 総則

1.1 適用の範囲

- (1) 「プレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた混和材を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル(案) (以下、このマニュアル(案)という)」は、プレキャストPC部材の高耐久化を目的として、混和材を用いたコンクリートの設計及び製造に関する事項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、関連する技術規準類によるものとする。

【解説】

(1)について

プレキャスト PC 部材の高耐久化を目的として、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有効であり、物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性の向上に寄与することが知られている。また、ポルトランドセメントの使用量が減少することから、CO₂ 排出量削減に寄与する技術としても期待されている。

本共同研究と過去に行われた共同研究の関係を表一 I.1.1 に示す。過去の共同研究では、現場打ちの PC 橋を対象として、混和材を用いたコンクリートの設計及び施工に関する標準的な方法、及び、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を定量的に評価するための標準的な方法を取りまとめている。

本共同研究では、工場等で製造されるプレキャスト(PCa)PC部材を対象として、部材の高耐久化を目的として混和

表一 I.1.1 過去の共同研究との関係

共同研究報告書	<本共同研究> 新設プレストレストコンクリート橋の 品質・信頼性向上方法の構築に関する 共同研究報告書 ープレキャスト PC 部材の高耐久化に向けた混和材 を用いたコンクリートの設計・製造マニュアル(案)ー	<過去の共同研究> 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する 共同研究報告書(Ⅱ) ー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)ー
対象	工場等で製造された PCaPC 部材	現場打ちプレストレストコンクリート橋
研究期間	2017 年 4 月～2022 年 3 月	2011 年 6 月～2016 年 1 月
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・高耐久化を目的として混和材を用いた PCaPC 部材の設計及び製造に関する標準的な方法を提示 ・コンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を迅速かつ適切に評価する手法、及び、その適用方法を提案 ・蒸気養生及び蒸気養生前後の養生に関する標準的な方法や、養生条件によって発生する外観変状への対応に関する標準的な方法を提示 	<ul style="list-style-type: none"> ・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に関する標準的な方法を提示 ・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提示

材を用いたコンクリートの設計及び製造に関する標準的な方法を提示した。加えて、PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和材を用いたコンクリートの品質を評価できる試験方法等を提案している。また、PCaPC 部材の製造においては、多くの場合で蒸気養生を実施することから、蒸気養生及び蒸気養生前後の養生に関する標準的な方法や、養生条件によって発生する外観変状への対応に関する標準的な方法をとりまとめている。また、このマニュアル(案)は、蒸気養生を行って製造される混和材を用いたコンクリートを主な対象としているが、蒸気養生を行わない場合や、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの場合も参考にできるようにとりまとめている。現場打ちの PC 橋に関する事項については、「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)」を参照されたい。

工場等で製造される PCaPC 部材の特徴として、部材を製造する前に実際に使用する材料や設備等を用いて部材と同一養生等を行った供試体を利用して、品質を確認できることがある。加えて、繰返し製造の各段階において定期的に PCaPC 部材に用いるコンクリートの品質を確認し、場合によっては使用材料やコンクリートの配合ならびに製造方法等を変更することが可能である。したがって、物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性を確認するための簡易な検査方法を明示できれば、工場等で製造するコンクリートの品質の信頼性をさらに向上できると考えられる。

以上のことを踏まえ、このマニュアル(案)では、工場で製造したコンクリートを用いた実験等で得られた知見に基づき、PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和材を用いたコンクリートの設計及び製造に関する事項を示し、さらに塩化物イオン浸透に対する抵抗性を適切に評価する方法を提案した。

このマニュアル(案)では、表－I.1.2 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。PCaPC 部材では比較的初期の材齢でプレストレス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、その一部を 3 種類の混和材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 15～20%とした。これらの混和材の置換率は、PC 橋の施工実績(付録－1 参照)等も参考として、材齢 28 日までに強度発現を確保できるように設定したものである。

このマニュアル(案)で示す事項は、表－I.1.2 に示す結合材の組合せを標準として、PCaPC 部材に多く適用されている設計基準強度 50N/mm² 程度を想定した水結合材比 32～40%のコンクリートでの実験結果に基づいて示したものである。結合材の組合せを表－I.1.2 に示すもの以外とする場合には、設計値、物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性、製造に関する留意事項について、実験や実績等に基づき、技術的検討を行って確認する必要がある。

このマニュアル(案)の構成を図－I.1.1 に示す。また、2 章以降の概要を次頁以降に示す。

表－I.1.2 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	15～20

第I部
プレキャストPC部材の高耐久化に向けた混和材を用いた
コンクリートの設計・製造マニュアル(案)

1章
総則

2章

PCaPC部材の高耐久化を実現するための基本事項

・PCaPC部材の高耐久化を目的として混和材を用いたコンクリートが有すべき品質を提示

3章

設計に関する事項

・2章で示した品質を満足させるための設計に関して検討すべき事項を明示
・塩化物イオン浸透に対する抵抗性の分類を提案

4章

製造に関する事項

・2章で示した品質を満足させるために製造に関して検討すべき事項を明示
・塩化物イオン浸透に対する抵抗性の迅速評価手法を用いた配合の検討方法及び向上における品質管理方法を提案

主に関連する項目

付録-1 「混和材を用いたPCaPC橋の実績」

付録-2 「PCaPC部材用コンクリートの力学的特性」

付録-3 「物質透過による鋼材腐食及びコンクリートの劣化に対する抵抗性の検討」

付録-4 「製造所の異なる混和材の塩化物イオン浸透に対する抵抗性の比較」

付録-5 「蒸気養生及び蒸気養生後の後養生が耐久性に与える影響」

付録-6 「混和材を用いたPCaPC部材の外観」

第II部
PCaPC部材の塩化物イオン浸透に対する抵抗性の
評価と品質管理

1章
総則

2章

電気抵抗率を用いたPCaPC部材用コンクリートの配合の検討

・電気抵抗率を用いたPCaPC部材用コンクリートの配合の具体的な検討方法を提示

3章

電気抵抗率を用いたPCaPC部材用コンクリートの品質管理

・電気抵抗率を用いたPCaPC部材用コンクリートの品質管理の具体的な検討方法を提示

4章

電気抵抗率試験の方法

・電気抵抗率試験の方法及びその留意点を明示

5章

電気泳動(非定常法)によるコンクリートの塩化物イオンの
拡散係数試験方法(案)

・電気泳動(非定常法)試験の方法及びその留意点を明示

主に関連する項目

第I部3章3.4 塩化物イオン浸透に対する抵抗性
第I部4章4.3.2 電気抵抗率を用いた配合の検討方法

第I部4章4.7.2 電気抵抗率を用いたPCaPC部材の品質管理

図- I.1.1 このマニュアル(案)の構成

2章 PCaPC 部材の高耐久化を実現するための基本事項について

2章では、PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和材を用いたコンクリートに求められる基本事項として、ワーカビリティ、強度、物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性、ひび割れ抵抗性、エトリンガイトの遅延生成(DEF)、環境負荷低減効果を提示した。

3章 設計に関する事項について

3章では、PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和材を用いたコンクリートの設計に関する事項として、硬化コンクリートの力学的特性、中性化と水分の浸透に対する抵抗性、塩化物イオン浸透に対する抵抗性及び凍結融解に対する抵抗性を確保するための検討事項を示した。加えて、混和材を用いたコンクリートの環境負荷低減効果の評価方法を提示した。

硬化コンクリートの力学的特性については、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度、引張強度、ヤング係数及びコンクリートのクリープ・収縮を確認するための方法を示した。中性化と水分の浸透に対する抵抗性については、中性化に対する抵抗性が十分に高いこと、及び水分の浸透の影響に関する留意点を示した。塩化物イオン浸透に対する抵抗性については、混和材を用いたコンクリートは塩化物イオン浸透が停滞するほどの極めて高い抵抗性を有していること、及びその抵抗性を電気抵抗率または非定常電気泳動試験により得られる塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を指標として区分し、各区分において塩化物イオン浸透に対する抵抗性を確保するための方針を示した。環境負荷低減効果については、プレテンション方式 PC 単純 T 桁橋を例に環境負荷低減効果の算出方法とその結果を示した。

4章 製造に関する事項について

4章では、材料、配合、養生、品質管理等、混和材を用いたコンクリートの製造を適切に行うための事項を示した。例えば、配合においては、電気抵抗率を指標とすることで、実際に製造するコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を確認して配合を決定する方法を提案した。養生では、蒸気養生における留意点や、蒸気養生後の水中養生(以下、後養生)の効果について言及した。品質管理では、強度管理に加えて電気抵抗率を指標とした塩化物イオン浸透に対する抵抗性の管理方法を提案、及び、蒸気養生後に生じることがある微細ひび割れ等の変状に関する留意点を示した。

第II部について

第II部では、第I部で提案した、電気抵抗率を用いた配合の検討及び品質管理の方法についての具体的な方法を示した。また、電気抵抗率試験の方法及び留意点、非定常電気泳動試験の方法及び留意点を示した。

(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工場等で製造される PCaPC 部材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、構造物に関する事項は次の既存の基準類を参考にするとよい。

- ・日本道路協会:道路橋示方書・同解説(Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編), 2017.

(以下, 道路橋示方書という)

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に関する事項については、次の文献を参考にするとよい。

- ・土木学会:2017年制定コンクリート標準示方書[設計編],[施工編], 2017.

(以下, コンクリート標準示方書という)

- ・土木学会:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針, コンクリートライブラリー151, 2018.
- ・土木学会:混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー152, 2018.

なお, これらの基準類は, このマニュアル(案)の発刊時(2022年3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するとよい。

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。

- ・**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 PCaPC 部材の高耐久化を実現するための基本事項

2.1 一般

PCaPC 部材に用いるコンクリートは、品質のばらつきが少なく、所要のワーカビリティ、強度、物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性、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、PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和材を用いたコンクリートに求められる品質を示した。

PCaPC 部材の高耐久化を目的とした混和材を用いたコンクリートは、従来の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、品質の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、物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性、ひび割れ抵抗性を有するものであることが求められる。

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、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

- 1) PCaPC 部材に用いるコンクリートのワーカビリティは、部材の形状、寸法を適切に考慮して設定する必要がある。
- 2) PCaPC 部材に用いるコンクリートは、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】

PCaPC 部材に用いるコンクリートのワーカビリティは、所要の性能を有する構造物を構築するために、施工条件及び環境条件を考慮して適切に設定する必要がある。混和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ため、特に、充填性、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、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ったり、同様のスランプの従来のコンクリートよりも充填性が低下したりすることがある。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。

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も確認する必要がある。

2.3 強度

PCaPC 部材に用いるコンクリートは、各製造過程において所要の強度を有するものでなければならない。

【解説】

コンクリート標準示方書【設計編】¹⁾では、コンクリート強度の特性値は原則として材齢 28 日における試験強度に基づいて定めるものとしている。

PCaPC 部材の製造においては、一般に、水結合材比が小さいコンクリートが用いられることや、早期にプレストレスを導入する等を目的として蒸気養生等の促進養生が用いられることなどから、コンクリートの強度発現が早く、各製造過程(脱型、プレストレス導入、吊り上げ、運搬等)において所要の強度が得られた場合には、材齢 28 日以前に使用されることがある。これらの特徴を適切に考慮し、PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和材を用いたコンクリートは、構造物に求められる性能を踏まえて、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 物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性

PCaPC 部材に用いるコンクリートは、物質透過及びコンクリートの劣化に対して、十分な抵抗性を有するものでなければならない。

【解説】

PCaPC 部材に用いるコンクリートは、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、物質透過に対する抵抗性ではコンクリートの中性化、コンクリート中への水の浸透及び塩化物イオン浸透等が挙げられる。また、コンクリートの劣化に対する抵抗性では凍結融解、アルカリシリカ反応等が挙げられる。これらの要因と混和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。

中性化と水の浸透について

PCaPC 部材の高耐久化を目的として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の使用量が抑制されて、水酸化カルシウムの生成量が少なくなるため、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、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、PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和材を用いるコンクリートの中性化に対する抵抗性について、3.3 節に示す方法で適切に評価する必要がある。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・濃縮する可能性があることに留意する必要がある。

中性化と水の浸透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。

塩化物イオン浸透について

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。ただし、PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和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、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ことが多い。この点を評価できる方法を 3.4 節に示した。

また、製造過程における塩化物イオン浸透に対する抵抗性の評価方法として、電気抵抗率を活用して短期間で配合の検討を行う方法を 4.3.2 項に示した。加えて、PCaPC 部材の出荷時における電気抵抗率を用いた品質管理方法を 4.7.2 項に示した。

凍結融解について

PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和材を用いたコンクリートの場合も、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、凍結融解に対する抵抗性を確保できる。ただし、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おそれがある。このため、PCaPC 部材の高耐久化を実現するために用いるコンクリートの凍結融解に対する抵抗性については、3.5 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。ただし、PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和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

混和材の置換率を一定以上とすると、ポルトランドセメントの使用量が減少することや、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。JISA 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等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。混和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。

また、工場で製造されるコンクリートは、製造管理が行いやすいという観点から使用材料の選択肢が広く、4.2 節に示す適切な材料や配合を選定することでアルカリシリカ反応を抑制することが可能であると考えられる。

2.5 ひび割れ抵抗性

PCaPC 部材に用いるコンクリートは、使用材料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】

PCaPC 部材の高耐久化を目的として混和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、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、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、耐久性の観点で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。

PCaPC 部材の高耐久化を目的とし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。一方で、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、「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）」を参考とするとよい。

2.6 エトリンガイトの遅延生成（DEF）

PCaPC 部材に用いるコンクリートは、エトリンガイトの遅延生成(DEF)に起因するひび割れを防止するために、適切な方法で養生しなければならない。

【解説】

エトリンガイトの遅延生成(DEF:Delayed Ettringite Formation)とは、材齢の極初期に高温履歴を受けたコンクリートにおいて、高温により分解されたエトリンガイトが硬化後に再生成し、膨張・ひび割れを引き起こす現象である⁴⁾。国内における DEF の事例については、例えば参考文献⁴⁾を参考にするとよい。現在においても、エトリンガイトの遅延生成の詳細なメカニズムの解明には至っていない。しかし、適切な材料や配合を選定し、製造中における養生温度等の管理を適切に行うことで DEF を防ぐことは可能である。温度管理に関しては、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 2016」⁹⁾を参考にするとよい。PCaPC 部材の製造時には、4.6 節に示す適切な方法によ

り養生を行うことで、DEF の発生を抑制することが可能であると考えられる。

混和材の使用によって DEF 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⁵⁾等、現状では不明な点も多い。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。

2.7 環境負荷低減効果

PCaPC 部材に用いるコンクリートを選定する際には、二酸化炭素排出量の削減への寄与も考慮することが望ましい。

【解説】

PCaPC 部材に用いるコンクリートにおいても、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抑制することが望ましい。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環境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。混和材を用いたコンクリートの特徴の一つは、ポルトランドセメントの一部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。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。

混和材を用いたコンクリート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、「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）」を参考に適切に評価することが望ましい。

なお、3.6 節に、工場で製作される「プレテンション方式 PC 単純 T 桁橋」の二酸化炭素排出効果の試算結果を示しているため参考とするとよい。

参考文献

- 1) 土木学会:2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2017.
- 2) 鈴木浩明, 上田洋:フライアッシュコンクリートの品質が水分浸透深さの時間依存性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol37, No.1, pp.631-636, 2015.
- 3) 鈴木浩明, 上田洋:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートへの水分浸透に関する検討, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, V部門, pp.1021-1022, 2015.
- 4) 日本コンクリート工学会:「DEFのリスクを考える」に関するシンポジウム:委員会報告集:論文集, 2019.
- 5) 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 2016, 2016.

3 章 設計に関する事項

3.1 一般

- (1) PCaPC 部材に用いるコンクリートの硬化後の力学的特性は、試験の結果等に基づき、適切な方法で確認された値を用いる。
- (2) PCaPC 部材に用いるコンクリートの物質透過及びコンクリートの劣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、十分な信頼性を有する方法によって評価することとする。

【解説】

この章では、PCaPC 部材に用いるコンクリート構造物の設計において配慮する事項を示した。

混和材を用いたコンクリートの力学的特性や物質透過及びコンクリートの劣化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異なる傾向を示す場合が多くある。このため、硬化コンクリートの力学的特性は試験等に基づいて確認し、物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性については、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に信頼性を有する方法によって評価する必要がある。

3.2 硬化コンクリートの力学的特性

- (1) PCaPC 部材に用いるコンクリートの圧縮強度、引張強度及びヤング係数は、材齢 28 日あるいはそれ以前の試験により確かめられた値に基づいて設定するものとする。
- (2) PCaPC 部材に用いる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して、式(3.1)によって求めてよい。

$$\varepsilon'_{cc} = \frac{\sigma'_{cp}}{E_{c28}} \varphi \quad (3.1)$$

ここに、 ε'_{cc} :コンクリートのクリープひずみ、 σ'_{cp} :作用する応力度(N/mm²)、 E_{c28} :材齢 28 日のヤング係数(N/mm²)、 φ :クリープ係数、である。

- (3) PCaPC 部材に用いる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、応力が作用するとき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。
- (4) PCaPC 部材に用いる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。

【解説】

(1)について

コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾では、コンクリート強度の特性値は原則として材齢 28 日における試験強度に基

づいて定めるものとしている。

PCaPC 部材の製造においては、一般に、水結合材比が小さいコンクリートが用いられることや、早期にプレストレスを導入する等を目的として蒸気養生等の促進養生が用いられることなどから、コンクリートの強度発現が早く、各製造過程(脱型、プレストレス導入、吊り上げ、運搬等)において所要の強度が得られた場合には、材齢 28 日以前に使用されることがある。このため、PCaPC 部材に用いるコンクリートの圧縮強度、引張強度及びヤング係数は、部材の製作工程等から設定した試験材齢(材齢 28 日あるいはそれ以前)の試験により確かめられた値を用いることとした。

さらに近年では、塩化物イオン等の劣化因子の侵入に対する抵抗性の向上を目的として、蒸気養生の後に水中養生や散水養生等の後養生を行う事例もある。なお、表－I.1.2 に示す結合材の組合せのコンクリートでは、蒸気養生を行った場合の材齢 28 日までの強度は混和材の使用の有無にかかわらず同程度であることが確認されている。また、後養生によって、圧縮強度の発現に対して効果があることも確認されている(付録－2 参照)。

なお、「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)」の成果から、本報告書の表－I.1.2 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²⁾に示される圧縮強度との関係式を用いて求めてよいことが示されている。

(2), (3), (4)について

道路橋示方書²⁾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。

また、乾燥収縮ひずみ及びクリープ係数の特性値について、「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)」の成果から、本報告書の表－I.1.2 に示す結合材の組合せのコンクリートを用いた場合には、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と同じ値を用いてよい。また、同報告書(pp.46-48)では、プレストレスを導入する材齢の圧縮強度を概ね同じとした場合には、PCaPC 部材に用いるコンクリートのうち、結合材に混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみ及びクリープ係数は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等として扱えることも報告されている。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様に、試験や道路橋示方書に記載の方法での導出、もしくは関連する JIS 製品規格が取りまとめられている「設計・製造便覧((一社)プレレスト・コンクリート建設業協会)^{3),4),5),6),7)}に記載の設計値または実績により定められた値としてよいこととした。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た自己収縮ひずみを含めたひずみである。

なお、付録－2 に先行する研究の検討事例等を示しているため、参考とするとよい。

3.3 中性化と水の浸透に対する抵抗性

- (1) PCaPC 部材に用いるコンクリートの中性化と水の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評価することとする。
- (2) PCaPC 部材に用いるコンクリートのうち、水結合材比 40%以下で、このマニュアル(案)で標準とする結合材の組合せを用いた場合は、かぶりの最小値を 25mm 以上とすることで、中性化に対する抵抗性を有するものとみなしてよい。

【解説】

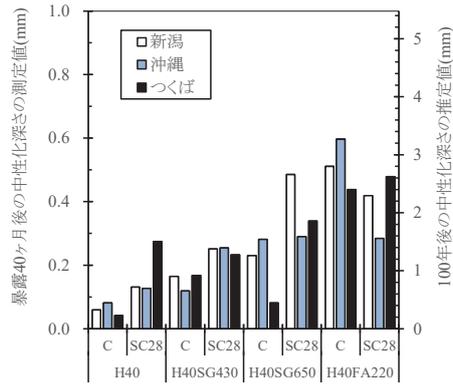
(1)について

PCaPC 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中性化の進行速度が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評価する必要がある。

(2)について

表-1.2 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 40 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²⁾のかぶりの最小値である 25mm よりも小さくなることが確認されている(図-I.3.1)。また、中性化速度係数は有効水結合材比で整理すると概ね $0.4\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$ 以下となることが確認されている(図-I.3.2 参照)。加えて、初期強度を確保するため、蒸気養生を行った場合でも、中性化に対する抵抗性に与える影響が小さいことを確認している(付録-3 参照)。

コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾では、中性化が進行しても、水の供給がなくコンクリートが乾燥状態で保たれる場合には、鋼材腐食は進行しにくいことから、水分浸透に着目した照査を実施することとしている。このマニュアル(案)においても、鋼材腐食に対する抵抗性についてはコンクリートの中性化と水の浸透に対する抵抗性を対象として検討することとした。PCaPC 部材を模擬した壁状供試体のコアの水分浸透速度を測定した結果より、100 年後のかぶり 25mm 位置での鋼材腐食深さの予測値は、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を用いたコンクリートともに、鋼材腐食深さの限界値以下となり鋼材腐食に対して、十分な抵抗性を確保できることを確認している(図-I.3.3)。ただし、実験のデータ数が限られるため、構造物の置かれる環境に応じて、十分な信頼性を有する試験等の結果に基づいて適切に評価することが望ましい。



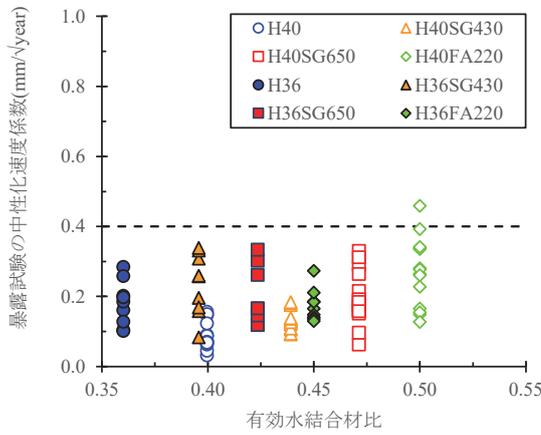
H40:
早強ポルトランドセメント単味
(水結合材比:40% W=165kg/m³)

H40SG430:
早強ポルトランドセメントの重量比30%
を高炉スラグ微粉末4000で置換
(水結合材比:40% W=165kg/m³)

H40SG650:
早強ポルトランドセメントの重量比50%
を高炉スラグ微粉末6000で置換
(水結合材比:40% W=165kg/m³)

H40FA220:
早強ポルトランドセメントの重量比20%
をフライアッシュII種で置換
(水結合材比:40% W=165kg/m³)

図一 I.3.1 暴露40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(水結合材比:40%)



H36, H40:
早強ポルトランドセメント単味
(水結合材比:36, 40% W=165kg/m³)

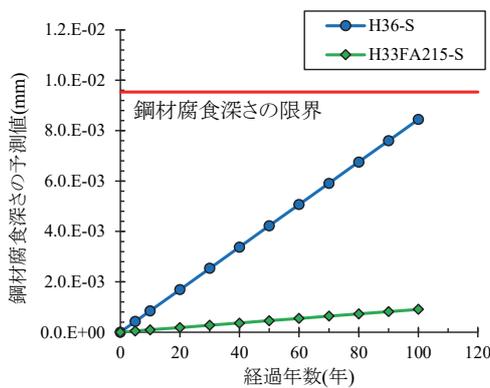
H36SG430, H40SG430:
早強ポルトランドセメントの重量比30%
を高炉スラグ微粉末4000で置換
(水結合材比:36, 40% W=165kg/m³)

H36SG650, H40SG650:
早強ポルトランドセメントの重量比50%
を高炉スラグ微粉末6000で置換
(水結合材比:36, 40% W=165kg/m³)

H36FA220, H40FA220:
早強ポルトランドセメントの重量比20%
をフライアッシュII種で置換
(水結合材比:36, 40% W=165kg/m³)

※有効水結合材比: $W/B' = W/(C_p + k \cdot A_d)$
 C_p : 単位セメント量(kg/m³), k : 混和材の種類
 により定まる係数(フライアッシュ: $k=0$, 高炉ス
 ラグ微粉末: $k=0.7$), A_d : 単位混和材量(kg/m³)

図一 I.3.2 有効水結合材比と暴露40ヶ月後の中性化速度係数の関係



H36:
早強ポルトランドセメント単味
(水結合材比:36% W=151kg/m³)

H33FA215:
早強ポルトランドセメントの重量比15%
をフライアッシュII種で置換
(水結合材比:33% W=151kg/m³)

※末尾の-Sは蒸気養生を実施

図一 I.3.3 鋼材腐食深さの予測値

3.4 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

- (1) PCaPC 部材に用いる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評価することとする。
- (2) PCaPC 部材に用いるコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、非定常電気泳動試験より得られる塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} あるいは電気抵抗率 ρ_t により評価するとよい。その場合は、対象とする PCaPC 部材に対する要求性能を踏まえて、表－I.3.1 に示す値を評価の指標とするとよい。

表－I.3.1 塩化物イオン浸透に対する抵抗性の分類

区分	非定常電気泳動試験による 塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	電気抵抗率 ρ_t (Ωm)	各区分に対応する結合材の例 (水結合材比:32~40%)	各区分に対応するコンクリートの 塩化物イオン浸透に対する抵抗性の特徴
区分1	4 <	< 100	早強ポルトランドセメント単味	塩害の影響度合いが最も厳しい環境では、かぶりのみでは防食できず、塗装鉄筋等を併用
区分2	2 ~ 4	100 ~ 200	早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末4000(置換率30%)	塩害の影響度合いが最も厳しい環境でも、100年間で、かぶり70mm位置の塩化物イオン濃度が腐食限界値に達しない
区分3	< 2	200 <	早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末6000(置換率50%) 早強ポルトランドセメント + フライアッシュII種(置換率20%)	塩化物イオンの浸透が停滞するため塩害の影響を受けない

【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。

塩化物イオン浸透に対する抵抗性を検討する方法には、浸せき試験(JSCE-G572)や電気泳動試験(定常(JSCE-G571)、非定常法(第Ⅱ部5章))及び電気抵抗率試験(第Ⅱ部4章)、暴露試験がある。なお、暴露試験の結果を評価する場合、塩化物イオンの供給量が地理的条件によって大幅に異なることに注意する必要がある。

既往の研究から、暴露試験、浸せき試験、非定常電気泳動試験及び電気抵抗率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。また、表－I.1.2 に示す結合材の組合せのコンクリートを用いた場合には、初期強度を確保するための蒸気養生を行っても、塩化物イオン浸透に対する抵抗性に与える影響が少ないことを確認している(付録－3 参照)。

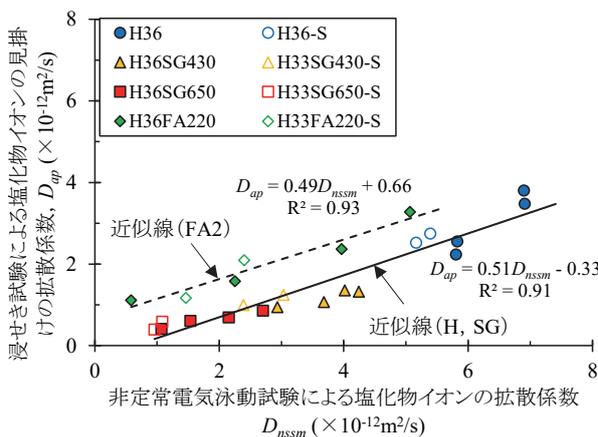
(2)について

コンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、浸せき試験や屋外暴露試験により評価した例は多いが、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が極めて高く、浸せき試験や屋外暴露試験で塩化物イオンがある程度浸入するまでには年単位の期間を要するため、非定常電気泳動試験及び電気抵抗率試験等の迅速な評価試験方法の活用が期待されている。

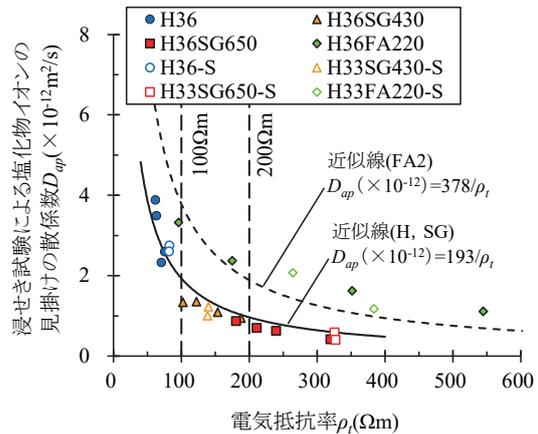
浸せき試験から算出される塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} と、非定常電気泳動試験から得られる塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} または電気抵抗率 ρ_t との間には相関関係があり⁸⁾、これらの試験結果を用いて塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価できることを確認している。また、非定常電気泳動試験は塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を比較的短時間で得ることができ(第Ⅱ部5章参照)、かつ、見掛けの拡散係数 D_{ap} と D_{nssm} に相関性がある。

表一 I.3.1 は、浸せき試験にて、浸せき 365 日以降に塩化物イオンの浸透が停滞したこと(付録一3 参照)と、非定常電気泳動試験または電気抵抗率試験の結果を関連付けて整理することで塩化物イオン浸透に対する抵抗性を分類したものである(図一 I.3.4, 図一 I.3.5)。なお、フライアッシュを置換率 20% で用いたコンクリートの場合には、ポズラン反応が顕著になるまでに時間を要するため、電気抵抗率 ρ_t の増加が高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートと比較して遅いことに留意する必要がある。

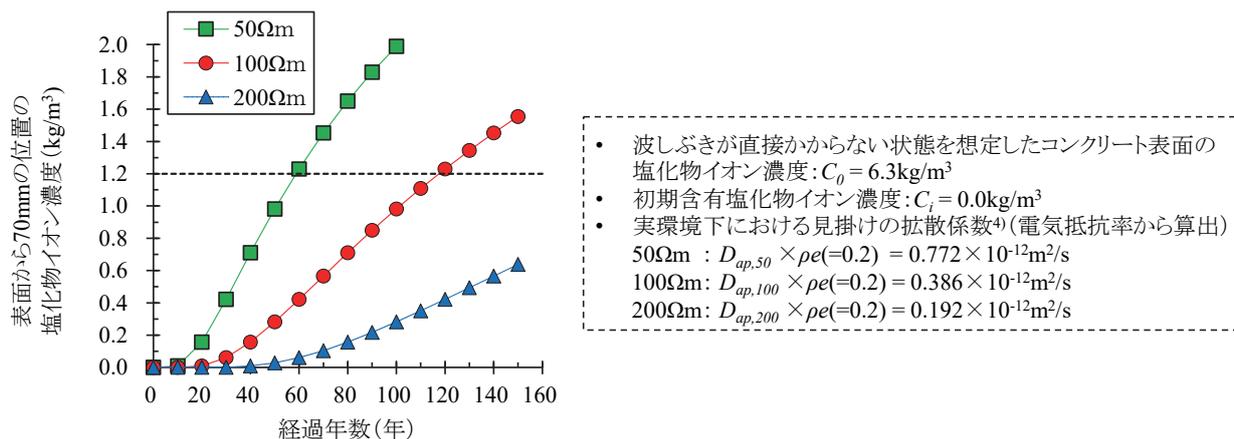
なお、塩化物イオンの作用を受ける時点において電気抵抗率 ρ_t が $100\Omega\text{m}$ 以上であれば、塩害の影響度合いがもっとも激しい区分においても、100 年後のかぶり 70mm 位置での塩化物イオン濃度は腐食限界値に達しないと推定される(図一 I.3.6)。ここで、推定値の算出に用いる塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、図一 I.3.4 から所定の電気抵抗率 ρ_t に対応する見掛けの拡散係数 D_{ap} を算出し、既往の研究⁹⁾に基づいて電気抵抗率 ρ_t から求めた見掛けの拡散係数と実環境における見掛けの拡散係数の違いを考慮するための係数($\rho_e=0.2$)を乗じることで求めた。



図一 I.3.4 浸せき試験による見掛けの拡散係数 D_{ap} と非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} の関係



図一 I.3.5 浸せき試験による見掛けの拡散係数 D_{ap} と電気抵抗率 ρ_t の関係



図－I.3.6 塩化物イオン濃度の推定結果

3.5 凍結融解に対する抵抗性

- (1) PCaPC 部材に用いる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評価することとする。
- (2) PCaPC 部材に用いるコンクリートのうち、水結合材比 40%以下で、このマニュアル(案)で標準とする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を有するものとみなしてよい。

【解説】

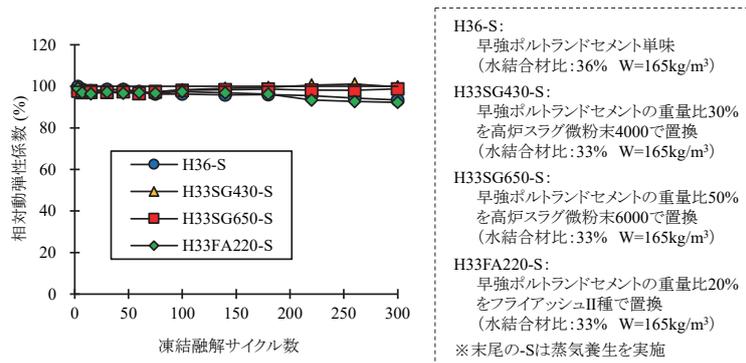
(1)について

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評価する必要がある。

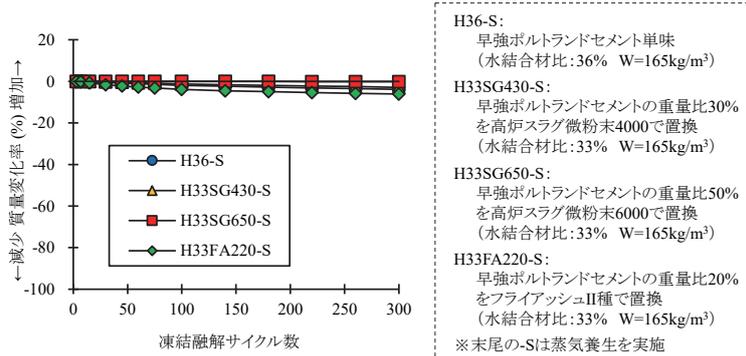
(2)について

凍結防止剤や海からの飛来塩分等による塩化物の影響を受ける場合を想定し、3%NaCl 溶液にて、空気量の実測値が 4.0~4.5%の表－I.1.2 に示す結合材の組合せのコンクリートの凍結融解試験を実施した。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－I.3.7)。このため、水結合材比が 40%以下で、表－I.1.2 に示す結合材の組合せのコンクリートを用いた場合には、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を有するとみなしてよい。

ただし、混和材の種類により、スケーリングによる質量の減少が大きくなる混和材もあるため(図－I.3.8)、供試体表面のスケーリングによる劣化の程度が異なる可能性に留意する必要がある。また、空気量を増加させることはス



図一 I.3.7 相対動弾性係数(試験条件:3%NaCl 溶液)



図一 I.3.8 質量変化率(試験条件:3%NaCl 溶液)

ケーリングに対する抵抗性を確保するうえで有効な場合があるが、空気量が増すとコンクリートの強度が小さくなるだけでなく、コンクリートの品質のばらつきも大きくなる傾向にあるため、過度に空気量を多くしないように留意する必要がある¹⁰⁾。

加えて、蒸気養生を行う場合には、昇温時における空気の膨張がコンクリートの品質に悪影響を及ぼす恐れもあるため、4.6節を参照して適切に実施する必要がある¹¹⁾。

3.6 環境負荷低減効果

- 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】

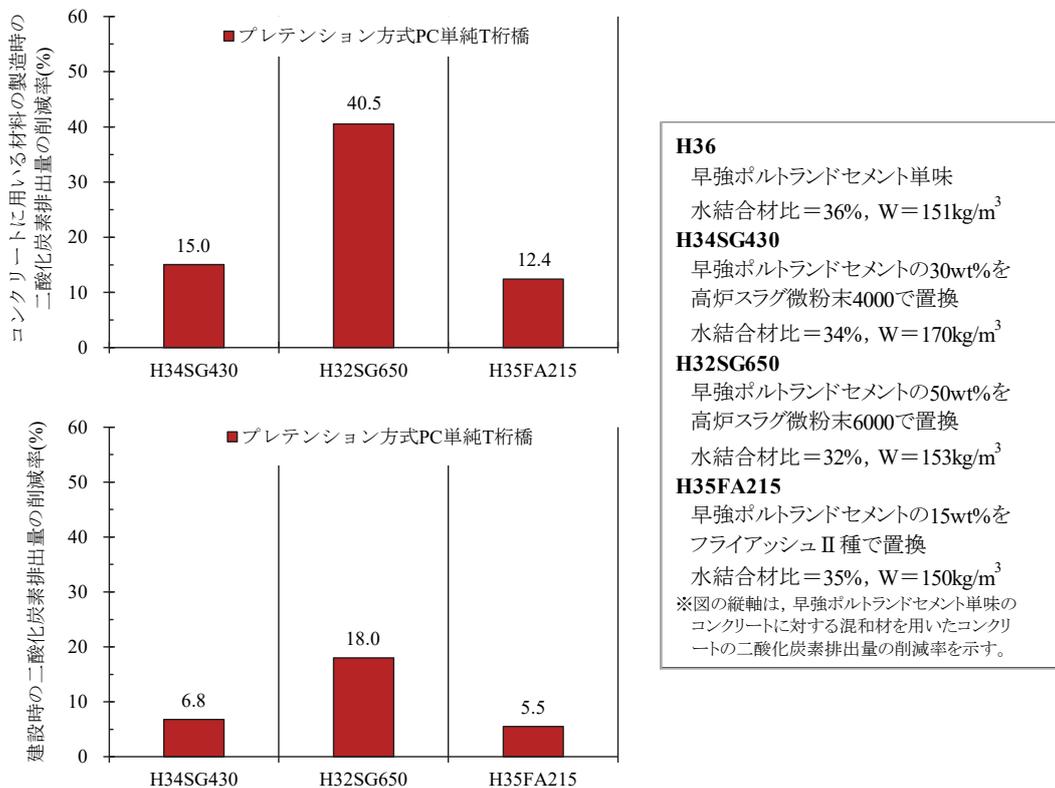
(1)について

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、評価の目的に応じた対象項目を設定し、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。なお、具体的な算出方法については、「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）」を参考とするとよい。

工場で製作されるプレテンション方式PC単純T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例を図－I.3.9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と、表－I.3.2に示す建設時における二酸化炭素排出量を評価の対象とした。混和材を用いたコンクリートでは、プレストレスの導入に必要となる材齢1日程度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－I.3.3の値¹²⁾を用いた。この結果、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、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。



図－I.3.9 混和材を用いたプレテンション方式PC単純T桁橋の二酸化炭素排出削減効果

表－I.3.2 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

表－I.3.3 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 ₂ /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6)を参照した値。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。

参考文献

- 1) 土木学会:2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2017.
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編, 2017.
- 3) 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会:JIS による道路橋用 PC 橋桁設計・製造便覧(JIS A 5373-2016), 2020.
- 4) 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会:JIS による軽荷重 PC スラブ橋設計・製造便覧(JIS A 5373-2016), 2022.
- 5) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会:JIS による道路橋橋桁用セグメント設計・製造便覧(JIS A 5373-2004), 2010.
- 6) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会:JIS による合成床版用プレキャスト板設計・製造便覧(JIS A 5373-2004), 2010.
- 7) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会:JIS による道路橋用プレキャスト床版設計・製造便覧(JIS A 5373-2004), 2010.
- 8) 櫻庭浩樹, 小田部貴憲, 鈴木雅博, 古賀裕久:混和材を用いた高耐久なコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性評価, 第29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.409-414, 2020.
- 9) 皆川浩, 中村英佑, 藤井隆史, 綾野克紀:大気中環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.767-772, 2019.
- 10) 土木学会:2017年制定コンクリート標準示方書[施工編], 2017.
- 11) 土木学会:プレキャストコンクリートを用いた構造物の構造計画・設計・製造・施工・維持管理指針(案), コンクリートライブラリー158, 2021.
- 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Vol.125, 2005.

4 章 製造に関する事項

4.1 一般

PCaPC 部材に用いるコンクリートの製造は、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ように行うものとする。

【解説】

この章では、PCaPC 部材に用いるコンクリートの製造において配慮が必要な事項を示す。

PCaPC 部材の製造において、混和材を用いたコンクリートを使用する場合、セメント及び混和材の種類や混和材の置換率によって、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと異なるフレッシュ性状を示す場合がある。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りやすい。このような混和材を用いたコンクリートの特徴を適切に把握した上で製造する必要がある。

硬化コンクリートの品質を確保するためには、混和材を用いる場合においても、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの場合と同様に、打込み後の養生を適切に行う必要がある。例えば、強度発現や物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性は、養生方法及び期間の影響を受けるため、所要の品質が得られることを試験によって確認する必要がある。特に、蒸気養生を行う場合には、前養生時間を十分に確保した上で、コンクリート温度の過度な上昇を抑制することなども求められる。

また、この章の 4.3 配合では、所要の塩化物イオン浸透に対する抵抗性を確保するため、実際に製造するコンクリートの電気抵抗率を確認して配合を決定するための考え方も示している。

4.2 材料

4.2.1 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】

(1)について

PCaPC 部材に用いる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、PCaPC 部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。

4.2.2 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

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、PCaPC 部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、PCaPC 部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。

4.2.3 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

このマニュアル(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、スラッジ水について、JIS A 5308 では呼び強度 50 以上のレディーミクストコンクリートにスラッジ水を適用しないことが定められている。JIS A 5364 ではプレキャストコンクリート製品へのスラッジ水の使用は禁止されていないものの、スラッジ水を用いる場合には、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十分に有することを確認しておく必要がある。

(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。

4.2.4 骨材

- (1) 細骨材は、JIS A 5308 附属書 A または JIS A 5005 に適合したものを、粗骨材は、JIS A 5308 附属書 A または JIS A 5005 に適合したものを標準とする。
- (2) (1)以外の骨材については、その品質を確かめ、これを用いたコンクリートが所要の品質を有することを確認しなければならない。

【解説】

(1)について

このマニュアル(案)では、細骨材は、JIS A 5308 附属書 A に適合した砂、または JIS A 5005 に適合した砕砂、または JIS A 5011 に適合した各スラグ細骨材を用いることを、粗骨材は、JIS A 5308 附属書 A に適合した砂利、または JIS A 5005 に適合した碎石を用いることを標準とした。

なお、付録-4 に示すように高炉スラグ微粉末 6000 を混和材として用いた場合の塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効果と比較すると、細骨材の品質がそれらに及ぼす影響は小さいことが確認されている。

(2)について

各スラグ細骨材等の(1)以外の骨材を用いる場合には、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。

4.2.5 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

このマニュアル(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。これら的高炉スラグ微粉末は比表面積や活性度指数等が異なるため、いずれの高炉スラグ微粉末を用いるかによって、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、耐久性、ひび割れに対する抵抗性に与える影響が異なることに注意が必要である。

なお、付録-4 に示すように、製造所が異なる 2 種類の高炉スラグ微粉末 6000 を用いて塩化物イオン浸透に対する抵抗性を比較した事例では、製造所の違いの影響は小さいことが確認されている。

また、付録-3 に示すように、全国の PCaPC 工場において高炉スラグ部粉末 6000 を 50%置換した配合を用いて供試体を製作し、塩化物イオン浸透に対する抵抗性を検討した結果、さまざまな材料や製造条件が異なっても塩化物イオン浸透に対する高い抵抗性を有していることが確認されている。

(2)について

このマニュアル(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。

なお、付録-4 に示すように発電所が異なる 7 種類のフライアッシュ II 種を用いて塩化物イオン浸透に対する抵抗

性を比較した事例では、発電所の違いがそれらに及ぼす影響は比較的大きいものの、全てのフライアッシュにおいて早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比較すると高い塩化物イオン浸透に対する抵抗性を有していることが確認されている¹⁾。

(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。

4.2.6 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

このマニュアル(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。なお、これらの使用が凝結時間に及ぼす影響については、4.5 節及び 4.6 節を参照して検討するとよい。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。

PCaPC 部材に用いる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、早強ポルトランドセメント単味の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などを参考として、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。

4.3 配合

4.3.1 配合一般

- (1) PCaPC 部材に用いる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、物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性、ひび割れ抵抗性をもつ範囲で、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) PCaPC 部材に用いるコンクリートのセメントと混和材の種類、混和材の置換率並びに水結合材比は、所要の品質、物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性を有するよう、適切に定めるものとする。

【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、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。

(2)について

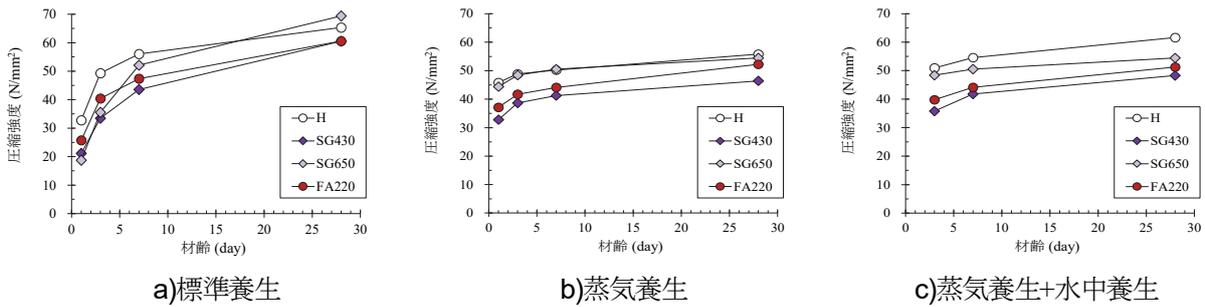
セメントと混和材の種類及び混和材の置換率には、多種多様な組合せが存在する。これらの組合せはフレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、物質透過及びコンクリート劣化に対する抵抗性、ひび割れ抵抗性等に多大な影響を及ぼすため、対象とする構造物の種別、環境条件等を考慮して、セメントと混和材の種類及び混和材の置換率を適切に設定する必要がある。このマニュアル(案)では、表- I.1.2 に示す結合材の組合せを用いることを標準とした。

表- I.4.1 に水結合材比を一定とし、結合材の種類が異なるコンクリートの配合とスランプ及び空気量、圧縮強度試験結果の一例を示す。また、円柱供試体の養生方法を変化させた場合の圧縮強度を図- I.4.1 に示す。圧縮強度については、混和材の使用によって初期材齢の強度発現が遅くなることが確認されている。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、プレストレスの導入に必要な圧縮強度を得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低減することが必要となる場合がある。また、図- I.4.1 b), c)のように蒸気養生後に水中養生を行うことによって圧縮強度が増加する場合があることも確認されている。したがって、養生による影響を考慮した配合の検討を行う必要がある。

表一 I.4.1 コンクリートの配合及び試験結果の一例

配合	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)						スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度(N/mm ²)			
		B=HPC+SG4+SG6+FA					S			G	材齢 3日	材齢 7日	材齢 28日
		W	HPC	SG4	SG6	FA2							
H	36	165	458	—	—	—	721	968	12.0	5.3	49.3	56.0	65.3
SG430			321	138	—	—	712		10.0	5.9	33.5	43.6	60.5
SG650			229	—	229	—	707		12.0	5.0	35.6	52.1	69.4
FA220			367	—	—	92	696		8.0	4.8	40.4	47.4	60.6

※W: 上水道水(茨城県つくば市), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14 g/cm³, 比表面積=4480 cm²/g), SG4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89 g/cm³, 比表面積=4350 cm²/g, せつこう添加(SO₃換算 2%)), SG6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91 g/cm³, 比表面積=6210 cm²/g, せつこう添加(SO₃換算 3%)), FA2: フライアッシュ II 種(密度=2.35 g/cm³, 比表面積=4330 cm²/g), S: 細骨材(静岡県掛川産砕砂: 密度=2.56 g/cm³, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6号(密度=2.67 g/cm³, 吸水率=0.43%, 硬質砂岩)と同 5号(密度=2.67 g/cm³, 吸水率=0.46%, 硬質砂岩)を均等に混合), 化学混和剤: スランブ 12±2.5 cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう高性能減水剤と空気連行剤の使用量を調整
 ※圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200 mm)を用いて, 材齢 1, 3, 7, 28 日に JISA 1108:2006 に準拠して測定



図一 I.4.1 各種混和材を用いたコンクリートの養生方法の違いによる圧縮強度

なお, 試し練りを行う等して塩化物イオン浸透に対する抵抗性を詳細に評価し, 配合の検討を行う場合には, 4.3.2 項を参照するとよい。

4.3.2 電気抵抗率を用いた配合の検討方法

PCaPC 部材に用いるコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を短期間で評価する場合は, 電気抵抗率試験を用いるとよい。

【解説】

3.4 節に示すように, 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電気抵抗率により区分することが可能である。例えば, 全国各地の PCaPC 製造工場(11 工場)の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, 電気抵抗率と非定常電気泳動法による塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を測定したところ,

これらの関係について配合やコンクリートの使用材料によらず 1 つの推定線で概ね評価できることが確認されている(付録-3, 付録-4 参照)。

そこで、このマニュアル(案)では、物質透過に対する抵抗性のうち、特に塩化物イオン浸透に対する抵抗性を考慮して配合を検討する際に、試験が比較的早期に結果が得られる電気抵抗率を指標として評価する方法を提案している。

試し練り等を行い、配合を検討する具体的な方法を第Ⅱ部 2 章に示す。

上記の方法により決定した配合のコンクリートを製品に用いる場合の品質管理は、4.7.2 項に示す方法により行うことができる。

4.4 計量

PCaPC 部材に用いるコンクリート材料の計量は、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】

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、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、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、結合材として用いる材料の種類が多くなること、早強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など、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。混和材専用の計量設備を備えておらず、セメントの計量設備と兼用して累加計量を実施する場合には、練り上がったコンクリートの品質に影響がないこと、目標とする物質透過に対する抵抗性等が得られることを事前に試し練り等で確認する必要がある。

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。

4.5 練混ぜ・打込み・締固め・仕上げ

- (1) 混和材を用いたコンクリートは、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。
- (2) 混和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、適切な打設計画に従って連続して打ち込み、締め固めるものとする。
- (3) 混和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

混和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。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及び練り混ぜ時間を決定しておく必要がある。表-I.4.2 は早強ポルトランドセメント単味のコンクリート練混ぜ方法について、22 工場を対象に行ったアンケート結果を示したものであり、材料の投入順序や練混ぜ総時間の検討において参考にするるとよい。

表-I.4.2 PCaPC 部材を製造している 22 工場の練混ぜ方法

練混ぜ方法	練り混ぜ総時間 (秒)
細骨材+水→4秒→粗骨材→12秒→セメント→104秒→排出	120
細骨材+セメント→10秒→水→50秒→粗骨材→90秒→排出	150
細骨材+水+セメント→9秒→粗骨材→111秒→排出	120
細骨材+水+セメント→12秒→粗骨材→90秒→排出	102
細骨材+水+セメント→20秒→粗骨材→60秒→排出	80
細骨材+水+セメント→20秒→粗骨材→90秒→排出	110
細骨材+水+セメント→20秒→粗骨材→90秒→排出	110
細骨材+水+セメント→20秒→粗骨材→90秒→排出	110
細骨材+水+セメント→30秒→粗骨材→60秒→排出	90
細骨材+水+セメント→30秒→粗骨材→90秒→排出	120
細骨材+水+セメント→30秒→粗骨材→120秒→排出	150
細骨材+水+セメント→50秒→粗骨材→100秒→排出	150
細骨材+水+セメント→60秒→粗骨材→100秒→排出	160
細骨材+水+セメント→70秒→粗骨材→90秒→排出	160
細骨材+セメント+水→20秒→粗骨材→90秒→排出	110+a(実績)
細骨材+セメント+水→粗骨材→90秒→排出	90+a(実績)
細骨材+水→セメント→粗骨材→90秒→排出	90+a(実績)
細骨材+粗骨材→水→セメント→90秒→排出	90+a(実績)
水→細骨材→セメント→粗骨材→排出 (粗骨材投入まで約8秒)	45+a(実績)
水→細骨材→セメント→粗骨材	90
水→細骨材→セメント→粗骨材	90
通常期:細骨材→水→セメント→粗骨材, 冬期:粗骨材→細骨材→温水→セメント	120

表－I.4.3 凝結試験結果の一例

工場名	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)							試験結果				
		水	結合材				細骨材	粗骨材	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	凝結試験	
			セメント HPC	混和材								始発 (h:m)	終結 (h:m)
				SG4	SG6	FA							
A	39.5	150	380	-	-	-	816	996	12.0	4.5	28	3:49	5:09
	34.5	158	321	137	-	-	768	943	14.0	3.5	28	3:14	5:34
B	36.0	152	422	-	-	-	753	1024	13.0	3.4	22	4:07	5:57
	33.0	150	227	-	227	-	766	972	11.0	4.0	21	3:24	5:28
C	36.0	151	420	-	-	-	730	1094	13.0	5.0	33	4:36	5:57
	33.0	151	389	-	-	69	699	1071	10.5	4.3	32	4:04	5:29

(2)について

混和材を用いたコンクリートのスランブ保持性や凝結特性は、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。混和材を用いたコンクリートをPCaPC部材に用いる場合には、材齢1日または比較的初期の材齢でプレストレスを導入するため、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと比べて水結合材比を小さく設定する場合が多い。表－I.4.3に早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの配合と混和材を用いたコンクリートの配合及び凝結試験結果を示す。ここでは、混和材を用いたコンクリートの水結合材比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3～4.5%低く設定されており、混和材を用いたコンクリートの凝結時間は、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに比べて始発、終結ともに早くなる傾向が確認されている。一方で、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの配合と比較して混和材を用いたコンクリートの水結合材比が小さい場合であっても、コンクリート温度やその他の環境条件等の影響によって凝結時間が遅くなる場合もある。混和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打設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。

(3)について

混和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、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。

高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートでは、ブリーディング量が小さくなる場合があるため、必要に応じて膜養生剤等を用いてコンクリートの表面の乾燥やこわばりを防ぐとよい。なお、膜養生剤の種類によっては、床版防水の接着性能が低下することも確認されていることから、製作する部材に適した膜養生剤を選定する必要がある。

4.6 養生方法

- (1) PCaPC 部材の養生方法及び期間は、所要の性能が得られるように適切に定める。
- (2) 常圧蒸気養生を行う場合には、コンクリートの打込み後 2 時間以上経過してから蒸気をかけるのがよい。養生室内の温度上昇速度は 15°C/h 以下、最高温度は 65°C 以下とすることを標準とする。

【解説】

(1)について

PCaPC 部材は成型後に、低温、乾燥、急激な温度変化、荷重、衝撃等の有害な影響を受けないように注意して、十分に養生する必要がある。混和材を用いたコンクリートの強度発現と物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性は、混和材の種類や置換率のほか、養生方法及び期間の影響を受けるため、所要の性能が得られることを試験によって確認した上で、適切な養生方法及び期間を定める必要がある。

(2)について

PCaPC 部材の製造においては、プレストレスの導入を行う材齢を短縮し使用する型枠数を少なくして製造の効率を上げるために、コンクリートの硬化促進を目的とする常圧の蒸気養生が広く用いられている。一般に蒸気養生を行ってもコンクリート中には未水和のセメント粒子がまだ多く残っている。特に、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に比べて後養生の影響が大きい場合があるため、所要の性能が得られるよう、脱型後にも適切な後養生を行うことが重要である。

蒸気養生方法の検討は、練混ぜから蒸気を通すまでの時間(前養生)も含めて行う。さらに、昇温速度、最高温度とその保持時間、降温速度等を条件として定めるが、使用材料、配合、雰囲気や練上りの温度、部材の形状や寸法によっても性能の発現、品質への影響が相違する。そのため、蒸気養生及び後養生の方法を定める場合には試験を行って定めることが望ましい。特に、前養生時間の不足、急激な温度変化、過度な最高温度の設定は、PCaPC 部材の性能や品質に悪い影響を与えるので、このような養生工程にならないように条件を定める必要がある。

前養生について

前養生が短いと、その後の蒸気養生の条件によっては強度増進が小さくなり、硬化後のコンクリートの品質が低下する可能性があるため、前養生の時間を適切に定める必要がある。適切な前養生時間はコンクリートの凝結時間と関係があることが知られている²⁾。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に比べて凝結時間が長くなる場合があり、コンクリート温度が凝結時間に与える影響も大きくなるので、特に練上り温度が低くなることが想定される場合には、凝結時間に応じた前養生時間を設定する必要がある。

昇温速度について

部材中で温度差が生じるとひび割れが発生するおそれがある。そのため、部材の内部も含めて、養生室内の温度が出来るだけ均等に上がるようにすることが望ましい。また、蒸気の配管や吹出し口付近は局所的に高温になるため、部材に悪影響を与えないように考慮する必要がある。

最高温度について

最高温度が過度に高くなると、強度増進が小さくなり、硬化後のコンクリートの品質が低下する場合がありますので、保持時間とともに、必要以上の給熱条件とならないように設定する。また、後述する DEF 予防の観点からも、温度を高くし過ぎないことは重要である。

降温速度について

部材中に生じる温度差をできる限り抑えるように養生室の温度を徐々に下げ、外気との温度差が小さくなってから PCaPC 部材を取り出せるように設定することが重要である。

後養生について

蒸気養生を行って水和を促進したコンクリートであっても、一般には未水和のセメントをはじめとする結合材粒子がまだ多く残っている。また、温度変化や乾燥等の有害な作用によってはひび割れ等の変状を生じる可能性もある。そのため、所要の性能や品質が得られるよう、脱型後も適切な後養生を行うことが大切である。特に、性能の確保、品質の向上には湿潤養生が有効であり、蒸気養生の終了から 2 日程度でも物質透過に対する抵抗性の向上に対して有効であることが確認されている(付録-5 参照)。

常圧の蒸気養生において、高温養生後に常温で湿潤な環境へ暴露した工場製品が、硬化後の DEF による劣化を起こす事例が各国で報告されている。この現象には、高温履歴、アルカリ量、硫酸塩、暴露時の水分供給等が関連するとされており、養生時のコンクリートの最高温度が高いほど発生する可能性が高いと言われている。わが国では、PCaPC 部材の蒸気養生工程で温度が比較的低温で管理され、セメント中のアルカリ量も低く抑えられるようになっていたため、DEF による劣化が顕在化した PCaPC 部材の報告は限られている³⁾。また、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用は、DEF による膨張を抑制する効果があると考えられている⁴⁾。しかし、部材内部の温度は水和熱によって養生室内の温度より高くなるため、養生温度と部材内部の温度の違いについても考慮しておく必要がある。DEF 対策に関する温度条件の設定については、参考文献⁴⁾を参考にするとよい。

4.7 品質管理

4.7.1 品質管理一般

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">(1) PCaPC 部材に用いる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、製造の各段階において適切に行うものとする。(2) PCaPC 部材において、外観変状が確認された場合は、その要因を把握するとともに、外観変状が品質に影響を与えないことを確認しなければならない。 |
|--|

【解説】

(1)について

PCaPC 部材に用いる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、部材に要求される品質を満足するよう、あらかじめ品質管理項目や管理方法(頻度等)を適切に設定した計画を作成し、これに準じて行う必要がある。

このうち、一般的なコンクリートと同様の要求事項に対する品質管理項目や管理方法については、コンクリート標準示方書や日本産業規格等の現行の関連基準類、または、これらを参考とした実績のある個別の規定等による品質管理計画を適用してよい。

上記では適用できない項目を品質管理項目とする場合には、実験や解析、または実績等に基づき、適切な管理方法を設定する必要がある。なお、4.3 節において電気抵抗率を指標として配合を定めたコンクリートに対しては、4.7.2 項に示す方法により PCaPC 部材の出荷前の品質管理を行うこととする。

(2)について

外観変状には、微細ひび割れ、色むら、表面気泡、砂すじ等がある。

ごく表層部の微細ひび割れや色むらについては、一般的に物質透過に対する抵抗性等の品質に影響を与えないと考えられ、付録-6 に示す実験結果からも、コンクリート表面に微細ひび割れが生じた場合でも、塩化物イオン浸透に対する抵抗性と中性化に対する抵抗性に与える影響は認められなかった。一方で、既往の研究では、例えば前養生期間が短い場合は、多くの微細ひび割れが発生し、その後の初期乾燥によりひび割れが増大して凍結融解に対する抵抗性を低下させることが明らかになっている。また、蒸気養生後の降温速度が大きい場合に強度の低下がみられる等、蒸気養生の条件によっては、強度や物質透過に対する抵抗性等を低下させる可能性があるとしている。

付録-6 に示す実験で生じた微細ひび割れは、紙やすりで削って見えなくなる程度のひび割れであり、ごく表層部のみで発生したひび割れであれば、物質透過に対する抵抗性等に影響を与えないと考えられる。ひび割れの発生要因に関しては、養生や乾燥の条件が主な要因と考えられるため、ひび割れが顕著な場合には所定の作業手順や蒸気養生条件等の製作要領が守られて製造されていたか等を調査する必要がある。

色むらについては、高炉スラグ微粉末を使用した場合、脱型後に表面が青藍色を呈し(写真-I.4.1(a))、時間の経過とともにまだら状に白色(写真-I.4.1(b))に変化することが知られている。この青藍色の呈色は、発色が顕著であるほどコンクリートの強度や物質透過に対する抵抗性等としては高い状態にあり、PCaPC 部材の耐久性に悪影響を及ぼすものではないとされている⁵⁾。

表面気泡や砂すじについては、既往の研究では変状の程度によっては凍結融解に対する抵抗性が損なわれる可能性が指摘されている。ただし、その程度がコンクリートの劣化に与える影響についての定量的な評価は難しいため、表面気泡や砂すじが発生した場合には適切な補修を行うことが望ましい。

表面気泡や砂すじは、締固め方法や型枠の構造等の施工上の原因により発生することが多く、これらの変状が発生した場合には施工方法の改善により変状を軽減する対策を検討する必要がある。



(a) 材齢 2 日の供試体表面
左: 早強ポルトランドセメント単味
右: 高炉スラグ微粉末



(b) 材齢 30 日の供試体表面(高炉スラグ微粉末)

写真-I.4.1 コンクリート表面の色調

4.7.2 電気抵抗率を用いた PCaPC 部材の品質管理

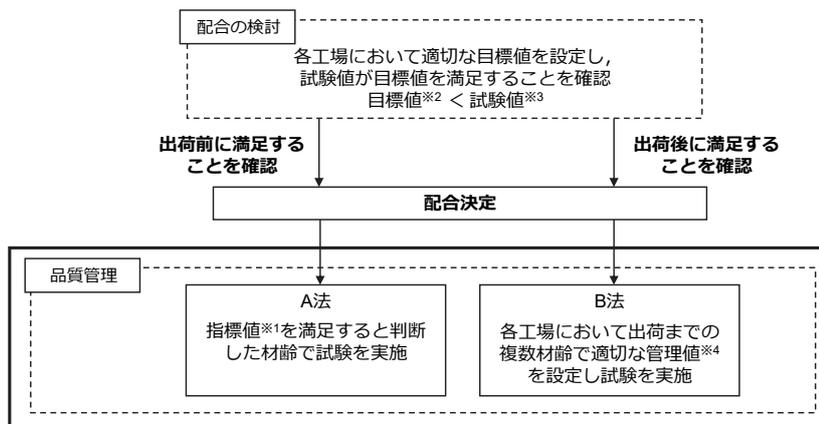
塩化物イオン浸透に対する高い抵抗性を有する PCaPC 部材を製造する際には、同時に製作した供試体の電気抵抗率を測定して品質管理を行うとよい。

【解説】

製品と同様の方法で製作した供試体の電気抵抗率を測定することで、出荷前の段階で塩化物イオン浸透に対する高い抵抗性を有することを確認することが可能であり、PCaPC 部材の塩化物イオン浸透に対する抵抗性の信頼性を向上させることが可能となるので、このマニュアル(案)ではその方法を提案した。

図-I.4.2に電気抵抗率を指標とした PCaPC 部材(製品)の出荷前の品質管理フローの一例を示す。製品出荷前の検査では、配合の検討時に、出荷前に電気抵抗率の目標値を満足する場合と、出荷後に目標値を満足する場合で管理方法が異なり、単一材齢管理法(A法)と複数材齢管理法(B法)の2種類が考えられる。

製品出荷時における電気抵抗率を用いた具体的な品質管理方法は、第II部3章に示す。



※1 指標値：表-I.3.1を参考に、製品に要求される性能から適切に設定される値
 ※2 目標値：指標値に適切にばらつきを考慮した電気抵抗率の値
 ※3 試験値：第II部4章に示す方法で製作した3個のコンクリート供試体を第II部4章に示す方法で測定することで得られる電気抵抗率の平均値
 ※4 管理値：確認試験時の試験値などを参考に各工場で設定される、出荷前の複数材齢における満足すべき電気抵抗率の値

図-I.4.2 電気抵抗率を指標とした PCaPC 部材の品質管理フローの例

参考文献

- 1) 小田部貴憲, 櫻庭浩樹, 俵道和, 古賀裕久:種々の使用材料や配合が異なるコンクリートを用いた電気抵抗率試験の適用性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.65-70, 2020.
- 2) 村田哲, 上野敦, 大野健太郎, 宇治公隆:極初期の組織形成が温度履歴養生後のモルタルの特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 481-486, 2015.
- 3) 土木学会:プレキャストコンクリートを用いた構造物の構造計画・設計・製造・施工・維持管理指針(案), コンクリートライブラリー158, 2021.
- 4) 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 2016, 2016.
- 5) 日本建築学会:高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説, 2017.

第II部

PCaPC 部材の塩化物イオン浸透に対する抵抗性の評価と品質管理

1 章 総則

1.1 総則

混和材を活用した PCaPC 部材は塩化物イオン浸透に対して高い抵抗性を有するが、その抵抗性の程度を定量的に評価して配合を選定したり、製造した PCaPC 部材の抵抗性を品質管理で確認したりする方法は確立されていない。

塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価する手法は複数存在するが、結果が得られるまでに長期間を要するものは、配合の検討や品質管理の手法として用いることが現実的ではない。電気抵抗率試験は、比較的短期間で結果を得ることが可能であり、試験により得られる電気抵抗率と浸せき試験による見掛けの拡散係数及び非定常電気泳動試験より得られる塩化物イオン拡散係数の関係(付録-3 参照)から塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価することが可能である。そこで、このマニュアル(案)では、電気抵抗率を活用した配合の検討方法及び製品出荷時の品質管理方法を提案した。

第Ⅱ部は、第Ⅰ部 4.3.2 電気抵抗率を用いた配合の検討方法及び第Ⅰ部 4.7.2 電気抵抗率を用いた PCaPC 部材の品質管理の具体的な方法を示すものである。なお、ここで示す各方法は第Ⅰ部に示す事項に留意して製造されたコンクリートに対して用いることを前提としている。

2 章では、第Ⅰ部 4.3.2 電気抵抗率を用いた配合の検討方法の具体的な方法及び具体的な例を示した。

3 章では、第Ⅰ部 4.7.2 電気抵抗率を用いた PCaPC 部材の品質管理の具体的な方法及び具体的な例を示した。

4 章では、配合の検討及び品質管理で実施する電気抵抗率試験の具体的な方法及びその留意点を示した。

5 章では、非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数試験の具体的な方法及びその留意点を示した。電気抵抗率を用いた塩化物イオン浸透に対する抵抗性の評価方法は、主として非定常電気泳動試験、浸せき試験及び暴露試験により得られる塩化物イオン拡散係数と電気抵抗率の関係に基づくものである。このマニュアル(案)に示す数値の妥当性の検証や工場ごとに根拠となるデータを得る場合には、非定常電気泳動法を適切に実施するとよい。

2 章 電気抵抗率を用いた PCaPC 部材用コンクリートの配合の検討

2.1 概要

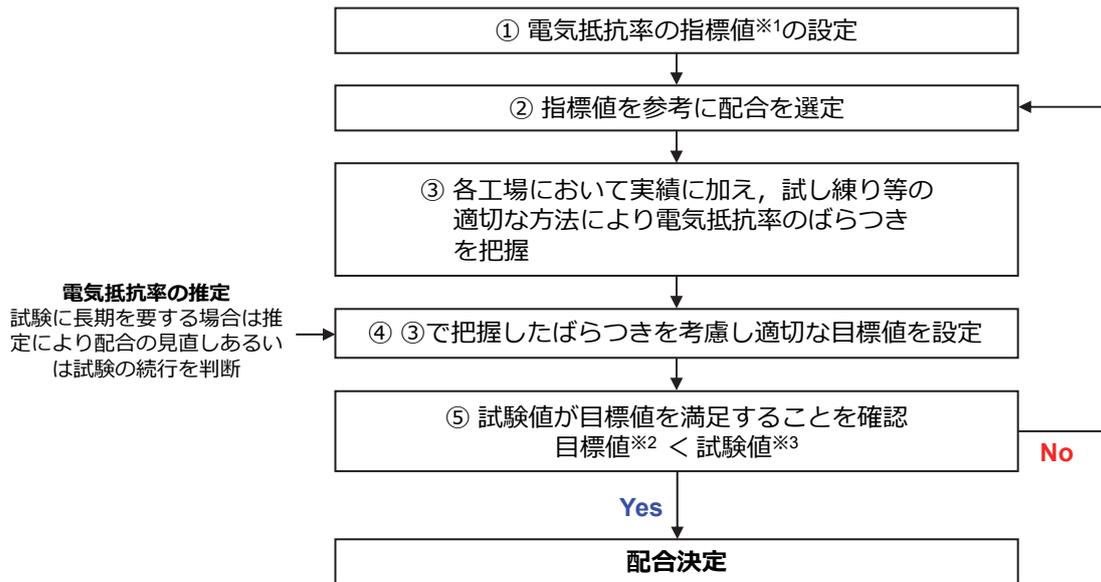
配合の検討時にコンクリートの電気抵抗率を測定して、PCaPC 部材に用いるコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価する方法を以下に示す(図－Ⅱ.2.1)。

- ① PCaPC 部材(製品)に求める塩化物イオン浸透に対する抵抗性から、表－Ⅱ.2.1 を参考に、電気抵抗率の指標値を選定する。
- ② ①で選定した指標値を満足する配合を選定する。その際、全国各地のPCaPC 工場及び室内試験で得られた混和材の種類及び水結合材比と電気抵抗率のデータ(表－Ⅱ.2.2)を参考にするとよい。なお、フライアッシュを混和したコンクリートは、他の配合に比べ塩化物イオン浸透に対する抵抗性の発現に長期間を要するため(付録－3 参照)、材齢 28 日以前の電気抵抗率を用いた配合検討及び品質管理を適用することは困難であることに留意する。
- ③ 工場ごとの実績に加えて、あらかじめ試し練りを実施する等、適切な方法により電気抵抗率のばらつきを把握する。電気抵抗率はコンクリートを製造する工場ごとの材料や配合等によって大きく異なり、また、同一工場で同一配合のコンクリートであっても、複数の打設日で製造されたコンクリートの試験結果にばらつきが生じる(第Ⅱ部 4 章参照)。
- ④ 電気抵抗率の目標値を、③で確認した電気抵抗率のばらつきを考慮して設定する。なお、その方法の例を 2.2 節に示す。
- ⑤ 製品と同一条件(蒸気養生等)でコンクリート供試体を製作し、電気抵抗率試験を実施して、試験値が目標値を上回ることを確認する。電気抵抗率を測定する材齢は、部材の出荷時期等の条件を考慮して適切に定める。ただし、電気抵抗率の試験値は品質管理にも用いられるため、複数の材齢で測定して材齢による電気抵抗率の変化を確認しておくとうい。ここで、電気抵抗率の試験値とは、同時に製作したコンクリート供試体 3 個の測定結果の平均値である。

表－Ⅱ.2.1 塩化物イオン浸透に対する抵抗性の分類

区分	非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	電気抵抗率 ρt (Ωm)	各区分に対応する結合材の例 (水結合材比: 32~40%)	各区分に対応するコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性の特徴
区分1	4 <	< 100	早強ポルトランドセメント単味	塩害の影響度合いが最も厳しい環境では、かぶりのみでは防食できず、塗装鉄筋等を併用
区分2	2 ~ 4	100 ~ 200	早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末4000(置換率30%)	塩害の影響度合いが最も厳しい環境でも、100年間で、かぶり70mm位置の塩化物イオン濃度が腐食限界値に達しない
区分3	< 2	200 <	早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末6000(置換率50%) 早強ポルトランドセメント + フライアッシュⅡ種(置換率20%)	塩化物イオンの浸透が停滞するため塩害の影響を受けない

※第Ⅰ部3章表－Ⅰ.3.1を再掲



※1 指標値：表－Ⅱ.2.1を参考に、製品に要求される性能から適切に設定される値
 ※2 目標値：指標値に適切にばらつきを考慮した電気抵抗率の値
 ※3 試験値：第Ⅱ部4章に示す方法で製作した3個のコンクリート供試体を第Ⅱ部4章に示す方法で測定することで得られる電気抵抗率の平均値

図－Ⅱ.2.1 電気抵抗率を活用した配合の検討フロー

表－Ⅱ.2.2 各種混和材を用いたコンクリートの配合と電気抵抗率の例

工場名	水結合材比 (%)	s/a (%)	Air (%)	W (kg/m ³)	結合材の構成割合(質量%)				養生条件	圧縮強度 (N/mm ²)		
					B=HPC+SG4+SG6+FA2					電気抵抗率(Ωm)		
					HPC	SG4	SG6	FA2		材齢28日	材齢28日	材齢91日
工場(A)	35.0	40.0	3.0	153	100	—	—	—	蒸気養生	75.8	87.1	101.5
工場(B)	35.4	38.8	4.5	157	100	—	—	—		82.8	—	89.9
工場(D)	36.0	44.5	4.5	150	100	—	—	—		66.6	82.3	91.9
工場(E)	33.5	43.8	4.5	152	100	—	—	—		70.3	115.7	129.6
工場(F)	33.5	43.8	4.5	152	100	—	—	—		69.5	—	119.2
工場(G)	36.0	40.9	4.5	148	100	—	—	—		58.5	90.7	96.8
工場(H)	36.0	44.4	4.5	163	100	—	—	—		58.7	—	73.4
工場(I)	36.0	42.0	4.5	155	100	—	—	—		62.8	—	89.3
工場(J)	37.4	41.0	4.5	157	100	—	—	—		58.0	77.9	81.6
工場(K)	36.0	42.0	4.5	151	100	—	—	—		56.5	—	55.8
工場(L)	39.5	—	4.5	150	100	—	—	—		57.9	61.3	73.0
室内試験	36.0	43.8	4.5	165	100	—	—	—		62.6	67.2	81.3
工場(L)	34.5	—	4.5	158	70	30	—	—		73.5	141.9	197.5
室内試験	33.0	42.2	4.5	165	70	30	—	—		64.7	87.3	117.0
工場(A)	33.0	39.0	4.5	145	50	—	50	—		66.4	213.2	257.5
工場(B)	33.4	43.0	4.5	150	50	—	50	—		65.8	—	240.4
工場(D)	36.0	42.0	4.5	150	50	—	50	—		67.4	353.2	395.1
工場(E)	33.0	43.8	4.5	150	50	—	50	—		73.5	339.3	423.5
工場(F)	32.0	47.5	5.5	160	50	—	50	—		67.6	—	422.6
工場(G)	35.8	41.3	4.5	146	50	—	50	—		65.7	169.9	240.9
工場(H)	34.0	38.9	4.5	162	50	—	50	—	70.8	—	206.9	
工場(I)	33.3	39.5	4.5	150	50	—	50	—	68.9	—	323.2	
工場(J)	33.0	45.0	4.5	160	50	—	50	—	69.8	207.1	261.7	
室内試験	33.0	42.0	3.8	165	50	—	50	—	70.5	241.2	319.1	
工場(K)	33.0	41.4	4.5	151	85	—	—	15	55.9	—	121.1	
室内試験	33.0	41.4	4.5	165	80	—	—	20	62.4	67.1	156.0	

2.2 電気抵抗率の目標値設定の例

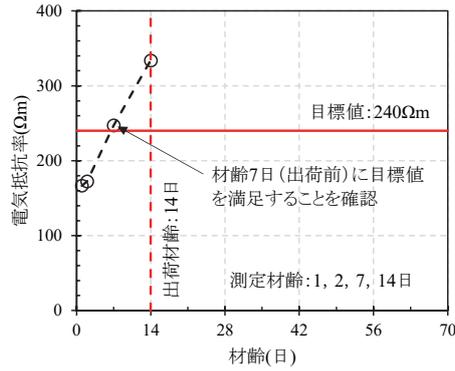
電気抵抗率の試験値は正規分布に従うことが確認されており、これまでの実験結果からその変動係数は 10%程度と考えられる(第Ⅱ部 4 章参照)ことから、ここでは、指標値を下回る確率が 5%以下の条件で、そのばらつきを考慮して目標値を設定する例を示す。なお、目標値の設定方法については、各工場の品質管理の考え方によるべきものであり、必ずしも本方法による必要はない。

例 1 出荷前に目標値に到達する例

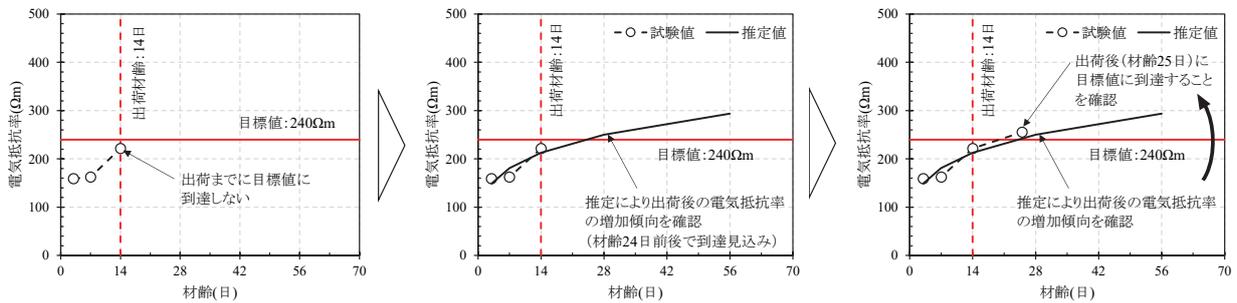
電気抵抗率の試験値が指標値を下回る確率が所定の確率以下となるようにするためには、試験値のばらつきの程度に応じて、指標値を適切に割り増した値を電気抵抗率の目標値として設定する必要がある。本事例では、電気抵抗率のばらつきの指標を変動係数とし、第Ⅱ部 4 章に示す複数の打設日で製作したコンクリート供試体の試験結果を参考に、電気抵抗率の変動係数を 10%と仮定し、指標値に標準偏差の 2 倍を加えて目標値とした。確認試験では、出荷までの複数の材齢において電気抵抗率を測定し、電気抵抗率の試験値が出荷前に安定して目標値に到達することを確認する。指標値を $200\Omega\text{m}$ 、出荷を材齢 14 日とした場合に出荷前に目標値に到達することが確認された例を図一Ⅱ.2.2 に示す。なお、出荷前に目標値に到達すると見込まれる場合も、今後の品質管理等への利用を考え、出荷後も含む複数の材齢で電気抵抗率を測定しておくことが望ましい。

例 2 出荷後に目標値に到達する例

製品の出荷までに目標値に到達しない場合の配合の検討の例を図一Ⅱ.2.3 に示す。混和材を活用した PCaPC 部材は長期的に塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上が見込まれるため、製品の出荷までに電気抵抗率の試験値が目標値に到達しないことを確認した場合、2.3 節を参考に、材齢経過に伴う電気抵抗率の増加を推定し、出荷後の電気抵抗率で評価することも考えられる。図一Ⅱ.2.3 に、製品の出荷までの材齢 3, 7, 14 日で得られた電気抵抗率の試験値から推定を行った結果、出荷後に電気抵抗率の増加が見込めるため、電気抵抗率試験を続行し、出荷後の材齢で目標値に到達することを確認した例を示す。



図－II.2.2 例1: 出荷までに目標値に到達する例



図－II.2.3 例2: 出荷後に目標値に到達する例

2.3 材齢経過に伴う電気抵抗率変化の推定方法

2.3.1 推定方法

材齢経過に伴う塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} の変化は、式(2.1)で表すことができると推定される³⁾。

$$D_t = D_n \left(\frac{n}{t} \right)^m \quad (2.1)$$

ここに、 D_t : 任意材齢の D_{nssm} (m^2/s), D_n : 基準となる材齢の D_{nssm} (m^2/s), n : 基準となる材齢 (day), t : 任意材齢 (day), m : 材齢経過に伴う塩化物イオン浸透抵抗性の向上を示すパラメータである。

塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率の関係は、反比例の関係にあることが確認されているため、式(2.2)で表すことができる。

$$D_t = \frac{A}{\rho_t} \quad (2.2)$$

ここに、 A : 試験結果から得られる定数 ($\Omega m^3/s$), ρ_t : 任意材齢の電気抵抗率 (Ωm) である。

式(2.2)に式(2.1)を代入して ρ_t について整理すると、

$$\rho_t = B t^m \quad (2.3)$$

ここで定数部分を、

$$B = \frac{A}{D_n \cdot n^m} \quad (2.4)$$

とおいている。

実測により得られた電気抵抗率と材齢の関係に対して式(2.3)を最小二乗法によりフィッティングすることで、材齢経過に伴う電気抵抗率の変化をある程度の精度で推定することができる。図-Ⅱ.2.4 に材齢 3, 7, 14 日に測定した電気抵抗率から材齢 91 日の電気抵抗率を推定した例を示す。なお、パラメータ B の値が大きいほど材齢初期段階の電気抵抗率が大きいこと、パラメータ m が大きいほど長期的な電気抵抗率の発現が大きいことを意味する。

2.3.2 推定精度

図-2.5 に電気抵抗率を推定する際に用いるデータの測定材齢及びデータ点数に着目した、推定値と実測値の関係を示す。ここで、凡例の H は早強ポルトランドセメント単味のコンクリート、H+SG6 は早強ポルトランドセメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換したコンクリート、H+SG4 は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である。材齢 1 日の試験値を含むデータから得られる推定値及び 2 点で推定を行った場合の推定値は、試験値との差が $\pm 20\%$ の範囲を大きく外れることが確認されている。一方で、材齢 3, 7, 14 日の 3 点もしくは材齢 3, 7, 14, 28 日の 4 点のデータから推定した場合には、極めて電気抵抗率が大きい場合を除き、推定誤差は概ね $\pm 20\%$ 以内となることが確認されている。この結果から、電気抵抗率の材齢経過に伴う増加を推定する場合には、少なくとも表-Ⅱ.2.3 に示す条件で測定することが望ましいと考えられる。

2.4 電気抵抗率試験の留意点

電気抵抗率試験は、迅速に試験が可能であるが、試験結果は供試体の含水率や供試体温度等の影響を受けるため、試験における留意点(表-Ⅱ.2.4)を十分に把握したうえで実施する。なお、電気抵抗率試験の詳細な方法及び留意点を第Ⅱ部 4 章及び付録-3 3.2.8 節に示しているため参考とするとよい。

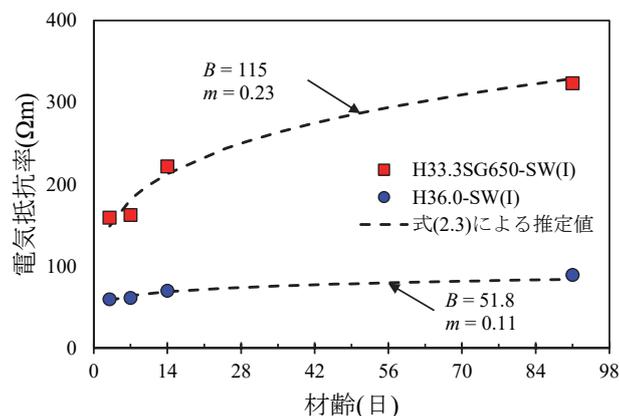
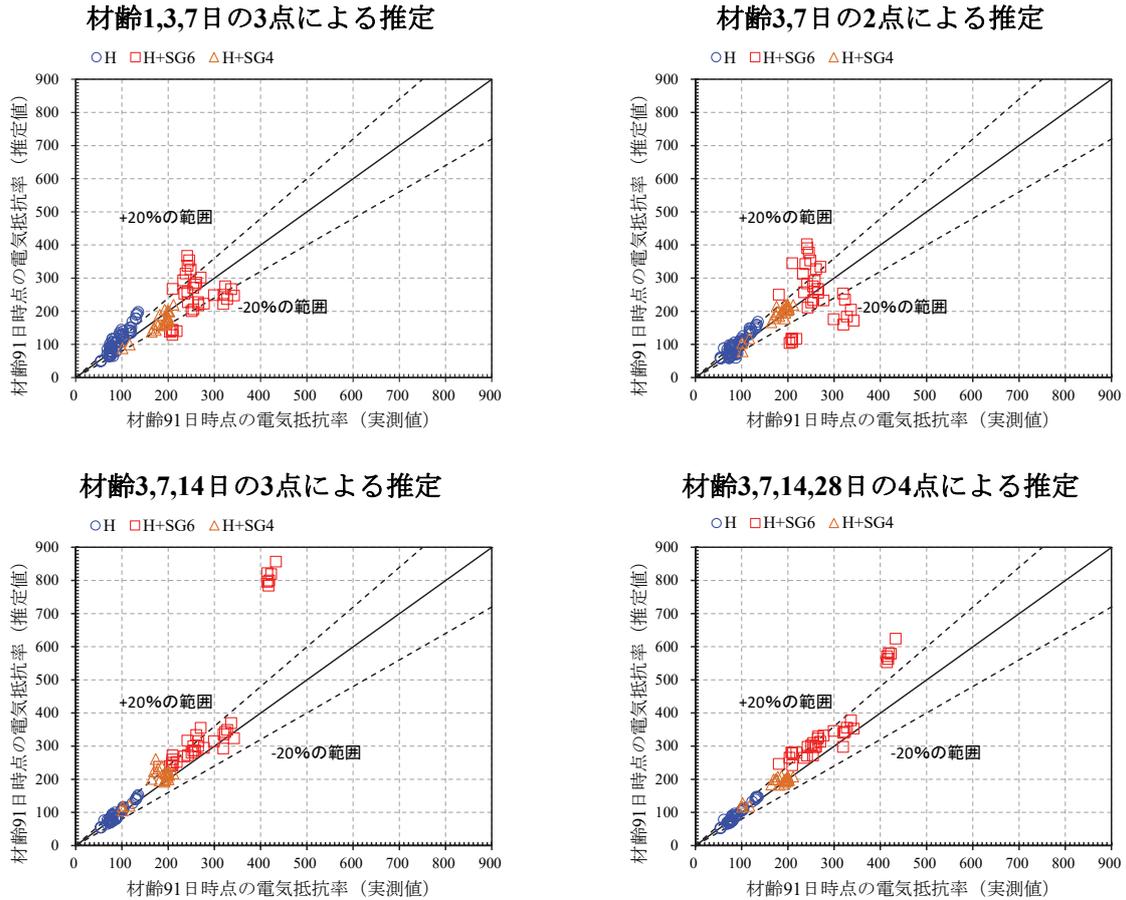


図-Ⅱ.2.4 式(2.3)による推定の例



図－Ⅱ.2.5 データ数，測定材齢と電気抵抗率の推定精度の関係

表－Ⅱ.2.3 電気抵抗率の測定条件

測定材齢の範囲	測定間隔	データ数
3～28日	4～7日	3点以上(3材齢分以上)

表－Ⅱ.2.4 電気抵抗率試験における留意点

留意点	概要
含水率	気中養生を行ったコンクリートの電気抵抗率は、水中養生を行ったものに比べて見掛け上大きくなり、PCaPC部材(製品)の塩化物イオン浸透抵抗性を危険側に評価する恐れがある。このため、このマニュアル(案)では電気抵抗率試験に用いる供試体は水中養生を標準とする。なお、高炉スラグ微粉末などを使用して物質透過に対する抵抗性を高めたコンクリートで蒸気養生の終了から2日程度まで湿潤養生した場合には、非定常電気泳動試験(第Ⅱ部5章)を行って確認した結果、その後の気中養生によって塩化物イオン浸透に対する抵抗性に顕著な変化は無いことを確認している。
養生水温	電気抵抗率の測定結果は温度に依存することが確認されており、供試体表面温度が高くなるほど電気抵抗率の測定値は小さくなる。このため、養生水温は $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ を標準とする。この温度範囲から外れる場合には第Ⅱ部4章を参考に電気抵抗率を補正する必要がある。
測定方法	測定方法は、互いに直交する4方向から行うことを標準とする。この測定方法とした場合の電気抵抗率のばらつきに関して検討した結果を第Ⅱ部4章に示しているため、参考とするとい。

3章 電気抵抗率を用いた PCaPC 部材用コンクリートの品質管理

3.1 概要

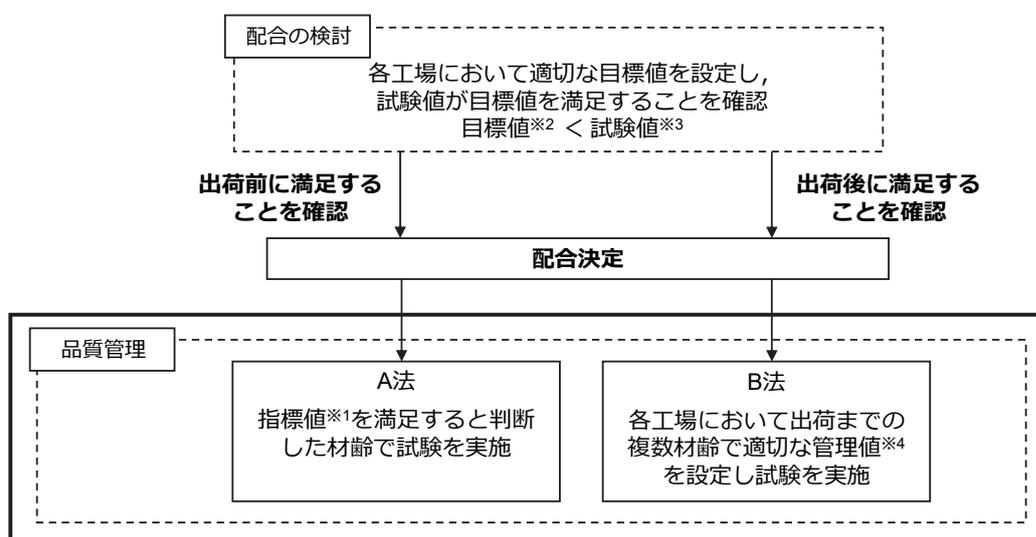
図－Ⅱ.3.1 に電気抵抗率を指標とした PCaPC 部材(製品)の出荷前の品質管理フローを示す。2.電気抵抗率を用いた PCaPC 部材用コンクリートの配合の検討に示す配合の検討時に、出荷前に目標値を満足することが期待される場合と、出荷後に目標値を満足することが期待される場合が考えられ、単一材齢管理法(A法)と複数材齢管理法(B法)として提案した。

単一材齢管理法(A法)について

出荷までに目標値を満足することが期待された場合の方法を単一材齢管理法(A法)とする。A法による品質管理では、配合の検討時に選定した指標値に到達すると判断した材齢において電気抵抗率試験を実施し、試験値が指標値を満足することを確認する。

複数材齢管理法(B法)について

出荷後に目標値を満足することが期待される場合の方法を複数材齢管理法(B法)とする。B法による品質管理では、確認試験時に得られた電気抵抗率の試験値等を参考に、出荷前の複数の材齢における管理値を適切に設定し、電気抵抗率の試験値が複数の材齢において管理値を満足することを確認する。



※1 指標値：表－Ⅱ.2.1を参考に、製品に要求される性能から適切に設定される値

※2 目標値：指標値に適切にばらつきを考慮した電気抵抗率の値

※3 試験値：第Ⅱ部4章に示す方法で製作した3個のコンクリート供試体を第Ⅱ部4章に示す方法で測定することで得られる電気抵抗率の平均値

※4 管理値：確認試験時の試験値などを参考に各工場で設定される、出荷前の複数材齢における満足すべき電気抵抗率の値

図－Ⅱ.3.1 電気抵抗率を指標とした PCaPC 部材の品質管理フローの一例

3.2 電気抵抗率を用いた品質管理の具体例

ここでは、第Ⅱ部 2章電気抵抗率を用いた PCaPC 部材用コンクリートの配合の検討において決定した配合のコンクリートに対する製品出荷前の品質管理の具体的な方法を示す。

単一管理材齢法(A法)

配合の検討において、出荷材齢までに電気抵抗率が目標値を満足した場合の品質管理方法を示す。この例では、材齢 7 日で電気抵抗率の目標値に到達することを確認したことから、品質管理における塩化物イオン浸透に対する抵抗性の管理材齢は 7 日と設定した。製品と同一条件で製作した 3 個のコンクリート供試体を用いて電気抵抗率を測定し、設定した管理材齢において、試験値が指標値を満足することを確認する(図-Ⅱ.3.2)。なお、この管理材齢で指標値を満足できなかった場合も、出荷後、部材が所定の性能を有する状態に置かれるまでの適切な材齢で指標値を満足できれば十分な塩化物イオン浸透に対する抵抗性を有すると判断できるため、出荷後に、同一の供試体を用いた再測定を検討するとよい。

複数材齢管理法(B法)

配合の検討において、出荷後に電気抵抗率が目標値を満足した場合の品質管理方法を示す。この例では、測定した複数材齢(材齢 3, 7, 14 日)の電気抵抗率の試験値と変動係数を用いて、複数材齢における管理値を設定する。品質管理における塩化物イオン浸透に対する抵抗性の管理材齢は 3, 7, 14 日と設定した。製品と同一条件で製作した 3 個のコンクリート供試体を用いて電気抵抗率を測定し、設定した全ての管理材齢において試験値が管理値を満足することを確認する(図-Ⅱ.3.3)。

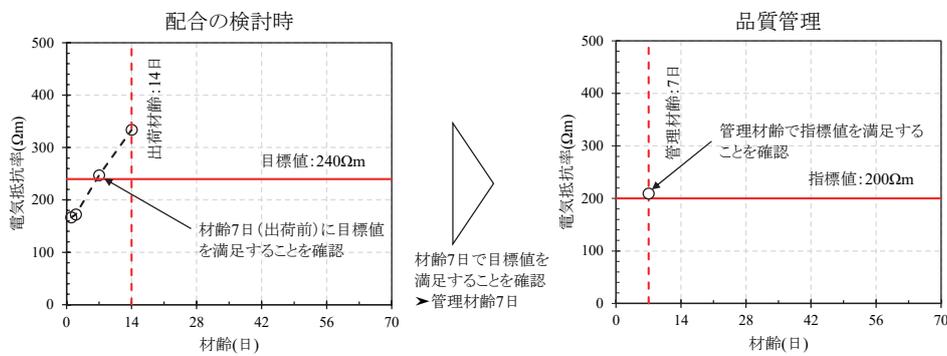


図-Ⅱ.3.2 単一材齢管理法(A法)

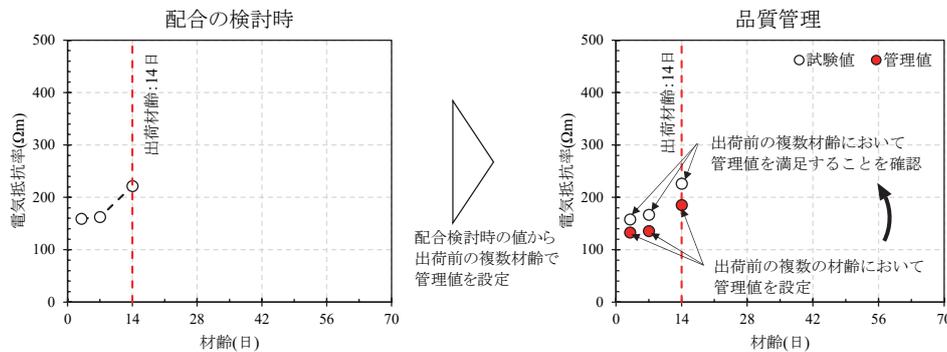


図-Ⅱ.3.3 複数材齢管理法(B法)

4 章 電気抵抗率試験の方法

4.1 適用範囲

この「電気抵抗率試験の方法」は、PCaPC 部材(製品)の塩化物イオン浸透に対する抵抗性の評価に用いる電気抵抗率を求めるための試験方法について規定する。

4.2 試験方法の概要

図－Ⅱ.4.1 に示すような、形状が棒状で、等間隔に配置された 2 つの電流電極及び電位差電極を用いて、コンクリートに交流電流を流した際に生じる電位差を測定することで得られる電気抵抗と、電位差電極と電流電極の間隔と供試体の形状、寸法から定まるセル定数から、コンクリートの電気抵抗率を求める。

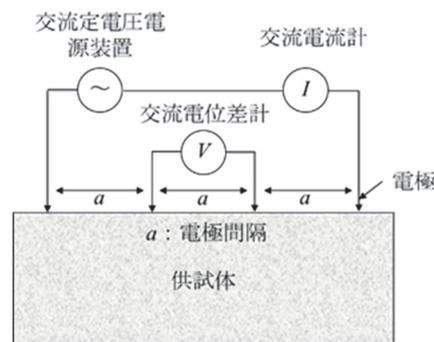
4.3 引用規準

次に示す規準は、この試験方法に引用されることによって、この試験方法の規定の一部を構成する。この規準は、その最新版を適用する。

JSCE-G 581 四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法(案), 2018 年制定コンクリート標準示方書[規準編] 土木学会規準および関連規準, 土木学会, pp.437-447, 2018.

4.4 測定装置

電気抵抗率の試験に用いる測定装置は、JSCE-G 581 G- 2018 B 法¹⁾などの既存の電気抵抗率試験の試験規準に適合するものを用いることとする。なお、電極間隔は骨材の最大寸法よりも狭くなくてはならない。



図－Ⅱ.4.1 電気抵抗率の測定の概要

4.5 供試体

4.5.1 供試体の寸法

試験に使用する供試体の寸法、形状は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体とする。

4.5.2 供試体の製作

試験に使用する供試体は評価しようとする PCaPC 部材(製品)の製造方法を考慮して適切な方法で実際の施工方法に合わせて製作する。蒸気養生を行う場合は、製品と同等の温度履歴を受けるように、製品の近傍に供試体を配置して行う。

4.5.3 供試体の脱型と養生

供試体の脱型は、乾燥の影響を受けないように、評価しようとする PCaPC 部材(製品)の製造方法を考慮して実際の施工方法に合わせて適切に養生後、脱型を行う必要がある。脱型後の供試体の養生は、供試体中の含水状態が均一となるように $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の水中で養生することを標準とする。この際、絶えず新鮮な水で洗われるような状態にしてはならない。絶えず新鮮な水で洗われる状態では、水和物が溶脱して空隙構造が疎になったり、細孔溶液中のイオンが溶出して細孔溶液の導電率が変化するため、コンクリートの電気抵抗率が変化したりする恐れがある。

4.6 電気抵抗率の測定方法

4.6.1 供試体の準備

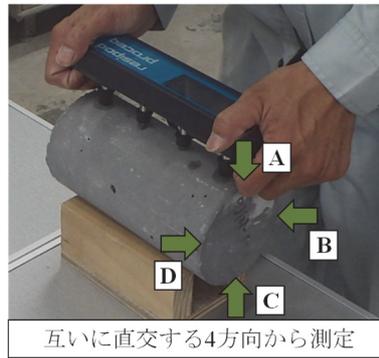
試験に用いる供試体は、電気抵抗率の測定直前に水中から取り出したのちに、供試体表面に浮き水がないように清潔なウェス等で表面水を除去する。

4.6.2 供試体温度の測定

電気抵抗率の測定時に供試体表面温度が $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ であることを確認する。やむを得ずこの温度範囲外となる場合は、解説に示す方法で個別に補正方法を決定しておけば、 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ での電気抵抗率の測定値に換算することも可能である。

4.6.3 供試体質量の測定

水中養生が確実に実施されていることを確認するため、脱型直後及び電気抵抗率の測定時に供試体の質量を測定する。



図－Ⅱ.4.2 測定方法

表－Ⅱ.4.1 有限要素法を用いて算出したセル定数(m⁻¹)¹⁾

供試体の形状と寸法		四電極法B法の電位差電極と電流電極の間隔							
形状	寸法	20mm	30mm	40mm	50mm	60mm	70mm	80mm	90mm
円柱	Φ50×100	15.9	18.7	-	-	-	-	-	-
円柱	Φ100×200	10	8.24	7.98	8.41	9.38	-	-	-
円柱	Φ150×300	9.04	6.69	5.73	5.36	5.31	5.47	5.78	6.25
角柱	40×40×160	16.5	20.4	25.8	31.7	-	-	-	-
角柱	100×100×400	8.67	6.79	6.38	6.58	7.08	7.76	8.54	9.39
角柱	150×150×530	8.2	5.78	4.79	4.37	4.25	4.25	4.48	4.72

4.6.4 電気抵抗率の測定

測定方法は、図－Ⅱ.4.2 に示すように、電流電極及び電位差電極を打設面、打設底面を除く側面に対して設置点が一つの直線上に乗るように、かつ、設置点を結ぶ直線が供試体の軸方向に対して平行になるように設置し、互いに直角をなす4方向から行うこととする。なお、本測定方法による試験値のばらつきについては、解説を参照されたい。また、測定した結果はΩmで表記する。

4.7 計算^{1),2),3)}

供試体等の有限体に電流を流す場合、電流分布が電極間隔や供試体の寸法に依存して歪んでしまうため、適切なセル定数を用いて真の電気抵抗率に換算する必要がある。したがって、JSCE-G-581-2018 B 法¹⁾に準拠し、表－Ⅱ.4.1 に示すセル定数を用いて供試体の形状、寸法と電極の配置を考慮した値に換算する。

一般に使用される測定機器では、半無限体のセル定数を仮定して電気抵抗率の測定値を表示する場合があるため、これを換算する場合を解説する。

セル定数は、式(4.1)で表される。

$$k = \frac{R}{\rho} \quad (4.1)$$

ここで、 k :セル定数、 R :電気抵抗、 ρ :電気抵抗率である。

まず、電気抵抗率の測定値 ρ' に、半無限体を仮定したセル定数(= $1/2\pi L$)を乗じて、電気抵抗を求める。

$$R = \rho' k = \frac{\rho'}{2\pi L} \quad (4.2)$$

ここで、 ρ' :半無限体のセル定数を仮定して求めた電気抵抗率の測定値, L :電極間隔である。

次に、式(4.2)を式(4.1)に代入すると、式(4.3)を得る。

$$\rho = \frac{\rho'}{k \cdot 2\pi L} = \rho' k' \quad (4.3)$$

ここで、 k' : 供試体の形状、寸法と電極の配置を考慮した電気抵抗率に換算するための補正係数

すなわち、測定により得られた電気抵抗率 ρ' に対して補正係数 k' を乗じることで、供試体の形状、寸法と電極の配置を考慮した電気抵抗率 ρ に換算する。

式(4.4)に電極間隔 L が 50mm で半無限体を仮定したセル定数を実装した測定機器を用いて、 $\phi 100 \times 200$ の供試体を測定する場合の、補正係数 k' の例を示す。

$$k' = \frac{1}{k \cdot 2\pi L} = \frac{1}{8.41(m^{-1}) \cdot 2\pi \cdot 0.05(m)} = 0.378 \quad (4.4)$$

4.8 報告

測定者は次の事項を報告する。図－Ⅱ.4.3 に報告書の様式例を示す。

- a. 打設日
- b. 測定日時
- c. 供試体の材料と配合
- d. 測定時の材齢
- e. 供試体製作時の養生条件
- f. 測定時の水中養生槽温度
- g. 電気抵抗率の補正に用いたセル定数
- h. 電気抵抗率の指標値
- i. 供試体の質量
- j. 供試体の表面温度
- k. 換算後の電気抵抗率

電気抵抗率測定結果報告書

打設日							
測定日時							
供試体の材料と配合							
測定時の材齢 (日)							
供試体製作時の養生条件							
測定時の水中養生槽温度 (°C)							
電気抵抗率の補正に用いたセル定数							
電気抵抗率の指標値 (Ωm)							
電気抵抗率測定結果							
	①		②		③		
供試体質量 (g)							
供試体表面温度 (°C)							
電気抵抗率 (Ωm)		換算前	換算後	換算前	換算後	換算前	換算後
	A						
	B						
	C						
	D						
	平均値						
3体の平均値							

図一Ⅱ.4.3 報告書の様式例

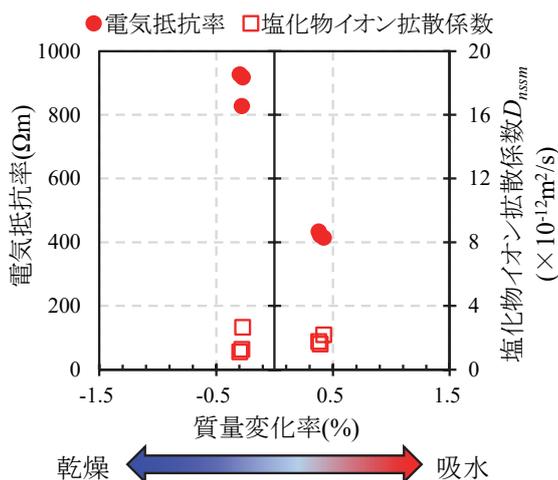
【解説】

4.5.3 項 供試体の養生方法について

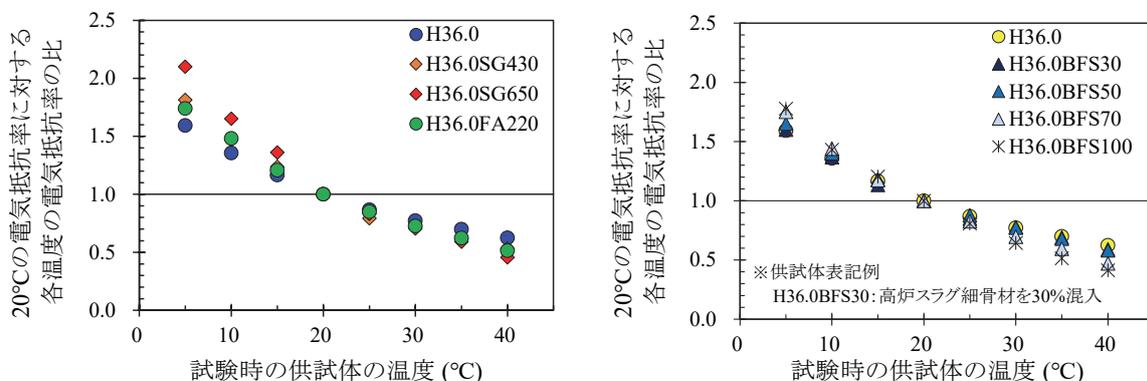
図一 II.4.4 に脱型後の質量変化率と電気抵抗率及び非定常電気泳動法から得られる塩化物イオン拡散係数の発現の関係を示す。供試体は、脱型後に材齢 3 日まで $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の水中で養生後に室温 20°C での試験室内で気中養生を行った。図中には、気中養生開始からの質量変化率を示している。一般に、電流はコンクリートの空隙水中のイオンを導電媒体として流れると考えられているため、含水率が低下し空隙水の連続性が低下すると、イオンの移動経路が制限され、見掛け上電気抵抗率が大きくなる。したがって、気中養生を行った供試体では塩化物イオン浸透抵抗性の評価結果が危険側となる恐れがある。なお、詳細は付録-3 3.2.8 項を参照されたい。

4.6.2 項 電気抵抗率の温度依存性について

図一 II.4.5 に示すように電気抵抗率は用いた材料によらず供試体の表面温度が高くなるほど小さくなる。なお、図中には供試体表面温度 20°C を基準とした各供試体表面温度の電気抵抗率の比を示している。これは、温度の上昇によりコンクリート中の導電媒体であるイオンの移動度が大きくなるためと考えられる⁴⁾。このため、温度の違いの影響を除去するために、試験時の供試体温度は $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ に調温する必要がある。供試体の調温が困難であり、この温度



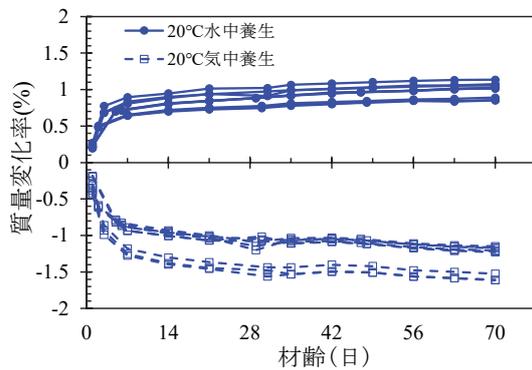
図一 II.4.4 質量変化率と電気抵抗率および塩化物イオン拡散係数の関係



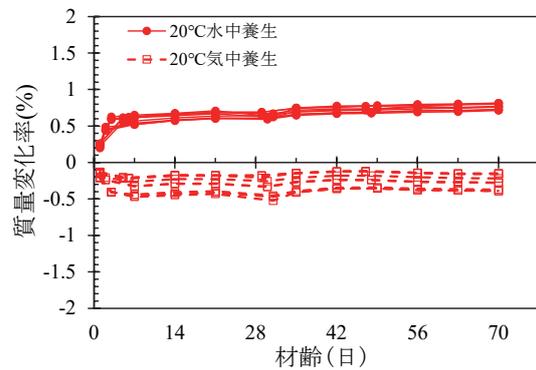
(a)混和材を用いた供試体

(b)高炉スラグ細骨材を用いた供試体

図一 II.4.5 供試体表面温度と電気抵抗率の関係



(a)早強ポルトランドセメント単味



(b)高炉スラグ微粉末 6000

図－II.4.6 材齢経過に伴う質量変化率の推移

範囲を外れる場合は配合ごとに式(4.5)に示すアレニウス則に基づく温度の補正が必要となる。

$$\rho_t = \rho_0 \cdot \exp \left[\frac{E_\rho}{R} \left(\frac{1}{T + 273.15} - \frac{1}{T_0 + 273.15} \right) \right] \quad (4.5)$$

ρ_t : 温度 T における電気抵抗率, ρ_0 : 標準温度 T_0 ($=20^\circ\text{C}$) における電気抵抗率, E_ρ : 電気抵抗率の温度依存性を示す係数, R : 気体定数 ($=8.31\text{J}/(\text{K}\cdot\text{mol})$), T : 測定時の温度, T_0 : 標準温度 ($=20^\circ\text{C}$)

アレニウス則に基づく補正を行う場合, 電気抵抗率の温度依存性を示す係数 E_ρ は結合材や細骨材の種類によって異なることに留意する。 E_ρ は実験により算出する必要がある。 混和材種類や細骨材種類ごとに供試体を製作し, 供試体表面温度を変化させた場合の電気抵抗率の値を記録し, 式(4.5)にフィッティングすることで E_ρ を求めることができる。 具体的な実験方法については文献²⁾を参考とするとよい。

既往の文献⁴⁾では, 早強ポルトランドセメント単味, 高炉スラグ微粉末を用いた配合では, 電気抵抗率が大きくなるほど係数 E_ρ は大きくなる傾向があると報告されているため, 参考とするとよい。

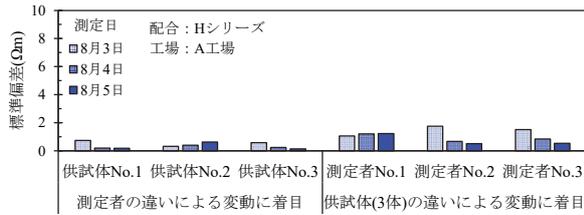
4.6.3 節 供試体の質量の測定について

図－II.4.6 に示すように, 水中養生を行った供試体は脱型直後に比べてコンクリートの吸水により質量が増加していることを確認する。 この測定により, 供試体に対して適切な養生が行われたことを示すことができる。

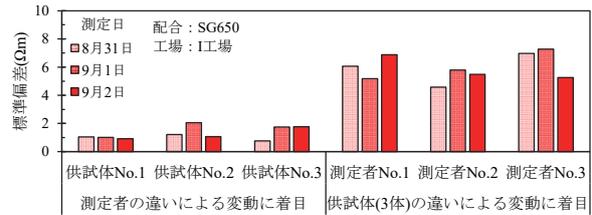
4.6.4 節 測定結果のばらつきについて

測定者, 測定機器の違いによる電気抵抗率のばらつきは, 供試体個別の品質のばらつきに比べ小さくなるため, 測定者及び測定機器によらず測定を実施することができる。

図－II.4.7 に同一の供試体を異なる測定者 3 名で測定した場合の電気抵抗率の標準偏差と, 同一の測定者が異なる供試体 3 体を測定した場合の標準偏差を示す。 図－II.4.8 に同一の供試体を異なる測定機器 3 台で測定した場合の電気抵抗率の標準偏差と, 同一の機器で異なる供試体 3 体を測定した場合の電気抵抗率の標準偏差を示す。 この結果, 同一の供試体を異なる測定者もしくは測定機器で測定した場合の標準偏差に比して, 同一の測定者もしくは

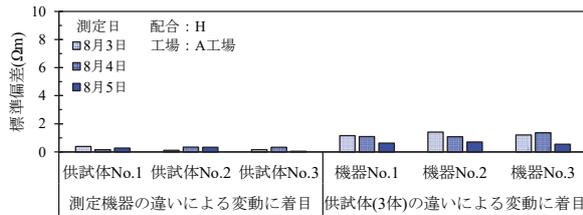


(a)早強ポルトランドセメント単味

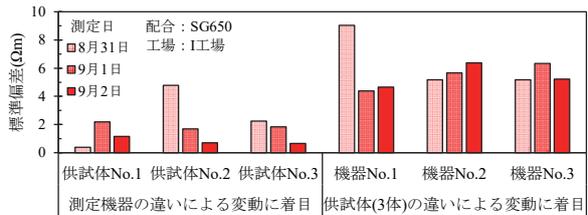


(b)高炉スラグ微粉末 6000

図一 II.4.7 測定者の違いによる電気抵抗率の変動



(a)早強ポルトランドセメント単味



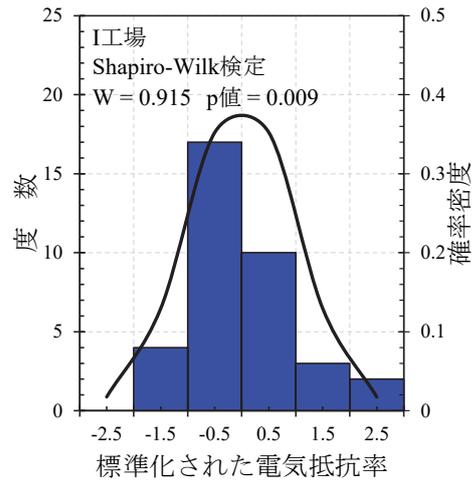
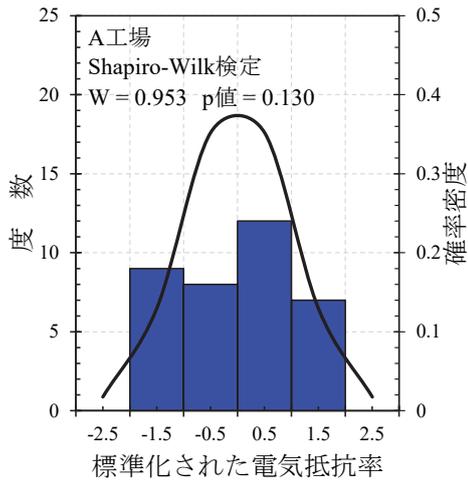
(b)高炉スラグ微粉末 6000

図一 II.4.8 測定機器の違いによる電気抵抗率の変動

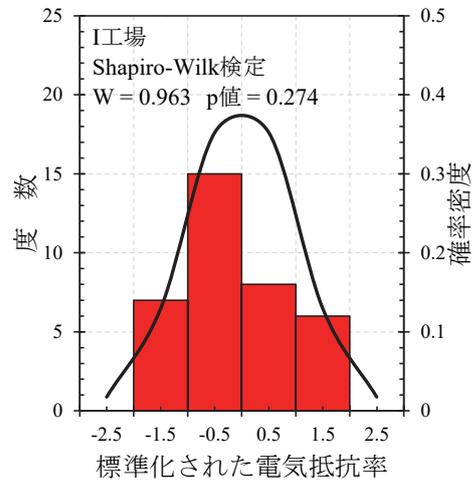
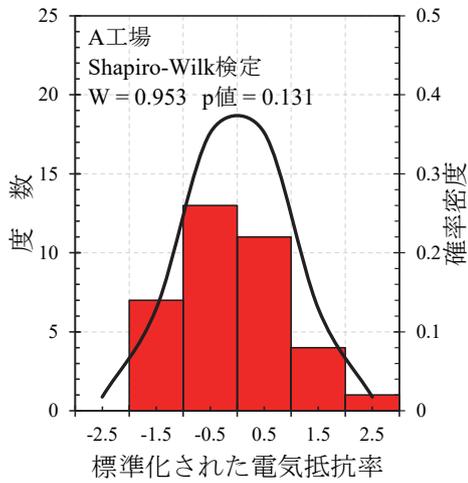
は同一の測定機器で測定した場合の標準偏差が大きくなることが確認された。したがって、電気抵抗率の変動は、測定時の測定機器の当て方や測定機器の違い等よりも、供試体内部の骨材及び空隙の分布等のコンクリートの品質のばらつきや製造過程の影響が支配的であると考えられる。

図一 II.4.9 に国内 2 工場(A, I 工場)において、複数の打設日(連続する 3 日間)で製作したコンクリート供試体の電気抵抗率(測定点ごと, 合計 36 点)の分布を示す。図中には、材齢 91 日の電気抵抗率の測定値を工場ごと, 配合ごとに標準化した値を示している。また, 同図には測定値が正規分布に従うと仮定した場合の正規分布曲線を併記した。正規性の確認のため, 標準化した電気抵抗率に対して Shapiro-Wilk 検定⁵⁾で検定を行った。図中に, Shapiro-Wilk 検定により算出される検定統計量 W と p 値を併記した。 p 値が 0.01 以上の場合, 99%信頼区間において正規分布であるといえる。この結果, 複数の打設日で製作されたコンクリートの電気抵抗率の測定結果は概ね正規分布に従うことを確認している。

図一 II.4.10 に材齢 7, 14, 28 日において測定した圧縮強度と電気抵抗率の測定結果と変動係数を示す。圧縮強度の変動係数は 1 回の試験値を供試体 3 体の平均値とした場合の 3 回(3 日間)の変動係数, 電気抵抗率の場合は 1 回の試験値を供試体 3 体(4 点/体×3 体=12 点)の平均値として 3 回(3 日間)の変動係数とした。養生条件は, 圧縮強度試験用の供試体が室温 20°Cの気中養生, 電気抵抗率試験用の供試体が 20°C水中養生としている。本報告書で示す配合の範囲内では早強ポルトランドセメント単味, 早強ポルトランドセメントの重量比 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換した配合のいずれにおいても, 圧縮強度, 電気抵抗率の変動係数は概ね同程度であり約 10%以内であることが確認されているため, 参考とするといふ。

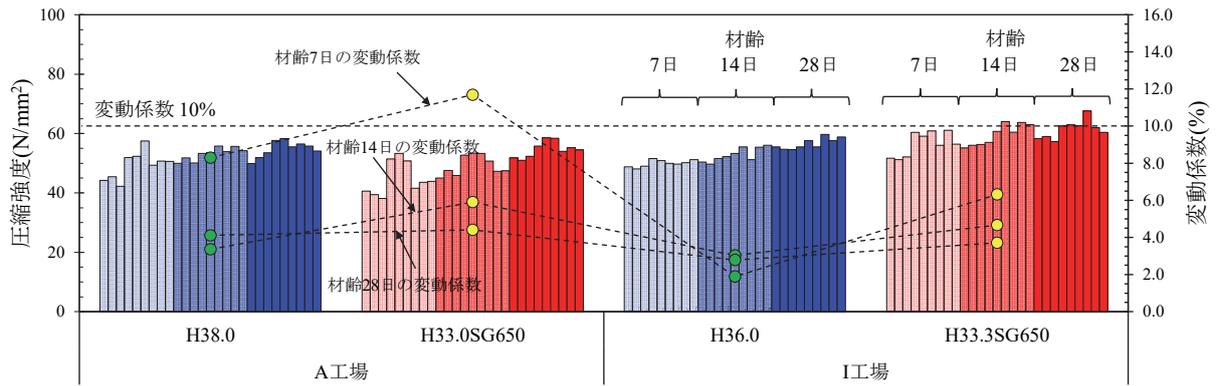


(a)早強ポルトランドセメント単味

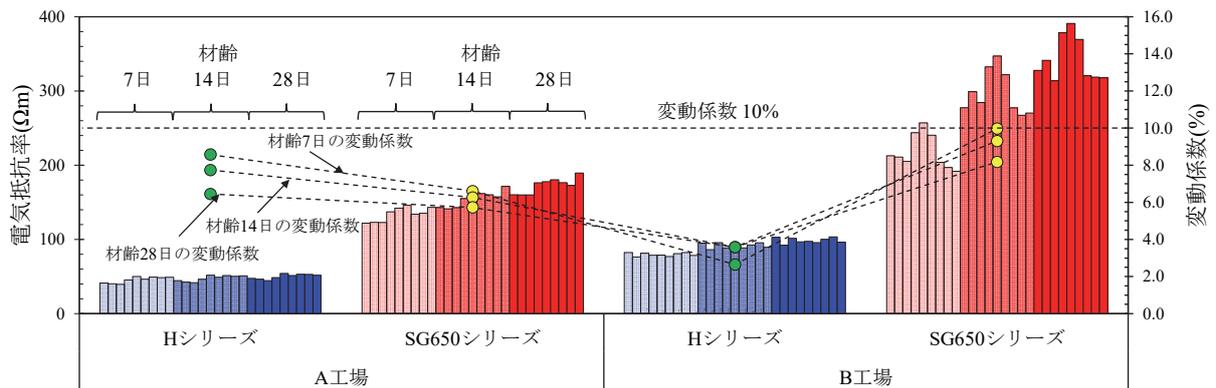


(b)高炉スラグ微粉末 6000

図一Ⅱ.4.9 電気抵抗率の測定値の分布



(a)圧縮強度の試験結果と変動係数



(b)電気抵抗率の試験結果と変動係数

図ーⅡ.4.10 圧縮強度と電気抵抗率の変動係数の関係

参考文献

- 1) JSCE-G 581 2018:四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法(案), 2018 年制定コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準, 土木学会, 2018.
- 2) コンクリート委員会・規準関連小委員会:[委員会報告]土木学会規準「四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法(案)(JSCE-G 581-2018)」の制定, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, pp.260-274, 2018.
- 3) 皆川浩, 駒井道哉, 藤田亮, 宮本慎太郎, 久田真:4 プローブ法をコンクリート供試体に適用した時のセル定数の数値解析による算定とその検証, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.17, pp.447-452, 2017.10.
- 4) 中村英佑, 水戸健介, 鈴木雅博, 古賀裕久:高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの電気抵抗率の温度依存性, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.215-220, 2019.
- 5) Shapiro, S. S. and Wilk, M. B.: An analysis of variance test for normality(complete samples), *Biometrika*, Vol.52, No.3 and 4, pp.591-611, Dec.1965.

5章 電気泳動(非定常法)によるコンクリートの塩化物イオンの 拡散係数試験方法(案)

5.1. 適用範囲

この「電気泳動(非定常法)によるコンクリートの塩化物イオンの拡散係数試験方法(案)」は、直流定電圧を用いた電気泳動法により、コンクリート中で非定常状態にある塩化物イオンの拡散係数を求めるための試験方法について規定する。ただし、鋼繊維などの導電性材料を混入したコンクリートは対象としない。

5.2. 試験方法の概要

コンクリート供試体に対して塩化物イオンを電気泳動させたのち、塩化物イオン浸透深さを測定し、この測定値を用いて塩化物イオンの拡散係数を算出する。

本試験方法で得られる塩化物イオンの拡散係数は、細孔溶液中で固定化現象の影響を受けながら電位勾配を駆動力として移動する塩化物イオンの移動のし易さ示すものであり、浸せき試験(JSCE-G 572¹⁾)により得られる見掛けの拡散係数及び電気泳動試験(JSCE-G 571²⁾)により得られる実効拡散係数とは物理的意味が異なることに留意する。以下、本試験で得られる塩化物イオンの拡散係数を塩化物イオン拡散係数 D_{simm} と称する。

5.3. 引用規準

次に示す規準は、この試験方法に引用されることによって、この試験方法の規定の一部を構成する。これらの規準は、その最新版を適用する。

JSCE-G 571 2013 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案), 2018年制定コンクリート標準示方書[規準編]土木学会規準および関連規準, 土木学会, pp.393-401, 2018.

NT BUILD 492: Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments, Nordtest, 1999.

AASHTO T 277-21: Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2021.

5.4 試験装置

5.4.1 電気泳動セル

JSCE-G 571²⁾, NT BUILD 492³⁾, AASHTO T 277⁴⁾などの既存の電気泳動試験の試験規準に適合するものを用いることとする。

5.4.2 セル内溶液

セル内溶液は陰極側が 10%の塩化ナトリウム水溶液, 陽極側が 0.3 mol/L の水酸化ナトリウム水溶液とする。

5.4.3 直流安定化電源

直流安定化電源は $\pm 0.1V$ の変動内で安定した直流定電圧を継続して印加できるものを使用する。

5.4.4 電極

陽極及び陰極に用いる電極は, 試験期間を通じて電気化学的に安定で, 試験結果に影響を与えない材質のものとする。

5.5 供試体

5.5.1 供試体の寸法

電気泳動セルに設置する供試体の形状, 寸法は, 直径 100 mm, 厚さ 50 mm の円盤型コンクリート供試体とする。

5.5.2 供試体の製作

供試体の製作の方法を以下に示す。

- a) 直径 100 mm, 高さ 200 mm の円柱供試体を製作する。
- b) 供試体は所定の材齢まで 20°C の水中で養生した後, カッターで厚さ 50 mm に成形する。成形にあたっては, まず a) で製作した円柱供試体の両端面から 25 mm の部分を除き, 残った約 150 mm の部分から 2 個の円盤型供試体を切り出す。
- c) 円盤型供試体の直径, 厚さ, 質量を測定する。
- d) 円盤型供試体は, 配合ごとに 6 個製作する。なお, 試験結果の信頼性の向上を目的とする場合には, 円盤供試体の数量を適宜変更してもよい。

5.5.3 供試体の前処理

供試体の前処理の方法を以下に示す。

- a) 5.5.2 で成形した円盤型供試体を室内で乾燥させた後, 円周面をエポキシ樹脂で被覆する。
- b) 被覆したエポキシ樹脂が硬化するまで室内に放置する。この時, 被覆していないコンクリート表面を乾燥させないように注意する。
- c) エポキシ樹脂の硬化後に, 供試体の質量を測定する。
- d) コンクリートを水で飽和させるために, 以下の手順で真空飽和处理を行う。
 - 1) 真空デシケータ内に供試体を横置きにセットする。
 - 2) 真空ポンプで吸引し, デシケータ内の真空度が 150 Pa 以下となる状態で 3 時間放置する。

- 3) 真空ポンプを稼働しながら、デシケータ内の円盤型供試体が水没するまで蒸留水を注入する。この時蒸留水中に空気を巻き込まないように注意する。
- 4) 蒸留水を注入して1時間後に真空ポンプを停止する。
- 5) デシケータ内に空気を戻して、1日程度放置する。

5.5.4 試験装置への供試体設置

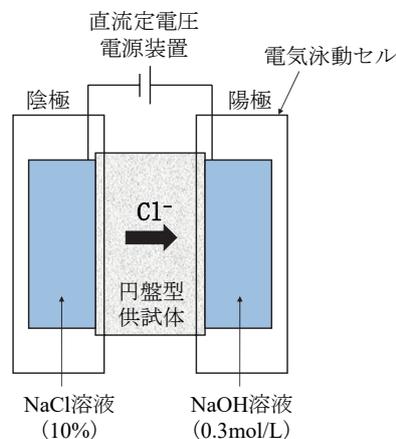
真空デシケータから取り出した供試体は直ちに質量を測定した後、供試体を電気泳動セルに設置する。この時、電気泳動セルと供試体の接触面にはシーリング材などを塗布し、電気泳動セルからの溶液の漏れを防止する。

5.6 試験方法

試験方法の概要を図－II.5.1に示す。

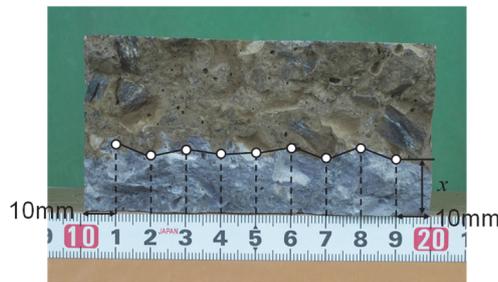
5.6.1 電気泳動試験

- a) 温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の恒温室内で実施する。
- b) 電気泳動セルに供試体をセットした後、陽極側及び陰極側の各セルに5.4.2で示した溶液を注入する。溶液の量は、供試体の両端面全体が完全に溶液に浸せきするまでとする。
- c) 直流安定化電源で、直流定電圧 30V を電極間へ印加する。
- d) 通電時間は2水準とし、各3回の試験を行う。
- e) 通電6時間後の塩化物イオン浸透深さ($x_{d,6h}$)を参考として他の通電時間を設定する。
 - 1) $x_{d,6h} \leq 10.0 \text{ mm}$ の場合: 6時間, 30時間
 - 2) $10.0 < x_{d,6h} \leq 12.5 \text{ mm}$ の場合: 6時間, 24時間
 - 3) $12.5 < x_{d,6h} \leq 15.0 \text{ mm}$ の場合: 6時間, 18時間
 - 4) $15.0 < x_{d,6h} \leq 20.0 \text{ mm}$ の場合: 6時間, 15時間
 - 5) $20.0 < x_{d,6h} \leq 25.0 \text{ mm}$ の場合: 6時間, 12時間
 - 6) $25.0 < x_{d,6h}$ の場合: 塩化物イオン浸透に対する抵抗性が極端に低いため試験の中止を要検討



図－II.5.1 非定常電気泳動試験の概要

硝酸銀噴霧後の割裂面



塩化物イオン浸透深さ (mm)
= 供試体端部から10mmの範囲を
除いた9点の測定値 x の平均値

図一 II.5.2 塩化物イオン浸透深さの測定方法

5.6.2 測定項目及び測定方法

- 試験の開始時と終了時に、供試体両端面の電位差、溶液温度、電流を測定する。電流については、直流安定化電源の読み値でもよい。
- 供試体両端面の電位差の測定にあたっては、電位測定器のプラス端子を陽極側溶液内に、マイナス端子を陰極側溶液内にそれぞれ挿入し、できるだけ供試体表面に近い位置で供試体表面に端子が触れないようにして電位差を測定する。なお、測定端子は、測定するときのみ溶液に挿入するものとし、通常は端子を溶液から取り出しておく。
- 試験終了後に供試体内部の塩化物イオン浸透深さを測定する。測定にあたっては、試験終了後に供試体を割裂し、割裂面に 0.1 mol/L 硝酸銀溶液を噴霧して測定する。硝酸銀溶液の噴霧は 20°C の恒温室で行うこととし、塩化物イオン浸透深さの測定は硝酸銀溶液が十分に乾燥した後に行うこととする。ただし、硝酸銀噴霧から時間が経過すると呈色境界が不鮮明となるため、乾燥後のなるべく早期に測定を行う。供試体端部から 10mm の範囲を除く等間隔で 9 点において、試験面から硝酸銀溶液が白色を呈した位置までの深さを測定し、その平均値を塩化物イオン浸透深さとする(図一 II.5.2)。なお、供試体内部の空隙や骨材の存在によって塩化物イオン浸透深さが極端に大きくなった場合には、これらの位置を避けて塩化物イオン浸透深さを測定する。

5.7 計算

コンクリートの塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} は、次式で計算し四捨五入によって有効数字 3 けたに丸める。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{|z|FE} K \quad (5.1)$$

ここに、 D_{nssm} : 電気泳動試験 (非定常法) から得られる塩化物イオン拡散係数 (m^2/s)、 R : 気体定数 (= 8.31 J/(K·mol))、 T : 通電時の陽極側と陰極側の溶液温度の平均値 (K)、 z : 塩化物イオンの電荷 (= -1)、 F : ファラデー定数 (= 9.65×10^4 J/(V·mol))、 E : 電位勾配 (試験の開始時と終了時における両溶液間の電圧の平均値を供試体の厚さで除した値、V/m)、 K : 塩化物イオン浸透速度係数 (m/s、2 水準の通電時間と塩化物イオン浸透深さの関係を回帰分析して求める) である。

5.8 報告

- a. 材料
- b. 配合
- c. 円盤型供試体の寸法, 質量
- d. 養生方法とその日数, 試験開始までの経過時間
- e. 電気泳動セルの形状(準拠した試験規準)
- f. 電極の材質
- g. 試験の開始時と終了時の供試体両端面の電位差, 溶液温度, 電流
- h. 硝酸銀溶液噴霧後の供試体の割裂面を撮影したデジタル写真
- i. 塩化物イオン浸透深さの測定値
- j. 塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}
- k. 試験年月日
- l. 試験期間

参考文献

- 1) JSCE-G 572-2018: 浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案), 2018年制定
コンクリート標準示方書[規準編]土木学会基準および関連規準, 土木学会, pp.402-406, 2018.
- 2) JSCE-G 571-2013: 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案), 2018年制定
コンクリート標準示方書[規準編]土木学会基準および関連規準, 土木学会, pp.393-401, 2018.
- 3) NT BUILD 492: Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments, Nordtest, 1999.
- 4) AASHTO T 277-21: Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2021.

第Ⅲ部
付録資料

付録－1 混和材を用いた PCaPC 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、現在では数百橋の実績がある。ここでは、このマニュアル(案)の付録として、混和材を用いた PCaPC 橋の代表的な実績及び施工事例を示す。

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 を用いたコンクリート

主に環境負荷軽減コンクリート研究会(EFC 研究会)の実績及びプレストレスト・コンクリート建設業協会加盟会社へのヒアリング

・高炉スラグ微粉末 6000 を用いたコンクリート

主に高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性 PC 構造物研究会(BSPC 研究会)の実績及びプレストレスト・コンクリート建設業協会加盟会社へのヒアリング

・フライアッシュⅡ種を用いたコンクリート

主に土木学会、日本コンクリート工学会、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及びプレストレスト・コンクリート建設業協会加盟会社へのヒアリング

2. 実績の調査結果

実績調査の結果を付表－1～3 に示す。ここでは、それぞれの混和材について、架設年度や橋種、PCaPC 部材の種類、設計基準強度が多岐にわたるように実績を選定した。

付表-1 高炉スラグ微粉末4000を用いたPCaPC橋の実績(主な橋梁)

No.	橋梁名	製造年	施工場所	橋種	構造データ				配合データ					製造データ			採用理由	
					構造形式	適用部材	橋長(m)	全幅員(m)	設計基準強度(N/mm ²)	水結合比W/B(%)	置換率(%)	水W	セメント	結合材B	コンクリート数量(m ³)	養生 一次		二次
1	猿投高架橋	2003	愛知県	道路橋	3径間連続非合成PC床版桁橋	PCa床版	290.0	10.8	50	34.8	30	174	350	150	1,536	蒸気	未実施	高耐久化 環境負荷低減
2	瀬田高架橋	2006	高知県	道路橋	PC2径間連結合成桁(コンボ)橋	PCaセグメント桁	69.0	12.8	50	33	30	164	350	150	366	蒸気	未実施	高耐久化 環境負荷低減
3	川島連続高架橋	2007	埼玉県	道路橋	PC9径間連続2主版桁橋	PCa床版	615.0	10.5	50	32	30	160	350	150	1,963	蒸気	未実施	高耐久化 環境負荷低減
4	川尻高架橋	2010	島根県	道路橋	PC5径間連結合成桁(コンボ)橋	PCaセグメント桁	180.0	11.2	50	33	30	164	350	150	724	蒸気	未実施	高耐久化 環境負荷低減
5	筑紫野大橋	2012	福岡県	道路橋	PC5径間連結T桁橋	PCa主桁	119.0	8.0	50	34	30	170	350	150	438	蒸気	未実施	高耐久化 環境負荷低減
6	能生大橋	2012	新潟県	道路橋	PC4径間連結中空床版橋	PCaセグメント桁	130.1	13.7	50	30.4	50	158	260	260	1,523	蒸気	水中後 湿潤	塩害対策
7	小佐川橋	2013	兵庫県	道路橋	PC7径間連結合成桁(コンボ)橋	PCaセグメント桁	267.0	8.0	50	33	30	164	350	150	1,190	蒸気	未実施	高耐久化 環境負荷低減
8	相模原ICランプ橋	2014	神奈川県	道路橋	PC単純合成桁(コンボ)橋	PCaセグメント桁	29.7	38.8	50	33	30	164	350	150	366	蒸気	未実施	高耐久化 環境負荷低減
9	姥ヶ山ICランプ橋	2014	新潟県	道路橋	PC単純中空床版橋	PCaセグメント桁	35.1	8.9	50	30.4	27	158	380(N)	140	251	蒸気	未実施	高耐久化
10	歌高架橋	2016	新潟県	道路橋	PC6.5+5径間連結中空床版橋	PCaセグメント桁	198 165+145	10.4	50	34	30	170	350	150	4,330	蒸気	未実施	塩害対策
11	横川高架橋	2017	福島県	道路橋	PC5径間連結ハルプT桁橋	PCaセグメント桁	182.5	12.8	50	30.4	40*	158	282	208	1,079	蒸気	湿潤	高耐久化

※置換率=混和材(セメント+膨張材)

付表-2 高炉スラグ微粉末6000を用いたPCaPC橋の実績(主な橋梁)

No.	橋梁名	製造年	施工場所	橋種	構造データ				配合データ						製造データ			採用理由		
					構造形式	適用部材	橋長(m)	全幅員(m)	設計基準強度(N/mm ²)	水結合比W/B(%)	置換率(%)	単位量(kg/m ³)	水W	セメント	結合材B	混和材	コンクリート数量(m ³)		一次	二次
1	屋嘉比橋	1998	沖縄県	道路橋	2径間単純中空床版橋(1径間のみ対象)	PCa桁	ボステン	59.8	10.8	50	35	50	160	229	229	229	204	蒸気	未実施	塩害対策
2	青柳橋	2001	青森県	道路橋	PC単純合成桁(コンボ)橋	PCa桁	ボステン	37.8	16.5	50	37	50	142	192	192	192	295	蒸気	未実施	塩害対策
3	恩納バイパス6号橋	2002	沖縄県	道路橋	PC3径間連続T桁橋	PCa桁	プレテン	147.0	12.9	50	35	50	160	229	229	229	858	蒸気	未実施	塩害対策
4	隣松寺高架橋	2002	愛知県	道路橋	鋼12径間連続非合成3主軸桁橋	PCa床版	プレテン	467.0	16.0	50	34	50	142	209	209	209	2,035	蒸気	未実施	耐久性向上
5	億首川橋	2008	沖縄県	道路橋	PC6径間連続中空床版橋	PCa桁	プレテン	533.0	10.7	60	32	50	150	235	235	235	1,437	蒸気	未実施	ASR・塩害対策
6	吹矢谷橋	2011	広島県	道路橋	鋼3径間連続鉸桁橋	PCa床版	プレテン	243.0	14.0	50	35	50	160	232	232	232	692	蒸気	水中	塩害対策
7	蓼野第五橋	2013	島根県	道路橋	3+2+2径間連続鉸桁橋	PCa床版	プレテン	272.0	10.2	50	34.5	50	160	232	232	232	773.4	蒸気	水中	塩害対策
8	長江川橋	2013	宮崎県	道路橋	鋼3+4径間連続鉸桁橋	PCa床版	プレテン	211.0	11.2	50	34	50	168	247	247	454	蒸気	散水	塩害対策	
9	野黒沢高架橋	2014	山形県	道路橋	鋼10+4径間連続鉸桁橋	PCa床版	プレテン	598.0	11.3	50	33	50	150	227	227	1,383	蒸気	水中	塩害対策	
10	福岡新高架橋	2018~2019	兵庫県	道路橋	PC単純T桁橋	PCa桁・横梁	プレテン ボステン	13.5	11.4	70 50	30.6 33.7	50 50	148 143	242 212	242 212	88 18	蒸気	水中	塩害対策	
11	米田大橋	2020	岩手県	道路橋	PC8径間連続合成桁(コンボ)橋	PCa桁・PC板	ボステン プレテン	292.0	12.8	50 50	32 33	50 50	160 150	250 227	250 227	1296.6 144.7	蒸気	ミスト後封緘	耐久性向上	
12	白山空間高架橋	2020	石川県	鉄道橋	PC単純T桁橋(3径間)	PCaセグメント桁	ボステン	30.0 ~35.0	10.3	50 40	34 39	50 50	145 145	213 186	213 186	195 308	蒸気	未実施	ASR対策(7ヵ所リセメント)	

付表-3 フライアイッシュュII種を用いたPCaPC橋の実績(主な橋梁)

No.	橋梁名	製造年	施工場所	橋種	構造データ				配合データ					製造データ		採用理由		
					構造形式	適用部材	橋長(m)	全幅員(m)	設計基準強度(N/mm ²)	水結合比W/B(%)	置換率(%)	単位量(kg/m ³)	コンクリート数量(m ³)	養生				
					セメント	水W	セメント	結合材B	一次	二次								
1	伊良部大橋	2008~2014	沖縄県	道路橋	32+14径間PC連続桁橋	PCaセグメント	2185.0+935.0	9.7	50	34	(外割)	156	436	22	19,834	湿潤	未実施	スラブプロシード ワーカビリティ改善
2	宮坂橋	2015	石川県	歩道橋	単純PCT桁橋	プレテン	22.7	3.3	50	35	15	150	366	65	不明	蒸気	ミス	ASR・塩害 環境負荷低減
3	富山新港	2015~2016	富山県	栈橋	PC単純中空床版橋	プレテン	35.1	12.0	50	33	15	151	389	69	56.0	蒸気	未実施	不明
4	大月橋	2016	福井県	道路橋	PC単純中空床版橋	プレテン	12.0	5.3	50	33	15	151	389	69	17.1	蒸気	未実施	環境負荷低減
5	上野本町1号橋	2016~2017	福井県	道路橋	PC単純中空床版橋	プレテン	22.2	16.25	50	33	15	151	389	69	181.9	蒸気	未実施	不明
6	日野川橋	2016~2017	福井県	道路橋	鋼3径間連続非合成 鉄桁橋	プレテン	113.2	10.2	50	33	15	151	389	69	232.8	蒸気	ミス	塩害対策
7	希望橋	2017	福井県	道路橋	PC単純バルブT桁橋	PCa桁	34.6	16.0	50	33	15	156	402	71	64.5	蒸気	未実施	不明
8	竹波橋梁	2016~2017	福井県	道路橋	PC単純中空床版橋	プレテン	12.0	9.8	50	33	15	151	389	69	42.8	蒸気	未実施	不明
9	上野本町2号橋	2018~2019	福井県	道路橋	PC単純中空床版橋	プレテン	21.1	13.75 ~15.13	50	33	15	151	389	69	136.3	蒸気	未実施	不明
10	一号農道橋	2020	島根県	道路橋	PC単純床版橋	プレテン	7.1	4.2	70	27	20	152	450	113	5.2	蒸気	未実施	環境負荷低減

3. PCaPC 橋の施工事例

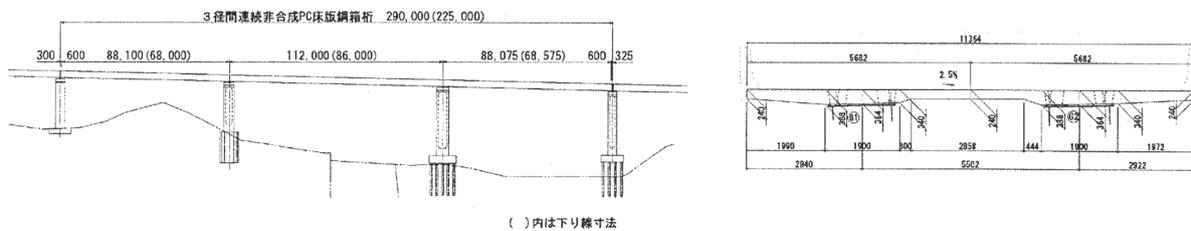
3.1 高炉スラグ微粉末 4000 を用いた事例

3.1.1 猿投高架橋¹⁾

東海環状猿投高架橋は、2004年に架設された鋼3径間連続非合成版PC床版桁橋である。本橋は、床版にPCaPC床版が用いられており、床版製作時には、打設時に必要なバイブレータの使用時間の短縮、これによる騒音・振動の抑制や製造労務の低減、未充填部の発生の防止に加えて耐久性の向上や環境負荷の低減を目的として高炉スラグ微粉末4000を30%置換した高流動コンクリートを使用している。

床版は1日に3枚製作され、翌日にプレストレス導入強度 35N/mm^2 を満足するよう打設終了から3時間経過後より $20^\circ\text{C}(2\text{h}) \rightarrow 45^\circ\text{C}(2\text{h}) \rightarrow 20^\circ\text{C}(2\text{h})$ の蒸気養生が行われている。

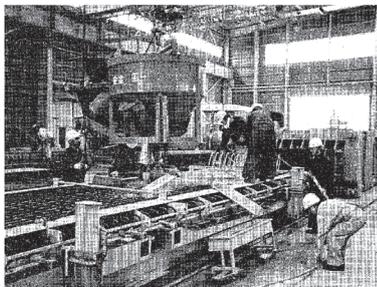
橋梁一般図を付図-1に、PCaPC床版に使用したコンクリート配合を付表-4に、PCaPC床版の製作及び架設状況を付写真-1、付写真-2に示す。



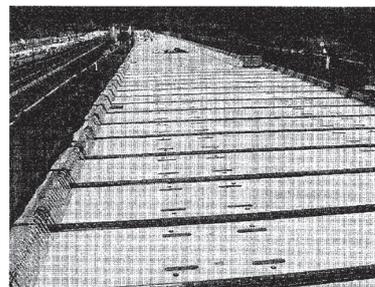
付図-1 猿投高架橋の橋梁一般図

付表-4 猿投高架橋 PCaPC 床版のコンクリート配合

設計 基準強度 (N/mm^2)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の 置換率 (%)	単位量 (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			
50	65	3.0	34.8	30	174	350	150	865	828	5.0



付写真-1 PCaPC 床版の製作



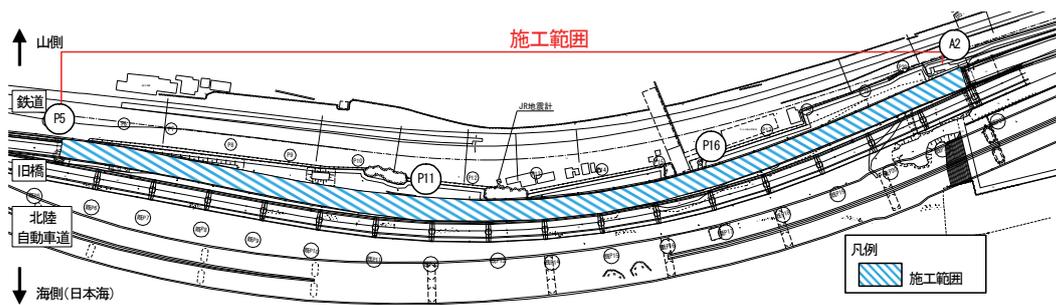
付写真-2 PCaPC 床版の架設

3.1.2 歌高架橋²⁾

歌高架橋(旧橋)は、1975年に建設された鋼単純桁橋(1径間)とポストテンション方式PC単純T桁橋(31径間)から構成された橋梁であった。旧橋は日本海の汀線付近に架橋しているものの、塩害対策指針(案)³⁾の制定される1984年より前に施工した橋梁であったため、過酷な環境下で塩害による経年劣化が顕著となり、定期的な補修対策を必要とする状態にあった。そこで、旧橋の隣に更新橋を構築する架替えを含む複数の案について比較検討が行われ、ライフサイクルコストに優れた高架橋の架替え更新を実施するに至っている。

新たに構築された更新橋は、塩害劣化した旧橋の再構築であることを踏まえ、飛来塩分の影響による耐久性低下を生じさせない対策を講じることが求められ、第2工区と第3工区の全16径間全てにおいて、塩分の付着する比表面積の少ないPCaセグメント工法によるポストテンション方式PC連結中空床版橋が採用された。主桁セグメントには、早強セメントの一部を高炉スラグ微粉末4000で30%置換した高流動コンクリート(設計基準強度50N/mm²)が使用され、コンクリートを緻密化するとともに充填性を高めることにより主桁コンクリートの塩化物イオンの浸透抑制が図られている。

橋梁一般図を付図-2に、PCa桁に使用したコンクリート配合を付表-5に、現地の状況及び架設状況を付写真-3、写真-4に示す。



付図-2 歌高架橋の橋梁一般図

付表-5 歌高架橋 PCa 桁のコンクリート配合

設計 基準強度 (N/mm ²)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					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		
50	60	4.5	34	30	170	350	150	786	917



付写真-3 現地の状況



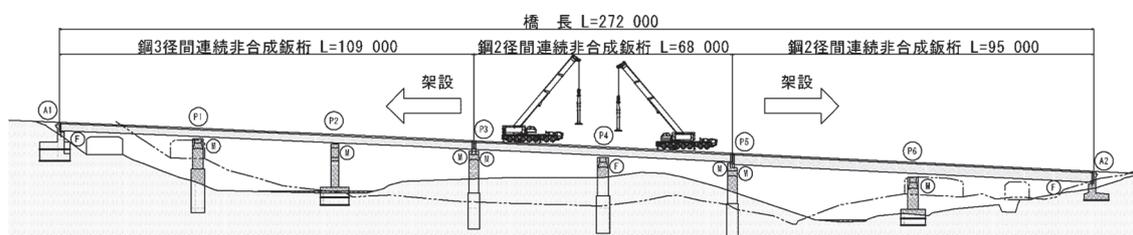
付写真-4 架設状況

3.2 高炉スラグ微粉末 6000 を用いた事例

3.2.1 中国自動車道 蓼野第五橋⁴⁾

蓼野第五橋は、供用開始から 30 年が経過した中国自動車道六日市 IC～鹿野 IC 間に位置する鋼 3+2+2 径間連続非合成版桁橋である。冬期の凍結防止剤の散布による塩害劣化に対して各種補修対策が実施されてきたが、劣化の顕在化により抜本的な対策が必要となり、ライフサイクルコストの最小化を目指して高品質かつ高耐久な PCaPC 床版に取り替える全面補修が実施されている。PCaPC 床版には、遮塩効果の高い高炉スラグ微粉末 6000 を早強セメントの 50%置換したコンクリートを使用しており、過去の試験結果⁵⁾を参考に蒸気養生後に 3 日間の水中養生を行っている。

橋梁一般図を付図-3 に、PCaPC 床版に使用したコンクリート配合を付表-6 に、PCaPC 床版の水中養生の状況を付写真-5 に示す。



付図-3 蓼野第五橋の橋梁一般図

付表-6 蓼野第五橋 PCaPC 床版のコンクリート配合

設計基準強度 (N/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 (kg/m ³)				
					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 6000		
50	12	4.5	34.5	50	160	232	232	683	991

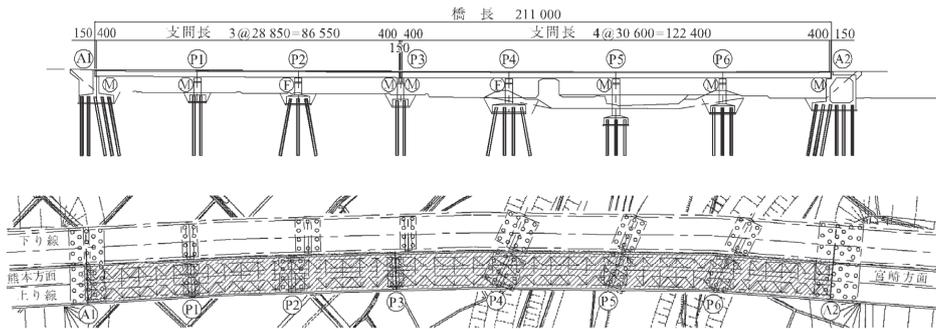


付写真-5 PCaPC 床版の水中養生

3.2.2 宮崎自動車道 長江川橋⁶⁾

長江川橋は、昭和 50 年の供用開始から約 40 年が経過した鋼 3 径間+4 径間連続非合成版桁橋である。車両の大型化や交通量の増加、凍結防止剤の散布によりポットホールや床版下面のひび割れ、遊離石灰、漏水などの経年劣化が確認され、床版に対して部分補修・防水工、高機能舗装などの対策が行われていたが、平成 23 年度の健全度調査において RC 床版に遊離石灰、剥離、亀甲状ひび割れの進行が確認されたため、抜本的な対策として PCaPC 床版による床版取替えが行われている。新設された PCaPC 床版に用いられたコンクリートは、塩化物イオンの浸透を抑制するため早強セメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 に置換、プレストレス導入強度の早期発現、ワーカビティーの確保から水結合材比を 34.0%とし、スランプは 12cm に設定されている。また、高炉スラグ微粉末 6000 の使用により懸念される自己収縮の増加に伴う収縮ひび割れの発生を抑制するため、ナイロン短繊維が混入されている。コンクリート打設後の翌日にプレストレス導入強度 36N/mm² を満足するよう最高温度を 50℃と設定、実績から積算温度 600℃・h となるよう蒸気養生を行うとともに、プレストレス導入後 15 日間、水中ポンプ及び散水ホースを循環させて湿潤養生を行っている。

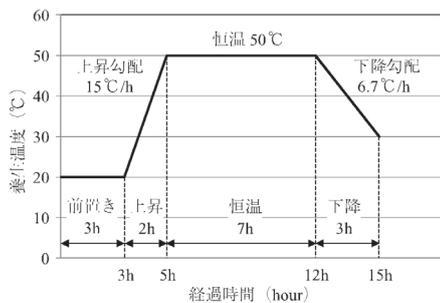
橋梁一般図を付図-4 に、PCaPC 床版に使用したコンクリート配合を付表-7 に、蒸気養生のパターンを付図-5 に、PCaPC 床版の湿潤養生の状況を付写真-6 に示す。



付図-4 長江川橋の橋梁一般図

付表-7 長江川橋 PCaPC 床版のコンクリート配合

設計 基準強度 (N/mm ²)	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 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			
50	12	4.5	34	50	168	247	247	717	1137	2.64



付図-5 蒸気養生パターン

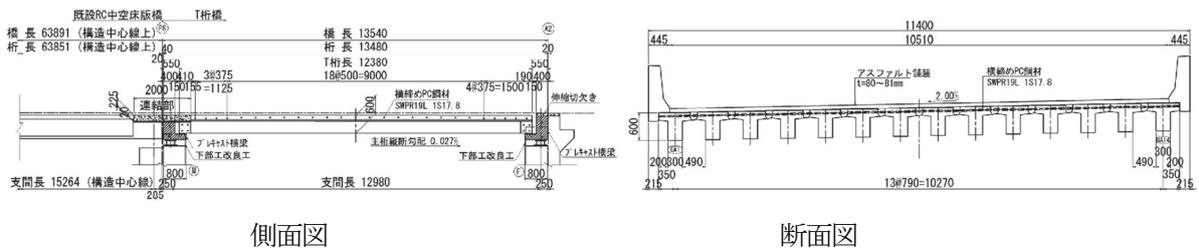


付写真-6 PCaPC 床版の湿潤養生

3.2.3 中国自動車道 福崎新高架橋^{7),8)}

福崎新高架橋は、昭和 49 年に供用が開始された中国自動車道の福崎 IC～山崎 IC 間に位置する多径間の RC 中空床版橋を主と高架橋である。国道と交差する P8-A2 径間はプレテンション方式の単純 I 桁橋とされていたが、供用開始から 40 年以上経過し、桁下面でのコンクリートの剥落や一部内部鋼材の露出破断など劣化損傷が確認されたため、架替え工事が行われた。架替えは支点部に設置した PCa 横梁上に T 桁を架設する工法により行われ、支承数の低減ならびに支点部の点検管理性の向上、高耐久化が図られている。また、架替え後には隣接する RC 中空床版橋と架替え桁の床版部を連結し、ジョイントレス化が図られている。新設された PCaT 桁の設計基準強度は 70N/mm²、横梁は 50N/mm²であり、塩化物イオンの浸透の抑制を目的として早強セメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 に置換したコンクリートが使用されている。また、耐久性向上のため、蒸気養生後には、二次養生として水中養生が行われている。

橋梁一般図を付図-6 に、PCa 部材の外観及び水中養生の状況を付写真-7、付写真-8、付写真-9 に、PCa 部材に使用したコンクリート配合を付表-8 に示す。



付図-6 福崎新高架橋の全体一般図



付写真-7 PCaT 桁



付写真-8 水中養生(横梁)



付写真-9 水中養生(T桁)

付表-8 福崎新高架橋 PCa 横梁及び T 桁のコンクリート配合

部 材	設計 基準強度 (N/mm ²)	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 ³)				
						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 6000		
PCa 桁	70	18	4.5	30.6	50	148	242	242	761	978
PCa 横梁	50	15	4.5	33.7	50	143	212	212	772	1032

3.3 フライアッシュⅡ種を用いた事例

3.3.1 北陸自動車道 日野川橋⁹⁾

日野川橋は、昭和52年の供用から39年が経過した鋼2径間連続鈹桁橋と2連の鋼3径間連続鈹桁橋で構成される8径間、橋長300mの橋梁である。過去に何度か鉄筋コンクリート床版の補修工事を実施しているものの凍結防止剤の散布に起因する劣化が確認されていることから、床版取替えをとまう大規模更新工事が行われている。施工にあたって凍結防止剤散布地域であることを考慮した耐久性向上対策が求められ、PCaPC床版、間詰め床版、場所打ち床版及び壁高欄にはフライアッシュを混和したコンクリートが使用されている。コンクリートの設計基準強度は、PCaPC床版、間詰め床版及び場所打ち床版が50N/mm²、壁高欄が30N/mm²であり、フライアッシュの置換率はASR抑制対策として有効とされている15%、間詰め床版及び場所打ち床版のコンクリートには、収縮ひび割れ防止を目的として膨張材を添加している。

PCaPC床版の製作に際して行われた蒸気養生は、養生温度60°C、養生時間7時間、温度勾配15°C/時間とし、早強セメント単味のコンクリートを用いた場合よりも養生温度を5°C高く、養生時間を2時間長くすることで材齢1日でのプレストレスの導入強度を確保している。また、材齢初期の湿潤養生による強度増進、耐久性の向上を目的として蒸気養生後、脱枠～材齢7日までは湿度80%以上を確保した専用養生室でミスト噴霧による湿潤養生、材齢8～28日までは保水養生テープによる封緘養生が実施されている。

PCaPC床版、間詰め床版・場所打ち床版及び壁高欄に使用したコンクリート配合を付表-9に、PCaPC床版の湿潤及び保水養生の状況を付写真-10、付写真-11に示す。

付表-9 日野川橋のコンクリートの配合

部 材	設計 基準強度 (N/mm ²)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	FA 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
						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	膨張材		
PCaPC床版	50	12	4.5	33.0	15	151	389	69	—	699	1074
間詰め床版 場所打ち床版	50	12	4.5	31.7	15	165	419	74	28	609	1074
壁高欄	30	12	4.5	43.3	15	170	313	55	25	709	1068



付写真-10 ミスト噴霧による湿潤養生



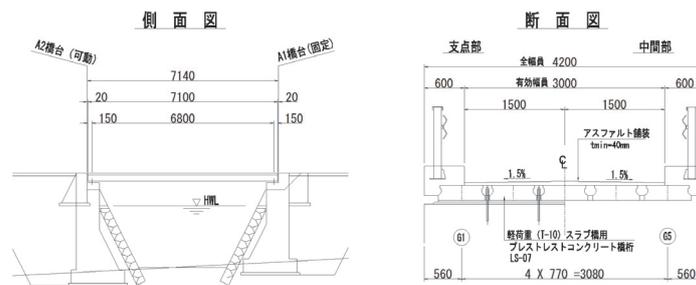
付写真-11 保水養生テープを用いた封緘養生

3.3.2 一号農道橋

一号農道橋は、島根県に建設された橋長 7.1m のプレテンション方式 PC 単純床版橋である。設計荷重「T-10」の小規模農道橋であり、JISA5373 附属書 B「プレキャストプレストレストコンクリート製品 橋りょう類」において、主に 10t 以下の自動車荷重で道路構造令の適用を受けない軽荷重道路橋用 PC 桁として規定されている「軽荷重スラブ橋げた(以下、LS 桁)」が採用されている。LS 桁は設計基準強度 70N/mm² のコンクリートを用いて主桁の軽量化を図った PC 桁であり、一号農道橋では、地産地消による環境負荷低減及び耐久性向上の観点から島根県で排出されたフライアッシュ II 種を混和したコンクリートが用いられている。

蒸気養生中、蒸気により養生槽内の湿度が高くて保たれていてもコンクリートの温度が雰囲気温度よりも高くなると、コンクリートは乾燥することが知られており、設計基準強度 70N/mm² のフライアッシュを混和した実大 PC 桁において蒸気養生中に表層部が乾燥の影響を受けると比較的大きな亀甲状の微細ひび割れが発生することが確認されている¹⁰⁾。これに対して一号農道橋の LS 桁製造時には、フライアッシュ混和による耐久性向上効果を十分に発揮できるよう、湿潤状態の養生マットをコンクリート打込み面に敷設して蒸気養生中の乾燥を防止している。

橋梁一般図を付図-7に、蒸気養生中の養生マット敷設状況及びLS桁保管状況を付写真-12、付写真-13に、コンクリート配合を付表-10に示す。



付図-7 一号農道橋の橋梁一般図

付表-10 一号農道橋のコンクリート配合

設計 基準強度 (N/mm ²)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の 置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					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		
70	60	4.5	27	20	152	450	113	633	978



付写真-12 養生マット敷設状況



付写真-13 保管状況

4. PCaPC 橋の耐久性調査事例

4.1 屋嘉比橋¹⁾

一般国道 58 号(旧道) 沖縄県国頭村浜の田嘉里川河口部に位置する屋嘉比橋は、1965 年に架設された旧橋が塩害により著しく劣化したため 1998 年に架け替えられたポストテンション方式の PC2 径間単純中空床版橋である。



付写真-14 屋嘉比橋

ミニマムメンテナンスを考慮した高耐久性 PC 構造物として全素線塗装型 PC 鋼より線やポリエチレンシース、エポキシ樹脂塗装の採用とともに、2 径間のうち 1 径間(A1-P1)で早強セメントの 50%を高炉スラグ微粉末 6000 に置換したコンクリートが使用されている(付表-11)。塩害対策工の効果を検証するため 10 年間の追跡調査が計画されており、桁の製作時に併せて採取した供試体による暴露試験とともに実橋調査が行われている。

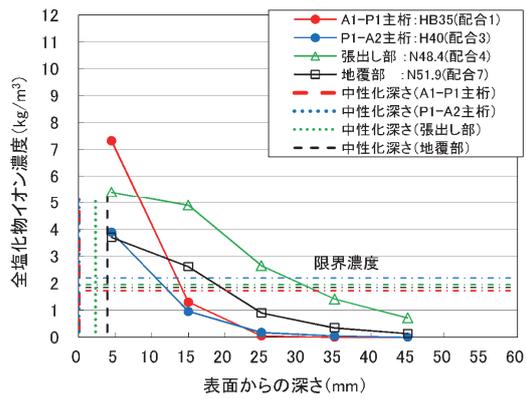
2004 年(竣工後 5 年 4 ヶ月)と 2013 年(同 14 年 6 ヶ月)に行われた 2 回の実橋調査では、早強セメント単味のコンクリートを使用したもう 1 径間(P1-A2)との比較が行われており、高炉スラグ微粉末 6000 を使用したコンクリート(HB35)は、早強セメント単味(H40)の場合に比べて塩化物イオンの浸透が抑制され、見掛けの拡散係数はコンクリート標準示方書[設計編]に示される高炉セメント B 種相当の予測式が適用できることが確認されている。

屋嘉比橋の全景を付写真-14 に、PCaPC 桁に使用したコンクリート配合を付表-11 に、実橋から採取したコアの全塩化物イオン濃度分布及び中性化深さを付図-8 に示す。

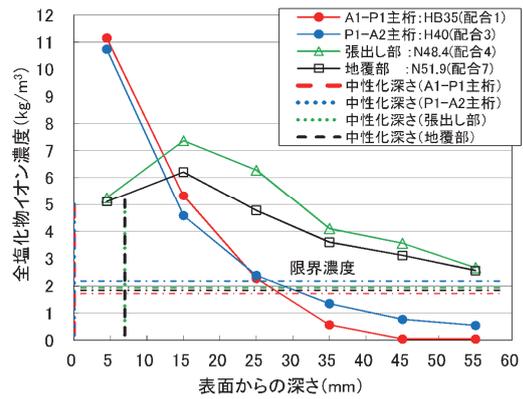
付表-11 屋嘉比橋のコンクリート配合

部材	配合名 (配合 No.)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 (%)	混和材の 置換率 (%)	単位量(kg/m ³)					圧縮強度※ (N/mm ²)	
						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				
A1-P1 間 PC 主桁部	HB35 (配合 1)	11.5	2.1	34.9	50	160	229	229	732	1143	2.29	55.4
P1-A2 間 PC 主桁部	H40 (配合 2)	8.4	2.0	40	0	160	400	—	768	1173	3.20	55.8
張出し部・間詰部	N48.4 (配合 4)	7.5	4.6	48.4	0	165	341	—	813	994	2.05	35.4
地覆部	N51.9 (配合 7)	7.5	4.3	51.9	0	165	318	—	832	994	1.91	33.5

※ 主桁部:PC 桁と同一養生した供試体の材齢 14 日の圧縮強度、張出し部・地覆部:標準養生供試体の材齢 28 日の圧縮強度



(a) 竣工後 5年 4ヵ月



(b) 竣工後 14年 6ヵ月

※ 早強ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末 6000:HB35, 早強ポルトランドセメント:H40

付図-8 実橋から採取したコアの全塩化物イオン濃度分布及び中性化深さ

5. まとめ

混和材を用いたコンクリートを PCaPC 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やアルカリ総量の抑制などによる ASR 対策、副産物の利用や CO₂ 発生量の抑制などの環境負荷の低減を目的として、PCaPC 橋に適用されている。
- (2) 一般的にプレテンション方式によりプレストレスを導入する PCa 部材は、初期強度の発現を促進するために蒸気養生が行われる。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でより効果が得られることから、近年、特に高炉スラグ微粉末 6000 を用いた PCa 部材で、二次養生として散水養生や水中養生等の湿潤養生が多く実施されていた。

参考文献

- 1) 米川英繁, 藤山一夫, 丹羽孝一, 八木洋介:3H-CRETE を使用したプレキャスト PC 床版の施工(猿投高架橋)について, 第 13 回プレ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.213-216, 2004.
- 2) 高橋弥成, 尾高一, 森山実, 三本竜彦:国道 8 号歌高架橋の施工ー日本海沿岸に位置する塩害劣化した橋梁の更新ー, プレレストコンクリート, Vol.60, No.1, pp.33-38, 2018.
- 3) 日本道路協会:道路橋の塩害対策指針(案)・同解説, 1984.
- 4) 本荘清司, 田中寛規, 岩井利裕:高耐久化を目指した床版取替え(中国自動車道蓼野第五橋), 第 23 回プレ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.661-664, 2014.
- 5) 本荘清司, 田中寛規, 桐川潔, 宮川豊章:プレキャスト PC 床版の耐久性向上のための一考察, 第 22 回プレ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.207-210, 2013.
- 6) 長濱正健, 山下義明, 只熊公義, 中原晋:宮崎自動車道長江川橋床版改良工事ーPCaPC 床版への高炉スラグ微粉末の適用ー, プレレストコンクリート, Vol.59, No.6, pp.69-73, 2017.
- 7) 福島夏樹, 早矢仕正尚, 中西雅人:中国自動車道(福崎 IC~山崎 IC)における PCI 桁橋の架替え施工報告, 第 28 回プレ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.33-36, 2019.
- 8) 永吉雄太, 加藤大樹, 齋藤幸治, 亀崎誠志:中国自動車道 福崎新高架橋でのプレキャスト横梁を用いた T 桁橋の設計, 第 28 回プレ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.645-648, 2019.
- 9) 山田稔, 山本将, 渡邊輝政, 谷口正輝:北陸自動車道日野川橋床版更新工事ー耐久性の高い PC 床版の適用ー, プレレストコンクリート, Vol.59, No.6, pp.58-64, 2017.
- 10) 和氣佳純, 河金甲, 氏家勲:蒸気養生中の表層部における乾燥がフライアッシュを混和した高強度 PC 桁の物質透過性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.131-136, 2020.
- 11) 豊福俊泰, 神山徳夫, 上津敏, 田中和幸, 辛軍青, 前田悦孝, 福地啓太:塩害に対応した高耐久性 PC 橋の建設と性能評価に関する 16 年間研究報告, 土木学会論文集 E2, 73 巻, 1 号, pp.16-35, 2017.

付録－2 PCaPC 部材用コンクリートの力学的特性

1. 概要

このマニュアル(案)で標準とした配合のコンクリートの強度、静弾性係数、クリープ係数、乾燥収縮の特性を示すため、本共同研究における実験結果及び一部既往の成果から抜粋した内容を示す。

2. 強度及び静弾性係数

2.1 養生条件の違いが圧縮強度に及ぼす影響

付表－1 に示す配合のコンクリートについて、円柱供試体(φ100×200mm)を用いて実験室内で行った圧縮強度の試験結果を示す。ここで、H:早強ポルトランドセメント、SG4:高炉スラグ微粉末 4000、SG6:高炉スラグ微粉末 6000、FA:フライアッシュⅡ種である。なお、結合材に用いた材料の影響を比較するため、すべての配合で、単位水量、単位粗骨材量、水結合材比を同一とした。

供試体の養生条件は付表－2 に示す 5 種類である。なお、ここでの蒸気養生とは、工場での蒸気養生を模擬した方法を示すものであり、具体的には、コンクリートの打込み完了後、十分に湿らせた養生マットで供試体の上面を覆い、20℃で3時間の前養生を行い、50℃まで2時間での昇温、50℃を6時間保持、20℃まで5時間で降温としたものである。

2.1.1 標準養生と蒸気養生

配合による違いに着目すると、付図－1 に示すとおり、蒸気養生を行わず材齢 28 日まで 20℃水中養生を行ったいわゆる標準養生(C28D)では、混和材を使用した場合、混和材を用いない場合よりも概ね材齢 28 日までの強度発現は遅れるが、材齢 28 日以降には同等の強度まで増進した。

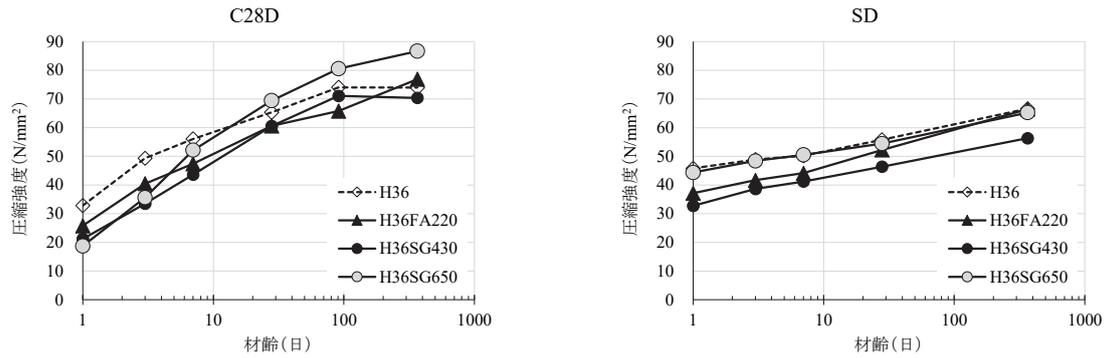
付表－1 コンクリートの配合

配合記号	水結合材比(%)	B(kg/m ³)	結合材の構成割合(%) B=H+SG4+SG6+FA			
			H	SG6	SG4	FA
H36	36	458	100	-	-	-
H36FA220			80	-	-	20
H36SG430			70	-	30	-
H36SG650			50	50	-	-

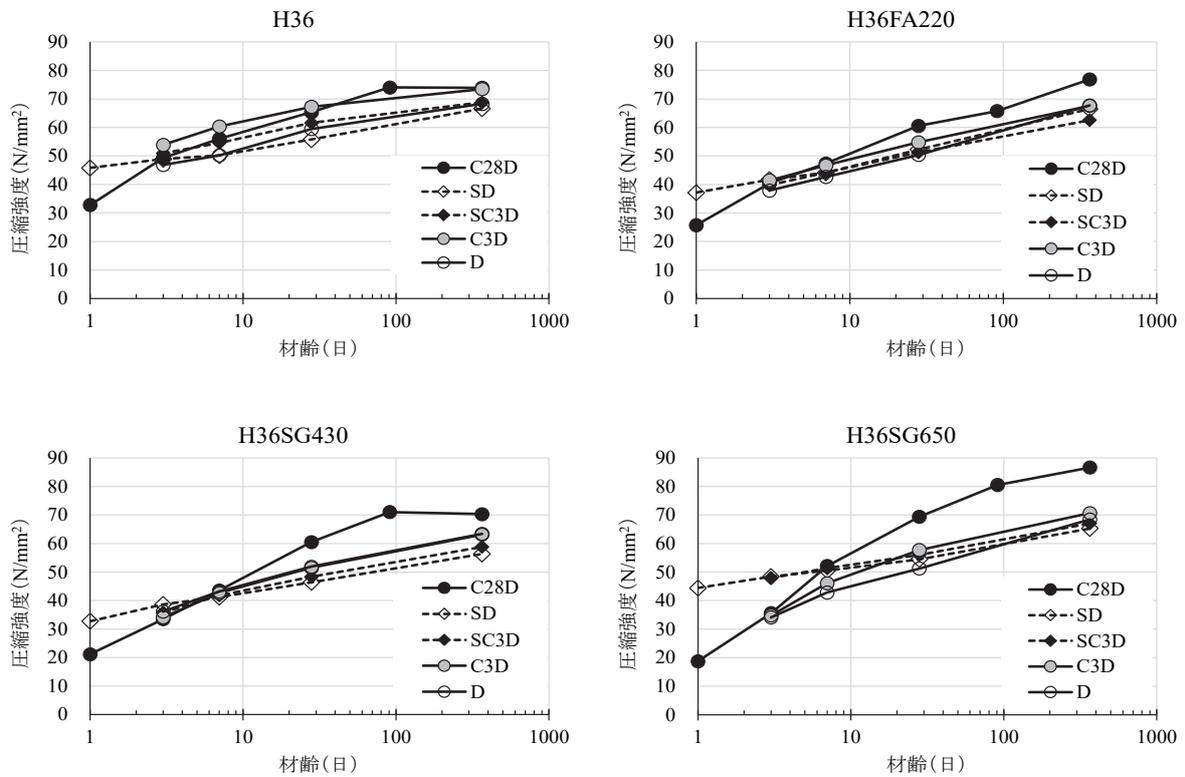
付表－2 養生条件

記号	養生条件
C28D	20℃封緘養生後、材齢1日に脱型し、材齢28日まで20℃水中養生を行った後、気中養生を実施
SD	蒸気養生後、材齢1日に脱型し、気中養生を実施
SC3D	蒸気養生後、材齢1日に脱型し、材齢3日まで20℃水中後養生を行った後、気中養生を実施
C3D	20℃封緘養生後、材齢1日に脱型し、材齢3日まで20℃水中養生を行った後、気中養生を実施
D	20℃封緘養生後、材齢1日に脱型し、材齢翌日から気中養生を実施

※蒸気養生：コンクリートの打込み完了後、十分に湿らせた養生マットで供試体の上面を覆い、20℃で3時間の前養生を行った後、50℃まで2時間での昇温、50℃を6時間保持、20℃まで5時間で降温



付図-1 配合の異なるコンクリートの圧縮強度の発現



付図-2 配合ごとの養生条件の異なるコンクリートの圧縮強度の発現

一方で、蒸気養生を行った条件(SD)の初期強度は、ばらつきはあるものの、混和材の有無によらず標準養生よりも増加し、一般的なPCaPC部材のプレストレス導入時の強度レベルを確保できると考えられる結果であった。ここで、プレストレス導入時の強度レベルとは、プレストレス直後にコンクリートに生じる最大圧縮応力度の1.7倍以上(ただし、プレテンション方式の場合には30N/mm²以上)である。

配合ごとに養生条件の違いに着目すると、付図-2に示すとおり、混和材の使用の有無にかかわらず、長期強度は蒸気養生よりも標準養生を行った場合が大きく、混和材を用いた場合にこの傾向が顕著であった。

なお、これらの傾向については、道路橋へ適用された、または適用が想定されたPCaPC部材用コンクリートに関する既往の報告^{1)~14)}においても同様の報告がなされている。

2.1.2 蒸気養生後の後養生

前述の蒸気養生を模擬した試験結果からは、付図-2 に示すとおり、後養生の有無による強度の違いは明確ではなかった。

ここで、本共同研究で別途実施した、複数の PCaPC 工場内で通常の製品と同様の蒸気養生を行い製作した円柱供試体(φ100×200mm)での後養生効果の確認試験¹⁵⁾のうち、圧縮強度特性に関する内容を以下に示す。

使用したコンクリートの配合を付表-3 に、蒸気養生後の後養生条件を付表-4 に示す。なお、使用材料や製造・養生設備、蒸気養生パターンについては、各工場にて通常適用している条件のため、工場により異なる。

強度試験結果を付図-3 に示す。工場 No.1 の試験結果である配合 H-1 と SG650 を比較すると、材齢 1 日強度は同等であり、その後も同程度であった。そのほかの 2 工場においても同様の傾向であった。

蒸気養生後の後養生の圧縮強度への影響に着目すると、配合 H-2 のみ後養生を行うことで強度の増加が見られるが、後養生の実施日数の違いによる差は見られなかった。また、同工場の配合 FA215 やそのほかの 2 工場の各配合においては、後養生の有無による圧縮強度への影響は見られなかった。

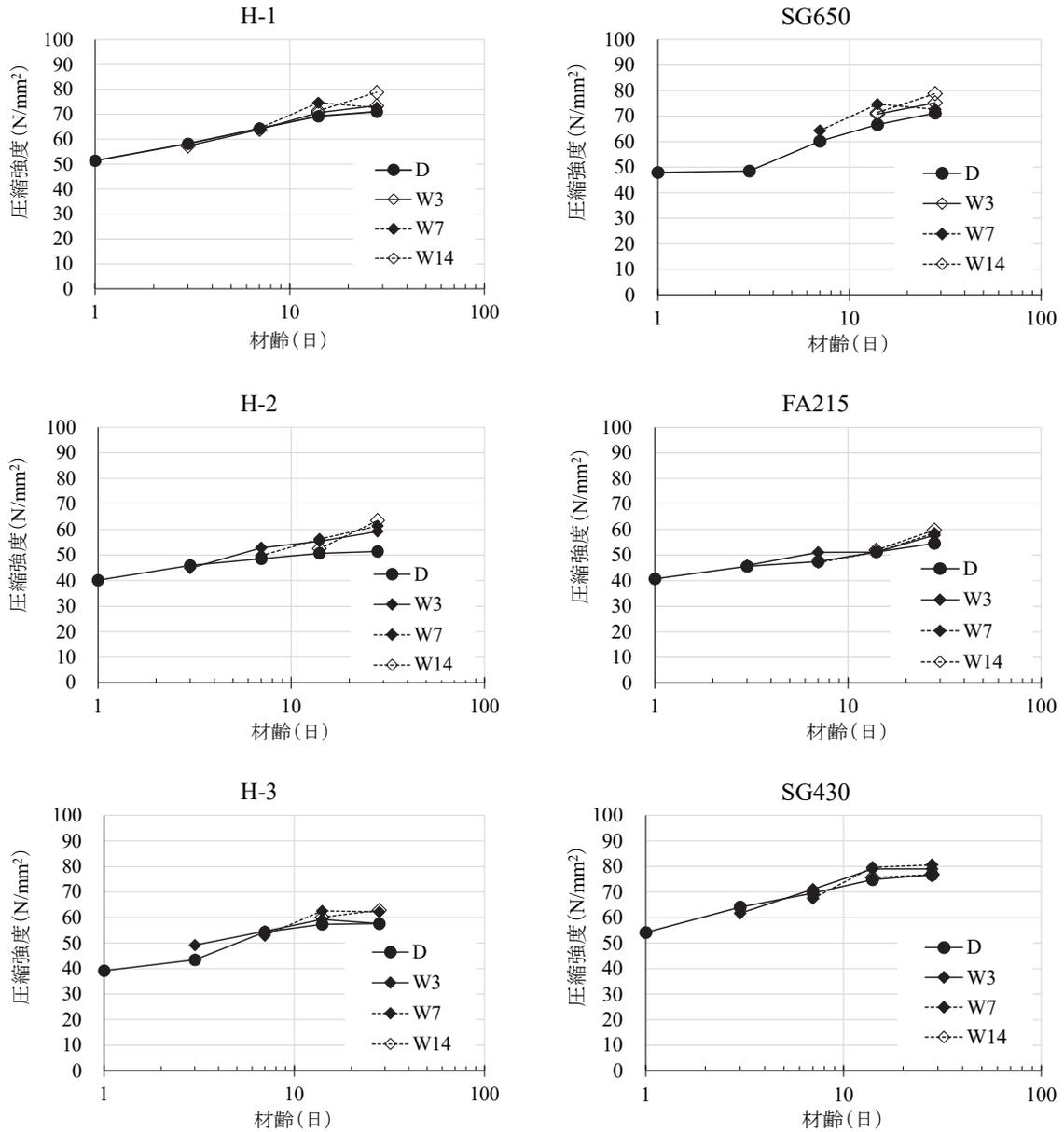
付表-3 コンクリートの配合

工場No.	配合記号	水結合材比(%)	B (kg/m ³)	結合材の構成割合(%) B=H+SG4+SG6+FA			
				H	SG6	FA	SG4
1	H-1	36.0	422	100	-	-	-
	SG650	33.0	454	50	50	-	-
2	H-2	36.0	420	100	-	-	-
	FA215	33.0	458	85	-	15	-
3	H-3	39.5	380	100	-	-	-
	SG430	34.5	458	70	-	-	30

付表-4 蒸気養生後の養生条件

記号	養生条件
D	蒸気養生後、材齢1日に脱型し、気中養生を実施
W3	蒸気養生後、材齢1日に脱型し、材齢3日まで後養生を行った後、気中養生を実施
W7	蒸気養生後、材齢1日に脱型し、材齢7日まで後養生を行った後、気中養生を実施
W14	蒸気養生後、材齢1日に脱型し、材齢14日まで後養生を行った後、気中養生を実施

※蒸気養生: 注水から約4時間の前養生を行い、昇温速度と最高温度および保持時間については、各工場の実績により設定



付図-3 蒸気養生後の異なる後養生条件における圧縮強度の発現

2.2 圧縮強度と静弾性係数の関係

付表-5に示すコンクリートについて、各種養生条件での圧縮強度と静弾性係数の関係を付図-4に示す。なお、グラフの凡例の配合記号末尾に付記した記号は付表-6に示す養生条件を示している。試験材齢は、28, 91, 365, 1095日である。この結果から、検討した範囲においては圧縮強度と静弾性係数の関係はコンクリート標準示方書に記載の式とおおむね一致した。

なお、道路橋へ適用されたまたは適用を想定したPCaPC部材用コンクリートに関する既往の報告^{1),3),6),8),13)}においても同様の傾向であることが報告されている。

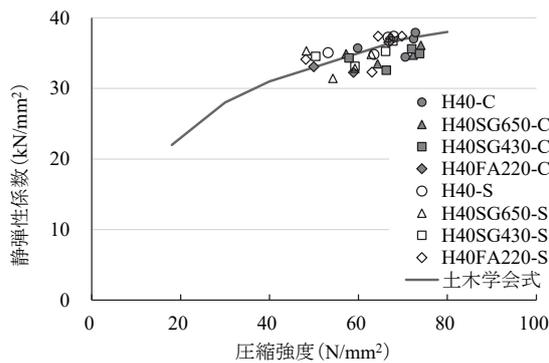
付表-5 コンクリートの配合

配合記号	水結合材比(%)	B (kg/m ³)	結合材の構成割合(%) B=H+SG4+SG6+FA			
			H	SG4	SG6	FA
H40	40	413	100			
H40SG430			70	30		
H40SG650			50		50	
H40FA220			80			20

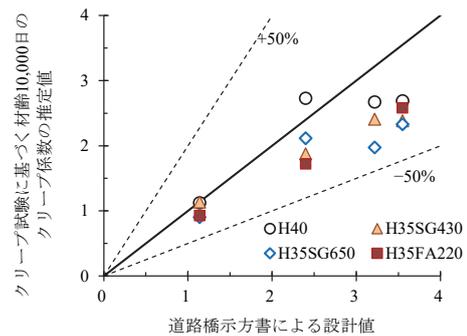
付表-6 養生条件

記号	養生条件
C	20℃封緘養生度，材齢1日に脱型し，材齢28日まで20℃水中養生を行った後，材齢91日まで屋内（温度20℃，湿度60%）に静置
S	恒温恒湿槽による蒸気養生を模擬した養生後，材齢1日に脱型し，材齢28日まで20℃水中養生を行った後，材齢91日まで屋内（温度20℃，湿度60%）に静置

※材齢91日以降は屋外に静置



付図-4 圧縮強度と静弾性係数



付図-5 クリープ試験結果

3. クリープ係数及び乾燥収縮

3.1 クリープ特性

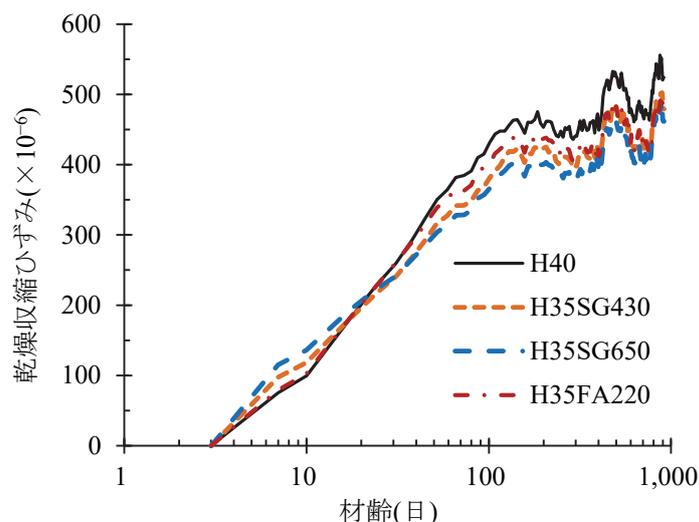
先行する研究¹⁶⁾による検討事例を示す。

コンクリートの配合は，H40（早強ポルトランドセメント単味：W/C=40%），H35SG430（高炉スラグ微粉末 4000 を 30% 置換，W/B=35%），H35SG650（高炉スラグ微粉末 6000 を 50%置換，W/B=35%），H35FA220（フライアッシュⅡ種を 20%置換，W/B=35%）である。

材齢 3 日まで湿潤養生された角柱供試体をクリープ試験に用いている。

付図-5 に示す実験により得られたクリープ係数の推定値と道路橋示方書に示されるクリープ係数の設計値の関係から，結合材に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ことが認められている。

上記の先行する研究結果について，他の文献においても同様の傾向が示されており，結合材に混和材を用いたコンクリートに関して，圧縮強度が同等であればクリープ係数も同等である報告^{5),8)}や，混和材を使用することでクリー



付図一六 乾燥収縮試験によって得られた乾燥収縮ひずみ

ブ係数が小さくなるとの報告^{7),13),14)}, 蒸気養生を行ったコンクリートは標準養生を行ったコンクリートよりもクリープ係数が小さくなるとの報告がある⁷⁾。

3.2 収縮特性

先行する研究¹⁶⁾による収縮特性の検討事例を示す。

コンクリートの配合は、H40(早強ポルトランドセメント単味:W/C=40%), H35SG430(高炉スラグ微粉末4000を30%置換, W/B=35%), H35SG650(高炉スラグ微粉末6000を50%置換, W/B=35%), H35FA220(フライアッシュII種を20%置換, W/B=35%)である。

JISA 1129に準拠した試験から、H35SG430、H35SG650及びH35FA220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ている。

また、付図一六に示す、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結果からも、同様の傾向が認められている。

上記のほか、蒸気養生を行った場合の乾燥収縮に関して、高炉スラグ微粉末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である報告⁸⁾や、JIS A 1129に準拠しつつ、材齢24時間時点の標点間距離として確認した結果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等との報告⁹⁾がある。

また、フライアッシュを用いたコンクリートについても、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同等もしくは小さいとの報告¹⁵⁾や、蒸気養生後の湿潤養生期間によらず、早強ポルトランドセメント単味の蒸気養生を行ったコンクリートと同等との報告²⁾がある。

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た自己収縮ひずみを含めたひずみである。

PCaPC部材の製造において、温度ひび割れ解析等を目的として個別に自己収縮特性を把握する必要がある場合には、別途試験で確認する必要がある。ここで、コンクリートの配合が既往の研究成果¹⁶⁾の条件を満足する場合には、同成果で提案されている自己収縮推定式が参考となる。

4. まとめ

このマニュアル(案)で標準としたコンクリートの強度、静弾性係数、クリープ係数、乾燥収縮について、本共同研究における実験結果及び一部既往の成果から抜粋した内容をまとめると下記の通りである。

- 1) 蒸気養生を行わない場合、混和材を用いた配合のコンクリートは混和材を用いない配合のコンクリートよりも初期強度発現が若干遅れるが、長期的には同等の強度に達した。この点で、既往の研究と同様の傾向を示した。
- 2) 蒸気養生を行った場合、混和材を用いた配合のコンクリートは混和材を用いない配合のコンクリートと同程度の初期強度であった。
- 3) 蒸気養生後の後養生の有無による圧縮強度への影響は見られない。
- 4) コンクリートの静弾性係数と圧縮強度の関係は、コンクリート標準示方書に示されている関係式とおおむね一致した。
- 5) 既往の研究から、クリープ係数は、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と考えられる。
- 6) 既往の研究から、乾燥収縮は混和材の使用の有無や養生条件によらず、同等である。ただし、自己収縮特性は混和材の種類や置換率により異なることが考えられるため、必要に応じて別途確認を行うと良い。

参考文献

- 1) 佐川康貴, 松下博道, 鶴田浩章, 中原晋: フライアッシュを混和した高強度コンクリートの強度・耐久性に関する研究, 第14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.467-472, 2005.
- 2) 山村智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之: 分級フライアッシュを用いたコンクリートのPC桁への適用に関する研究, 第22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, 2013.
- 3) 山田悠二, 橋本紳一郎, 徳光卓, 正木守: プレストレストコンクリートにおけるフライアッシュの適用性に関する検討, 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.263-268, 2014.
- 4) 山田悠二, 橋本紳一郎, 徳光卓, 正木守: フライアッシュを混入したプレストレストコンクリートの諸特性に関する検討, 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.303-308, 2015.
- 5) 山村智, 桜田道博, 小林和弘, 鳥居和弘: フライアッシュコンクリートの収縮特性, 耐久性および構造特性に関する検討, 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.309-314, 2015.
- 6) 河金甲, 下野聖也, 中田順憲: フライアッシュを混和した高強度PC桁の実用化に関する検討, 第26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.529-532, 2017.
- 7) 高山俊一, 渡辺明, 宮辺和, 近田孝夫: 高炉スラグ微粉末のプレストレストコンクリートへの利用に関する研究, 第1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.247-250, 1990.
- 8) 松下博通, 鶴田浩章, 坂本賢次, 前田悦孝: 高炉スラグ微粉末を用いた高耐久性コンクリートの収縮・ク

- リーブ性状, 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.97-102, 2000.
- 9) 高野茂晴, 酒井秀昭, 和佐勇次郎, 横山博司, 前田悦孝: 高炉スラグ微粉末 (6000cm²/g) を用いた PC プレキャスト床版性能確認試験報告, 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.595-600, 2001.
 - 10) 小林崇, 中村定明, 前田拓郎: 高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの収縮特性の改善に関する研究, 15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, 2006.
 - 11) 水戸健介, 中村英佑, 鈴木雅博, 古賀裕久: 高炉スラグやフライアッシュを用いたプレキャスト PC 部材用コンクリートの強度発現と耐久性に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.227-232, 2019.
 - 12) 俵道和, 呉承寧, 石川嘉崇, 滝上邦彦: プレストレストコンクリートへのフライアッシュの適用性に関する基礎試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.197-202, 2011.
 - 13) 鶴田浩章, 松下博道, 吉富泰一, 前田悦孝: PC 桁に適用した高炉スラグ微粉末混和コンクリートの収縮・クリープ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.793-798, 2000.
 - 14) 谷口秀明, 渡辺博志, 田中良樹, 藤田学: 高炉スラグ微粉末を用いた PC 用コンクリートの特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.531-536, 2002.
 - 15) 水戸健介, 中村英佑, 鈴木雅博, 古賀裕久: 混和材を用いたプレキャスト PC 部材の耐久性に関する検討, 第27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.491-496, 2018.
 - 16) 土木研究所・プレストレスト・コンクリート建設業協会: 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)-, 共同研究報告書 472 号, 2016.

付録－3 物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性

1. 概要

混和材を用いたコンクリートの物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性のうち、中性化、水分浸透、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、これまでに暴露試験や室内試験を行って検討した結果の概要を示す。

1.1 コンクリートの配合と基礎物性

中性化、水分浸透、塩化物イオン浸透及び凍結融解に対する抵抗性の検討に用いたコンクリートの配合と基礎物性を付表－1、付表－2 及び付表－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、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、50%を高炉スラグ微粉末6000で置換したコンクリート、20%をフライアッシュII種で置換したコンクリートの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シリーズIとPCaPC部材への適用を想定したシリーズII、シリーズIIIを実施した。シリーズIでは、全配合において、水結合材比を40%、単位水量(W)を165kg/m³、単位粗骨材量(G)を968kg/m³に統一した。シリーズI及びシリーズIIIでは、PCaPC部材への適用を想定して材齢1日においてプレストレスの導入が可能な圧縮強度¹⁾を得られるように、シリーズIIでは水結合材比を36%、単位水量(W)を165kg/m³、単位粗骨材量(G)を968kg/m³に統一し、シリーズIIIでは、水結合材比を早強ポルトランドセメント単味のコンクリートで36%、混和材を用いたコンクリートで33%とした。また、シリーズI～IIIに加えて、全国各地のPCaPC工場(11工場)で供試体を製作した。

付表－1 コンクリートの配合と基礎物性(シリーズI)

配合	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材齢28日 (N/mm ²)	
		W	B = HPC + SG4 + SG6 + FA				S				G
			HPC	SG4	SG6	FA2					
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	11.5	4.6	59.8
H40SG430			289 (70%)	124 (30%)	—	—	749		10.5	3.8	57.9
H40SG650			206 (50%)	—	206 (50%)	—	745		14.5	4.8	57.2
H40FA220			330 (80%)	—	—	83 (20%)	734		14.0	4.5	49.9

※HPC: 早強ポルトランドセメント(密度 = 3.14g/cm³, 比表面積 = 4,490cm²/g), SG4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度 = 2.89g/cm³, 比表面積 = 4,440cm²/g, SO₃ = 2.19%(無水せつこう添加)), SG6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度 = 2.91g/cm³, 比表面積 = 5,950cm²/g, SO₃ = 2.85%(無水せつこう添加)), FA2: フライアッシュII種(密度 = 2.30g/cm³, 比表面積 = 4,280cm²/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/cm³, 吸水率 = 2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石6号(密度 = 2.67g/cm³, 吸水率 = 0.43%)と5号(密度 = 2.67g/cm³, 吸水率 = 0.46%)を均等に混合)

※化学混和剤:高性能減水剤と空気連行剤を使用

※圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)を用いて、材齢28日にJISA1108:2006に準拠して測定

付表-2 コンクリートの配合と基礎物性(シリーズII)

配合	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材齢 28 日 (N/mm ²)	
		W	B = HPC + SG4 + SG6 + FA				S				G
			HPC	SG4	SG6	FA2					
H36	36	165	458 (100%)	—	—	—	721	968	12.0	5.3	65.3
H36SG430			321 (70%)	138 (30%)	—	—	712		10.0	5.9	60.5
H36SG650			229 (50%)	—	229 (50%)	—	707		12.0	5.0	69.4
H36FA220			367 (80%)	—	—	92 (20%)	696		8.0	4.8	60.6

※HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14 g/cm³, 比表面積=4480 cm²/g), SG4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89 g/cm³, 比表面積=4350 cm²/g, せつこう添加(SO₃換算 2%)), SG6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91 g/cm³, 比表面積=6210 cm²/g, せつこう添加(SO₃換算 3%)), FA2: フライアッシュ II 種(密度=2.35 g/cm³, 比表面積=4330 cm²/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(静岡県掛川産砕砂: 密度=2.56 g/cm³, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6号(密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.43%, 硬質砂岩)と同 5号(密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.46%, 硬質砂岩)を均等に混合)

※化学混和剤:高性能減水剤と空気連行剤を使用

※圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200 mm)を用いて, 材齢 28 日に JIS A 1108:2006 に準拠して測定

付表-3 コンクリートの配合と基礎物性(シリーズIII)

配合	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材齢 28 日 (N/mm ²)	
		W	B = HPC + SG4 + SG6 + FA				S				G
			HPC	SG4	SG6	FA					
H36	36	165	458 (100%)	—	—	—	721	967	13.5	5.4	62.6
H33SG430	33		350 (70%)	150 (30%)	—	—	677	968	12.0	4.8	64.7
H33SG650			250 (50%)	—	250 (50%)	—	671		11.5	3.8	70.5
H33F220			400 (80%)	—	—	100 (20%)	655		17.5	5.0	62.4

※HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14 g/cm³, 比表面積=4680 cm²/g), SG4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89 g/cm³, 比表面積=4,530 cm²/g, せつこう添加(SO₃換算 2%)), SG6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91 g/cm³, 比表面積=5,940 cm²/g, せつこう添加(SO₃換算 3%)), FA2: フライアッシュ II 種(密度=2.25 g/cm³, 比表面積=4,010 cm²/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(静岡県掛川産砕砂: 密度=2.56 g/cm³, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6号(密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.43%, 硬質砂岩)と同 5号(密度 2.67 g/cm³, 吸水率 0.46%, 硬質砂岩)を均等に混合)

※化学混和剤:高性能減水剤と空気連行剤の使用量を使用

※圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200 mm)を用いて, 材齢 28 日に JIS A 1108:2006 に準拠して測定

2. 中性化と水の浸透に対する抵抗性

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。つくば、新潟及び沖縄にコンクリート供試体を暴露して 20 ヶ月、40 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。また、同時に比較した供試体の促進中性化試験を実施した。

混和材を用いたコンクリートの水分浸透に対する抵抗性については、水分浸透試験を実施して検討した。PCaPC 工場において、実際の部材と同様の蒸気養生を与えた壁状供試体からコアを採取し、JSCE-G 582 に準拠して水分浸透試験を実施した。

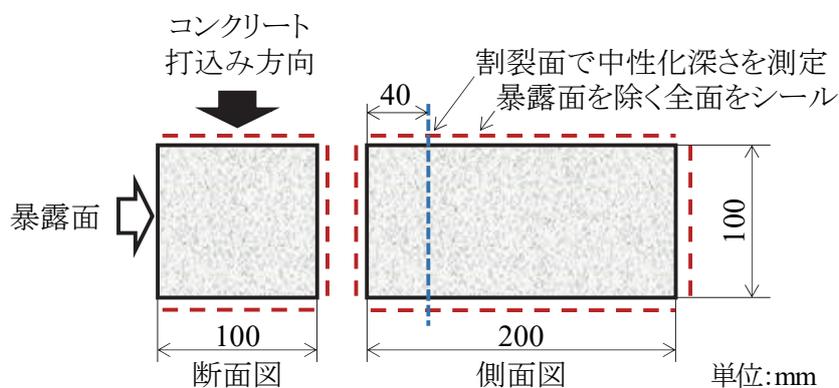
2.1 暴露試験

2.1.1 暴露試験の概要

供試体の形状を付図-1 に示す。同図には、中性化深さの測定位置も併せて示す。供試体は 100mm×100mm×200mm の角柱供試体である。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。また、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。

供試体の養生方法を付表-4 に示す。シリーズ I では混和材の使用が耐久性に与える影響を検証するため、標準養生を基本とした。なお、蒸気養生を模擬した供試体も製作した。シリーズ II では、養生方法の違いが耐久性に与える影響を検討するために、標準養生、模擬蒸気養生及び模擬蒸気養生＋水中養生とした。C28 では、材齢 28 日まで 20°C の養生槽で水中養生を行った。SC28 では、コンクリート打込み後、恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与え、翌日に脱型して材齢 28 日まで 20°C の養生槽で水中養生を行った。SD では、SC28 同様の温度履歴を与えて翌日に脱型して気中養生を行った。SC3 では、SC28 と同様の温度履歴を与えて翌日に脱型し、材齢 3 日まで 20°C の養生槽で水中養生を行った。

その後、シリーズ I では材齢 44～69 日で行くば、新潟、沖縄の各暴露場に、シリーズ II では材齢 78 日～93 日で行くば、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。



付図-1 供試体の形状

暴露 20 ヶ月後(シリーズ II 新潟除く), 暴露 40 ヶ月後, 暴露 90 ヶ月(シリーズ I 沖縄のみ)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値の平均値とした。

付表-4 供試体の養生方法

Case	養生方法	コンクリート打込み後の取扱い
C28	標準養生	20℃の室内で封緘養生, 翌日に脱型して材齢 28 日まで 20℃の養生槽で水中養生
SC28	模擬蒸気養生 + 水中養生	恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与え, 翌日に脱型して材齢 28 日まで 20℃の養生槽で水中養生
SD	模擬蒸気養生	恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与え, 翌日に脱型して気中養生
SC3	模擬蒸気養生養生 + 水中養生	恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与え, 翌日に脱型して材齢 3 日まで 20℃の養生槽で水中養生

付表-5 暴露試験の実施状況と気象データ(シリーズ I)

	新潟県上越市	沖縄県国頭郡	茨城県つくば市
暴露状況			
日平均気温(℃)	13.2 (Max.36.3 Min.-8.0)	22.4 (Max.34.7 Min.7.7)	13.9 (Max.36.8 Min.-8.8)
日平均湿度(%)	76.0	74.6	71.8
積算降水量(mm)	10,378	7,828	4,896
地理条件	沿岸部	沿岸部	内陸部

※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²⁾を記載

付表-6 暴露試験の実施状況と気象データ(シリーズ II)

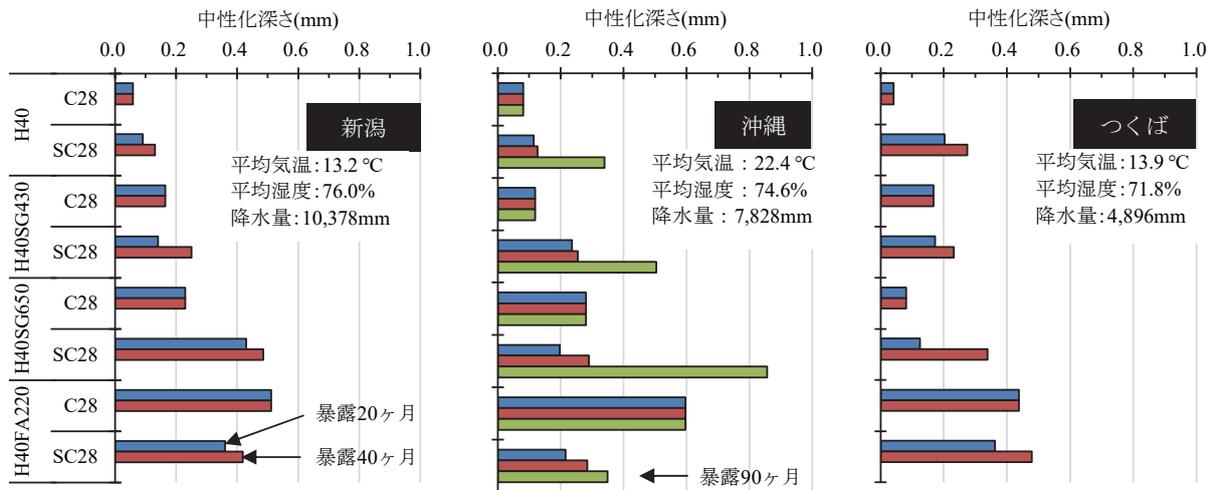
	新潟県糸魚川市	沖縄県国頭郡
暴露状況		
日平均気温(℃)	14.8 (Max.38.9 Min.-4.3)	23.1 (Max.34.9 Min.8.0)
日平均湿度(%)	N/A	78.8
積算降水量(mm)	9,912	8,245
地理条件	沿岸部	沿岸部

※日平均気温, 日平均湿度, 積算降水量は, 最寄りの気象観測地点の 2017年2月から2020年7月までの気象データ²⁾である。

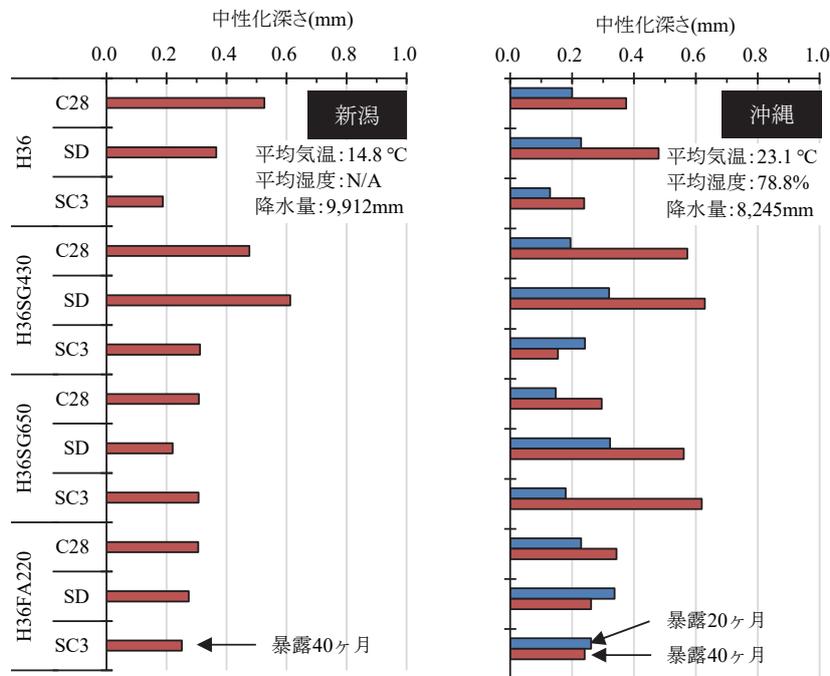
つくば、新潟及び沖縄の暴露試験の実施状況と各暴露場付近の気象データ¹⁾を付表-5と付表-6に示す。つくばの暴露場は内陸部に位置するため塩害環境にはないが、新潟と沖縄の暴露場は海岸線近くの厳しい塩害環境下にある。また、シリーズIの新潟暴露場は海中の消波ブロックや波打ち際で生成された海水の飛沫のみで飛来塩分が供給される環境であるが、沖縄の暴露場は天候によっては海水が供試体に直接降りかかる場合もある環境である。

2.1.2 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、40及び90ヶ月後の供試体の中性化深さを付図-2及び付図-3に示す。各暴露場の中性化深さの図には付表-5と付表-6に示した気象データを併記した。同一配合、同一養生の供試体の中性化深さを比較すると、各暴露場の中性化深さは同程度であり、各暴露場では飛来塩分量、気温、湿度及び降水量等が中性化深さに与え



付図-2 暴露試験による中性化深さ(水結合材比:40%)



付図-3 暴露試験による中性化深さ(水結合材比:36%)

る影響は明確には現れなかった。また、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の中性化深さに比べ大きくなった。蒸気養生を模擬した供試体の中性化深さは、標準養生供試体の中性化深さに比べ大きくなった。今回の暴露試験の結果の範囲内では、中性化深さの測定値は最大でも 1.0mm 以下と小さく、暴露環境や配合、養生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。

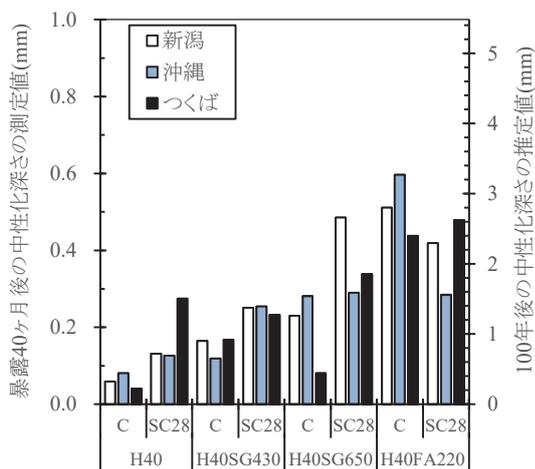
次に、暴露 40 ヶ月後の中性化深さの測定値を用いて求めた 100 年後の中性化深さの推定値を付図-4 及び付図-5 に示す。100 年後の中性化深さの推定値は、コンクリートの中性化が暴露試験の実施期間の平方根に比例して進行すると仮定して、標準養生暴露 40 ヶ月後の中性化深さの測定値から式(1)を用いて求めた。

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

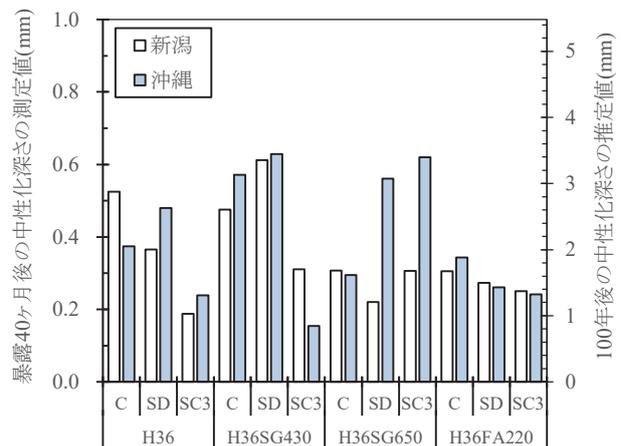
ここに、 $C_{estimated}$:100 年後の中性化深さの推定値(mm)、 $C_{measured}$:標準養生を行った供試体での暴露 40 ヶ月後の中性化深さの測定値(mm)、 $t_{estimated}$:中性化深さを推定するコンクリートの材齢(=100 年)、 t_{test} :暴露試験の実施期間(=40/12 年)である。

100 年後の中性化深さの推定値は最大でも 5mm 以下であった。道路橋示方書¹⁾では、工場で製作される PCaPC 部材の最小かぶりを 25mm としている。また、コンクリート標準示方書³⁾の「中性化に対する照査」ではかぶりと中性化の差である中性化残りを考慮した照査を規定しており、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最小かぶり 25mm から通常環境下での中性化残り 10mm を差し引くと、15mm となり、今回の暴露実験の結果の範囲では、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。

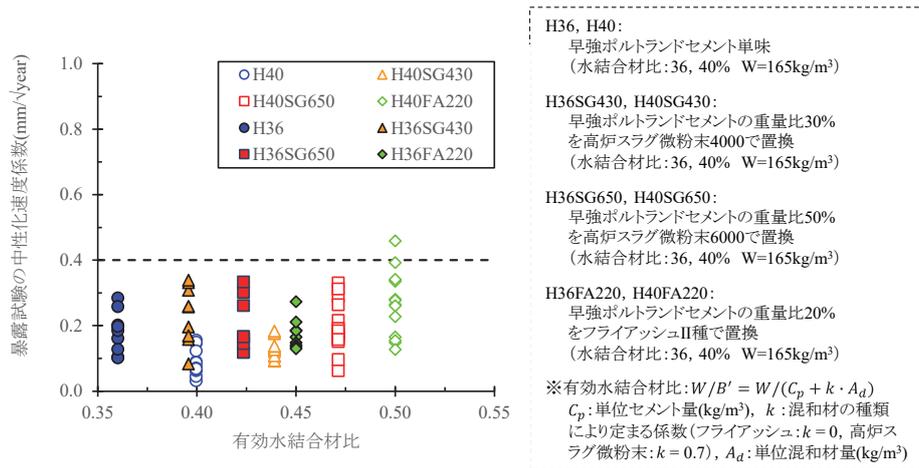
次に、今回の暴露試験で得られた中性化速度係数を付図-6 に示す。この結果、水結合材比が 40%以下で、表-I.1.1 に示す結合材の組合せのコンクリートでは、中性化速度係数は有効水結合材比で整理すると概ね 0.4mm/ $\sqrt{\text{year}}$ 以下となることが確認された。



付図-4 暴露 40 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 (水結合材比:40%)



付図-5 暴露 40 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 (水結合材比:36%)



付図-6 有効水結合材比と暴露 40 ヶ月後の中性化速度係数の関係

付表-7 コンクリートの配合と基礎物性(壁状供試体)

配合	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)						スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 材齢 28 日 (N/mm ²)	
		W	B = HPC + SG4 + SG6 + FA				S				G
			HPC	SG4	SG6	FA2					
H36	36	151	420 (100%)	—	—	—	730	1094	11.5	4.2	63.6
H33FA215	33		389 (85%)	—	—	69 (15%)	699	1071	10.5	4.3	61.3

※HPC: 早強ポルトランドセメント(密度 = 3.14g/cm³, 比表面積 = 4,410cm²/g), FA2: フライアッシュ II 種(密度 = 2.27g/cm³, 比表面積 = 4,550cm²/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(三國産陸砂と教賀産砕砂の 45:55 混合, 密度 = 2.59g/cm³, 吸水率 = 1.52%), G: 粗骨材(滋賀県産今津町椋川産(密度 = 2.84g/cm³, 吸水率 = 0.89%))

※化学混和剤:高性能減水剤と空気連行剤を使用

※圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)を用いて, 材齢 28 日に JISA 1108:2006 に準拠して測定

2.2 水分浸透試験

2.2.1 水分浸透試験の概要

PCaPC 部材に用いるコンクリートの水分浸透について検討するため, PCaPC 製造工場において, 実際の部材と同様の蒸気養生(注水時間を起点に 4 時間の前養生, 15°C/h 以下で昇温, 60°C で 7 時間保持, 15°C/h で降温)を与えた壁状供試体(幅 850mm×奥行 350mm×高さ 700mm)を製作した。コンクリートの配合を付表-7 に示す。

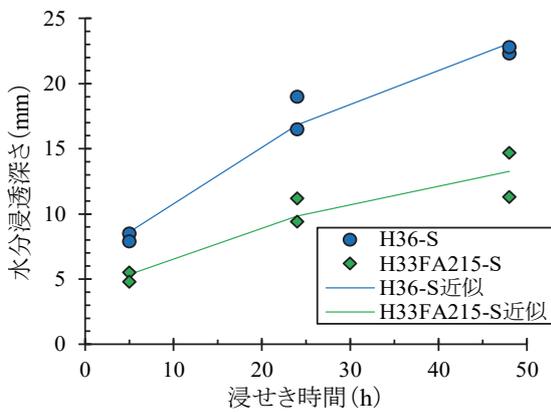
水分浸透試験は, 壁状供試体から採取したコアにて, JSCE-G582 に準じて実施した。供試体の製作は, 壁状供試体より φ100×195mm のコアを採取し, φ100×175mm となるように供試体片側端部から 20mm を切断したのち, 温度 20°C, 湿度 60% の環境で, 91 日間乾燥させた後, 24 時間の質量変化が 0.1% 以下となるまで乾燥させ, 両側の円形面以外の側面にエポキシ樹脂塗料を塗布した。

2.2.2 水分浸透試験結果

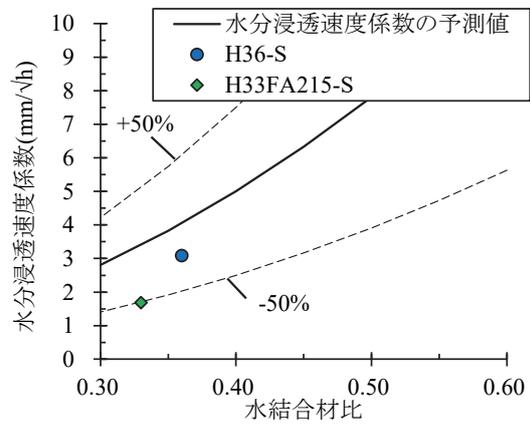
水分浸透試験の結果を付図-7 に示す。図中のプロットは測定値であり, 実線は水分浸透速度係数から算出した水分浸透深さである。48 時間後の水分浸透深さは早強ポルトランドセメント単味の配合 H36 では 22mm であるのに対して, フライアッシュの配合 H33FA215 では 13mm と小さく, 水分浸透速度係数は, H36 で 3.09 mm/√h, H33FA215 で 1.67 mm/√h であった。これは, フライアッシュを用いた配合は初期強度を確保するため, 水結合材比を小さくしたこと, 及びフライアッシュの混和により組織が緻密化したことが影響したものと推察される。

試験から求めた水分浸透速度係数とコンクリート標準示方書の式より算出したコンクリートの水分浸透速度係数の予測値の比較結果を付図-8に示す。ここで、コンクリート標準示方書の水分浸透速度係数の予測式の適用範囲は水結合材比 40%~60%であるが、図中の実線は水結合材比 30%まで 5%刻みで算出した結果である。H36 と H33FA215 のいずれの配合も、試験から求めた水分浸透速度係数は予測式より算出した水分浸透速度係数の±50%以内であり、水分浸透速度係数の予測式が水結合材比 40%以下でも使用できる可能性を示唆している。

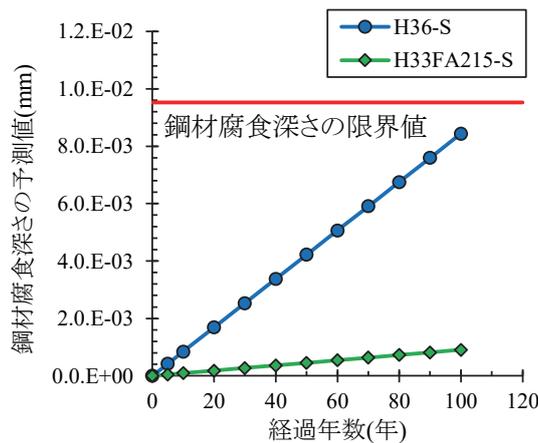
次に、試験から求めた水分浸透速度係数を用いて、はり部材を想定した、かぶり 25mm における 100 年後の鋼材腐食深さの予測値を算出した結果を付図-9に示す。100 年後の鋼材腐食深さの推定値は、いずれの配合でも鋼材腐食深さの限界値以下となり、今回の実験結果の範囲では、鋼材腐食に対して、十分な抵抗性を確保できると考えられる。



付図-7 水分浸透試験結果



付図-8 水分浸透速度係数の実験値と予測値の関係



※ $\gamma=1.00$, $\gamma_w=1.15$, $\gamma_c=1.30$ にて算出した。

付図-9 鋼材腐食深さの予測値

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、40 ヶ月、90 ヶ月後に回収し、塩化物イオン濃度を測定した。室内試験では、浸せき試験(JSCE-G572)、非定常電気泳動試験及び電気抵抗率試験を実施した。

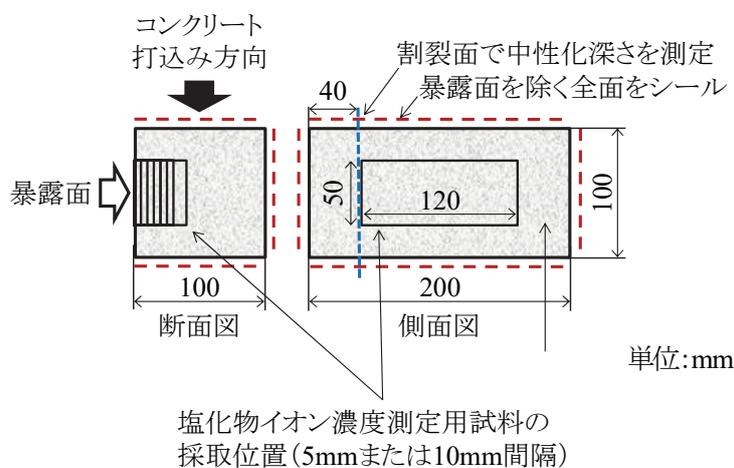
3.1 暴露試験

3.1.1 暴露試験の概要

供試体の形状を付図-10 に示す。同図には、塩化物イオンの測定試料の採取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。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。また、暴露面以外の供試体表面を塗装材料でシールし、暴露面以外からの塩化物イオンの侵入を防止した。

供試体の養生方法を付表-8 に示す。シリーズ I では混和材の使用が耐久性に与える影響を検証するため、標準養生を基本とした。なお、蒸気養生を模擬した供試体も製作した。シリーズ II では、養生方法の違いが耐久性に与える影響を検討するために、標準養生、模擬蒸気養生及び模擬蒸気養生+水中養生とした。C28 では、材齢 28 日まで 20°C の養生槽で水中養生を行った。SC28 では、コンクリート打込み後、恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与え、翌日に脱型して材齢 28 日まで 20°C の養生槽で水中養生を行った。SD では、SC28 同様の温度履歴を与えて翌日に脱型して気中養生を行った。SC3 では、SC28 と同様の温度履歴を与えて翌日に脱型し、材齢 3 日まで 20°C の養生槽で水中養生を行った。

暴露 20 ヶ月後(シリーズ II 新潟除く)、暴露 40 ヶ月後、暴露 90 ヶ月(シリーズ I 沖縄のみ)に供試体を回収して、塩化物イオン濃度の測定を行った。供試体中央部から厚さ 5mm あるいは 10mm で試料を切断して粉砕し、JIS A 1154 の電位差滴定法に準拠して塩化物イオン濃度を測定し、濃度分布を最小二乗法により式(2)にフィッティングして見掛けの拡散係数 D_{app} を算出した。



付図-10 供試体の形状

付表-8 供試体の養生方法

シリーズ	Case	養生方法	コンクリート打込み後の取扱い
I	C28	標準養生	20℃の室内で封緘養生、翌日に脱型して材齢28日まで20℃の養生槽で水中養生
	SC28	模擬蒸気養生 + 水中養生	恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与え、翌日に脱型して材齢28日まで20℃の養生槽で水中養生
II	C28	標準養生	20℃の室内で封緘養生、翌日に脱型して材齢28日まで20℃の養生槽で水中養生
	SD	模擬蒸気養生	恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与え、翌日に脱型して気中養生
	SC3	模擬蒸気養生 + 水中養生	恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与え、翌日に脱型して材齢3日まで20℃の養生槽で水中養生

※蒸気養生を模擬した温度履歴: 十分に湿らせた養生マットで供試体の上面を覆い、20℃で3時間の前養生、50℃まで2時間で昇温、50℃を6時間維持、20℃まで5時間で降温

付表-9 暴露試験の実施状況と気象データ(シリーズ I)

	新潟県上越市	沖縄県国頭郡	茨城県つくば市
暴露状況			
日平均気温(℃)	13.2 (Max.36.3 Min.-8.0)	22.4 (Max.34.7 Min.7.7)	13.9 (Max.36.8 Min.-8.8)
日平均湿度(%)	76.0	74.6	71.8
積算降水量(mm)	10,378	7,828	4,896
地理条件	沿岸部	沿岸部	内陸部

※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²⁾を記載

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

ここに、 $C(x, t)$: 距離 x と試験期間 t の塩化物イオン濃度 (kg/m^3), x : コンクリート表面からの距離 (m), t : 試験期間 (s), C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_i : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3), D_{ap} : 見掛けの拡散係数 (m^2/s), erf : 誤差関数である。

つくば、新潟及び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¹⁾を付表-9と付表-10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、シリーズ I の新潟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。

付表－10 暴露試験の実施状況と気象データ(シリーズⅡ)

	新潟県糸魚川市	沖縄県国頭郡
暴露状況		
日平均気温(°C)	14.8 (Max.38.9 Min.-4.3)	23.1 (Max.34.9 Min.8.0)
日平均湿度(%)	N/A	78.8
積算降水量(mm)	9,912	8,245
地理条件	沿岸部	沿岸部

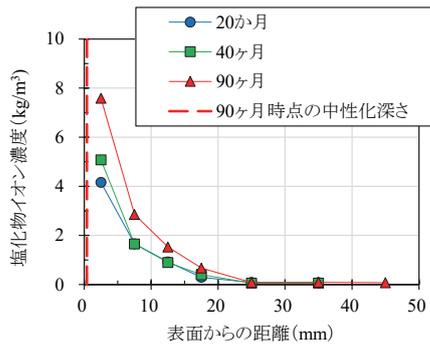
※日平均気温, 日平均湿度, 積算降水量は, 最寄りの気象観測地点の2017年2月から2020年7月までの気象データである。

3.1.2 塩化物イオン濃度分布

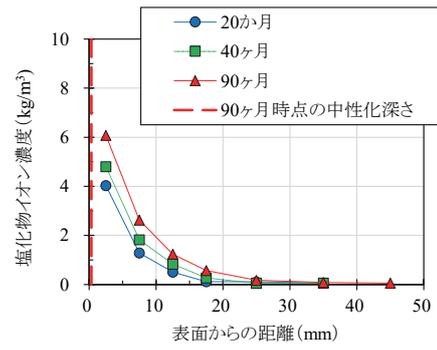
シリーズⅠの沖縄に暴露した供試体の全塩化物イオン濃度分布を付図－11, シリーズⅡの沖縄に暴露した供試体の全塩化物イオン濃度分布を付図－12 に示す。ここでは, 供試体の塩化物イオン濃度分布を混和材の種類及び養生方法ごとに比較して示す。図中には, 前の章で記載した最終暴露期間での中性化深さも併せて示す。

水結合材比を40%としたシリーズⅠでは, 「表面から20mmの位置」まで外部からの塩化物イオンの浸透があったことを確認できる。また, 20ヶ月から90ヶ月までの塩化物イオン濃度分布の変化はあるものの, 塩化物イオンの浸透深さは変化していないことが読み取れる。水結合材比を36%としたシリーズⅡでは, 塩化物イオンの浸透深さは, 「表面から15mmの位置」までであるが, 塩化物イオンの浸透深さはシリーズⅠ同様に大きな変化は見られない。また, 養生方法の違いによる塩化物イオン濃度分布への違いは不明瞭であった。

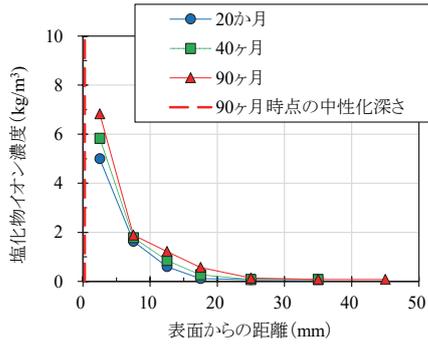
なお, 中性化深さは, いずれの供試体でもごく表層に留まっており, 中性化に伴う塩化物イオンの濃縮現象は認められなかった。



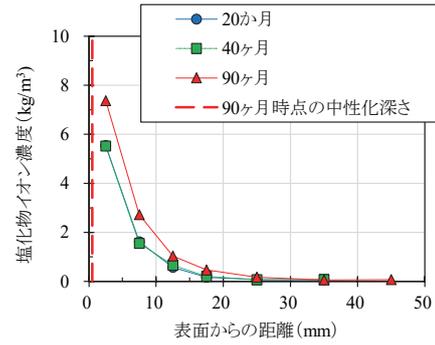
(a)H40(C28)



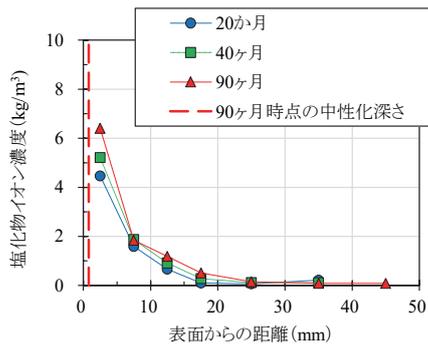
(b)H40(SC28)



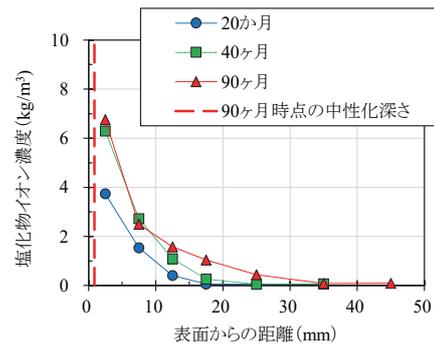
(c)H40SG430(C28)



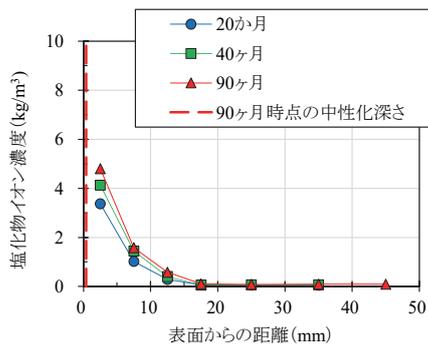
(d)H40SG430(SC28)



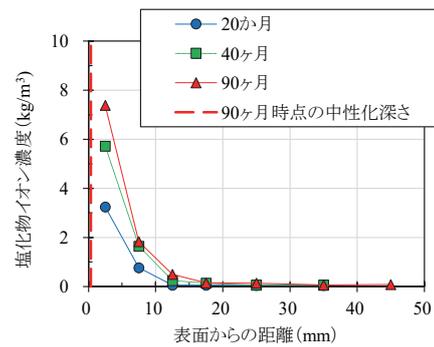
(e)H40SG650(C28)



(f)H40SG650(SC28)

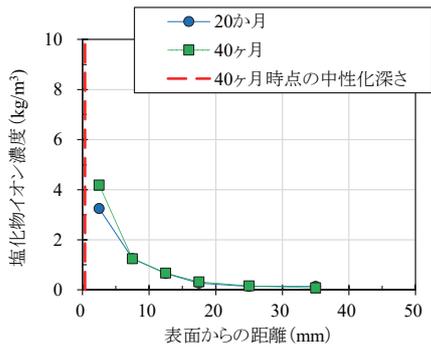


(g)H40FA220(C28)

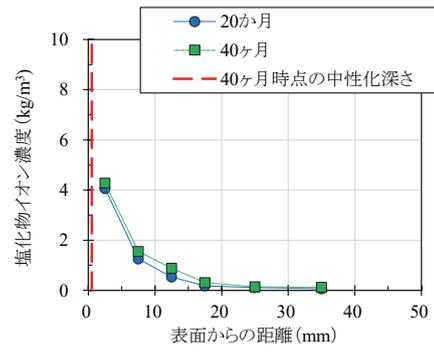


(h)H40FA220(SC28)

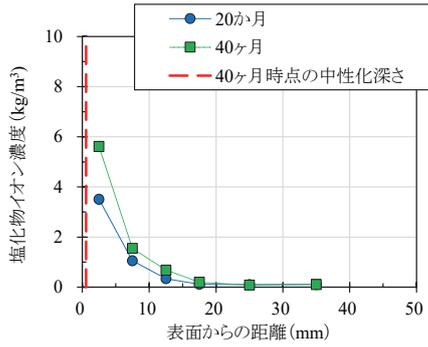
付図-11 塩化物イオン濃度分布と中性化深さの関係(シリーズ I : 沖縄)



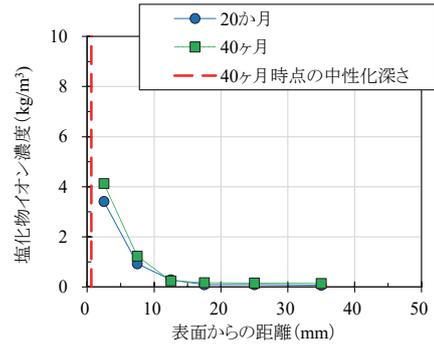
(a)H36(C28)



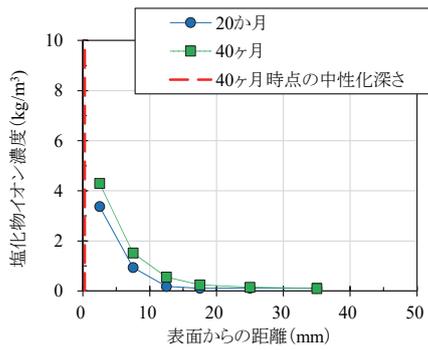
(b)H36(SD)



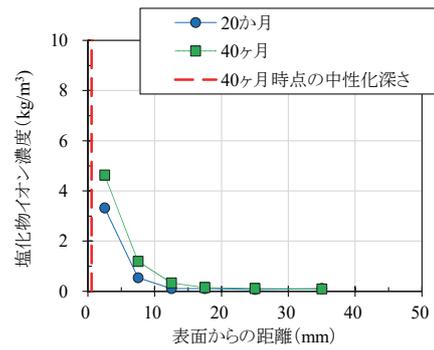
(c)H36SG430(C28)



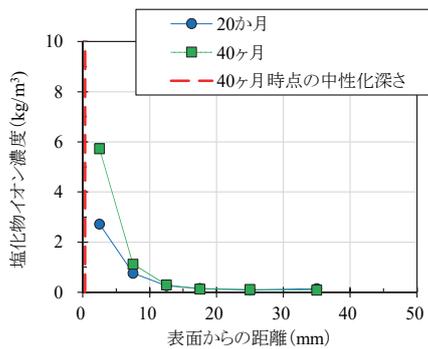
(d)H36SG430(SD)



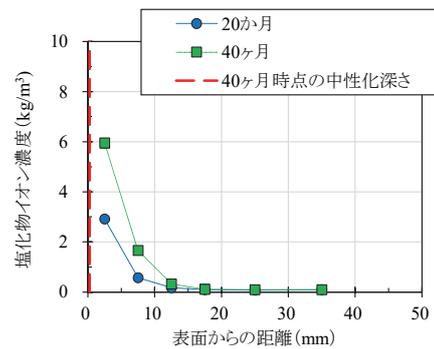
(e)H36SG650(C28)



(f)H36SG650(SD)



(g)H36FA220(C28)



(h)H36FA220(SD)

付図-12 塩化物イオン濃度分布と中性化深さの関係(シリーズ II : 沖縄)

3.2 浸せき試験、非定常電気泳動試験及び電気抵抗率試験

3.2.1 浸せき試験、非定常電気泳動試験及び電気抵抗率試験の概要

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。その片側の切断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、塩水に所定の期間浸せきした。所定の期間浸せきした後、表面から 5mm または 10mm ごとに試料を採取して JIS A 1154 の電位差滴定法によって塩化物イオン濃度を測定し、濃度分布を最小二乗法により式(2)にフィッティングして見掛けの拡散係数 D_{ap} を算出した。供試体の養生方法を付表-11 に示す。シリーズ I とシリーズ II の養生方法は材齢 28 日まで水中養生、シリーズ III の養生方法は、模擬的な蒸気養生後、材齢 14 日まで水中養生として、配合記号の末尾に-S を付している。塩化物イオン濃度は、シリーズ I では 10%、シリーズ II では 3%、シリーズ III では塩化物イオン濃度 3%、10%、20% とした。

非定常電気泳動試験は第 II 部 5 章に示す方法で実施した。電気抵抗率試験は第 II 部 4 章に示す方法で実施し、第 II 部 4 章の 7 節に示す方法で換算後の値を平均した値を用いた。

3.2.2 浸せき試験結果

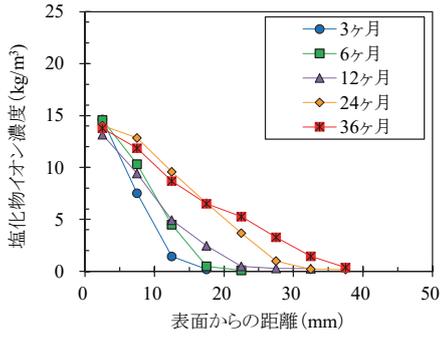
シリーズ II の塩化物イオン濃度分布を付図-13 に、シリーズ III の塩化物イオン濃度分布を付図-14 に示す。なお、いずれの試験結果も、NaCl 溶液濃度 3% のデータを用いた。

早強ポルトランドセメント単味の配合 H36 では、経時的に塩化物イオンが内部に浸透し、浸せき 36 か月で「表面から 35mm の位置」まで塩化物イオンの浸透があったことが確認できる。H36SG430 では、H36 と比較すると、浸せき 36 か月で「表面から 25mm の位置」であり、内部への塩化物イオンの浸透が抑制されているが、経時的に塩化物イオンが浸透しているものと考えられる。一方、H36SG650 と H36FA220 では、塩化物イオンの内部への浸透が、浸せき期間 12 ヶ月以降は明確ではなく、停滞しているように見える。また、シリーズ II とシリーズ III の早強ポルトランドセメント単味の配合を比較すると、塩化物イオン濃度分布は、概ね等しく、蒸気養生の影響はないものと考えられる。

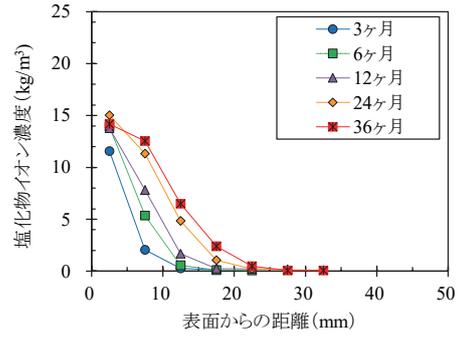
付表-11 供試体の養生方法

シリーズ	養生方法	コンクリート打込み後の取扱い
I, II	水中養生	20°C の室内で封緘養生、翌日に脱型して材齢 28 日まで、20°C の養生槽で水中養生
III	模擬蒸気養生 + 水中養生	恒温恒湿槽内で蒸気養生を模擬した温度履歴を与え、翌日に脱型して材齢 14 日まで 20°C の養生槽で水中養生

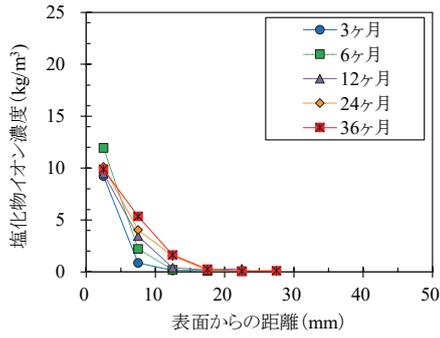
※蒸気養生を模擬した温度履歴: 十分に湿らせた養生マットで供試体の上面を覆い、20°C で 3 時間の前養生、50°C まで 2 時間で昇温、50°C を 6 時間維持、20°C まで 5 時間で降温



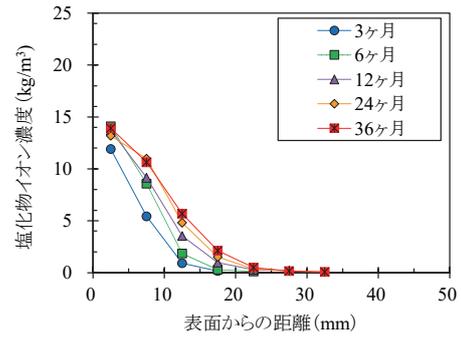
(a)H36



(b)H36SG430

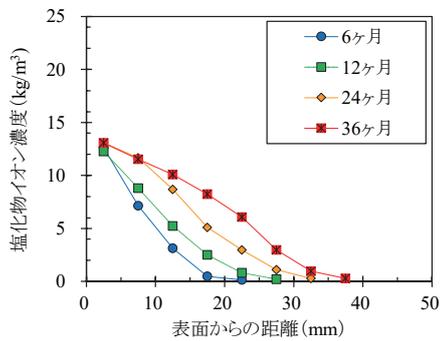


(c)H36SG650

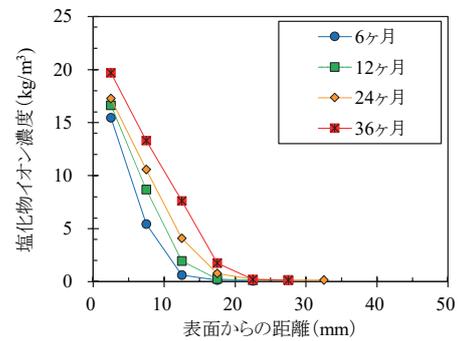


(d)H36FA220

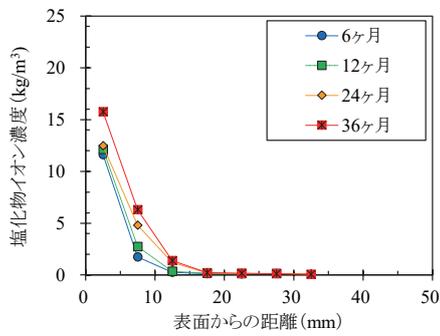
付図-13 塩化物イオン濃度分布(シリーズII 塩化物イオン濃度 3%)



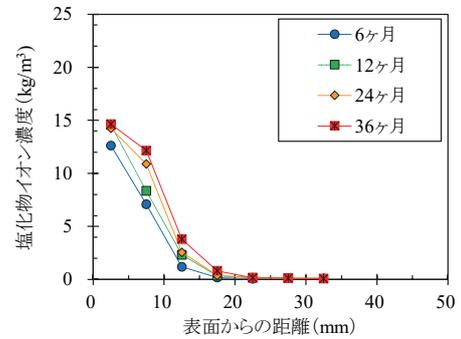
(a)H36



(b)H33SG430

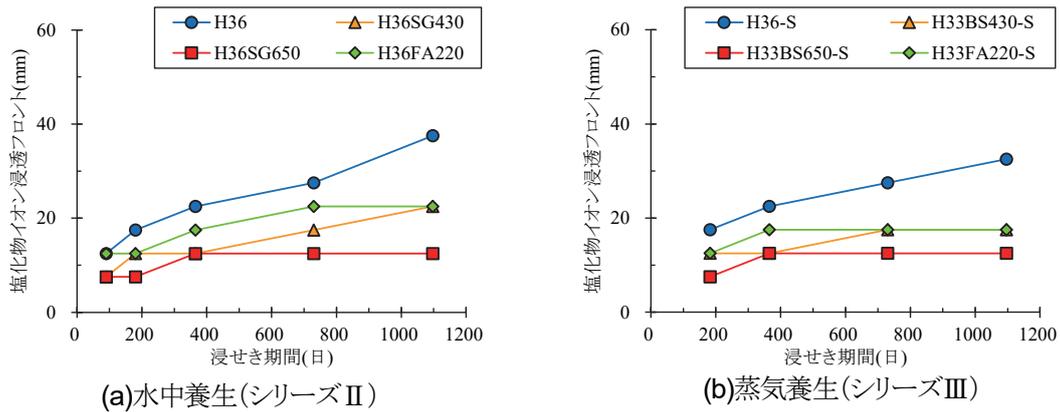


(c)H33SG650

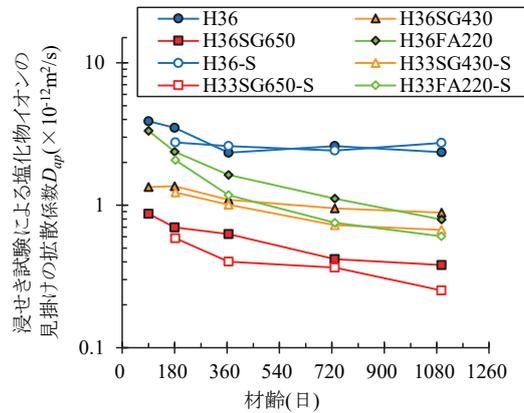


(d)H33FA220

付図-14 塩化物イオンの濃度分布(シリーズIII 塩化物イオン濃度 3%)



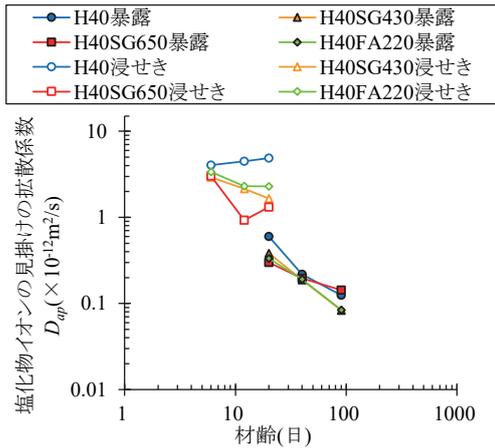
付図-15 浸せき試験における塩化物イオン浸透フロントの経時変化



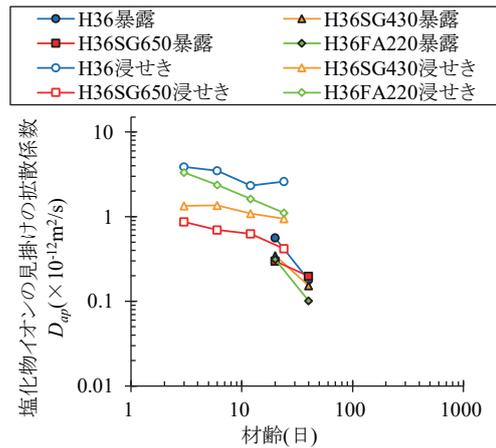
付図-16 浸せき試験による見掛けの拡散係数 D_{ap} の経時変

塩化物イオン浸透フロントの経時変化を付図-15 に示す。ここで、塩化物イオン浸透フロントは、塩化物イオン濃度が 0.3kg/m^3 を超えた試料の midpoint までの距離と定義した。H36, H36SG430, H33SG430 では、経時的に塩化物イオン浸透フロントが増加しているのに対し、H36SG650, H33SG650, H36FA220, H33FA220 では、浸せき 12 ヶ月以降に、塩化物イオン浸透フロントが停滞した。このことから、水結合材比が 36%以下で、早強ポルトランドセメントの重量比 50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換したコンクリート及び早強ポルトランドセメントの重量比 20%をフライアッシュ II 種で置換したコンクリートでは、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が特に高いと考えられる。

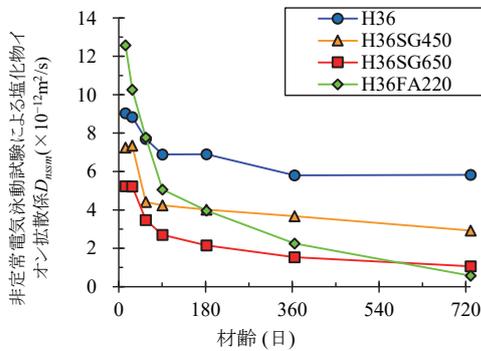
見掛けの拡散係数 D_{ap} の経時変化を付図-16 に示す。この結果、早強ポルトランドセメント単味の供試体(H36)及び高炉スラグ微粉末 6000 を用いた供試体(H36SG650, H33SG650)では、塩化物イオン浸透フロントの経時的な増加あるいは停滞を見掛けの拡散係数で区別できることが確認された。一方で、高炉スラグ微粉末 4000 を用いた供試体(H36SG430, H33SG430)では塩化物イオン浸透フロントが経時的に増加しているのに対し、フライアッシュ II 種を用いた供試体(H36FA220, H33FA220)では塩化物イオン浸透フロントが停滞しているが、見掛けの拡散係数は同程度であり区別することは困難であった。これは、浸せきの開始材齢が 20 日または 50 日であり、ポズラン反応が顕著になる以前に塩化物イオンが浸透した影響であると考えられる。



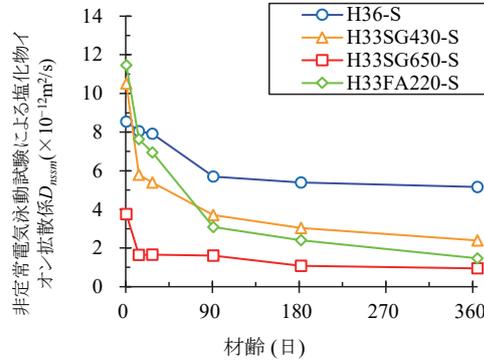
付図-17 暴露試験及び浸せき試験による拡散係数の経時変化(シリーズ I)



付図-18 暴露試験及び浸せき試験による拡散係数の経時変化(シリーズ II)



付図-19 非定常電気泳動試験の結果(シリーズ II)



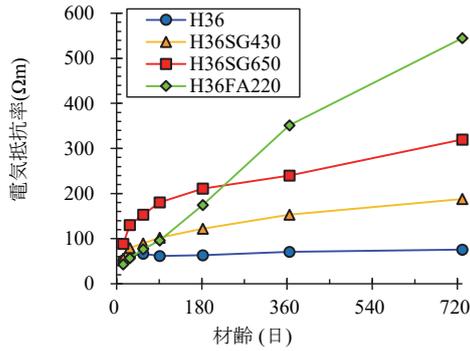
付図-20 非定常電気泳動試験の結果(シリーズ III)

3.2.3 暴露試験と浸せき試験

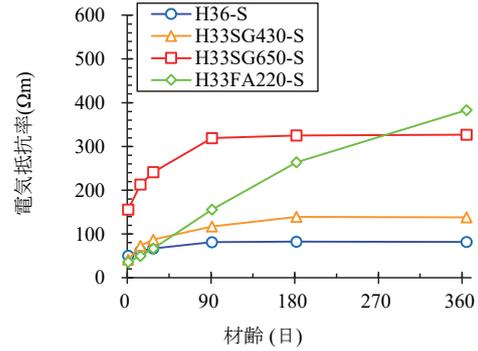
暴露試験及び浸せき試験における見掛けの拡散係数の経時変化を付図-17 と付図-18 に示す。浸せき試験における見掛けの拡散係数は、浸せき期間においてほぼ一定となっている。一方、暴露試験では、暴露期間が長くなるにつれて見掛けの拡散係数は低下する傾向が確認できる。また、浸せき試験の結果と比較すると、低下の度合いが大きい。これは、浸せき試験では供試体が飽和状態にあるのに対し、暴露試験では乾燥状態となることに起因すると推察される。また、浸せき試験から得られる見掛けの拡散係数は、暴露試験の場合と比較し大きい値を示している。例えば、浸せき期間及び暴露期間を 20 ヶ月として比較すると 1.5~8 倍になる。このことは、既往の研究でも報告されている⁵⁾⁶⁾。

3.2.4 非定常電気泳動試験及び電気抵抗率

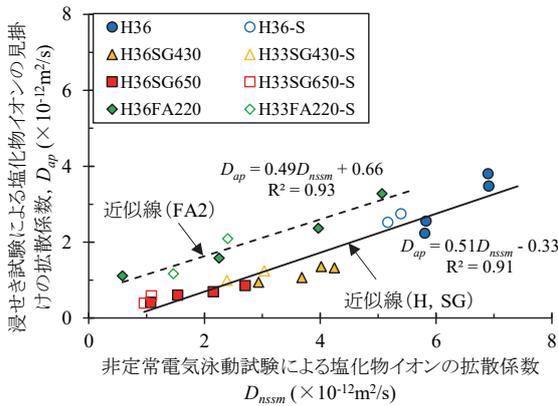
シリーズ II において、非定常電気泳動試験から得られた塩化物イオン拡散係数を付図-19 に示す。全ての供試体において、 D_{nssm} は材齢の経過に伴って減少し、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が長期的に向上したことがわかる。ただし、 D_{nssm} の大小と経時変化の傾向は、結合材によって異なった。例えば、高炉スラグ微粉末を用いた供試体(H36SG430, H36SG650)の D_{nssm} は、早強ポルトランドセメントを用いた供試体(H36)よりも常に小さくなった。一方、フライアッシュを用いた供試体(H36FA220)の D_{nssm} は、材齢 56 日以降で H36 よりも小さくなった。H36FA220 では、フライアッシュのポゾラン反応によって、他の供試体よりも長期の材齢で塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効



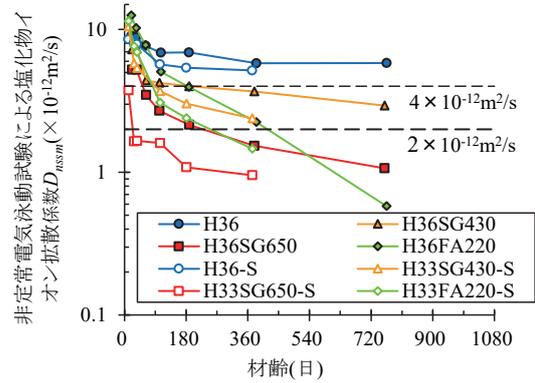
付図-21 電気抵抗率の測定結果(シリーズII)



付図-22 電気抵抗率の測定結果(シリーズIII)



付図-23 見掛けの塩化物イオン拡散係数 D_{ap} と非常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}



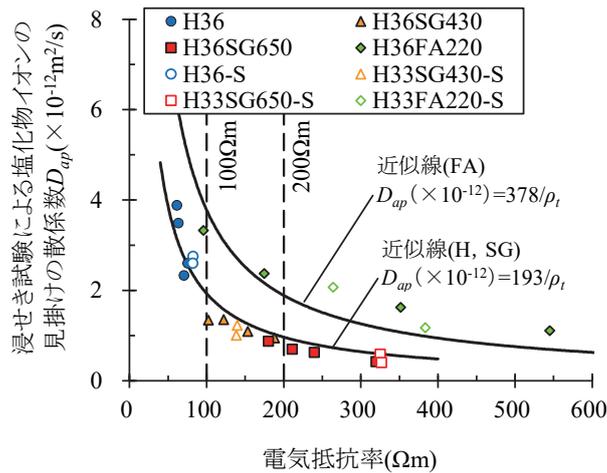
付図-24 塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} の経時変化

果が現れたためと考えられる。

次に、シリーズIIIにおいて、非常電気泳動試験から得られた塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を付図-20 に示す。高炉スラグ微粉末 6000 を用いた供試体(H33SG650)では材齢 1 日以降、高炉スラグ微粉末 4000 を用いた供試体(H33SG430)とフライアッシュを用いた供試体(H33FA220)では材齢 14 日以降で、 D_{nssm} が早強ポルトランドセメントを用いた供試体(H36)よりも小さくなった。シリーズIIIでは、コンクリート打込み後に蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたこと、H33SG430、H33SG650、H33FA220 において水結合材比を低く設定したことから、高炉スラグやフライアッシュの使用による塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効果がシリーズ I よりも早期に現れたと考えられる。

以上を踏まえると、非常電気泳動試験では、試験実施時点での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が可能であるため、高炉スラグやフライアッシュの使用による塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効果に加えて、材齢の経過に伴う塩化物イオン浸透に対する抵抗性の変化を把握することができると考えられる。

シリーズIIの電気抵抗率試験の結果を付図-21、シリーズIIIの電気抵抗率試験の結果を付図-22 に示す。高炉スラグ微粉末を用いた供試体(H36SG430、H36SG650、H33SG430、H33SG650)とフライアッシュを用いた供試体(H36FA220、H33FA220)の電気抵抗率は、材齢の経過に伴って増加し、早強ポルトランドセメントを用いた供試体(H36)よりも大きくなった。H36FA220 では、この傾向が材齢 56 日以降で明確に現れ、付図-19 と付図-20 で D_{nssm} が大幅に低下した材齢と概ね一致した。



付図-25 見掛けの塩化物イオン拡散係数 D_{ap} と電気抵抗率の関係

3.2.5 浸せき試験と非定常電気泳動試験

浸せき試験による見掛けの拡散係数 D_{ap} と非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を付図-23 に示す。同図では、浸せき試験と非定常電気泳動試験の結果は、もっとも近い材齢の試験結果を用いた。全体の傾向として、 D_{ap} と D_{nssm} は、相関関係にあることを確認できる。3.2.2 項で塩化物イオンの浸透が停滞した高炉スラグ微粉末 6000 を用いた配合とフライアッシュを用いた配合では、見掛けの拡散係数 D_{ap} の傾向は異なった。高炉スラグ微粉末 6000 を用いた配合では、ほかの配合よりも見掛けの拡散係数 D_{ap} が小さい値を示し、フライアッシュを用いた配合では、高炉スラグ微粉末 6000 を用いた配合よりも大きい値を示した。これは、フライアッシュのポゾラン反応が顕著になる以前に塩化物イオンが浸透した影響で見掛け上、拡散係数が大きくなったためと考えられる。

塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} の経時変化を付図-24 に示す。浸せき 365 日以降に塩化物イオンの浸透が停滞したことも踏まえて、塩化物イオン浸透に対する抵抗性を分類すると、1)早強ポルトランドセメント単味の場合、2)高炉スラグ微粉末 4000 を置換率 30% で用いた場合、3)高炉スラグ微粉末 6000 を置換率 50% またはフライアッシュを置換率 20% で用いた場合となり、1)~3)は、 $4 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ と $2 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ を閾値として区分できた。

3.2.6 浸せき試験と電気抵抗率

浸せき試験による見掛けの拡散係数 D_{ap} と電気抵抗率の関係を付図-25 に示す。また、図中には、反比例の関係を仮定し、最小二乗法により得られた近似線も示す。ここでは、3.2.5 項に示すように、フライアッシュを用いたコンクリートではポゾラン反応が顕著になる以前に塩化物イオンが浸透した影響で見掛け上、見掛けの拡散係数 D_{ap} が他の混和材を用いた場合と比較して大きくなることから、単独で近似曲線を算出した。

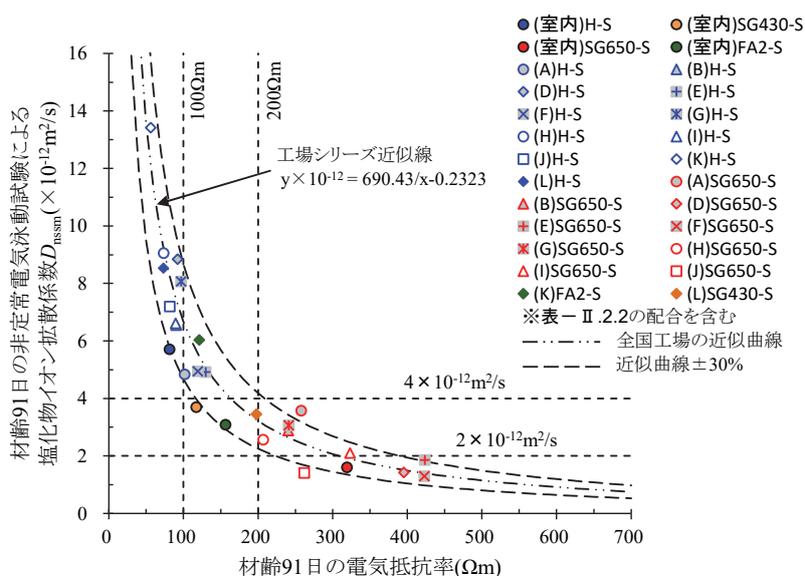
全体の傾向として、供試体の種類や材齢に関わらず、両試験結果は、概ね反比例の関係であることを確認できる。浸せき試験で 365 日以降に塩化物イオンの浸透が停滞したこと、及び見掛けの拡散係数 D_{ap} と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} は相関関係があることを踏まえ、迅速な評価が可能であるという観点から、非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率を分類すると、付表-12 のように区分できた。

3.2.7 全国各地の工場のコンクリートの塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率の関係

付図-26 に全国各地の PCaPC 工場で使用されているコンクリートの塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率の関係を示す。なお、同図には、これらが反比例の関係にあると仮定して回帰した近似曲線及び本検討で得られた試

付表-12 塩化物イオン浸透抵抗性の分類

塩化物イオン浸透に対する抵抗性に 応じた方針の区分	非定常電気泳動試験による 塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	電気抵抗率 (Ωm)	各区分に対応する結合材の例 (水結合材比: 32~40%)
区分1 塩害の影響度合いが最も厳しい区分 では、かぶりのみでは防食できず、 塗装鉄筋等を併用	4 <	< 100	早強ポルトランドセメント単味
区分2 塩害の影響度合いが最も厳しい区分 でも、100年間で、かぶり70mm位置の 塩化物イオン濃度が腐食限界値に 達しない	2 ~ 4	100 ~ 200	早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末4000(置換率30%)
区分3 塩化物イオンの浸透が停滞するため 塩害の影響を受けない	< 2	200 <	早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末6000(置換率50%) 早強ポルトランドセメント + フライアッシュII種(置換率20%)



H: 早強ポルトランドセメント単味
 SG650: 早強ポルトランドセメントの重量比50%を高炉スラグ微粉末6000で置換
 SG430: 早強ポルトランドセメントの重量比30%を高炉スラグ微粉末4000で置換
 FA2: 早強ポルトランドセメントの重量比15%あるいは20%をフライアッシュII種で置換
 ※()内: 工場名
 ※工場製作の供試体は製品と同一条件の蒸気養生(前養生: 3~11h, 最高温度: 40~60°C, 最高温度保持時間: 3~8h)後、試験材齢まで20°C水中養生
 ※室内試験: 蒸気養生を模擬した温度履歴(20°Cで3時間前養生, 50°Cまで2時間で昇温, 50°Cを6時間保持, 20°Cまで5時間で降温)を付与後、試験材齢まで20°C水中養生

付図-26 全国各地のPCaPC工場における塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率の関係

験値が概ねその範囲内となる近似曲線±30%の線を示した。図全体を俯瞰すると、付図-25と同様に、塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率は反比例となることが確認された。また、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は電気抵抗率の範囲が明確に異なっており、混和材を使用することで塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効果を、電気抵抗率により評価できるものと考えられる。

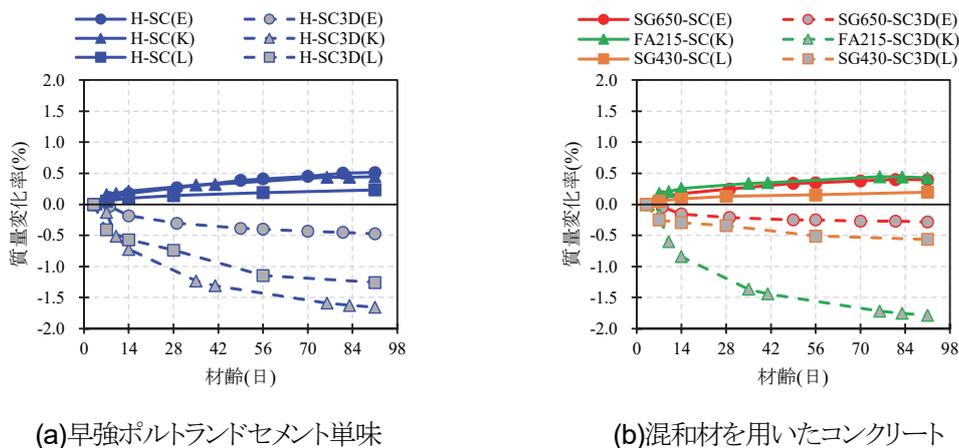
3.2.8 蒸気養生後の養生方法が塩化物イオン浸透に対する抵抗性に与える影響

電気抵抗率試験に用いる供試体は含水状態が均一となるように水中養生を標準としている。一方、PCaPC 部材は初期の養生後は大気環境下に置かれるため、その保管条件の違いが塩化物イオン浸透に対する抵抗性に及ぼす影響を確認する必要がある。ここでは、全国各地の PCaPC 工場で作製した供試体を用いて、養生条件がコンクリートの質量変化と電気抵抗率及び塩化物イオン拡散係数 D_{rsm} に与える影響を検討した結果を示す。なお、実験は、第1期と第2期に分けて実施した。第1期では3工場(付図-26中のE, K, L工場)で、第2期では2工場(付図-26中のA, I工場)で実施した。第1期では、単一の打設日において供試体3体を製作した。第2期では、複数の打設日(連続する3日間)において、1日あたり3体の供試体を製作した。

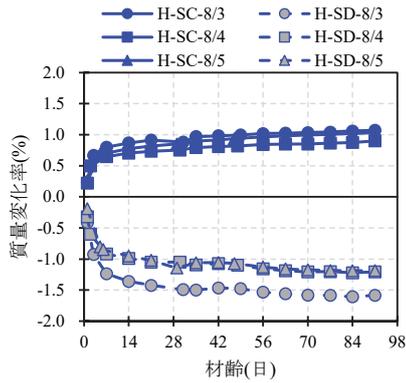
供試体の養生条件は、気中養生と水中養生の2種類とした。まず、第1期での条件について説明する。気中養生は、蒸気養生後に脱型して水温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の養生槽内で材齢3日まで水中養生を行ったのち、試験材齢まで室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の室内に静置する条件とした。水中養生は、蒸気養生後に脱型して、試験材齢まで水温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の養生槽内に静置する条件とした。次に、第2期での条件について説明する。第1期よりも厳しい乾燥条件を検討するため、気中養生は、蒸気養生後に脱型して、試験材齢まで室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の室内に静置する条件とした。水中養生は、第1期と同様の条件とした。

付図-27、付図-28に供試体の質量の経時変化(3体の平均値)を示す。質量変化率は、気中養生を開始した時点で測定した質量から各材齢で測定した質量を差し引いた値を気中養生開始時点の質量で除すことで求めた。まず、第1期及び第2期における早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに着目すると、各工場の供試体で質量変化率は大きく異なった。これは、配合や骨材の吸水率の差によるものと考えられる。

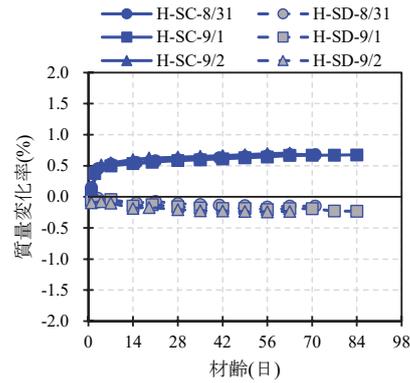
次に、第1期及び第2期における混和材を用いたコンクリートに着目すると、高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、乾燥による質量減少率は、同一工場で作製した早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに比べて小さくなった。高炉スラグ微粉末の使用や水結合材比が異なることにより、緻密なコンクリートとなり乾燥しにくかったことが考えられる。一方で、フライアッシュを用いたコンクリートの質量減少率は、同一工場の早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同程度であった。



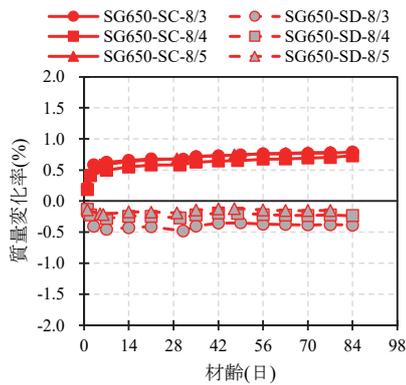
付図-27 質量の経時変化(第1期)



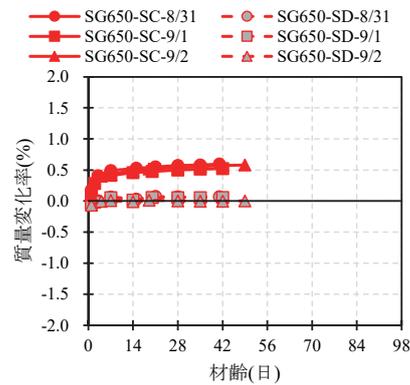
(a)早強ポルトランドセメント単味(A工場)



(b)早強ポルトランドセメント単味(I工場)



(c)早強ポルトランドセメント単味(A工場)



(d)早強ポルトランドセメント単味(I工場)

付図-28 質量の経時変化(第2期)

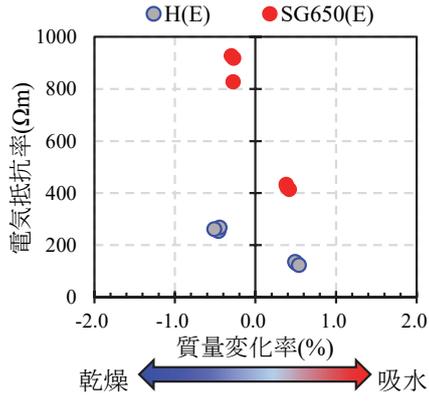
付図-29, 付図-30 に気中養生開始時点からの質量変化率と電気抵抗率及び非定常電気泳動試験より得られる塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} の関係を示す。

まず、第1期及び第2期の高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートに着目すると、塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} は脱型後の養生条件に関わらず同程度の値を示した。この結果、塩化物イオン浸透に対する抵抗性は同程度と考えられる。一方で、電気抵抗率は乾燥すると大きくなることが確認された。質量変化率としては他の配合より変化が小さいが、水分が減少したことにより空隙水の連続性が低下し、電気抵抗率が増加したと考えられる。

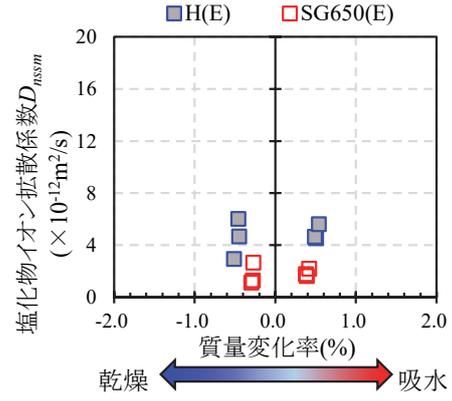
次に、第1期の早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに着目すると、K工場の供試体では、気中養生の場合塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} が増加し、脱型後の養生条件により塩化物イオン浸透に対する抵抗性への影響が確認された。一方で、L工場の供試体では若干の増加、E工場の供試体ではほとんど変化なしと傾向が異なった。

第2期の早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに着目すると、A工場、I工場ともに気中養生の場合に塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} が増加した。蒸気養生直後から気中養生とした条件では、乾燥の影響がより顕著になると考えられる。

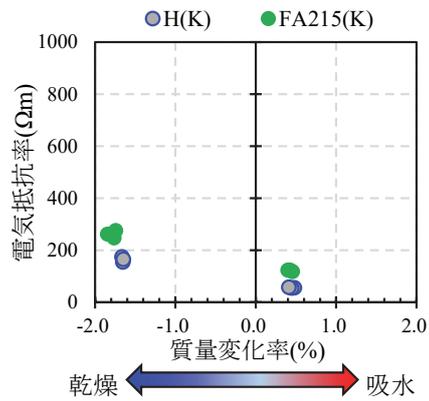
第1期のフライアッシュを混和したコンクリートに着目すると、同一工場の早強ポルトランドセメント単味のコンクリートと同様に、乾燥の影響により電気抵抗率及び塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} が増加する傾向が確認された。これは、乾燥の条件下では、ポズラン反応に必要なセメントの水和生成物である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量が減少し、材齢91日時点ではポズラン反応による組織の緻密化が顕著になっていないためと考えられる。



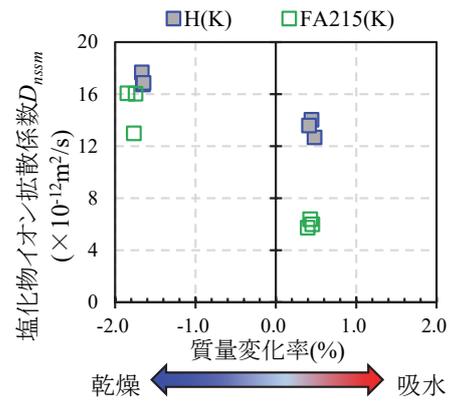
(a)E 工場 質量変化率と電気抵抗率



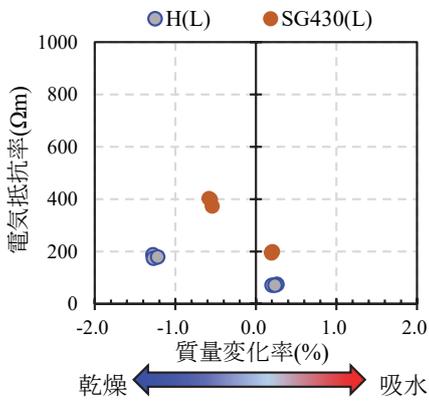
(b)E 工場 質量変化率と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}



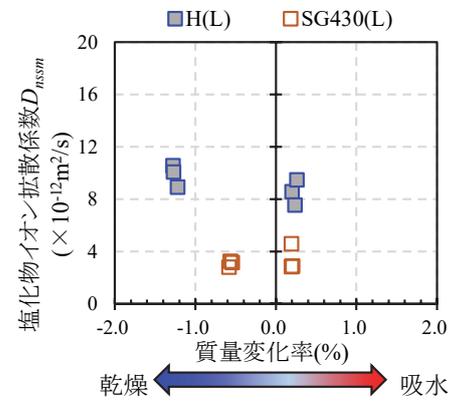
(c)K 工場 質量変化率と電気抵抗率



(d)K 工場 質量変化率と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}

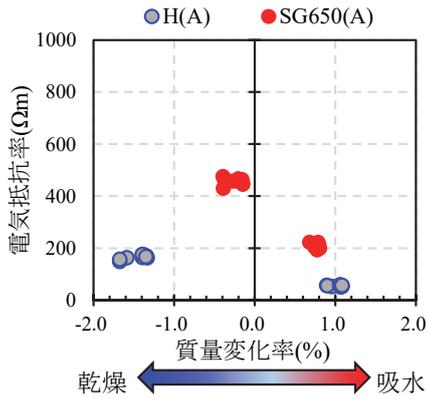


(e)L 工場 質量変化率と電気抵抗率

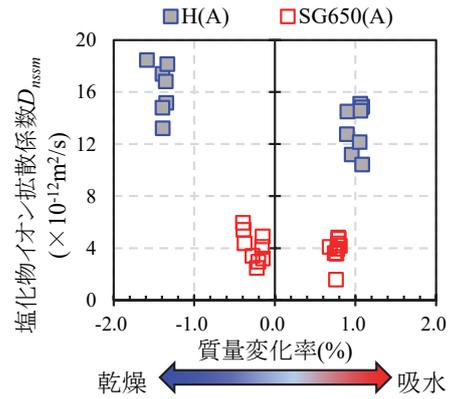


(f)L 工場 質量変化率と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}

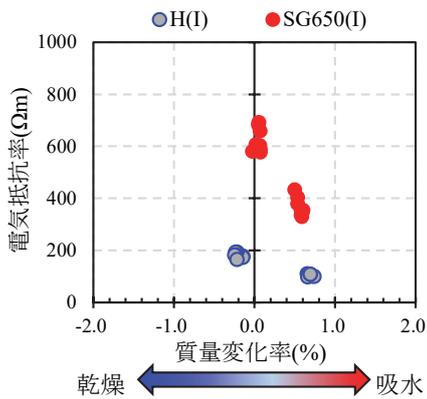
付図-29 質量変化率と電気抵抗率及び塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} (第1期)



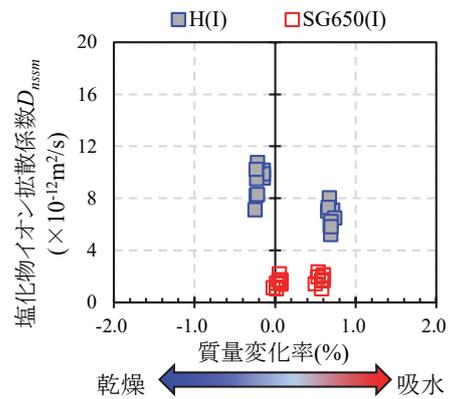
(a)A 工場 質量変化率と電気抵抗率



(b)A 工場 質量変化率と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}



(c)I 工場 質量変化率と電気抵抗率



(d)I 工場 質量変化率と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}

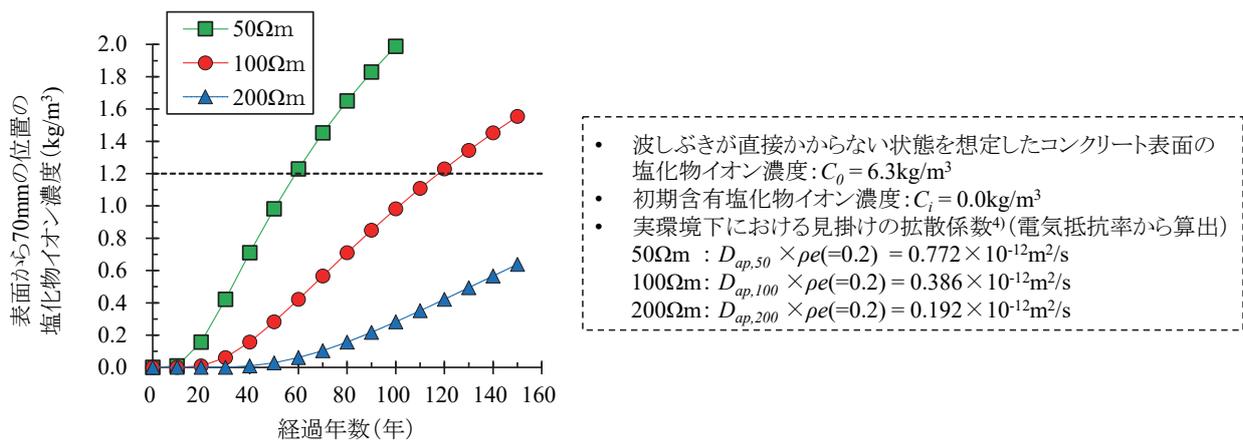
付図-30 質量変化率と電気抵抗率及び塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} (第 2 期)

以上の結果から、高炉スラグ微粉末を用いる等した緻密な PCaPC 用コンクリートは、蒸気養生後の水中養生の期間の大小による塩化物イオン浸透に対する抵抗性の違いは少なく、水中養生を継続した供試体を用いた電気抵抗率試験により製品の塩化物イオン浸透に対する抵抗性を評価してもよいと考えられる。

3.3 電気抵抗率試験の結果と塩化物イオン濃度の将来予測

付図-25 の近似線から電気抵抗率 $100\Omega\text{m}$ の浸せき試験による見掛けの拡散係数を算出すると、 $1.93 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ となる。浸せき試験で得られる見掛けの拡散係数は、コンクリート中の含水率の違い等に起因して、屋外暴露試験等で得られる実環境での見掛けの拡散係数よりも大きくなることが知られている。皆川らの研究⁶⁾では、大気中環境下での暴露試験と浸せき試験によって得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数を比較し、実環境条件を考慮するための係数 ρ_e は 0.2 程度となると報告している。この値を浸せき試験により得られた見掛けの拡散係数 D_{ap} に乗じることで実環境条件下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出すると、 $0.386 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ となる。これらの値と式(2)及び式(3)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。道路橋示方書では、沖縄県や日本海側沿岸部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。

$$C_0 = 1.2C_{air}^{0.4} = 1.2(C_1 d^{-0.6})^{0.4} \quad (3)$$



付図-31 塩化物イオン濃度推定結果

ここに、 C_0 :波しぶきが直接かからない状態を想定した表面の塩化物イオン濃度 (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 (= 0.001km , 海岸線上の場合)である。

コンクリートの表面から 70mm の位置の塩化物イオン濃度の推定結果を付図-31 に示す。ここでは、鋼材腐食発生限界の目安として塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 を破線で示した。

電気抵抗率 $100\Omega\text{m}$ 以上であれば、100 年後の塩化物イオン濃度の推定値は 1.2kg/m^3 以下となった。塩害の影響度合いがもっとも激しい区分においても、100 年後のかぶり 70mm 位置の塩化物イオン濃度が腐食限界値に達しないことが確認できた。

4. 凍結融解に対する抵抗性

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、50%を高炉スラグ微粉末 6000 で置換したコンクリート、20%をフライアッシュ II 種で置換したコンクリートの 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試験 (シリーズ II) と塩害と凍害の複合劣化に対する抵抗性を検討することを目的とした試験 (シリーズ III) を実施した。

4.1 凍結融解試験

4.1.1 凍結融解試験の概要

シリーズ I では、JIS A 1148 A 法に準拠し、標準養生した供試体にて実施した。なお、練上がり直後のフレッシュコンクリートの空気量は 4.8~5.9% の範囲にあった。

シリーズ II では、蒸気養生後、材齢 14 日まで水中養生 (20°C) を行った供試体にて、水中養生終了後直ちに、凍結融解試験を開始した。凍結融解試験は、JIS A 1148 A 法に準拠した温度履歴と試験装置を用いて、溶液を水道水と NaCl 溶液濃度 3%、10% の 3 種類にて実施した。なお、練上がり直後のフレッシュコンクリートの空気量は 3.8~5.4% の範囲にあった。

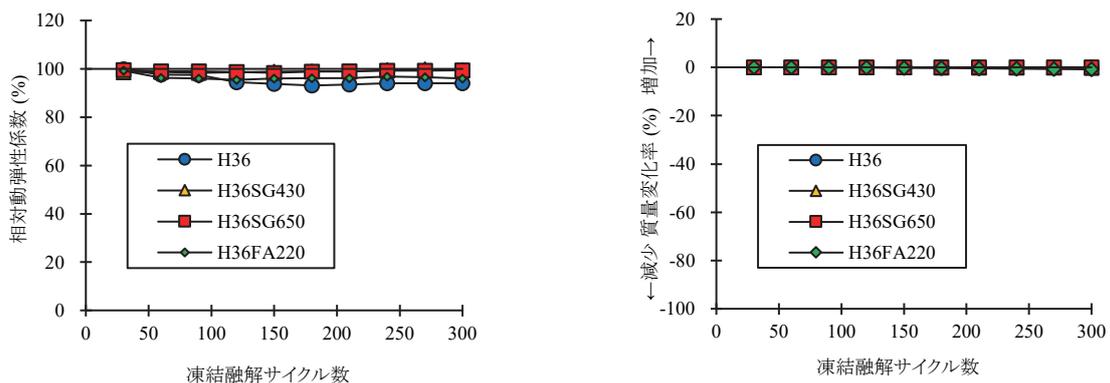
4.1.2 実験結果

シリーズ I の凍結融解試験による相対動弾性係数と質量変化を付図-32 に、凍結融解 300 サイクル後の供試体の状況を付写真-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、化学混和材を用いて 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。

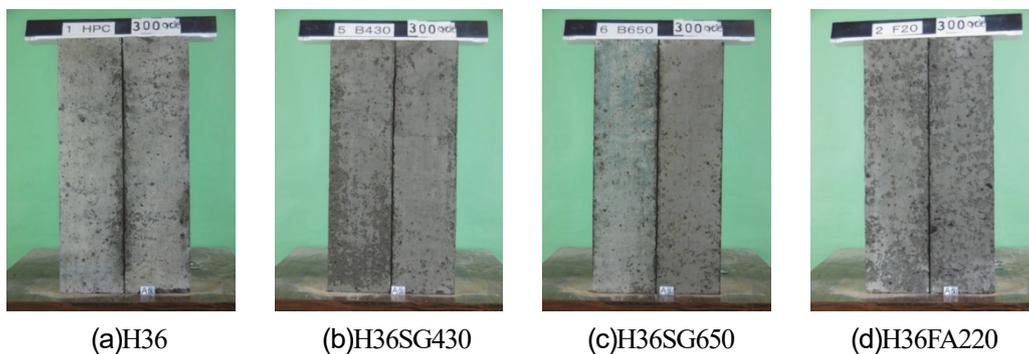
シリーズ II の凍結融解試験による相対動弾性係数と質量変化率を付図-33 に示す。水道水、3%NaCl 溶液、10%NaCl 溶液の結果を比較すると、3%NaCl 溶液の結果が、質量変化率及び相対動弾性係数の変化が大きく、促進条件として厳しかった。

水道水の結果(JIS A 1148 A 法)では、シリーズ I と同様に、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、化学混和材を用いて 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。

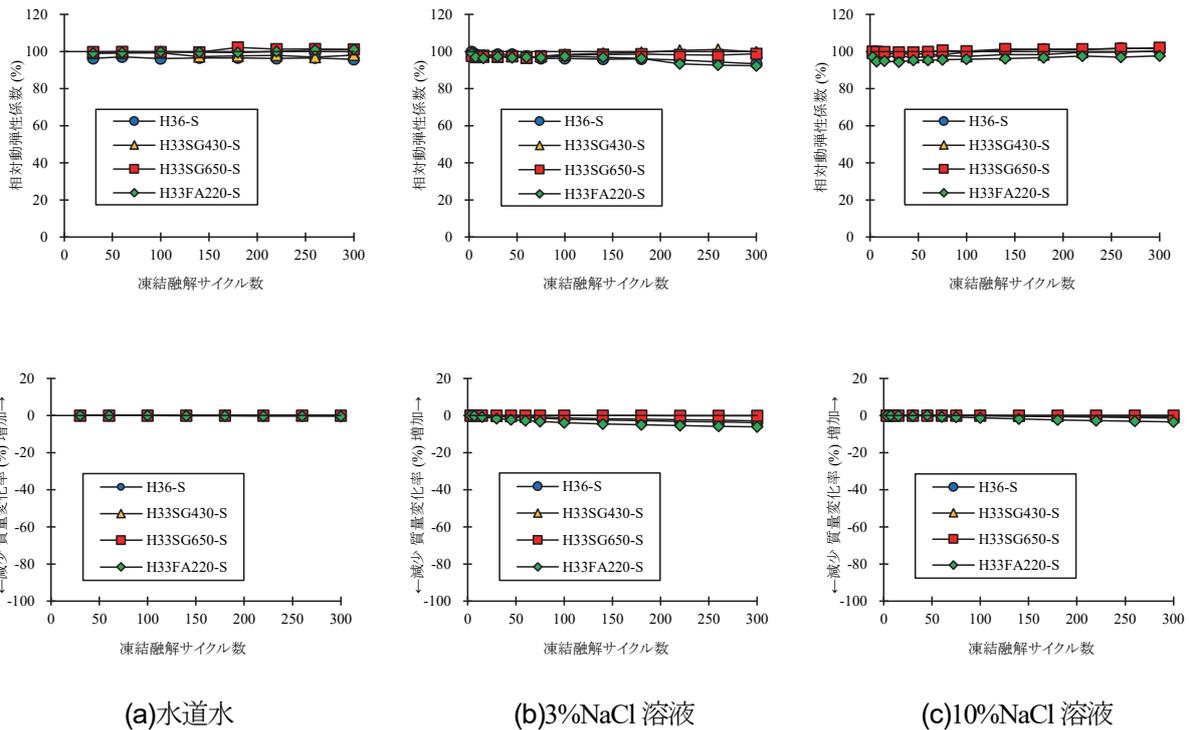
一方で、溶液に NaCl 溶液を用いた試験では、相対動弾性係数は同等ではあるものの、質量変化率は混和材の種



付図-32 相対動弾性係数と質量変化率



付写真-1 凍結融解 300 サイクル後の供試体の状況



付図—33 相対動弾性係数と質量変化率

類により異なる傾向を示した。高炉スラグ微粉末を用いた配合では、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに比べて質量変化率が小さく、フライアッシュを用いた配合では、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに比べて質量変化率が大きくなった。質量の減少率が大きくなった原因は、供試体表面のスケーリングによる劣化の程度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激しくなったためと考えられる。しかし、いずれの供試体においても凍結融解 300 サイクル後の相対動弾性係数は 95%以上であり、凍結融解に対して十分な抵抗性を有していたと考えられる。

5. 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、各種試験を行って検討した。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、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートより大きく、蒸気養生を行ったコンクリートの中性化深さは、標準養生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り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。
- (2) 暴露試験の結果、混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透深さは、養生方法の違いによる塩化物イオン濃度分布への影響はないことを確認した。暴露期間中の塩化物イオン濃度分布の変化はあるものの、塩化物イオンの浸透深さは変化していないこと、中性化に伴う塩化物イオンの濃縮現象は認められないことを確認し

た。

- (3) 室内試験の結果、浸せき試験と非定常電気泳動試験、電気抵抗性試験との相関性を確認し、浸せき試験の塩化物イオン浸透の停滞と非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数、電気抵抗率による指標を提案した。電気抵抗率 $100\ \Omega\ m$ 以上であれば、100年後の塩化物イオン濃度の推定値は $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 以下となった。道路橋示方書において塩害の影響度合いがもっとも激しい区分においても、100年後のかぶり 70mm 位置の塩化物イオン濃度が腐食限界値に達しないことが確認できた。
- (4) 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。ただし、塩害と凍結融解抵抗性を想定した試験では、相対動弾性係数は同等ではあるものの、フライアッシュを用いた配合では、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートに比べて質量変化率が大きくなった。

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編, 2017.
- 2) 気象庁ホームページ:気象統計情報, 各種データ・資料, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html>
- 3) 土木学会:2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], 2017.
- 4) 国立研究開発法人土木研究所, 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会, 株式会社大林組, 大成建設株式会社, 前田建設工業株式会社, 戸田建設株式会社, 西松建設株式会社, 鉄鋼スラグ協会, 電源開発株式会社:低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(I)ー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)ー, 共同研究報告書第471号, pp.57-58, 2016.
- 5) 田中良樹, 藤田学, 河野広隆, 渡辺博志:高強度コンクリートの塩化物浸透抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.517-522, 2001.
- 6) 皆川浩, 中村英佑, 藤井隆史, 綾野克紀:大気中環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol41, No.1, pp.767-772, 2019.

付録－4 産地の異なる混和材の塩化物イオン浸透に対する抵抗性の比較

1. 概要

付録－3 及び付録－5 において、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを使用した PCaPC 部材は高い塩化物イオン浸透に対する抵抗性を有することを示した。しかし、それらは限られた材料を用いた試験であり、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の使用材料の種類によっては塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効果が異なる可能性がある。そこで、異なる産地の混和材や骨材を用いたコンクリートを対象に塩化物イオン浸透に対する抵抗性の検討を行った結果を示す¹⁾。

2. 実験方法

2.1 コンクリートの配合と基礎物性

検討に用いたコンクリートの配合を付表－1～付表－3に、使用したポルトランドセメントの品質を付表－4に示す。配合は計 24 種類である。従来の PCaPC 部材を想定した配合を基本として、結合材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場合、結合材の品質が異なる場合、さらに参考として配合条件が異なる場合などを想定して配合を計画した。

付表－1 コンクリートの配合
(早強または普通ポルトランドセメント単味の場合、高炉セメント B 種を想定した配合)

記号	水結合材比(%)	単体量(kg/m ³)				結合材の構成割合と種別				細骨材種別	スランブ(cm)	空気量(%)
		水	結合材	細骨材	粗骨材	セメント	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	膨張材			
H36	36	165	458	721	968	100%(H)	—	—	—	S	13.5	5.5
H36TH				718			—	—	—	TH	9.5	5.4
H36CR				755			—	—	—	CR	12.5	3.8
H36SL				721			—	—	—	S	20.0	5.0
H36AI				—			—	—	12.5		6.4	
N50				50			330	828	100%(N)		—	—
N65	65	254	889	—	—	—	—	10.5	5.6			
B50	50	330	816	55%(N)	45%(SG4)	—	—	—	11.0	5.8		

付表－2 コンクリートの配合
(高炉スラグ微粉末 6000 を用いた配合)

記号	水結合材比(%)	単体量(kg/m ³)				結合材の構成割合と種別				細骨材種別	スランブ(cm)	空気量(%)		
		水	結合材	細骨材	粗骨材	セメント	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	膨張材					
B33	33	165	500	671	968	50%(H)	50%(SG6N)	—	—	S	12.0	4.0		
B33TH				668				—	—	TH	6.0	3.8		
B33CR				702				—	—	CR	16.5	3.0		
B33SL				671				—	—	S	21.5	3.8		
B33AI								—	—		12.5	2.5		
B33DC								50%(SG6D)	—		—	11.0	3.6	
B33EX				48%(H)				48%(SG6N)	—	4%	—	—	16.5	4.0
B33FA				50%(H)				40%(SG6N)	10%(CB)	—	—	—	10.5	4.8

付表-3 コンクリートの配合
(フライアッシュを用いた配合)

記号	水結合材比(%)	単位量(kg/m ³)				結合材の構成割合と種別				細骨材種別	スランブ(cm)	空気量(%)
		水	結合材	細骨材	粗骨材	セメント	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	膨張材			
F33FN	33	165	500	661	968	80%(H)	—	20%(FN)	—	S	16.0	4.8
F33NS				649			—	20%(NS)	—		15.5	4.4
F33HK				664			—	20%(HK)	—		12.5	4.0
F33CB				656			—	20%(CB)	—		9.5	3.8
F33KS				654			—	20%(KS)	—		15.0	4.8
F33MS				650			—	20%(MS)	—		17.0	4.0
F33AN				656			—	20%(AN)	—		10.0	4.1
F33OK				657			—	20%(OK)	—		16.5	4.1

付表-4 ポルトランドセメントの品質

記号	種類	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	凝結(h-min)		安定性バット法	圧縮強さ(N/mm ²)			
				始発	終結		1d	3d	7d	28d
N	普通ポルトランドセメント	3.16	3270	2-15	3-45	良	—	30.3	47.2	64.2
H	早強ポルトランドセメント	3.14	4650	1-40	2-40	良	25.9	47.2	58.9	68.3

付表-5 高炉スラグ微粉末の品質

記号	種類	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	活性度指数(%)			フロー値比(%)	酸化マグネシウム(%)	三酸化硫黄(%)	強熱減量(%)	塩化物イオン(%)
				7日	28日	91日					
SG4	高炉スラグ微粉末4000	2.89	4370	68	91	105	96	6.21	1.97	0.25	0.005
SG6D	高炉スラグ微粉末6000	2.91	6450	89	99	—	97	6.03	3.61	0.40	0.004
SG6N		2.91	5940	95	114	—	97	5.18	2.98	0.21	0.004

付表-6 フライアッシュの品質

記号	種類	二酸化けい素(%)	湿分(%)	強熱減量(%)	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	フロー値比(%)	活性度指数(%)		MB吸着量(mg/g)
								7日	91日	
FN	フライアッシュ I 種	65.8	0.15	1.9	2.37	5320	108	94	109	—
NS	フライアッシュ II 種	66.5	0.2	2.5	2.14	3810	104	90	103	0.48
HK		57.8	0.1	1.3	2.45	4770	111	91	105	0.34
CB		62.3	0.08	1.8	2.26	3660	107	86	101	0.28
KS		65.3	0.1	1.9	2.23	3650	101	83	99	0.39
MS		61.5	0.1未満	3.1	2.16	3200	104	81	93	0.54
AN		65.5	0.26	2.6	2.26	3750	104	83	100	—
OK		67.9	0.0	0.8	2.28	4700	105	80	94	—

2.1.1 結合材種類

PCaPC 部材を想定した結合材を早強ポルトランドセメント単味のコンクリートでは水結合材比を 36%(以下, H36 シリーズ)とした。また, 材齢初期の圧縮強度を同程度とするために, 結合材の一部を高炉スラグ微粉末で置換した配合(以下, B33 シリーズ)及びフライアッシュで置換した配合(以下, F33 シリーズ)では水結合材比を 33%とした。なお, 膨張材を添加した配合(B33EX)や三成分混合とした配合(B33FA)も併せて検討した。

2.1.2 使用材料

材料品質の違いが各試験の結果に与える影響を検討するため, 複数の産地等から高炉スラグ微粉末(付表-5), フライアッシュ(付表-6), 細骨材(付表-7)を入手して使用した。フライアッシュは, 供給元の発電所により品質が異なること²⁾が知られており, I 種を 1 種類, II 種を 7 種類と数多く集めた。細骨材は品質の異なる 3 種類を使用した。

付表-7 細骨材の品質

記号	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
S	細骨材(川砂)	2.58	1.78	2.67
TH		2.55	3.94	3.33
CR	細骨材(石灰砕砂)	2.64	1.45	—

2.1.3 配合条件

基本とした配合のフレッシュ性状の目標値はスランプ 12cm, 空気量 4.5%であるが, 比較のためこれよりスランプを大きくした 2 配合(H36SL, B33SL), 空気量を大きくした 1 配合(H36AI), 空気量を小さくした 1 配合(B33AI)を設定した。これらは化学混和剤の使用量等によって変化させており, 顕著な材料分離等は生じていない。なお, 本実験では単位水量や単位粗骨材量の条件を一定としたため, 材料によっては, 目標としたスランプ 12cm, 空気量 4.5%からの差が大きい配合もある。

2.1.4 その他の配合条件

比較のために, 普通ポルトランドセメントを用いた水結合材比が 50%の配合(N50)と 65%の配合(N65), 及び高炉セメント B 種相当の結合材を使用した配合(B50)を用意した。全ての配合で単位水量を 165kg/m³, 単位粗骨材量を 968kg/m³とした。

2.2 試験方法

各配合のコンクリートで円柱供試体(φ 100×200mm)を製作し, 圧縮強度試験, 非定常電気泳動試験, 及び浸せき試験を行った。供試体は, コンクリート打込み翌日に脱型し, 各々の試験材齢まで 20°Cの水中養生とした。

2.2.1 圧縮強度の試験方法

圧縮強度試験は, JISA 1108 に準拠し, 材齢 28, 91 日に行った。

2.2.2 非定常電気泳動試験の方法

材齢 91 日まで水温 20°C水中養生を行った円柱供試体を用いて, 第 II 部 5 章に示す方法で, 非定常電気泳動試験を実施した。

2.2.3 浸せき試験の方法

浸せき試験は, 材齢 28 日まで 20°Cの水中養生とした円柱供試体を JSCE-G 572-2018 に準じて加工し, 本検討では, 濃度 3%の NaCl 水溶液に浸せきした。浸せき期間は 180 日とし, その後, 供試体表面から厚さ 5mm ごとに切断して試料を採取し, 電位差滴定法によって塩化物イオン濃度を測定した。また, 塩化物イオン濃度分布を最小二乗法で式(1)にフィッティングし, 浸せき試験から得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数(以下, 塩化物イオンの見掛けの拡散係数)を算出した。

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

ここに, $C(x, t)$: 距離 x と試験期間 t の塩化物イオン濃度(kg/m³), x : コンクリート表面からの距離(m), t : 試験期間(s), C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度(kg/m³), C_i : 初期含有塩化物イオン濃度(kg/m³), D_{ap} : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(m²/s), erf : 誤差関数である。

3. 実験結果と考察

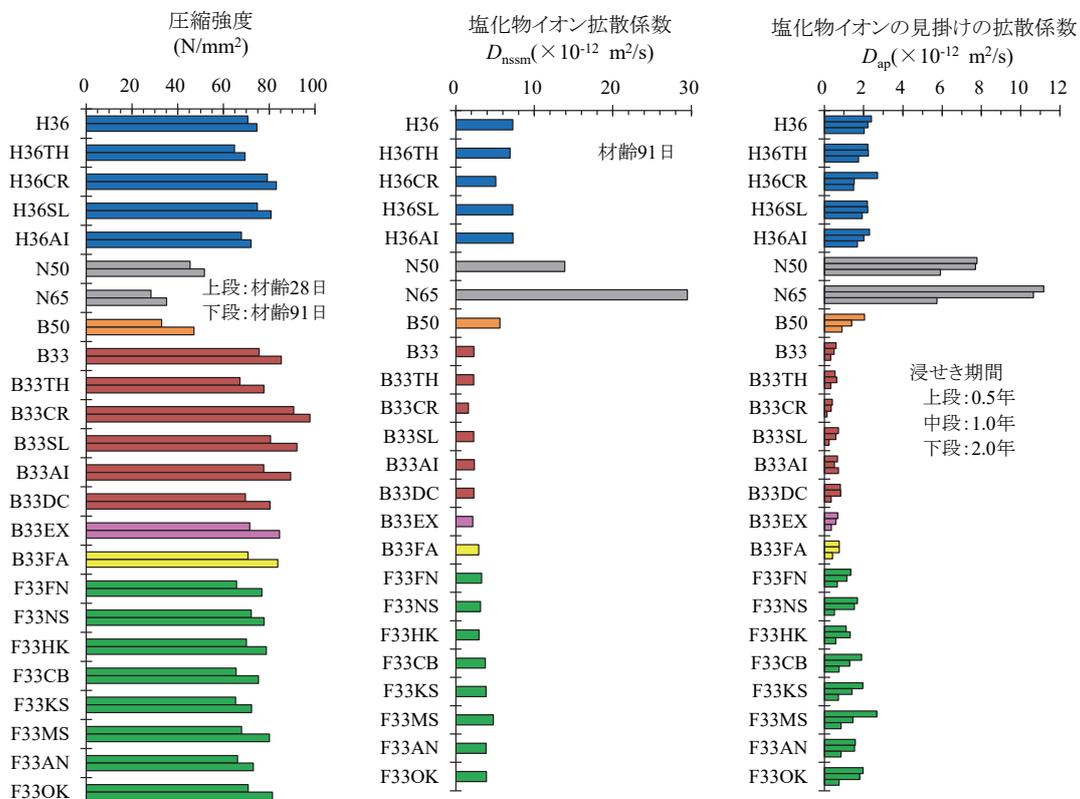
3.1 結合材種類の影響

各試験結果の一覧を付図-1に示す。圧縮強度は、結合材が早強ポルトランドセメント単味のH36シリーズと結合材の一部を混和材で置換したB33シリーズ及びF33シリーズで大きくは変わらなかった。これに対して、非定常電気泳動試験及び浸せき試験では、混和材の使用の有無で試験結果に差があることが確認された。

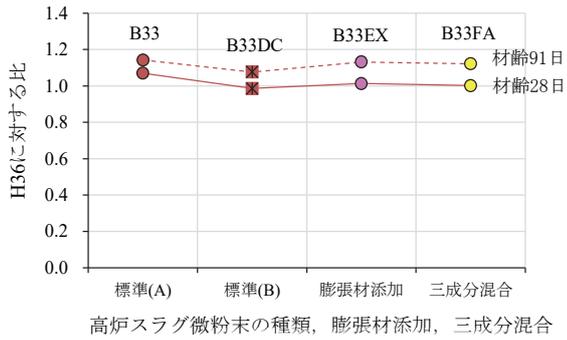
圧縮強度及び塩化物イオン浸透に対する抵抗性に及ぼす高炉スラグ微粉末の種類等の影響を付図-2に、フライアッシュの種類の影響を付図-3示す。それぞれ、ベース配合であるH36に対する比を示している。

付図-2に示すように、高炉スラグ微粉末6000の場合、製造所の違いが塩化物イオン浸透に対する抵抗性に及ぼす影響はほとんど認められなかった(B33, B33DC)。また、膨張材を添加した配合(B33EX)や三成分混合とした配合(B33FA)においても、それらを用いない配合(B33)と比較して塩化物イオン浸透に対する抵抗性に大きな差はみられなかった。

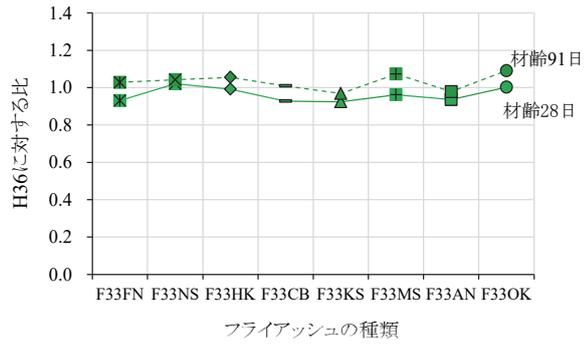
フライアッシュの種類の影響は、付図-3からフライアッシュI種を用いた場合(F33FN)及び発電所が異なる7種類のフライアッシュII種を用いた場合いずれもH36に対して明らかに塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上していることが確認できる。一方、高炉スラグ微粉末を用いた場合と比較すると、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の差がみられる。



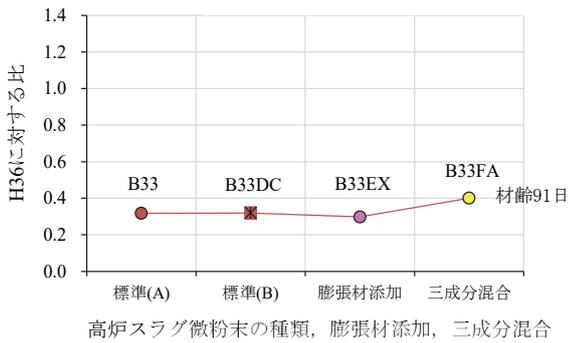
付図-1 各試験の結果一覧



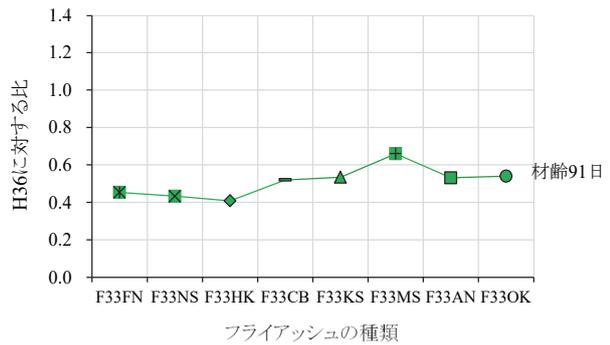
(a)圧縮強度



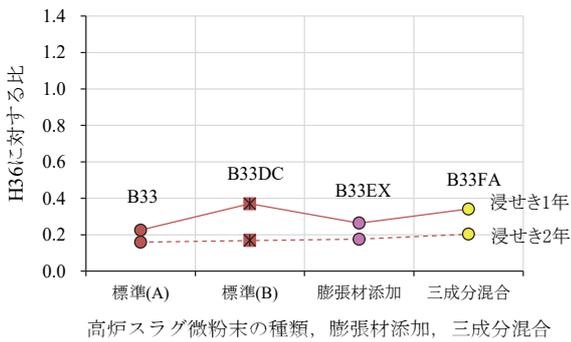
(a)圧縮強度



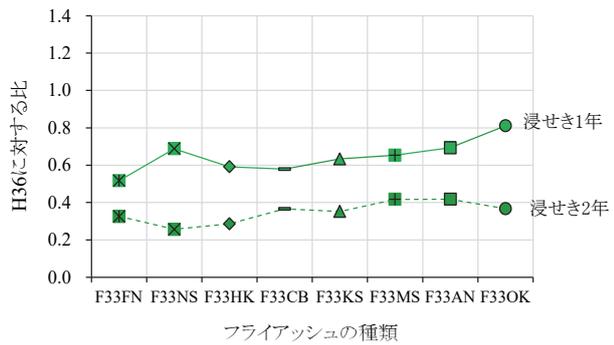
(b)塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}



(b)塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}



(c)塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap}



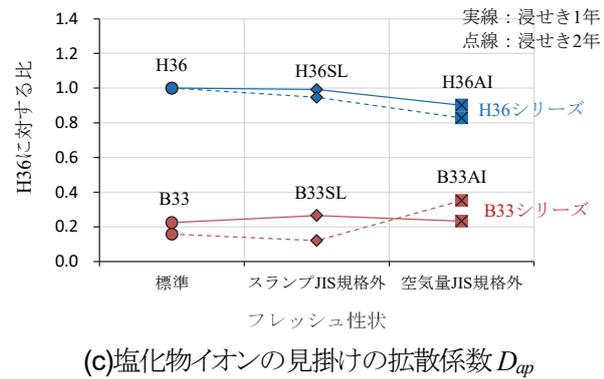
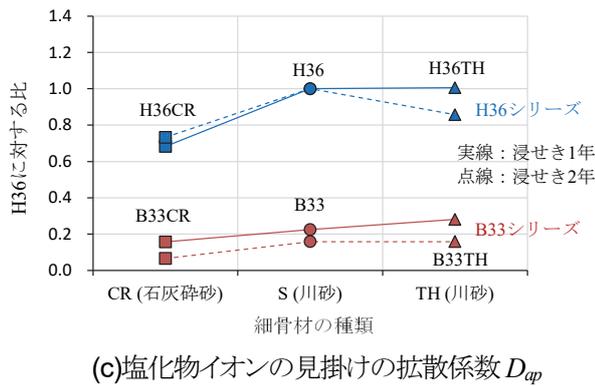
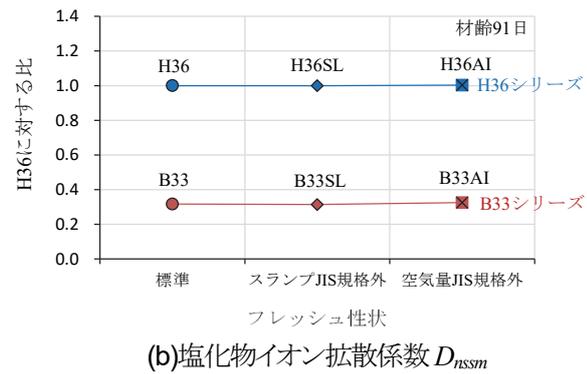
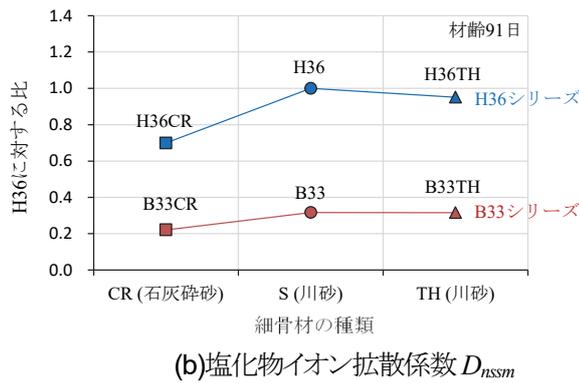
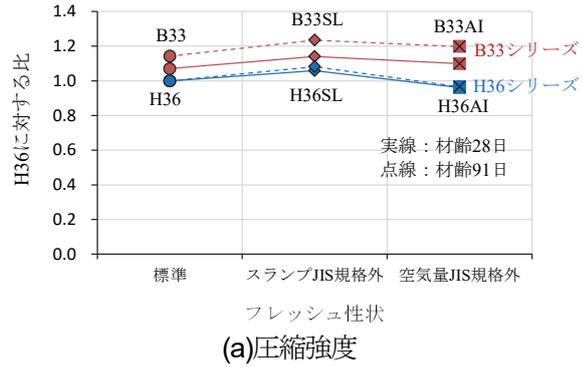
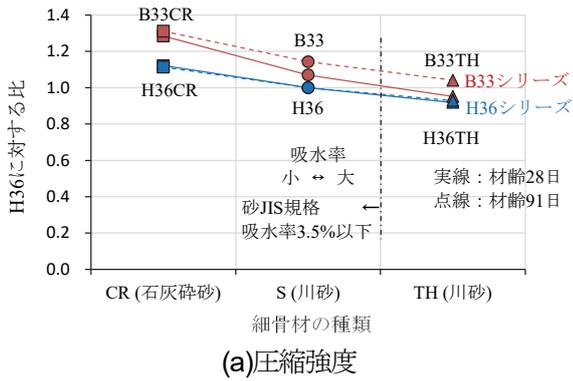
(c)塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap}

付図-2 H36 に対する比
(高炉スラグ微粉末の種類等)

付図-3 H36 に対する比
(フライアッシュの種類)

3.2 細骨材種類の影響

圧縮強度及び塩化物イオン浸透に対する抵抗性に及ぼす細骨材種類の影響を付図-4 に示す。H36 シリーズと比較して高炉スラグ微粉末 6000 を混和材として用いた B33 シリーズは細骨材の種類にかかわらず顕著に塩化物イオン浸透に対する抵抗性は向上した。また、高炉スラグ微粉末使用による塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上効果と比較すると、細骨材の品質が塩化物イオン浸透に対する抵抗性に及ぼす影響は小さいことが確認できる。



付図-4 H36 に対する比
(細骨材の種類)

付図-5 H36 に対する比
(フレッシュ性状)

3.3 フレッシュ性状の影響

圧縮強度及び塩化物イオン浸透に対する抵抗性に及ぼすフレッシュ性状の影響を付図-5 に示す。この図に示すようにフレッシュ性状が異なっても高炉スラグ微粉末の塩化物イオン浸透に対する抵抗性向上効果には及ぼす影響はほとんどみられなかった。

4. まとめ

産地の異なる混和材や骨材を用いたコンクリートを対象として塩化物イオン浸透に対する抵抗性を比較した。以下に得られた知見をまとめる。

- (1) 製造所が異なる 2 種類の高炉スラグ微粉末 6000 を用いて耐久性を比較した結果、製造所の違いが塩化物イオン浸透に対する抵抗性に及ぼす影響は小さかった。
- (2) 発電所が異なる 7 種類のフライアッシュⅡ種を用いて耐久性を比較した結果、発電所の違いが塩化物イオン浸透に対する抵抗性に及ぼす影響は比較的大きいものの、全てのフライアッシュにおいて早強ポルトランドセメント単味と比較すると高い塩化物イオン浸透に対する抵抗性を有していた。
- (3) 高炉スラグ微粉末6000を混和材として用いた場合の塩化物イオン浸透に対する抵抗性向上効果と比較すると、細骨材の品質が塩化物イオン浸透に対する抵抗性に及ぼす影響は小さかった。

参考文献

- 1) 小田部貴憲, 櫻庭浩樹, 俵道和, 古賀裕久:種々の使用材料や配合が異なるコンクリートを用いた電気抵抗率試験の適用性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.65-70, 2020.
- 2) 土木学会:コンクリートライブラリー94 フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), pp.139-144, 1999.
- 3) 中村英佑, 皆川浩, 宮本慎太郎, 久田真, 古賀裕久, 渡辺博志:通電後の塩化物イオン浸透深さをを用いたコンクリートの遮塩性能の評価, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.72, No.3, pp.304-322, 2016.

付録－5 蒸気養生及び蒸気養生後の後養生が耐久性に与える影響

1. はじめに

混和材を用いたコンクリートの物質透過及びコンクリートの劣化に対する抵抗性については付録－3 で示した。ここでは、特に蒸気養生及び蒸気養生後の後養生が耐久性に与える影響について、実験及び文献調査により検討を行った結果を報告する。

一般に、混和材を用いたコンクリートではポルトランドセメント単味のコンクリートに比べて養生の影響が大きく、コンクリート標準示方書¹⁾等においても、標準的な湿潤養生期間はポルトランドセメント単味のコンクリートと比べて長い期間が示されている。一方、工場で製造される PCaPC 部材では混和材の使用の有無に限らず、硬化促進のための蒸気養生が広く行われている(付録－7 参照)。蒸気養生を行なう場合であっても、混和材を用いる場合には養生がコンクリートの品質に与える影響が大きいため、給熱養生(蒸気養生)後に湿潤養生を適切に行う必要がある²⁾とされている。しかし、給熱養生の方法やその後の湿潤養生の方法や期間等については、統一的な見解が得られていないとは言えず、関連する指針類においても試験によって定めるか、既往の文献等を参考に定めてもよいという表現にとどまっているのが現状である。そこで、特に混和材を用いたコンクリートの耐久性に着目して、蒸気養生後の後養生の効果について検討した結果を示す。

2. 実験概要

複数の PCaPC 工場にて早強単味及び混和材を用いたコンクリートを用いて、付写真－1 に示す壁状の供試体を製作した。作製した供試体に対して付表－1 に示す養生を行い、蒸気養生後の後養生が、耐久性に与える影響について検討を行った。各コンクリートの配合を付表－2 に示す。付写真－2 に蒸気養生後の後養生として行った水中養生の状況例を示す。

付表－1 養生方法

記号	養生方法
S	蒸気養生
W3	蒸気養生+材齢3日まで水中養生
W7	蒸気養生+材齢7日まで水中養生
W14	蒸気養生+材齢14日まで水中養生

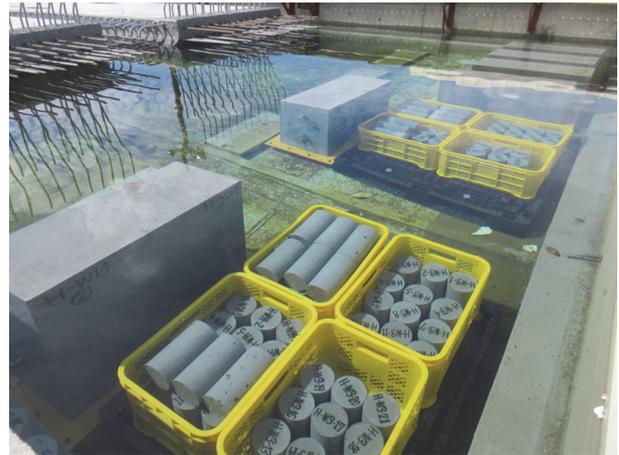
※蒸気養生:注水から約4時間の前養生を行い、昇温速度と最高温度及び保持時間については、各工場の実績により設定

付表－2 コンクリートの配合

工場	配合記号	水結合材比(%)	B (kg/m ³)	結合材の構成割合(%) B=H+SG4+SG6+FA			
				H	SG6	FA	SG4
E	H36	36.0	422	100	-	-	-
	H36SG650	33.0	454	50	50	-	-
K	H36	36.0	420	100	-	-	-
	H33FA215	33.0	458	85	-	15	-
L	H39.5	39.5	380	100	-	-	-
	H34.5SG430	34.5	458	70	-	-	30



付写真-1 壁状供試体(脱型直後)



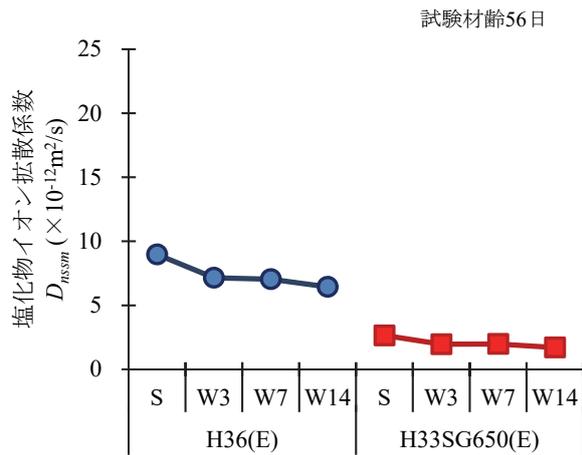
付写真-2 後養生(水中養生)状況の例

3. 塩分浸透抵抗性

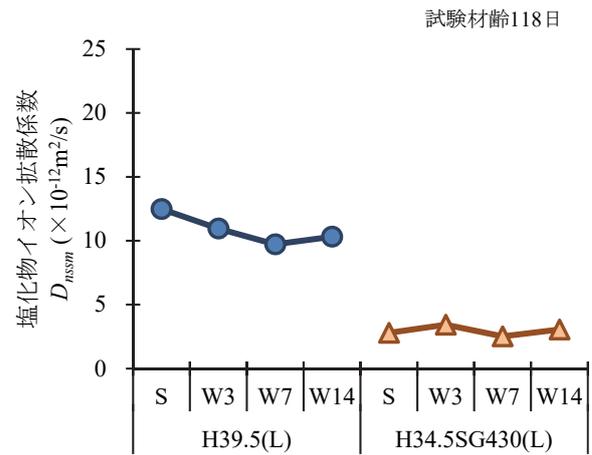
3.1 非定常電気泳動試験

供試体から $\phi 100\text{mm}$ のコア供試体を採取し、非定常法電気泳動試験(第Ⅱ部5章参照)を行なった。供試体は型枠面が陰極側となるようセルに取り付け試験を行なった。付図-1に試験結果より求めた塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} を示す。

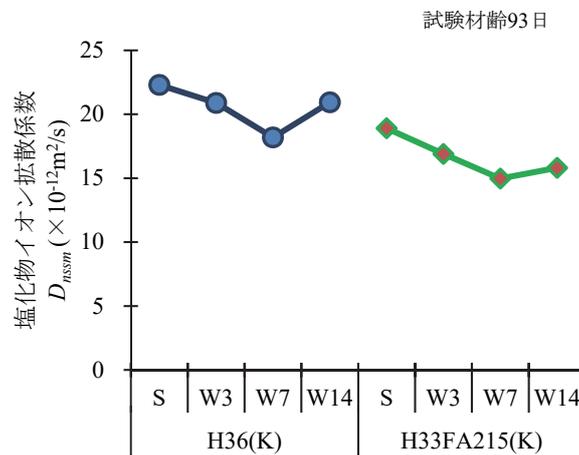
いずれの工場においても、H配合に対して混和材を用いた配合の D_{nssm} は小さくなり、混和材の使用によって塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上していることが確認できる。また、いずれの配合においても、蒸気養生後に後養生を行うことで後養生を行わない条件と比べて D_{nssm} が同程度以下に低減されている。本試験条件では、混和材の使用による D_{nssm} の低減効果は高炉スラグ微粉末の方が高く、フライアッシュの方が低い傾向を示した。これは、付録-3で示した室内試験結果と同様に、本試験を実施した材齢(56~118日)ではフライアッシュのポゾラン反応による組織の緻密化が顕著になる前に塩化物イオンが浸透したためであると考えられる。



(a) H, SG650



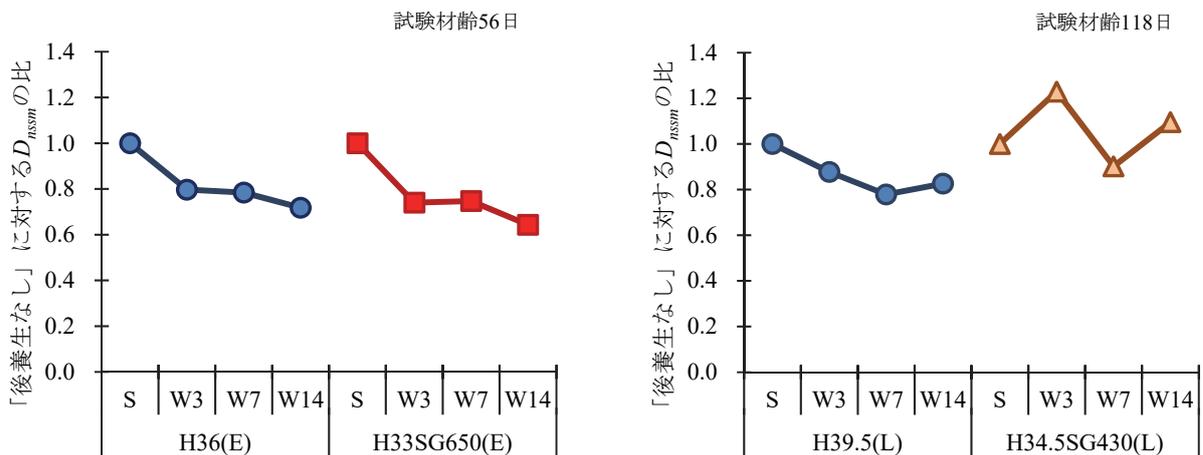
(b) H, SG430



(c) H, FA2

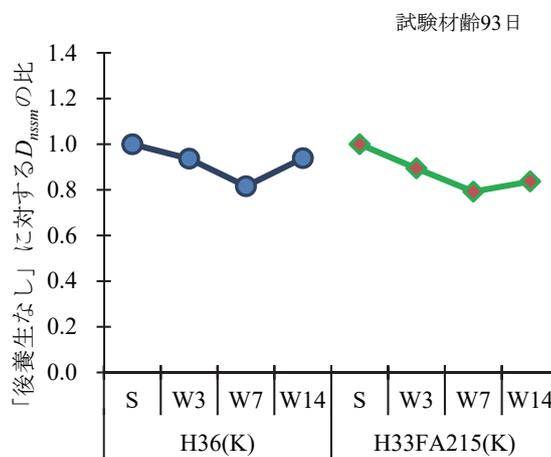
付図-1 非定常電気泳動試験で測定した塩化物イオン拡散係数 D_{nssm}

付図-2 に後養生を行わない場合の D_{nssm} に対する後養生を行った場合の D_{nssm} の相対値を示す。この図からは、混和材の使用の有無にかかわらず、蒸気養生後の後養生は D_{nssm} の低減に対して一定の効果を有することがみとれる。



(a) H, G650

(b) H, SG430



(c) H, FA2

付図-2 後養生なしに対する後養生を行った場合の D_{nssm} の比

本実験で得た塩化物イオンの拡散係数を用いて、付録-3 3.3 節と同様の方法で塩化物イオン濃度の経時変化を推定した。すなわち、コンクリート表面から 70mm 位置での塩化物イオン濃度を、フィックの拡散方程式から求められる式(1)を用いて算出した。

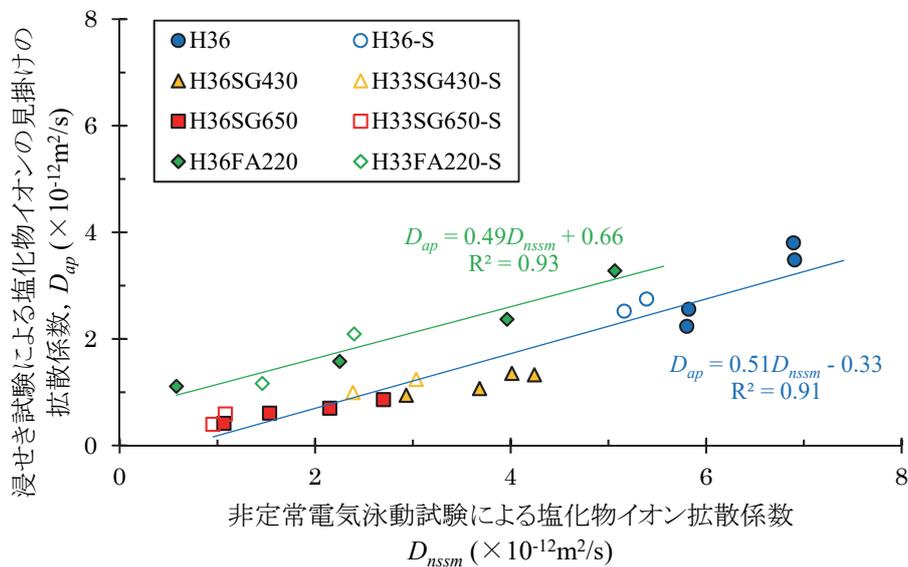
$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right\} + C_i \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$:塩化物イオン濃度 (kg/m^3), C_0 :表面塩化物イオン濃度 (kg/m^3), x :コンクリート表面からの距離 (mm), D_d :塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), t :経過時間 (年), C_i :初期塩化物イオン濃度(=0.3) (kg/m^3), erf :誤差関数である。 C_0 は国内の飛来塩分量の測定結果³から得られた式(2)を用いて求めた。

$$C_0 = 1.2 \cdot C_{air}^{0.4} = 1.2 \cdot (C_1 \cdot d^{-0.6})^{0.4} \quad (2)$$

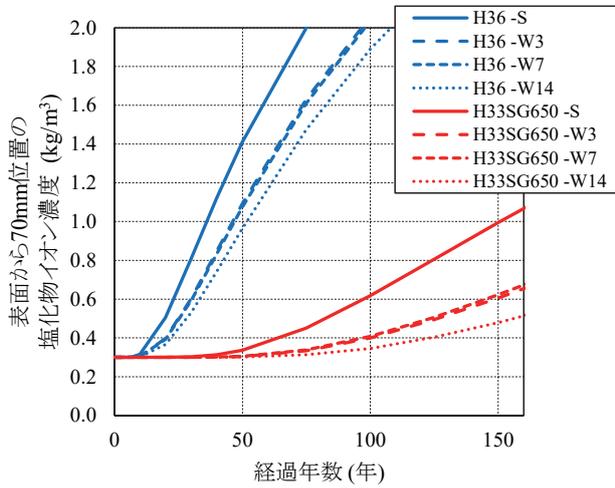
ここに、 C_{air} :飛来塩分量 (mdd = $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$), C_1 :1 km 換算飛来塩分量(=1.0 mdd-NaCl, 低区分 A(沖縄)での滞分の頻度が高いことを考慮して設定した値), d :海岸線からの距離(=0.001 km, 海岸線上の場合)

拡散係数は、付録-3 で示した非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数と浸せき試験による見掛けの拡散係数の関係を用いて実験での測定値を浸せき試験による見掛けの拡散係数へ換算し、さらに、実環境条件を考慮するための係数 ρ_e (= 0.2)⁴を用いて算出した値を用いた。付図-3 に非定常電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数と浸せき試験による見掛けの拡散係数の関係を示す(付録-3 付図-23 の再掲)。ここでは、フライアッシュのみ別途、単独で近似式を求めて計算を行った。

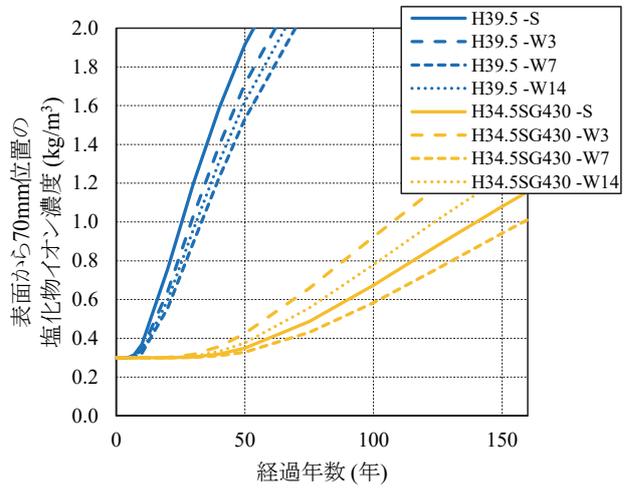


付図-3 非定常法による塩化物イオンの拡散係数と浸せき試験による塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係 (付録-3, 付図-23 の再掲)

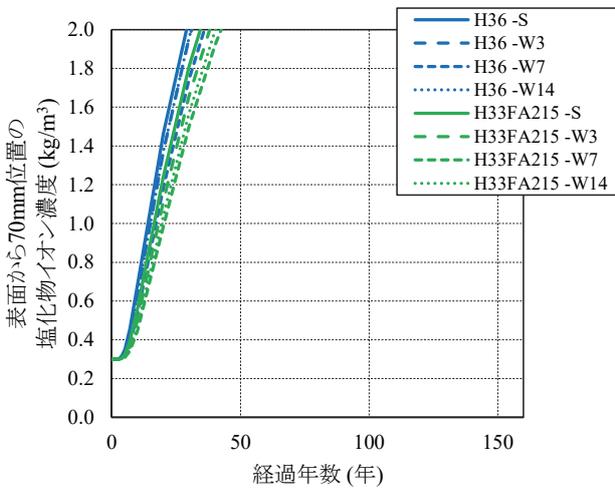
以上の手順で推定した塩化物イオン量と経過年数の関係を付図-4に示す。この図から、後養生期間の影響は明確ではないものの、ほとんどの条件で、後養生を行うことで塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上していることが確認できる。たとえば、100年後の塩化物イオン濃度を比較すると、後養生を行わない場合に対して平均で10%程度の低減が可能となり、一部の条件では40%以上低減されるものもあった。



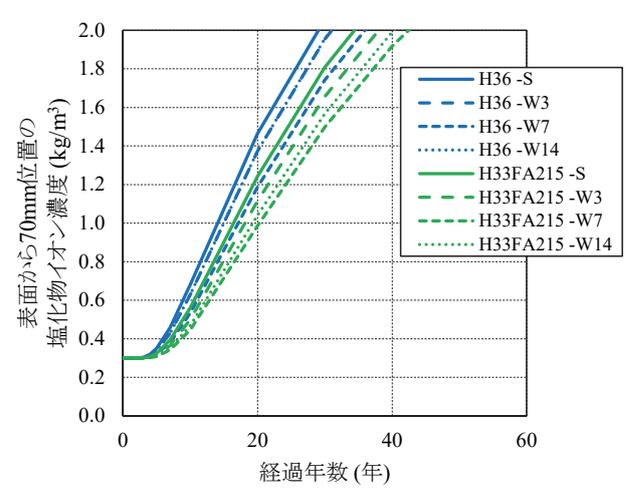
(a) H, SG650



(b) H, SG430



(c) H, FA2



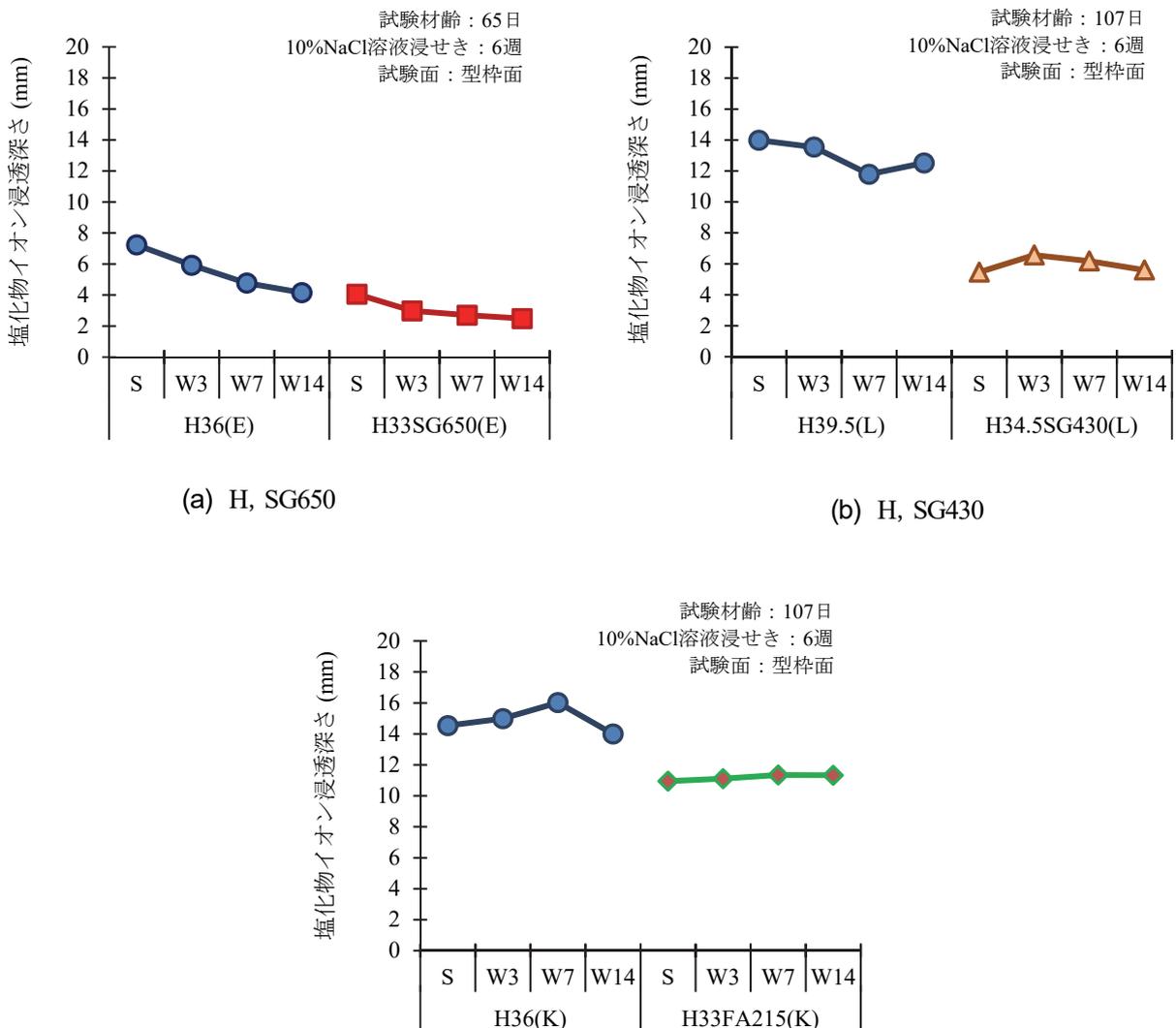
(d) H, FA2 (横軸拡大)

付図-4 実験値に基づく塩化物イオン濃度の推定結果

3.2 塩水浸せき試験

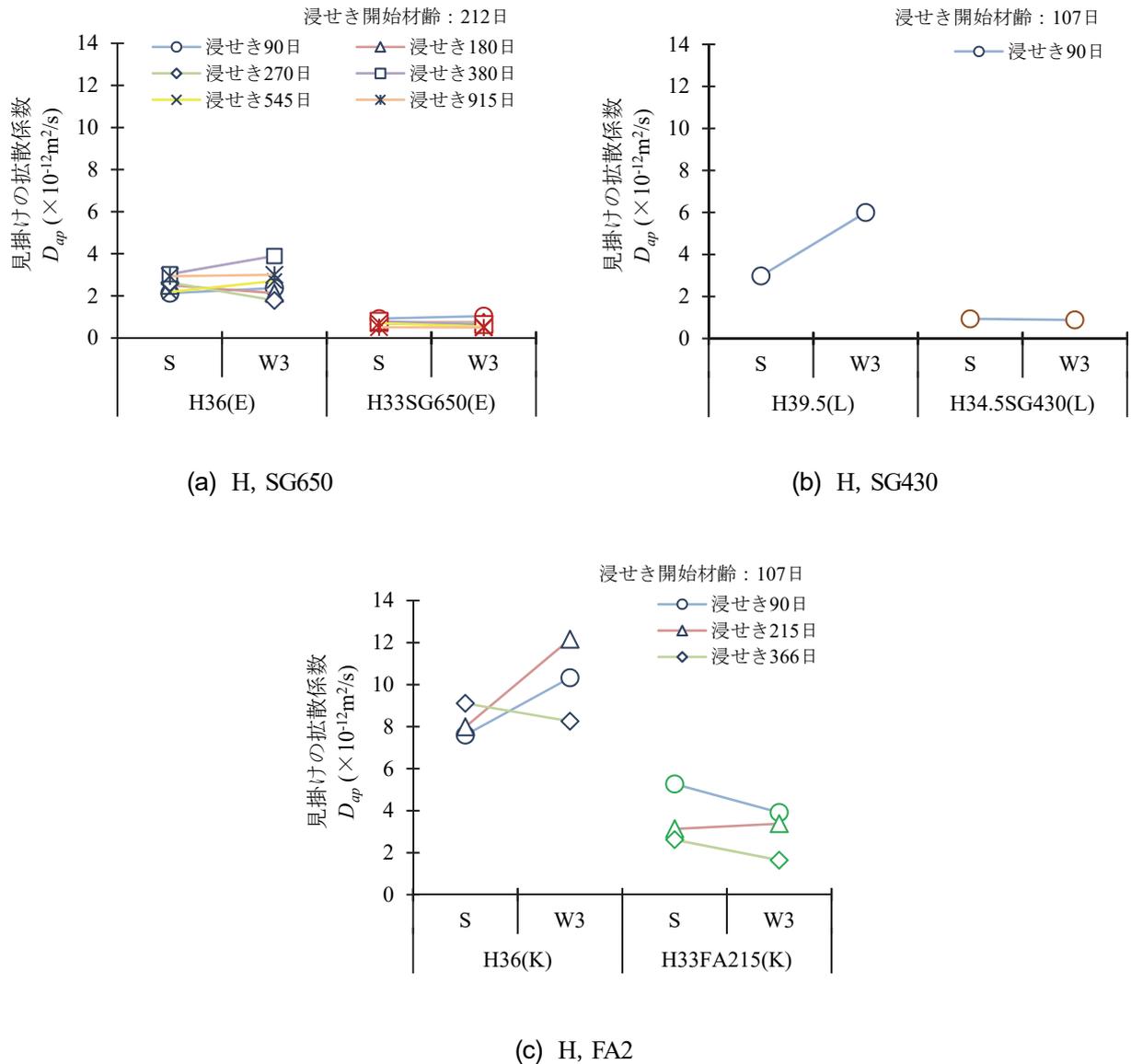
供試体からφ100mm コア供試体を採取し、塩水浸せき試験を行なった。コア供試体の暴露面は型枠面とし、型枠面以外はエポキシ樹脂を用いてシール処理をした。

付図-5は10%NaCl水溶液に6週間浸せきし、割裂面に0.1mol/L硝酸銀水溶液を噴霧することで塩分浸透深さを測定した結果である。全体的には、蒸気養生後の後養生により塩分浸透深さは同程度または小さくなる傾向が確認できる。工場によって、また、同じ工場でも配合によって、蒸気養生後の後養生の効果に差異が生じているが、これは、工場や配合毎の蒸気養生の条件が様々であることが要因として考えられる。このように、蒸気養生後の後養生の効果の程度については、その他の製造条件の影響を受けると考えられるが、少なくとも後養生によって塩化物イオン浸透に対する抵抗性は同程度以上となることが期待できるため、品質の確保・向上に有効な方法であると考えられる。

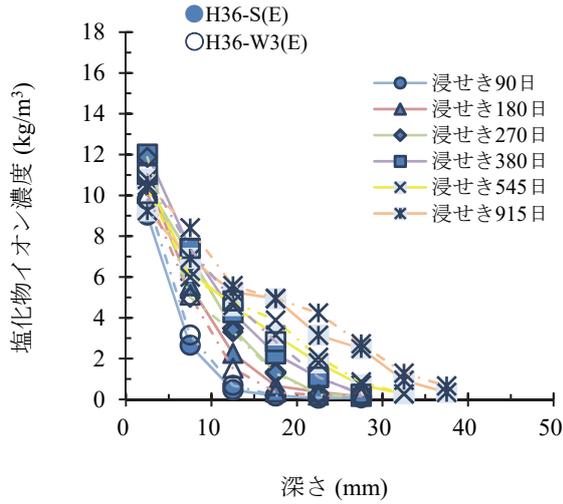


付図-5 10%塩水浸せき試験で測定した塩化物イオン浸透深さ

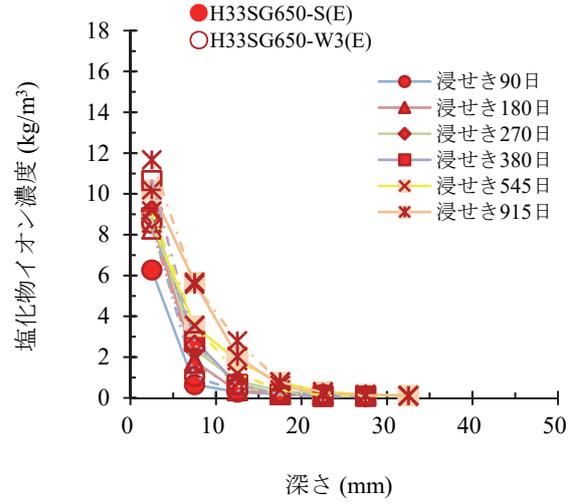
付図-6は3%NaCl水溶液に浸せきする条件で、一定の浸せき期間毎に塩化物イオン濃度分布を測定しすることで得られた見掛けの拡散係数(D_{ap})を示したものである。蒸気養生後の後養生については、材齢3日までの条件のみとした。 D_{nssm} と異なり、 D_{ap} に対する後養生の影響についての明確な傾向は確認できなかった。 D_{nssm} と比較して D_{ap} のほうが小さい値となることから分かるように、両試験での塩化物イオンの供給条件は同一ではない。実施した浸せき試験のほうが条件としては緩やかであると考えられ、全体として塩化物イオンの浸透の程度が小さかったことから明確な差異が確認できなかったことが考えられる。付図-7には塩化物イオン濃度分布の測定結果を示した。



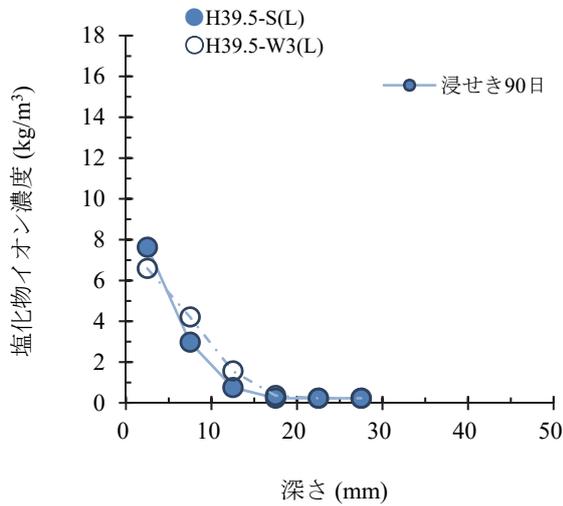
付図-6 3%塩水浸せき試験で測定した塩化物イオンの拡散係数 D_{ap}



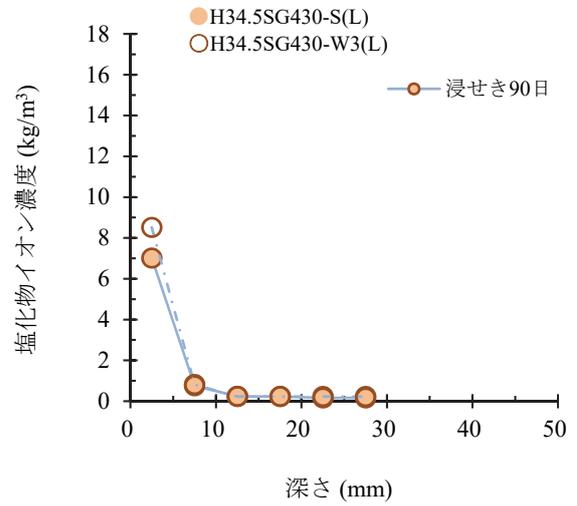
(a) E工場 H



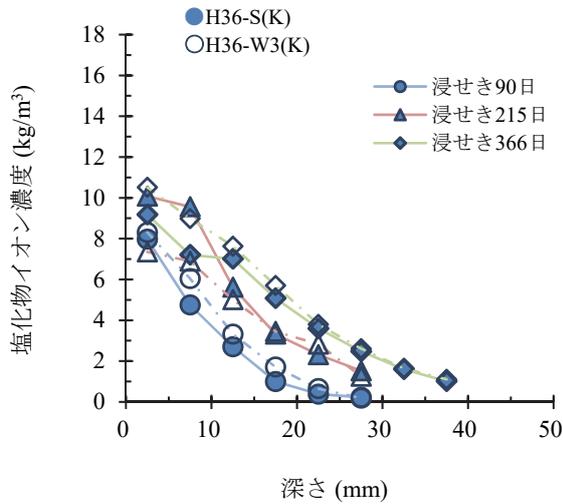
(b) E工場 SG650



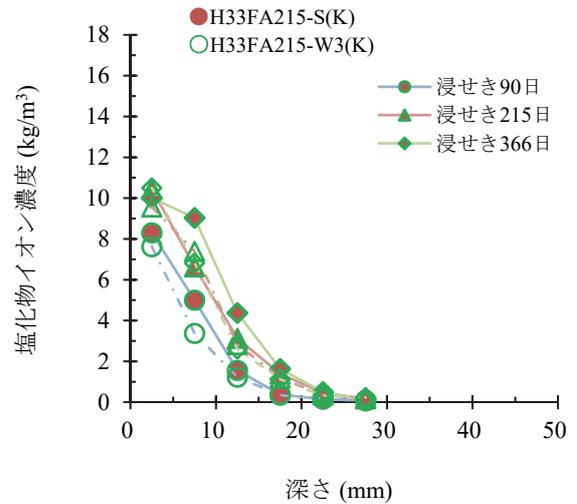
(c) L工場 H



(d) L工場 SG430



(e) K工場 H



(f) K工場 FA2

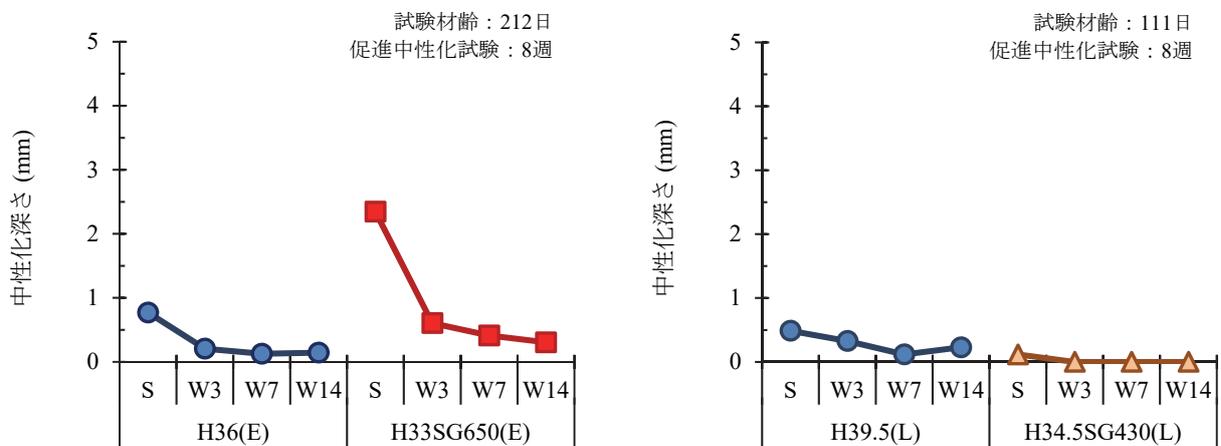
付図-7 塩化物イオン濃度分布(3%塩水浸せき試験)

4. 水の浸透と中性化

4.1 促進中性化

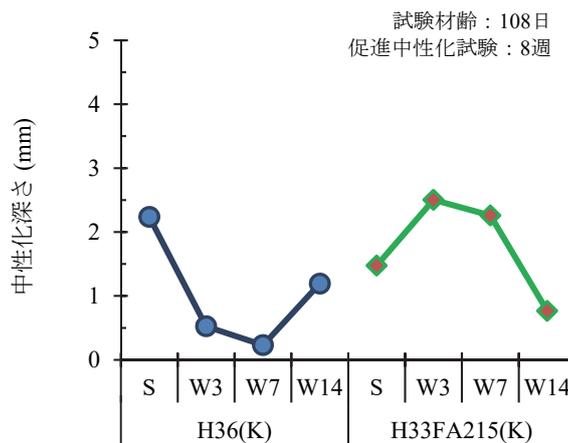
供試体から採取したφ100のコア供試体を促進中性化槽(槽内温度 20°C, 湿度 60%, CO₂ 濃度 5%)に静置し, 8週間後の中性化深さを測定した。付図-8 に中性化深さの測定結果を示す。フライアッシュを用いた配合を除いて, 蒸気養生後の後養生を行うことで中性化深さが小さくなった。高炉スラグ微粉末 6000 を 50%使用した配合(SG650)では, 蒸気養生後の後養生を行わない場合には早強ポルトランドセメント単味と比べて中性化深さが大きくなったが, 蒸気養生後の後養生を行うことで中性化深さは大きく低減された。本実験におけるフライアッシュを用いた配合では, 中性化に対する養生の影響は明確ではなかった。

蒸気養生後の後養生日数の影響は必ずしも明確ではなく, 材齢 3 日までの後養生でも中性化への抵抗性に対する一定の効果が確認された。



(a) H, SG650

(b) H, SG430



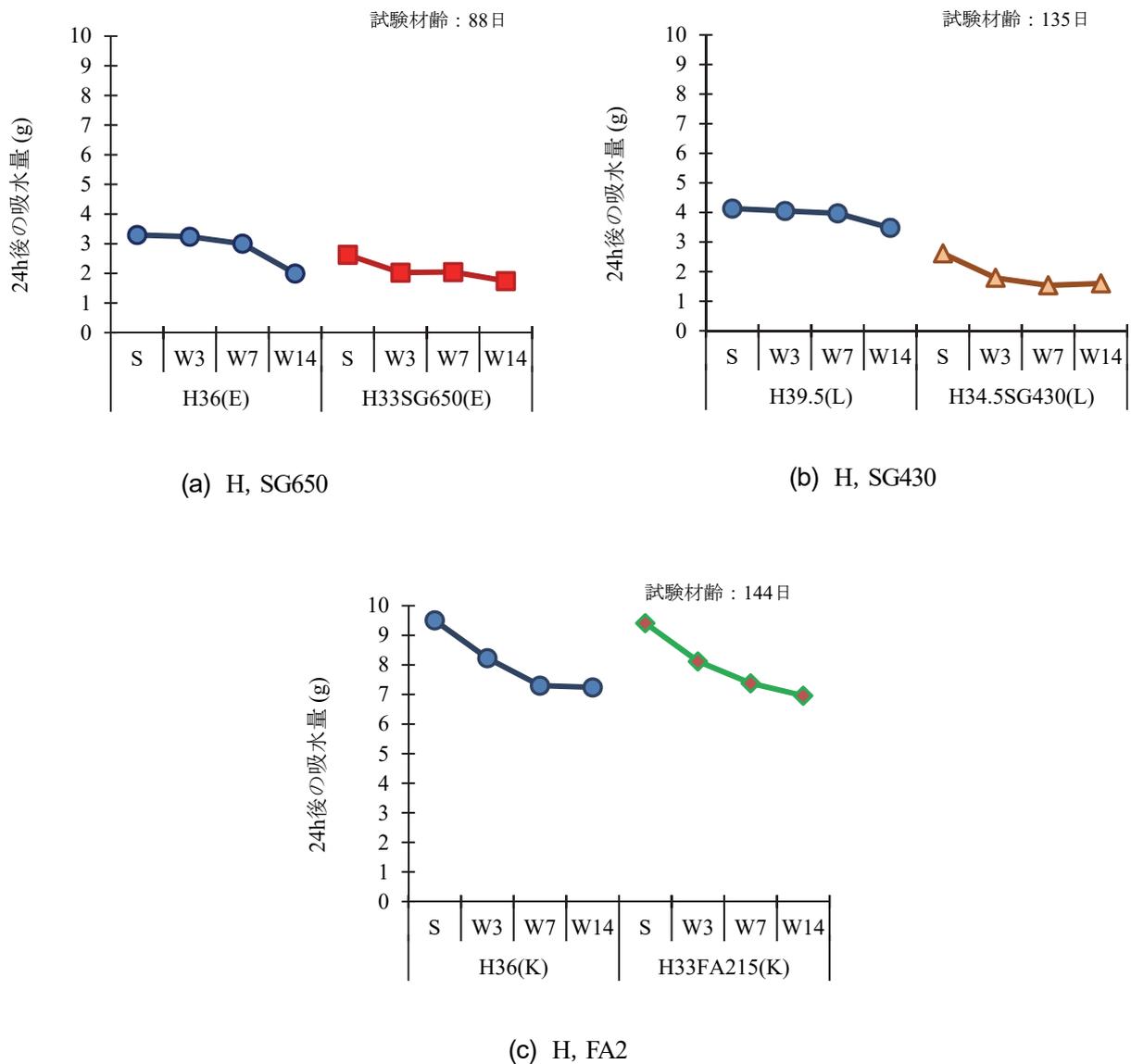
(c) H, FA2

付図-8 促進中性化 8 週間後の中性化深さ

4.2 水分浸透

供試体から採取したφ100のコア供試体を用いて、ASTM C 1585を参考に表面吸水試験を行なった。高さ50mmに成形したコア供試体を含水率調整後に表面から2mmまで水に浸せきし、測定された質量変化を吸水量として評価した。付図-9に24時間後の吸水量の測定結果を示す。

いずれの工場においても、H配合に対して混和材を用いた配合の吸水量は小さくなり、混和材の使用によって水分浸透に対する抵抗性が向上していることが確認できる。特に、フライアッシュを用いた配合で吸水量の低下が大きい。また、いずれの配合においても蒸気養生後に後養生を行うことで後養生を行わない条件と比べて吸水量が低下している。後養生期間の影響については、特に混和材を用いた場合では材齢3日まで(約2日間)の養生でも吸水量の低下がみられ、後養生の効果が確認できている。



付図-9 表面吸水試験における吸水量

5. スケーリング

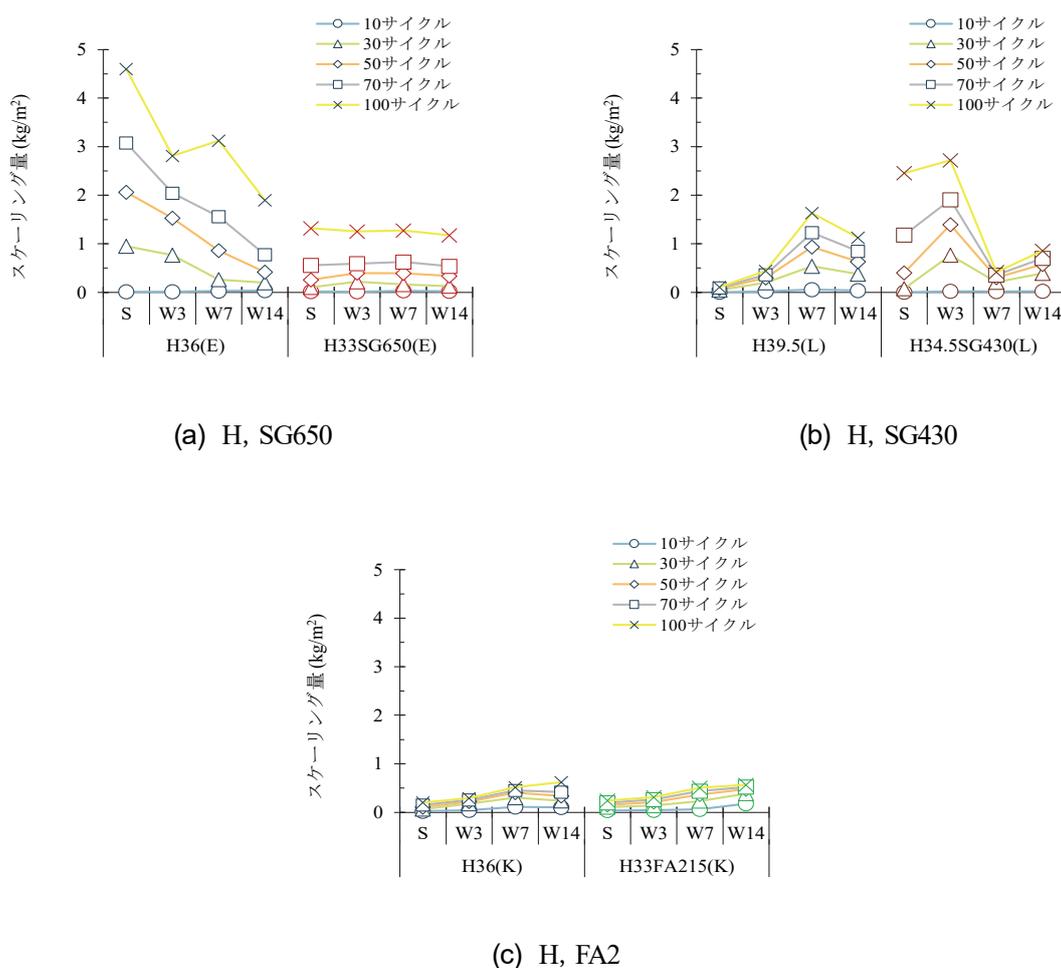
5.1 実験方法

供試体は、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の検討に用いた各 PCaPC 工場で製作した壁状の供試体と同一のものである。PCaPC 工場で製造する部材と同一の蒸気養生を行い、蒸気養生後の後養生の条件を変化させ、供試体からコアを採取して、スケーリング試験を実施した。

φ150mm のコアを採取し、コアの両端部を長さ 75mm で切断し、型枠面側の円形面を試験面とした。その後、試験面を□106mm に切断加工し、加工後の試験面に深さ 6mm となるように濃度 3% の NaCl 水溶液を溜め、冷凍庫に 16~18 時間静置(凍結)、20℃恒温室に 6~8 時間静置(融解)し、24 時間で 1 サイクルの凍結融解試験を実施した。各凍結融解サイクルにおいて、スケーリングによって試験面から剥がれ落ちた試料の質量を測定した。

5.2 実験結果

10, 30, 50, 70, 100 サイクルのスケーリング試験の結果を付図-10 に示す。H 配合における蒸気養生後の後養生の違いに着目すると、H, SG650 の工場の供試体では、蒸気養生後の後養生による効果がみられた。一方、H, SG430 の供試体では、蒸気養生後の後養生による効果がみられなかった。H, FA2 の供試体では、後養生の実施にかかわ



付図-10 各サイクルのスケーリング量

らずスケーリング量は同程度であった。

混和材配合における蒸気養生後の後養生の違いに着目すると、H, SG650 と H, FA2 の供試体では、後養生の実施にかかわらずスケーリング量は同程度であった。H, SG430 の供試体では 7 日以上の後養生で効果がみられた。本試験の範囲においては、一部の配合において後養生の実施が耐久性の向上に効果的であることがみられたものの、総合的に後養生の期間の実施によって得られる耐久性の向上効果は明確ではなかった。

6. 細孔径分布

6.1 実験方法

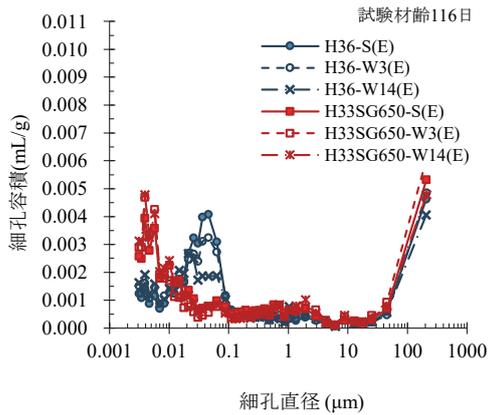
供試体は、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の検討に用いた各 PCaPC 工場で製作した壁状の供試体と同一のものである。PCaPC 工場で製造する部材と同一の蒸気養生を行い、蒸気養生後の後養生の条件を変化させ、供試体からコアを採取して、細孔径分布の測定を行った。

φ 100mm のコアを採取し、コアの片側の型枠面から 5mm の位置で切断し、円盤状片の試料とした。その後、モルタル部分を 5mm 角程度の小片に加工して乾燥させたのち、水銀圧入法によって細孔径分布を測定した。

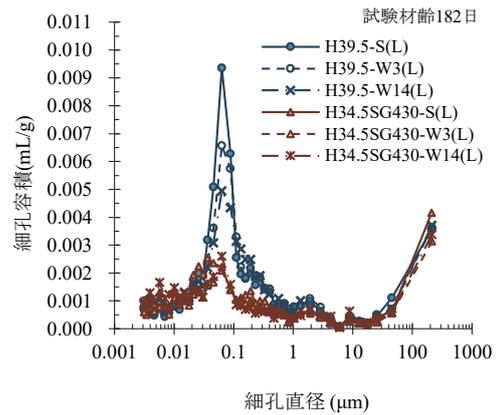
6.2 実験結果

細孔径分布の測定結果を付図-11 に示す。細孔直径が $0.01 \mu\text{m}$ よりも小さい範囲では、後養生を実施した場合に細孔容積が若干多くなり、 $0.1 \sim 0.01 \mu\text{m}$ の範囲で概ね若干小さくなる傾向がみられた。

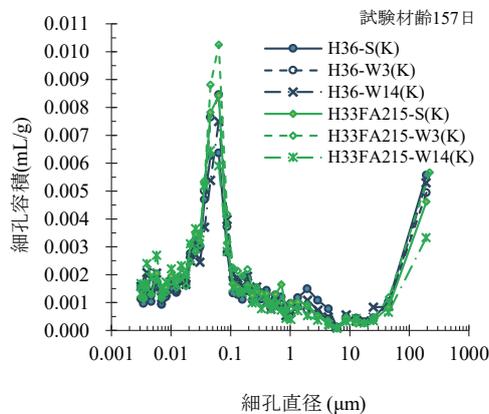
既往の文献においても、蒸気養生後の後養生を行うことによって、コンクリートの表層部あるいは表層部からの深さ方向の細孔構造が緻密化されていることが報告されており⁵⁾⁶⁾、本検討においても、蒸気養生後の後養生の実施が細孔構造の緻密化に寄与したものと推察される。また、本検討における蒸気養生方法は各 PCaPC 工場で実施される製造と概ね同じであったが、前置き時間を長く設定することによって、細孔構造が緻密化される事例も報告されており⁷⁾、細孔構造は蒸気養生方法の工夫や後養生を実施することによって緻密化される可能性がある。



(a) H, SG650



(b) H, SG430



(c) H, FA2

付図-11 細孔径分布の測定結果

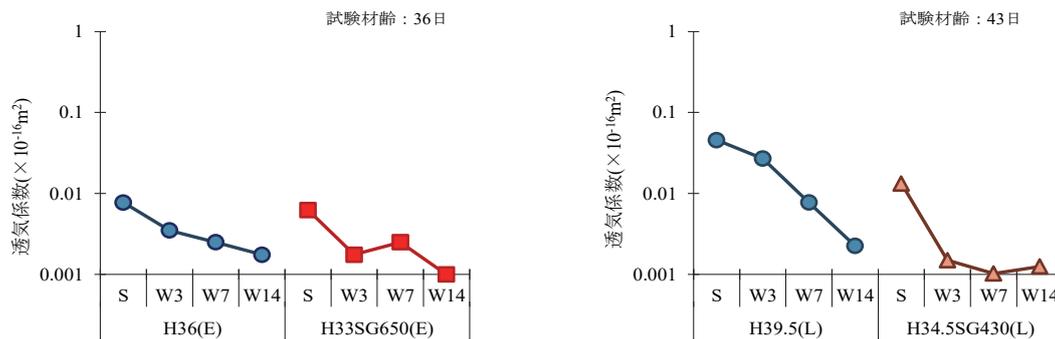
7. 透気係数及び表面吸水速度

7.1 実験方法

供試体は、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の検討に用いた各 PCaPC 工場で製作した壁状の供試体と同一のものである。PCaPC 工場で製造する部材と同一の蒸気養生を行い、蒸気養生後の後養生の条件を変化させて、透気試験 (Torrent 法) と表面吸水試験 (SWAT 法) を実施した。非破壊試験の測定面は壁状コンクリートの一部を模擬するため、コンクリート打込み方向に対して側面 (幅 750mm, 高さ 700mm) とし、1 供試体につき表裏の二面で測定した。また、測定面以外の供試体表面をアルミテープでシールし、乾燥によってコンクリート中の水分が測定面以外から逸散することを防止した。なお、Torrent 法や SWAT 法では、コンクリート中の含水率が測定結果に影響を受けやすいことが知られているため、試験前にコンクリート水分計を使用して測定位置での表面含水率を測定し、顕著な差は無いことを確認した。

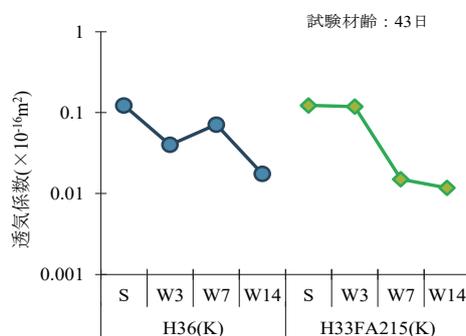
7.2 Torrent 法の実験結果

材齢 36 日あるいは 43 日における Torrent 法から得られた透気係数を付図-12 に示す。二面の透気係数の平均値は、各工場における結合材の種類が同一の場合、蒸気養生後に後養生を行うことによって、概ね透気係数が小さ



(a) H, SG650

(b) H, SG430



(c) H, FA2

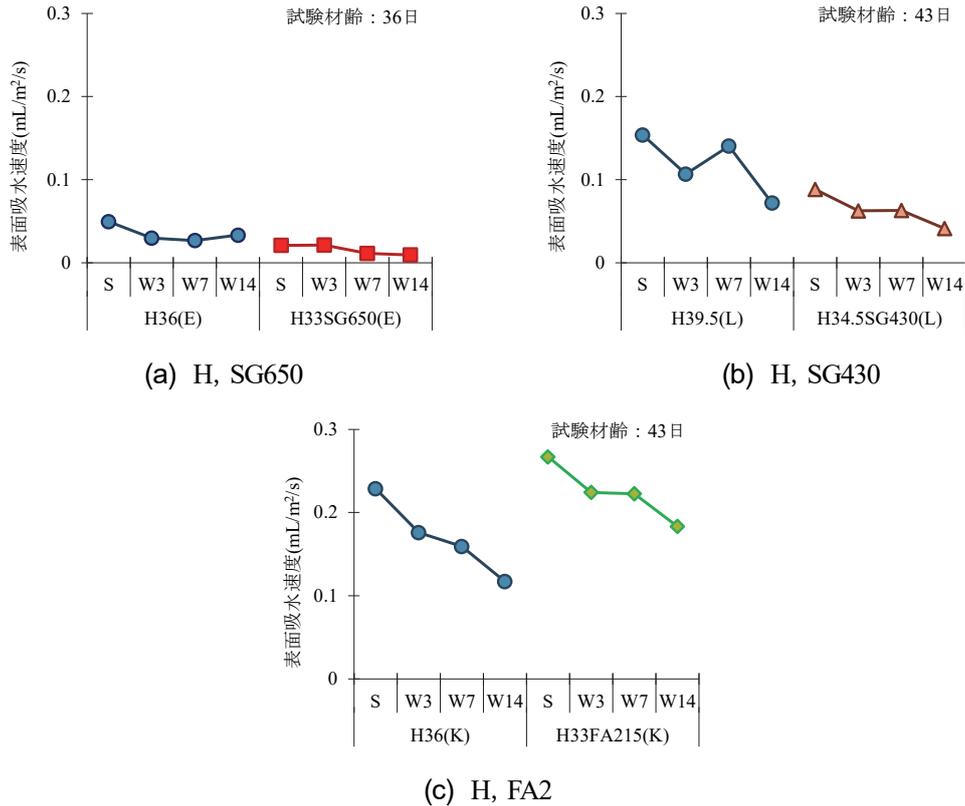
付図-12 透気係数

くなる傾向がみられた。

既往の文献においても、蒸気養生後の後養生を行うことによって、透気係数が小さくなり、表層部の品質の改善が確認されたことが報告されており⁸⁾、本検討においても、後養生を行うことによってコンクリート表層の緻密化に寄与したものと推察される。

7.3 SWAT 法の実験結果

材齢 36 日あるいは 43 日における SWAT 法から得られた 10 分時点での表面吸水速度を付図-13 に示す。二面の表面吸水速度の平均値は、各工場における結合材の種類が同一の場合、蒸気養生後に後養生を行うことによって、概ね表面吸水速度が小さくなる傾向がみられた。



付図-13 表面吸水速度

8. まとめ

この付録では、PCaPC 工場で製作した壁状供試体を用いて蒸気養生後の後養生の効果について検討した結果を示した。主な知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 塩分浸透に対する抵抗性は、混和材の有無によらず後養生によって向上する傾向にあることが確認された。ただし、本試験を実施した材齢(56～118日)では、フライアッシュの効果は明確にならなかった。
- (2) 中性化に対する抵抗性は、後養生によって向上した。特に高炉スラグ微粉末 6000 を 50%使用した条件で向上の程度が大きかった。また、水分浸透に対する抵抗性も後養生によって向上した。
- (3) 凍結融解に伴うスケーリングに対しては、後養生の影響は確認できなかった。
- (4) Torrent 法による透気係数や SWAT 法による表面吸水速度は、いずれも混和材の有無によらず後養生によって低下し、表層部の品質が向上していることが示唆された。

いずれの測定項目においても、後養生を行うことによって後養生を行わない場合に比べて同程度またはそれ以上に向上しており、蒸気養生後の後養生が PCaPC 部材の品質の向上に一定の効果をもつことがわかった。一方で、後養生期間を長くすることの効果については必ずしも明確ではなく、蒸気養生終了後から 2 日程度の後養生でも有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会:2017年制定コンクリート標準示方書【施工編】, 2017.
- 2) 土木学会:高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針, コンクリートライブラリー151, 2018.
- 3) 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.
- 4) 皆川浩, 中村英佑, 藤井隆史, 綾野克紀:大気中環境下における塩化物イオンの見掛けの拡散係数の設定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 1, pp. 767-772, 2019.
- 5) 寺川麻美, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎:プレキャストコンクリート製品の細孔構造に及ぼす養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, vol.34, No.2, pp. 469-474, 2012.
- 6) 原洋介, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎:蒸気養生を施したコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性, コンクリート工学論文集, 第28巻, pp. 93-101, 2017.
- 7) 丸山晃平, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎:蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.2, pp. 571-576, 2011.
- 8) 山村智, 鈴木雅博, 小林和弘, 鳥居和之:分級フライアッシュを用いたコンクリートのPC桁への適用に関する研究, 第22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, 2013.

付録－6 混和材を用いた PCaPC 部材の外観

1. 概要

PCaPC 部材では、製造から一定期間が経過した後に降雨等で表面が濡れると微細な亀甲状のひび割れが一時的に現れることがある。また高炉スラグを混和したコンクリートでは、脱型直後に青色を呈色することが知られている。このような外観変状の発生条件や耐久性に与える影響は必ずしも明確にされていない。この付録では、混和材を用いた PCaPC 部材に発生しうる外観変状の発生要因やその耐久性への影響について、実験結果と文献調査結果を示す。

2. 実験及び観察

2.1 微細ひび割れに関する実験

本実験では、一定期間乾燥させた PCaPC 部材用コンクリートの表面に散水を行い、微細ひび割れの発生条件を検証するとともに、微細ひび割れが塩化物イオン浸透抵抗性や中性化抵抗性に与える影響を検討した。

2.1.1 実験方法

コンクリート配合と基礎性状を付表－1 に示す。配合は、早強ポルトランドセメントと天然砂を用いた配合(H)、結合材あるいは細骨材に高炉スラグやフライアッシュを用いた配合(SG430, SG650, FA20, BFS50, BFS100)の6種類であり、水結合材比を36%とした。また、比較用として、普通ポルトランドセメントを使用し水結合材比を50%とした配合(N50)も実験対象とした。PCaPC 部材用コンクリートは材齢約1年、N50は材齢約2年まで標準養生を行った円柱(φ100×200mm)を2本ずつ用いた。なお、このマニュアル(案)の対象からは外れているが、高炉スラグ細骨材(BFS)の結果も参考として示している。

コンクリート表面の目視観察と耐久性試験の方法を付表－2、付図－1 に示す。目視観察は、円柱の側面を対象として、円柱を水中から取り出した直後、恒温恒湿槽(温度 20℃、湿度 60%)に移設して乾燥を開始してから 1, 3, 7, 14, 28 日後の計 6 回で微細ひび割れの発生有無を確認した。乾燥開始後の観察では、観察箇所 A に水道水を霧吹きで噴霧し、この水道水が乾燥するまでの微細ひび割れの有無と発生状況を確認した。また、乾燥開始 28 日後の

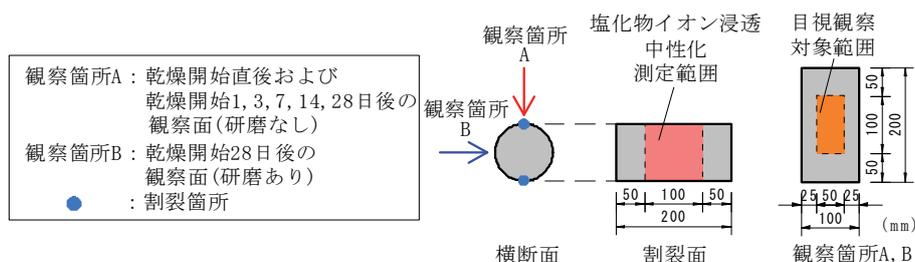
付表－1 コンクリート配合と基礎性状

配合	水結合材比 (%)	単位量(kg/m ³)									スランプ (cm)	空気量 (%)	材齢 28 日 圧縮強度 (N/mm ²)
		B=HPC+OPC+SG4+SG6+FA						S	BFS	G			
		W	HPC	OPC	SG4	SG6	FA						
H	36	165	458	—	—	—	—	721	—	968	12.0	5.3	65.3
SG430			321	—	138(30%)	—	—	712	—		10.0	5.9	60.5
SG650			229	—	—	229(50%)	—	707	—		12.0	5.0	69.4
FA20			367	—	—	—	92(20%)	696	—		8.0	4.8	60.6
BFS50			458	—	—	—	—	361	379(50%)		11.5	5.2	67.9
BFS100				—	—	—	—	758(100%)	13.0		5.3	68.7	
N50(比較用)	50	—	330	—	—	—	828	—	10.5	4.0	45.5		

※W: 上水道水(茨城県つくば市), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度 3.14 g/cm³, 比表面積 4480 cm²/g), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm³, 比表面積 3210 cm²/g), SG4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度 2.89 g/cm³, 比表面積 4350 cm²/g), SG6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度 2.91 g/cm³, 比表面積 6210 cm²/g), FA: フライアッシュ II 種(密度 2.35 g/cm³, 比表面積 4330 cm²/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度 2.56 g/cm³), BFS: 5 mm 高炉スラグ細骨材(密度 2.69 g/cm³), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6 号(密度 2.67 g/cm³, 硬質砂岩)と同 5 号(密度 2.67 g/cm³, 硬質砂岩)を均等に混合)

表-2 コンクリート表面の目視観察の方法

観察時期		観察方法
乾燥開始直後		養生槽から円柱を取り出した直後に、図-1に示す観察箇所Aを目視観察
乾燥開始 1, 3, 7, 14, 28 日後	研磨 なし	図-1に示す観察箇所Aに水道水を霧吹きで噴霧した後、目視観察
乾燥開始 28日後	研磨 あり	図-1に示す観察箇所Bを紙やすりで軽く研磨し、水道水を霧吹きで噴霧した後、目視観察



付図-1 目視観察と耐久性試験の方法

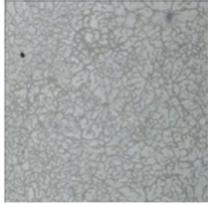
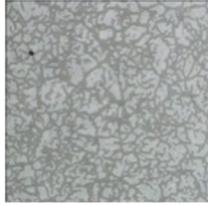
観察では、観察箇所 B を紙やすりで軽く研磨した後に散水し、微細ひび割れの深さ方向の発生状況を確認した。なお、目視観察前の円柱の質量を測定し、乾燥による水分の逸散量を確認した。

耐久性試験は、乾燥開始 28 日後の目視観察の後、各配合 1 本の円柱を用いて、塩水浸せき試験と促進中性化試験を行った。塩水浸せき試験は、塩化ナトリウム水溶液(濃度 10%)に円柱を 8 週間浸せきした後に割裂し、割裂面に硝酸銀溶液を噴霧して塩化物イオン浸透深さを測定した。促進中性化試験は、気温 20°C、湿度 60%、CO₂ 濃度 5% の環境に円柱を 8 週間静置した後に割裂し、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して中性化深さを測定した。

2.1.2 実験結果

コンクリート表面の微細ひび割れ発生状況の一例を付図-2 に示す。円柱を養生槽から取り出した直後ではひび割れは認められなかったが、乾燥開始後に水道水を噴霧すると、PCaPC 部材用コンクリートでは微細ひび割れが認められた。この微細ひび割れは、円柱表面が再度乾燥すると目視では確認できなくなった。微細ひび割れは乾燥開始後 1~3 日の間に目立つようになり、乾燥期間が長くなるほど増加し、特に高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた配合(SG430, SG650, FA20)で微細ひび割れが目立った。ただし、乾燥開始 3 日後以降の進展は大きくはなかった。また、乾燥開始 28 日後に観察箇所 B の表面を紙やすりで軽く研磨したところ、水道水を噴霧しても微細ひび割れは認められなかったことから、この実験で確認された微細ひび割れは、円柱のごく表層部のみに発生したものであったと考えられる。一方、この実験では水結合材比を 50%とした N50 において微細ひび割れは認められなかった。

次に、塩化物イオン浸透深さを付図-3、中性化深さを付図-4に示す。PCaPC 部材用コンクリートの塩化物イオン浸透深さと中性化深さは N50 よりも小さくなった。割裂面を精査したところ、本稿の実験で確認された微細ひび割れ

配合	乾燥開始1日後	乾燥開始3日後	乾燥開始28日後
H			
SG650			

※観察箇所Aに水道水を霧吹きで噴霧した後の状況
(供試体側面の中央部約50mm×50mmの拡大写真)

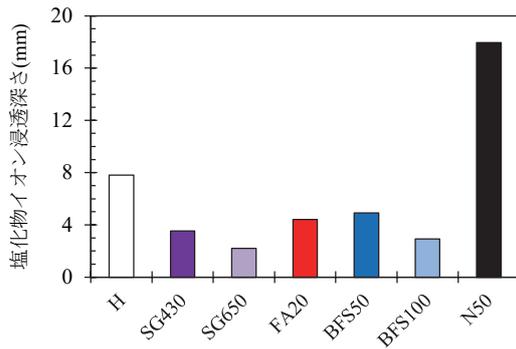
(a)乾燥開始からの経過による微細ひび割れ発生状況(H, SG650)

乾燥開始 28日後	H	SG430	SG650	FA20
	BFS50	BFS100	N50	

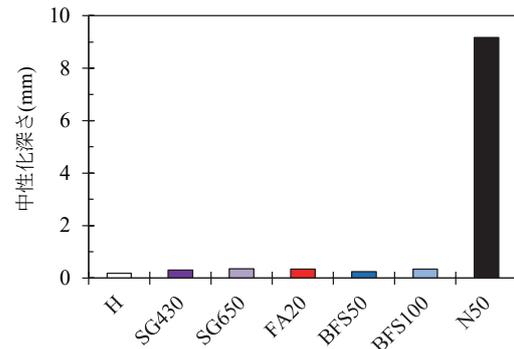
※観察箇所Bに水道水を霧吹きで噴霧した後の状態
(供試体側面の中央部約50mm×50mmの拡大写真)

(b)乾燥開始 28 日後の微細ひび割れ発生状況(全配合)

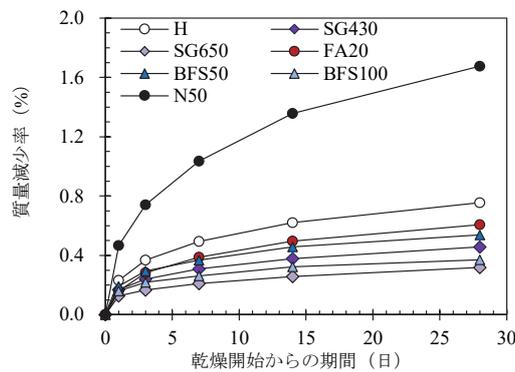
付図-2 コンクリート表面の微細ひび割れ発生状況の一例



付図-3 塩化物イオン浸透深さ



付図-4 中性化深さ



付図-5 質量減少率

は円柱の表層部のみで発生したものであり、微細ひび割れに沿った塩化物イオン浸透や中性化は発生していなかった。質量減少率を付図-5に示す。PCaPC部材用コンクリートの質量減少率はN50よりも小さくなった。PCaPC部材用コンクリートは、水結合材比が小さく、緻密なコンクリートであったため、乾燥による水分逸散量が少なくなったと考えられる。PCaPC部材用コンクリートの微細ひび割れは、ごく表層部のコンクリートのみが局所的に乾燥の影響を受けたために発生したと推察される。

2.1.3 まとめ

- (1) 本実験では、PCaPC部材用コンクリートの微細ひび割れは、乾燥開始後1～3日の間に目立つようになり、乾燥期間が長くなるほど増加し、特に高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた配合で目立った。また、水結合材比が低い配合 (36%)の方が、水結合材比の高い配合 (50%)より、微細ひび割れが発生しやすい傾向がみられた。
- (2) 本稿の実験で確認された微細ひび割れは、ごく表層部のみで発生したものであったため、塩化物イオン浸透抵抗性と中性化抵抗性に与える影響は認められなかった。

2.2 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの呈色について

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、この呈色の経時変化について観察を行った。



(a)材齢2日の円柱供試体
(左:H配合, 右:B配合)



(b)材齢2日の壁供試体(B配合)



(c)材齢30日の壁供試体(H配合)



(d)材齢30日の壁供試体(B配合)

付図-6 コンクリート表面の色調の経時変化

2.2.1 観察内容

H29年度に工場試験を行った際に採取した円柱供試体及び壁供試体で脱型後から30日まで観察を行った。高炉スラグを用いた配合はブレン値6000の高炉スラグ微粉末を50%混和した配合で、比較対象は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートである。

2.2.2 観察結果

高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートは、脱型直後はほぼ全面が青藍色を呈しており、時間の経過とともにまだら状に白色に変化した(付図-6)。材齢30日後には全面が白色となり、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートよりも白くなるが多かった(付図-6(c)及び(d))。「高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説」(日本建築学会)によれば、水結合材比が小さい場合やコンクリートが湿潤状態である場合に青藍色が濃くなる傾向があり、発色が顕著であるほど構造物の耐久性としては高い状態にあり、強度や耐久性に全く影響しないとされている。

3. 外観変状に関する文献調査

微細ひび割れを始めとした外観変状について、既往文献の調査を行い、得られた知見を整理した。微細ひび割れについての研究は少ないが、既往文献のうち、①～④の文献は同一グループによる一連の研究成果で普通コンクリートを使用して蒸気養生を行った場合の養生条件とひび割れ発生に関する研究、⑤及び⑥は高炉スラグ微粉末及びフライアッシュをそれぞれ使用したコンクリートのひび割れ発生に関する内容である。また、⑦、⑧はそれぞれ表面気泡(あばた)及び砂すじに関する研究である。

①阿波稔, 大塚浩司, 諸橋克敏: 蒸気養生過程で発生する鉄筋コンクリート部材の微細ひびわれ, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15, No. 1, pp.567-572, 1993.

【内容】

蒸気養生コンクリートの養生過程で発生する微細なひび割れの発生状況, 発生条件及び発生機構を解明するための実験を行った。

【結果】

蒸気養生過程で, コンクリートには骨材とペーストとの剥離, モルタル部における骨材間を連結するような微細なひび割れ及び比較的大きな気泡を起点とする放射状の微細ひび割れが発生する。

骨材とペーストとの剥離は, 主として, 後養生温度を急速に下げた場合に生じること, モルタル部における骨材間を連結する微細ひび割れは, 主として, 前養生時間が不足した時に生じること, 気泡を起点とした放射状の微細ひび割れは, 主として, 温度上昇速度が大きいときに生じることが分かった。

蒸気養生過程のコンクリートのひずみ測定の結果, 前養生時間が不足したり, 温度上昇速度が大きかったりすると最高温度に達した時点のコンクリートのひずみが他の条件の場合よりもかなり大きくなり, また, 温度下降時の収縮量も大きくなることが分かった。

②大塚浩司, 庄谷征実, 小関憲一, 阿波稔: コンクリートの蒸気養生過程で発生する表面微細ひび割れの性状に関する研究, 土木学会論文集 No.520/V-28, pp.143-155, 1995.

【内容】

鉄筋コンクリート供試体を用いて, 種々の蒸気養生条件がコンクリート表面に発生する微細ひび割れの性状に及ぼす影響を, X線造影撮影法, SEM, ポロシメータ等によって調べる実験を行った。

【結果】

前養生時間の長さが微細ひび割れの性状に及ぼす影響は極めて大きい。前養生時間が短い場合には, 他の条件である昇温速度と降温速度の影響をできるだけ小さくするようにしても, 非常に多くの微細ひび割れが発生する。前養生時間が短い場合の微細ひび割れには, モルタルひび割れが比較的多く見られた。

昇温速度の大きさがコンクリートの微細構造に及ぼす影響は比較的少なく, コンクリート強度にあまり大きな差を生じさせない。

降温速度の大きさが微細ひび割れの性状に及ぼす影響は比較的大きい。降温速度が大きい場合は, コンクリート組織の緻密さを欠如させる原因となり, コンクリートの強度を低下させる傾向がある。

微細ひび割れ発生防止の面から実験結果を通して現行(1995 年当時)の示方書類の規定を検討した結果、土木学会示方書に規定されている前養生 2 時間をとっても、場合によっては微細ひび割れを防止するには不十分であることが分かった。

③阿波稔, 大塚浩司, 今野洋一: 乾燥によりコンクリート表面に発生する微細ひび割れの性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, pp.725-730, 1995.

【内容】

普通養生及び蒸気養生を行ったコンクリート供試体を用いて、乾燥によって時間とともにその表面に発生する微細ひび割れの性状を調べる実験を行った。

【結果】

乾燥によってコンクリート表面に発生する微細ひび割れを X 線造影撮影法によって検出した結果、普通養生及び蒸気養生の何れの場合においても、それらには、骨材とペーストとの剥離ひび割れとモルタル部のひび割れとがあることが分かった。また、SEM によってその表面を観察した結果、長さ 2~10mm 程度、幅 0.01~0.02mm 程度の交差する複数の微細ひび割れが観察された。

普通養生コンクリートの表面に乾燥によって発生する微細ひび割れは、養生終了後、乾燥開始 3 日頃から発生し、経時変化とともにその数を増していったが、1 ヶ月程度経過するとその数はほぼ一定となった。

蒸気養生コンクリートで、前養生時間を十分に取った場合は、養生終了直後に、その表面にほとんど微細ひび割れは見られなかったが、前養生時間が短い場合は、かなりの数の微細ひび割れの発生が見られた。何れの場合も乾燥開始後、経時的に微細ひび割れは増加していくが、普通養生の場合と同様に 1 ヶ月後からはその数はほぼ一定となった。

蒸気養生を行った場合は、普通養生を行った場合と比べて、微細ひび割れの早期における増加率が大きくなる傾向が見られた。また、蒸気養生で前養生時間が 4 時間の場合と 0 時間の場合の微細ひび割れの増加量にはあまり大きな差が見られなかった。

④大塚浩司, 庄谷征実, 阿波稔: 蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響, 土木学会論文集 No. 585/V-38, pp.97-111, 1998.

【内容】

比較的寸法の小さく水セメント比 50%の蒸気養生コンクリート製品を対象とし、その表面に発生する微細ひび割れを X 線造影等により検出しその性状を調べた。さらに、表面微細ひび割れの発生した供試体を用いて凍結融解試験、塩分浸透試験及び中性化試験を行い、表面微細ひび割れが部材の耐久性に及ぼす影響を検討した。

【結果】

蒸気養生終了直後のコンクリートの表面には、多くの微細ひび割れが発生しているが、ひび割れの幅は、何れの場合も 0.03mm 以下と微細なものであった。

蒸気養生過程で発生した表面微細ひび割れは、蒸気養生終了後、二次養生の過程で気中に置かれると、幅を増加させながらさらに進展成長し、初期乾燥ひび割れの起源となることが分かった。気中二次養生開始 28 日後における

表面微細ひび割れは、蒸気養生終了直後の場合と比べて長さ密度で約3～5倍、幅では約8～10倍に増加した。しかし、二次養生として水中に置いた場合には、表面微細ひび割れは時間の経過とともに減少した。

表面微細ひび割れ幅が非常に小さい場合は、微細ひび割れが多く発生していても、凍結融解抵抗性に与える影響は小さい。しかし、初期乾燥の影響を受けひび割れが進展成長し、平均幅で約0.06mm、且つ長さ密度で約5mm/cm²を超えると、凍結融解抵抗性を急激に低下させる。

表面微細ひび割れ幅が非常に小さい場合は、微細ひび割れが多く発生していても、見掛けの塩化物イオン拡散係数に及ぼす影響は比較的小さい。しかし、初期乾燥の影響を受けひび割れが進展成長し、平均幅で約0.06mm、且つ長さ密度で約5mm/cm²を超えると、見掛けの塩化物イオン拡散係数を急激に増加させる。

蒸気養生コンクリートは、蒸気養生後の二次養生の方法によって耐久性を大きく低下させる場合があることが分かった。

⑥川口千大, 北野勇一, 堀池一男:プレキャスト PC 部材への高炉スラグ微粉末の適用に関する基礎実験, 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.351-356, 2012.

【内容】

蒸気養生を行い工場製作されるプレキャスト PC 部材を対象に高炉スラグ微粉末の適用に関する各種検討を実施し、養生方法が製品の外観(呈色及び微細ひび割れ)に及ぼす影響について検討した。

【結果】

高炉スラグ微粉末を使用した試験体の蒸気養生後に、二次養生として湿潤養生(散水)をしなかった場合は、ひび割れが発生しなかったが、湿潤養生を実施した場合に材齢28日で微細ひび割れが発生した。この原因としては湿潤養生後に乾燥を防ぐ処置を行わなかったため、急激な湿度変化が生じてひび割れが発生した可能性がある。

6000ブレーンと8000ブレーンの高炉スラグを用いた両配合とも脱枠直後に青みがかかった色調を呈するものの、数時間から数日の間にほとんど退色した。8000ブレーンの高炉スラグを用いた配合では材齢7日においても発色の痕跡が若干残る結果となった。

⑥河金甲, 和氣佳純, 氏家勲:フライアッシュ混和の高強度 PC 桁の蒸気養生方法に関する検討, 第28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.705-708, 2019.

【内容】

フライアッシュを用いた設計基準強度70N/mm²クラスの高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート桁において、蒸気養生中の乾燥の有無がコンクリート表層品質に与える影響を検討した。

【結果】

フライアッシュを用いた高強度 PC 桁において、蒸気養生中の乾燥を抑制しない場合、脱枠直後のコンクリート打込み面に亀甲状の微細ひび割れが発生した。高強度コンクリートは緻密である反面、水分逸散が表層部のみで卓越するため乾燥収縮による亀甲状の微細ひび割れが打込み面に生じやすくなると考えられる。

⑦赤津雅之, 辻正哲, 三田勝也, 佐々木彬, 広瀬泰之, 佐々木憲明:コンクリート表面に生じる砂筋の発生機構および目視試験による耐久性予測に関する研究, 土木学会第 63 回年次学術講演会, V-520, pp.1039-1040, 2008.

【内容】

透明な型枠を用いてコンクリートの打重ね時に発生する砂筋の発生機構を明らかにするとともに, その外観と耐久性の関係を検討することを目的として, 実験を行った。

【結果】

砂すじが確認された場合, 健全なものと比較して著しく耐凍害性が低下することが確認された。また, 砂筋の目視評価結果と耐凍害性には相関性があることが明らかとなった。

⑧竹田宣典, 平田隆祥, 十河茂幸, 芳賀孝成:透水性シートを用いた型枠によるコンクリート表面の品質改善, コンクリート工学年次論文報告集, 11-1, pp.683-688, 1989.

【内容】

表面気泡の低減を目的として, 傾斜面及び鉛直面に透水性シートを用いた型枠を使用した場合のコンクリートの表面強度や中性化深さ, 塩分浸透深さを調査した。

【結果】

透水性シートを用いることにより, 表面のあばた率が 3~5%から 0.1%程度に低減するとともに, 表面強度が大きく増加し, 同時に中性化深さ, 塩分浸透深さが大きく低減した。

4. まとめ

- (1) プレキャスト PC 部材用コンクリートの微細ひび割れは, 乾燥期間が長くなるほど増加し, 特に高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた配合が目立つことが多い。また, 水結合材比が低い配合の方が, 水結合材比の高い配合より, 微細ひび割れが発生しやすい傾向がみられた。これらの原因としては, 緻密なコンクリートの方が, 水分逸散が表層部のみで卓越するため, 内部と表面で収縮量の差が大きくなり, 乾燥収縮による亀甲状の微細ひび割れが打込み面に生じやすくなることが考えられる。
- (2) 微細ひび割れの発生に, 前養生時間の長さが及ぼす影響は極めて大きく, 前養生時間が短い場合には, 非常に多くの微細ひび割れが発生する。また, 降温速度も微細ひび割れの性状に及ぼす影響は比較的大きく, 降温速度が大きい場合は, コンクリート組織の緻密さを欠如させる原因となり, コンクリートの強度を低下させる傾向がある。
- (3) 蒸気養生終了後に発生するひび割れのうち, 0.05mm 程度以下の微細なひび割れは, 塩化物イオン浸透抵抗性と中性化抵抗性に与える影響は認められない。しかし, 二次養生が適切に行われずに急激な乾燥等の影響を受けた場合, これらのひび割れが進展成長し耐久性を損なう可能性がある。
- (4) 砂すじが発生すると, その程度により耐凍害性が大きく損なわれる可能性がある。また, 表面気泡に関しては, 透水型枠を用いることにより表面気泡を低減すると, 表面強度が向上し耐久性が改善する効果があると考えられる。

付録ー7 PCa 製品の製造に関するアンケート調査結果

1. 概要

国内では既に多くの PCaPC 工場で混和材を用いた PCaPC 部材の製造を行っている。ここでは、このマニュアル(案)の付録として、国内の PCaPC 工場における PCaPC 部材の製造実態を調査した結果を示す。プレストレスト・コンクリート建設業協会会員会社 12 社の 42 工場を対象に、過去 3 年間(平成 26 年度から平成 28 年度)の実績についてのアンケート調査を実施した。

主なアンケート実施項目は以下のとおりである。なお、実施したアンケートの調査票を 4 節に示す。

・生産実績

対象工場における早強ポルトランドセメント単味のコンクリートや混和材を用いたコンクリートの生産実績について

・製造方法

早強ポルトランドセメント単味のコンクリートや混和材を用いたコンクリートにおける促進養生時の温度管理や後養生方法について

・工場設備

混和材貯蔵設備や計量機、養生プール等の有無について

・配合

スランプ値や水結合材比の設定について

2. アンケート調査結果

2.1 アンケートの回答総数及び生産実績

2.1.1 回答総数

12 社、42 工場(鉄筋・無筋コンクリート部材のみを製造する工場は対象外)

2.1.2 生産実績

各工場の生産実績を付表ー1 に示す。

付表ー1 アンケート対象工場の実績(42 工場)

部材 \ 配合	早強ポルトランドセメント単味	早強ポルトランドセメント + 高炉スラグ微粉末	早強ポルトランドセメント + フライアッシュ
プレテンション部材	39	12	4
セグメント	37	12	2
床版	34	14	2

2.2 製造方法について

2.2.1 早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの蒸気養生

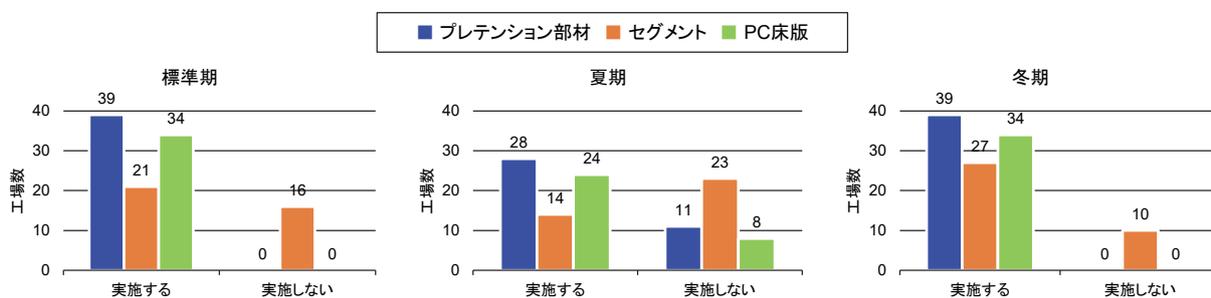
(1) 蒸気養生の実施

早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおける蒸気養生の実施の有無を付図-1 に示す。プレテンション部材及び PC 床版の場合は、標準期と冬期には必ず実施している。しかし、夏期にはプレテンション部材で 39 工場のうち 11 工場で、PC 床版で 32 工場のうち 8 工場で実施していない。セグメントの場合には、季節にかかわらず蒸気養生を実施しない場合があり、特に夏期は 37 工場のうち 23 工場で蒸気養生を実施していない。これは、部材寸法が大きく水和反応に起因した発熱が大きくなり、また、ポストテンション方式であり早期のプレストレス導入強度の発現が必要ないためと考えられる。

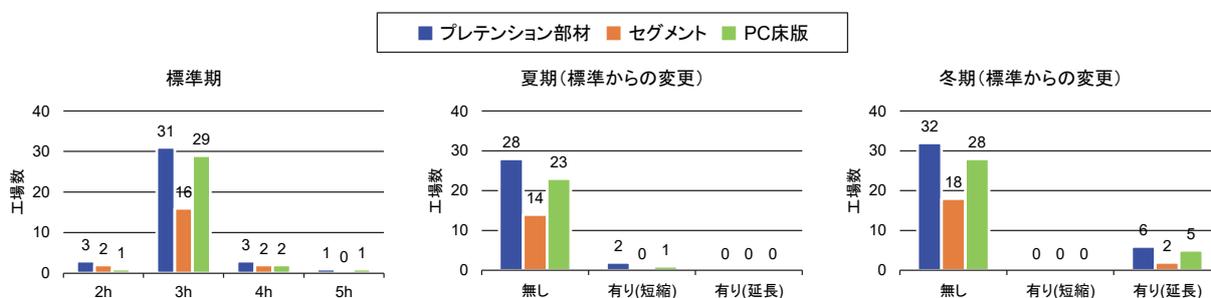
(2) 前置き方法

a) 前置き時間

早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおける蒸気養生の前置き時間を付図-2 に示す。部材の違いにかかわらず多くの工場で前置き時間は 3 時間としている。また、標準期からの前置き時間の変更については、夏期においてプレテンション部材では 30 工場のうち 2 工場で、PC 床版では 24 工場のうち 1 工場で短縮の場合があった。セグメントでは夏期において前置き時間の変更はなかった。冬期においては、プレテンション部材では 38 工場のうち 6 工場で、セグメントでは 20 工場のうち 2 工場で、PC 床版では 33 工場のうち 5 工場で前置き時間の延長があった。こ



付図-1 蒸気養生の実施



付図-2 前置き養生

のように、前置き時間については、各工場のノウハウとなるが3時間が最多であり夏期は短縮、冬期は延長の傾向がみられた。

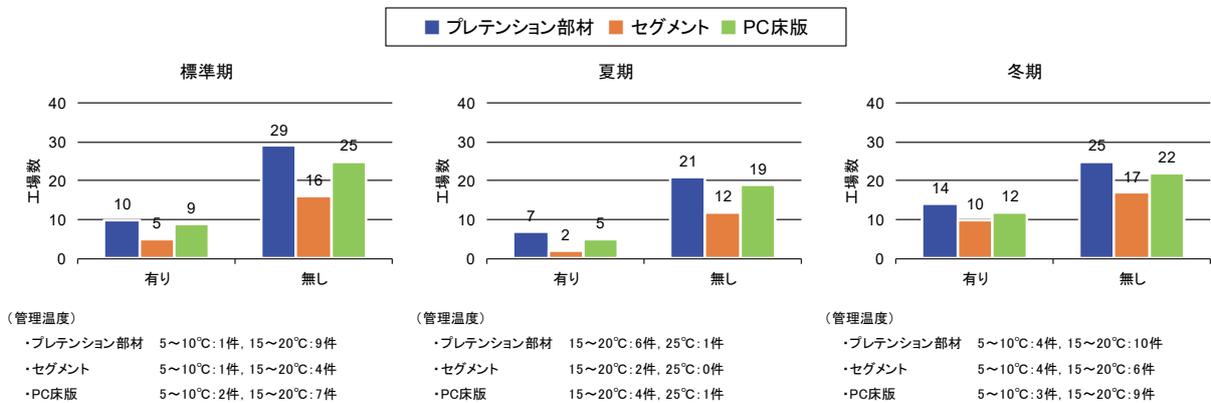
b) 温度管理の実施

早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおける前置き時の温度管理の実施の有無を付図-3に示す。標準期ではプレテンション部材では39工場のうち10工場、セグメントでは21工場のうち5工場、PC床版では34工場のうち9工場で無しとの回答であり温度管理を実施している工場は少ない。夏期において温度管理の実施の有無の割合はほぼ変わらないが、冬期においてはプレテンション部材では39工場のうち14工場、セグメントでは27工場のうち10工場、PC床版では34工場のうち12工場で温度管理を実施するとの回答であり、温度管理を行う工場が増加している。これは、前置き時の温度管理は部材ごとに固定されているものではなく、雰囲気温度の違いにより各工場適切に計画、管理しているためと考えられる。

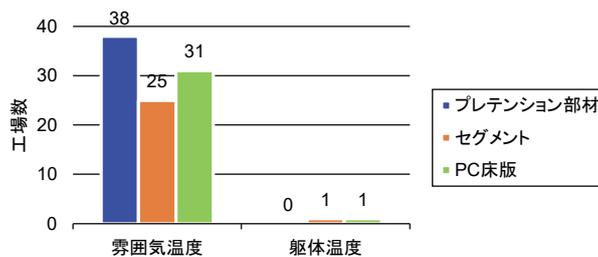
(3) 蒸気養生の方法

a) 温度管理の方法

早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおける温度管理の方法を付図-4に示す。プレテンション部材では全ての工場で雰囲気温度によって管理しているとの回答であった。セグメント及びPC床版では、各々1工場のみ躯体温度で温度管理を行っていた。この結果から各工場における蒸気養生の温度管理の方法は雰囲気温度によるものが主であることが分かる。



付図-3 温度管理の実施



付図-4 温度管理の方法

b) 昇温速度

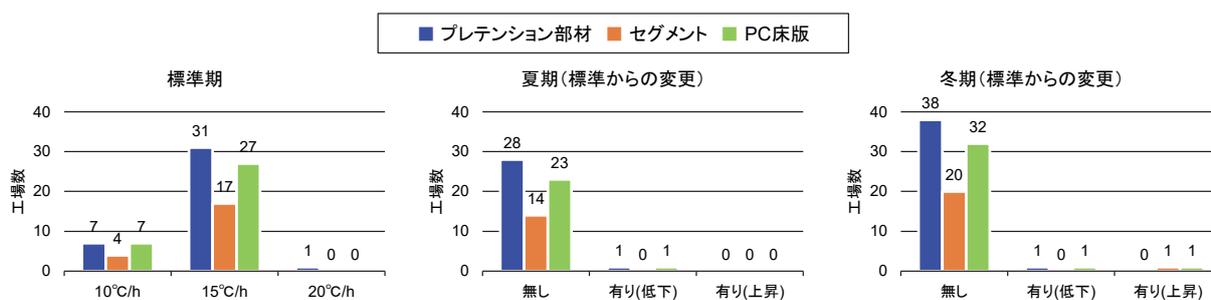
早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおける蒸気養生の昇温速度を付図-5に示す。全ての部材において15°C/hが最多であった。プレテンション部材における蒸気養生の昇温速度は10°C/hが39工場のうち7工場、20°C/hが39工場のうち1工場であった。セグメント及びPC床版における昇温速度は20°C/hはなく10°C/hがそれぞれ21工場のうち4工場、34工場のうち7工場であった。また、標準期からの昇温速度の変更は全ての部材において少なかった。このように、昇温速度においては部材や季節によらず標準期と同程度の昇温速度を採用している工場が多い。

c) 最高温度

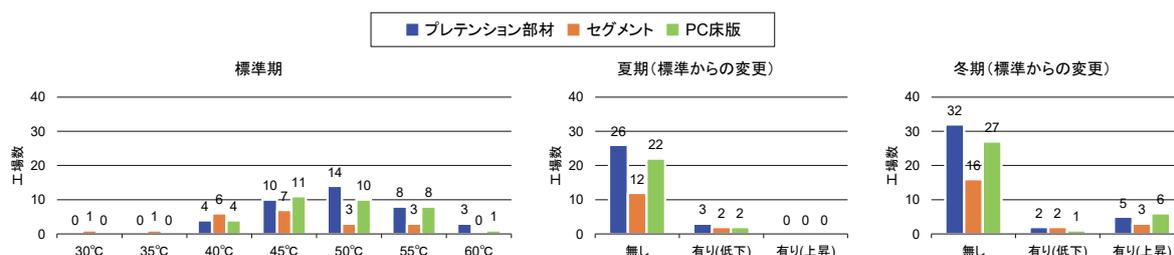
早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおける蒸気養生の最高温度を付図-6に示す。プレテンション部材は標準期では40°C~60°Cであり、50°Cが最多であった。夏期では最高温度を下げる場合があり冬期では上げる場合と下げる場合があった。冬期で最高温度を低下させた2工場については最高温度の維持時間を延長していた。PC床版においても同様の傾向であった。セグメントについても夏期及び冬期の傾向はプレテンション部材やPC床版と同様であるが、標準期においては蒸気養生の最高温度が30°C~55°Cであり、45°Cが最多であるように最高温度の設定が低い結果が確認できた。これは、2.2.1(1)で述べたようにセグメントは部材寸法が大きくまた早期の強度発現が必要ないためだと思われる。

d) 維持時間

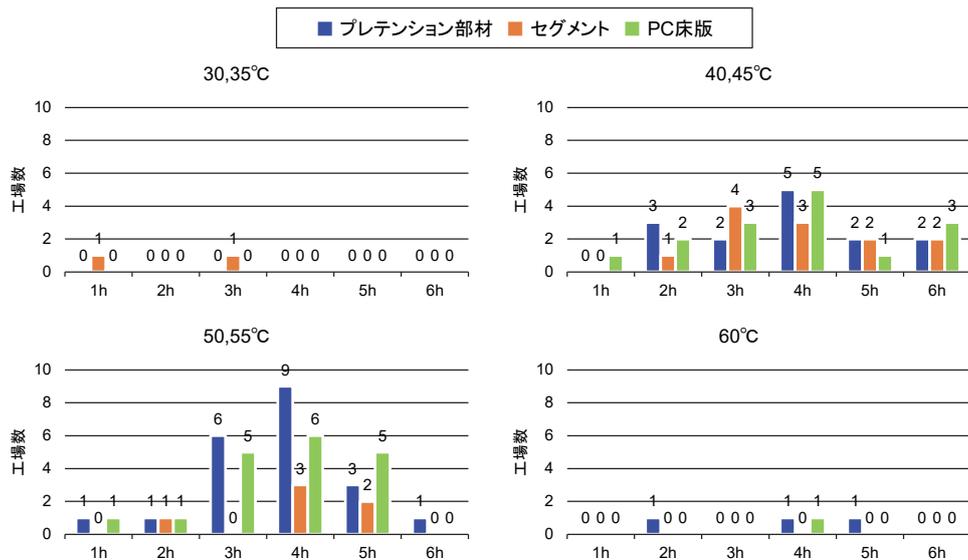
早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおける蒸気養生の最高温度の維持時間を付図-7に示す。各工場によりばらつきが大きいものの、プレテンション部材においては、40°C~45°C及び50°C~55°Cでは4時間が最多となった。PC床版においても同様に4時間が最多となった。セグメントにおいては40°C~45°Cでは3時間が50°C~55°Cでは4時間が最多となった。最高温度の維持時間においても、セグメントがプレテンション部材やPC床版に比べ比較的短い傾向がみられた。



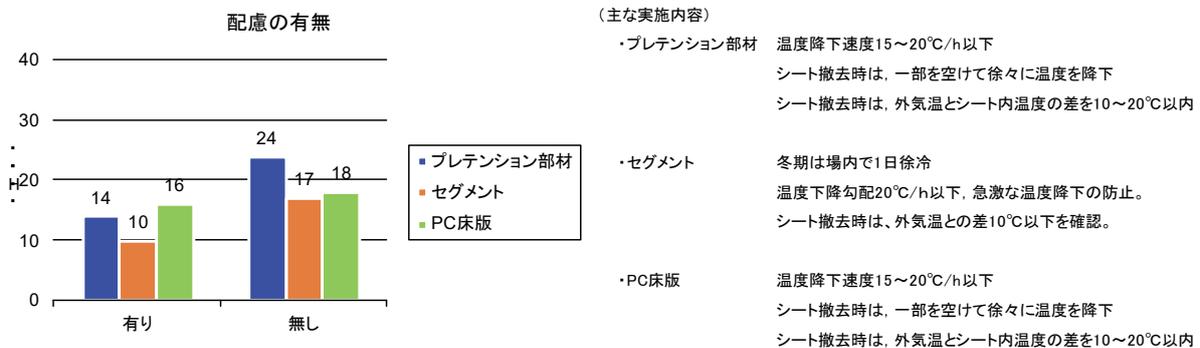
付図-5 昇温速度



付図-6 最高温度



付図-7 最高温度の維持時間



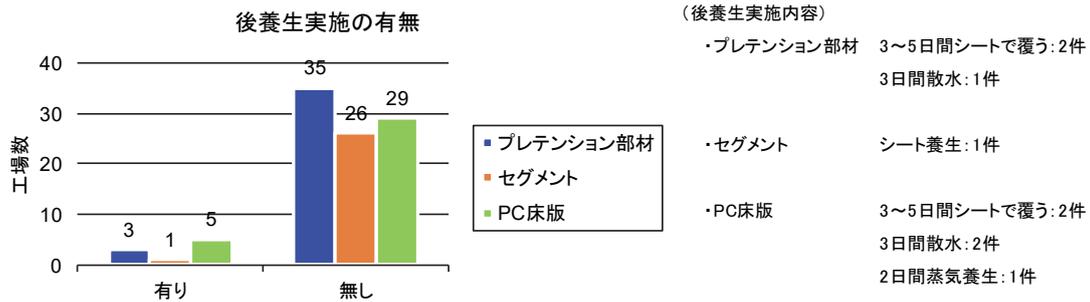
付図-8 降温時の配慮

e) 降温時の配慮

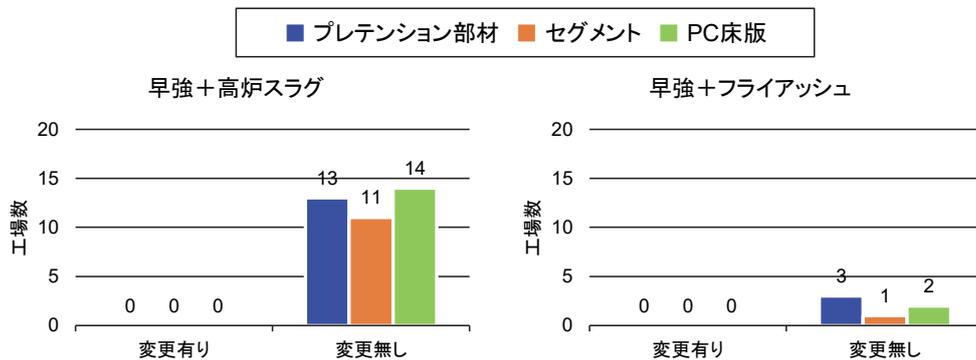
早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおける蒸気養生の降温時の配慮の有無及びその主な実施内容を付図-8に示す。プレテンション部材及びセグメントにおいて特に配慮していない場合が、それぞれ 38 工場のうち 24 工場、27 工場のうち 17 工場あり多くなっている。PC 床版においては、34 工場のうち 16 工場で配慮していると回答があり、降温時に配慮している工場が比較的多い。降温時の配慮事項として部材の急冷を避けるため、シート撤去時の温度差の管理や降温速度を 20°C/h 以下とする等の回答があった。

(4) 後養生

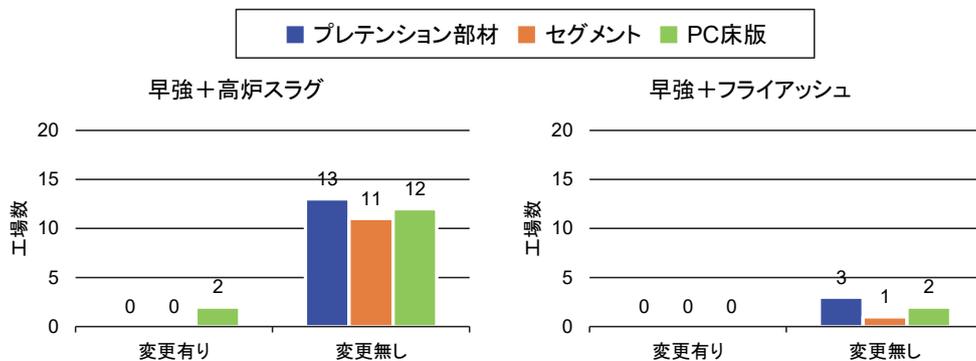
早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおける後養生の実施の有無及びその主な実施内容を付図-9に示す。各部材ともに実施していない場合が多い結果であった。しかし、従来から用いられている早強ポルトランドセメント単味のコンクリートにおいても少数だが後養生を行うとの回答があり、その内容はシートで 3~5 日覆う、3 日間散水養生を行うとのことであった。



付図-9 後養生の実施



付図-10 蒸気養生の実施(早強ポルトランドセメント単味からの変更)



付図-11 前置き方法(早強ポルトランドセメント単味からの変更)

2.2.2 混和材使用時の蒸気養生(早強ポルトランドセメント単味からの変更の有無)

(1) 蒸気養生の実施

混和材使用時における蒸気養生の実施について早強ポルトランドセメント単味からの変更の有無を付図-10に示す。全ての部材において高炉スラグ微粉末、フライアッシュともに変更無しであった。この結果、蒸気養生の実施の有無は混和材使用の影響よりも季節や部材の違いにより各工場で計画していることが分かる。

(2) 前置き方法

混和材使用時における前置き時間とその温度について早強ポルトランドセメント単味からの変更の有無を付図-11に示す。ほぼ全ての工場において変更は無しであった。しかし高炉スラグを用いたPC床版において14工場のうち2工場に変更有りであった。これは、標準期において1時間前置き時間を延長したものであった。

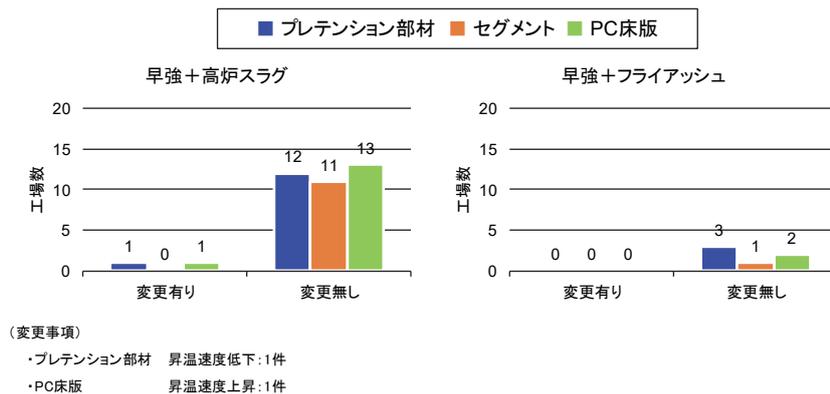
(3) 蒸気養生の方法

a) 昇温速度

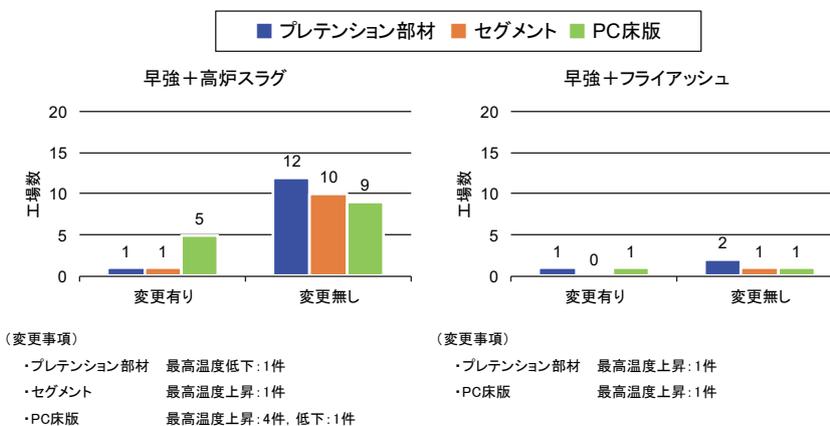
混和材使用時における蒸気養生の昇温速度について早強ポルトランドセメント単味からの変更の有無を付図-12に示す。ほぼ全ての工場において変更は無しであった。しかし高炉スラグを用いたプレテンション部材及びPC床版においてそれぞれ1工場に変更有であった。これは、プレテンション部材においては昇温速度の低下、PC床版においては昇温速度の上昇であった。

b) 最高温度

混和材使用時における蒸気養生の最高温度について早強ポルトランドセメント単味からの変更の有無を付図-13に示す。プレテンション部材及びセグメントではほぼ全ての工場において変更は無しとの回答であった。しかし、PC



付図-12 昇温速度(早強ポルトランドセメント単味からの変更)

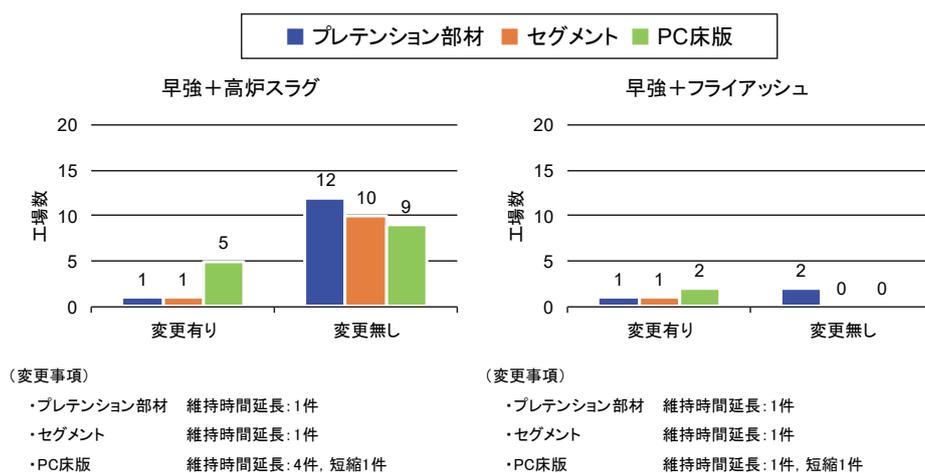


付図-13 最高温度(早強ポルトランドセメント単味からの変更)

床版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から最高温度を上昇したことが多い。これは、部材厚さが薄い PC 床版にプレストレスを早期に導入するため強度発現を促す目的だと考えられる。また、最高温度を低下させた 1 工場は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの場合季節によらず 55°C 一定であったものが、混和材を用いて PC 床版を製造するとき、季節によらず最高温度を 50°C 一定としているものである。

c) 維持時間

混和材使用時における蒸気養生の維持時間について早強ポルトランドセメント単味からの変更の有無を付図-14 に示す。プレテンション部材及びセグメントにおいて、高炉スラグ及びフライアッシュについてはほぼ全ての工場に変更は無しであった。しかし、PC 床版においては早強ポルトランドセメント単味のコンクリートから最高温度と同様に維持時間を変更する割合が多い。これも、「b) 最高温度」と同様に強度発現を促すためだと思われる。また、維持時間を短縮している高炉スラグの 1 工場は早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの場合の標準期の最高温度を 45°C とし維持時間を 6 時間としていたものを、混和材を用いて PC 床版を製造するとき、最高温度を 55°C に上げ維持時間を 4 時間としたものである。同様に維持時間を短縮したフライアッシュの 1 工場は標準期のデータであり、最高温度は 55°C と同じであるが、維持時間を早強ポルトランドセメント単味のコンクリートの場合の 5 時間からフライアッシュ使用時に 4 時間に短縮したものである。



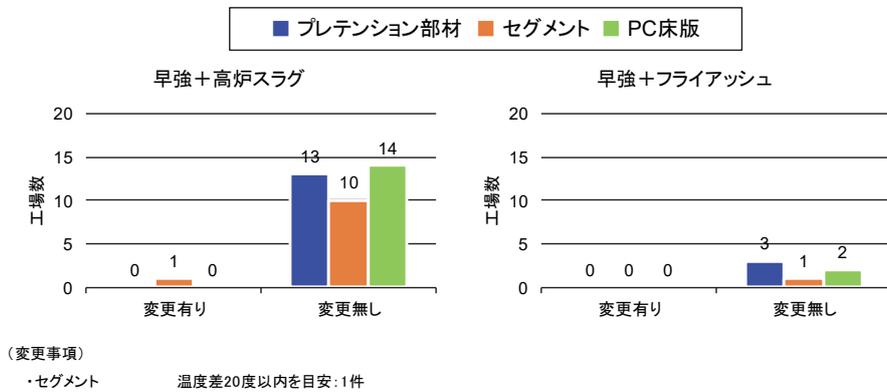
付図-14 最高温度の維持時間(早強ポルトランドセメント単味からの変更)

d) 降温時の配慮

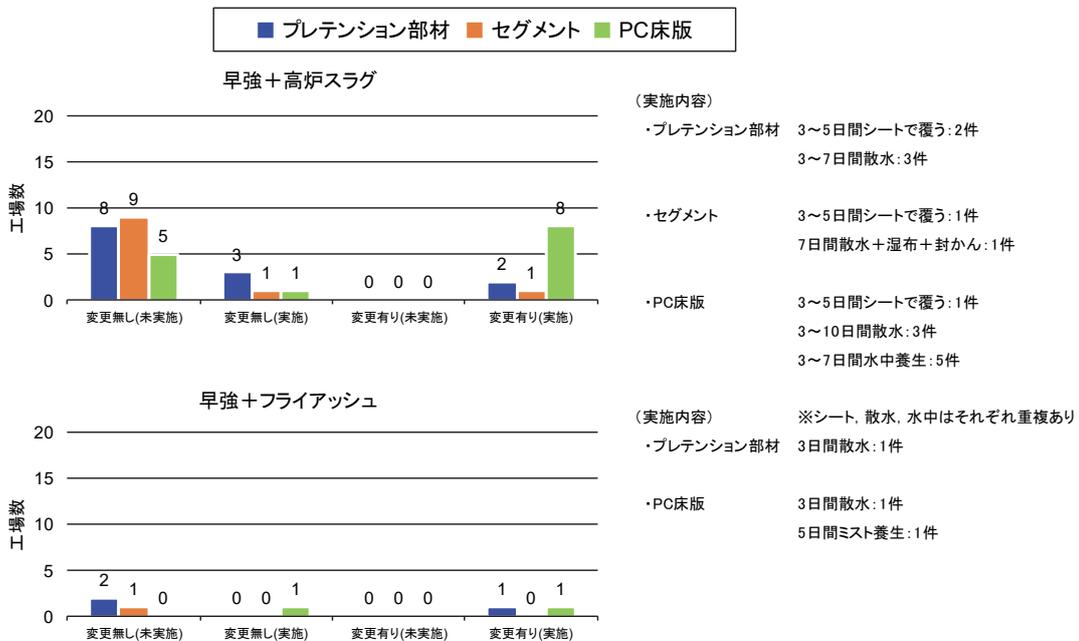
混和材使用時における蒸気養生の降温時の配慮について早強ポルトランドセメント単味からの変更の有無を付図-15に示す。ほぼ全ての工場において変更は無しであった。これは、降温時の配慮の有無は混和材使用の影響よりも季節や部材の違いにより各工場で決められたルールにより実施されているためだと思われる。

(4) 後養生

混和材使用時における後養生の実施について早強ポルトランドセメント単味からの変更の有無を付図-16に示す。プレテンション部材及びセグメントにおいては実施していない場合が多く、それぞれ16工場のうち10工場、12工場のうち10工場であった。PC床版においては実施している場合が16工場のうち11工場と多い。なお、PC床版の高耐久化を図るために混和材を使用したコンクリートにおいては、散水養生等の後養生を行うことを標準仕様としている発注者もある。



付図-15 降温時の配慮(早強ポルトランドセメント単味からの変更)



付図-16 後養生の方法(早強ポルトランドセメント単味からの変更)

2.3 製造方法に関するまとめ

アンケート回答工場における各部材の早強ポルトランドセメント単味と混和材使用時の変更事項について以下のことが確認できた。

プレテンション部材については、前置き時と蒸気養生時の温度設定において、夏期と冬期に標準期から変更する場合がみられた。また、少数ではあるが後養生を行う工場もあった。総じて混和材使用時の早強ポルトランドセメント単味からの変更事項は少なかった。

セグメントについては、プレテンション部材と比較して、蒸気養生を実施しない場合が多く、最高温度の設定が低い傾向がみられた。また、後養生の実施例がほとんど確認できなかった。プレテンション部材と同様にセグメントにおいても混和材使用時の早強ポルトランドセメント単味からの変更事項は少なかった。

PC 床版については、プレテンション部材の傾向とおおむね同様であった。また、混和材使用時に、蒸気養生の最高温度を変更する工場が多くみられた。混和材使用時に散水養生等の後養生を標準仕様としている発注者もあり、PC 床版製作時には後養生を実施する割合は多かった。

2.4 工場設備

2.4.1 混和材関連設備

(1) 混和材貯蔵設備

混和材の使用にあたっては、混和材を貯蔵するサイロが必要となる。混和材の貯蔵設備に関するアンケートは、34 工場より回答が得られ、その内訳は「セメントサイロを流用している」が 10 工場、「専用のサイロを有する」工場が 22 件、「その他」として貯蔵ビンに直接圧送するか手投入の 2 件である(付図-17 参照)。

アンケートの結果から貯蔵設備が混和材使用の弊害になる可能性は少ないが、セメントサイロを流用している工場では、混和材を使用しないコンクリートと製造時期が重なる場合、セメントの納入間隔が短くなる等の影響がある。

(2) 混和材の種類

混和材の種類に関するアンケートでは、21 工場より回答が得られ、その内訳は「高炉スラグ微粉末」が 19 工場、「フライアッシュ」が 3 工場、「石灰石微粉末」が 1 工場である(付図-18 参照)が、フライアッシュと回答した 1 工場と石灰石微粉末と回答した 1 工場をそれぞれ高炉スラグ微粉末と複数回答である。高炉スラグ微粉末の回答が多い背景としては PC 業界内で形成される研究会等による積極的な利用や高耐久性の確保から一部で仕様として要求されたものと思われる。

(3) 特殊骨材の貯蔵

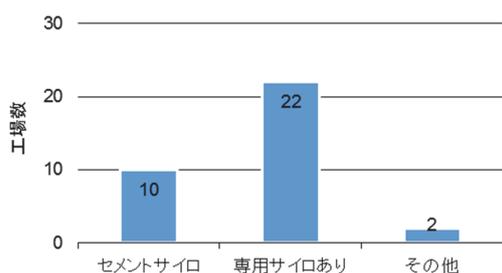
特殊骨材の貯蔵に関するアンケートでは、回答 34 工場のうち 4 工場のみ専用の置き場が貯蔵ビンを有するとの回答があり、その内訳は「専用置き場」「専用貯蔵ビン」それぞれ 2 工場である(付図-19 参照)。

特殊骨材として高炉スラグ骨材のほか軽量骨材や再生骨材が考えられるが、使用にあたって貯蔵方法について検討が必要である。

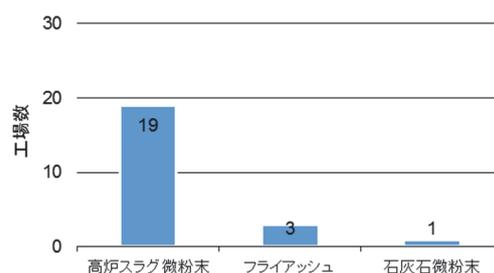
(4) 混和材の計量

混和材の計量については、35 工場のうち 15 工場専用計量器を有するとの回答が得られた(付図-20 参照)。

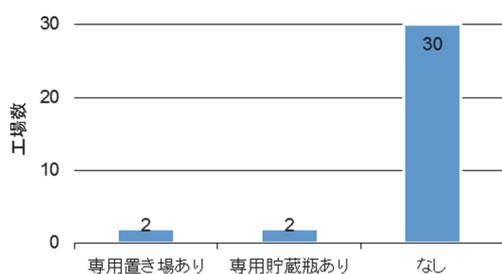
セメント及び混和材の計量誤差については、JIS A 5308 レディーミクストコンクリートを参考に、1 回計量分量の計量誤差をセメントで $\pm 1\%$ 、混和材で $\pm 2\%$ (高炉スラグ微粉末で $\pm 1\%$)としてよい。一方で、「高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針」(コンクリートライブラリー151, 土木学会)では、印字記録を残すことで累加計量が許容されている。混和材専用の計量設備を備えておらず、セメントの計量設備と兼用して累加計量を実施する場合には、練り上がったコンクリートの品質に影響がないこと、目的とする耐久性が得られることを事前に確認する必要がある。



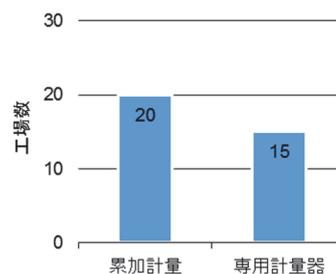
付図-17 混和材貯蔵施設



付図-18 混和材の種類



付図-19 特殊骨材の貯蔵



付図-20 混和材の計量

2.4.2 養生設備

(1) 養生用プール

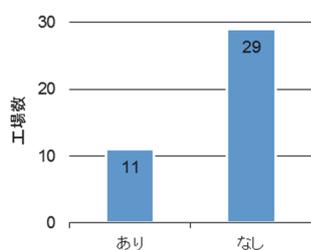
品質向上を目的としてコンクリート製品の水中養生について、養生プールを有する工場は回答を得た 40 工場のうち 11 工場であった(付図-21 参照)。近年、高炉スラグ微粉末を用いた PCaPC 床版の蒸気養生後の水中養生が仕様として求められる場合もあり、養生用プールの保有工場は今後増加が見込まれる。

養生用プールを保有する 11 工場について、その深さは 1m 未満が 7 工場と最も多く、1m 以上 2m 未満が 3 工場、2m 以上が 1 工場である(付図-22(a)参照)。深さ 1m 未満の工場が多い要因として、プレテン桁や床版が多く養生されているためと推測され、セグメント桁等の部材高さのある製品への適用では、対応できる工場が限定される。

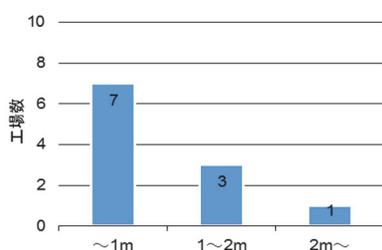
養生用プールの容積は 200m³ 未満が 1 工場、200m³ 以上 400m³ 未満が 4 工場、400m³ 以上 600m³ 未満が 5 工場、600m³ 以上が 1 工場であり(付図-22(b)参照)、養生日数が、養生する製品の形状や数量の制約を受ける可能性がある。

(2) 実績

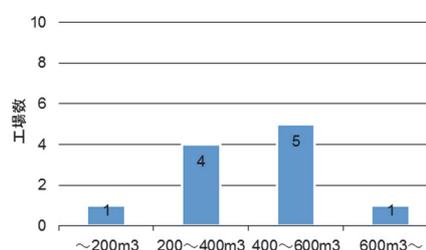
養生用プールを保有する 11 工場の製品の製造実績について、早強ポルトランドセメント単味のコンクリートを用いたプレテン桁は全ての工場で作成されており、セグメントは 10 工場、床版は 9 工場で作成されている(付図-23 参照)。これに対して早強+高炉スラグ微粉末のコンクリートを用いたプレテン桁が 3 工場、セグメントが 2 工場であるのに対して床版は 6 工場で作成されている。また、養生用プールを保有する全ての工場でフライアッシュは使用されていない。



付図-21 養生用プール設備

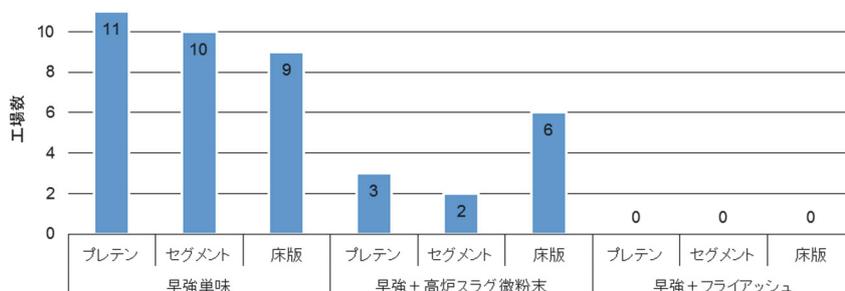


(a)深さ



(b)容積

付図-22 養生用プールの規模



付図-23 養生用プール保有工場の製品実績

(3) その他の養生設備

その他の養生設備について、設備を有する工場は回答を得られた 36 工場のうち 2 工場であった(付図-24 参照)。1 工場はミスト養生の設備を有してあり、もう 1 工場の設備は不明である。

2.5 配合について

2.5.1 早強ポルトランドセメント単味の標準配合

(1) スランプ値

a) スランプ設定値

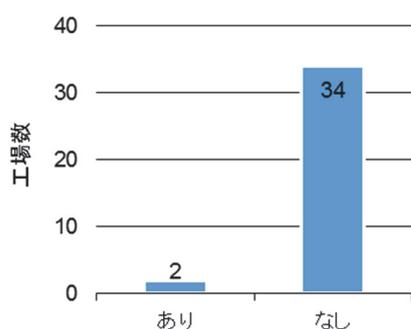
スランプの設定値を付図-25 に示す。回答件数は 52 件であり、約 70%が 12cm であった。

b) 水結合材比とスランプ値の関係

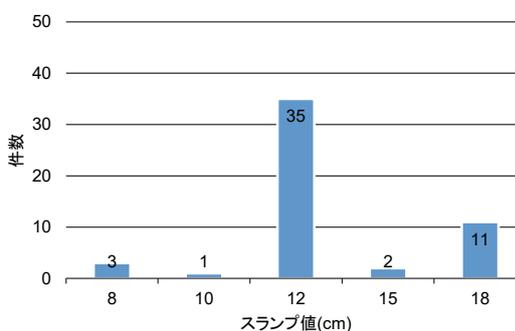
水結合材比とスランプ値の関係を付図-26 に示す。水結合材比は 35.5~36%に設定されている場合が多く、スランプ 12cm では 13 件、すべてのスランプで 19 件であった。しかし、水結合材比はスランプ値によって幅広い範囲で設定されており、両者に関係性は見られなかった。

c) 単位水量とスランプ値の関係

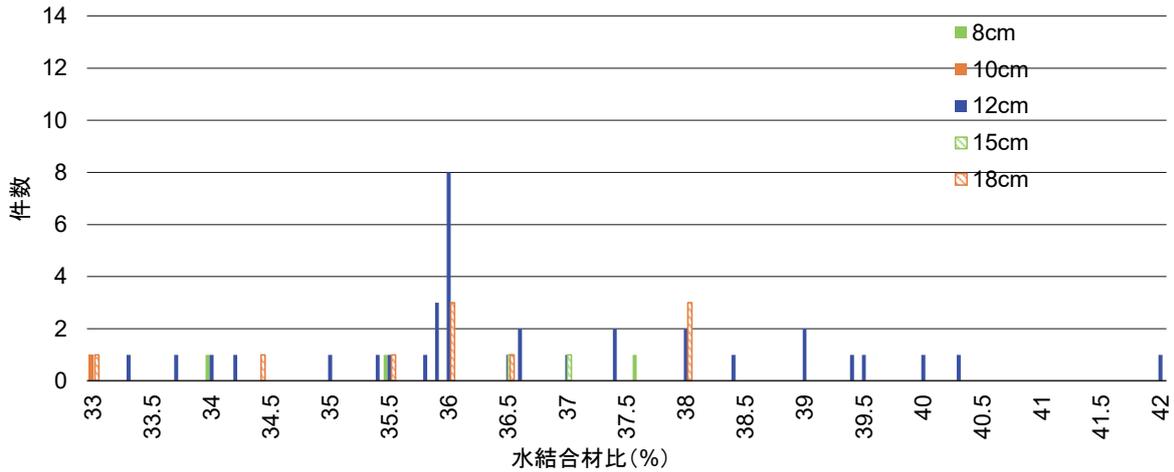
単位水量とスランプ値の関係を付図-27 に示す。単位水量は 150~160kg/m³ に設定されている場合が多く、スランプ 12cm で 25 件、すべてのスランプで 35 件であった。単位水量においても水結合材比の場合と同様に、スランプ値によって幅広い範囲で設定されていた。



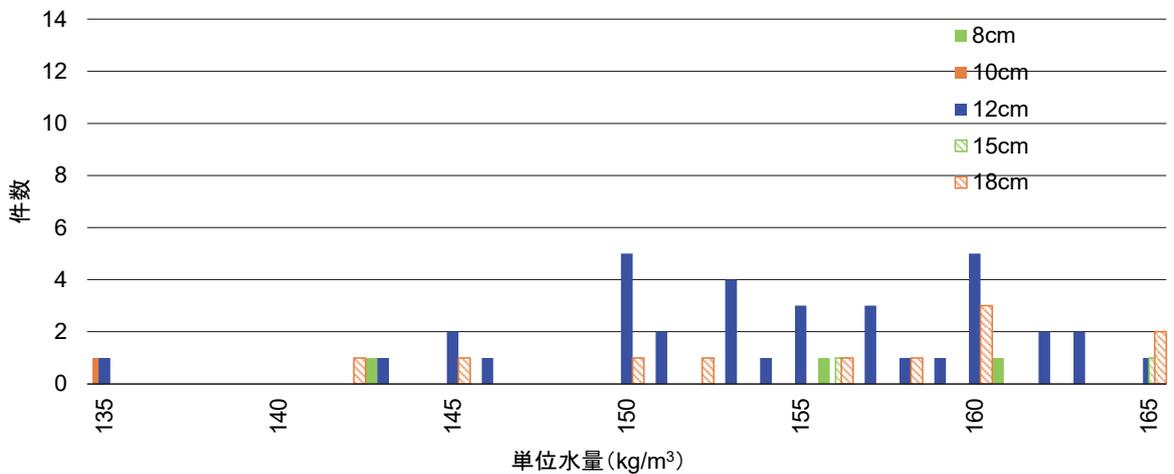
付図-24 その他養生用設備



付図-25 スランプ設定値



付図-26 水結合材比とスランブ値の関係



付図-27 単位水量とスランブ値の関係

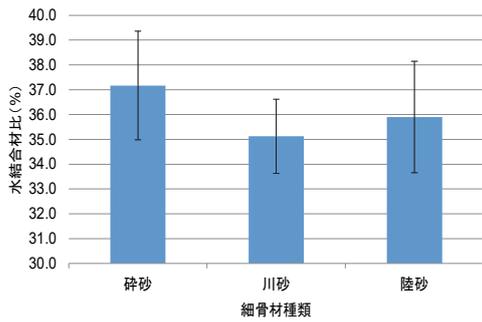
d) まとめ

早強ポルトランドセメント単味を使用した標準配合では、スランブ値を 12cm に設定している場合が多かったが、スランブの設定値と水結合材比または単位水量の関係に明確な相関は確認されなかった。PC 工場で日常的に用いられる早強ポルトランドセメントを用いた標準配合に関しては、骨材等の使用材料や、外気温及び養生温度等の環境条件のような様々な要因を考慮して目標スランブ値を設定しているものと考えられ、単一の条件との比較では相関が現れにくかったものと考えられる。

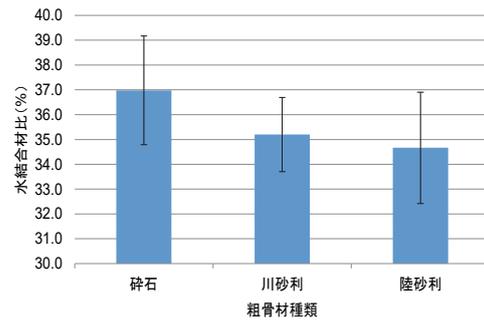
(2) 骨材種類

a) 水結合材比と骨材種類の関係

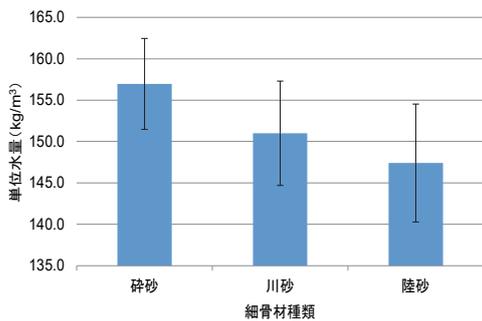
標準配合の水結合材比と使用している細骨材及び粗骨材との関係を付図-28 及び付図-29 に示す。細骨材については、砕砂と比較して川砂を使用した配合の水結合材比が低い傾向であった。粗骨材においてもその傾向は同様であった。一般的に、砕砂や砕石に比べて川砂(砂利)や陸砂(砂利)は骨材自身の強度が低く、砕砂や砕石を



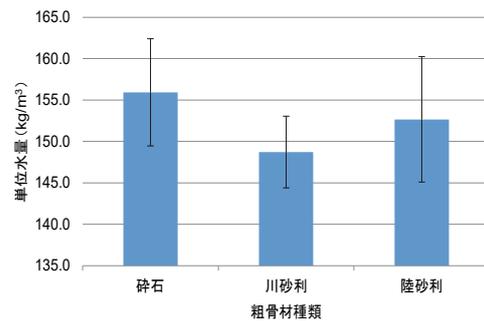
付図-28 水結合材比と細骨材種類の関係



付図-29 水結合材比と粗骨材種類の関係



付図-30 単位水量と細骨材種類の関係



付図-31 単位水量と粗骨材種類の関係

使用した場合に比べてコンクリートの圧縮強度が低くなる傾向にあることが報告されており、本調査でも同様の傾向が確認されたものと考えられる。

b) 単位水量と骨材種類の関係

標準配合の単位水量と使用している細骨材及び粗骨材との関係を付図-30及び付図-31に示す。に示す。細骨材については、砕砂に比べて川砂と陸砂の単位水量が小さくなる傾向であった。粗骨材においてもその傾向は同様であった。砕砂及び砕石は岩石を破砕する等して製造されるため、尖った形状をしている。一方で川砂(砂利)や陸砂(砂利)は比較的球形に近い形状をしているため、コンクリートの流動性を向上させ単位水量を低減できるものと考えられる。

c) まとめ

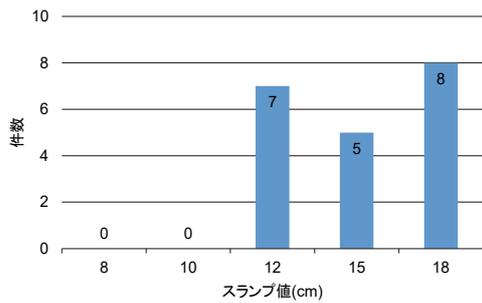
細骨材や粗骨材はその強度や形状によってコンクリートの水結合材比や単位水量に影響を及ぼすことが確認された。

2.5.2 混和材を用いた配合

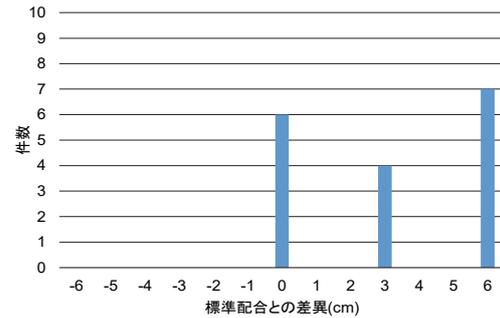
(1) 高炉スラグ微粉末 6000

a) スランプ設定値

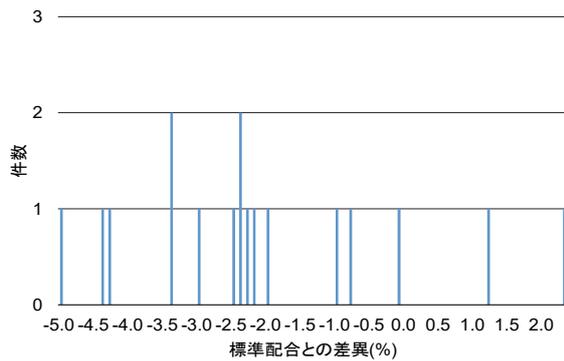
スランプの設定値を付図-32に示す。回答件数は20件であり、8cm及び10cmに設定している配合はなかった。高炉スラグ微粉末 6000 をセメント重量の 50%置換して使用する場合、早強ポルトランドセメントを使用した同一水結



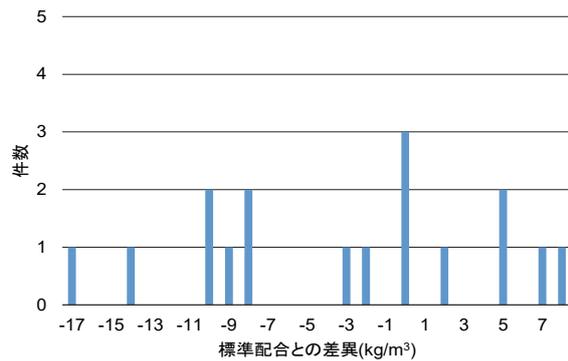
付図-32 スランプ設定値



付図-33 標準配合とのスランプ設定値の差異



付図-34 標準配合との水結合材比の差異



付図-35 標準配合との単位水量の差異

合材比の配合と比較して初期材齢の強度が小さくなる傾向にあるため、水結合材比を低く設定する必要がある。水結合材比が小さくなると単位結合材量が増加するため、コンクリートの粘性が増加し、また、結合材のブレン比表面積が大きくなることによっても粘性が増加する傾向がある。コンクリートの粘性が大きいと施工性に影響するため、スランプ値を比較的大きく設定しているものと考えられる。

b) 標準配合とのスランプ設定値の差異

標準配合(早強ポルトランドセメント単味の配合)で設定されているスランプ値と高炉スラグ微粉末 6000 を使用した配合のスランプ値の差異を付図-33 に示す。なお、比較対象とした標準配合はスランプ設定値が 12cm である配合とした。高炉スラグ微粉末 6000 を用いた配合 17 件のうち、11 件が標準配合よりもスランプ値を高く設定していた。これは、前述したとおり、施工性を考慮しているためと考えられる。

c) 標準配合との水結合材比の差異

標準配合で設定されている水結合材比と高炉スラグ微粉末 6000 を使用した配合の水結合材比の差異を付図-34 に示す。水結合材比はほとんどの配合で標準配合よりも低くなる傾向であり、最も差が大きい場合で-5.0%であった。これは、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末に置換することで標準配合に比べて初期強度が発現しにくくなるため、初期材齢で標準配合と同程度の強度を得るために水結合材比を小さくしているものと考えられる。

d) 標準配合との単位水量の差異

標準配合で設定されている単位水量と高炉スラグ微粉末 6000 を使用した配合の単位水量の差異を付図-35 に示す。単位水量は標準配合と比較して小さく設定される傾向があった。これは、高炉スラグ微粉末 6000 を 50%置換することによって標準配合よりも単位水量を小さくできること、また、単位水量を小さく抑えることで単位結合材量も小

さくし、粘性の低減を図っていること等が理由と考えられる。

e) まとめ

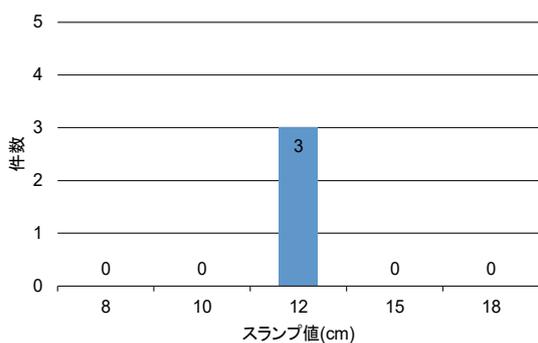
高炉スラグ微粉末 6000 を単位セメント重量の 50%置換した配合では、早強ポルトランドセメント単味を使用した標準配合と比べて、スランプ設定値は大きくなる傾向であった。また、水結合材比は標準配合よりも小さく設定される場合が多かった。これは、初期強度を確保するためと考えられる。水結合材比を小さくするとコンクリートの粘性が増加するため、施工性を考慮してスランプ設定値を大きくしていることが考えられる。一方で、単位水量は標準配合と比べて小さく設定される傾向であった。これは、単位水量を小さくすることができるという高炉スラグ微粉末 6000 の材料特性や単位結合材量を小さくして粘性を低減するという目的によるものと考えられる。

(2) 高炉スラグ微粉末 4000, フライアッシュ

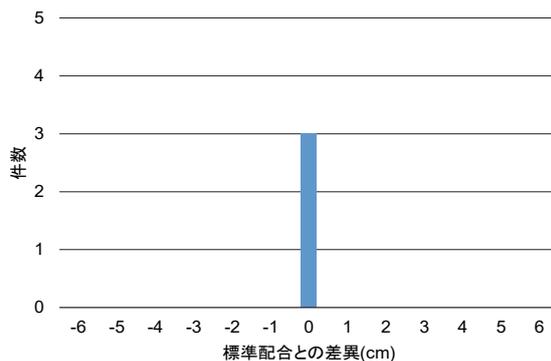
高炉スラグ微粉末 4000 とフライアッシュに関しては、件数が少なかつたため、データのみ示す。

a) 高炉スラグ微粉末 4000

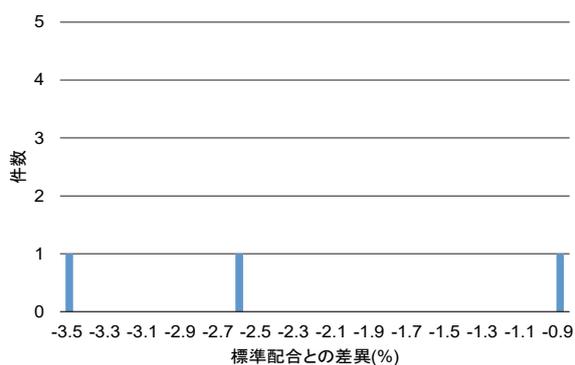
スランプ設定値を付図-36 に、スランプ設定値及び水結合材比、単位推量それぞれの標準配合との差異を付図-37～付図-39 に示す。



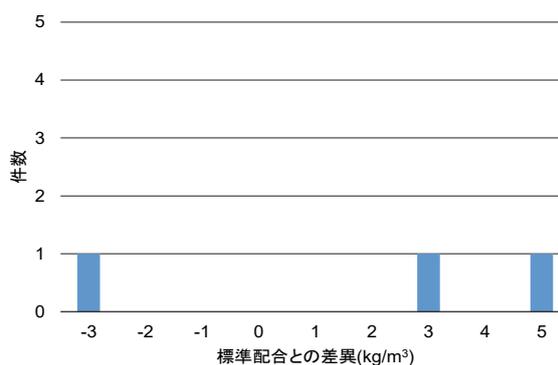
付図-36 スランプ設定値



付図-37 標準配合とのスランプ設定値の差異



付図-38 標準配合との水結合材比の差異



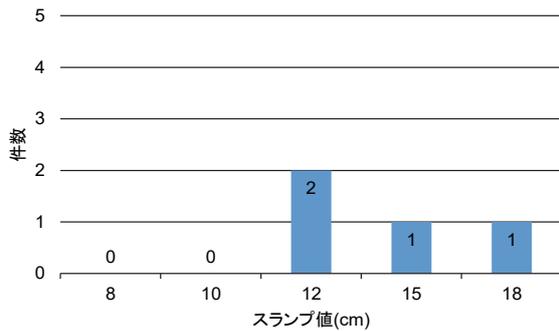
付図-39 標準配合との単位水量の差異

b) フライアッシュ

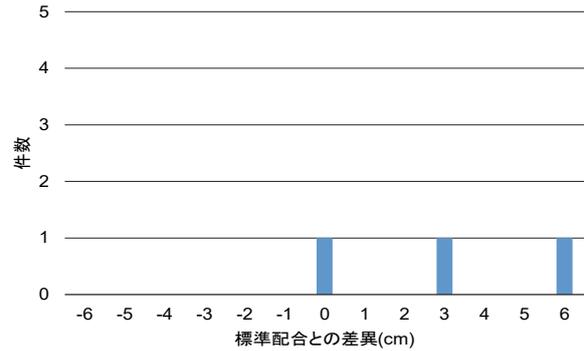
スランプ設定値を付図-40, スランプ設定値及び水結合材比, 単位推量それぞれの標準配合との差異を付図-41~付図-43に示す。

2.6 混和材使用実績について

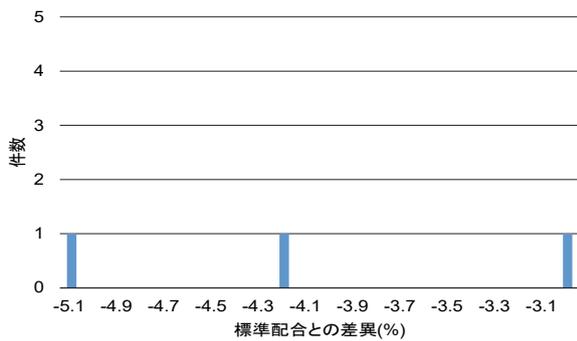
混和材を使用した配合の実績件数及び実績トン数を付図-44, 付図-45に示す。実績は平成26年度から平成28年度の3年間の集計結果を示している。



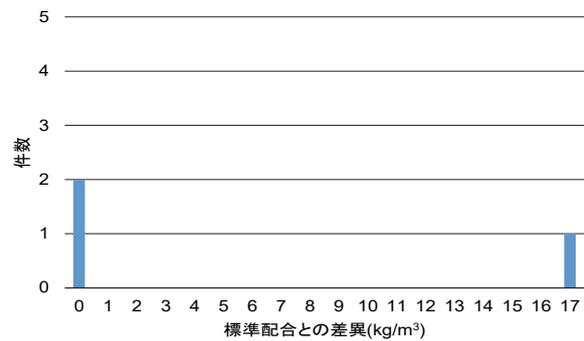
付図-40 スランプ設定値



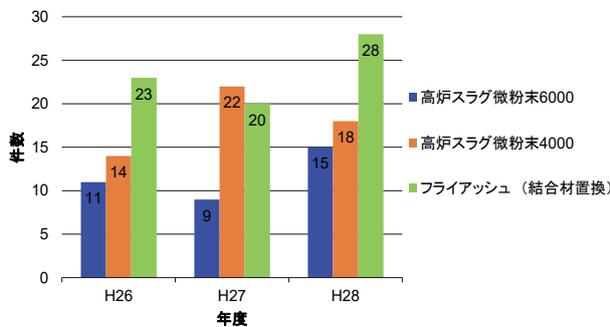
付図-41 標準配合とのスランプ設定値の差異



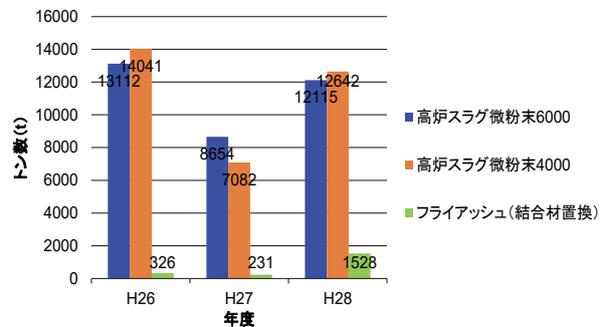
付図-42 標準配合との水結合材比の差異



付図-43 標準配合との単位水量の差異



付図-44 実施件数



付図-45 実施トン数

3. まとめ

全国 42 の PCaPC 工場を対象に、PCaPC 部材の製造実態の把握を目的としたアンケート調査を実施した。以下に得られた知見をまとめる。

(製造方法)

- プレテンション部材については、前置き時と蒸気養生時の温度設定において、夏期と冬期に標準期から変更する場合がみられた。また、少数ではあるが後養生を行う工場もあった。総じて混和材使用時の早強ポルトランドセメント単味からの変更事項は少なかった。
- セグメントについては、プレテンション部材と比較して、蒸気養生を実施しない場合が多く、最高温度の設定が低い傾向がみられた。また、後養生の実施例がほとんど確認できなかった。プレテンション部材と同様にセグメントにおいても混和材使用時の早強ポルトランドセメント単味からの変更事項は少なかった。
- PC床版については、プレテンション部材の傾向とおおむね同様であった。また、混和材使用時に、蒸気養生の最高温度を変更する工場が多くみられた。混和材使用時に散水水中養生等の後養生を標準仕様としている発注者もあり、PC床版製作時には後養生を実施する割合は多かった。

(工場設備)

- 混和材の貯蔵設備については、専用のサイロを有する工場が最も多く、セメントサイロを流用している工場の割合を上回った。
- 使用する混和材の種類については、ほとんどが高炉スラグ微粉末を使用していた。
- 混和材の計量方法は、半数以上が累加計量を実施しており、専用計量器を使用する場合を上回った。
- 養生用プールを保有する工場では、プールの深さは 1m 未満が最も多く、セグメント桁等の部材高さのある製品への適用では、対応できる工場が限定されることが確認された。

(配合)

- 早強ポルトランドセメント単味を使用した標準配合では、スランプ値を 12cm に設定している場合が多かったが、スランプの設定値と水結合材比または単位水量の関係に明確な相関は確認されなかった。
- 細骨材や粗骨材はその強度や形状によってコンクリートの水結合材比や単位水量に影響を及ぼすことが確認された。
- 高炉スラグ微粉末 6000 を単位セメント重量の 50%置換した配合では、早強ポルトランドセメント単味を使用した標準配合と比べて、スランプ設定値は大きくなる傾向であった。また、水結合材比は標準配合よりも小さく設定される場合が多かった。

4. アンケート様式

次頁以降に当該アンケートの様式を添付する。

プレキャスト製品の製造方法に関するアンケート

会社名

工場名

記入者氏名

■アンケートの目的

新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性の向上を実現するための技術指針案を作成するにあたり、より使いやすく現実に即した指針とするために、PC製品の製造の実態を調査する。

■アンケート内容

1. 蒸気養生の温度設定および脱型後の養生について
以下の表に示す使用材料を用いて製造するプレキャスト製品について、実績があれば実績欄に「○」を記入し、対応する設問に答えてください

使用材料	プレキャスト製品	実績	設問
早強セメント単味 (混和材未混和)	プレテンション部材	○	1-1
	セグメント部材	○	1-2
	PC床版	○	1-3
早強セメント + 高炉スラグ微粉末	プレテンション部材		1-4
	セグメント部材		1-5
	PC床版		1-6
早強セメント + フライアッシュ	プレテンション部材		1-7
	セグメント部材		1-8
	PC床版		1-9

※高炉スラグ微粉末のブレン値や置換率について複数の実績があり、養生方法などを変更している場合は、対応する設問のシートを複製して、それぞれの実績について記入してください。

1-1	使用材料	: セメント単味(混和材未混和)
	プレキャスト製品	: プレテンション部材

1-1-1 蒸気養生開始のタイミングについて
・ 製造時期毎に蒸気養生実施の有無にチェックし、実施する場合は打設完了から蒸気養生開始までの時間(前置き時間)を記入してください
標準期: 実施しない 実施する 時間
夏期: 実施しない 実施する 時間
冬期: 実施しない 実施する 時間
 上記以外

1-1-2 蒸気養生温度の管理方法について
・ 該当するものにチェックし、それ以外の場合は具体的に記入してください
 雰囲気温度 躯体温度
 上記以外

1-1-3 蒸気養生の昇温速度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C/時間 夏期
冬期

1-1-4 蒸気養生の最高温度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C 夏期
冬期

1-1-5 蒸気養生時の最高温度の維持時間について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○時間 夏期
冬期

1-1-6 蒸気養生後の温度降下時・シート撤去時の配慮について
・ 配慮の有無にチェックし、配慮している場合は具体的に記入してください
 配慮していない
 配慮している

1-1-7 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 該当するものにチェックして、養生日数を記入してください
 気中 水中 湿潤
後養生開始から 日以上

1-2	使用材料	: セメント単味(混和材未混和)
	プレキャスト製品	: セグメント部材

1-2-1 蒸気養生開始のタイミングについて
・ 製造時期毎に蒸気養生実施の有無にチェックし、実施する場合は打設完了から蒸気養生開始までの時間(前置き時間)を記入してください
標準期: 実施しない 実施する 時間
夏期: 実施しない 実施する 時間
冬期: 実施しない 実施する 時間
 上記以外

1-2-2 蒸気養生温度の管理方法について
・ 該当するものにチェックし、それ以外の場合は具体的に記入してください
 雰囲気温度 躯体温度
 上記以外

1-2-3 蒸気養生の昇温速度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C/時間 夏期
冬期

1-2-4 蒸気養生の最高温度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C 夏期
冬期

1-2-5 蒸気養生時の最高温度の維持時間について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○時間 夏期
冬期

1-2-6 蒸気養生後の温度降下時・シート撤去時の配慮について
・ 配慮の有無にチェックし、配慮している場合は具体的に記入してください
 配慮していない
 配慮している

1-2-7 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 該当するものにチェックして、養生日数を記入してください
 気中 水中 湿潤
後養生開始から 日以上

1-3	使用材料	: セメント単味(混和材未混和)
	プレキャスト製品	: PC床版

1-3-1 蒸気養生開始のタイミングについて
・ 製造時期毎に蒸気養生実施の有無にチェックし、実施する場合は打設完了から蒸気養生開始までの時間(前置き時間)を記入してください
標準期: 実施しない 実施する 時間
夏期: 実施しない 実施する 時間
冬期: 実施しない 実施する 時間
 上記以外

1-3-2 蒸気養生温度の管理方法について
・ 該当するものにチェックし、それ以外の場合は具体的に記入してください
 雰囲気温度 躯体温度
 上記以外

1-3-3 蒸気養生の昇温速度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C/時間 夏期
冬期

1-3-4 蒸気養生の最高温度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C 夏期
冬期

1-3-5 蒸気養生時の最高温度の維持時間について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○時間 夏期
冬期

1-3-6 蒸気養生後の温度降下時・シート撤去時の配慮について
・ 配慮の有無にチェックし、配慮している場合は具体的に記入してください
 配慮していない
 配慮している

1-3-7 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 該当するものにチェックして、養生日数を記入してください
 気中 水中 湿潤
後養生開始から 日以上

1-4 使用材料 : セメント+高炉スラグ微粉末
プレキャスト製品 : プレテンション部材

- 1-4-1 蒸気養生開始のタイミングについて
・ 製造時期毎に蒸気養生実施の有無にチェックし、実施する場合は打設完了から蒸気養生開始までの時間(前置き時間)を記入してください
標準期 : 実施しない 実施する 時間
夏 期 : 実施しない 実施する 時間
冬 期 : 実施しない 実施する 時間
 上記以外
- 1-4-2 蒸気養生温度の管理方法について
・ 該当するものにチェックし、それ以外の場合は具体的に記入してください
 雰囲気温度 躯体温度
 上記以外
- 1-4-3 蒸気養生の昇温速度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C/時間 夏 期
冬 期
- 1-4-4 蒸気養生の最高温度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C 夏 期
冬 期
- 1-4-5 蒸気養生の最高温度の維持時間について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○時間 夏 期
冬 期
- 1-4-6 蒸気養生後の温度降下時・シート撤去時の配慮について
・ 配慮の有無にチェックし、配慮している場合は具体的に記入してください
 配慮していない
 配慮している
- 1-4-7 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 該当するものにチェックして、養生日数を記入してください
 気中 水中 湿潤
後養生開始から 日以上

1-5 使用材料 : セメント+高炉スラグ微粉末
プレキャスト製品 : セグメント部材

- 1-5-1 蒸気養生開始のタイミングについて
・ 製造時期毎に蒸気養生実施の有無にチェックし、実施する場合は打設完了から蒸気養生開始までの時間(前置き時間)を記入してください
標準期 : 実施しない 実施する 時間
夏 期 : 実施しない 実施する 時間
冬 期 : 実施しない 実施する 時間
 上記以外
- 1-5-2 蒸気養生温度の管理方法について
・ 該当するものにチェックし、それ以外の場合は具体的に記入してください
 雰囲気温度 躯体温度
 上記以外
- 1-5-3 蒸気養生の昇温速度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C/時間 夏 期
冬 期
- 1-5-4 蒸気養生の最高温度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C 夏 期
冬 期
- 1-5-5 蒸気養生の最高温度の維持時間について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○時間 夏 期
冬 期
- 1-5-6 蒸気養生後の温度降下時・シート撤去時の配慮について
・ 配慮の有無にチェックし、配慮している場合は具体的に記入してください
 配慮していない
 配慮している
- 1-5-7 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 該当するものにチェックして、養生日数を記入してください
 気中 水中 湿潤
後養生開始から 日以上

1-6 使用材料 : セメント+高炉スラグ微粉末
プレキャスト製品 : PC床版

- 1-6-1 蒸気養生開始のタイミングについて
・ 製造時期毎に蒸気養生実施の有無にチェックし、実施する場合は打設完了から蒸気養生開始までの時間(前置き時間)を記入してください
標準期 : 実施しない 実施する 時間
夏 期 : 実施しない 実施する 時間
冬 期 : 実施しない 実施する 時間
 上記以外
- 1-6-2 蒸気養生温度の管理方法について
・ 該当するものにチェックし、それ以外の場合は具体的に記入してください
 雰囲気温度 躯体温度
 上記以外
- 1-6-3 蒸気養生の昇温速度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C/時間 夏 期
冬 期
- 1-6-4 蒸気養生の最高温度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C 夏 期
冬 期
- 1-6-5 蒸気養生の最高温度の維持時間について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○時間 夏 期
冬 期
- 1-6-6 蒸気養生後の温度降下時・シート撤去時の配慮について
・ 配慮の有無にチェックし、配慮している場合は具体的に記入してください
 配慮していない
 配慮している
- 1-6-7 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 該当するものにチェックして、養生日数を記入してください
 気中 水中 湿潤
後養生開始から 日以上

1-7 使用材料 : セメント+フライアッシュ
プレキャスト製品 : プレテンション部材

- 1-7-1 蒸気養生開始のタイミングについて
・ 製造時期毎に蒸気養生実施の有無にチェックし、実施する場合は打設完了から蒸気養生開始までの時間(前置き時間)を記入してください
標準期 : 実施しない 実施する 時間
夏 期 : 実施しない 実施する 時間
冬 期 : 実施しない 実施する 時間
 上記以外
- 1-7-2 蒸気養生温度の管理方法について
・ 該当するものにチェックし、それ以外の場合は具体的に記入してください
 雰囲気温度 躯体温度
 上記以外
- 1-7-3 蒸気養生の昇温速度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C/時間 夏 期
冬 期
- 1-7-4 蒸気養生の最高温度について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○°C 夏 期
冬 期
- 1-7-5 蒸気養生の最高温度の維持時間について
・ ○に入る数値を製造時期毎に記入してください 標準期
○時間 夏 期
冬 期
- 1-7-6 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 配慮の有無にチェックし、配慮している場合は具体的に記入してください
 配慮していない
 配慮している
- 1-7-7 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 該当するものにチェックして、養生日数を記入してください
 気中 水中 湿潤
後養生開始から 日以上

1-8 使用材料 : セメント+フライアッシュ
プレキャスト製品 : セグメント部材

- 1-8-1 蒸気養生開始のタイミングについて
・ 製造時期毎に蒸気養生実施の有無にチェックし、実施する場合は打設完了から蒸気養生開始までの時間(前置き時間)を記入してください
標準期 : 実施しない 実施する 時間 _____
夏期 : 実施しない 実施する 時間 _____
冬期 : 実施しない 実施する 時間 _____
 上記以外 _____
- 1-8-2 蒸気養生温度の管理方法について
・ 該当するものにチェックし、それ以外の場合は具体的に記入してください
 雰囲気温度 躯体温度
 上記以外 _____
- 1-8-3 蒸気養生の昇温速度について
・ Oに入る数値を製造時期毎に記入してください
標準期 _____
夏期 _____
冬期 _____
O°C/時間
- 1-8-4 蒸気養生の最高温度について
・ Oに入る数値を製造時期毎に記入してください
標準期 _____
夏期 _____
冬期 _____
O°C
- 1-8-5 蒸気養生の最高温度の維持時間について
・ Oに入る数値を製造時期毎に記入してください
標準期 _____
夏期 _____
冬期 _____
O時間
- 1-8-6 蒸気養生後の温度降下時・シート撤去時の配慮について
・ 配慮の有無にチェックし、配慮している場合は具体的に記入してください
 配慮していない
 配慮している _____
- 1-8-7 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 該当するものにチェックし、養生日数を記入してください
 気中 水中 湿潤
後養生開始から _____ 日以上

2. 製造設備および脱型後の養生設備について

- 2-1 混和材使用の場合の対応方法
・ 該当するものにチェックし、専用のサイロがある場合は混和材の種類を記入してください
それ以外の場合は具体的に記入してください
 セメントのサイロを入れ替えて使用
 専用サイロあり _____
 上記以外 _____
- 2-2 特殊細骨材(スラグ細骨材等)用の置き場および貯蔵瓶の有無
・ 該当するものにチェックしてください
 専用の置き場あり 専用の置き場なし
 専用の貯蔵瓶あり 専用の貯蔵瓶なし
- 2-3 混和材の計量方法
・ 該当するものにチェックしてください
 セメントと累加計量
 専用の計量器あり
- 2-4 養生用のプールの有無
・ 該当するものにチェックし、常設プールがある場合は寸法を記入してください
 常設プールなし
 常設プールあり
縦方向 _____ m 横方向 _____ m 高さ _____ m
- 2-5 その他の養生設備の有無
・ 該当するものにチェックし、その他の養生設備がある場合は具体的に記入してください
 その他養生設備なし
 その他養生設備あり

1-9 使用材料 : セメント+フライアッシュ
プレキャスト製品 : PC床版

- 1-9-1 蒸気養生開始のタイミングについて
・ 製造時期毎に蒸気養生実施の有無にチェックし、実施する場合は打設完了から蒸気養生開始までの時間(前置き時間)を記入してください
標準期 : 実施しない 実施する 時間 _____
夏期 : 実施しない 実施する 時間 _____
冬期 : 実施しない 実施する 時間 _____
 上記以外 _____
- 1-9-2 蒸気養生温度の管理方法について
・ 該当するものにチェックし、それ以外の場合は具体的に記入してください
 雰囲気温度 躯体温度
 上記以外 _____
- 1-9-3 蒸気養生の昇温速度について
・ Oに入る数値を製造時期毎に記入してください
標準期 _____
夏期 _____
冬期 _____
O°C/時間
- 1-9-4 蒸気養生の最高温度について
・ Oに入る数値を製造時期毎に記入してください
標準期 _____
夏期 _____
冬期 _____
O°C
- 1-9-5 蒸気養生の最高温度の維持時間について
・ Oに入る数値を製造時期毎に記入してください
標準期 _____
夏期 _____
冬期 _____
O時間
- 1-9-6 蒸気養生後の温度降下時・シート撤去時の配慮について
・ 配慮の有無にチェックし、配慮している場合は具体的に記入してください
 配慮していない
 配慮している _____
- 1-9-7 蒸気養生完了後の後養生の方法と養生期間について
・ 該当するものにチェックし、養生日数を記入してください
 気中 水中 湿潤
後養生開始から _____ 日以上

3. 配合について

- 3-1 セメント単味(混和材未混和)の50N/mm²の標準配合について
・ セメント単味(混和材未混和)の50N/mm²の標準配合を記入してください
標準配合が複数ある場合は複数記入してください

No.	スランブ cm	空気量 %	水セメント比 %	水 kg/m ³	セメント kg/m ³	細骨材 kg/m ³	粗骨材 kg/m ³
1							

※複数の骨材を使用している場合は、合計重量を記入してください

- 3-2 夏期配合および冬期配合の有無について
・ セメント単味(混和材未混和)の50N/mm²の標準配合について、夏期配合や冬期配合があれば記入してください
No.には標準配合に対応する番号を記入し、時期は「夏期」「冬期」から選択してください

No.	時期	スランブ cm	空気量 %	水セメント比 %	水 kg/m ³	セメント kg/m ³	細骨材 kg/m ³	粗骨材 kg/m ³
1	夏期							
1	冬期							

※複数の骨材を使用している場合は、合計重量を記入してください

- 3-3 混和材の使用実績について
・ 混和材の使用実績について、混和材種類ごとに記入してください
混和材種類はリストから選択してください

混和材種類	年間物件数	年間トン数
高炉スラグ微粉末6000		

※年間トン数は混和材を使用したコンクリートのトン数としてください

3-4 混和材用の標準配合について

- ・ 混和材を使用した配合の標準配合を混和材種類毎に記入してください
- ・ 混和材種類、骨材種類、ASR対策はリストから選択してください
- ・ 標準配合が複数ある場合は複数記入してください

No.	混和材種類	置換率 %	スランプ cm	空気量 %	水結合材比 %	骨材種類	
						細骨材	粗骨材
1	BS6						

No.	ASR対策	水 kg/m ³	セメント kg/m ³	混和材 kg/m ³	細骨材 kg/m ³	粗骨材 kg/m ³

※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
 ※置換率は単位セメント重量に対する比率

3. その他の配慮事項

その他、プレキャスト製品の製造や混和材を使用したコンクリートの取り扱い等について配慮していることがあれば自由に記入してください

ご協力ありがとうございました！

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.559 March 2022

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