

# 低炭素型セメント結合材の利用技術 に関する共同研究報告書(Ⅰ)

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

平成 28 年 1 月

国立研究開発法人土木研究所

一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会

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

Copyright © (2016) by P.W.R.I.

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

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

## 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書(Ⅰ)

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

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  
材料資源研究グループ

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

一般社団法人

プレストレスト・コンクリート建設業協会  
手塚 正道  
鈴木 雅博

株式会社大林組

竹田 宣典  
小林 利充  
片野 啓三郎

大成建設株式会社

丸屋 剛  
大脇 英司 (2013.4～)  
坂本 淳  
宮原 茂禎  
荻野 正貴 (2013.4～)  
武田 均 (~2012.3)

前田建設工業株式会社

舟橋 政司  
梶田 秀幸  
白根 勇二

戸田建設株式会社

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

西松建設株式会社

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

鐵鋼スラグ協会

長尾 之彦  
大澤 友宏 (2013.4～)  
東 和彦 (2013.10～)  
奥村 博昭 (~2013.9)  
久家 立 (~2013.3)

電源開発株式会社

石川 嘉崇  
鷺尾 朝昭 (2013.4～)  
石川 学 (2015.4～)  
今岡 知武 (2012.4～2015.3)  
佐藤 道生 (~2013.3)  
有菌 大樹 (~2012.3)

### 要 旨

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

この共同研究報告書では、「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)」を提案するとともに、検討の過程で得られた研究成果をとりまとめた。

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



## はじめに

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

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

この共同研究報告書は、「低炭素型セメント結合材を用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドライン（案）」（第Ⅰ部）を示すとともに、検討の過程で得られた知見を付録資料（第Ⅱ部）としてまとめたものである。

## 低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書の構成と概要

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

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

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

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

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

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

#### 混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル (案)

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

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

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

#### 混和材を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

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

国立研究開発法人土木研究所、株式会社大林組

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所、大成建設株式会社、前田建設工業株式会社

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所、戸田建設株式会社、西松建設株式会社

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所、大成建設株式会社

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

## 参考文献

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

# 目次

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

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

5.7 温度ひび割れに対する抵抗性.....	27
5.8 二酸化炭素排出削減効果.....	27
6章 製造及び施工.....	30
6.1 一般.....	30
6.2 計量.....	30
6.3 練混ぜ.....	31
6.4 運搬・打込み・締固め・仕上げ.....	32
6.5 湿潤養生.....	33
7章 品質管理.....	36
8章 検査.....	37
9章 記録.....	38

## 第Ⅱ部 付録資料

付録ー1 日米欧における混和材に関する規格の制定状況.....	39
付録ー2 圧縮強度とヤング係数.....	45
付録ー3 中性化に対する抵抗性.....	52
付録ー4 塩化物イオン浸透に対する抵抗性.....	64
付録ー5 凍結融解に対する抵抗性.....	80
付録ー6 湿潤養生期間が強度発現と耐久性に与える影響.....	84
付録ー7 温度履歴が強度発現に与える影響.....	97
付録ー8 クリープ・収縮特性.....	108
付録ー9 温度ひび割れに対する抵抗性.....	120
付録ー10 フレッシュコンクリートの性状.....	132
付録ー11 二酸化炭素排出削減効果.....	138



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

担当：国立研究開発法人土木研究所



# 1 章 総則

## 1.1 適用の範囲

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

### 【解説】

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

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

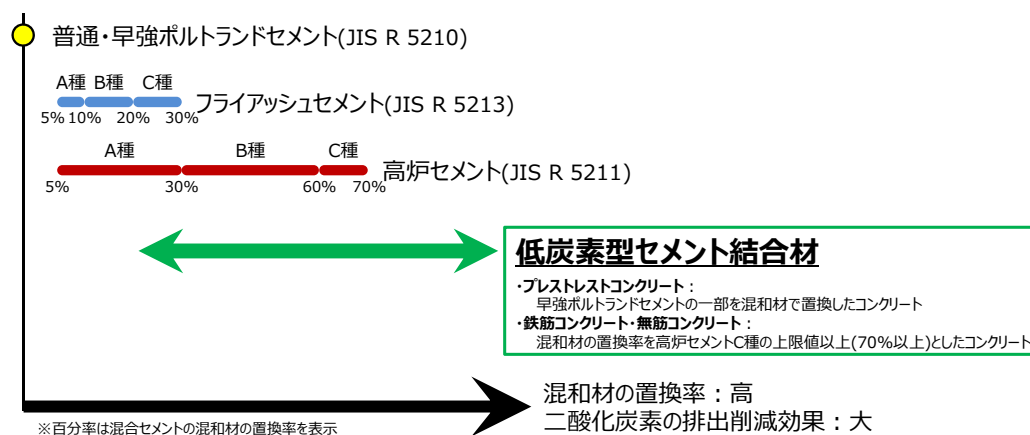


図-1.1 低炭素型セメント結合材の位置づけ

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

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

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

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

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

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

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

なお、このガイドライン（案）を作成する際に行った実験や解析等の結果を第Ⅱ部の付録資料にとりまとめている。国内外の混和材に関する規格の制定状況を調査した結果を第Ⅱ部付録-1に示しているため、必要に応じて参考にするとよい。

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

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

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

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

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

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

**混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル (案)**

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

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

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

**混和材を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)**

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

国立研究開発法人土木研究所, 株式会社大林組

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所, 大成建設株式会社, 前田建設工業株式会社

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所, 戸田建設株式会社, 西松建設株式会社

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所, 大成建設株式会社

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

図-1.2 このガイドライン (案) 及び5編のマニュアル (案) の構成と概要

【参考】

混和材を用いたコンクリートの品質の一般的な傾向について

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

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

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

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

## 1.2 用語の定義

このガイドライン（案）では、次のように用語を定義する。

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

### 【解説】

#### 低炭素型セメント結合材について

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

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

#### 混和材と結合材について

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

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

## 水結合材比について

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

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

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

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

## 置換率について

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

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

ここに、 $C$ ：単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>)、 $SCMs$ ：単位混和材量(kg/m<sup>3</sup>)である。単位混和材量には、複数の混和材の使用量を含めてよい。

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

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



## 規定の末尾に用いられる字句の意味について

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

表-1.2 規定の末尾に用いられる字句の意味

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

## 「品質」と「性能」の区別について

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

## 英語の語尾に対応する長音符号の扱いについて

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

## 2章 低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの品質

### 2.1 一般

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

#### 【解説】

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

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

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

### 2.2 ワーカビリティ

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

#### 【解説】

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

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

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

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

### 2.3 強度

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

#### 【解説】

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

### 2.4 耐久性

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

#### 【解説】

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

#### 中性化について

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

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

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

### 塩化物イオン浸透について

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

### 凍結融解について

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

### 化学的侵食について

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

### アルカリシリカ反応について

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

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

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

### 長期的な安定性について

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

## 2.5 ひび割れ抵抗性

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

### 【解説】

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

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

## 2.6 環境負荷低減効果

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

### 【解説】

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

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

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

## 3 章 材料

### 3.1 一般

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

#### 【解説】

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

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

#### (1)について

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

#### (2)について

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

#### (3)について

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

### 3.2 セメント

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

#### 【解説】

#### (1)について

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

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

#### (2)について

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

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

### 3.3 練混ぜ水

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

#### 【解説】

#### (1)について

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



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

## (2)について

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

## 3.4 混和材

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

### 【解説】

#### (1)について

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

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

#### (2)について

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

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

#### (3)について

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

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

### 3.5 化学混和剤

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

#### 【解説】

#### (1)について

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

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

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

#### (2)について

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

## 4章 配合

### 4.1 一般

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

#### 【解説】

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

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

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

### 4.2 セメントと混和材の種類及び混和材の置換率

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

#### 【解説】

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

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

### 4.3 水結合材比

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

#### 【解説】

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

## 5 章 設計

### 5.1 一般

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

#### 【解説】

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

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

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

### 5.2 強度

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

#### 【解説】

##### (1)について

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

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの圧縮強度について検討した結果を第Ⅱ部付録-2に示しているため、必要に応じて参考にとるとよい。

## (2)について

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

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度発現に温度履歴が与える影響を検討した結果を第Ⅱ部付録-7に示しているため、必要に応じて参考にとるとよい。

## (3)について

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係について検討した結果を第Ⅱ部付録-2に示しているため、必要に応じて参考にとるとよい。

### 5.3 クリープ・収縮

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

#### 【解説】

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

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのクリープ及び収縮の特性について検討した結果を第Ⅱ部付録-8に示しているため、必要に応じて参考にするるとよい。

### 5.4 中性化に対する抵抗性

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

#### 【解説】

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

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

### 中性化深さの推定方法について

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

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

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

### 暴露試験の結果に基づく中性化速度係数の設定について

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

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

### 促進中性化試験の結果に基づく中性化速度係数の設定について

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

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

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

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



## 中性化残りの設定について

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

## 中性化速度係数の予測式の適用性について

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

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

ここに、 $\alpha_{JSCE}$ ：中性化速度係数の予測値(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )、 $W$ ：単位体積あたりの水の質量(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_p$ ：単位体積あたりのポルトランドセメントの質量(kg/m<sup>3</sup>)、 $A_d$ ：単位体積あたりの混和材の質量(kg/m<sup>3</sup>)、 $k$ ：混和材の種類により定まる定数(高炉スラグ微粉末の場合  $k=0.7$ 、フライアッシュの場合  $k=0$ )である。

## 環境条件の考慮について

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの中性化に対する抵抗性について検討した結果を第Ⅱ部付録-3に示しているため、必要に応じて参考にとよい。

## 5.5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

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

### 【解説】

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

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

### かぶりの最小値について

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

位置の塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達しないことを確認した場合においても、かぶりの最小値については既存の基準類の規定に準拠することが望ましい。

### コンクリート内部の塩化物イオン濃度の推定方法について

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

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

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

### 塩化物イオンの見掛けの拡散係数について

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

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

### 鋼材腐食発生限界濃度の設定について

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

## 環境条件の考慮について

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性について検討した結果を第Ⅱ部付録-4に示しているため、必要に応じて参考にとよい。

## 5.6 凍結融解に対する抵抗性

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

### 【解説】

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

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

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性について検討した結果を第Ⅱ部付録-5に示しているため、必要に応じて参考にとよい。

## 5.7 温度ひび割れに対する抵抗性

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

### 【解説】

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

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

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性の評価方法について検討した実験結果を第Ⅱ部付録-9に示しているため、必要に応じて参考にするとよい。

## 5.8 二酸化炭素排出削減効果

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

### 【解説】

構造物の構築に伴って発生する二酸化炭素排出量を定量化する方法としては、コンクリートに用いる材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量を各材料の使用量とインベントリデータから算出する方法、構造物のライフサイクルで発生する二酸化炭素排出量を積上げ計算あるいは産業連関分析によって算出する方法の2

種類がある。低炭素型セメント結合材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果は、これらの方法に基づき、十分な信頼性を有するデータを用いて定量的に評価する必要がある。

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

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの二酸化炭素排出削減効果を定量化する方法について検討した結果を第II部付録-11 に示しているため、必要に応じて参考にするるとよい。

## 参考文献

- 1) fib: Model Code for Concrete Structures 2010, First Edition, 2013
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004
- 3) 日本建築学会：高耐久性コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，1991
- 4) 気象庁ホームページ：二酸化炭素濃度の経年変化，[http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2\\_trend.html](http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html)
- 5) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013
- 6) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008
- 7) ISO 13315-1: Environmental Management for Concrete and Concrete Structures – Part 1 General Principles, 2014
- 8) ISO 13315-2: Environmental Management for Concrete and Concrete Structures – Part 2 System Boundary and Inventory Data, 2014
- 9) 国土交通省国土技術政策総合研究所：社会資本のライフサイクルをとおした環境評価技術の開発，国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告書第36号，2012
- 10) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の環境負荷低減への取組み—PC 構造物の建設に伴う CO<sub>2</sub> 排出量の見える化—，2011
- 11) 日本コンクリート工学協会：コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究小委員会報告書，2010

- 12) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリー125，2005
- 13) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価（その2），コンクリート技術シリーズ62，2004
- 14) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価，コンクリート技術シリーズ44，2002

## 6章 製造及び施工

### 6.1 一般

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

#### 【解説】

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

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

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

### 6.2 計量

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

#### 【解説】

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

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



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

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

### 6.3 練混ぜ

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

#### 【解説】

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

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

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

## 6.4 運搬・打込み・締固め・仕上げ

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

### 【解説】

#### (1)について

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

#### (2)について

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

#### (3)について

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

#### (4)について

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

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

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのフレッシュ性状に関する参考データを第Ⅱ部付録-10に示しているため、必要に応じて参考にとるとよい。

## 6.5 湿潤養生

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

### 【解説】

#### (1)について

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

#### (2)について

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

#### 湿潤養生期間の設定方法について

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

### ・所要の品質を担保できる湿潤養生期間を試験によって設定する

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

例えば、構造物の種別によっては、所定の材齢で所要の強度を得ることが求められる場合、中性化や塩化物イオン浸透、凍結融解等の作用に対して所要の抵抗性を有することが求められる場合がある。このような場合には、所要の品質を担保することができる湿潤養生期間を試験によって確認し、これを湿潤養生期間として設定してよい。

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

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

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

なお、文献 2), 3)では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリートの湿潤養生期間の標準が示されているため、必要に応じて参考にするとよい。また、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度発現と耐久性に湿潤養生期間が与える影響について検討した結果を第II部付録-6 に示しているため、必要に応じて参考にするとよい。

### (3)について

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

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

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

施することが望ましい。

なお、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの強度発現に温度履歴が与える影響について検討した結果を第Ⅱ部付録一7に示しているため、必要に応じて参考にとよい。

#### 参考文献

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

## 7章 品質管理

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

### 【解説】

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

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

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

## 8章 検査

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

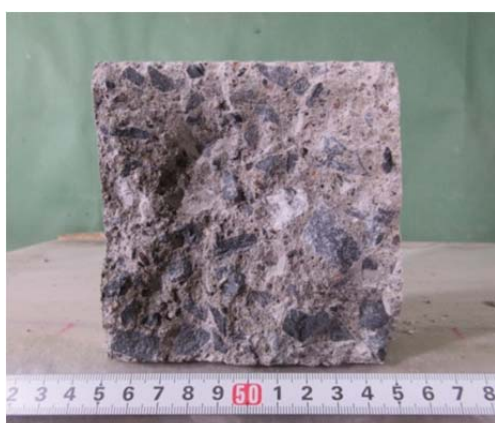
### 【解説】

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

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

### 【参考】

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



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



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

写真-8.1 供試体の割裂面の色調

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

## 9章 記録

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

### 【解説】

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

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

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

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



第Ⅱ部  
付録資料

担当：国立研究開発法人土木研究所



## 付録一 日米欧における混和材に関する規格の制定状況

### 1. はじめに

この付録では、日米欧における混和材に関する規格の制定状況を明らかにするため、混合セメントと混和材に関する規格の内容を調査した結果を示す。

調査対象は、日本の JIS、米国の ASTM、欧州の EN とした。また、調査内容は、(1)混合セメントの高炉スラグ微粉末とフライアッシュの置換率（質量%、JIS では分量という）、(2)高炉スラグ微粉末とフライアッシュの品質規格、(3)レディーミクストコンクリートの品質規格やコンクリート構造物の設計規準等における混合セメントあるいは混和材の取り扱い、とした。

日米欧の混合セメントの規格における高炉スラグ微粉末とフライアッシュの置換率の概要を表-1 に示す。

表-1 日米欧の混合セメントの規格における混和材の置換率の概要

混和材 国・地域	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ
日本 (JIS R 5211) (JIS R 5213)	<u>高炉セメント</u> ・高炉セメント A 種 (5% < GGBFS ≤ 30%) ・高炉セメント B 種 (30% < GGBFS ≤ 60%) ・高炉セメント C 種 (60% < GGBFS ≤ 70%)	<u>フライアッシュセメント</u> ・フライアッシュセメント A 種 (5% < FA ≤ 10%) ・フライアッシュセメント B 種 (10% < FA ≤ 20%) ・フライアッシュセメント C 種 (20% < FA ≤ 30%)
米国 (ASTM C 595)	<u>Portland blast-furnace slag cement</u> (高炉スラグセメント) ・Type IS (GGBFS ≤ 95%) ※ただし、70%以上の置換率は高炉スラグ微粉末に消石灰が含まれている場合に認めている。	<u>Portland-pozzolan cement</u> (ポゾランセメント) ・Type IP (FA ≤ 40%) ※フライアッシュ以外にもポゾラン活性を示す混和材をポゾランとして使用できる。
	<u>Ternary Blended Cement</u> (三成分系セメント) ・Type IT (FA ≤ 40% かつ GGBFS+FA ≤ 70%) ※フライアッシュ以外にもポゾラン活性を示す混和材をポゾランとして使用できる。	
欧州 (EN 197)	<u>Portland-slag cement</u> (スラグセメント) ・CEM II/A-S (6% ≤ GGBFS ≤ 20%) ・CEM II/B-S (21% ≤ GGBFS ≤ 35%) <u>Blastfurnace cement</u> (高炉セメント) ・CEM III/A (36% ≤ GGBFS ≤ 65%) ・CEM III/B (66% ≤ GGBFS ≤ 80%) ・CEM III/C (81% ≤ GGBFS ≤ 95%)	<u>Portland-fly ash cement</u> (フライアッシュセメント) ・CEM II/A-V, CEM II/A-W (6% ≤ FA ≤ 20%) ・CEM II/B-V, CEM II/B-W (21% ≤ FA ≤ 35%) <u>Pozzolanic cement</u> (ポゾランセメント) ・CEM IV/A (11% ≤ FA ≤ 35%) ・CEM IV/B (36% ≤ FA ≤ 55%) ※フライアッシュ以外にもポゾラン活性を示す混和材をポゾランとして使用できる。
	<u>Portland composite cement</u> (混合セメント) ・CEM II/A-M (12% ≤ GGBFS+FA ≤ 20%) ・CEM II/B-M (21% ≤ GGBFS+FA ≤ 35%) ※フライアッシュ以外にもポゾラン活性を示す混和材をポゾランとして使用できる。 <u>Composite cement</u> (混合セメント) ・CEM V/A (18% ≤ GGBFS ≤ 30%, 18% ≤ FA ≤ 30%) ・CEM V/B (31% ≤ GGBFS ≤ 49%, 31% ≤ FA ≤ 49%) ※フライアッシュ以外にもポゾラン活性を示す混和材をポゾランとして使用できる。	

※GGBFS : 高炉スラグ微粉末の置換率, FA : フライアッシュの置換率

## 2. 調査結果

### 2.1 日本

国内では、JISにおいて、高炉セメント（JIS R 5211）、フライアッシュセメント（JIS R 5213）等の混合セメントの品質規格が制定されている。また、これらに用いる混和材として、高炉スラグ微粉末（JIS A 6206）、フライアッシュ（JIS A 6201）等の品質規格が制定されている。

JIS R 5211 では、高炉セメントは高炉スラグ微粉末の分量によって A 種、B 種、C 種に分類されている。JIS R 5211 の範囲内では、高炉セメントに用いることができる高炉スラグ微粉末の分量の最大値は、C 種の上限值である 70%とされている。ただし、国内で使用されている高炉セメントの大部分は B 種であり、一般工事向けに販売されている高炉セメント B 種の高炉スラグ微粉末の分量は 40~45%であることが報告されている<sup>1)</sup>。一方、JIS R 5213 では、フライアッシュセメントはフライアッシュの分量によって A 種、B 種、C 種に分類されている。JIS R 5213 の範囲内では、フライアッシュセメントに用いることができるフライアッシュの分量の最大値は、C 種の上限值である 30%とされている。

次に、2013 年の日本国内におけるセメントの生産高<sup>2)</sup>を図-1 に示す。輸出用クリンカ等を除くと、国内で生産されたセメントのうち、約 75%がポルトランドセメント、約 25%が混合セメントである。

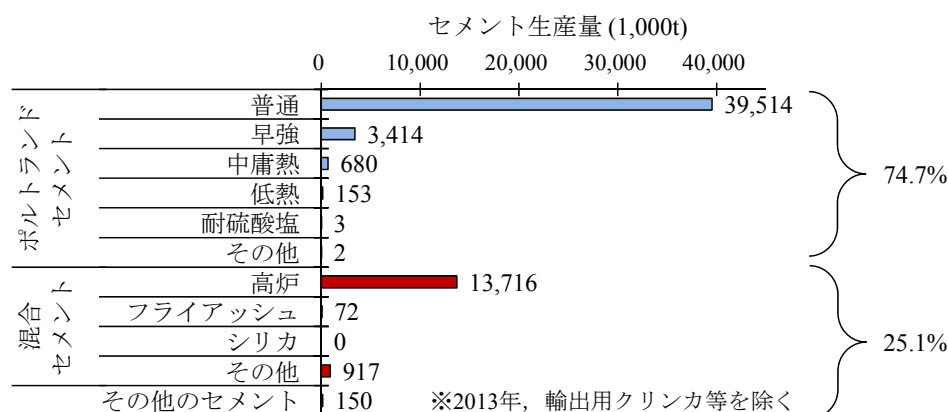


図-1 日本のセメントの生産高 ※文献2)を参考に作成

JIS A 6206 では、高炉スラグ微粉末は比表面積によって高炉スラグ微粉末 3000, 4000, 6000, 8000 の 4 種類に分類されている。比表面積が大きいほど、活性度指数が大きく、フロー値比が小さくなるように品質が定められている。また、高炉スラグ微粉末に含まれる三酸化硫黄については 4.0%以下とされている。JIS A 6201 では、フライアッシュは I, II, III, IV 種の 4 種類に分類されている。I 種から IV 種にかけて活性度指数と比表面積の下限値が低く、I 種から III 種にかけて強熱減量の上限值が高くなるように品質が定められている。

レディーミクストコンクリートの品質規格である JIS A 5308 では、前述の JIS に適合する高炉セメント、フライアッシュセメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを用いることとし、混和材の種類や分量を限

定する規定はない。コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>でも、JIS に適合する混合セメントと混和材を標準としている。しかし、例えば、湿潤養生期間のような具体的な施工方法については、混合セメントでは B 種の規定しか示されておらず、混和材の分量の多い C 種の取り扱い方法は示されていない。また、道路橋示方書<sup>4)</sup>では、クリープや乾燥収縮の特性が必ずしも明確になっていないことから、高炉セメントを原則として上部構造の材料としては使用しないこととしている。

これらのことを踏まえると、国内では、JIS で混和材の分量の多い C 種までの混合セメントの品質が定められているが、混合セメントの生産高自体が少ないこと、また、国内で生産される混合セメントの大部分を占める高炉セメントの多くが B 種であることから、C 種相当以上の混和材の分量の多い混合セメントの使用実績は多くないと考えられる。この一因としては、クリープや乾燥収縮等の設計値、湿潤養生期間等の施工方法が確立されていないことが挙げられる。

## 2.2 米国

米国では、ASTM において、混合セメント (ASTM C 595<sup>5)</sup>)、高炉スラグ微粉末 (ASTM C 989<sup>6)</sup>)、フライアッシュ (ASTM C 618<sup>7)</sup>) の品質規格が制定されている。また、性能規定型のセメントの規格として ASTM C 1157<sup>8)</sup>があり、ここでは混和材の種類や置換率の規定はなく、セメントは早強性や耐硫酸性、低熱性等の性能に応じて分類されている。

ASTM C 595 では、混合セメントは、高炉スラグ微粉末を用いた高炉スラグセメント (Type IS)、フライアッシュ等のポゾラン反応を示す材料を用いたポゾランセメント (Type IP)、高炉スラグ微粉末とポゾラン反応を示す材料の両方を用いた三成分系セメント (Type IT) の 3 種類に大きく分類されている。高炉スラグセメントにおける高炉スラグ微粉末の置換率は 95%以下 (70%以上は消石灰を含む場合に認められている)、ポゾランセメントにおけるポゾラン反応を示す材料の置換率は 40%以下とされている。これらは、日本の JIS の高炉セメントやフライアッシュセメントの混和材の分量の上限値よりも高い値である。また、三成分系セメントでは、ポゾラン反応を示す材料の置換率の上限値を 40%、かつ、高炉スラグ微粉末あるいはポゾラン反応を示す材料の置換率の上限値を 70%としている。

ASTM C 989 では、高炉スラグ微粉末は活性度指数によって Grade 80, 100, 120 の 3 種類に分類されている。また、ASTM C 618 では、フライアッシュは化学成分 ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$  の含有量) と強熱減量によって Class N, F, C の 3 種類に分類されている。

レディーミクストコンクリートの品質規格である ASTM C 94<sup>9)</sup>では、前述の ASTM に適合する混合セメントと混和材を用いることとし、混和材の種類や置換率を限定する規定はない。一方、ACI 318<sup>10)</sup>では、ASTM に適合した混合セメントと混和材を用いることとした上で、コンクリート構造物の耐久性確保の観点から混和材の置換率に関する規定がある。例えば、硫酸塩の作用を受ける環境では、高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用によって硫酸塩の作用に対する抵抗性が向上するため、試験等によって適切な置換率を定めて用いることとしている。凍結融解の作用を受け、かつ、凍結防止剤の散布が行われる環境では、高炉スラグ微粉末の置換率の上限値を 50%、フライアッシュ及び他のポゾラン反応を示す材料の置換率の上限値を 25% としている。また、明確な理由は示されていないが、構造体コンクリートでは高炉スラグ微粉末の置換率を

70%以上とした高炉スラグセメント (Type IS) は用いないこととしている。なお、ACI 318 では、凍結融解や化学的侵食、塩害等の作用を受ける環境条件ごとに水結合材比の最大値を示し、前述の ASTM に適合する混合セメントと混和材については水結合材比の計算に含めることができるとしている。

## 2.3 欧州

欧州では、EN において、セメント (EN 197<sup>11)</sup>、高炉スラグ微粉末 (EN 15167<sup>12)</sup>、フライアッシュ (EN 450<sup>13)</sup>) の品質規格が制定されている。

EN 197 では、混合セメントは、混和材の有無や種類、置換率によって CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V の 5 種類に分類され、混和材の置換率によってさらに細かく 27 種類に分類されている。CEM III/C における高炉スラグ微粉末の置換率の上限値は 95%、CEM IV/B におけるフライアッシュの置換率の上限値は 55%とされている。これらは、日本の JIS の高炉セメントやフライアッシュセメントの混和材の分量の上限値よりも高い値である。さらに、CEM V においては、三成分系の混合セメントでの混和材の置換率を示している。

EN 15167 では、高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 や ASTM C 989 のような分類はされておらず、比表面積や活性度指数の下限値等の品質が定められている。高炉スラグ微粉末に含まれる三酸化硫黄の上限値については、JIS A 6206 よりも低く、2.5%とされている。また、EN 450 では、フライアッシュは強熱減量によって Category A, Category B, Category C の 3 種類、粉末度によって Category N, Category S の 2 種類に分類されている。

コンクリートの品質規格である EN 206<sup>14)</sup> では、前述の EN に適合するセメントと混和材を用いることとし、高炉スラグ微粉末とフライアッシュを Type II Addition と定義している。EN 206 では、中性化や塩害、凍結融解、化学的侵食等の作用を受ける環境条件ごとに、設計供用期間を 50 年とした場合のコンクリートの最大水セメント比と最小単位セメント量の推奨値を示している。Type II Addition に分類されている高炉スラグ微粉末とフライアッシュについては、表-2 に示す k 値を乗じることによって、使用量の一部を水セメント比や単位セメント量の計算に含めることができる。すなわち、ACI 318 と異なり、EN 206 では混和材の使用量の一部を結合材とみなして水結合材比を計算することとしている。

表-2 EN 206 の k 値の概略

高炉スラグ微粉末	k=0.6 ただし、高炉スラグ微粉末の質量 / セメントの質量 $\leq 1.0$ とし、 これ以上の高炉スラグ微粉末は計算に含めない。 (※付録に参考値として記載)
フライアッシュ	k=0.4 ただし、フライアッシュの質量 / セメントの質量 $\leq 0.33$ (CEM I 使用時)、 フライアッシュの質量 / セメントの質量 $\leq 0.25$ (CEM II/A 使用時) とし、 これ以上のフライアッシュは計算に含めない。

※セメントとして CEM I および CEM II/A を使用した場合  
※文献 14) を参考に作成

### 3. まとめ

この付録では、日米欧における混和材に関する規格の制定状況を明らかにするため、混合セメントと混和材に関する規格の内容を調査した。この調査の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

1. 米国の ASTM と欧州の EN では、日本の JIS よりも混和材の置換率が高い混合セメント、日本の JIS では対象としていない三成分系の混合セメントの品質を規定していた。混合セメントの規格に規定される混和材の置換率の面からは、日本よりも欧米において、混和材を多量に用いたコンクリートを実用化できる可能性が高いと考えられた。
2. 日米欧では、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの品質規格の規定内容が異なることがわかった。また、レディーミクストコンクリートの品質規格やコンクリート構造物の設計規準等においても、地域によって混和材の取り扱い方法が異なることがわかった。
3. 日本では、クリープや乾燥収縮等の設計値、湿潤養生期間等の施工方法等、混和材を多量に用いたコンクリート構造物の設計施工方法が既存の設計規準等で明確に示されていなかった。混和材を多量に用いたコンクリートの実用化を進めるためには、混和材を多量に用いたコンクリートの品質評価方法と設計施工方法を確立することが必要と考えられた。

#### 参考文献

- 1) 鐵鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用，2015年版，2015
- 2) セメント協会ホームページ：統計データベース，<http://www.jcassoc.or.jp/>
- 3) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2013
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（I 共通編・III コンクリート橋編），2012
- 5) ASTM C 595-10: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements, ASTM International, 2010
- 6) ASTM C 989-09a: Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars, ASTM International, 2009
- 7) ASTM C 618-08a: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, 2008
- 8) ASTM C 1157-10: Standard Performance Specification for Hydraulic Cement, ASTM International, 2010
- 9) ASTM C 94-13a: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete, ASTM International, 2013
- 10) ACI 318M-14: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary (ACI 318RM-14), American Concrete Institute, 2015
- 11) BS EN 197-1:2011: Cement – Part 1 Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, European Committee for Standardization, 2011
- 12) BS EN 15167-1:2006: Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use in Concrete, Mortar and Grout – Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria, European Committee for Standardization, 2006

- 13) BS EN 450-1:2012: Fly Ash for Concrete – Part 1: Definitions, Specifications and Conformity Criteria, European Committee for Standardization, 2012
- 14) BS EN 206:2013: Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity, European Committee for Standardization, 2013



## 付録ー2 圧縮強度とヤング係数

### 1. はじめに

この付録では、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数について検討した結果を示す。

混和材を用いたコンクリートの強度発現の傾向は、セメントと混和材の種類、混和材の置換率、水結合材比等によって異なる可能性が高い。このため、混和材を用いたコンクリートを適用する際には、構造物に求められる性能を適切に踏まえて、所定の材齢において所要の強度が得られるように、セメントと混和材の種類、混和材の置換率、水結合材比等を設定する必要がある。

この付録では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリート供試体を製作して、圧縮強度試験を行い、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数について検討した結果を示す。

### 2. 実験方法

混和材を用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数について検討するため、セメントと混和材の種類、混和材の置換率、水結合材比等の異なる円柱供試体を製作して、圧縮強度試験を行った。

#### 2.1 コンクリートの配合と基礎物性

コンクリートの配合と基礎物性を表ー1に示す。配合は26種類である。セメントには普通ポルトランドセメント（OPC）あるいは早強ポルトランドセメント（HPC）を用いた。混和材には、JIS A 6206に適合する高炉スラグ微粉末4000（BS4）と高炉スラグ微粉末6000（BS6）、JIS A 6201に適合するフライアッシュⅡ種（FA）を用いた。

水結合材比（W/B）は3種類である。W/Bを40%とした13配合の供試体では、プレストレストコンクリートへの適用を想定して早強ポルトランドセメントを用い、標準養生あるいは模擬的な蒸気養生を行った。混和材には、高炉スラグ微粉末4000、高炉スラグ微粉末6000、フライアッシュⅡ種を用いた。プレストレストコンクリートでは早期の強度発現が求められることが多いため、混和材の置換率については混合セメントC種の上限值以下とした。

一方、W/Bを35、50%とした13配合の供試体では、鉄筋コンクリート及び無筋コンクリートへの適用を想定して普通ポルトランドセメントを用い、標準養生を行った。混和材には高炉スラグ微粉末4000とフライアッシュⅡ種を用い、混和材の置換率を混合セメントC種の上限值よりも高めた供試体も製作した。

なお、混和材の使用がコンクリートの圧縮強度とヤング係数に与える影響を検討することを目的としたため、全配合で単位水量（165kg/m<sup>3</sup>）と単位粗骨材量（968kg/m<sup>3</sup>）を同一とした。

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								スランブ (cm)	空気量 (%)		
		W	OPC	HPC	BS4	BS6	FA	S	G				
H40	40	165	-	413	-	-	-	-	758	968	11.5	4.6	
H40B430			-	289	124(30%)	-	-	-	749		10.5	3.8	
H40B450			-	206	206(50%)	-	-	-	744		13.5	5.1	
H40B630			-	289	-	124(30%)	-	-	750		13.5	4.7	
H40B650			-	206	-	206(50%)	-	-	745		14.5	4.8	
H40B670			-	124	-	289(70%)	-	-	740		13.0	4.9	
H40F10			-	371	-	-	-	41(10%)	746		9.5	4.2	
H40F20			-	330	-	-	-	83(20%)	734		14.0	4.5	
H40F30			-	289	-	-	-	124(30%)	721		12.0	4.3	
H40S			-	413	-	-	-	-	758		12.0	4.6	
H40B430S			-	289	124(30%)	-	-	-	749		10.0	3.9	
H40B650S			-	206	-	206(50%)	-	-	745		12.5	4.7	
H40F20S			-	330	-	-	-	83(20%)	734		10.5	3.1	
N35			35	165	471	-	-	-	-		713	14.5	4.7
N35B50					236	-	236(50%)	-	-		695	14.5	4.3
N35B85					71	-	401(85%)	-	-		682	12.5	5.1
N35F20	377	-			-	-	94(20%)	684	12.0	3.5			
N35F40	283	-			-	-	189(40%)	655	14.5	4.5			
N50	50	165	330	-	-	-	-	827	14.0	5.2			
N50B50			165	-	165(50%)	-	-	815	13.5	4.3			
N50B70			99	-	231(70%)	-	-	810	12.5	4.5			
N50B85			50	-	281(85%)	-	-	806	11.5	4.0			
N50F20			264	-	-	-	66(20%)	807	11.5	4.4			
N50F30			231	-	-	-	99(30%)	797	11.0	4.6			
N50F40			198	-	-	-	132(40%)	787	14.5	4.0			
N50B50F20			99	-	165(50%)	-	66(20%)	795	12.0	4.6			

※W: 上水道水(茨城県つくば市), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,300cm<sup>2</sup>/g), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,490cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,400cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.19%(無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=5,950cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.85%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,280cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材, 静岡県掛川産陸砂(密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材, 茨城県笠間産砕石 6 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合, 最大寸法=20mm, 単位量の()内の百分率は全結合材に占める各混和材の質量%を表示

※化学混和剤: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの, W/B=35%で使用), AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体, W/B=50%で使用), 空気連行剤(フライアッシュを用いた配合以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, フライアッシュを用いた配合で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランブ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整

※養生方法: 配合の末尾に「S」を付記していない供試体では打込み翌日に脱型して材齢 28 日まで 20°Cで水中養生。配合の末尾に「S」を付記した供試体では恒温恒湿槽を用いて模擬的な蒸気養生(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)を行い、脱型して材齢 28 日まで 20°Cで水中養生

## 2.2 供試体の製作方法

表-1 に示した 26 配合で、円柱供試体 (φ100×200mm) を製作した。

供試体の養生方法は、「標準養生」と「模擬的な蒸気養生」の 2 種類である。「標準養生」では、コンクリート打込み直後から供試体を封緘状態に保ち、翌日に脱型して、水温 20°Cの養生槽で材齢 28 日まで水中養生を行った。「模擬的な蒸気養生」では、コンクリート打込み直後から供試体を封緘状態に保ち、恒温恒湿槽を用いて促進養生 (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) を行った後に脱型して、水温 20°Cの養生槽で材齢 28 日まで水中養生を行った。

どちらの養生方法の供試体も、材齢 28 日から材齢 91 日まで実験室内で気中養生を行い、材齢 91 日以降で土木研究所 (茨城県つくば市南原) の雨掛かりのある屋外に暴露した。供試体の暴露状況を写真-1 に示す。



写真-1 供試体の暴露状況

### 2.3 圧縮強度試験の方法

標準養生を行った供試体では、材齢7日、28日、91日、1年、3年で圧縮強度試験を行った。模擬的な蒸気養生を行った供試体では、材齢1日（促進養生後）、28日、91日、1年、3年で圧縮強度試験を行った。すなわち、材齢28日では水中養生後、材齢91日では気中養生後、材齢1年と材齢3年では屋外暴露後の供試体を用いた。また、材齢28日の強度試験では、圧縮強度試験と同時に、ヤング係数を測定した。圧縮強度試験についてはJISA 1108、ヤング係数の測定についてはJISA 1149に準拠して行った。

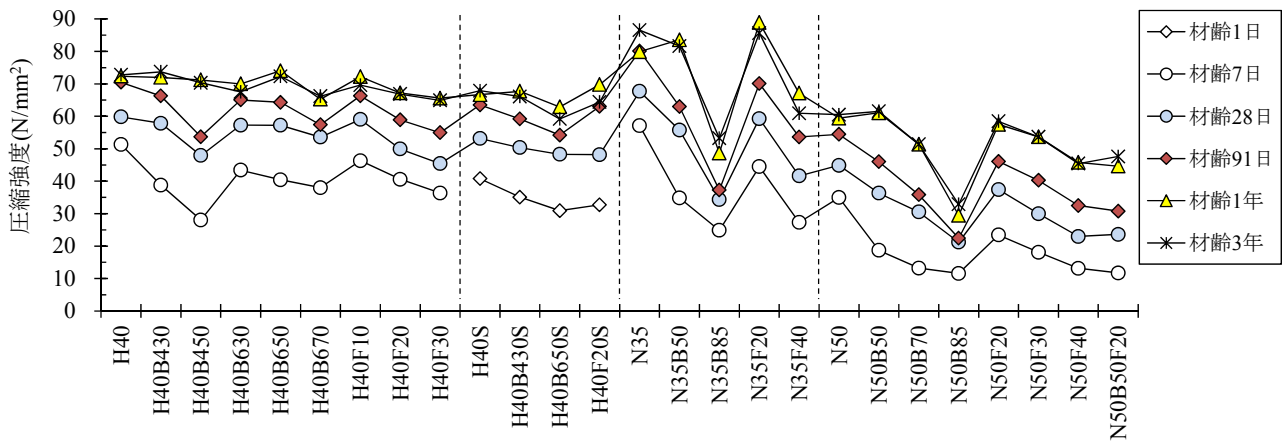
## 3. 実験結果

### 3.1 圧縮強度の推移

材齢3年までの圧縮強度の推移を図-1に示す。圧縮強度は、セメントと混和材の種類、混和材の置換率、W/B、養生方法の違いにかかわらず、材齢1日あるいは材齢7日から、材齢28日、91日、1年まで増加する傾向にあったが、材齢1年と材齢3年では同程度となった。

W/Bが同一の場合、混和材を用いた供試体では、ポルトランドセメントのみを用いた供試体と比較して、材齢91日までは圧縮強度が小さくなった。その後、材齢1年及び材齢3年では、混和材の置換率を混合セメントB種相当以下とした供試体の圧縮強度は、ポルトランドセメントのみを用いた供試体と同程度まで増加した。一方、混和材の置換率を混合セメントC種の上限值以上とした供試体の圧縮強度は、材齢1年及び材齢3年でも、ポルトランドセメントのみを用いた供試体よりも小さくなった。ただし、混和材の置換率を混合セメントC種の上限值以上とした供試体においても、W/Bを低減することによって、圧縮強度が大きくなった。

このように、混和材を用いたコンクリートの強度発現の傾向は混和材の置換率やW/Bによって異なる傾向を示すため、構築する構造物で求められる強度を適切に考慮して、混和材の置換率やW/Bを設定する必要があると考えられる。



図一1 圧縮強度の推移

### 3.2 圧縮強度の比較

圧縮強度を混和材の種類と置換率，W/B，養生方法ごとに比較して図一2に示す。前述したように，材齢1年と材齢3年の圧縮強度が同程度であったため，ここでは材齢1年までの圧縮強度を比較して示した。

#### 3.2.1 混和材の置換率の影響：W/B=40%の供試体

図一2(A)～(C)では，W/Bを40%として早強ポルトランドセメントを用いた供試体の圧縮強度を混和材の種類ごとに示した。W/Bが同一の場合，混和材を用いた供試体では，早強ポルトランドセメントのみを用いた供試体（置換率0%）と比較して，混和材の置換率が高いほど初期材齢の強度発現が遅れたが，材齢1年ではこの差が小さくなった。ただし，材齢1年でも，混和材の置換率を混合セメントC種の上限值とした供試体では，早強ポルトランドセメントのみを用いた供試体と比較して，圧縮強度が小さくなった。

#### 3.2.2 養生方法の影響：W/B=40%の供試体

図一2(D)，(E)では，W/Bを40%として早強ポルトランドセメントを用いた供試体の圧縮強度を養生方法ごとに示した。模擬的な蒸気養生を行った供試体では，材齢1日で圧縮強度が30N/mm<sup>2</sup>以上となったが，材齢28日以降では標準養生を行った供試体よりも圧縮強度が小さくなった。

#### 3.2.3 混和材の置換率とW/Bの影響：W/B=35，50%の供試体

図一2(F)～(I)では，普通ポルトランドセメントを用いてW/Bを35，50%とした供試体の圧縮強度を混和材の種類ごとに示した。W/Bが同一の場合，混和材を用いた供試体では，普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体（置換率0%）と比較して，混和材の置換率が高いほど初期材齢の強度発現が遅れたが，材齢1年ではこの差が小さくなった。また，材齢1年でも，混和材の置換率を混合セメントC種の上限值以上とした供試体では，W/Bが同一の普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体と比較して圧縮強度が小さくなったが，W/Bを低減することによって初期材齢及び長期材齢の圧縮強度が大きくなった。

### 3.2.4 セメントと混和材の種類、混和材の置換率の影響

図-2(A)~(E)では早強ポルトランドセメントを用いた供試体の圧縮強度、図-2(F)~(I)では普通ポルトランドセメントを用いた供試体の圧縮強度を示した。W/B と混和材の置換率が異なるため厳密な比較は困難であるが、全体的な傾向としては、早強ポルトランドセメントを用いた供試体では初期材齢の強度発現が大きくなったこと、普通ポルトランドセメントを用いた供試体では圧縮強度の増加が長期的に継続していたことがわかる。

図-2(F), (H)では高炉スラグ微粉末を用いた供試体の圧縮強度、図-2(G), (I)ではフライアッシュを用いた供試体の圧縮強度を示した。高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた供試体では、混和材の種類にかかわらず、普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体と比較して、圧縮強度の増加が長期的に継続したことがわかる。また、図-2(F), (H)には高炉スラグ微粉末 4000 の置換率を 85%とした供試体の圧縮強度を示したが、これらの供試体の材齢 28 日以降の圧縮強度の増加量は他の混和材を用いた供試体と比較して小さかったことがわかる。

以上を踏まえると、混和材を用いたコンクリートの強度発現の傾向は、セメントと混和材の種類、混和材の置換率、W/B、養生方法等によって異なる傾向を示すため、構築する構造物で求められる強度を適切に考慮して、セメントと混和材の種類、混和材の置換率、W/B、養生方法等を設定する必要があると考えられる。

### 3.3 圧縮強度とヤング係数の関係

材齢 28 日の圧縮強度とヤング係数の関係を図-3 に示す。同図では、圧縮強度とヤング係数の関係を W/B と混和材の使用有無によって整理して示した。また、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>に示される圧縮強度とヤング係数の関係を併記した。

この結果によると、圧縮強度とヤング係数の関係は、W/B、混和材の使用有無や置換率にかかわらず、概ね同一の傾向を示したことがわかる。また、この傾向は、コンクリート標準示方書に示される圧縮強度とヤング係数の関係と概ね一致したことがわかる。

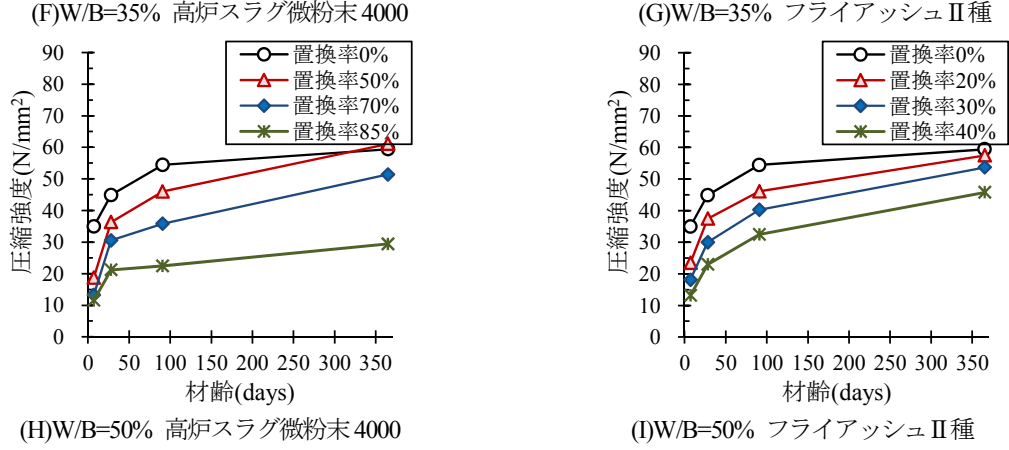
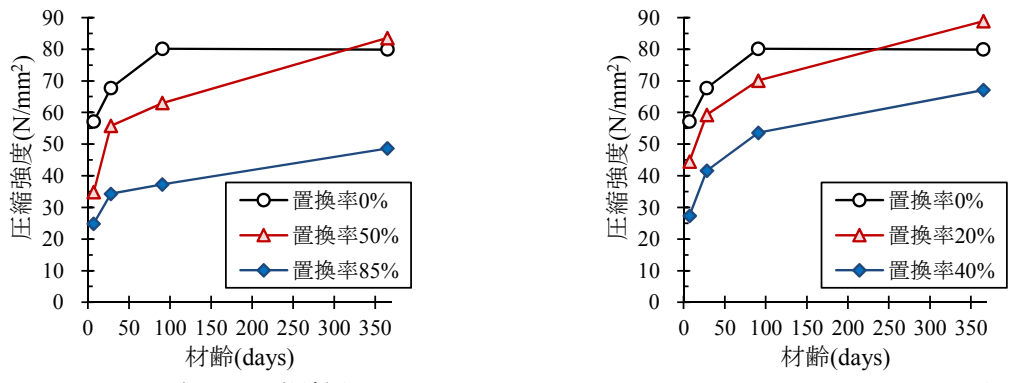
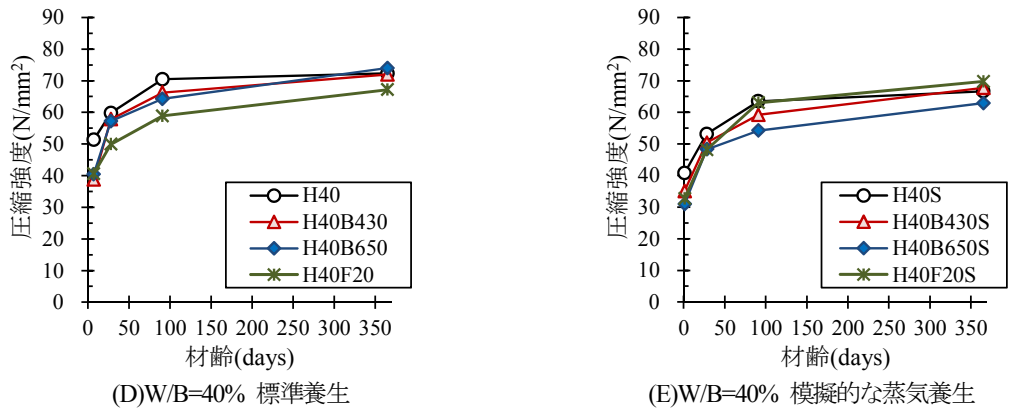
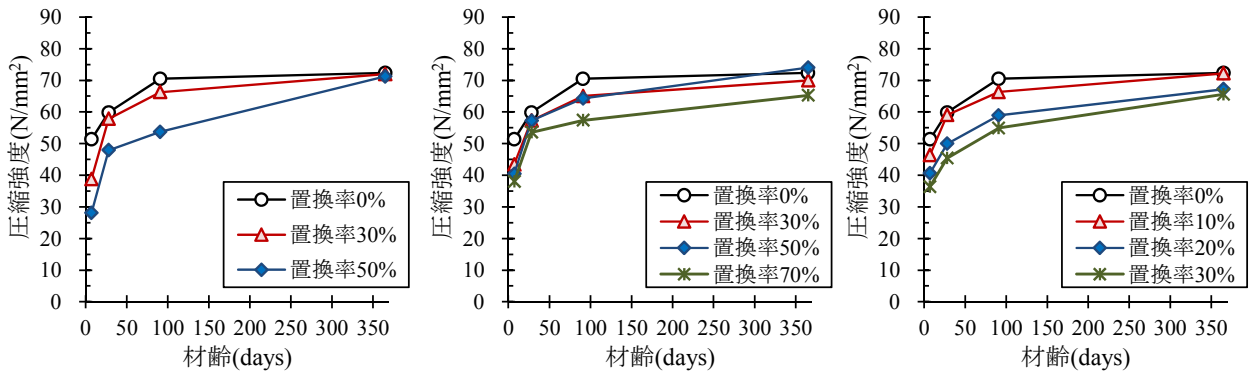
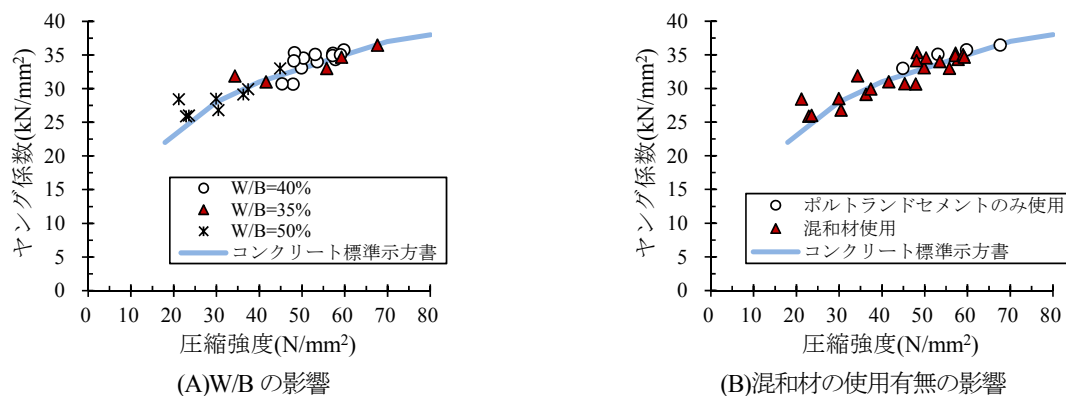


図-2 圧縮強度の比較

※養生方法：(A)~(D), (F)~(I)では材齢 28 日まで 20°C で水中養生，(E)では模擬的な蒸気養生の後に材齢 28 日まで 20°C で水中養生した後，材齢 91 日まで実験室内で気中養生，材齢 3 年まで雨掛かりのある屋外に暴露



図一3 圧縮強度とヤング係数

#### 4. まとめ

この付録では、セメントと混和材の種類、混和材の置換率、W/B等の異なるコンクリート供試体を製作して圧縮強度試験を行い、混和材を用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数について検討した。この実験の範囲内で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では、W/Bが同一のポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、混和材の置換率が高いほど初期材齢の強度発現が遅れたが、長期的に圧縮強度の差は小さくなる傾向にあった。混和材の置換率を混合セメントB種相当以下としたコンクリートの圧縮強度は、材齢1年でポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同程度となったが、混和材の置換率を混合セメントC種の上限值以上としたコンクリートでは、材齢1年でもポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも小さくなった。
2. 混和材の置換率を混合セメントC種の上限值以上としたコンクリートにおいても、W/Bを低減すると初期材齢及び長期材齢の圧縮強度が大きくなった。
3. 混和材を用いたコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係は、W/B、混和材の使用有無や置換率にかかわらず、概ね同一の傾向を示した。また、この傾向は、コンクリート標準示方書に示される圧縮強度とヤング係数の関係と概ね一致した。

#### 参考文献

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

## 付録ー3 中性化に対する抵抗性

### 1. はじめに

この付録では、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検討した結果を示す。

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の使用が抑制されて水酸化カルシウムの含有量が少なくなるため、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、中性化に対する抵抗性が低下する可能性が高い。このため、混和材を用いたコンクリートの実用化に際して耐久性面で最も懸念されるのが、中性化による鋼材腐食の発生である。しかし、混和材の置換率を混合セメントC種の上限值以上としたコンクリートにおいて、中性化に対する抵抗性を実環境下で検討した事例は多くない。実環境下における中性化の進行速度は降雨等による水分の供給や大気との接触の有無によって異なる可能性が高いが、このような環境条件の違いが混和材を多量に用いたコンクリートの中性化の進行速度に与える影響は明確ではない。また、混和材を多量に用いたコンクリートの中性化に対する抵抗性を室内試験で迅速に評価するためには、促進中性化試験（JISA 1153）の適用性を明らかにする必要がある。

この付録では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリート供試体を製作して暴露試験を行い、実環境下において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検討した結果<sup>1)</sup>～<sup>4)</sup>を示す。また、暴露試験に用いた供試体と同時に製作した供試体を用いて促進中性化試験（JISA 1153）を行い、促進中性化試験の適用性について検証した結果<sup>1)～2), 4)</sup>を示す。

### 2. 実環境下での中性化に対する抵抗性の検討

#### 2.1 実験方法

混和材を用いたコンクリートの中性化に対する抵抗性を実環境下で検討するため、つくば、新潟、沖縄の屋外及び室内の4種類の環境条件で暴露試験を行った。

コンクリートの配合と基礎物性を表ー1に示す。配合は26種類である。セメントには普通ポルトランドセメント（OPC）あるいは早強ポルトランドセメント（HPC）を用いた。混和材には、JIS A 6206に適合する高炉スラグ微粉末4000（BS4）と高炉スラグ微粉末6000（BS6）、JIS A 6201に適合するフライアッシュⅡ種（FA）を用いた。

水結合材比（W/B）は3種類である。W/Bを40%とした13配合の供試体では、プレストレストコンクリートへの適用を想定して早強ポルトランドセメントを用い、標準養生あるいは模擬的な蒸気養生を行った。混和材には、高炉スラグ微粉末4000、高炉スラグ微粉末6000、フライアッシュⅡ種を用いた。プレストレストコンクリートでは早期の強度発現が求められることが多いため、混和材の置換率については混合セメントC種の上限值以下とした。一方、W/Bを35、50%とした13配合の供試体では、鉄筋コンクリート及び無筋



表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	B (kg/m <sup>3</sup> )	B=OPC+HPC+BS4+BS6+FA 結合材の構成割合(%)					スランプ (cm)	空気量 (%)	
			OPC	HPC	BS4	BS6	FA			
H40	40	413	-	100	-	-	-	11.5	4.6	
H40B430			-	70	30	-	-	-	10.5	3.8
H40B450			-	50	50	-	-	-	13.5	5.1
H40B630			-	70	-	30	-	-	13.5	4.7
H40B650			-	50	-	50	-	-	14.5	4.8
H40B670			-	30	-	70	-	-	13.0	4.9
H40F10			-	90	-	-	10	-	9.5	4.2
H40F20			-	80	-	-	20	-	14.0	4.5
H40F30			-	70	-	-	30	-	12.0	4.3
H40S			-	100	-	-	-	-	12.0	4.6
H40B430S			-	70	30	-	-	-	10.0	3.9
H40B650S			-	50	-	50	-	-	12.5	4.7
H40F20S	-	80	-	-	20	-	10.5	3.1		
N35	35	471	100	-	-	-	-	14.5	4.7	
N35B50			50	-	50	-	-	-	14.5	4.3
N35B85			15	-	85	-	-	-	12.5	5.1
N35F20			80	-	-	-	20	-	12.0	3.5
N35F40			60	-	-	-	40	-	14.5	4.5
N50	50	330	100	-	-	-	-	14.0	5.2	
N50B50			50	-	50	-	-	-	13.5	4.3
N50B70			30	-	70	-	-	-	12.5	4.5
N50B85			15	-	85	-	-	-	11.5	4.0
N50F20			80	-	-	-	20	-	11.5	4.4
N50F30			70	-	-	-	30	-	11.0	4.6
N50F40			60	-	-	-	40	-	14.5	4.0
N50B50F20			30	-	50	-	20	-	12.0	4.6

※W: 上水道水(茨城県つくば市), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,300cm<sup>2</sup>/g), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,490cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,400cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.19%(無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=5,950cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.85%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,280cm<sup>2</sup>/g), 細骨材: 静岡県掛川産陸砂(密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), 粗骨材: 茨城県笠間産砕石 6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合, 最大寸法=20mm

※化学混和剤: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの, W/B=35%で使用), AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体, W/B=50%で使用), 空気連行剤(フライアッシュを用いた配合以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, フライアッシュを用いた配合で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整

※養生方法: 配合の末尾に「S」を付記していない供試体では打込み翌日に脱型して材齢 28 日まで 20℃で水中養生。配合の末尾に「S」を付記した供試体では恒温恒湿槽を用いて模擬的な蒸気養生(20℃で3時間前養生, 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)を行い, 脱型して材齢 28 日まで 20℃で水中養生

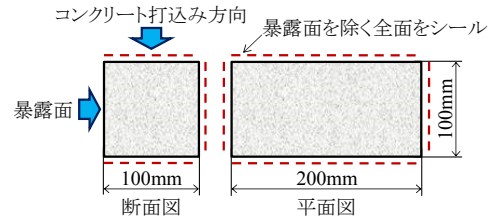


図-1 暴露供試体の形状



【つくば】

茨城県つくば市南原  
内陸部  
平均気温: 13.9℃  
平均湿度: 71.8%  
積算降水量: 4,896mm



【新潟】

新潟県上越市名立区  
沿岸部  
平均気温: 13.2℃  
平均湿度: 76.0%  
積算降水量: 10,378mm



【沖縄】

沖縄県国頭郡大宜味村  
沿岸部  
平均気温: 22.4℃  
平均湿度: 74.6%  
積算降水量: 7,828mm

写真-1 供試体の暴露状況と気象データ  
※気象データは暴露試験場の最寄りの気象観測地点(つくば(館野), 高田, 名護)の測定値を引用<sup>5)</sup>

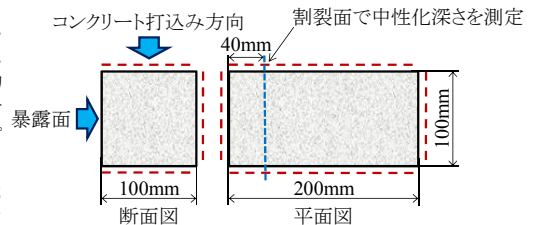


図-2 暴露供試体の解体調査方法

コンクリートへの適用を想定して普通ポルトランドセメントを用い, 標準養生を行った。混和材には高炉スラグ微粉末 4000 とフライアッシュ II 種を用い, 混和材の置換率を混合セメント C 種の上限值よりも高めた供試体と高炉スラグ微粉末とフライアッシュの両方を用いた三成分の供試体も製作した。なお, 混和材の使用がコンクリートの耐久性に与える影響を検討することを目的としたため, 全配合で単位水量 (165kg/m<sup>3</sup>) と単位粗骨材量 (968kg/m<sup>3</sup>) を同一とした。

暴露試験に用いた供試体の形状を図-1 に示す。供試体は, 100×100×200mm の角柱供試体である。実際のコンクリート構造物が置かれる状況を模擬するため, コンクリート打込み方向に対して側面 (100×200mm) を暴露面とし, この暴露面を側面とした状態で供試体を暴露した。また, 暴露面を除く全面を塗装材料でシールし, 暴露面以外での中性化の進行を防止した。いずれの供試体も, 材齢 28 日まで水中養生を行い, 材齢

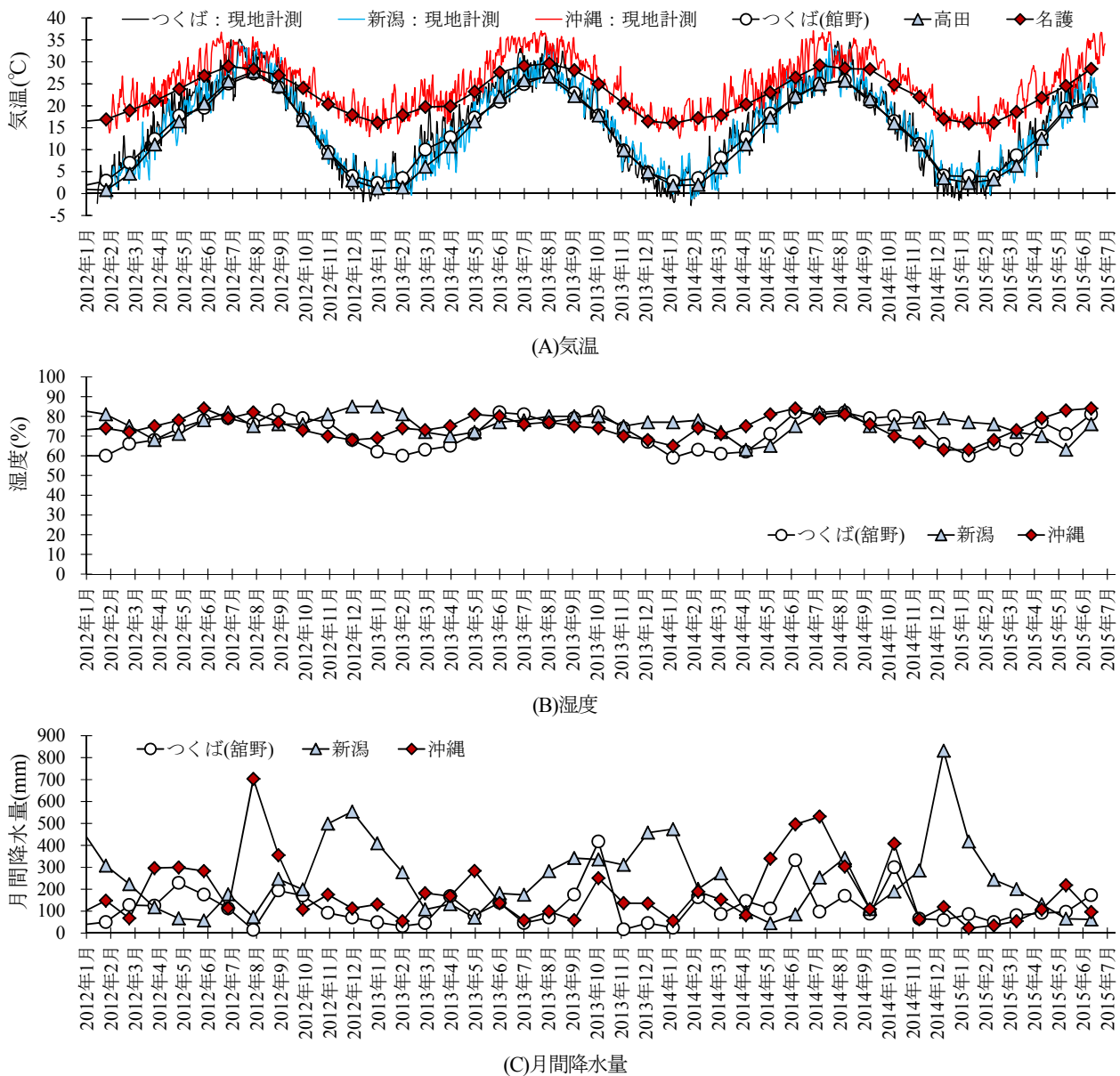


図-3 気温、湿度、月間降水量の測定値

※つくば(館野), 高田, 名護の気象データは暴露試験場の最寄りの気象観測地点での測定値を引用<sup>5)</sup>  
 ※(A)気温の「現地計測」データは暴露試験場内での測定値

44～69日 で暴露を開始した。

屋外の暴露試験場における供試体の暴露状況と気象データを写真-1に示す。平成24年2月からの40ヶ月間、雨掛かりのある屋外の暴露試験場（茨城県つくば市南原，新潟県上越市名立区，沖縄県国頭郡大宜味村）と国立研究開発法人土木研究所の事務室内の4ヶ所に供試体を暴露した。

つくばの暴露試験場は内陸部に位置するため塩化物イオンの供給は無いが，新潟と沖縄の暴露試験場は海岸線近くの厳しい塩害環境下にある。新潟の暴露試験場は，海水が供試体に直接降りかかることは無いが，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によって飛来塩分が供給される環境である。沖縄の暴露試験場は，天候によっては海水が供試体に直接降りかかることもある環境である。また，各暴露試験場の最寄りの気象観測地点の気象データ<sup>5)</sup>によると，気温は沖縄で高く，つくばと新潟で低い。湿度は全地点

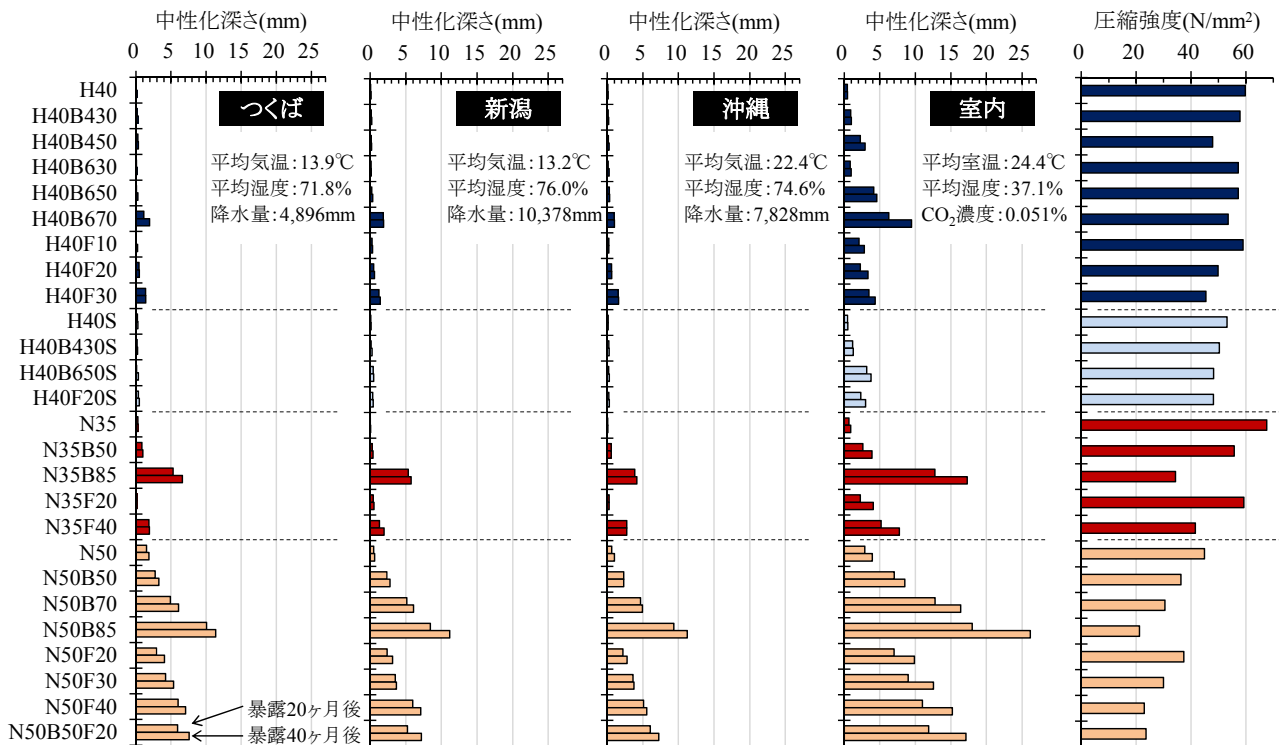


図-4 暴露 20, 40 ヶ月後の中性化深さと材齢 28 日の圧縮強度

で同程度であったが、降水量は新潟と沖縄で多く、つくばで少ない。すなわち、3ヶ所の暴露試験場は、飛来塩分量、気温、湿度、降水量等が異なる環境条件であった。

暴露供試体の解体調査の方法を図-2に示す。暴露 20 ヶ月後と暴露 40 ヶ月後に中性化深さの測定を行った。供試体の端部から約 40mm の位置を割裂し、JIS A 1152 を参考に、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、供試体表面から赤紫色を呈した部分までの距離を等間隔に 9 点で測定して得られた平均値を中性化深さの測定値とした。

なお、参考のため、暴露期間における気温、湿度、月間降水量の測定値を図-3に示す。気温については、暴露試験場内での測定値（現地計測）と最寄りの気象観測地点での測定値<sup>5)</sup>を併記した。いずれの測定値も同程度で推移しており、暴露試験場内の気温は気象観測地点での測定値と同等であったと考えられる。特に冬期において、沖縄で気温が高く、つくばと新潟で気温が低いことがわかる。湿度と月間降水量は最寄りの気象観測地点での測定値<sup>5)</sup>である。湿度は、冬期に新潟で若干高くなった。月間降水量は、夏期に沖縄で多く、冬期に新潟で多くなった。

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 中性化深さ

暴露 20, 40 ヶ月後の供試体の中性化深さと材齢 28 日の圧縮強度を図-4に示す。つくば、新潟、沖縄の中性化深さの図には写真-1に示した気象データ、室内の中性化深さの図には供試体の周囲で測定した室温と湿度、二酸化炭素濃度の平均値を併記した。いずれの暴露環境においても、暴露期間が長いほど中性化深さが大きくなったこと、W/B が大きく、混和材の置換率の高い供試体で、中性化深さが大きくなったことが

読み取れる。同一配合の供試体の中性化深さを比較すると、屋外3ヶ所に暴露した供試体の中性化深さは同程度であったが、室内に暴露した供試体の中性化深さは屋外に暴露した供試体よりも大幅に大きくなった。屋外の各暴露場では飛来塩分量、気温、湿度、降水量等の環境条件が異なったが、これらの違いが中性化深さに与えた影響は屋外と室内の環境条件の違いほど明確ではなかったと考えられる。また、室内に暴露した供試体の中性化深さが大きくなった原因は、室内の二酸化炭素濃度(=0.051%, 測定値)が大気中の二酸化炭素濃度(=0.03977%<sup>6)</sup>, 2014年の世界の平均値)よりも高かったこと、室内は雨掛かりがなく屋外よりも乾燥していたことなどから、中性化が進行しやすい環境に供試体が置かれたためと考えられる。

材齢28日の圧縮強度は、標準養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)を用いてJIS A 1108に準拠して測定したものである。この結果によると、W/Bやポルトランドセメントの種類が同一であれば、混和材の置換率の高い供試体において、圧縮強度が小さくなる傾向にあった。

## 2.2.2 中性化速度係数

暴露供試体の中性化速度係数を図-5に示す。ここでは中性化が時間の平方根に比例して進行する、すなわち、 $\sqrt{t}$ 則に従って進行すると仮定して、暴露20、40ヶ月後の中性化深さの測定値を暴露期間の平方根で除して中性化速度係数を求めた。この $\sqrt{t}$ 則の考え方は中性化の進行を予測する方法として既存の設計規準等<sup>7), 8)</sup>でも採用されており、式(1)のように表される。

$$y = \alpha \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、 $y$ : 中性化深さ(mm),  $\alpha$ : 中性化速度係数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ ),  $t$ : 暴露期間(year)である。

この結果によると、中性化速度係数は暴露20ヶ月後と暴露40ヶ月後で同程度であり、混和材を多量に用いた供試体においても $\sqrt{t}$ 則を適用して中性化深さの進行を推定できると考えられる。ただし、暴露20ヶ月後と暴露40ヶ月後の中性化速度係数を精査すると、暴露期間を長くすると、中性化速度係数は、屋外に暴露した供試体では若干減少したが、室内に暴露した供試体では同程度か若干増加した場合もあった。降雨等によって水分が供給される屋外に暴露した供試体では、結合材の反応が暴露後も継続して材齢の経過とともに中性化に対する抵抗性が向上したこと、室内に暴露した供試体よりもコンクリート表層の含水率が高く二酸化炭素の侵入が抑制されたこと等が原因ではないかと考えられる。

混和材を用いたコンクリートの中性化に対する抵抗性を暴露試験によって評価する場合には、気象条件の違いによる試験結果の変動をなるべく小さくするため、なるべく長期の暴露試験を行うことが望ましい。しかし、長期の暴露試験の実施は必ずしも容易ではなく、屋外に暴露した供試体では暴露期間を長くすると $\sqrt{t}$ 則に基づいて求めた中性化速度係数が減少する傾向にあったことから、試験期間の短い暴露試験の結果を用いて $\sqrt{t}$ 則から中性化深さの将来予測を行う場合には安全側の結果が得られると考えられる。ただし、中性化の進行速度は環境条件の影響を受ける可能性が高く、暴露試験を行って中性化に対する抵抗性を評価する場合には、夏期や冬期等の暴露試験の実施時期による気象条件の違いによる結果の変動を避けるため、1年間以上の試験期間を確保することが望ましいと考えられる。

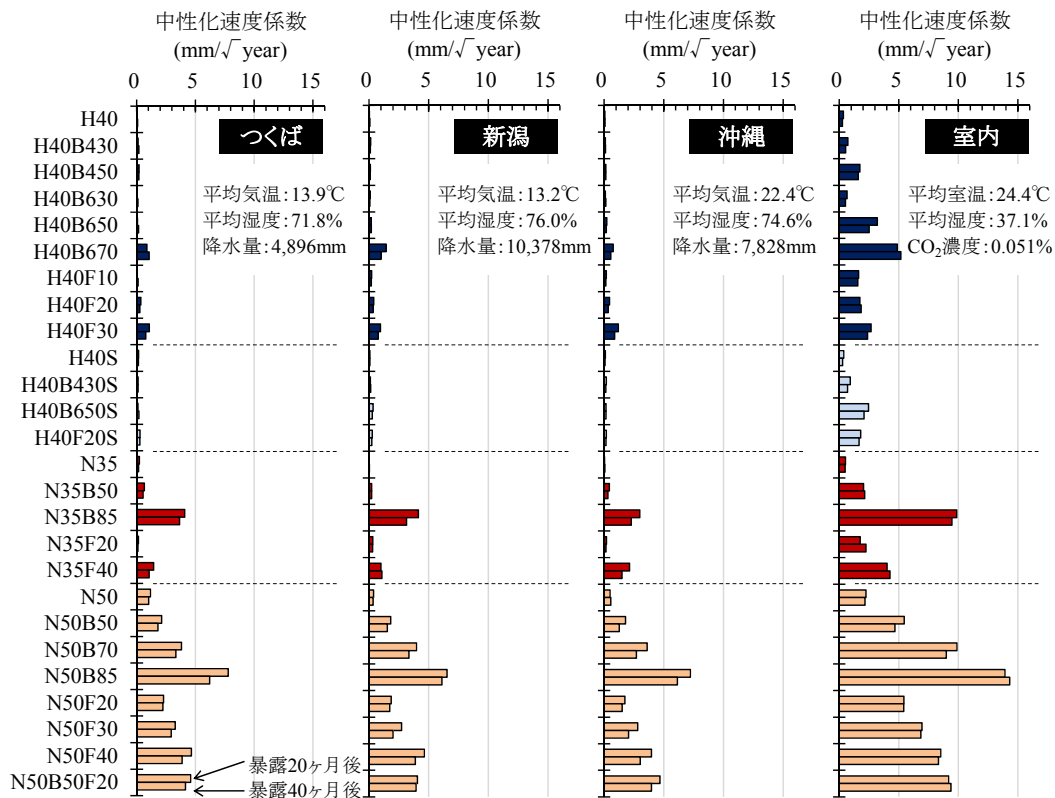


図-5 暴露 20, 40 ヶ月後の中性化速度係数

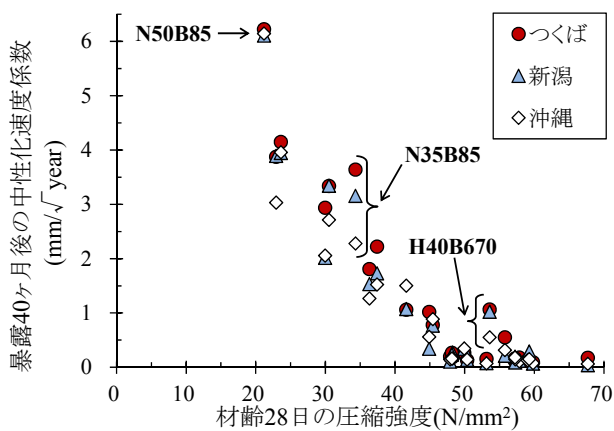


図-6 中性化速度係数と材齢 28 日の圧縮強度

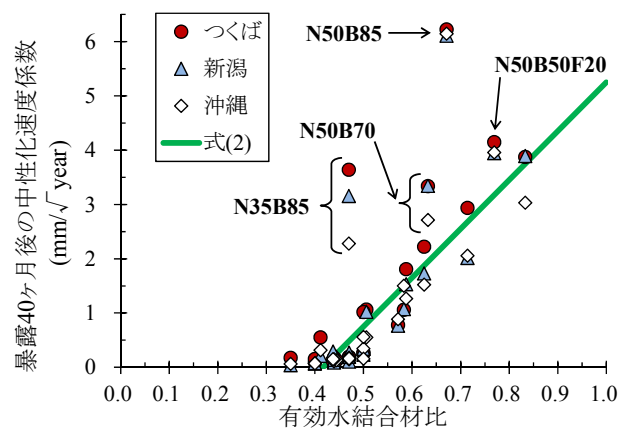


図-7 中性化速度係数と有効水結合材比

### 2.2.3 屋外の暴露供試体の中性化速度係数と圧縮強度、有効水結合材比の関係

屋外の暴露供試体の中性化速度係数と材齢 28 日の圧縮強度の関係を図-6 に示す。全体的な傾向として、材齢 28 日の圧縮強度が大きいほど中性化速度係数が小さくなった。過去の暴露試験<sup>9), 10)</sup>でも、圧縮強度が同等であれば、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの使用の有無にかかわらず中性化に対する抵抗性が同程度になることが報告されており、今回の暴露試験の結果も同様の傾向にあった。しかし、図-6 を精査すると、高炉スラグ微粉末の置換率の高い供試体（例えば、H40B670, N35B85, N50B85）では、圧縮強度が同等であっても、高炉スラグ微粉末の置換率の低い供試体と比較して中性化速度係数が大きくなった。圧縮強度は中性化に対する抵抗性を間接的に推定する指標として用いられることもあるが、高炉スラグ微粉

末の置換率を高炉セメント C 種の上限值以上とする場合には、高炉スラグ微粉末の置換率の低いコンクリートと傾向が異なる点に留意する必要がある。

次に、屋外の暴露供試体の中性化速度係数と有効水結合材比の関係を図-7 に示す。同図には、文献 7) の中性化速度係数の予測式である式(2)の計算値を併記した。また、有効水結合材比は式(3)の計算値とした。

$$\alpha_{JSCE} = -3.57 + 9.0 \frac{W}{B'} \quad (2)$$

$$\frac{W}{B'} = \frac{W}{C_p + k \cdot A_d} \quad (3)$$

ここに、 $\alpha_{JSCE}$ ：中性化速度係数の予測値(mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )、 $W$ ：単位水量(kg/m<sup>3</sup>)、 $B'$ ： $C_p + k \cdot A_d$ 、 $W/B'$ ：有効水結合材比、 $C_p$ ：単位セメント量(kg/m<sup>3</sup>)、 $k$ ：混和材の種類により定まる定数(高炉スラグ微粉末の場合  $k = 0.7$ 、フライアッシュの場合  $k = 0$ )、 $A_d$ ：単位混和材量(kg/m<sup>3</sup>)である。

図-7 によると、中性化速度係数は有効水結合材比の高い供試体で大きくなる傾向にあったが、材齢 28 日の圧縮強度との関係よりもばらつきが大きくなった。また、暴露 40 ヶ月後の中性化速度係数を式(2)の計算値と比較すると、高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメント C 種の上限值以上とした供試体 (N35B85, N50B70, N50B85) と三成分の供試体 (N50B50F20) では、暴露試験から得られた中性化速度係数が式(2)の計算値を上回った。式(2)がフライアッシュの置換率を 30%までとした屋外暴露試験の結果から導出されたこと、高炉スラグ微粉末の  $k$  値の設定方法に検討の余地が残されていること等が原因と考えられる。

### 3. 促進中性化試験の適用性に関する検討

#### 3.1 実験方法

国内では、コンクリートの中性化に対する抵抗性を評価する試験方法として、JIS A 1153 に準拠した促進中性化試験が広く採用されている。しかし、この促進中性化試験では試験時の二酸化炭素濃度の設定値 (=5 ±0.2%) が大気中の二酸化炭素濃度 (=0.03977%<sup>6)</sup>) よりも大幅に高く、混和材を多量に用いたコンクリートへの適用性が明確ではなかった。そこで、促進中性化試験と暴露試験の結果を比較して混和材を用いたコンクリートへの適用性を検証するため、前述した暴露試験に用いた供試体の製作時に促進中性化試験に用いる供試体を同時に製作し、JIS A 1153 に準拠して促進中性化試験を行った。

促進中性化試験に用いた供試体は、100×100×400mm の角柱供試体である。材齢 28 日まで水中養生を行った後、材齢 49 日以降で供試体の両側の側面 (100×400mm) 以外をエポキシ樹脂塗料でシールし、材齢 56 日から促進中性化試験を開始した。JIS A 1153 に準拠して、試験条件を温度 20±2℃、湿度 60±5%、二酸化炭素濃度 5±0.2%、促進期間を 1, 4, 8, 13, 26 週間とした。

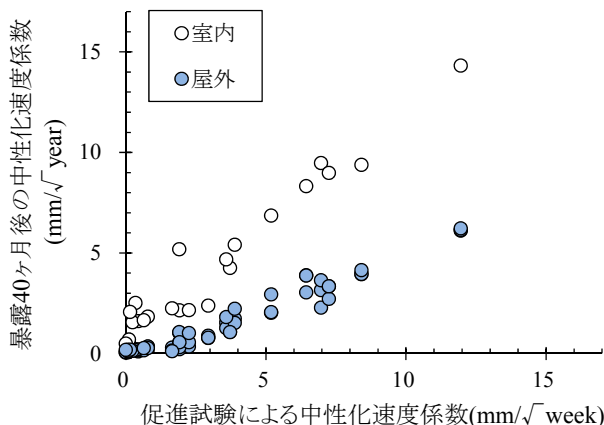


図-8 暴露試験と促進試験による中性化速度係数

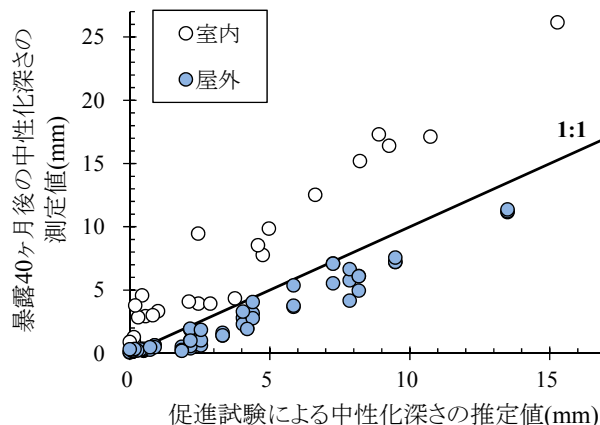


図-9 中性化深さの測定値と推定値

### 3.2 実験結果

暴露試験と促進中性化試験から得られた中性化速度係数の関係を図-8に示す。前述したように屋外3ヶ所に暴露した供試体の中性化深さが暴露環境の違いにかかわらず同程度であったため、ここでは屋外に暴露した供試体の全データを「屋外」と称した。この結果によると、暴露試験から得られた中性化速度係数は、屋外と室内で差が生じていたが、環境条件の違いにかかわらず、促進中性化試験で得られた中性化速度係数と概ね比例関係にあったことがわかる。

次に、暴露試験から得られた中性化深さの測定値と促進中性化試験から得られた中性化深さの推定値の関係を図-9に示す。暴露試験と促進中性化試験では様々な試験条件が異なるが、ここでは式(4)を用いて暴露試験と促進中性化試験の二酸化炭素濃度の差を補正して、促進中性化試験から得られた中性化速度係数をもとに屋外と室内での暴露40ヶ月後の中性化深さを推定した。式(4)は中性化の進行速度が二酸化炭素濃度の平方根の比で関係づけられると仮定するものであり、同様の考え方は既存の設計規準等<sup>8), 11), 12)</sup>でも採用されている。

$$C_{ACT} = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO_2 / CO_{2,ACT}} \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

ここに、 $C_{ACT}$ ：中性化深さの推定値(mm)、 $A_{ACT}$ ：促進中性化試験から得られる中性化速度係数(mm/√week)、 $CO_2$ ：実環境の二酸化炭素濃度(屋外=0.03977%(2014年の世界の平均値<sup>6)</sup>)、室内=0.051%(図-4に併記した測定値))、 $CO_{2,ACT}$ ：促進中性化試験の二酸化炭素濃度(=5%)、 $t$ ：暴露試験期間(week)である。

促進中性化試験から得られた中性化深さの推定値と暴露試験から得られた中性化深さの測定値を比較すると、屋外に暴露した供試体の中性化深さの測定値は促進中性化試験から得られた推定値よりも小さくなったことがわかる。前述した材齢28日の圧縮強度や有効水結合材比との関係では、特に高炉スラグ微粉末の置換率の高い供試体で中性化深さの測定値が突出して大きくなったが、このような傾向は図-9では生じていない。屋外では降雨等による水分供給があり、結合材の反応が暴露後も継続して中性化に対する抵抗性が材齢の経過とともに向上すること、室内に暴露した供試体と比較してコンクリート表層の含水率が高く二酸化炭素の侵入が抑制されること等によって、中性化が比較的進行しにくい環境に供試体が置かれたため、促進中

性化試験から得られた推定値よりも中性化深さが小さくなったと考えられる。

前述したように暴露試験と促進中性化試験から得られた中性化速度係数が概ね比例関係にあったこと、屋外に暴露した供試体の中性化深さの測定値は促進中性化試験から得られた中性化深さの推定値よりも小さくなったこと、促進中性化試験を用いても極端に過大な推定値は得られなかったこと等を踏まえると、混和材を多量に用いたコンクリートを屋外で供用する土木構造物に適用する際には、促進中性化試験の結果を用いることによって中性化深さを安全側に推定できる可能性があると考えられる。ただし、ここでは屋外の二酸化炭素濃度として世界の平均値を用いており、環境条件によっては二酸化炭素濃度が極端に大きくなる場合や雨掛かりの影響を受けない場合もあるため、促進中性化試験の結果を用いて中性化深さを推定する際には、二酸化炭素濃度等の環境条件を適切に考慮する必要があると考えられる。

一方、室内に暴露した供試体では、促進中性化試験から得られた中性化深さの推定値が測定値よりも小さく、中性化深さを過小に推定する結果となった。室内では降雨等による水分供給が無く、かつ、促進中性化試験よりも室温が高く湿度が低く、中性化が比較的進行しやすい環境に供試体が置かれたため、促進中性化試験から得られた中性化深さの推定値が測定値よりも小さく、過小評価になったと考えられる。

なお、二酸化炭素濃度の設定については、文献 11)では、屋外で 0.05%、室内で 0.2%、文献 12)では、屋外で 0.03%、室内で 0.1%とされている。

## 4. 屋外・室内・土中における中性化進行に関する検討

### 4.1 実験方法

混和材を多量に用いたコンクリートの実用化を進める際の一つの方法として、中性化の作用を受けにくい環境条件で供用される土木構造物に適用範囲を限定することが考えられる。ここでは、環境条件の違いが混和材を用いたコンクリートの中性化の進行速度に与える影響を検討するため、屋外・室内・土中の 3 種類の異なる環境に供試体を 1 年間暴露して、中性化深さの測定を行った。

供試体の暴露状況を写真-2、コンクリートの配合と基礎物性を表-2 に示す。「屋外」は茨城県つくば市南原の雨掛かりのある屋外、「室内」は室温を 20℃に管理した恒温室、「土中」は地表面から深さ約 200mm の位置の有害物質を含まない土中とした。供試体の形状は、角柱供試体 (100×100×200mm) である。水温 20℃の養生槽で材齢 28 日まで水中養生を行い、両側の側面 (100×200mm) を暴露面として、材齢 56 日から暴露を開始した。暴露期間は 1 年間とした。端部から約 40mm の位置で供試体を割裂し、JIS A 1152 を参考に、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、試験面から赤紫色を呈した部分までの距離を両側の側面で等間隔に 9 点で測定して得られた平均値を中性化深さの測定値とした。

### 4.2 実験結果

各暴露環境の温度、湿度、降水量の測定値を図-10 に示す。温度 (屋外、室内、土中) と湿度 (室内のみ) はデータロガーによる測定値、降水量は最寄りの気象観測地点 (つくば (館野)) での測定値<sup>5)</sup>である。





(A)屋外：両試験面を南北に向けて設置



(B)室内：恒温室内の状況



(C)土中：発掘回収時の状況

写真-2 供試体の暴露状況

表-2 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
		W	OPC	BS4	FA	S	G			
N50	50	165	330 (100%)	—	—	827	968	10.0	4.2	42.9
N50B50			165 (50%)	165 (50%)	—	815		10.0	4.4	37.0
N50B70			99 (30%)	231 (70%)	—	810		10.0	4.1	32.5
N50F20			264 (80%)	—	66 (20%)	807		11.5	4.7	33.5

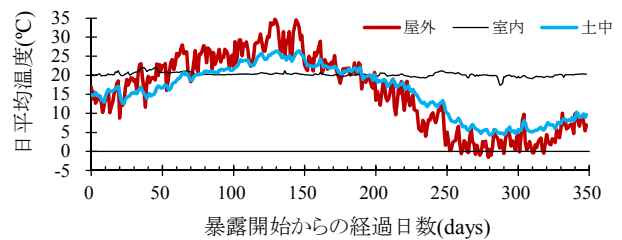
※W: 上水道水(茨城県つくば市), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,340cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,410cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.08%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュII種(密度=2.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,810cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の()内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

※化学混和剤: AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体, W/B=50%で使用), 空気連行剤(N50F20以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, N50F20で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランブ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整

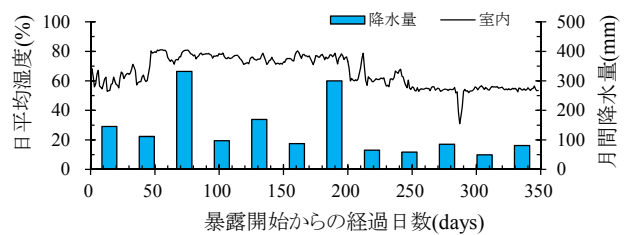
※スランブ: JIS A 1101 に準拠して測定, 空気量: JIS A 1128 に準拠して測定, 圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)の材齢 28 日の圧縮強度を JIS A 1108 に準拠して測定

この結果によると、「屋外」は温度変化が比較的大きく雨掛かりのある環境であり、「室内」は温度が約 20℃で、湿度が 55~80%で変化する室内の環境であり、「土中」は大気との接触がほとんど無く、「屋外」よりも温度変化が小さく凍結融解の作用を受けにくい環境であったことがわかる。

中性化深さの測定値を図-11 に示す。高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた供試体の中性化深さは、普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体よりも大きくなった。ただし、土中に暴露した供試体の中性化深さは 1mm 以下であり、ほとんど中性化が進行していなかった。また、屋外に暴露した供試体の中性化深さは室内に暴露した供試体よりも小さくなった。土中の供試体は大気との接触がほとんど無く、屋外と室内の供試体では降雨の有無等による水分の供給条件が異なったため、環境条件の違いによって中性化深さに差が生じたと考えられる。



(A)温度



(B)湿度と降水量

図-10 温度、湿度、降水量の測定値

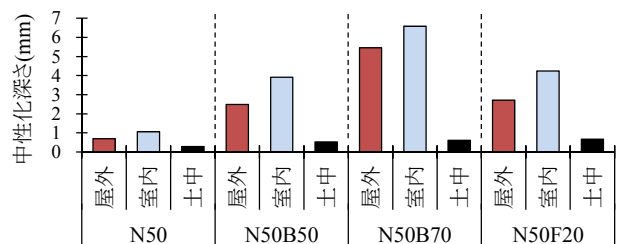


図-11 暴露1年後の中性化深さの測定値

土中に暴露した供試体については、地表面から深さ約 200mm の位置に埋設した。これよりも地表面から深い位置では、大気との接触の程度が小さく、中性化の進行速度がさらに小さくなる可能性が高い。また、年間を通じて温度変化が小さく、凍結融解の作用を受ける可能性も低い。すなわち、屋外と比較して、土中は中性化や凍結融解の作用が緩やかな環境であったと考えられる。このため、混和材を多量に用いたコンクリートにおいて、特に中性化や凍結融解に対する抵抗性が低いコンクリートの実用化を進める際の一つの方法として、土中のように中性化や凍結融解の作用が穏やかな環境に適用範囲を限定することが挙げられる。

## 5. まとめ

この付録では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリート供試体を製作して暴露試験を行い、実環境下における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検討した。また、暴露試験に用いた供試体と同時に製作した供試体を用いて促進中性化試験を行い、促進中性化試験の適用性について検証した。この実験の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

1. つくば、新潟、沖縄の屋外及び室内で暴露試験を行った結果、降雨等によって水分供給のある屋外に暴露した供試体では室内に暴露した供試体よりも中性化深さが小さくなった。中性化深さの測定値は圧縮強度や有効水結合材比と概ね比例関係にあったが、高炉スラグ微粉末の置換率の高い供試体では他の供試体よりも中性化深さが大きく、異なる傾向を示すことがわかった。
2. 促進中性化試験と暴露試験の結果を比較した結果、促進中性化試験から得られた中性化深さの推定値は暴露試験から得られた中性化深さの測定値と概ね比例関係にあり、屋外に暴露した供試体の中性化深さの測定値は推定値よりも小さくなった。二酸化炭素濃度や環境条件を適切に考慮することによって、混和材を多量に用いたコンクリートにおいても、促進中性化試験を活用することによって屋外における中性化深さを推定できる可能性があることがわかった。
3. 屋外・室内・土中の3種類の異なる環境条件で暴露試験を行った結果、土中では中性化がほとんど進行せず、温度変化が小さく凍結融解の作用も穏やかであった。中性化や凍結融解に対する抵抗性が低いコンクリートの実用化を進める際の一つの方法として、土中のように中性化や凍結融解の作用をほとんど受けない環境に適用範囲を限定することが考えられた。

## 参考文献

- 1) Nakamura, E., Watanabe, H.; Laboratory Accelerated and Outdoor Durability Testing of Concrete with Supplementary Cementitious Materials, *Journal of Asian Concrete Federation*, Vol.1, No.1, pp.28-36, 2015
- 2) 中村英佑, 石井豪, 渡辺博志: 暴露試験と促進試験に基づく混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性に関する実験的研究, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.37, No.1, pp.97-102, 2015
- 3) 中村英佑, 石井豪, 渡辺博志: 屋外・室内・土中・促進環境における混和材を用いたコンクリート・モ

- ルタルの中性化進行, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-499, pp.997-998, 2015
- 4) 中村英佑, 石井豪, 渡辺博志: 暴露試験と促進試験による混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.202-207, 2014
  - 5) 気象庁ホームページ: 気象統計情報, <http://www.data.kishou.go.jp/menu/report.html>
  - 6) 気象庁ホームページ: 二酸化炭素濃度の経年変化, [http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2\\_trend.html](http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html)
  - 7) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2013
  - 8) fib: Model Code for Concrete Structures 2010, First Edition, 2013
  - 9) 依田彰彦: 40 年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化と仕上げ材の効果, セメント・コンクリート論文集, Vol.56, pp.449-454, 2002
  - 10) 土木学会: フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究 (最終報告), コンクリートライブラリー64, 1988
  - 11) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針 (案)・同解説, 2004
  - 12) 日本建築学会: 高耐久性コンクリート造設計施工指針 (案)・同解説, 1991

## 付録－4 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

### 1. はじめに

この付録では、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検討した結果を示す。

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のみを用いたコンクリートと比較して、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、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上すると考えられる。しかし、混和材の置換率を混合セメントC種の上限值以上としたコンクリートにおいて、塩化物イオン浸透に対する抵抗性を実環境下で検討した事例は多くない。また、混和材を多量に用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性を室内試験で評価するためには、電気泳動試験（JSCE-G 571）や浸せき試験（JSCE-G 572）の適用性を明らかにする必要がある。

この付録では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリート供試体を製作して暴露試験を行い、実環境下にお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について検討した結果<sup>1)</sup>を示す。また、同時に製作した供試体を用いて電気泳動試験（JSCE-G 571）と浸せき試験（JSCE-G 572）を行い、既存の室内試験の適用性について検証した結果を示す。

### 2. 実環境下での塩化物イオン浸透に対する抵抗性の検討

#### 2.1 実験方法

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を実環境下で検討するため、付録－3に示した暴露試験において新潟と沖縄に暴露した供試体を対象として、塩化物イオン濃度の測定を行った。コンクリートの配合と基礎物性を表－1、暴露供試体の形状を図－1、供試体の暴露状況と気象データを写真－1に再掲する。

暴露供試体の解体調査の方法を図－2に示す。新潟と沖縄に暴露した供試体において、暴露20ヶ月後と暴露40ヶ月後に塩化物イオン濃度の測定を行った。供試体の中央部から厚さ5mmあるいは10mmで試料を切断して粉碎し、JISA 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た。また、沖縄に40ヶ月暴露した供試体のうち、水結合材比（W/B）を50%とした8体（N50、N50B50、N50B70、N50B85、N50F20、N50F30、N50F40、N50B50F20）では、EPMA法による面分析（JSCE-G 574）もあわせて行い、塩化物イオン浸透状況を測定した。

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	B (kg/m <sup>3</sup> )	B=OPC+HPC+BS4+BS6+FA 結合材の構成割合(%)					スランプ (cm)	空気量 (%)
			OPC	HPC	BS4	BS6	FA		
H40	40	413	-	100	-	-	-	11.5	4.6
H40B430			-	70	30	-	-	10.5	3.8
H40B450			-	50	50	-	-	13.5	5.1
H40B630			-	70	-	30	-	13.5	4.7
H40B650			-	50	-	50	-	14.5	4.8
H40B670			-	30	-	70	-	13.0	4.9
H40F10			-	90	-	-	10	9.5	4.2
H40F20			-	80	-	-	20	14.0	4.5
H40F30			-	70	-	-	30	12.0	4.3
H40S			-	100	-	-	-	12.0	4.6
H40B430S			-	70	30	-	-	10.0	3.9
H40B650S			-	50	-	50	-	12.5	4.7
H40F20S			-	80	-	-	20	10.5	3.1
N35			35	471	100	-	-	-	-
N35B50	50	-			50	-	-	14.5	4.3
N35B85	15	-			85	-	-	12.5	5.1
N35F20	80	-			-	-	20	12.0	3.5
N35F40	60	-			-	-	40	14.5	4.5
N50	50	330	100	-	-	-	-	14.0	5.2
N50B50			50	-	50	-	-	13.5	4.3
N50B70			30	-	70	-	-	12.5	4.5
N50B85			15	-	85	-	-	11.5	4.0
N50F20			80	-	-	-	20	11.5	4.4
N50F30			70	-	-	-	30	11.0	4.6
N50F40			60	-	-	-	40	14.5	4.0
N50B50F20			30	-	50	-	20	12.0	4.6

※W: 上水道水(茨城県つくば市), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,300cm<sup>2</sup>/g), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,490cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,400cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.19%(無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=5,950cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.85%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,280cm<sup>2</sup>/g), 細骨材: 静岡県掛川産陸砂(密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), 粗骨材: 茨城県笠間産砕石 6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合, 最大寸法=20mm

※化学混和剤: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの, W/B=35%で使用), AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール)の複合体, W/B=50%で使用), 空気連行剤(フライアッシュを用いた配合以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, フライアッシュを用いた配合で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整

※養生方法: 配合の末尾に「S」を付記していない供試体では打込み翌日に脱型して材齢 28 日まで 20℃で水中養生。配合の末尾に「S」を付記した供試体では恒温恒湿槽を用いて模擬的な蒸気養生(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)を行い, 脱型して材齢 28 日まで 20℃で水中養生

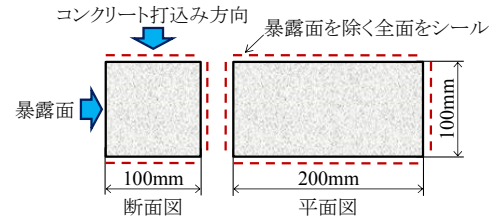


図-1 暴露供試体の形状



【つくば】

茨城県つくば市南原  
内陸部  
平均気温: 13.9℃  
平均湿度: 71.8%  
積算降水量: 4,896mm

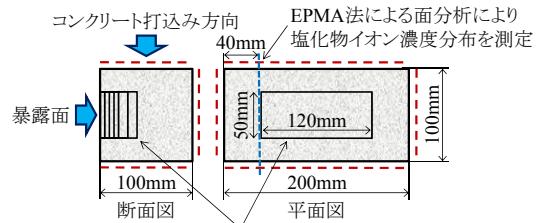
【新潟】

新潟県上越市名立区  
沿岸部  
平均気温: 13.2℃  
平均湿度: 76.0%  
積算降水量: 10,370mm

【沖縄】

沖縄県国頭郡大宜味村  
沿岸部  
平均気温: 22.4℃  
平均湿度: 74.6%  
積算降水量: 7,828mm

写真-1 供試体の暴露状況と気象データ  
※気象データは暴露試験場の最寄りの気象観測地点(つくば(館野), 高田, 名護)の測定値を引用<sup>2)</sup>



塩化物イオン濃度測定用試料の採取位置  
表面から0~5, 5~10, 10~15, 15~20, 20~30, 30~40mm

図-2 暴露供試体の解体調査方法

2.2 実験結果

2.2.1 塩化物イオン濃度分布

新潟に暴露した供試体の塩化物イオン濃度分布を図-3, 沖縄に暴露した供試体の塩化物イオン濃度分布を図-4 に示す。ここではポルトランドセメントのみを用いた供試体と混和材を用いた供試体の塩化物イオン濃度分布を W/B 及び混和材の種類ごとに比較して示す。W/B を 40%とした供試体では、「表面からの距離 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。最も表面に近い「表面からの距離 5mm の位置」までの塩化物イオン濃度の大小と混和材の使用有無の関係は明確ではなかった。しかし、「表面からの距離 10~20mm の位置」では, 早強ポルトランドセメントのみを用いた H40 よりも混和材を用いた供試体で塩化物イオン濃度が小さくなった。混和材の使用によって塩化物イオン浸透に対する抵抗

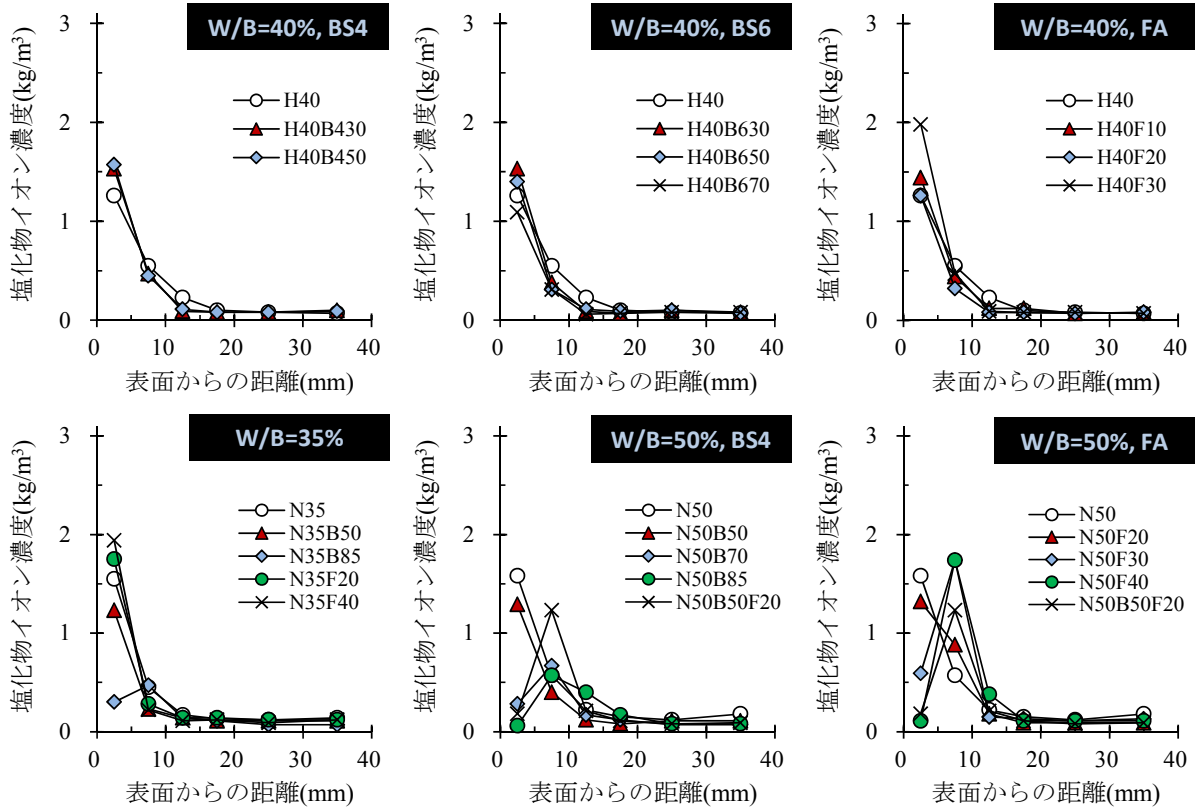
性が向上したためと考えられる。

次に、W/B を 35, 50%とした供試体の塩化物イオン濃度分布に着目すると、W/B を 40%とした供試体とは塩化物イオン濃度分布の傾向が異なっていたことが読み取れる。高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメント C 種の上限值以上とした N35B85, N50B70, N50B85, フライアッシュの置換率をフライアッシュセメント C 種の上限值以上とした N50F30, N50F40, 三成分とした N50B50F20 では、「表面からの距離 0~5mm の位置」よりも「表面からの距離 5~10mm の位置」で塩化物イオン濃度が大きくなった。特に N50B85 では、「表面からの距離 10~15mm の位置」で塩化物イオン濃度が最大となり、この位置の塩化物イオン濃度は普通ポルトランドセメントのみを用いた N50 よりも大きくなった。混和材の置換率の高い供試体では、表面付近よりも供試体内部の塩化物イオン濃度が大きく、普通ポルトランドセメントのみを用いた N35 や N50 よりも供試体内部の塩化物イオン濃度が大きくなる場合があった。また、この傾向は暴露 20 ヶ月後よりも暴露 40 ヶ月後で明確に現れており、混和材の置換率の高い供試体では暴露期間を長くするほど供試体内部の塩化物イオン濃度が大きくなった。

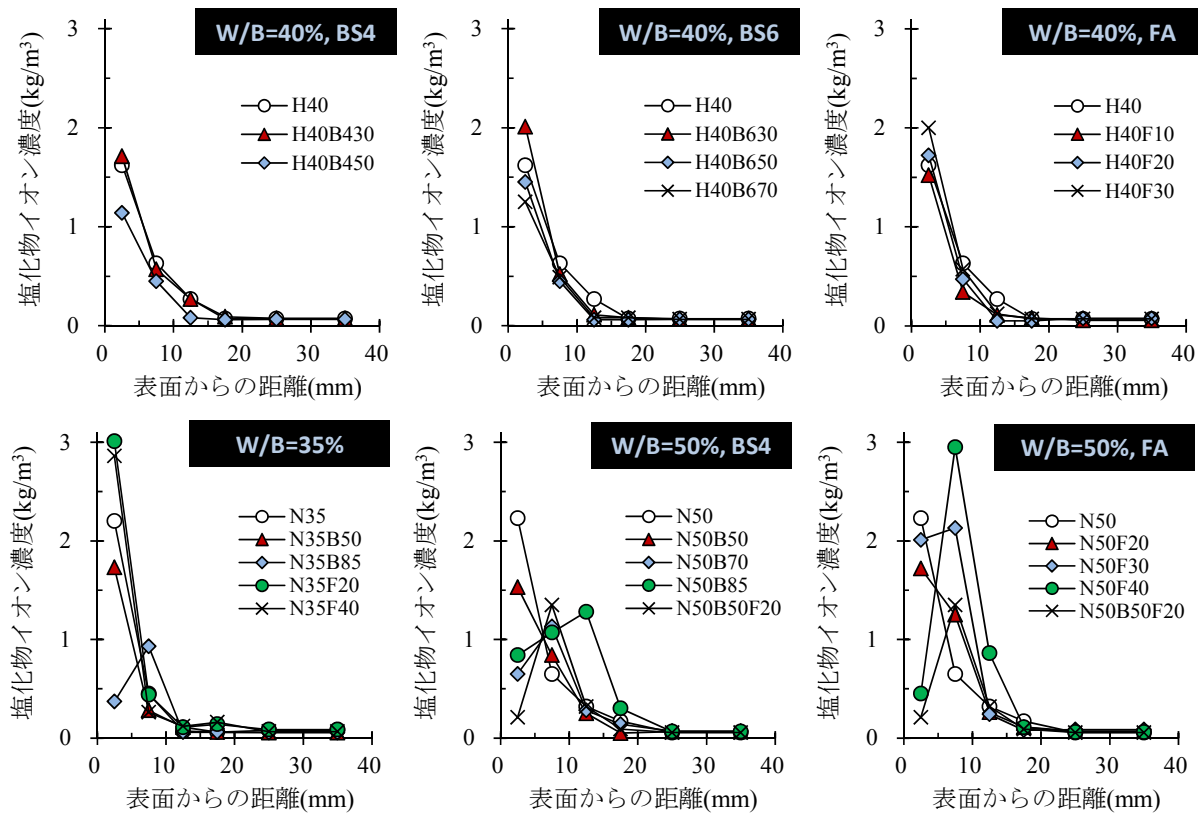
## 2.2.2 塩化物イオン濃度分布と中性化深さ

塩化物イオン濃度分布と中性化深さの関係を検証するため、W/B を 35%として普通ポルトランドセメントのみを用いた N35 と混和材の置換率を混合セメント C 種の上限值以上とした N35B85, N35F40, W/B を 50%とした 8 体の供試体、計 11 体の供試体の塩化物イオン濃度分布と中性化深さの関係を図-5 に示す。中性化深さは、付録-3 で示したフェノールフタレイン溶液噴霧法によって得られた測定値である。W/B の違いにかかわらず、混和材を用いた供試体では普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体よりも中性化深さが大きくなり、中性化深さよりも内部まで塩化物イオンが浸透していた。コンクリートの中性化によって外部から浸透した塩化物イオンが供試体内部に移動・濃縮し、この影響が混和材の置換率の高い供試体で特に顕著に現れたためと考えられる。

次に、混和材の置換率が同一で W/B の異なる供試体の塩化物イオン濃度分布と中性化深さの関係を比較すると、W/B を 35%とした供試体では、W/B を 50%とした供試体よりも中性化深さが小さく、供試体内部の塩化物イオン濃度も小さくなった。W/B を低減することによって、中性化とこれに伴う塩化物イオンのコンクリート内部への移動・濃縮を抑制することができたためと考えられる。したがって、混和材を用いたコンクリートで中性化に対して十分な抵抗性を確保することは、中性化による鋼材腐食の防止に加えて、中性化に伴う塩化物イオンのコンクリート内部への移動・拡散の抑制にも不可欠といえる。

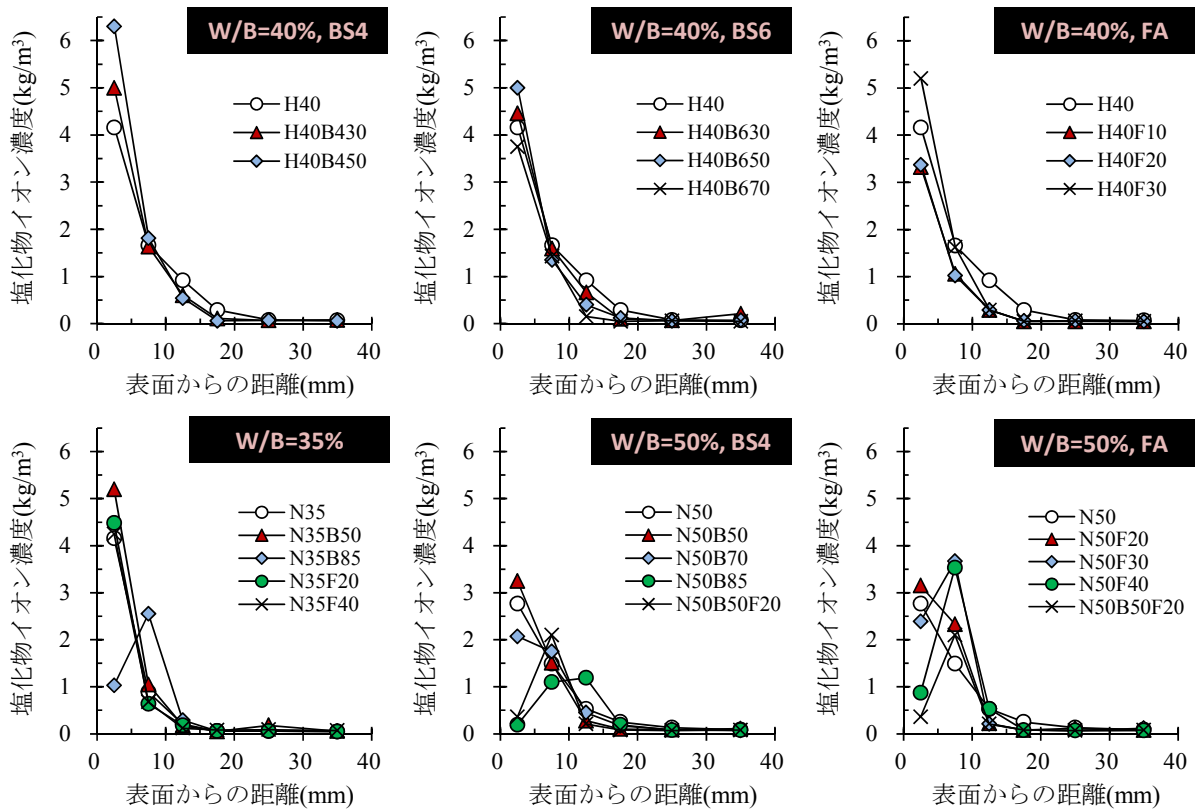


(A) 暴露 20 ヶ月後

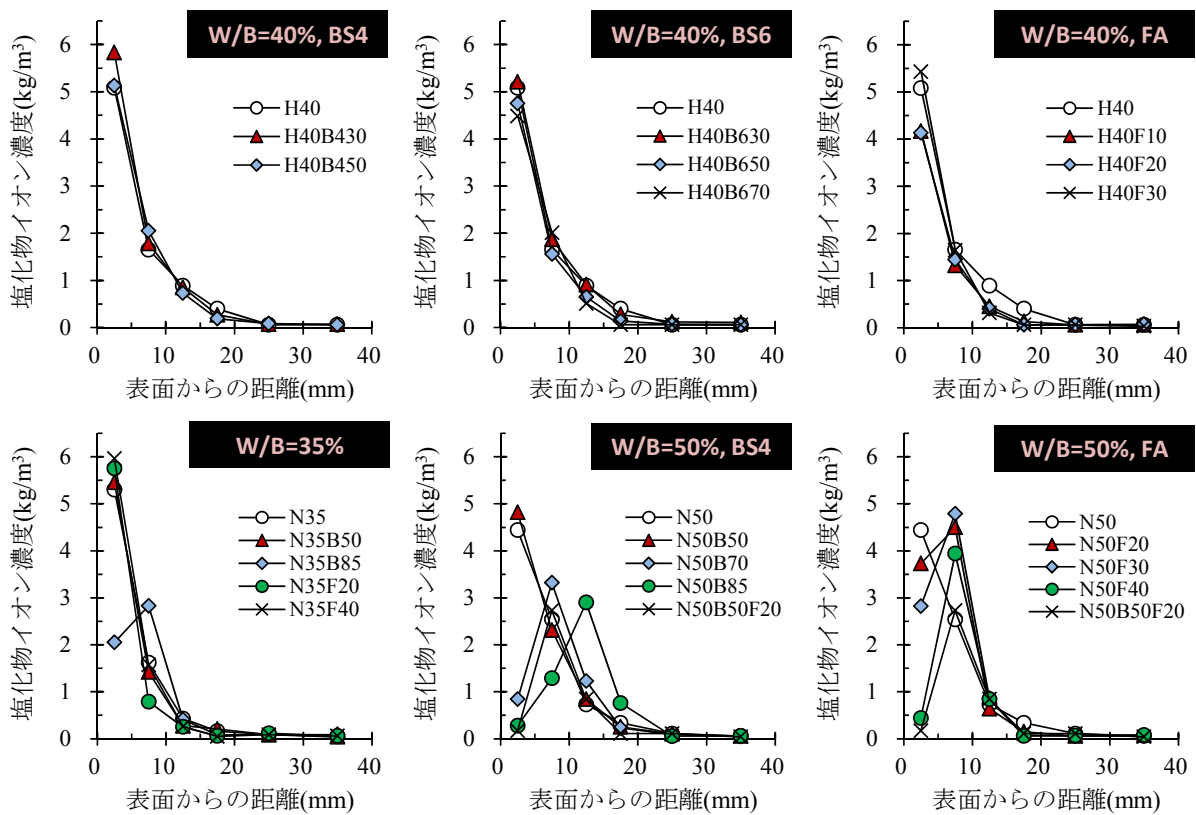


(B) 暴露 40 ヶ月後

図-3 暴露供試体の塩化物イオン濃度分布 (新潟)



(A) 暴露 20 ヶ月後



(B) 暴露 40 ヶ月後

図-4 暴露供試体の塩化物イオン濃度分布 (沖縄)



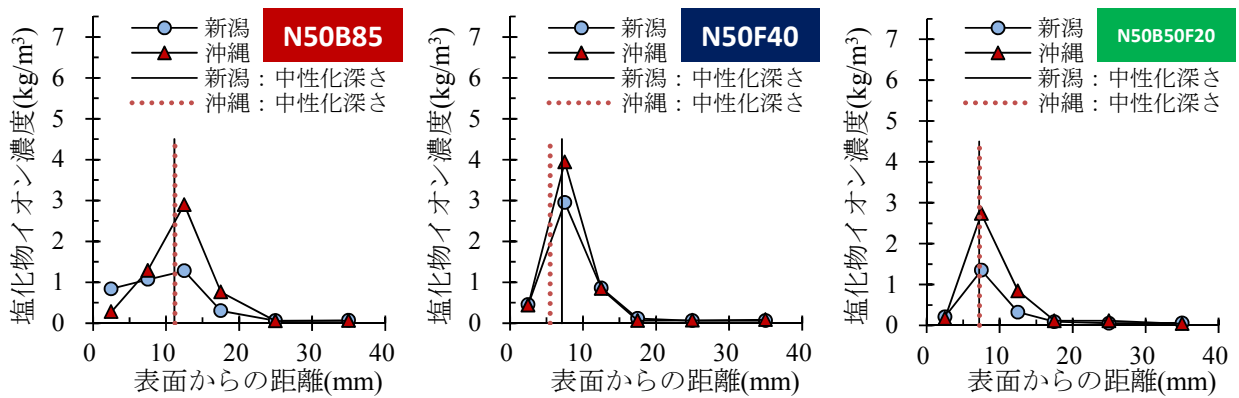
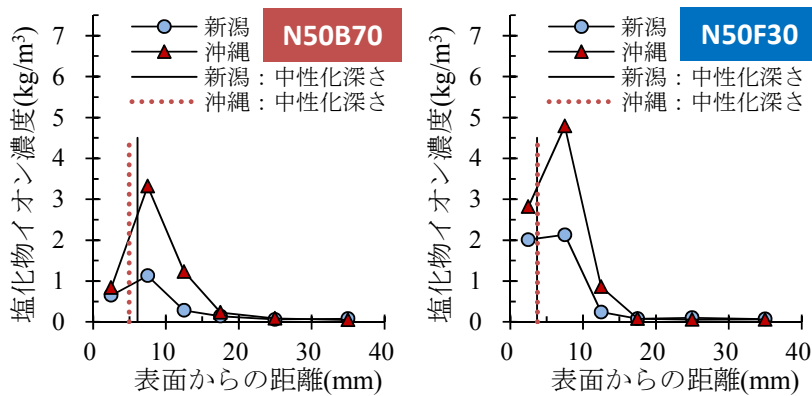
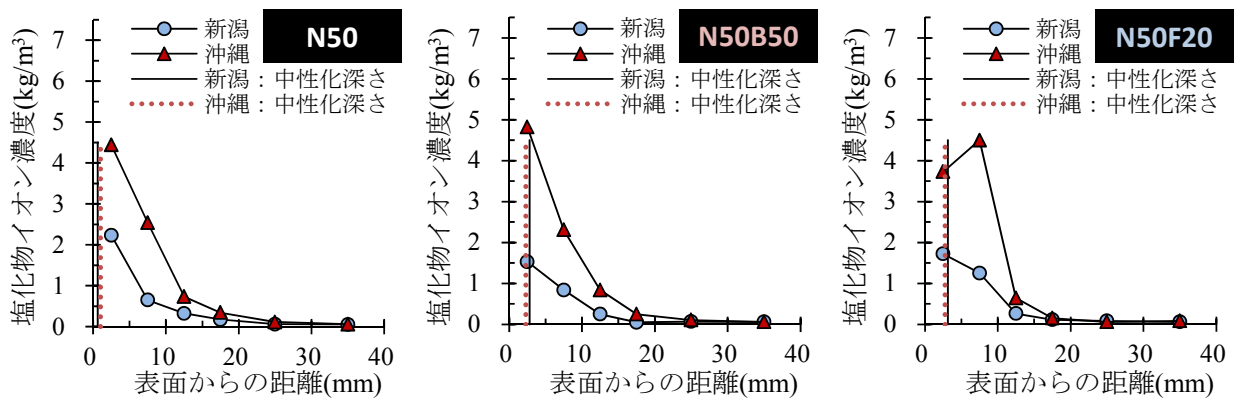
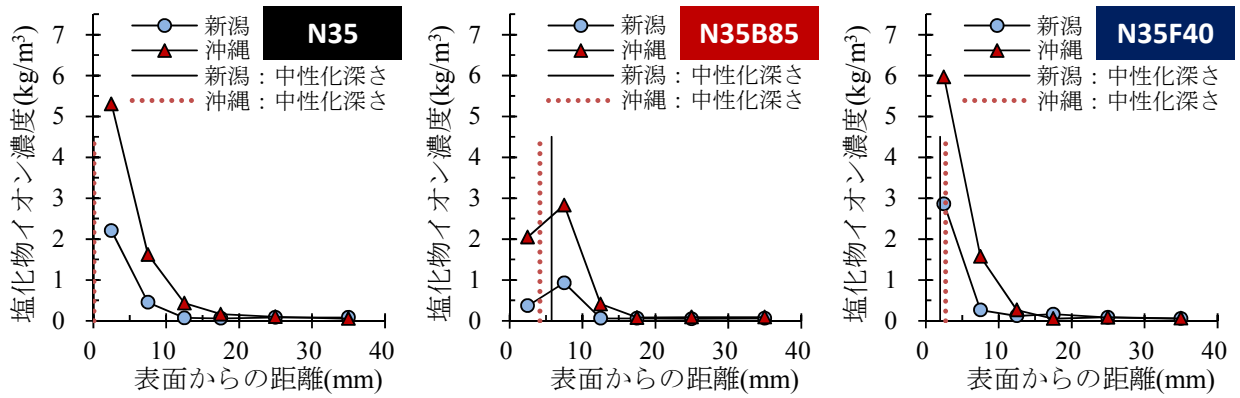


図-5 塩化物イオン濃度分布と中性化深さの関係 (暴露 40 ヶ月後)

### 2.2.3 塩素・カルシウム・ナトリウム・硫黄の分布

EPMA 法による面分析の結果を図-6に示す。ここでは、測定の対象範囲を「暴露供試体の中央部の幅80mm×表面から深さ40mm」とした。測定の対象元素は塩素、カルシウム、ナトリウム、硫黄の4元素とし、カルシウム、ナトリウム、硫黄については各元素の標準試料として酸化物(CaO, Na<sub>2</sub>O, SO<sub>3</sub>)を用いたため、各酸化物の濃度分布を示した。なお、イオンの浸透の大部分がペーストに相当する部分で生じると仮定して、CaO濃度10.0~47.0 mass%に相当するピクセルをペースト部とみなして抽出した結果を示す。

混和材を用いた供試体の塩素の濃度分布に着目すると、供試体の表面付近では濃度が小さく、これよりも内部に濃度の大きい領域が生じていたことがわかる。また、混和材を用いた供試体の硫黄の濃度分布に着目すると、供試体の表面付近で塩素の濃度分布の小さい領域では硫黄の濃度も小さく、この内部に硫黄の濃度の高い領域が生じていたことがわかる。既往の研究<sup>3)</sup>では、普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体で、中性化による塩素と硫黄の移動・濃縮現象が確認されているが、混和材を用いた供試体でも同様の現象が生じたと考えられる。また、混和材の置換率の高い供試体ほど、付録-3で示したように中性化深さが大きくなり、塩素と硫黄の濃度が高くなった領域が供試体表面から深い位置で発生していた。

### 2.2.4 塩化物イオン浸透深さと中性化深さの位置関係

EPMA 法による面分析の結果を用いて塩化物イオン浸透深さと中性化深さの位置関係を検討するため、EPMA 法から得られた塩化物イオン濃度分布とフェノールフタレイン溶液噴霧法から得られた中性化深さの関係を図-7に示す。同図には、塩化物イオン浸透深さと中性化深さの距離も併記した。なお、EPMA 法によって測定した塩素の濃度分布が供試体を微粉砕して電位差滴定法によって測定した塩化物イオンの濃度分布と概ね一致することが報告されているため<sup>4)</sup>、ここではEPMA 法によって測定した塩素の濃度分布が全塩化物イオンの濃度分布と等しいと仮定した。

塩化物イオン浸透深さと中性化深さまでの距離を比較すると、普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体では約20mmであったが、混和材を用いた供試体では約8~16mmで小さくなった。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の高い供試体ほど、塩化物イオン浸透深さと中性化深さの距離は小さくなり、混和材の置換率を混合セメントC種の上限值以上とした供試体では最大で約12mmであった。普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体では、中性化深さが小さく、塩化物イオンが主として濃度拡散によって供試体内部に浸透したと考えられるが、混和材の置換率の高い供試体では、中性化深さが大きく、塩化物イオンが主として中性化の進行とともに供試体内部に移動・濃縮したためと考えられる。

また、塩化物イオン浸透深さは、高炉スラグ微粉末を用いたN50B85で最も大きくなった。高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメントC種の上限值よりも高めた場合には、中性化による塩化物イオンの移動・濃縮によって普通ポルトランドセメントのみよりも深部に塩化物イオンが浸透する場所があると考えられる。このため、塩化物イオンと中性化が同時に進行する環境条件下では、中性化によって移動・濃縮する塩化物イオンに起因する鋼材腐食の発生を防止するため、中性化残りを大きく設定する等の対策を講じる必要があると考えられる。

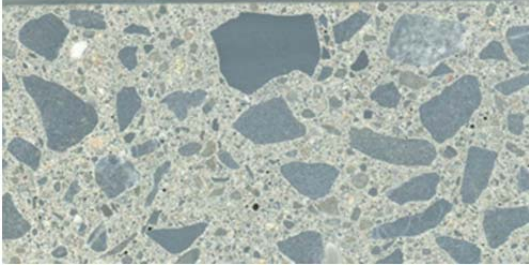
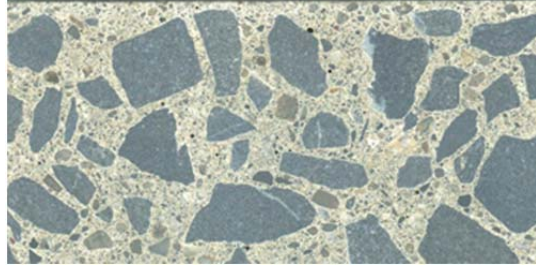
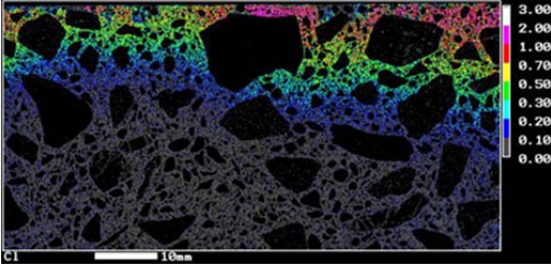
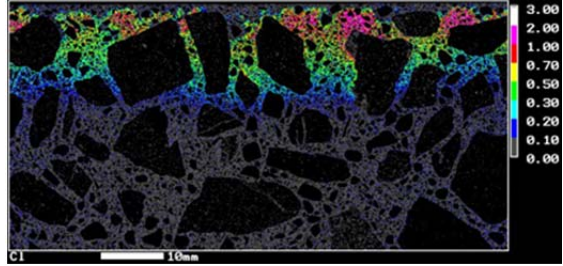
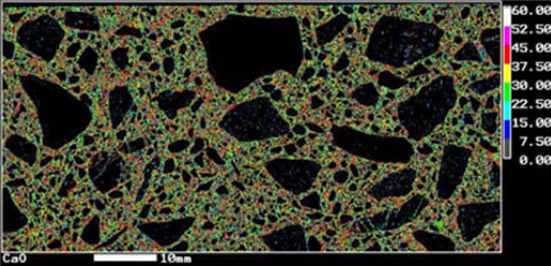
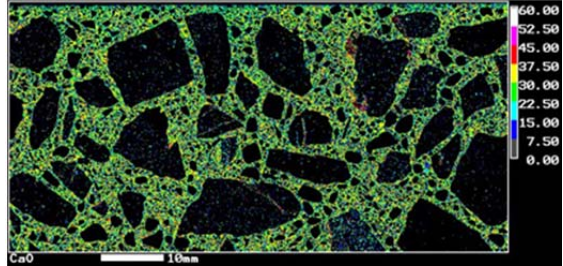
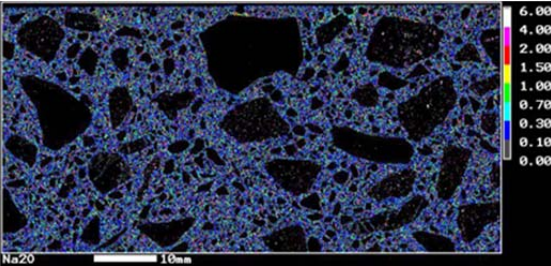
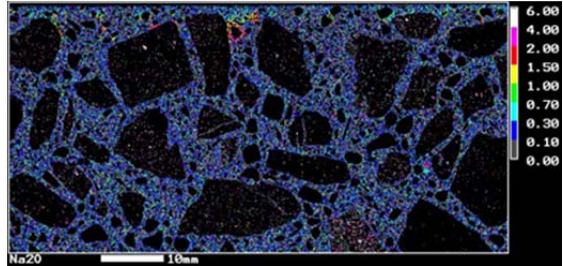
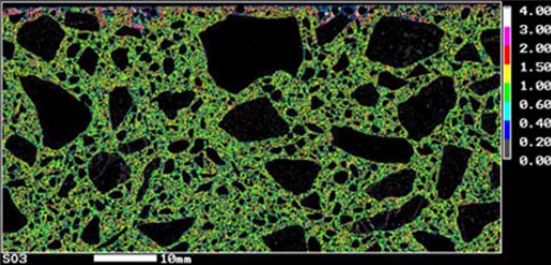
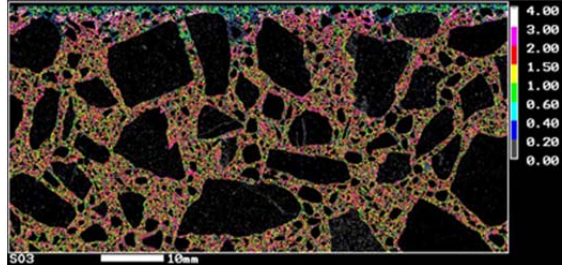
	N50	N50B50
試料写真		
Cl		
CaO		
Na <sub>2</sub> O		
SO <sub>3</sub>		

図-6 EPMA 法によるマッピング画像 (1/4)

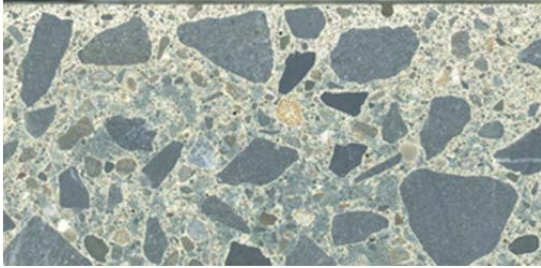
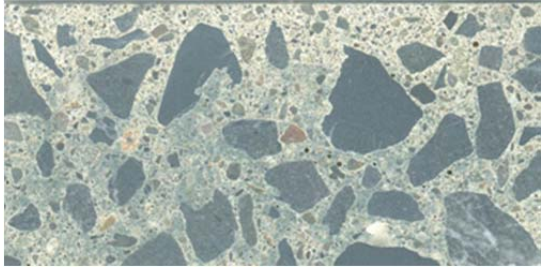
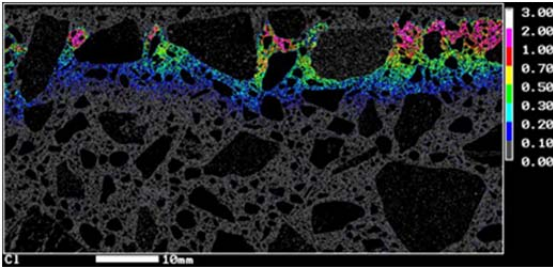
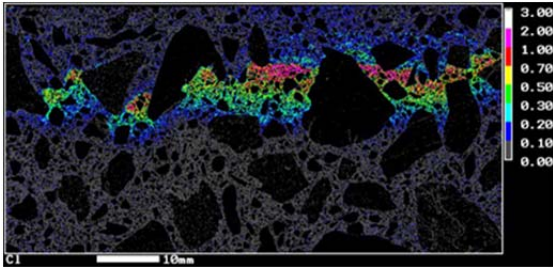
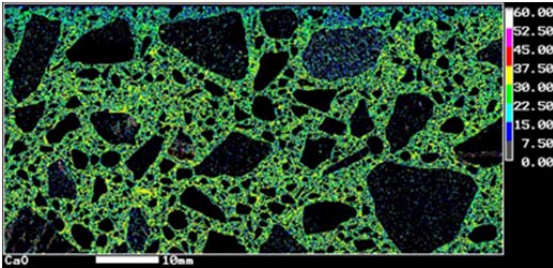
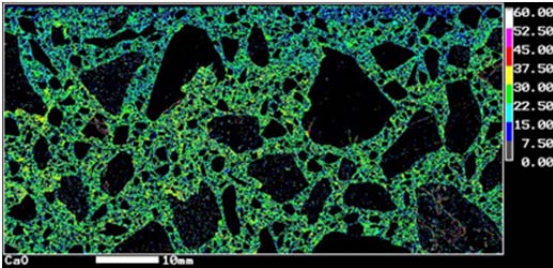
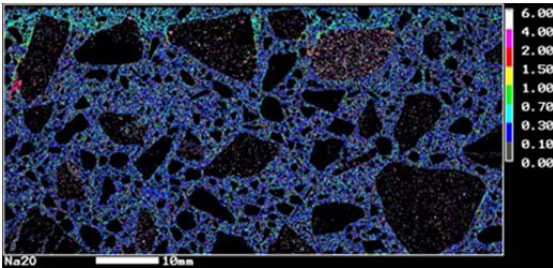
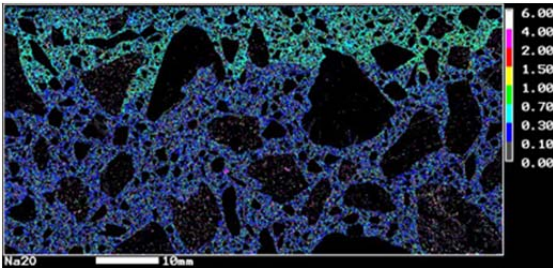
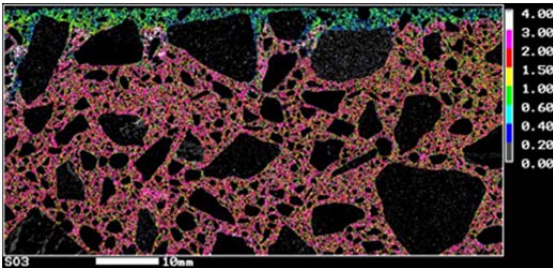
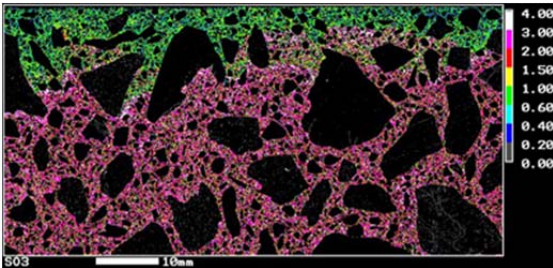
	N50B70	N50B85
試料写真		
Cl		
CaO		
Na <sub>2</sub> O		
SO <sub>3</sub>		

図-6 EPMA 法によるマッピング画像 (2/4)

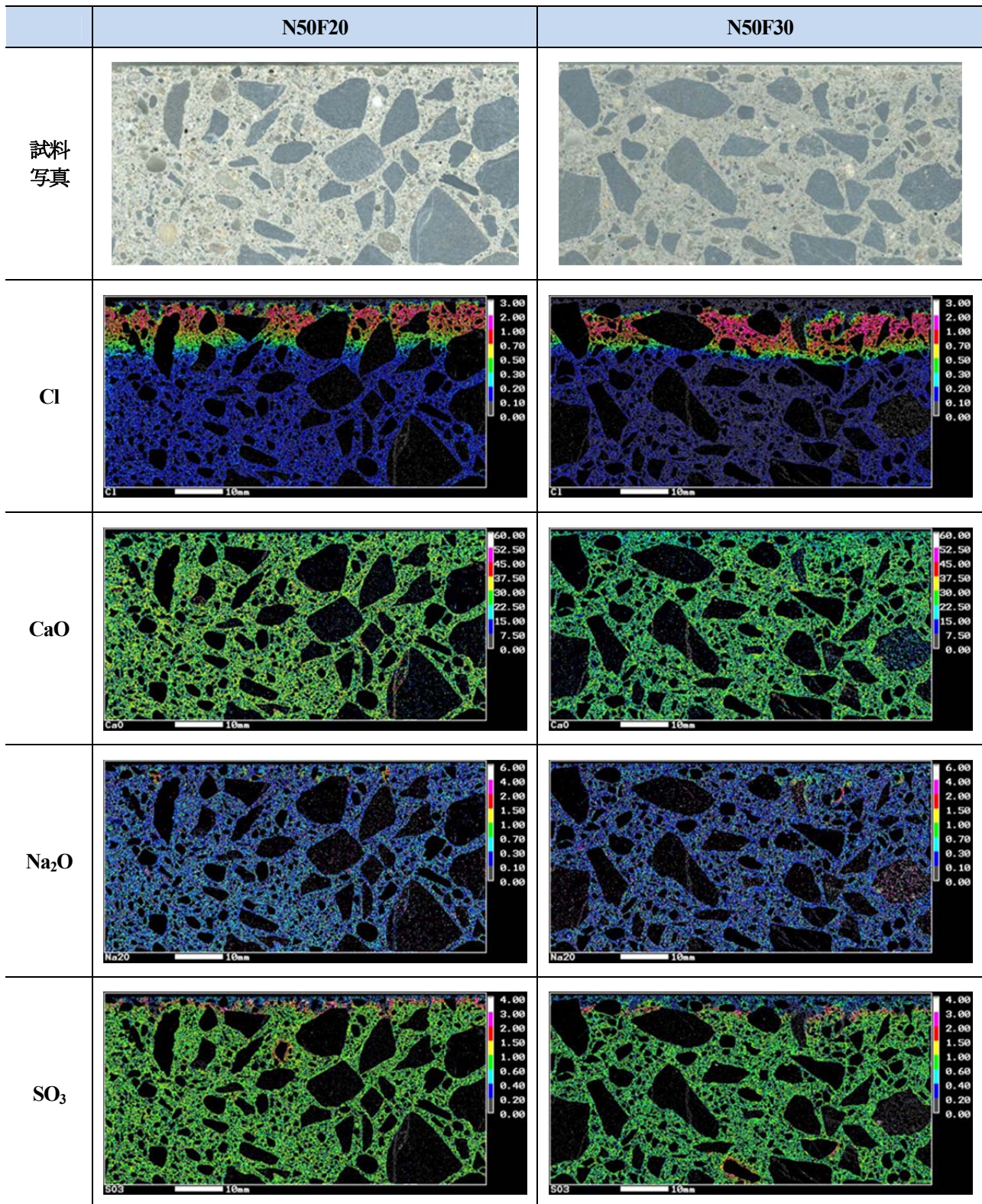


図-6 EPMA 法によるマッピング画像 (3/4)

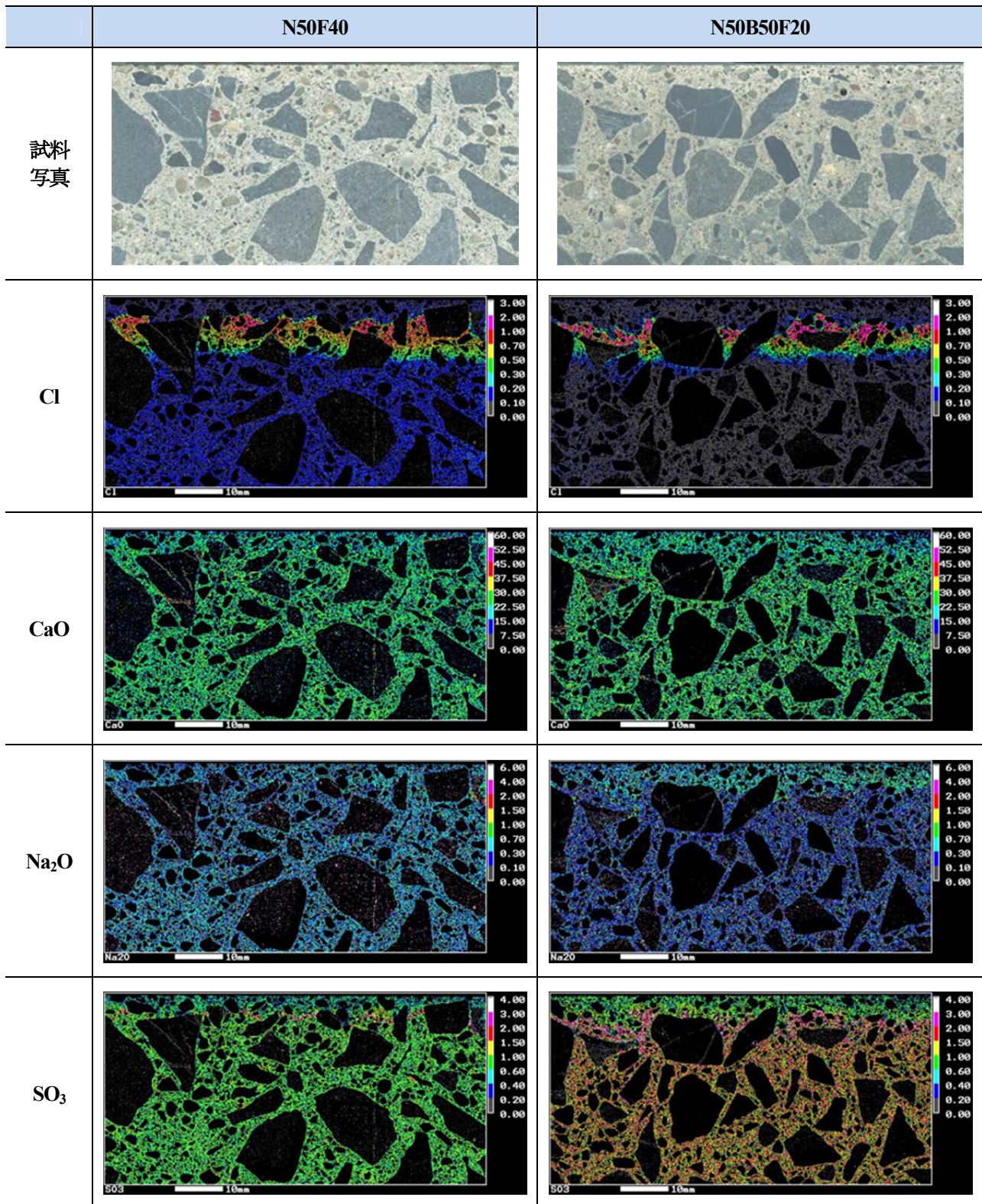
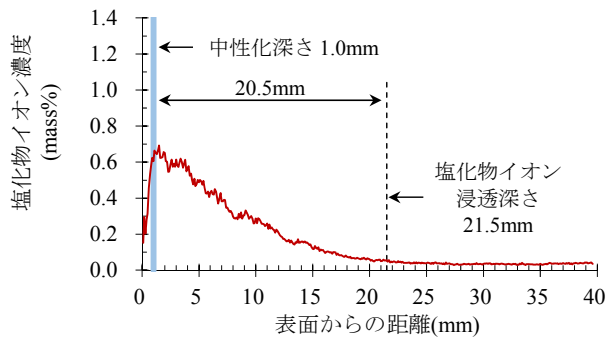
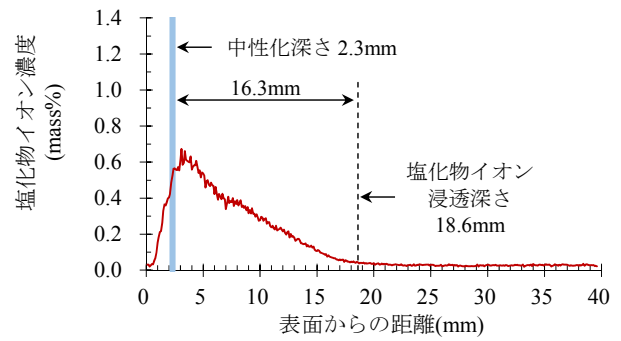


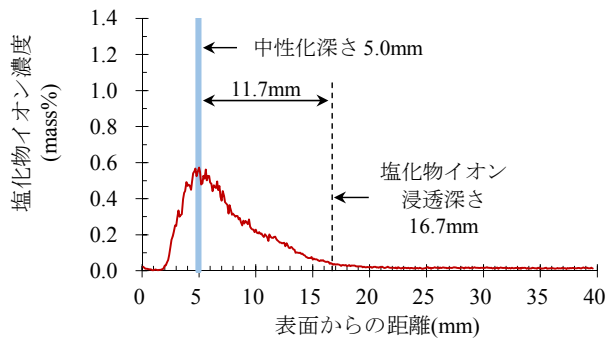
図-6 EPMA 法によるマッピング画像 (4/4)



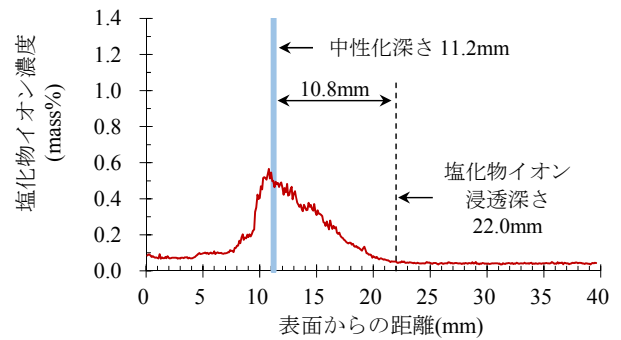
(A)N50



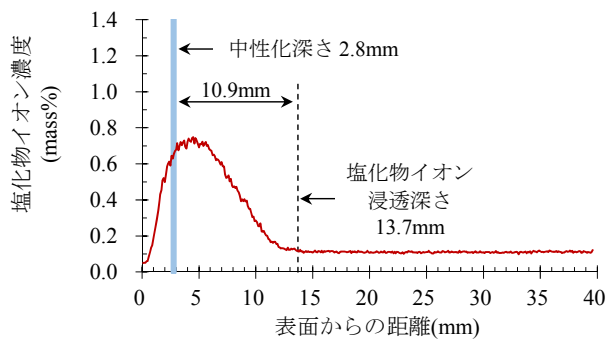
(B)N50B50



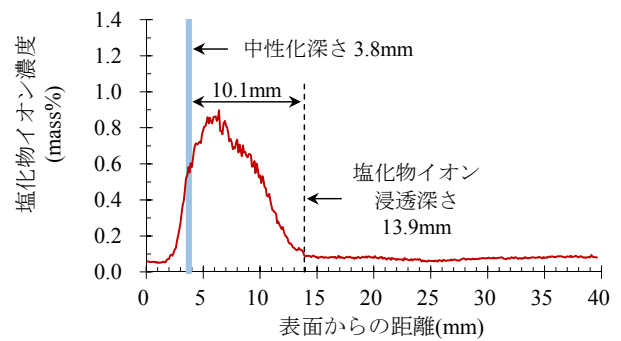
(C)N50B70



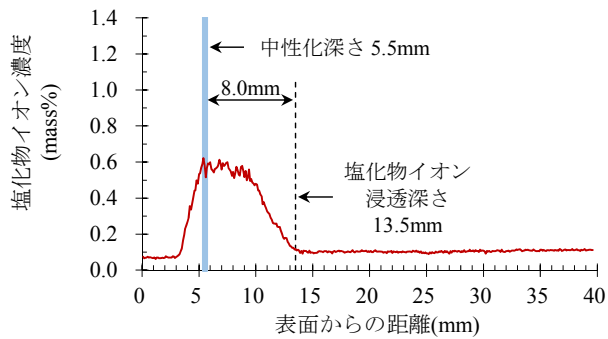
(D)N50B85



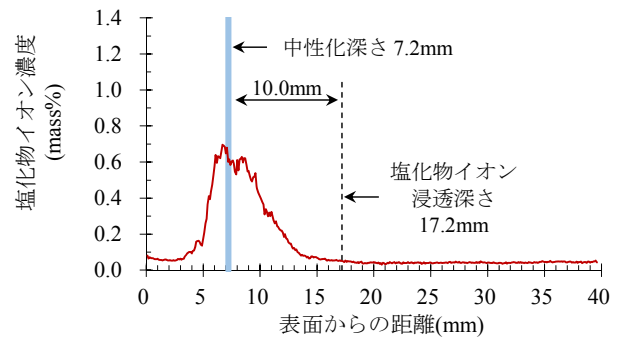
(E)N50F20



(F)N50F30



(G)N50F40



(H)N50B50F20

図-7 塩化物イオン濃度分布と中性化深さの関係

### 3. 電気泳動試験と浸せき試験の適用性に関する検討

#### 3.1 実験方法

電気泳動試験 (JSCE-G 571) と浸せき試験 (JSCE-G 572) の混和材を用いたコンクリートへの適用性を検討するため、暴露供試体と同時に製作した供試体を用いて、電気泳動試験と浸せき試験を行った。

電気泳動試験では、6種類の供試体 (N50, N50B50, N50B85, N50F20, N50F40, N50B50F20) を対象として、JSCE-G 571 に準拠して試験を行い、塩化物イオンの実効拡散係数を求めた。供試体には、材齢 28 日まで水中養生を行った円柱供試体 ( $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ) の中央部分から切り出した円盤型供試体 ( $\phi 100 \times 50\text{mm}$ ) を用いた。

浸せき試験では、全 26 種類の供試体を対象として、JSCE-G 572 に準拠して試験を行った。供試体には、水中養生後の円柱供試体 ( $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ) の両端部 25mm を切断して切り出した円柱供試体 ( $\phi 100 \times 150\text{mm}$ ) を用いた。また、塩化ナトリウム水溶液の濃度を 10%、浸せき期間を 6 ヶ月間、12 ヶ月間、20 ヶ月間とした。浸せき終了後に、供試体を厚さ 10mm で切断して微粉碎し、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た。その後、式(1)を用いて、塩化物イオンの見掛けの拡散係数とコンクリート表面の塩化物イオン濃度を求めた。

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

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

#### 3.2 実験結果

電気泳動試験から得られた実効拡散係数、浸せき試験から得られた見掛けの拡散係数とコンクリート表面の塩化物イオン濃度を図-8 に示す。

データ数が限られるが、電気泳動試験から得られた実効拡散係数は、普通ポルトランドセメントのみを用いた N50 と比較して、混和材を用いた供試体で小さくなった。浸せき試験から得られた見掛けの拡散係数でも同様の傾向を確認できた。また、ばらつきは認められるが、混和材を用いた供試体では、見掛けの拡散係数が浸せき期間を長くするほど減少した。材齢の経過とともに塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上したためと考えられる。

コンクリート表面の塩化物イオン濃度については、普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体との比較では、混和材の置換率を混合セメント B 種相当以下とした供試体では大きくなるものが多くあったが、混和材の置換率を混合セメント C 種の上限值以上とした供試体では小さくなるものが多くあった。

次に、浸せき 6 ヶ月後、20 ヶ月後の供試体の塩化物イオン濃度分布を図-9, 10 に示す。ここではポルト



ランドセメントのみを用いた供試体と混和材を用いた供試体の塩化物イオン濃度分布を W/B 及び混和材の種類ごとに比較して示す。いずれの W/B の供試体においても、混和材を用いた供試体の塩化物イオン浸透量は普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体よりも減少したことがわかる。また、この混和材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は、浸せき期間を長くするほど明確に現れた。

前述したように、混和材の置換率の高い暴露供試体では、中性化によって塩化物イオンが供試体内部へ移動・濃縮し、供試体内部の塩化物イオン濃度が普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体よりも大きくなることがあったが、浸せき試験では塩水中に供試体を常時浸せきするため、このような現象は生じなかった。混和材の置換率が高く実環境で中性化の影響を受ける場合には、浸せき試験で示されるような混和材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得られない可能性がある点に留意する必要がある。

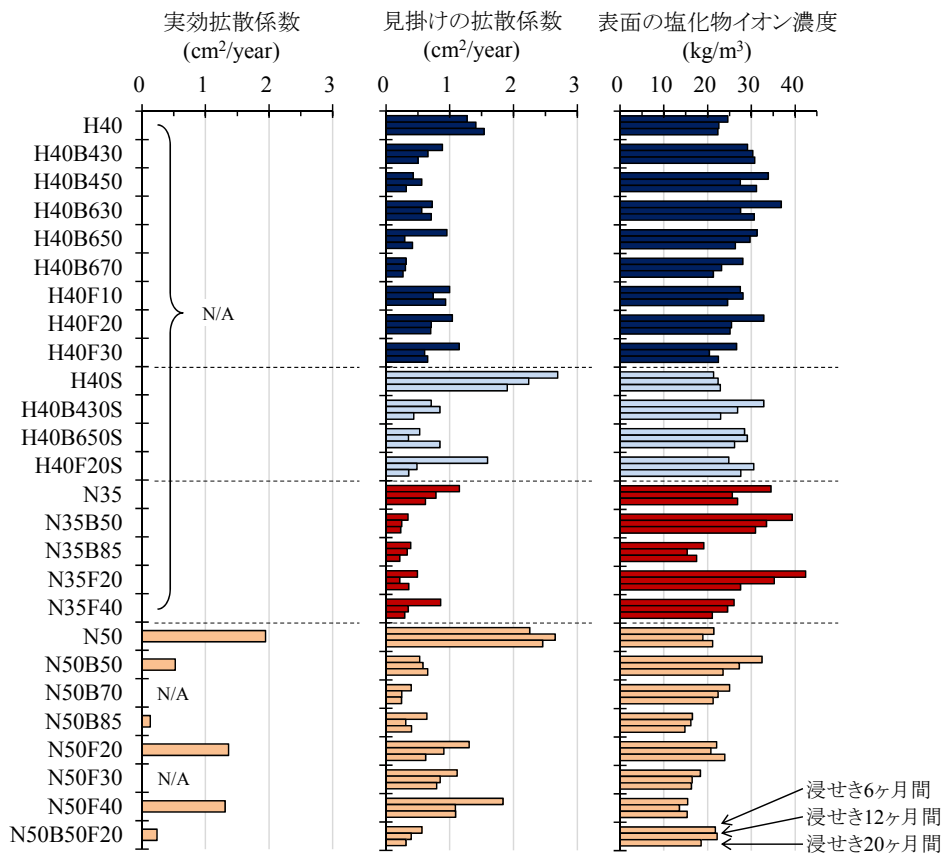


図-8 実効拡散係数，見掛けの拡散係数，表面の塩化物イオン濃度

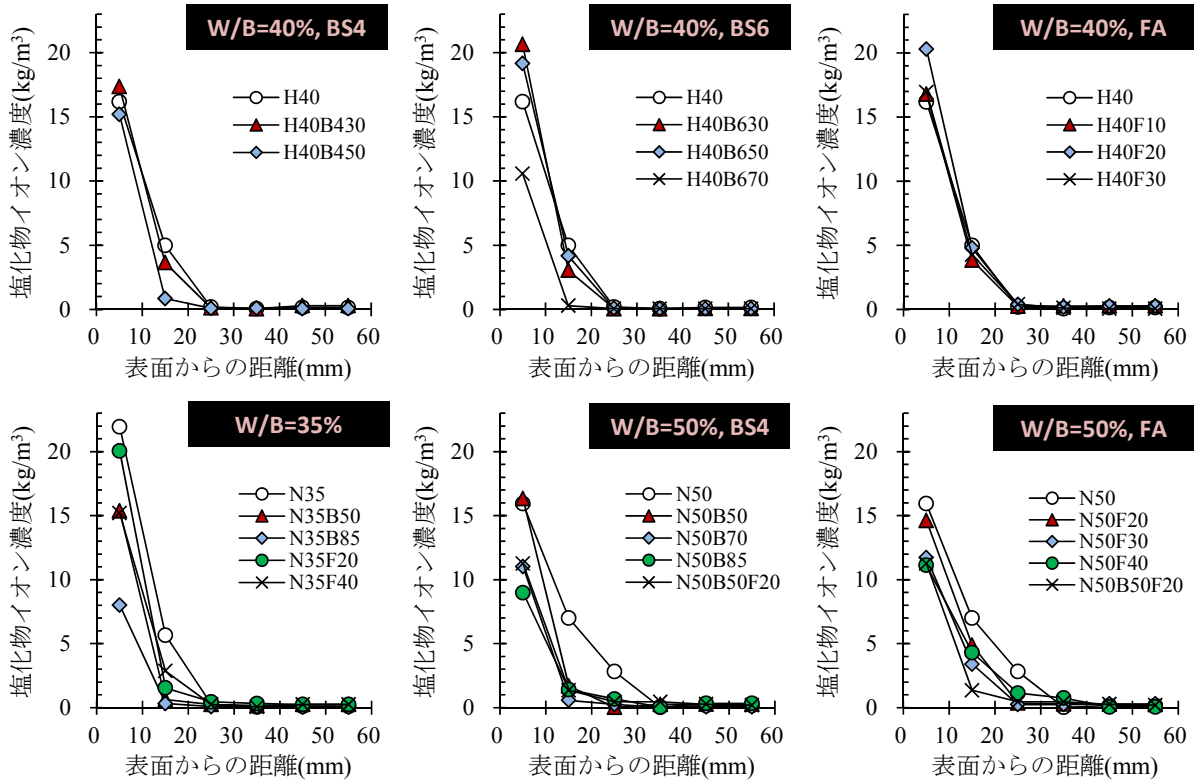


図-9 浸せき試験後の供試体の塩化物イオン濃度 (浸せき6ヶ月後)

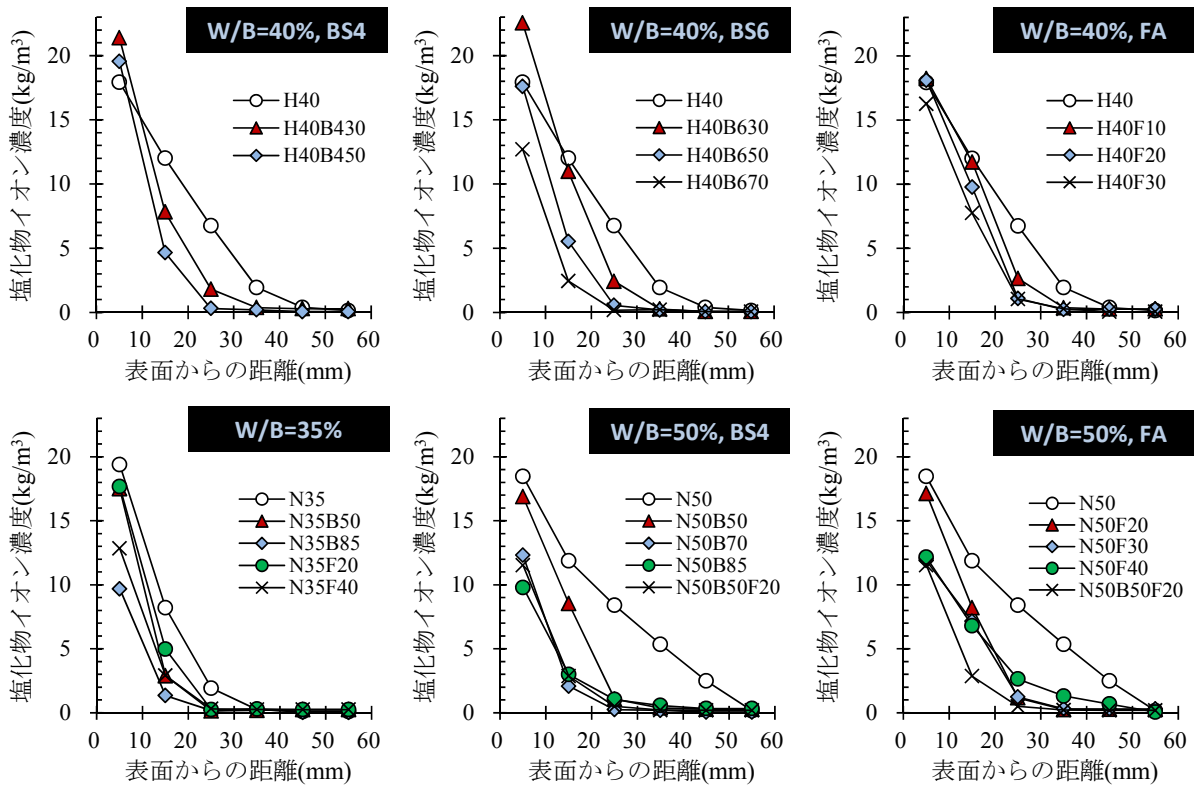


図-10 浸せき試験後の供試体の塩化物イオン濃度 (浸せき20ヶ月後)

## 4. まとめ

この付録では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリート供試体を製作して暴露試験を行い、実環境下における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検討した。また、同時に製作した供試体を用いて電気泳動試験と浸せき試験を行い、これらの室内試験の適用性について検証した。この実験の範囲内で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塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも向上する傾向にあった。ただし、屋外で塩化物イオン浸透と中性化が同時に進行する環境では、混和材の置換率の高いコンクリートでは中性化深さが大きくなり、これに伴って塩化物イオンが供試体内部に移動・濃縮することがあった。
2. 混和材の置換率を混合セメントC種の上限值以上としたコンクリートにおいて、EPMA法から得られた塩化物イオン濃度分布とフェノールフタレイン溶液噴霧法から得られた中性化深さを比較すると、中性化の進行によってコンクリート内部に移動・濃縮した塩化物イオンは中性化深さの位置から最大で約12mm内部に浸透していた。このため、中性化によって移動・濃縮した塩化物イオンに起因する鋼材腐食を防止するためには、中性化残りを塩害環境にない場合よりも大きく設定して評価を行うことが望ましいと考えられた。
3. 電気泳動試験及び浸せき試験の結果によると、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、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して向上することがわかった。ただし、これらの室内試験では屋外で生じる中性化の影響を考慮することが困難であるため、実環境下で混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を評価する際には、中性化の影響を適切に考慮することが必要であると考えられた。

## 参考文献

- 1) Nakamura, E., Watanabe, H.,: Laboratory Accelerated and Outdoor Durability Testing of Concrete with Supplementary Cementitious Materials, *Journal of Asian Concrete Federation*, Vol.1, No.1, pp.28-36, 2015
- 2) 気象庁ホームページ：気象統計情報, <http://www.data.kishou.go.jp/menu/report.html>
- 3) 小林一輔, 白木亮司, 河合研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物, 硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.2, pp.69-82, 1990
- 4) 土木学会：硬化コンクリートのミクロの世界を拓く新しい土木学会規準の制定—EPMA法による面分析方法と微量成分溶出試験方法について—, コンクリート技術シリーズ 69, 2006

## 付録ー5 凍結融解に対する抵抗性

### 1. はじめに

この付録では、混和材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性について検討した結果を示す。

混和材を用いたコンクリートでは、混和材の置換率を混合セメント B 種相当とした場合には、化学混和剤を用いて適切な空気量を確保することによって、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同等の凍結融解に対する抵抗性を確保できると考えられる。しかし、高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメント C 種の上限值以上としたコンクリートでは化学混和剤を用いて空気量の目標値を 4.5%としても凍結融解に対する抵抗性が低くなる場合があること、フライアッシュを用いたコンクリートでは AE 剤等の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等、混和材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性についての懸念もある。

この付録では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリート供試体を製作して、JIS A 1148 に準拠した凍結融解試験 (A 法) を行い、混和材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性について検討した結果を示す。

### 2. 混和材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性

#### 2.1 実験方法

高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリート供試体を製作し、JIS A 1148 に準拠した凍結融解試験 (A 法) を行った。

コンクリートの配合と基礎物性を表-1 に示す。水結合材比 (W/B) を 50%として普通ポルトランドセメントのみを用いた配合 (N50) を基準として、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率、ポルトランドセメントの種類、W/B の 3 種類の実験パラメータを設定した。高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率を実験パラメータとした配合では、各混和材の置換率を混合セメント B 種相当 (N50B50, N50F20) あるいは C 種の上限值 (N50B70, N50F30) とした供試体を製作した。ポルトランドセメントの種類あるいは W/B を実験パラメータとした配合では、混和材の置換率を混合セメント C 種の上限值として、早強ポルトランドセメントを用いた供試体 (H50B70, H50F30) と W/B を 35%とした供試体 (N35B70, N35F30) を製作した。いずれの配合でも化学混和剤を用い、練上がり直後のフレッシュコンクリートの空気量の目標値を 4.5%とした。なお、コンクリートの凍結融解に対する抵抗性に各実験パラメータが与える影響を明らかにすることを目的としたため、全配合で単位水量 ( $165\text{kg/m}^3$ ) と単位粗骨材量 ( $968\text{kg/m}^3$ ) を同一とした。

供試体は角柱供試体 ( $100\times 100\times 400\text{mm}$ ) とし、各配合で 3 体ずつ製作した。コンクリートの打込み直後から翌日まで封緘養生、その後、材齢 28 日まで水温  $20^\circ\text{C}$  の養生槽で水中養生を行い、凍結融解試験に用い

た。なお、コンクリートの練混ぜ、打込み、封緘養生については、室温 20℃の実験室内で行った。

凍結融解試験では、凍結融解サイクル 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300 回後の計 9 時点で、相対動弾性係数と質量の測定を行った。

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		W	B = OPC + HPC + BS4 + FA				S				G
			OPC	HPC	BS4	FA					
N50	50	165	330 (100%)	—	—	—	827	968	11.0	4.8	38.9
N50B50			165 (50%)	—	165 (50%)	—	815		12.0	4.5	32.3
N50F20			264 (80%)	—	—	66 (20%)	807		12.0	5.0	31.4
N50B70			99 (30%)	—	231 (70%)	—	810		9.5	3.8	28.6
N50F30			231 (70%)	—	—	99 (30%)	797		12.0	4.4	25.2
H50B70			—	99 (30%)	231 (70%)	—	809		11.5	4.9	30.9
H50F30			—	231 (70%)	—	99 (30%)	796		12.0	4.8	30.0
N35B70			35	165	141 (30%)	—	330 (70%)		—	688	14.5
N35F30	330 (70%)	—			—	141 (30%)	670	14.5	5.4	46.2	

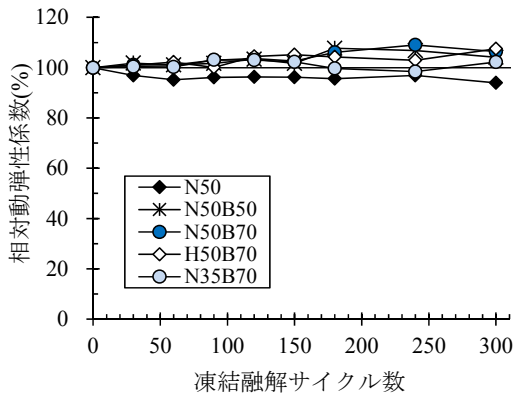
※W: 上水道水(茨城県つくば市), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,200cm<sup>2</sup>/g), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,630cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,460cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.19%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,280cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の( )内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

※化学混和剤: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの, W/B=35%で使用), AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体, W/B=50%で使用), 空気連行剤(フライアッシュを用いた配合以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, フライアッシュを用いた配合で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランブ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整

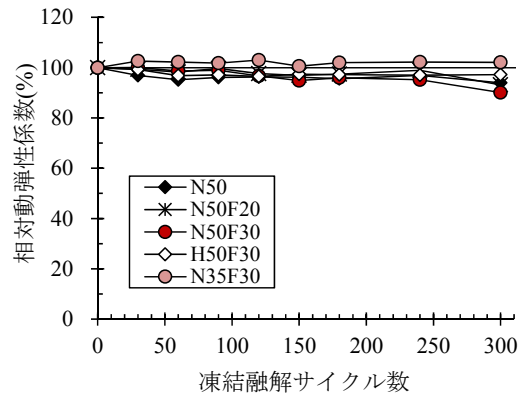
※スランブ: JIS A 1101 に準拠して測定, 空気量: JIS A 1128 に準拠して測定, 圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)の材齢 28 日の圧縮強度を JIS A 1108 に準拠して測定

## 2.2 実験結果

凍結融解試験で得られた相対動弾性係数と質量変化率を図-1, 2, 凍結融解 300 サイクル後の供試体の状況を写真-1 に示す。高炉スラグ微粉末とフライアッシュのどちらを用いるかによって、凍結融解試験の結果は異なる傾向を示した。高炉スラグ微粉末を用いた供試体では、普通ポルトランドセメントのみを用いた N50 と比較して、相対動弾性係数が大きく、質量の減少率が小さくなった。N50B50, N50B70, H50B70 では、N50 と比較して、材齢 28 日の圧縮強度が小さくなったが(表-1), 凍結融解に対する抵抗性は高くなった。この原因は高炉スラグ微粉末の使用によって硬化体の細孔構造が緻密になったためではないかと推察される。高炉スラグ微粉末の置換率を混合セメント C 種の上限值としたコンクリートでは、化学混和剤を用いて空気量の目標値を 4.5%とした場合、ポルトランドセメントの種類や W/B の違いにかかわらず、凍結融解に対する抵抗性が向上する結果となった。

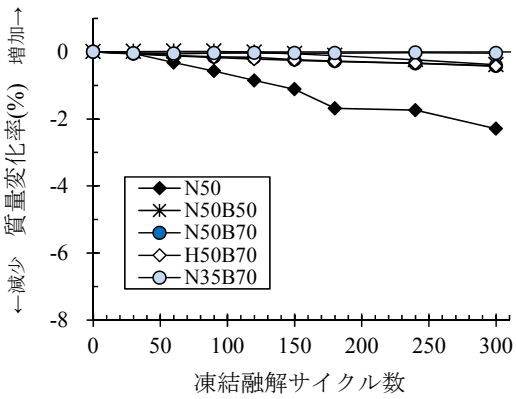


(A)高炉スラグ微粉末を用いた供試体

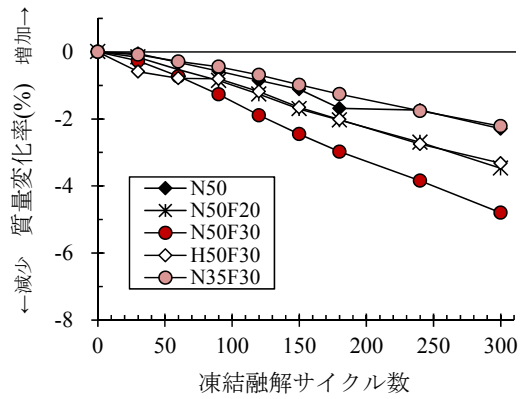


(B)フライアッシュを用いた供試体

図-1 相対動弾性係数



(A)高炉スラグ微粉末を用いた供試体



(B)フライアッシュを用いた供試体

図-2 質量変化率

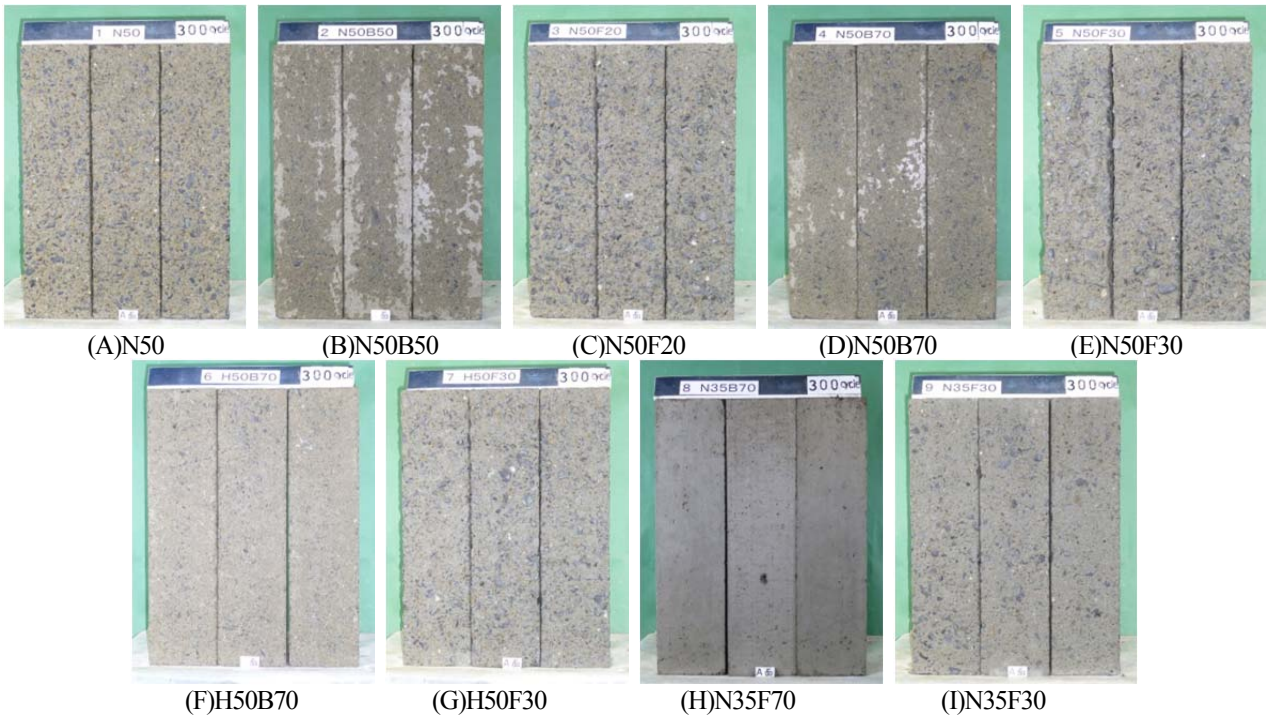


写真-1 凍結融解300サイクル後の供試体の状況

※コンクリート打込み面側の供試体表面の状況

一方、フライアッシュを用いた供試体では、N50と比較して、N50F30で相対動弾性係数が小さく、N35F30以外で質量の減少率が大きくなった。N50F30で相対動弾性係数が小さくなったことの一つの原因としては、N50と比較して材齢28日の圧縮強度が大幅に小さかったことが挙げられる(表-1)。また、N35F30以外で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N50よりも激しくなったためと考えられる(写真-1)。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90%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。

コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、凍結融解試験における相対動弾性係数が90%以上の場合には、凍害による内部損傷に対する抵抗性の照査を行わなくてもよいとしている。ここでの実験の結果によると、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率を混合セメントC種の上限值としたコンクリートにおいても、化学混和剤を用いて空気量の目標値を4.5%とした場合には、ポルトランドセメントの種類やW/Bにかかわらず、凍結融解300サイクル後の相対動弾性係数が90%以上となった。このため、混和材の置換率を混合セメントC種の上限值としたコンクリートにおいても、化学混和剤を用いて空気量を適切に確保することによって、凍結融解に対して十分な抵抗性を確保できると考えられる。

### 3. まとめ

この付録では、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリート供試体を製作して、JISA 1148に準拠した凍結融解試験(A法)を行い、混和材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性について検討した。この実験の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

1. 混和材の置換率を混合セメントC種の上限值としたコンクリートにおいても、化学混和剤を用いて空気量の目標値を4.5%とした場合には、凍結融解300サイクル後の相対動弾性係数が90%以上となり、凍結融解に対して十分な抵抗性を有していた。
2. 高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメントC種の上限值としたコンクリートでは、ポルトランドセメントの種類やW/Bの違いにかかわらず、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、凍結融解に対する抵抗性が向上した。
3. フライアッシュの置換率をフライアッシュセメントC種の上限值としたコンクリートでは、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、W/Bが同一の場合、凍結融解300サイクル後の質量の減少率が大きくなったが、相対動弾性係数は90%以上であった。

### 参考文献

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

## 付録一6 湿潤養生期間が強度発現と耐久性に与える影響

### 1. はじめに

この付録では、湿潤養生期間が混和材を用いたコンクリートの強度発現と耐久性に与える影響について検討した結果を示す。

コンクリートを施工する際には、打込み後からコンクリートを適切な温度と湿潤状態に保ち、硬化コンクリートに有害な作用の影響が生じることを防ぎ、所要の品質を付与する必要がある。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のみを用いたコンクリートと比較して、初期材齢の強度発現が遅く、初期材齢の養生条件の違いが強度発現や耐久性に与える影響が大きくなる可能性が高い。しかし、混和材の置換率を混合セメントC種相当以上としたコンクリートの強度発現や耐久性に初期材齢の養生条件が与える影響は必ずしも明確ではない。また、適切な湿潤養生期間を設定する方法が確立されていないため、混和材を多量に用いたコンクリートを実用化する際の施工上の課題となっている。

この付録では、湿潤養生期間の異なる供試体を製作して強度試験と耐久性試験を行い、打込み後の湿潤養生期間の違いが混和材を用いたコンクリートの強度発現と耐久性に与える影響について検討した結果を示す。

### 2. 日米欧の設計基準等における湿潤養生期間に関する規定

日米欧の設計規準等<sup>1)~6)</sup>における湿潤養生期間に関する規定の概要を表一1に示す。打込み後の湿潤養生によって確保するコンクリートの品質や標準的な湿潤養生日数は設計規準等によって異なるものが規定されており、これらの特徴を整理すると次の3点となる。

1. 湿潤養生で確保するコンクリートの品質としては様々なものが規定されていたが、いずれの設計規準等においても湿潤養生日数を検討する際に考慮すべき品質として強度と耐久性を取り上げていた。
2. 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のみを用いたコンクリートと比較して湿潤養生期間を長くし、低温時には湿潤養生期間を更に長くする必要があることを規定しているものがあつた。
3. 混和材の置換率を混合セメントC種相当以上としたコンクリート、複数の混和材を同時に用いたコンクリート、早強ポルトランドセメントを混和材で置換したコンクリート等については、標準的な湿潤養生日数を規定しているものが存在しなかつた。

既存の設計規準等で標準的な湿潤養生日数が示されていない結合材を用いる場合には、実験によって初期材齢の養生条件の違いがコンクリートの強度と耐久性に与える影響を明確にし、適切な湿潤養生日数を設定することが不可欠と考えられる。



表一 日米欧の設計規準等における湿潤養生期間に関する規定の概要

設計規準等	湿潤養生期間に関する規定の概要																																		
土木学会 2012年制定 コンクリート標準示方書 〔施工編〕 <sup>1)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>養生はコンクリートが所要の品質（強度、耐久性、ひび割れ抵抗性、水密性、鋼材を保護する性能、美観等）を確保できるように行うこととし、湿潤養生期間の標準を規定。</li> </ul> <table border="1" data-bbox="488 342 1385 461"> <thead> <tr> <th>日平均気温</th> <th>普通ポルトランドセメント</th> <th>混合セメントB種</th> <th>早強ポルトランドセメント</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15℃以上</td> <td>5日</td> <td>7日</td> <td>3日</td> </tr> <tr> <td>10℃以上</td> <td>7日</td> <td>9日</td> <td>4日</td> </tr> <tr> <td>5℃以上</td> <td>9日</td> <td>12日</td> <td>5日</td> </tr> </tbody> </table>						日平均気温	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種	早強ポルトランドセメント	15℃以上	5日	7日	3日	10℃以上	7日	9日	4日	5℃以上	9日	12日	5日													
日平均気温	普通ポルトランドセメント	混合セメントB種	早強ポルトランドセメント																																
15℃以上	5日	7日	3日																																
10℃以上	7日	9日	4日																																
5℃以上	9日	12日	5日																																
土木学会 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの 施工指針 <sup>2)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高炉スラグ微粉末の置換率と粉末度に応じた湿潤養生日数を次の定義によって規定。 「普通ポルトランドセメントのみを使用した水セメント比が45～55%のコンクリートにおいて、材齢28日に対する圧縮強度比が50%程度に達する材齢を基準として、対応する同じ水結合材比で普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末で置換した場合に、同等の圧縮強度比となるのに必要な湿潤養生日数の目安を、気温とコンクリートの養生温度が同じ場合について求めた結果」</li> <li>養生期間中のコンクリートの表面温度を10℃以上に保つことを原則とすること、早強ポルトランドセメントの使用によって湿潤養生期間を短縮できるが別途検討が必要であること、材齢7日まで湿潤養生を行った場合に材齢91日の圧縮強度が28日間の湿潤養生を行った場合と同程度となったこと等を記載。</li> </ul> <table border="1" data-bbox="464 741 1409 913"> <thead> <tr> <th rowspan="2">日平均気温</th> <th colspan="2">置換率 30～40%</th> <th colspan="2">置換率 50%</th> <th>置換率 55～70%</th> </tr> <tr> <th>高炉スラグ微粉末 4000</th> <th>高炉スラグ微粉末 4000</th> <th>高炉スラグ微粉末 6000</th> <th>高炉スラグ微粉末 8000</th> <th>高炉スラグ微粉末 4000</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>17℃</td> <td>6日以上</td> <td>7日以上</td> <td>7日以上</td> <td>6日以上</td> <td>8日以上</td> </tr> <tr> <td>10℃</td> <td>9日以上</td> <td>10日以上</td> <td>9日以上</td> <td>8日以上</td> <td>11日以上</td> </tr> <tr> <td>5℃</td> <td>12日以上</td> <td>13日以上</td> <td>12日以上</td> <td>10日以上</td> <td>14日以上</td> </tr> </tbody> </table>						日平均気温	置換率 30～40%		置換率 50%		置換率 55～70%	高炉スラグ微粉末 4000	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	高炉スラグ微粉末 4000	17℃	6日以上	7日以上	7日以上	6日以上	8日以上	10℃	9日以上	10日以上	9日以上	8日以上	11日以上	5℃	12日以上	13日以上	12日以上	10日以上	14日以上
日平均気温	置換率 30～40%		置換率 50%		置換率 55～70%																														
	高炉スラグ微粉末 4000	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	高炉スラグ微粉末 4000																														
17℃	6日以上	7日以上	7日以上	6日以上	8日以上																														
10℃	9日以上	10日以上	9日以上	8日以上	11日以上																														
5℃	12日以上	13日以上	12日以上	10日以上	14日以上																														
土木学会 フライアッシュを用いたコンクリートの 施工指針（案） <sup>3)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>普通ポルトランドセメントを用いてフライアッシュII種を20～30%程度置換したコンクリートでは、同一養生条件下の普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して日平均気温が約15℃で2日以上、10℃以下で5日以上の養生日数を増加させることを標準とすること、養生期間中のコンクリートの表面温度を10℃以上に保つことを原則とすること等を記載。</li> </ul>																																		
日本建築学会 建築工事標準仕様書・ 同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009 <sup>4)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>湿潤養生期間を計画供用期間の級に応じて規定し、厚さ18cm以上の部材で早強、普通及び中庸熱ポルトランドセメントを用いる場合はコンクリートの圧縮強度が10N/mm<sup>2</sup>以上（短期、標準）、15N/mm<sup>2</sup>以上（長期、超長期）に達したことを確認すれば湿潤養生を打ち切ることができること、脱型時の圧縮強度が上記の値以上であれば強度（材齢28、91日）と耐久性（中性化）を確保できること等を記載。</li> </ul> <table border="1" data-bbox="440 1223 1437 1346"> <thead> <tr> <th>計画供用期間の級</th> <th>早強ポルトランドセメント</th> <th>普通ポルトランドセメント</th> <th>中庸熱及び低熱ポルトランドセメント、 高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>短期、標準</td> <td>3日以上</td> <td>5日以上</td> <td>7日以上</td> </tr> <tr> <td>長期、超長期</td> <td>5日以上</td> <td>7日以上</td> <td>10日以上</td> </tr> </tbody> </table>						計画供用期間の級	早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	中庸熱及び低熱ポルトランドセメント、 高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種	短期、標準	3日以上	5日以上	7日以上	長期、超長期	5日以上	7日以上	10日以上																	
計画供用期間の級	早強ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント	中庸熱及び低熱ポルトランドセメント、 高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種																																
短期、標準	3日以上	5日以上	7日以上																																
長期、超長期	5日以上	7日以上	10日以上																																
ACI 308R-01 Guide to Curing Concrete <sup>5)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>セメントの種類によって養生期間の最低日数の推奨値を規定し、強度の確保が重要な構造物では材齢28日の圧縮強度の70%が得られるまで養生を継続することが望ましく、一般的なセメントでは7日間の養生でこれを確保できる場合が多いこと、規定された養生期間を遵守することで強度に加えて耐久性も確保できることが多いが、耐久性の確保が重要となる構造物では試験等を行って養生期間を設定することが望ましいこと等を記載。</li> </ul> <table border="1" data-bbox="432 1509 1449 1648"> <thead> <tr> <th>セメントの種類</th> <th>普通ポルトランドセメント (Type I)</th> <th>耐硫酸塩ポルトランドセメント (Type II)</th> <th>早強ポルトランドセメント (Type III)</th> <th>低熱ポルトランドセメント (Type IV)</th> <th>混合セメント</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>養生期間の最低日数</td> <td>7日</td> <td>10日</td> <td>3日</td> <td>14日</td> <td>Variable</td> </tr> </tbody> </table>						セメントの種類	普通ポルトランドセメント (Type I)	耐硫酸塩ポルトランドセメント (Type II)	早強ポルトランドセメント (Type III)	低熱ポルトランドセメント (Type IV)	混合セメント	養生期間の最低日数	7日	10日	3日	14日	Variable																	
セメントの種類	普通ポルトランドセメント (Type I)	耐硫酸塩ポルトランドセメント (Type II)	早強ポルトランドセメント (Type III)	低熱ポルトランドセメント (Type IV)	混合セメント																														
養生期間の最低日数	7日	10日	3日	14日	Variable																														
EN 13670:2009 Execution of concrete structures <sup>6)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>養生は、プラスチック収縮の最小化、表層の強度の確保、表層の耐久性の確保、苛酷な気象条件や凍結、振動、衝撃、損傷から保護するために実施することを記載。</li> <li>養生期間はコンクリートの表層の品質の発現の関数となること、表層の品質の発現は圧縮強度とMaturityの関係に基づくこと、Maturityの計算は表層から最大で10mmの位置のコンクリート温度か雰囲気の日平均温度を使用すること、リバウンドハンマーを使用しての評価も可であること等を記載。</li> <li>材齢28日の圧縮強度の35、50、70%のうち、いずれの強度が確保できるまで養生を行うかによって「養生クラス」を設定し、「コンクリートの強度発現の速さ」と「気温」に応じて「最低湿潤養生日数」を規定。「養生クラス」は、環境条件や材料、かぶりに応じて設定することを記載。</li> </ul>																																		

### 3. 実験方法

#### 3.1 コンクリートの配合と基礎物性

打込み後の湿潤養生期間の違いが混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に与える影響を検討するため、湿潤養生期間の異なる供試体を製作して強度試験と耐久性試験を行った。

コンクリートの配合と基礎物性を表-2 に示す。水結合材比 (W/B) を 50%とした普通ポルトランドセメントのみを用いた配合 (N50) を基準として、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率、ポルトランドセメントの種類、W/B の3種類の実験パラメータを設定した。高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率を実験パラメータとした配合では、各混和材の置換率を混合セメント B 種相当 (N50B50, N50F20) あるいは混合セメント C 種の上限值 (N50B70, N50F30) とした供試体を製作した。ポルトランドセメントの種類あるいは W/B を実験パラメータとした配合では、混和材の置換率を混合セメント C 種の上限值として、早強ポルトランドセメントを用いた供試体 (H50B70, H50F30) と W/B を 35%とした供試体 (N35B70, N35F30) を製作した。なお、湿潤養生期間の違いが混和材を用いたコンクリートの強度特性と耐久性に与える影響を検討することを目的としたため、全配合で単位水量 (165kg/m<sup>3</sup>) と単位粗骨材量 (968kg/m<sup>3</sup>) を同一とした。

表-2 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
		W	B = OPC + HPC + BS4 + FA				S				G		
			OPC	HPC	BS4	FA							
N50	50	165	330 (100%)	—	—	—	827	968	11.0	4.8	38.9		
N50B50			165 (50%)	—	165 (50%)	—	815		12.0	4.5	32.3		
N50F20			264 (80%)	—	—	66 (20%)	807		12.0	5.0	31.4		
N50B70			99 (30%)	—	231 (70%)	—	810		9.5	3.8	28.6		
N50F30			231 (70%)	—	—	99 (30%)	797		12.0	4.4	25.2		
H50B70			—	99 (30%)	231 (70%)	—	809		11.5	4.9	30.9		
H50F30			—	231 (70%)	—	99 (30%)	796		12.0	4.8	30.0		
N35B70			35	165	141 (30%)	—	330 (70%)		—	688	14.5	4.9	42.9
N35F30					330 (70%)	—	—		141 (30%)	670	14.5	5.4	46.2

※W: 上水道水(茨城県つくば市), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,200cm<sup>2</sup>/g), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,630cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,460cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.19%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,280cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の( )内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

※化学混和剤: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの, W/B=35%で使用), AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体, W/B=50%で使用), 空気連行剤(フライアッシュを用いた配合以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, フライアッシュを用いた配合で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランブ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整

※スランブ: JIS A 1101 に準拠して測定, 空気量: JIS A 1128 に準拠して測定, 圧縮強度: 標準養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)の材齢 28 日の圧縮強度を JIS A 1108 に準拠して測定

### 3.2 供試体の養生条件

供試体の養生条件を表-3 に示す。普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体 (N50) と混和材の置換率を混合セメント B 種相当とした供試体 (N50B50, N50F20) については、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>で湿潤養生期間の標準が示されているため、これを参考として、N50 では標準養生 (W) と材齢 5 日まで湿潤養生 (5d) を行った供試体、N50B50 と N50F20 では標準養生 (W) と材齢 7 日まで湿潤養生 (7d) を行った供試体を製作した。

混和材の置換率を混合セメント C 種の上限值とした供試体 (N50B70, N50F30, H50B70, H50F30, N35B70, N35F30) については、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では湿潤養生期間の標準が示されていないため、標準養生 (W)、材齢 3 日に脱型して気中養生 (3d)、材齢 7, 10, 14 日まで養生マットを用いて湿潤養生 (7d, 10d, 14d) を行った供試体を製作し、湿潤養生期間の違いが強度と耐久性に与える影響を検討することとした。

表-3 供試体の養生条件

養生条件	記号	養生方法	対象配合									
			N50	N50 B50	N50 F20	N50 B70	N50 F30	H50 B70	H50 F30	N35 B70	N35 F30	
標準養生	W	材齢 28 日まで 20℃ の養生槽で水中養生	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
気中養生	3d	脱型後から室内で気中養生				○	○	○	○	○	○	○
湿潤養生	5d	材齢 5 日まで湿潤養生した後、室内で気中養生	○			○	○	○	○	○	○	○
	7d	材齢 7 日まで湿潤養生した後、室内で気中養生		○	○	○	○	○	○	○	○	○
	10d	材齢 10 日まで湿潤養生した後、室内で気中養生				○	○	○	○	○	○	○
	14d	材齢 14 日まで湿潤養生した後、室内で気中養生				○	○	○	○	○	○	○

※いずれの養生条件の供試体も、打込み直後から翌日まで封緘養生した後、十分に湿らせた養生マットで被覆して湿潤養生し、材齢 3 日に脱型して所定の養生条件で養生を行い、その後は試験時まで温度 20℃湿度 60%の実験室内に静置

### 3.3 強度試験と耐久性試験の概要

強度試験と耐久性試験の概要を表-4 に示す。

強度試験では、円柱供試体 (φ100×200mm) を製作し、脱型時、湿潤養生終了時、材齢 7, 28, 91, 365 日で、JIS A 1108 に準拠して圧縮強度を測定した。材齢 365 日の試験のみ、材齢 91 日以降に土木研究所 (茨城県つくば市南原) の屋外に暴露した円柱供試体を用いて圧縮強度を測定した。

耐久性試験では、中性化に対する抵抗性と塩化物イオン浸透に対する抵抗性に着目した。いずれも室内試験と暴露試験を行って検討した。供試体の暴露状況を写真-1、暴露試験の環境条件を表-5、暴露供試体の解体調査方法を図-1 に示す。

中性化に対する抵抗性については、JIS A 1153 に準拠した促進中性化試験と暴露試験によって検討を行った。促進中性化試験には、100×100×400mm の角柱供試体を用いた。材齢 49 日以降で供試体の片側の側面 (100×400mm) 以外をエポキシ樹脂塗料でシールして、材齢 56 日から促進中性化試験を開始し、促進 1, 4, 8, 13, 26 週後に中性化深さを測定した。一方、暴露試験には、100×100×200mm の角柱供試体を用いた。片側の側面 (100×200mm) 以外を塗装材料でシールし、材齢 91 日以降で土木研究所 (茨城県つくば市南原) の雨掛かりのある屋外と実験室内 (温度 20℃, 湿度 60%) に供試体を暴露した。2012 年 2 月から 2014 年 10

月までの20ヶ月間を暴露期間とした。付録-3に示した暴露試験と同様に、暴露後の供試体を端部から40mmの位置で割裂して中性化深さを測定した。JIS A 1152を参考に、供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、試験面から赤紫色を呈した部分までの距離を等間隔に9点で測定して得られた平均値を中性化深さとした。

塩化物イオン浸透に対する抵抗性については、電気泳動試験（非定常法）と暴露試験によって検討を行った。電気泳動試験（非定常法）の実施状況を図-2に示す。電気泳動試験（非定常法）では、円柱供試体（φ100×100mm）の型枠底面を試験対象面として、この面が脱型後に湿潤状態あるいは乾燥状態となるように養生を行った。その後、型枠底面から厚さ50mmで円盤型供試体を切り出し、真空飽水処理後に印加電圧30Vで通電して塩化物イオンを浸透させた。通電後の供試体を割裂して硝酸銀溶液（0.1mol/L）を割裂面に噴霧し、塩化物イオンの浸透深さを測定した。通電時間については、塩化物イオンが供試体を貫通しないように、6～18時間とし、塩化物イオン浸透深さを通電時間で除して「塩化物イオン浸透速度」を求め、これを比較した。一方、暴露試験には、中性化に対する抵抗性の検討と同様に、100×100×200mmの角柱供試体を用いた。片側の側面（100×200mm）以外を塗装材料でシールし、材齢91日以降で新潟県上越市名立区の雨掛かりのある屋外に供試体を暴露した。2012年2月から2015年6月までの30ヶ月間を暴露期間とした。付録-3、4に示した暴露試験と同様に、中性化深さと塩化物イオン濃度の測定を行った。中性化深さについては、供試体を端部から40mmの位置で割裂し、JIS A 1152を参考に、供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して、供試体表面から赤紫色を呈した部分までの距離を等間隔に9点で測定した。塩化物イオン濃度については、供試体の中央部を厚さ5mmで切断して微粉碎し、JIS A 1154の電位差滴定法に準拠して測定した。

表-4 強度試験と耐久性試験の概要

試験項目	実施内容
圧縮強度	<ul style="list-style-type: none"> <li>脱型時、湿潤養生終了時、材齢7, 28, 91, 365日で、JIS A 1108に準拠して測定</li> <li>材齢365日の試験のみ、材齢91日以降で土木研究所の屋外に暴露した供試体を用いて測定</li> </ul>
中性化に対する抵抗性	<ul style="list-style-type: none"> <li>JIS A 1153に準拠して促進中性化試験を実施</li> <li>角柱供試体（100×100×400mm）の片側側面（100×400mm）のみを試験面に設定</li> <li>材齢56日から試験を開始し、促進1, 4, 8, 13, 26週後に中性化深さを測定</li> <li>土木研究所の屋外と室内で暴露試験を実施</li> <li>角柱供試体（100×100×200mm）の片側側面（100×400mm）のみを試験面に設定</li> <li>材齢91日以降から試験を開始し、暴露20ヶ月後に中性化深さを測定</li> </ul>
塩化物イオン浸透に対する抵抗性	<ul style="list-style-type: none"> <li>電気泳動試験（非定常法）によって通電後の塩化物イオン浸透深さを測定</li> <li>暴露前の材齢91日と土木研究所の屋外に暴露して30ヶ月後に実施</li> <li>新潟県上越市名立区の暴露試験場で暴露試験を実施</li> <li>材齢91日以降から試験を開始し、暴露30ヶ月後に中性化深さと塩化物イオン濃度を測定</li> </ul>



(A)つくば



(B)新潟

写真-1 供試体の屋外の暴露状況

表-5 暴露試験の環境条件

供試体	つくば		新潟
	屋外	室内	屋外
平均気温(°C)	15.5 <sup>※1</sup>	20.2 <sup>※3</sup>	13.1 <sup>※4</sup>
平均湿度(%)	72.1 <sup>※1</sup>	61.9 <sup>※3</sup>	75.4 <sup>※4</sup>
積算降水量(mm)	2,451 <sup>※1</sup>	—	7,381 <sup>※4</sup>
二酸化炭素濃度(%)	0.0396 <sup>※2</sup>	0.0439 <sup>※3</sup>	0.03977 <sup>※2</sup>

※1 最寄りの気象観測地点（つくば（館野））での20ヶ月間の測定値<sup>7)</sup>を引用

※2 気象庁による2014年の世界の平均値<sup>8)</sup>を引用

※3 データロガーによる測定値を記載

※4 最寄りの気象観測地点（高田）での30ヶ月間の測定値<sup>7)</sup>を引用

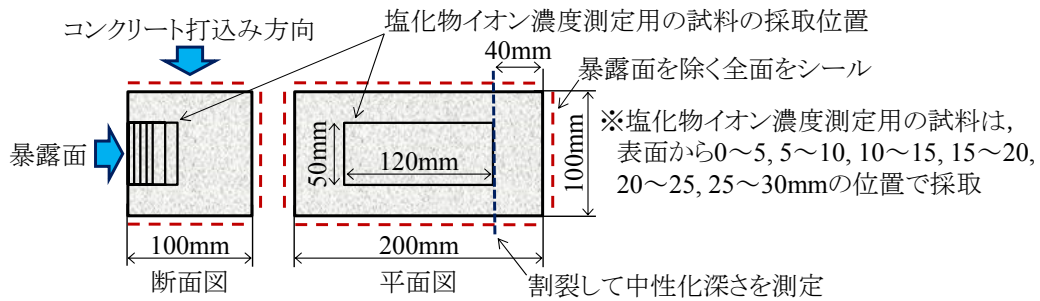


図-1 暴露供試体の解体調査方法

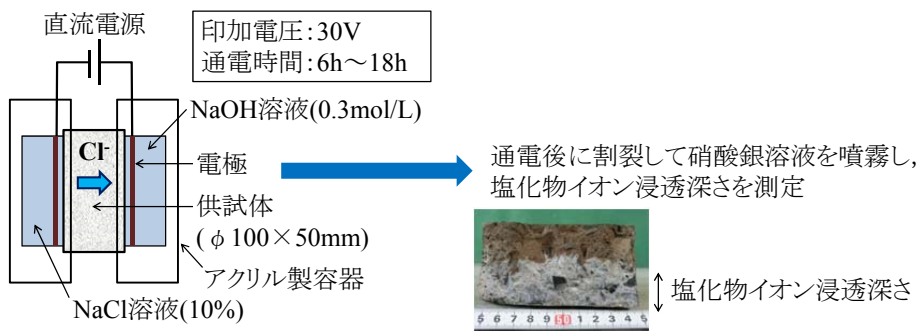


図-2 電気泳動試験（非正常法）の概要

## 4. 実験結果

### 4.1 圧縮強度

#### 4.1.1 標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度

圧縮強度の推移を配合及び養生条件ごとに図-3 に示す。同図には、標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度 ( $f'_{c,28}$ ) を水平線で示した。いずれの配合及び養生条件の供試体においても、材齢の経過とともに圧縮強度が増加した。

標準養生を行った供試体の圧縮強度を比較すると、W/B を 50%とした場合、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率を混合セメント C 種の上限值とした供試体 (N50B70, N50F30) では普通ポルトランドセメントのみを用いた N50 と比較して圧縮強度が小さくなった。しかし、水結合材比を小さくして W/B を 35%とした供試体 (N35B70, N35F30) では、N50 と同等以上の圧縮強度が得られた。混和材の置換率の高いコンクリートにおいても W/B を調整することによって、所定の圧縮強度を確保することができると考えられる。

早強ポルトランドセメントを用いた供試体 (H50B70, H50F30) では、混和材の置換率が同一の普通ポルトランドセメントを用いた供試体 (N50B70, N50F30) よりも圧縮強度が大きくなった。混和材を用いたコンクリートにおいて初期材齢の強度発現の遅延を避けるための一つの対策として、早強ポルトランドセメントを用いることも効果的であることがわかる。ただし、高炉スラグ微粉末の置換率を 70%とした供試体ではフライアッシュの置換率を 30%とした供試体よりもポルトランドセメントの使用量が少なく、早強ポルトランドセメントの使用による強度発現の改善効果が相対的に小さくなった点には注意が必要である。

#### 4.1.2 初期材齢の養生条件の違いが圧縮強度に与える影響

前述したように、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、湿潤養生日数の標準として、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合に 5 日、混和材の置換率を混合セメント B 種相当とした場合に 7 日としている。図-3 によると、N50, N50B50, N50F20 では、上記の標準的な湿潤養生日数で養生を行った供試体の圧縮強度は、材齢 28 日の時点では標準養生を行った供試体の圧縮強度よりも若干小さくなったが、材齢 91 日の時点では標準養生を行った供試体の材齢 28 日の圧縮強度と同等となった。

混和材の置換率を混合セメント C 種の上限值とした供試体において、材齢 28, 91 日の圧縮強度に着目すると、いずれの配合においても湿潤養生期間を長くするほど圧縮強度が大きくなっており、初期材齢の養生条件とその後の強度発現が密接な関係にあったことが読み取れる。ただし、湿潤養生期間を長くすることで得られる圧縮強度の増加量は徐々に遞減する傾向にあった。すなわち、若干のばらつきは認められるが、湿潤養生期間を 3 日間から 7 日間に延長した場合と 10 日間から 14 日間に延長した場合とでは、前者よりも後者で圧縮強度の増加量が小さくなる傾向にあった。

また、材齢 365 日の圧縮強度においても、初期材齢の湿潤養生期間の違いによって圧縮強度には差が生じていた。ここでは材齢 91 日以降に雨掛かりのある屋外に供試体を暴露したが、材齢 365 日の長期材齢においても、初期材齢の湿潤養生期間の影響が残存していたことがわかる。ただし、材齢 365 日の圧縮強度の差は、

材齢 28 日及び材齢 91 日の圧縮強度の差よりも小さいため、長期的には湿潤養生期間の違いによる養生条件の差は小さくなる傾向にあると考えられる。

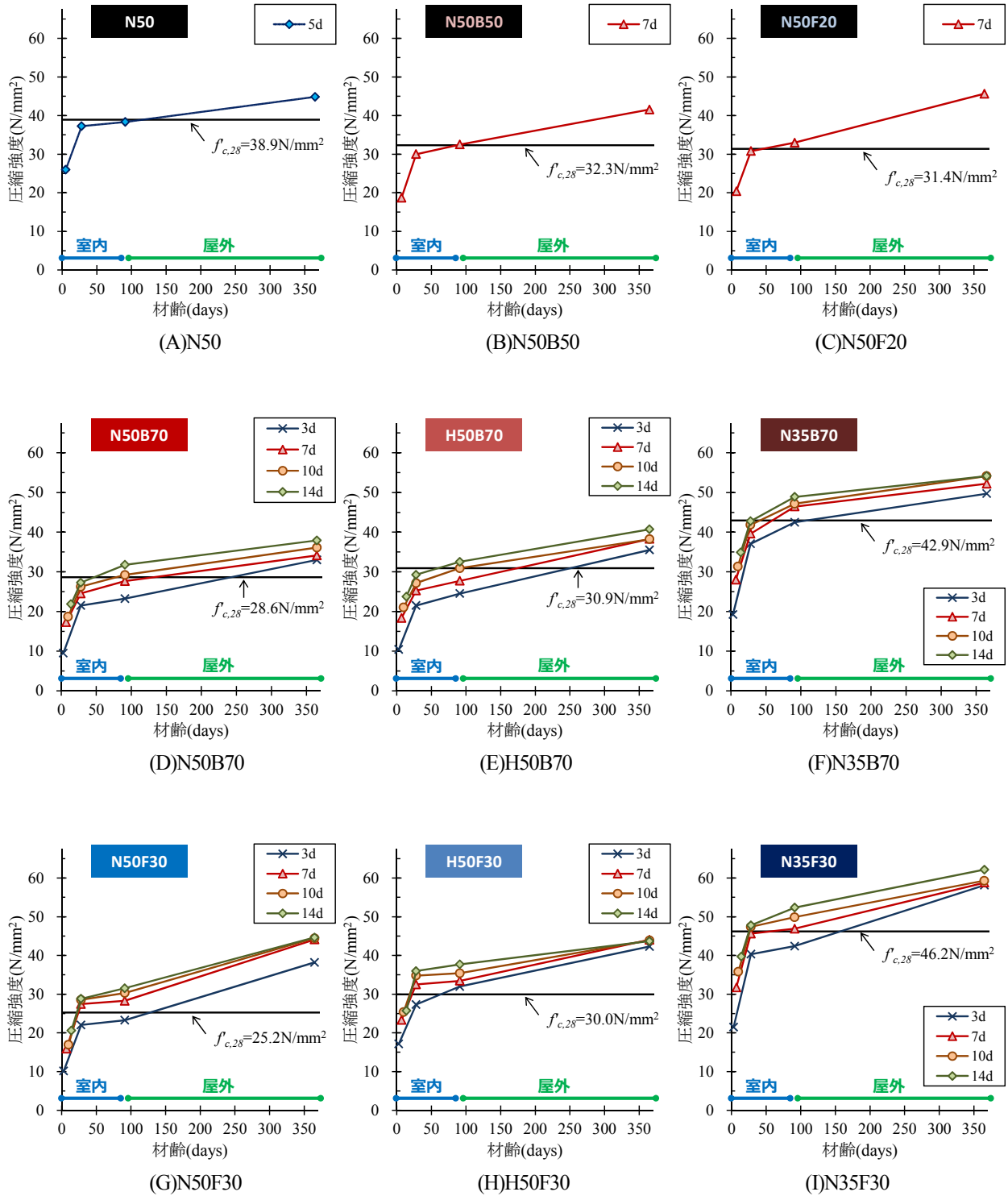


図-3 圧縮強度

## 4.2 中性化に対する抵抗性

### 4.2.1 促進中性化試験の結果

促進中性化試験から得られた中性化速度係数を図-4 に示す。中性化速度係数は、普通ポルトランドセメントのみを用いた N50 よりも混和材を用いた供試体で大きくなった。

高炉スラグ微粉末の置換率を70%とした供試体とフライアッシュの置換率を30%とした供試体はいずれも混和材の置換率を混合セメントC種の上限值とした供試体であるが、セメントの使用量が大幅に異なるため、これらの供試体では湿潤養生日数の長短が中性化速度係数に与える影響が異なった。高炉スラグ微粉末の置換率を70%とした供試体（N50B70, H50B70, N35B70）では、フライアッシュの置換率を30%とした供試体（N50F30, H50F30, N35F30）よりもポルトランドセメントの使用量が少なく、湿潤養生日数の長短による中性化速度係数の差が大きくなった。混和材の置換率が高くポルトランドセメントの使用量の少ないコンクリートでは、初期材齢の養生条件が促進中性化試験の結果に多大な影響を与え、湿潤養生日数の長短による中性化速度係数の差が明確に現れると考えられる。

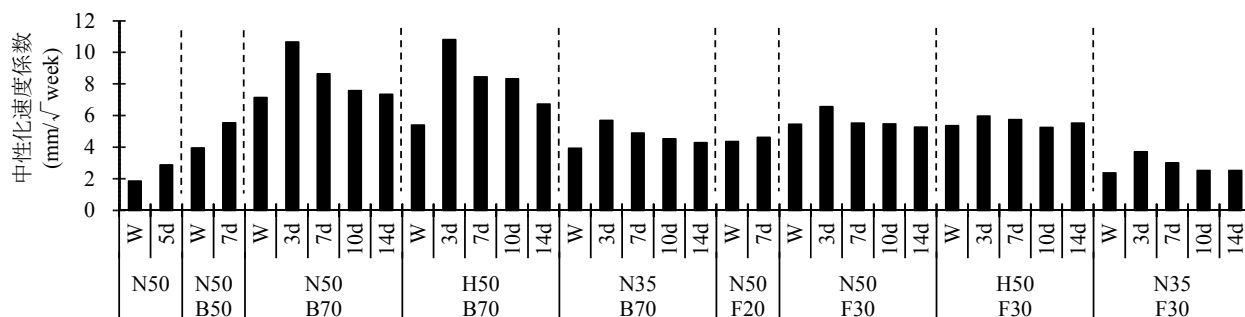


図-4 促進中性化試験から得られた中性化速度係数

### 4.2.2 暴露試験の結果

暴露試験から得られた中性化深さと円柱供試体の圧縮強度を図-5 に示す。中性化深さの結果は屋外と室内に暴露した供試体での測定結果、圧縮強度の結果は養生終了時、材齢28日、材齢1年での測定結果である。

暴露環境や配合の違いにかかわらず、中性化深さは脱型後の湿潤養生期間の短い供試体で大きくなった。暴露環境の違いに着目すると、屋外に暴露した供試体に比べて、室内に暴露した供試体で中性化深さが大きく、養生方法の違いによる中性化深さの差も大きくなった。室内に暴露した供試体には降雨等による水分供給が無い場合、初期材齢の湿潤養生期間の違いによる影響が長期的に継続したためと考えられる。こうした傾向は特に高炉スラグ微粉末の置換率を70%とした供試体で明確に現れており、ポルトランドセメントの分量の少ない供試体では初期材齢の湿潤養生期間の影響を受けやすくなると考えられる。また、若干のばらつきが認められるが、中性化深さは、特に養生方法3dの値が突出して大きく、他の養生方法の中性化深さの差



は比較的小さくなった。中性化に対する抵抗性は脱型後の湿潤養生期間を延長することで改善する傾向にあったが、この効果がある時点から逡減したことを示唆していると考えられる。

湿潤養生期間の影響は材齢1年の圧縮強度にも現れており、脱型後の湿潤養生期間の短い供試体ほど圧縮強度が小さくなった。ただし、図-5 の中性化深さと圧縮強度の分布を比較すると、材齢が経過すると、湿潤養生期間の違いによる差は圧縮強度よりも中性化深さで大きくなった。中性化に対する抵抗性は供試体表層のコンクリートの品質の影響を強く受けるが、圧縮強度は円柱供試体の断面全体の平均的な品質を示すため、養生の良否による影響が中性化深さで明確に現れたためと考えられる。

また、高炉スラグ微粉末の置換率を70%あるいはフライアッシュの置換率を30%とした供試体に着目すると、早強ポルトランドセメントの使用が初期材齢の強度発現の改善に寄与したことがわかるが、材齢1年の圧縮強度の増加や暴露試験用供試体の中性化の抑制に与えた影響は必ずしも大きくなかった。一方で、W/Bを35%まで低減した場合には、W/Bを50%とした供試体と比較して圧縮強度が大きく、中性化深さが小さくなった。長期的な圧縮強度の発現と中性化の抑制のためには早強ポルトランドセメントの使用よりもW/Bの低減が効果的と考えられる。

暴露試験と促進中性化試験で得られた中性化速度係数を図-6 に示す。この結果によると、養生方法の違いにかかわらず、暴露試験と促進中性化試験で得られた中性化速度係数は比例関係にあった。また、室内に暴露した供試体の中性化速度係数は屋外に暴露した供試体よりも大きくなった。室内では、降雨等による水分の供給が無いこと、屋外よりも二酸化炭素濃度が大きいこと等から、中性化が進行しやすい環境であったためと考えられる。

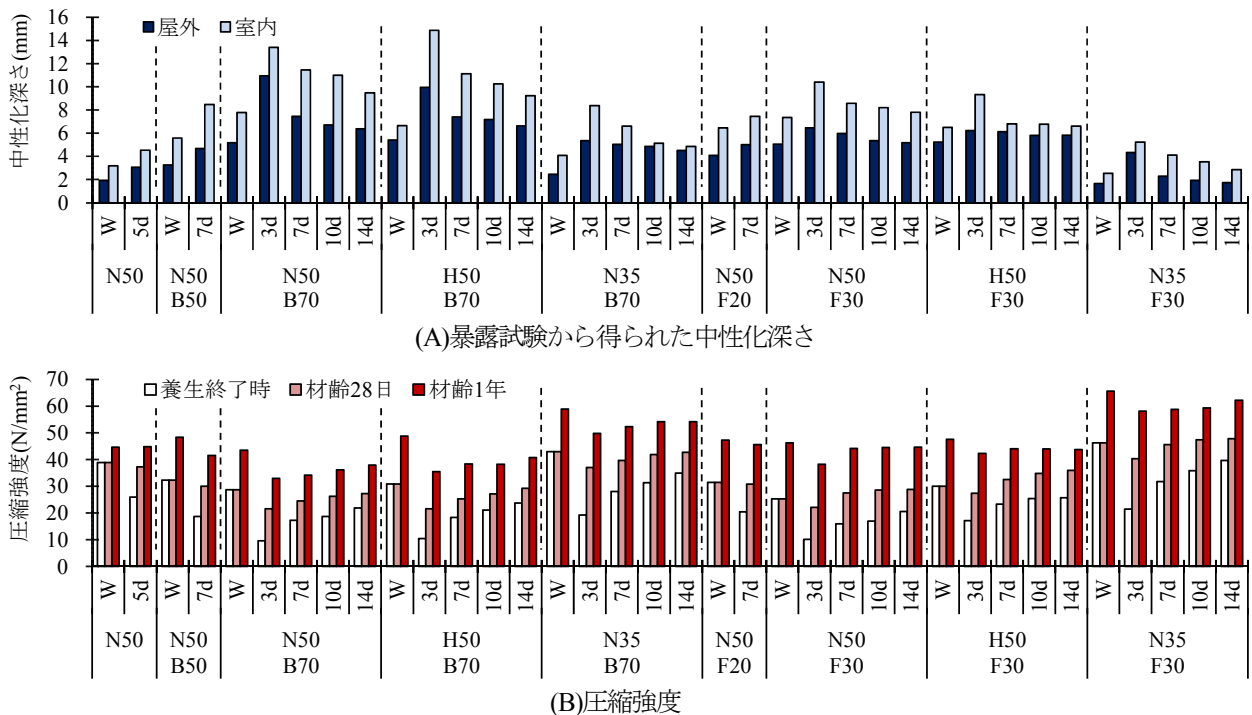


図-5 暴露試験から得られた中性化深さと圧縮強度

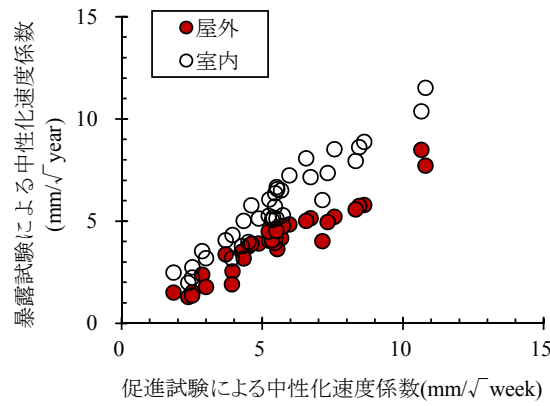


図-6 暴露試験と促進試験から得られた中性化速度係数

### 4.3 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

#### 4.3.1 電気泳動試験（非正常法）の結果

電気泳動試験（非正常法）から得られた塩化物イオン浸透速度を図-7に示す。若干のばらつきが認められるが、いずれの配合においても、初期材齢の湿潤養生期間を長くするほど、塩化物イオン浸透速度が小さくなり、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上したことがわかる。試験材齢の違いに着目すると、材齢91日では、塩化物イオン浸透速度は、普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体との比較では、高炉スラグ微粉末を用いた供試体で小さく、フライアッシュを用いた供試体で大きくなった。しかし、暴露30ヶ月後では、塩化物イオン浸透速度は、いずれの混和材を用いた供試体でも、普通ポルトランドセメントのみを用いた供試体よりも小さくなり、湿潤養生日数の長短による塩化物イオン浸透速度の差も小さくなった。特にフライアッシュを用いた供試体において、材齢の経過による塩化物イオン浸透速度の減少が顕著に現れた。混和材を用いた供試体では、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が長期的に向上し、初期材齢の養生条件の影響が徐々に小さくなると考えられる。

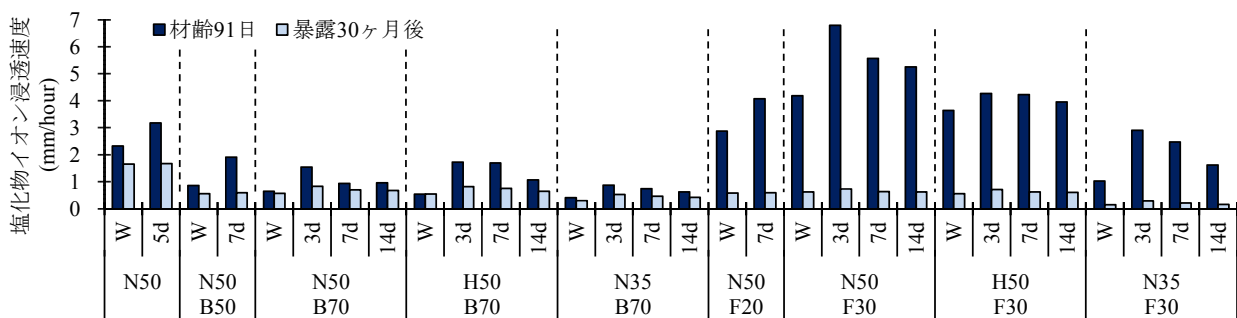


図-7 電気泳動試験（非正常法）による塩化物イオン浸透速度

### 4.3.2 暴露試験の結果

暴露供試体の塩化物イオン濃度分布と中性化深さを図-8に示す。W/B=50%として混和材の置換率を混合セメントC種の上限值とした供試体では、湿潤養生期間が短いほど中性化深さが大きくなり、この結果として、塩化物イオンが供試体内部へと浸透したことがわかる。前述した電気泳動試験（非定常法）の結果からは材齢の経過とともに塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上することが示されたが、中性化の影響を受けると場合には、中性化の進行によって塩化物イオンが供試体内部に移動・濃縮したためと考えられる。

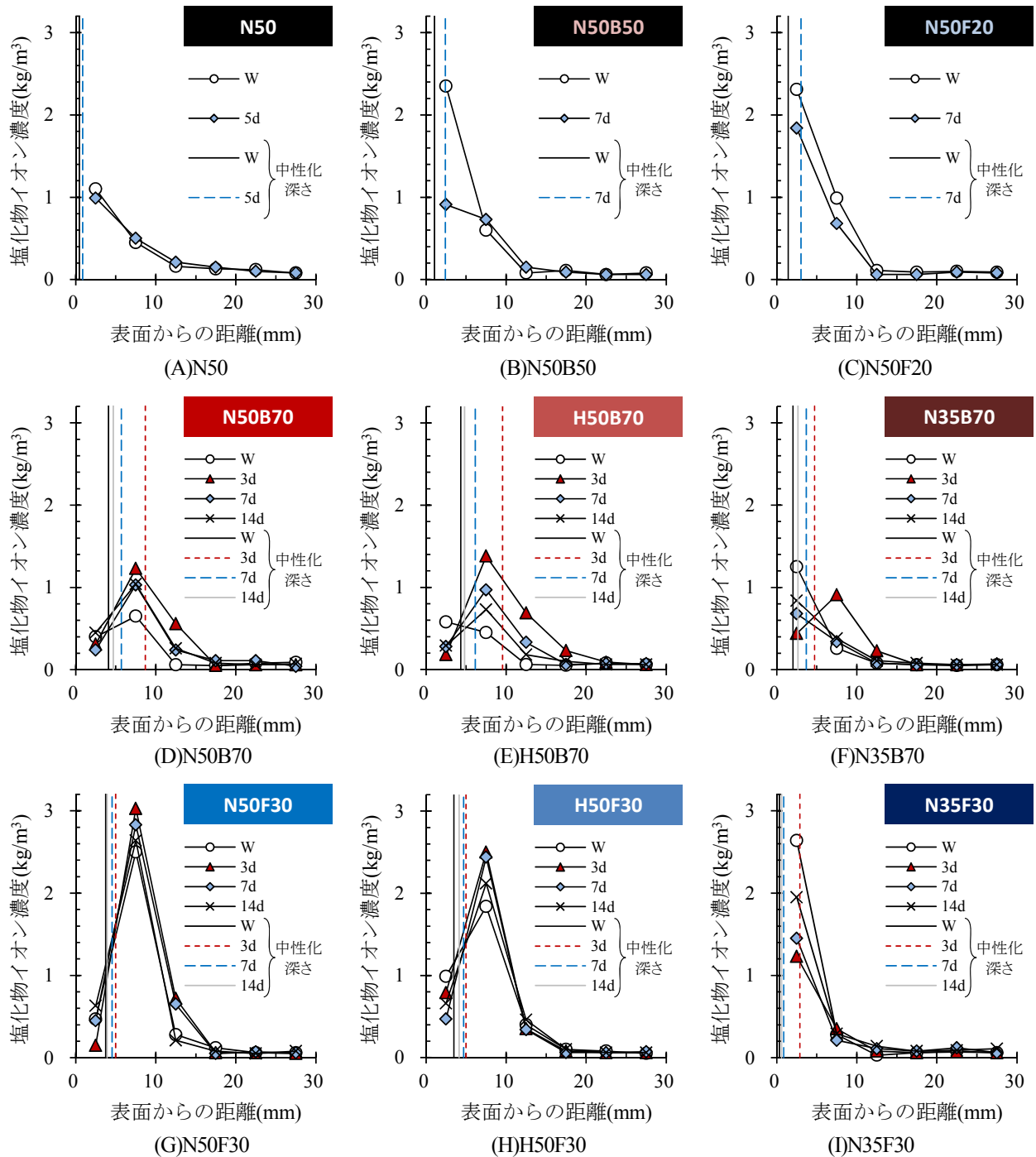


図-8 塩化物イオン濃度分布と中性化深さ

## 5. まとめ

この付録では、湿潤養生期間の異なる供試体を製作して強度試験と耐久性試験を行い、打込み後の湿潤養生期間の違いが混和材を用いたコンクリートの強度と耐久性に与える影響について検討した。この実験の範囲内で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強度、中性化及び塩化物イオン浸透に対する抵抗性は、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、初期材齢の養生条件の影響を受けやすく、湿潤養生期間の長短による差が明確に現れた。
2. 混和材を用いたコンクリートの中性化の進行速度は、初期材齢の養生条件に加えて、屋外と室内のような環境条件の違いによっても異なった。
3. 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、初期材齢の養生条件の影響を受けるものの、材齢の経過とともに養生条件の影響が小さくなり、長期的に向上した。ただし、塩化物イオン浸透と中性化が同時に作用する実環境下では、特に混和材の置換率が高いコンクリートにおいて、湿潤養生期間が短いほど中性化深さが大きくなり、中性化に起因する塩化物イオンの移動・濃縮によって供試体内部に塩化物イオンが浸透することがあった。

### 参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2013
- 2) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー86，1996
- 3) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），コンクリートライブラリー94，1999
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS 5，鉄筋コンクリート工事，2009
- 5) ACI 308R-01: Guide to Curing Concrete, American Concrete Institute, 2001
- 6) BS EN 13670:2009: Execution of concrete structures, European Committee for Standardization, 2009
- 7) 気象庁ホームページ：気象統計情報，<http://www.data.kishou.go.jp/menu/report.html>
- 8) 気象庁ホームページ：二酸化炭素濃度の経年変化，[http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2\\_trend.html](http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html)

## 付録ー7 温度履歴が強度発現に与える影響

### 1. はじめに

この付録では、打込み後の温度履歴が混和材を用いたコンクリートの強度発現に与える影響について検討した結果を示す。

混和材を用いたコンクリートの強度発現は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも打込み後の温度履歴の影響を受けやすく、特に冬期のような低温環境下では初期材齢の強度発現が遅れることが懸念される。また、夏期のような高温環境下では、初期材齢での強度発現の遅れは生じないが、長期材齢で強度発現が滞る可能性がある。このため、冬期や夏期等のコンクリートの温度履歴が異なる場合の圧縮強度を推定する場合や温度ひび割れの発生リスクを評価する場合等、温度履歴の影響を適切に考慮してコンクリートの強度発現を推定する必要がある。しかし、混和材の置換率を混合セメントC種相当以上としたコンクリートの強度発現に温度履歴が与える影響は必ずしも明確ではない。

この付録では、練上がり温度とその後の養生温度を変化させた円柱供試体の圧縮強度試験を行い、打込み後の温度履歴の違いが混和材を用いたコンクリートの強度発現に与える影響について検討した結果を示す。また、混和材を用いたコンクリートにおいて、有効材齢を用いた強度発現の推定方法の精度について検証した結果を示す。

### 2. 日米欧の設計基準等における養生期間中のコンクリートの温度に関する規定

日米欧の設計規準等における養生期間中のコンクリートの温度に関する規定の概要を表ー1に示す。いずれの設計規準等においても、寒冷時には初期凍害を防止するため、コンクリートの温度の最低値、初期強度の目標値、養生期間の目安等が示されている。混和材を用いたコンクリートでは、特に低温環境下で初期材齢の強度発現が遅れることが懸念されるため、低温時の強度発現の特徴を適切に把握する必要がある。

また、文献7)~9)では、式(1)によってコンクリートの温度履歴から有効材齢を算出し、これを用いて打込み後のコンクリートの強度発現を推定する方法が示されている。

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

ここに、 $t_e$ ：有効材齢(days)、 $\Delta t_i$ ：ある一定のコンクリート温度が継続する期間(days)、 $T(\Delta t_i)$ ： $\Delta t_i$ の間継続するコンクリート温度(°C)、 $T_0$ ：1°Cである。

ただし、文献7)では、式(1)がセメントの水和反応の活性化エネルギーを33kJ/molと仮定して導出されたこ

とから、ポゾラン活性を示す混和材を多量に含むセメントを用いる場合や設計時に温度の影響が重要となる場合には、実験によって推定式を別途定めることとされている。なお、活性化エネルギーを実験によって定める方法としては ASTM C 1074<sup>10)</sup>がある。ASTM C 1074 では、化学反応の進行速度の温度依存性を経験的に予測するアレニウス則に基づき、異なる養生温度で製作した供試体の圧縮強度試験の結果から活性化エネルギーを算出する方法が示されている。

表-1 日米欧の設計規準等における養生期間中のコンクリートの温度に関する規定の概要

設計規準等	コンクリートの温度に関する規定
土木学会 2012年制定 コンクリート標準示方書 〔施工編〕 <sup>1)</sup>	日平均気温が4℃以下になる場合には、寒中コンクリートとして施工を行う。 ・初期凍害を防止できる強度が得られるまで5℃以上に保ち、さらに2日間は0℃以上に保つ。 ・圧縮強度が4N/mm <sup>2</sup> 以上となれば、数回の凍結では凍害を受けることが比較的少ない。 ・構造物の温度を測定した場合には、試験結果をもとに積算温度から強度を推定できる。 日平均気温が25℃を超える場合には、暑中コンクリートとして施工を行う。
土木学会 高炉スラグ微粉末を用いた コンクリートの施工指針 <sup>2)</sup>  土木学会 フライアッシュを用いた コンクリートの施工指針 (案) <sup>3)</sup>	養生期間中はコンクリート温度を10℃以上に保つ。 ・部材が薄い場合には、マスコンクリートでも7℃以上に保つ。 日平均気温が4℃以下になる場合は寒中コンクリートとして施工を行う。 ・所定の圧縮強度が得られるまでコンクリート温度の最低値を下回らないように、また、所定の圧縮強度が得られても指定された温度で3日間以上、その後は0℃以上で2日間の養生を行う。 ・圧縮強度が5N/mm <sup>2</sup> 以上となれば数回の凍結では凍害を受けることが比較的少なく、10N/mm <sup>2</sup> 以上となれば厳しい気象作用を受けてもほとんど凍害を受けない。
日本建築学会 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009 <sup>4)</sup>	寒冷期には、コンクリートを寒気から保護し、打込み後5日間以上は2℃以上に保つ。 ・ただし、混合セメントでは7日間以上、早強ポルトランドセメントでは3日間以上とする。 ・通常のセメントで、強度5N/mm <sup>2</sup> を5日間で確保できると思われるため、2℃を最低限界とした。 初期凍害を受けるおそれがある場合には、寒中コンクリートとしての施工を行う。 ・適用期間は、低温による初期凍害と強度発現の遅れを考慮し、打込み日を含む日平均温度が4℃以下の期間及び打込み後91日までの積算温度が840°D・Dを下回る期間とする。 部材断面の中心部温度が外気よりも25℃以上高くなる場合にマスコンクリートとして対策を行う。
ACI 308R-01 Guide to Curing Concrete <sup>5)</sup>	・初期凍害を防止するためには、圧縮強度が3.5N/mm <sup>2</sup> 以上となるまでコンクリートの凍結を防ぎ、追加的な水分を供給しないようにする。 ・寒冷時には、湿潤状態にあるコンクリートを10℃以上に保つ。 ・強度発現を推定する際には、ASTM C 1074のMaturity Methodを用いてよい。
EN 13670:2009 Execution of Concrete Structures <sup>6)</sup>	・コンクリート表面の温度は、コンクリート表面の圧縮強度が5N/mm <sup>2</sup> 以上となるまで0℃を下回らないようにする。 ・養生期間中の表層コンクリートの品質の経時的な変化は、圧縮強度とMaturityの関係に基づいてよく、例えば、表面から10mmよりも浅い位置のコンクリート温度の測定値や周囲の平均気温を用いたMaturityの計算値を用いてよい。

### 3. 実験方法

コンクリートの練上がり目標温度を 30, 20, 10, 5°Cとして円柱供試体（φ100×200mm）を製作し、所定の材齢で JIS A 1108 に準拠して圧縮強度を測定した。

コンクリートの配合を表-2、基礎物性を表-3に示す。水結合材比（W/B）を50%として普通ポルトランドセメントのみを用いた配合（N50）を基準として、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率、W/Bの2種類の実験パラメータを設定した。高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率を実験パラメータとした配合では、混和材の置換率を混合セメントB種相当（N50B50, N50F20）あるいは混合セメントC種の上限值（N50B70, N50F30）とした。W/Bを実験パラメータとした配合では、混和材の置換率を混合セメントC種の上限值として、W/Bを35%とした（N35B70, N35F30）。

表-2 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					s/a (%)	
		W	B = OPC + BS4 + FA			S		G
			OPC	BS4	FA			
N50	50	165	330 (100%)	—	—	827	968	47.2
N50B50			165 (50%)	165 (50%)	—	815		46.8
N50B70			99 (30%)	231 (70%)	—	810		46.6
N35B70	35		141 (30%)	330 (70%)	—	688		42.6
N50F20	50		264 (80%)	—	66 (20%)	807		46.6
N50F30			231 (70%)	—	99 (30%)	797		46.2
N35F30			35	330 (70%)	—	141 (30%)		670

※W: 上水道水(茨城県つくば市), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,340cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,410cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.08%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,810cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の( )内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

※化学混和剤: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの, W/B=35%で使用), AE 減水剤(リグニンシルホン酸化合物とポリオール複合体, W/B=50%で使用), 空気連行剤(フライアッシュを用いた配合以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, フライアッシュを用いた配合で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整, 練上がり目標温度 30°Cでは遅延形, その他では標準形を使用

表-3 コンクリートの基礎物性

配合	練上がり目標温度 30°C			練上がり目標温度 20°C			練上がり目標温度 10°C			練上がり目標温度 5°C		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
N50	12.5	5.7	32.4	12.5	4.9	19.6	14.0	4.4	10.3	14.0	5.1	4.5
N50B50	13.5	4.1	32.7	11.5	4.0	19.6	12.5	4.5	10.8	13.0	4.2	4.8
N50B70	13.0	4.5	32.9	12.5	4.2	19.6	11.5	4.3	10.7	11.0	4.0	5.0
N35B70	11.0	3.4	33.2	9.5	3.9	20.0	11.5	4.0	11.2	10.5	4.5	5.5
N50F20	12.5	5.3	33.1	12.5	4.7	20.2	13.5	4.0	11.2	13.5	4.7	5.9
N50F30	11.5	4.5	33.8	12.0	5.1	20.1	12.0	4.4	11.3	14.5	4.9	6.1
N35F30	13.0	3.1	34.5	14.0	3.8	20.6	11.0	5.2	11.5	13.0	3.7	6.6

※スランプ: JIS A 1101 に準拠して測定, 空気量: JIS A 1128 に準拠して測定, 温度: 練上がり直後のフレッシュコンクリートで温度計を用いて測定



(A)温度一定の恒温室



(B)発泡スチロール製の容器を用いた簡易断熱養生



写真-1 円柱供試体の養生状況

温度履歴がコンクリートの強度発現に与える影響を検討するため、コンクリート打込み直後から供試体を封緘状態に保ち、2種類の温度環境下に供試体を保管して養生を行った。一つは温度一定とした恒温室とし(写真-1(A))、もう一つはマスコンクリートで想定される水和発熱による温度履歴を再現するため発泡スチロール製の容器内で簡易的な断熱状態とした(写真-1(B))。温度一定の恒温室に保管した供試体については、練上がり目標温度を 30, 20, 10, 5℃として、室温を練上がり目標温度と同一とした恒温室に保管した。配合ごとに温度測定用の供試体を1体ずつ準備し、中心部に熱電対を埋設してコンクリートの温度を測定した。材齢 1, 2, 3, 7, 28, 56, 91 日の7時点で、圧縮強度試験を行った。ただし、練上がり目標温度を 5℃とした場合には、材齢 1 日での脱型が困難であったため、材齢 2 日以降で圧縮強度試験を行った。なお、封緘状態で供試体を保管したため、恒温室の湿度の管理は行わないこととした。

一方、マスコンクリートで想定される水和発熱による温度履歴を再現するため簡易断熱養生を行った供試体については、特に低温環境下での高温履歴が混和材を用いたコンクリートの強度発現に与える影響を明らかにするため、練上がり目標温度を 10, 5℃として、JASS 5 T-606<sup>4)</sup>を参考に、発泡スチロール製の容器(発泡率 90 倍、厚さ 200mm 以上)に供試体を保管し、水和発熱による高温履歴を再現した。配合ごとに 13 体の供試体を容器に保管し、1 体をコンクリート温度の測定、残り 12 体を圧縮強度の測定に用いた。材齢 3, 7, 28, 91 日の4時点で、圧縮強度試験を行った。

## 4. 実験結果

### 4.1 コンクリートの温度履歴

温度一定の恒温室に保管した供試体の温度は、材齢 1 日までの期間において表-3 の練上がり時の温度から 3℃ほど増加したが、その後は恒温室の室温と同程度で推移した。

次に、練上がり目標温度を 10, 5℃として簡易断熱養生を行った供試体の温度履歴を図-1 に示す。W/B=50%の供試体の温度履歴を比較すると、普通ポルトランドセメントのみを用いた N50 よりも混和材を用いた供試体の温度が低く、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ほど最高温度が低くなった。一方、W/B を 35%とした N35B70 と N35F30 は単位結合材量が多いため N50 よりも最高温度が高くなった。特に N35F20 は N50 よりも大幅に最高温度が高くなったが、この原因は N35F30 と N50 の単位セメ



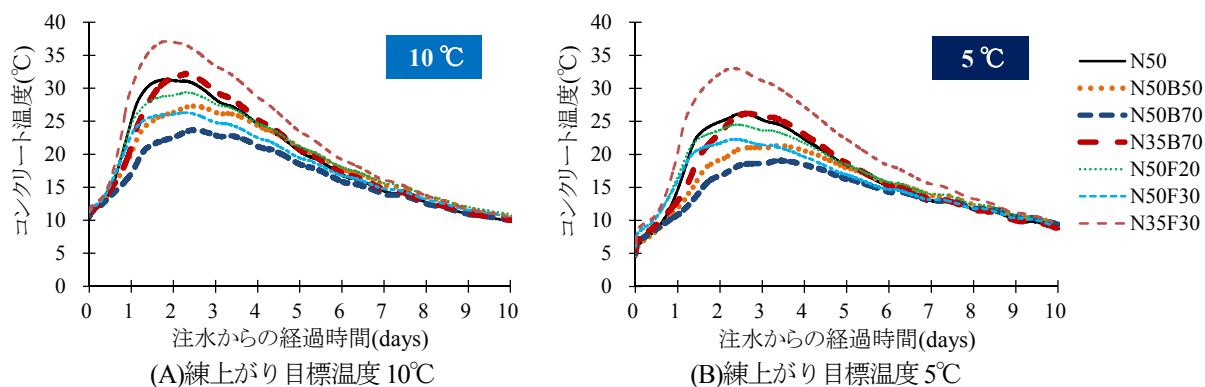


図-1 簡易断熱養生を行った円柱供試体の温度履歴

ント量が等しく、N35F30 ではさらにフライアッシュを用いて単位結合材量が多くなったためと考えられる。また、10°Cと5°Cの温度履歴を比較すると、10°Cよりも5°Cの場合に、最高温度が低く、最高温度に到達するまでの経過時間が長くなった。

#### 4.2 圧縮強度の推移：温度一定の恒温室に保管した場合

練上がり目標温度を 30, 20, 10, 5°Cとして、温度一定の恒温室に保管した供試体の圧縮強度の推移を図-2 に示す。いずれの配合においても、養生期間中の温度が低い場合ほど、初期材齢での強度発現が遅くなる傾向にあった。

W/B を 50%とした配合間の比較によると、材齢 28 日の時点までは、混和材を用いた配合の圧縮強度は、普通ポルトランドセメントのみを用いた N50 の圧縮強度よりも小さくなった。また、この差は養生期間中の温度が低いほど大きくなった。その後、材齢 91 日の時点では、30°Cでは N50B70, 20°Cでは N50B70, N50F30, 10°Cと 5°Cでは N50B70, N50F30, N50B50, N50F20 において、N50 よりも圧縮強度が大幅に小さくなり、養生期間中の温度が低いほど N50 よりも圧縮強度の小さい配合が多く存在した。また、混和材を用いた配合と N50 の圧縮強度の差は、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率の高い配合で大きくなった。W/B が同一の場合、混和材を用いたコンクリートの強度発現は普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して温度履歴の影響を受けやすく、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ほど、また、低温時ほど、初期材齢の強度発現が遅くなったためと考えられる。

次に、W/B の違いに着目すると、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率が同一の場合には、養生期間中の温度の違いにかかわらず、W/B を 35%とした配合の圧縮強度が W/B を 50%とした配合の圧縮強度よりも大きくなったことがわかる。水結合材比を低減することによって圧縮強度の低下を避けることができると考えられる。ただし、N35B70 の圧縮強度は、養生期間中の温度を 30°Cあるいは 20°Cとした場合に N50 よりも大きく、10°Cとした場合に N50 と同程度、5°Cとした場合に N50 よりも小さくなった。このため、高炉スラグ微粉末の置換率を高炉セメント C 種の上限值とした配合では、10°C以下の低温時においては、W/B を低減しても強度発現が遅れる傾向にあると考えられる。一方、N35F30 では、単位セメント量が N50 と同一であったため、養生期間中の温度にかかわらず、N50 よりも圧縮強度が大きくなった。

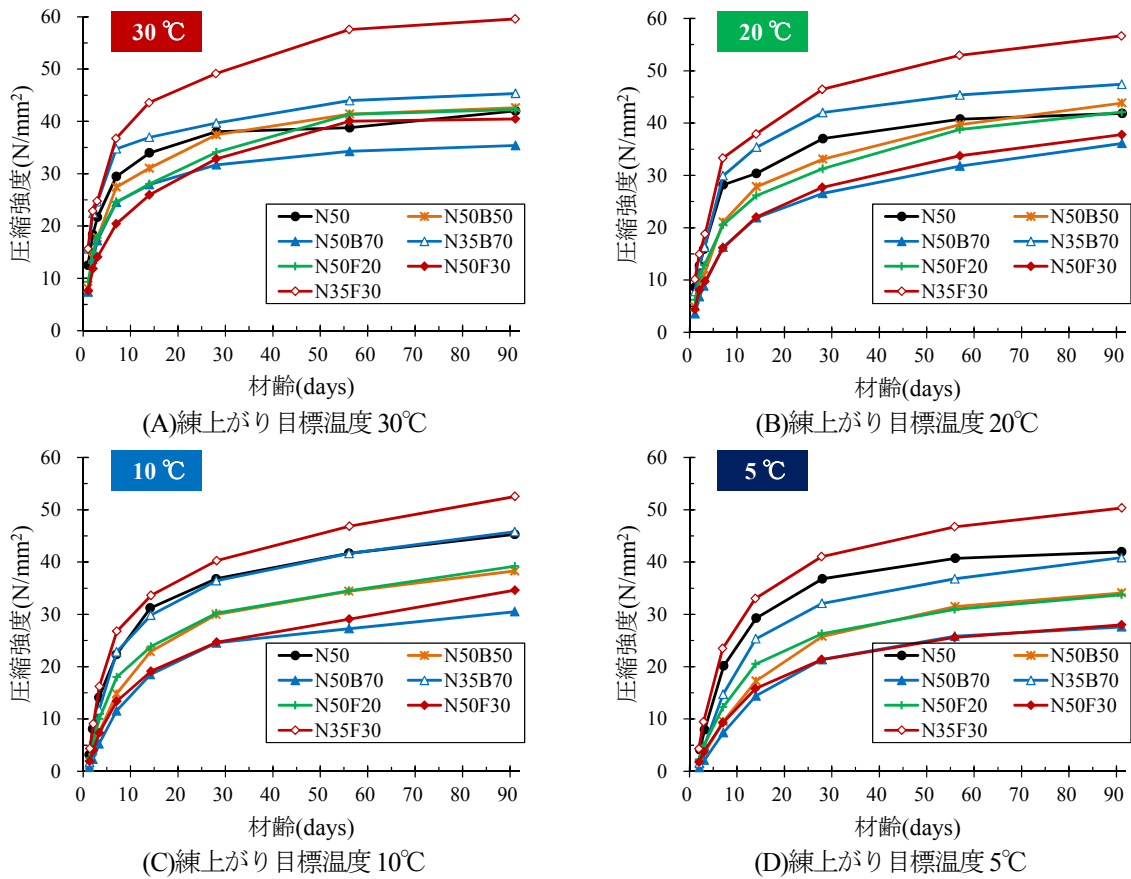


図-2 温度一定の恒温室に保管した供試体の圧縮強度

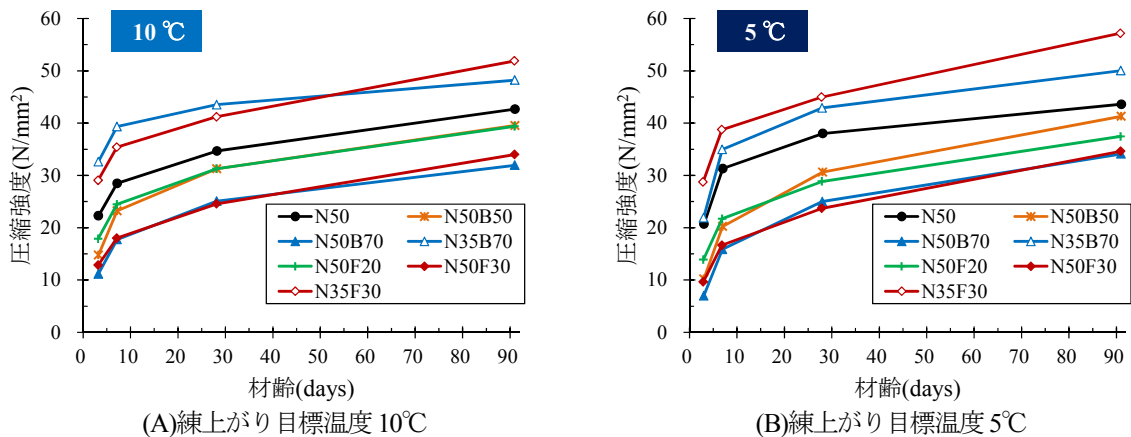


図-3 簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度

#### 4.3 圧縮強度の推移：簡易断熱養生を行った場合

練上がり目標温度を 10、5°Cとして、簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度の推移を図-3 に示す。図-2 の温度一定の恒温室に保管した供試体の圧縮強度と比較すると、簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度は材齢 3、7 日の時点では温度一定の恒温室に保管した供試体の圧縮強度よりも大幅に大きくなったが、材齢 28、91 日の時点ではこの差が小さくなった。簡易断熱養生を行った供試体では、図-1 に示したように練上がり後に水和発熱によってコンクリートの温度が上昇し、この結果として初期材齢において温度一定の恒温室に保管した供試体よりも圧縮強度の増加量が大きくなったためと考えられる。

#### 4.4 圧縮強度と材齢の関係

配合ごとの圧縮強度の推移を図-4に示す。同図では、横軸の材齢を注水からの経過時間とした。いずれの配合においても、温度一定の恒温室に保管した供試体の圧縮強度は、初期材齢では養生期間中の温度が低いほど小さくなったが、その後は混和材の使用有無や種類によって傾向が異なった。普通ポルトランドセメントのみを用いたN50の圧縮強度は、材齢28日の時点では養生期間中の温度にかかわらず同程度となり、材齢91日の時点では養生期間中の温度が低い場合に大きくなった。一方、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた配合では、特に低温時に強度発現が遅くなる傾向にあり、材齢91日の時点においても養生期間中の温度を10°Cあるいは5°Cとした場合に圧縮強度が小さくなった。混和材を用いたコンクリートでは、5~10°Cの低温状態に常時置かれる場合には、材齢91日の時点においても低温時の強度発現の遅れが継続したためと考えられる。

また、温度一定の恒温室に保管した供試体と簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度を比較すると、材齢3日や材齢7日の初期材齢では簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度が温度一定の恒温室に保管した供試体の圧縮強度よりも大きくなったが、材齢28日や材齢91日の長期材齢では両者の差が小さくなった。マスコンクリートのように水和発熱によって打込み後のコンクリートの温度が上昇する場合には、練上がり時の温度が低温であっても、初期材齢において強度発現が進展したためと考えられる。

#### 4.5 圧縮強度と有効材齢の関係

配合ごとの圧縮強度と有効材齢の関係を図-5に示す。同図では、横軸を式(1)によって計算した有効材齢とし、室温20°Cの恒温室に保管した供試体の圧縮強度を式(2)で回帰分析して求めた回帰曲線を併記した。

$$f'_{c,test}(t_e) = \frac{t_e - t_0}{a + b \cdot (t_e - t_0)} f'_{c,test}(91) \quad (2)$$

ここに、 $f'_{c,test}(t_e)$ : 室温20°Cの恒温室に保管した供試体の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $t_e$ : 注水からの有効材齢(days)、 $a$ 、 $b$ 、 $t_0$ : 回帰分析によって求めたパラメータ、 $f'_{c,test}(91)$ : 室温20°Cの恒温室に保管した供試体の材齢91日の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)である。

どの配合においても、有効材齢で整理することによって、圧縮強度の実測値の分布と回帰曲線の傾向が概ね一致した。長期材齢の実測値に着目すると、N50では養生期間中の温度が高いほど圧縮強度が小さくなったが、混和材を用いた配合では圧縮強度の低下の程度が小さくなった。普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートでは高温時に長期材齢の強度発現が停滞する傾向にあったが、混和材を用いたコンクリートでは長期的に強度発現が継続するため、長期材齢の強度発現の停滞の程度を小さくできると考えられる。

また、実測値と回帰曲線の関係を厳密に比較すると、10°Cあるいは5°Cの恒温室に保管した場合に初期材齢の圧縮強度の実測値が回帰曲線を下回ったこと、簡易断熱養生を行った場合に圧縮強度の実測値の多くが回帰曲線を上回ったことがわかる。

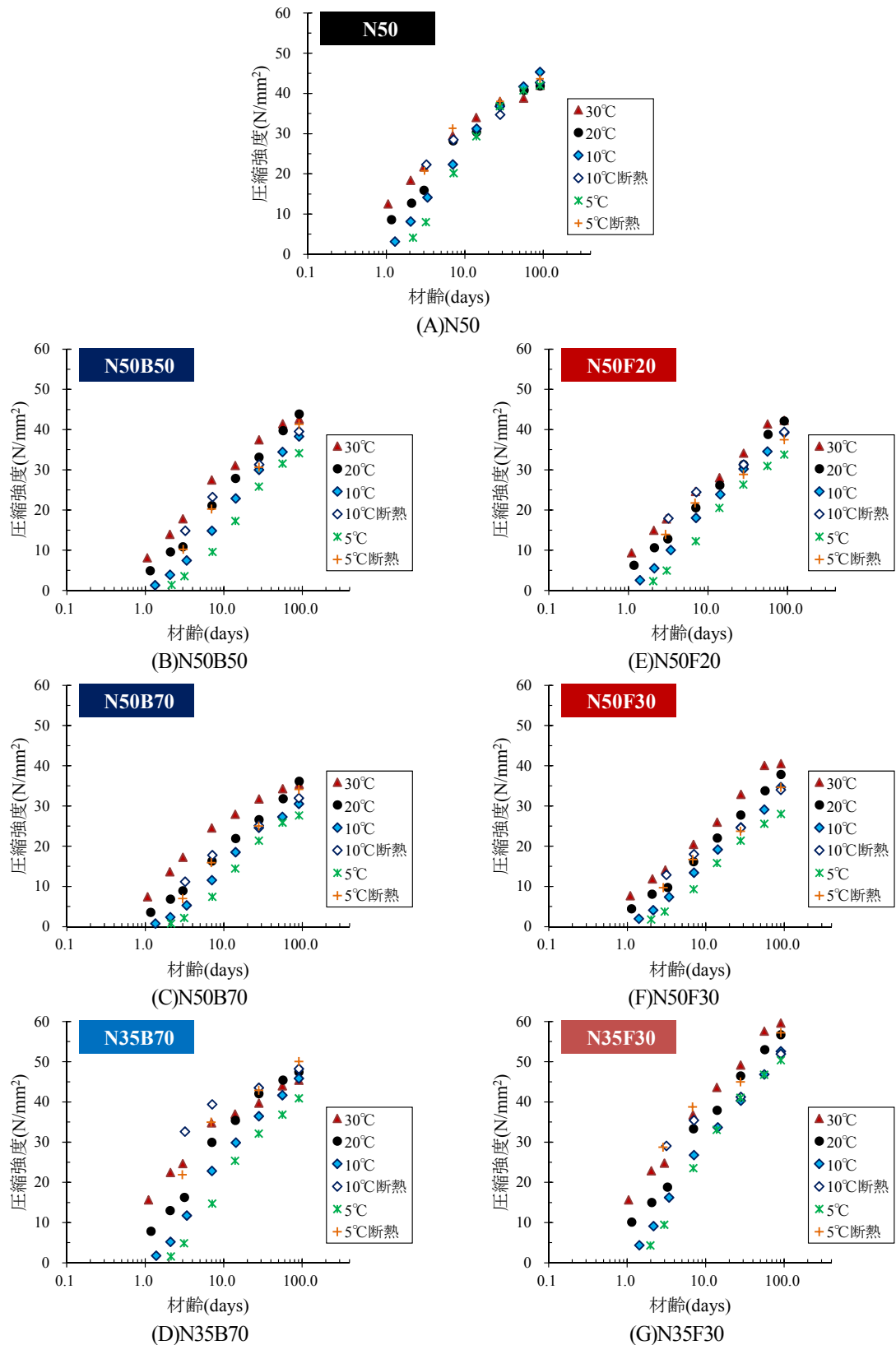
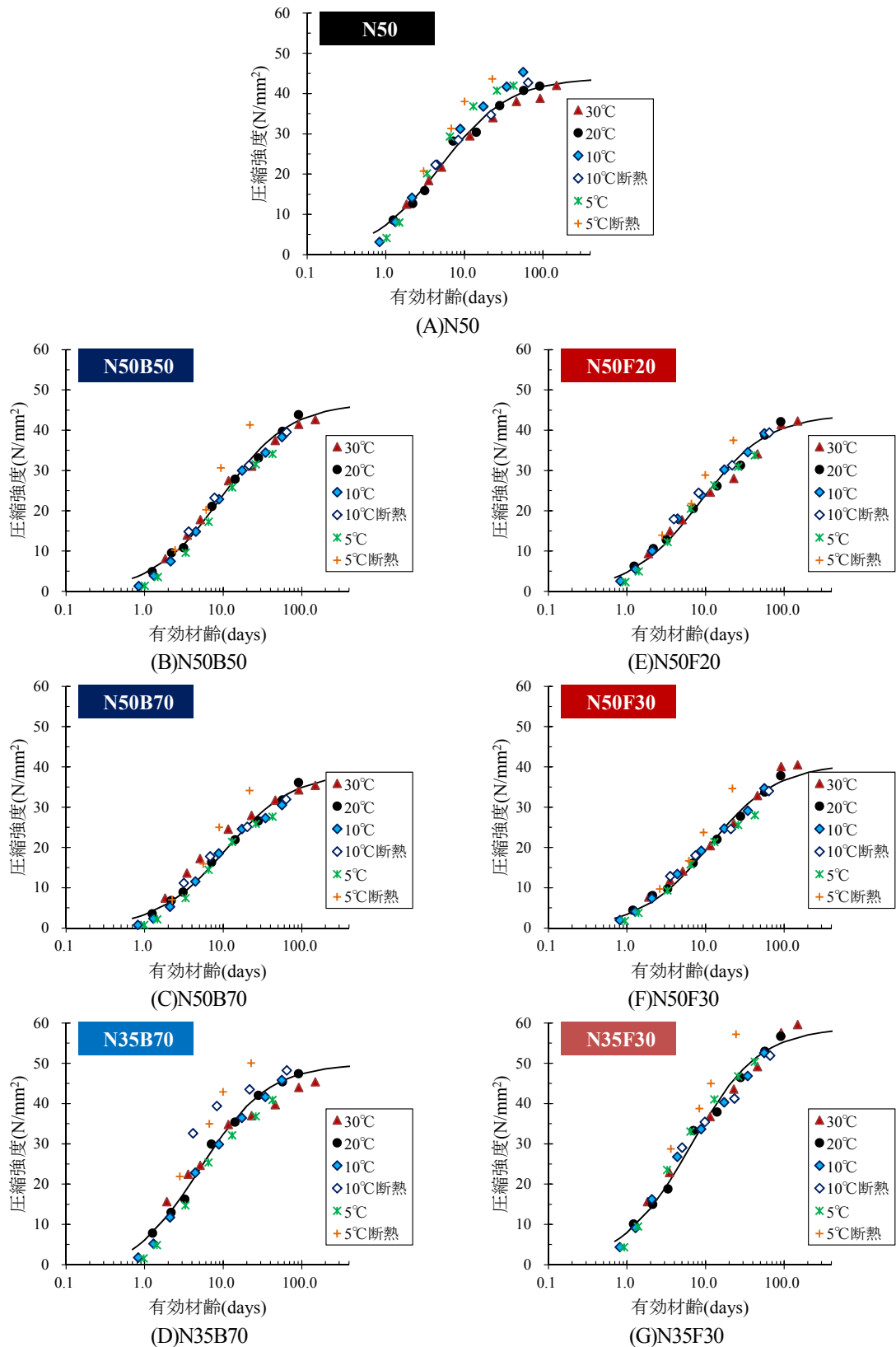


図-4 圧縮強度と材齢の関係



図一5 圧縮強度と有効材齢の関係

次に、有効材齢を用いた圧縮強度の推定精度を検証するため、圧縮強度の実測値と式(2)の回帰曲線から得られる推定値の比を図-6に示す。この推定値は、室温20°Cの恒温室に保管した供試体の強度試験結果とコンクリートの温度の測定値から求めた有効材齢から算出した結果である。

室温を10°Cあるいは5°Cとした恒温室に保管した供試体では、材齢7日より前の時点で実測値/推定値が1.0よりも小さく、特に5°Cとした場合に実測値/推定値が小さくなった。また、この傾向は、混和材の置換率の高い配合で明確に現れた。このため、混和材の置換率が高く、かつ、打込み後も5~10°Cの低温状態が継続するコンクリートでは、20°Cの恒温室に保管した供試体の試験結果から得られる推定値と比較して、実際の圧縮強度が小さくなる可能性が高いと考えられる。

一方、練上がり温度が10°Cあるいは5°Cであっても、簡易断熱養生を行った場合には、実測値/推定値は1.0よりも大きくなった。このため、打込み時の温度が低温であっても、その後の水和発熱によってコンクリートの温度が上昇する場合には、室温20°Cの恒温室に保管した供試体の試験結果から得られる推定値と比較して、実際の圧縮強度が大きくなる可能性が高いと考えられる。

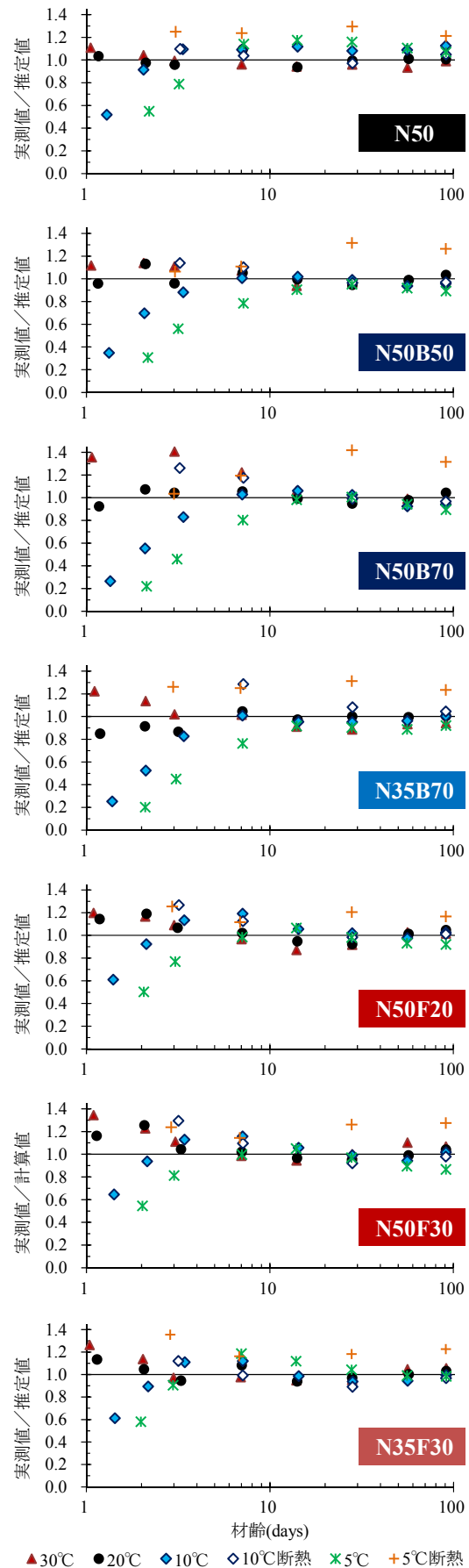


図-6 実測値と推定値の比較

## 5. まとめ

この付録では、練上がり温度とその後の養生温度を変化させた円柱供試体の圧縮強度試験を行い、打込み後の温度履歴の違いが混和材を用いたコンクリートの強度発現に与える影響について検討するとともに、有効材齢を用いた強度発現の推定精度を検証した結果を示した。この実験の範囲内で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強度発現は、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して養生期間中の温度の影響を受けやすく、混和材の置換率が高いほど低温時に強度発現が遅れる傾向にあった。
2. 混和材を用いたコンクリートの強度発現は、打込み後の温度履歴が異なる場合においても、コンクリートの温度の測定値から求めた有効材齢と20°Cの環境で行った圧縮強度試験の結果から概ね推定できることがわかった。ただし、5~10°Cの低温状態が継続する場合には初期材齢の圧縮強度が推定値よりも小さくなる傾向にあること、打込み時の温度が5~10°Cであっても水和発熱によってコンクリートの温度が上昇する場合には圧縮強度が推定値よりも大きくなる傾向にあることがあった。
3. 混和材を用いたコンクリートでは、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、強度発現が長期的に継続するため、初期材齢で高温履歴を受けた場合にも長期材齢の強度発現の停滞の程度が小さくなった。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2013
- 2) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，コンクリートライブラリー86，1996
- 3) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），コンクリートライブラリー94，1999
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS 5，鉄筋コンクリート工事，2009
- 5) ACI 308R-01: Guide to Curing Concrete, American Concrete Institute, 2001
- 6) BS EN 13670:2009: Execution of concrete structures, European Committee for Standardization, 2009
- 7) fib: Model Code for Concrete Structures 2010, First Edition, 2013
- 8) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013
- 9) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008，2008
- 10) ASTM C 1074-11: Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM International, 2011

## 付録ー8 クリープ・収縮特性

### 1. はじめに

この付録では、混和材を用いたコンクリートのクリープ・収縮特性について検討した結果を示す。

コンクリートのクリープ係数と乾燥収縮度は、プレストレストコンクリートのプレストレス力の減少量や不静定構造物の不静定力等を計算するために不可欠な設計値であり、コンクリートの種類に応じて適切な数値を設定する必要がある。また、乾燥収縮あるいは自己収縮に起因するコンクリートの体積変化は、初期ひび割れの発生要因のひとつであるため、その特徴を適切に把握するとともに、必要に応じて初期ひび割れの発生を抑制するための対策を講じる必要がある。しかし、混和材を用いたコンクリートのクリープ・収縮特性はポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して異なる傾向を示す可能性があり、その特徴は必ずしも明確ではない。

この付録では、日米欧の設計規準等におけるクリープ係数と乾燥収縮ひずみの予測式の概要を整理するとともに、プレストレストコンクリートに混和材を用いたコンクリートを適用することを念頭に、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートのクリープ・収縮特性について実験を行って検討した結果<sup>1), 2)</sup>を示す。

### 2. 日米欧の設計規準等におけるクリープ係数と収縮ひずみの予測式

日米欧における主要な設計規準等<sup>3)~8)</sup>におけるクリープ係数と収縮ひずみの予測式の概要を表ー1に示す。既存の国内外の設計規準等では、クリープ係数と収縮ひずみの予測式に様々な形式のものを採用していることが読み取れる。

クリープ係数の予測式は、対数関数を用いて長期的なクリープ係数を予測するものと、クリープ係数の最終値と分数関数で表されたクリープの進行度の積でクリープ係数を予測するものとに二分される。前者はコンクリート標準示方書や JIS A 1157, ISO 1920-9<sup>9)</sup>で採用されている。fib Model Code 2010 では、クリープ係数を基本クリープと乾燥クリープの重ね合わせで算出し、基本クリープの予測式に対数関数を用いる方法を採用している。また、後者は主に米国の設計規準等で採用されているが、分数関数の詳細や各パラメータの取扱方法が異なっている。なお、道路橋示方書では、CEB-FIP Model Code 1978<sup>10)</sup>に基づく方法を採用している。

一方、収縮ひずみの予測式は、収縮ひずみの最終値、分数関数で表された収縮ひずみの進行度、様々なパラメータの影響を表す項を乗じて収縮ひずみを予測する形式のものが多い。コンクリート標準示方書では、収縮ひずみの特性値と部材中におけるコンクリートの収縮ひずみの経時変化の2種類の予測式を示している。前者は、試験によって収縮ひずみの特性値が得られない場合に用いられる。後者は、試験等によって求めた



表一1 日米欧の設計規準等におけるクリープ係数と収縮ひずみの予測式の概要

設計規準等	予測式	クリープ係数	収縮ひずみ
コンクリート標準示方書 <sup>3)</sup>		クリープ係数 $\varphi(t, t')$ $\varphi(t, t') = \frac{4W(1 - \frac{RH}{100}) + 350}{12 + f'_c(t')} \cdot \log_e(t - t' + 1) \cdot E_{ct}$	JIS A 1129 試験によらない場合のコンクリートの収縮ひずみの特性値 $\varepsilon'_{sh}$ $\varepsilon'_{sh} = 2.4 \left( W + \frac{45}{-20 + 30 \cdot C/W} \cdot \alpha \cdot \Delta \omega \right)$ 部材中におけるコンクリートの収縮ひずみの経時変化 $\varepsilon'_{sh}(t, t_0)$ $\varepsilon'_{sh}(t, t_0) = \frac{1 - RH/100}{1 - 60/100} \varepsilon'_{sh, \ln f'(t - t_0)} \left( \frac{d}{100} \right)^2 \cdot \beta + (t - t_0)$
道路橋示方書 <sup>4)</sup>		クリープ係数 $\varphi(t, t_0)$ $\varphi(t, t_0) = \varphi_{a0} \cdot \beta_a(t - t_0) + \varphi_{f0} \cdot \{\beta_f(t) - \beta_f(t_0)\}$ 影響する因子として、温度、湿度、セメント種類（早強、普通）、仮想部材厚さを考慮している。	乾燥収縮度 $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ $\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{s0} \cdot \beta_s(t - t_0)$ 影響する因子として、温度、湿度、仮想部材厚さを考慮している。
JIS A 1157: 2010 <sup>5)</sup>		試験結果から求めるクリープ係数 $\varphi_t$ $\varphi_t = A' \log_e(t + 1) + B'$	
ACI 209R-92 (Reapproved 2008) <sup>6)</sup>		クリープ係数 $v_t$ $v_t = \frac{t^\psi}{a + t^\psi} v_u$ クリープ係数の最終値 $v_u$ は、荷重材齢、養生条件、湿度、部材厚さ、V/S、スランプ、細骨材率、空気量によって補正される。	収縮ひずみ $\varepsilon_{sh}(t)$ $\varepsilon_{sh}(t) = \frac{t^\alpha}{f + t^\alpha} \varepsilon_{sh}(u)$ 収縮ひずみの最終値 $\varepsilon_{sh}(u)$ は、養生条件、湿度、部材厚さ、V/S、スランプ、細骨材率、セメント量、空気量によって補正される。
AASHTO LRFD 2010 <sup>7)</sup>		クリープ係数 $\varphi(t, t_i)$ $\varphi(t, t_i) = 1.9k_s k_{hc} k_f \left( \frac{t}{61 - 4f'_{ci} + t} \right) t_i^{-0.118}$ $k_s$ は V/S に関する係数、 $k_{hc}$ は湿度に関する係数、 $k_f$ はコンクリート強度に関する係数である。	収縮ひずみ $\varepsilon_{sh}$ $\varepsilon_{sh} = k_s k_{hs} k_f \left( \frac{t}{61 - 4f'_{ci} + t} \right) 0.48 \times 10^{-3}$ $k_s$ は V/S に関する係数、 $k_{hs}$ は湿度に関する係数、 $k_f$ はコンクリート強度に関する係数である。
fib Model Code 2010 <sup>8)</sup>		クリープ係数 $\varphi(t, t_0)$ $\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{ac}(t, t_0)$ 基本クリープのクリープ係数 $\varphi_{bc}(t, t_0)$ と乾燥クリープのクリープ係数 $\varphi_{ac}(t, t_0)$ の重ね合わせである。 $\varphi_{bc}(t, t_0) = \beta_{bc}(f_{cm}) \cdot \ln \left( \left( \frac{30}{t_{0,adj}} + 0.035 \right)^2 \cdot (t - t_0) + 1 \right)$ $\varphi_{ac}(t, t_0) = \beta_{ac}(f_{cm}) \cdot \beta(RH) \cdot \beta_{ac}(t_0) \cdot \beta_{ac}(t, t_0)$	乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ $\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \left( \frac{t - t_s}{0.035 \cdot h^2 + (t - t_s)} \right)^{0.5}$ 乾燥収縮ひずみ最終値 $\varepsilon_{cds0}(f_{cm})$ は、コンクリート強度の関数である。

※各予測式における記号の定義については各設計規準等を参照されたい。

収縮ひずみの最終値をもとに、部材の断面の厚さと外気の相対湿度の影響を考慮して収縮ひずみを予測することとしている。道路橋示方書では、CEB-FIP Model Code 1978 に基づく方法を採用してきたが、平成8年版で予測式の形状と予測式に用いる数値を修正している。欧米の予測式は分数関数で収縮ひずみの進行度を取り入れている点は同様であるが、分数関数の詳細や各パラメータの取扱い方法は様々である。

このように、クリープ係数と収縮ひずみの予測式は設計規準等によって異なるものが採用されている。この原因としては、コンクリートのクリープ・収縮特性に関する研究が古くから行われてきたにもかかわらず、未だに統一的な予測モデルが確立されていないこと、過去の実験結果を回帰分析して導かれた様々な経験式が国・地域ごとに普及していること等が考えられる。また、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を用いた場合の影響については、いずれの設計基準等においても明確な規定がなく、既存の予測式の適用性は必ずしも明確でないと考えられる。

### 3. 実験の概要

早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換したコンクリートのクリープ・収縮特性を明らかにするための実験を行った。持続荷重作用時の長期的なコンクリートのクリープひずみの特徴を明らかにするため、材齢910日までの持続載荷試験を行った。また、コンクリートの収縮ひずみは、水和反応に伴うセメントペーストの体積減少（水和反応）とコンクリート内部の水分の消費による乾燥（自己乾燥）に起因する自己収縮と、水分の外部逸散や内部移動に起因する乾燥収縮によって生じるため、自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみの進行を個別に明らかにするための収縮試験（シリーズⅠ）を行った。さらに、文献 11)において高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮ひずみは打込み後の温度履歴の影響を受けやすいことが指摘されているため、マスコンクリートを模擬した若材齢の高温履歴が自己収縮ひずみの進行速度に与える影響を明らかにするための収縮試験（シリーズⅡ）を行った。

#### 3.1 持続載荷試験

##### 3.1.1 コンクリートの配合と基礎物性

コンクリートの配合と基礎物性を表-2 に示す。セメントには早強ポルトランドセメント（HPC）を用いた。コンクリートの配合は、早強ポルトランドセメントのみを用いた配合（H40）と、3種類の混和材を用いた配合の計4種類である。混和材を用いた配合では、早強ポルトランドセメントの質量に対して、高炉スラグ微粉末4000（BS4）が30%（H35B430）、高炉スラグ微粉末6000（BS6）が50%（H35B650）、フライアッシュⅡ種（FA）が20%（H35F20）の置換率となるように混和材を用いた。水結合材比（W/B）は、早強ポルトランドセメントのみを用いた配合で40%、混和材を用いた配合で35%とした。これらの値は、一般的な現場打ちのプレストレストコンクリートの湿潤養生日数やプレストレス力の導入材齢を踏まえて、材齢3日まで養生マットを用いて湿潤養生を行った直後に30N/mm<sup>2</sup>以上の圧縮強度を確保でき、さらには配合間のW/Bの差が過大とならないように、圧縮強度の発現を事前に確認して決定したものである。また、混和材の使用がコンクリートのクリープ・収縮特性に与える影響を検討することを目的としたため、全配合で単位水量（165kg/m<sup>3</sup>）と単位粗骨材量（968kg/m<sup>3</sup>）を同一とした。

##### 3.1.2 実験方法

過去の実験<sup>12)</sup>を参考に、断面中央にφ48mmの円形孔を有する角柱供試体（150×150×500mm）を製作し、2体の供試体を貫通して連結したPC鋼棒を緊張して固定することによって、所定の圧縮応力を供試体に導入した（図-1）。連結した2体の供試体は同一配合の供試体とし、各供試体の内部に設置した埋込型ひずみ計で測定したコンクリートひずみの平均値を用いて検討を行った。また、PC鋼棒を定期的に再緊張することによって、PC鋼棒の緊張力を目標値の±3%の範囲内で管理し、供試体に導入された圧縮応力が概ね一定となるようにした。試験期間は材齢910日までとした。圧縮応力は、同時に製作した円柱供試体（φ100×200mm）の圧縮強度に基づき、材齢3日に載荷を開始する供試体では圧縮強度の20%、材齢7、28、365日に載荷を開始する供試体ではJIS A 1157を参考に圧縮強度の30%とした。なお、コンクリートのひずみの測定値から

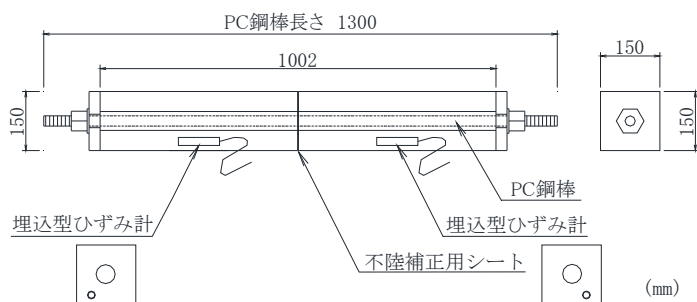
表-2 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S						G
			HPC	BS4	BS6	FA							
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	12.0	3.8	22.1	59.7	35.4
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	700		11.0	4.2	22.3	67.5	37.7
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	695		10.5	3.7	21.9	67.3	36.9
H35F20			377 (80%)	—	—	94 (20%)	682		14.5	5.2	22.3	57.8	33.7

※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=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,570cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,460cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.19%(無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=6,020cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.89%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.30g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,280cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の( )内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

※化学混和剤: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの)と空気連行剤(H35F20以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, H35F20で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整

※スランプ: JIS A 1101 に準拠して測定, 空気量: JIS A 1128 に準拠して測定, 温度: 練上がり直後のフレッシュコンクリートで温度計を用いて測定, 圧縮強度, ヤング係数: 材齢 28 日における標準養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)において JIS A 1108, JIS A 1149 に準拠して測定



(A) 供試体形状



(B) 試験状況

図-1 持続載荷試験の概要

クリープひずみを抽出するため、圧縮応力を導入した供試体と同一形状の圧縮応力を導入しない供試体も製作し、圧縮応力を導入した供試体と同様の方法でコンクリートひずみを測定した。

角柱供試体に導入する圧縮応力を決定するため、また、強度発現の推移を確認するため、材齢 3, 7, 28, 91, 182, 365, 910 日の時点で、圧縮強度を JIS A 1108, ヤング係数を JIS A 1149 に準拠して測定した。

供試体の養生方法は、材齢 3 日までは温度 20°Cの実験室内で養生マットを用いた湿潤養生、その後は温湿度の管理のされていない実験室内で気中養生とした。材齢 910 日までの実験室の温度の平均値は 18.5°C, 湿度の平均値は 55.8%であった。

### 3.1.3 実験結果

#### (1) 圧縮強度とヤング係数

圧縮強度試験の結果を図-2 に示す。図-2(A)によると、圧縮強度は、いずれの配合においても、材齢 3 日で目標値の 30N/mm<sup>2</sup>を超えた。その後、圧縮強度は材齢 91 日までは増加傾向にあり、材齢 182 日から材齢 910 日にかけては若干変動しつつも同程度で推移した。配合間の比較では、高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 と H35B650 の圧縮強度が材齢 3 日で他の配合よりも小さくなったが、その後は同程度か若干大き

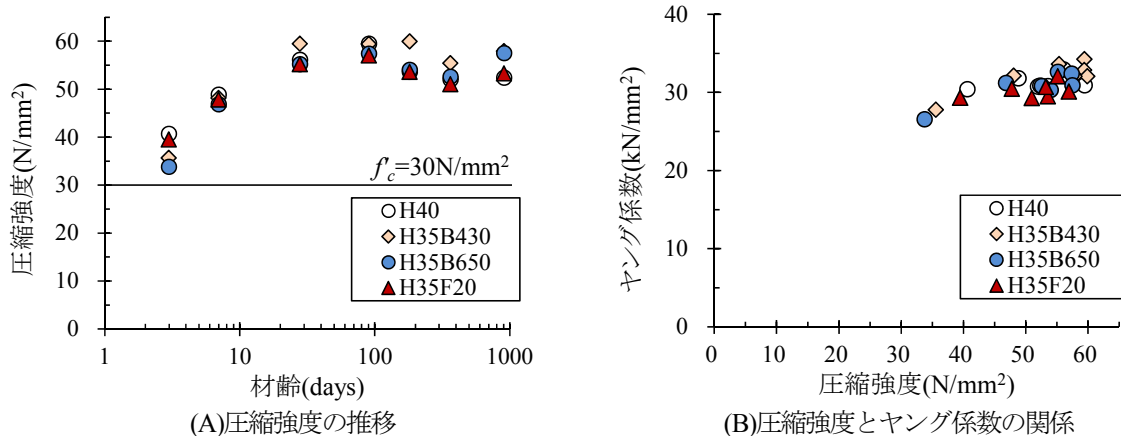


図-2 圧縮強度試験の結果

くなった。また、図-2(B)によると、円柱供試体の圧縮強度とヤング係数の関係は、混和材の使用有無にかかわらず同傾向であったと考えられる。

## (2) 単位応力あたりのクリープひずみ

材齢 3, 7, 28, 365 日から載荷を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみを図-3 に示す。同図では、式(1)を用いて求めた単位応力あたりのクリープひずみの推移を示した。すなわち、圧縮応力を導入していない供試体のひずみ ( $\varepsilon_{sh}$ , 図-4) を収縮に起因するひずみと仮定し、圧縮応力を導入した供試体のひずみ ( $\varepsilon$ ) から  $\varepsilon_{sh}$  と載荷時の弾性ひずみ ( $\varepsilon_{ci}$ ) を差し引いてクリープひずみ ( $\varepsilon_{cc}$ ) を求めた。ただし、材齢 7 日から載荷を開始した H35F20 については、計測器が不良となったため結果を未記載とした。

$$\frac{\varepsilon_{cc}(t-t_0)}{\sigma_c} = \frac{\varepsilon(t-t_0) - \{\varepsilon_{sh}(t) - \varepsilon_{sh}(t_0)\} - \varepsilon_{ci}(t_0)}{\sigma_c} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{cc}/\sigma_c$ : 単位応力あたりのクリープひずみ ( $\times 10^{-6}/\text{N/mm}^2$ )、 $\varepsilon_{cc}$ : クリープひずみ ( $\times 10^{-6}$ )、 $\sigma_c$ : 圧縮応力 ( $\text{N/mm}^2$ )、 $\varepsilon$ : 圧縮応力を導入した供試体のひずみの測定値 ( $\times 10^{-6}$ )、 $\varepsilon_{sh}$ : 圧縮応力を導入していない供試体のひずみの測定値 ( $\times 10^{-6}$ , 図-4)、 $\varepsilon_{ci}$ : 載荷時の弾性ひずみの測定値 ( $\times 10^{-6}$ )、 $t$ : 測定時の材齢(days)、 $t_0$ : 載荷開始時の材齢(days)である。

材齢 3 日から載荷を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみは、早強ポルトランドセメントのみを用いた H40 とフライアッシュを用いた H35F20 で同程度となり、高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 と H35B650 ではこれらよりも小さくなった。図-2(A)によると、圧縮強度は材齢 3 日では H35B430 と H35B650 で小さくなったが、その後の配合間の差は減少した。H35B430 と H35B650 では H40 や H35F20 よりも材齢 3 日以降の圧縮強度の増加量が大きく、その後の単位応力あたりのクリープひずみの増加量が小さくなったためと考えられる。

また、材齢 7, 28 日から載荷を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみは、早強ポルトランドセメントのみを用いた H40 と比較して、混和材を用いた H35B430, H35B650, H35F20 で小さくなった。材

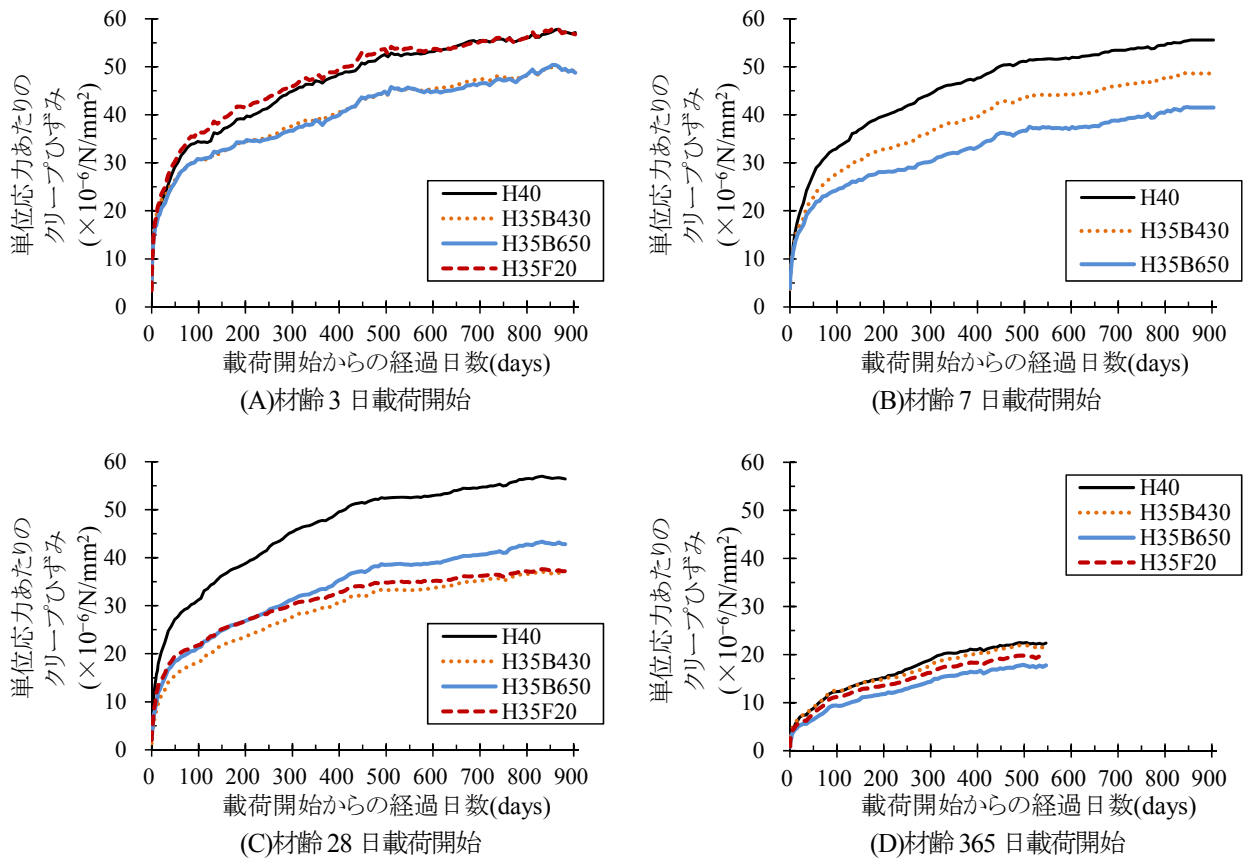


図-3 単位応力あたりのクリープひずみ

齢 7 日以下の圧縮強度は配合間の差が減少したが、混和材を用いた供試体ではその後の強度発現とともに細孔構造が緻密になり単位応力あたりのクリープひずみが小さくなったのではないかと推察される。

一方、材齢 365 日から荷重を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみは、これ以前に荷重を開始した供試体よりも大幅に小さく、配合間の差も減少した。材齢 28 日までに荷重を開始した供試体の単位応力あたりのクリープひずみは、荷重開始からの経過日数が 100 日前後までの期間で配合間の差が生じており、その後はこの差を保った状態で徐々に増加した。このため、材齢 365 日のような長期材齢で荷重を開始した供試体では、単位応力あたりのクリープひずみの増加量自体が小さく、混和材の使用有無の違いによる単位応力あたりのクリープひずみの差も小さくなったと考えられる。

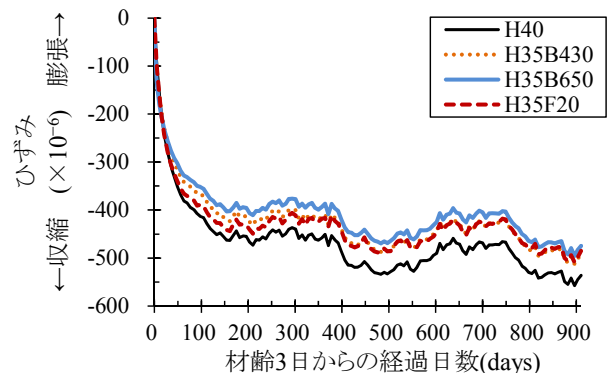


図-4 圧縮応力を導入していない供試体のひずみ

### (3) クリープ係数

材齢 10,000 日のクリープ係数について、持続荷重試験の結果から求めた推定値とコンクリート標準示方書<sup>3)</sup>と道路橋示方書<sup>4)</sup>の予測式から求めた計算値を図-5 に示す。持続荷重試験の結果から求めた推定値につい

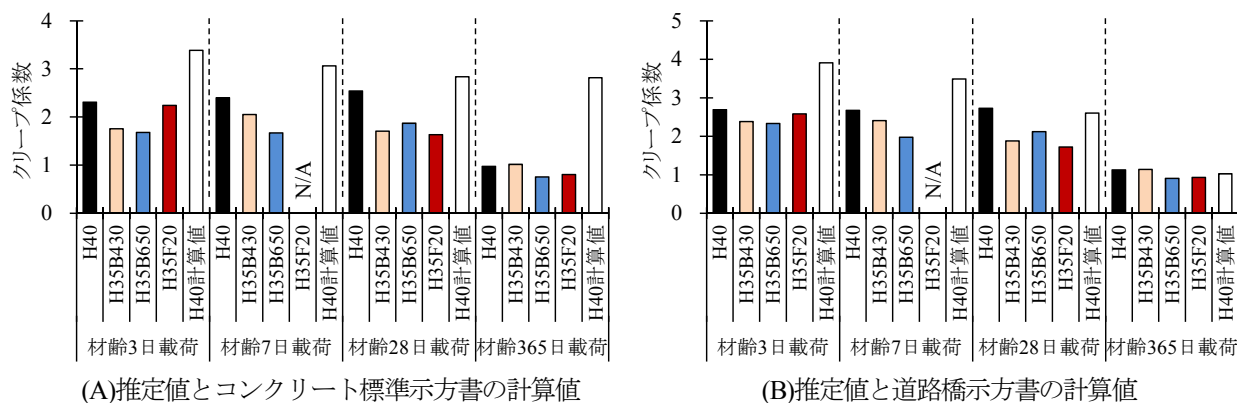


図-5 材齢10,000日のクリープ係数の推定値と計算値

では、式(2)を用いて単位応力あたりのクリープひずみからクリープ係数を得て、この結果をJIS A 1157を参考に式(3)を用いて回帰分析して求めた。また、クリープ係数の計算値については、早強ポルトランドセメントのみを用いたH40を対象として求めた。なお、温度には、実験室の平均温度である18.5°Cを用いた。

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{cc}(t-t_0)}{\sigma_c} \cdot E_c \quad (2)$$

ここに、 $\varphi$ ：クリープ係数、 $E_c$ ：ヤング係数(道路橋示方書では標準養生した供試体の材齢28日の値(表-1)、コンクリート標準示方書では材齢3日まで湿潤養生した供試体の載荷開始時の値)である。

$$\varphi_t = A \cdot \log_e(t+1) + B \quad (3)$$

ここに、 $\varphi_t$ ：クリープ係数、 $t$ ：載荷開始からの経過日数、 $A$ 、 $B$ ：回帰分析によって得られる定数である。

混和材を用いたH35B430、H35B650、H35F20のクリープ係数は、載荷開始材齢にかかわらず、早強ポルトランドセメントのみを用いたH40と同程度かこれよりも小さくなった。このように混和材を用いた供試体のクリープ係数が小さくなる傾向は、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換した供試体を用いて行われた過去の実験結果<sup>13)~15)</sup>とも一致する。また、混和材を用いた供試体のクリープ係数は、各予測式から得られた早強ポルトランドセメントのみを用いたH40のクリープ係数の計算値よりも小さくなった。このため、混和材を用いたコンクリートのクリープ係数は、既存の予測式から得られるポルトランドセメントのみを用いたコンクリートのクリープ係数の計算値よりも小さくなると考えられる。

次に、載荷開始材齢の影響を比較すると、若干のばらつきはあるが、載荷開始材齢の遅い供試体のクリープ係数は、載荷開始材齢の早い供試体と比較して同程度か小さくなった。載荷開始材齢の遅い供試体のクリープ係数が小さくなる傾向は、材齢28日に載荷を開始した供試体と材齢365日に載荷を開始した供試体の間で顕著に現れた。この傾向は、道路橋示方書<sup>4)</sup>の計算値にも現れたが、コンクリート標準示方書の計算値には現れなかった。この原因は、道路橋示方書<sup>4)</sup>の予測式では載荷開始材齢が遅いほどクリープ係数を小さく予測することとしているが、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>の予測式ではこのような載荷開始材齢の影響を考慮

していないためではないかと推察される。既存の予測式は国内外で様々なものが提案されており、その予測精度も様々であると考えられるため、適用にあたっては各々の特徴を適切に把握しておく必要があると考えられる。

### 3.2 収縮試験 (シリーズ I)

#### 3.2.1 実験方法

収縮試験 (シリーズ I) では、混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみの進行を個別に明らかにすることを目的として、水中養生の終了直後から2種類の養生を行った角柱供試体 (100×100×400mm) のひずみを測定した。一般的な乾燥収縮ひずみ測定用の供試体と同様に材齢7日まで水温20℃の養生槽で水中養生を行い、水中養生の終了直後から温度20℃、湿度60%の恒温恒湿槽内で乾燥させた供試体の収縮ひずみ (LCD) と、水中養生の終了直後にアルミテープで封緘して上記と同じ恒温恒湿槽に保管した供試体の自己収縮ひずみ (LCS) である。前者の収縮ひずみ (LCD) は乾燥収縮と自己収縮の両方に起因する全ひずみであるが、後者の自己収縮ひずみ (LCS) は自己収縮のみに起因するひずみとみなすことができる。このため、収縮ひずみ (LCD) から自己収縮ひずみ (LCS) を差し引いた「ひずみ差 (LCD-LCS)」を乾燥収縮のみに起因するひずみと仮定し、乾燥収縮あるいは自己収縮ひずみに起因するひずみの挙動を把握することを試みた。

収縮ひずみ (LCD) は JIS A 1129 のダイヤルゲージ方法、自己収縮ひずみ (LCS) は供試体の中心部に水平配置した埋込型ひずみ計で測定を行い、各条件で2体ずつの供試体の平均値を用いて検討を行った。各ひずみの測定は、水中養生の終了直後から開始した。なお、ここで用いた供試体は、前述の持続荷重試験に用いた供試体と同時に製作したものである。

#### 3.2.2 実験結果

収縮ひずみ (LCD) の測定結果を図-6(A)に示す。同図では、横軸の基点を水中養生の終了時の材齢7日

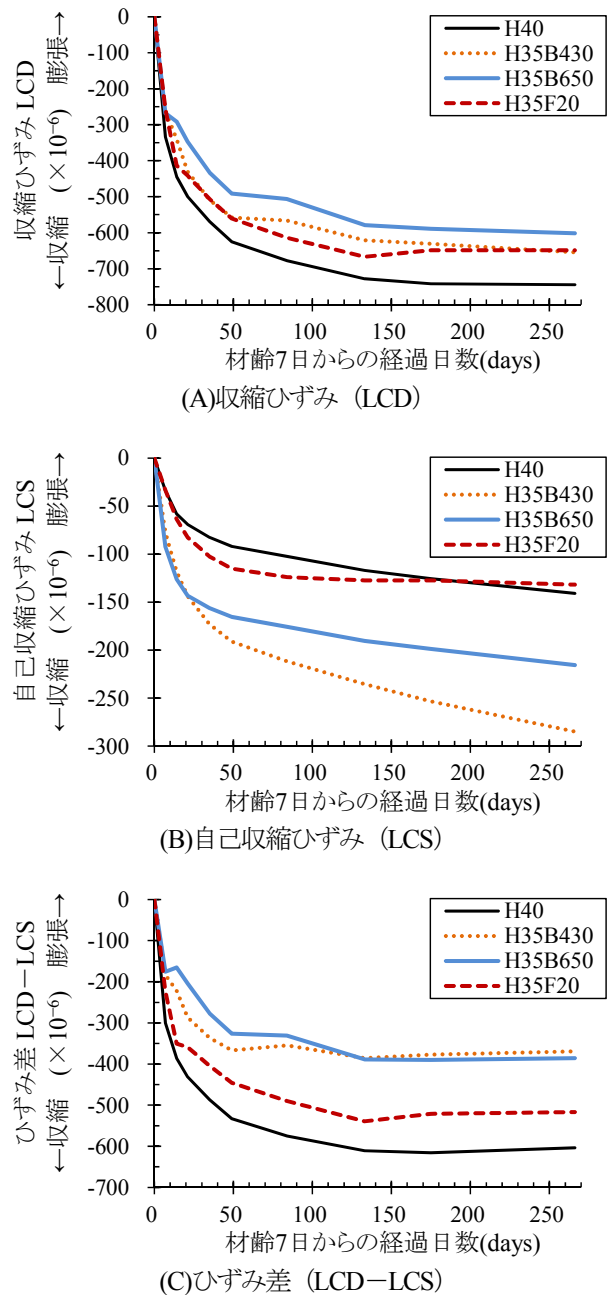


図-6 収縮試験 (シリーズ I) の結果

表-3 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	始発時間 (時:分)	終結時間 (時:分)	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S						G
			HPC	BS4	BS6	FA							
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	15.5	5.7	20.1	5:49	7:44
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	700		12.0	4.5	21.0	5:56	7:52
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	695		12.0	4.0	21.0	4:38	6:44
H35F20			377 (80%)	—	—	94 (20%)	682		14.0	3.8	20.8	6:12	8:42

※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=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,580cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,410cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.08%(無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=6,170cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.51%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,810cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の( )内の百分率は各結合材の結合材に占める質量%を表示

※化学混和剤: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの)と空気連行剤(H35F20以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, H35F20で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量を調整

※スランプ: JISA 1101 に準拠して測定, 空気量: JISA 1128 に準拠して測定, 温度: 練上がり直後のフレッシュコンクリートで温度計を用いて測定, 凝結時間: JISA 1147 に準拠して測定

とした。収縮ひずみ (LCD) は自己収縮と乾燥収縮の両方に起因する全ひずみであり、早強ポルトランドセメントのみを用いた H40 よりも混和材を用いた H35B430, H35B650, H35F20 で小さくなった。混和材の使用によって全ひずみは減少する傾向にあったことがわかる。

次に、自己収縮ひずみ (LCS) の測定結果を図-6(B)に示す。また、収縮ひずみ (LCD, 図-6(A)) と自己収縮ひずみ (LCS, 図-6(B)) の差であるひずみ差 (LCD-LCS) を図-6(C)に示す。これらの図でも横軸の基点は水中養生を終えた材齢 7 日とした。前述したように、自己収縮ひずみ (LCS) は自己収縮起因分、ひずみ差 (LCD-LCS) は乾燥収縮起因分のひずみと仮定した。自己収縮ひずみ (LCS) は、早強ポルトランドセメントのみを用いた H40 との比較では、高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 と H35B650 で大きく、フライアッシュを用いた H35F20 で同程度となった。一方、乾燥収縮起因分のひずみであるひずみ差 (LCD-LCS) は、H40 よりも H35B430, H35B650, H35F20 で小さく、特に H35B430 と H35B650 で大幅に小さくなった。混和材の使用は乾燥収縮に起因するひずみの減少に寄与し、この傾向は高炉スラグ微粉末を用いた供試体で特に明確に現れたが、逆に高炉スラグ微粉末を用いた供試体では自己収縮に起因するひずみが増加したことがわかる。混和材の使用によって全ひずみは減少する傾向にあったが、これに占める自己収縮あるいは乾燥収縮に起因するひずみの構成は用いる混和材の種類によって大幅に異なると考えられる。

### 3.3 収縮試験 (シリーズ II)

#### 3.3.1 実験方法

コンクリートの配合と基礎物性を表-3 に示す。収縮試験 (シリーズ II) では、各混和材を用いたコンクリートの自己収縮ひずみに打込み後の温度履歴が与える影響を把握することを目的として、文献 16)を参考とした小型供試体 (100×100×400mm) と、発泡スチロール製型枠 (発泡倍率 90 倍, 厚さ 200mm) で簡易断熱を行うことによってマスコンクリートを模擬した高温履歴を与えたマスブロック供試体 (400×400×400mm, 図-7) の自己収縮ひずみを測定した。角柱供試体は温度 20°Cの実験室、マスブロック供試体は温



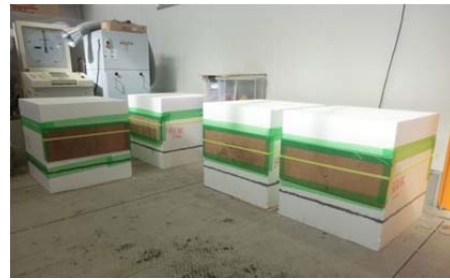
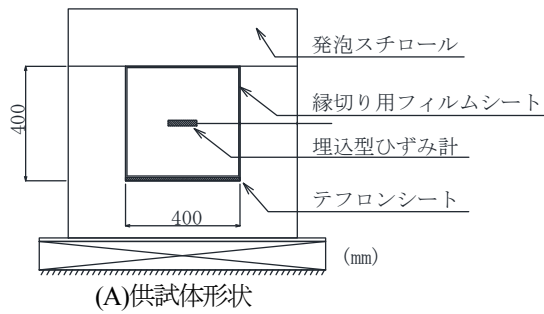


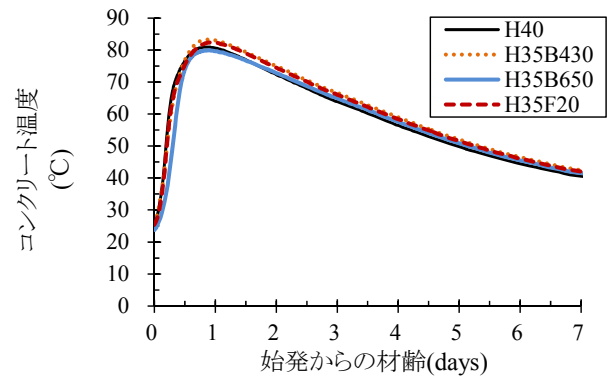
図-7 収縮試験 (シリーズII) の概要

湿度の管理のされていない実験室でコンクリート打込み直後から封緘状態にして保管し、各条件で1体ずつの供試体の中心部に水平配置した埋込型ひずみ計で自己収縮ひずみを測定した。

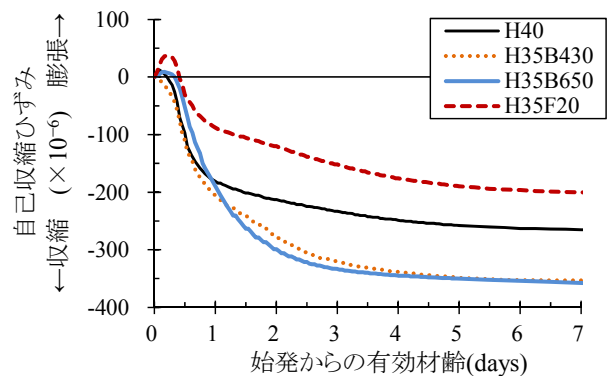
### 3.3.2 実験結果

マスブロック供試体の中心部で測定したコンクリート温度を図-8(A)に示す。同図では横軸の基点を凝結試験で得られた始発時間とした。温度上昇曲線は、混和材の使用有無にかかわらず、ほぼ同一形状となり、供試体中心部のコンクリート温度は約80℃まで上昇した後に低下した。今回の実験では、材齢3日の圧縮強度を30N/mm<sup>2</sup>以上とするために、W/Bを早強ポルトランドセメントのみを用いたH40で40%、混和材を用いたH35B430、H35B650、H35F20で35%とした。一般に混和材の使用は水和発熱の低減に効果的とされるが、比較的初期の材齢の圧縮強度を確保するために混和材を用いた配合でW/Bを低下させた場合には、混和材の使用による水和発熱の低減効果は明確ではなかった。一方、小型供試体の中心部のコンクリート温度は25℃程度まで増加し、その後は20℃前後で推移した。マスブロック供試体と小型供試体に用いたコンクリートの体積が異なるため厳密な比較は困難であるが、簡易断熱の有無によって両供試体の温度履歴は大幅に異なった。

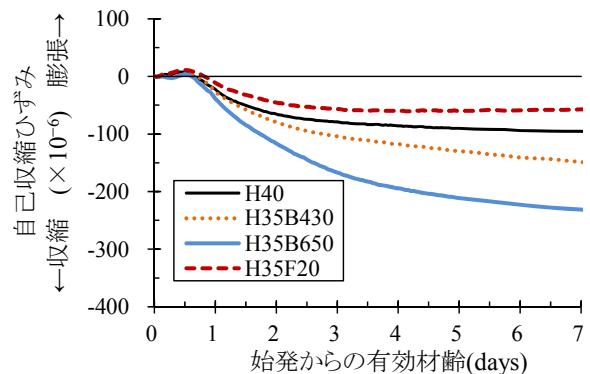
マスブロック供試体の自己収縮ひずみの測定結果を図-8(B)、小型供試体の自己収縮ひずみの測定結



(A)マスブロック供試体の中心部の温度



(B)マスブロック供試体の自己収縮ひずみ



(C)小型供試体の自己収縮ひずみ

図-8 収縮試験 (シリーズII) の結果

果を図-8(C)に示す。各供試体の打込み後の温度履歴が大幅に異なったため、これらの図では横軸を式(4)で計算した有効材齢とし、若材齢で自己収縮ひずみの増加が顕著であったため有効材齢7日までの結果を示した。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (4)$$

ここに、 $t_e$ ：有効材齢(days)， $\Delta t_i$ ：ある一定のコンクリート温度が継続する期間(days)， $T(\Delta t_i)$ ： $\Delta t_i$ の間継続するコンクリート温度(°C)， $T_0$ ：1°Cである。

自己収縮ひずみは、早強ポルトランドセメントのみを用いた H40 との比較では、高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 と H35B650 で大きく、フライアッシュを用いた H35F20 で小さくなった。この傾向は両供試体で共通した。しかし、有効材齢7日までの両供試体の自己収縮ひずみを比較すると、マスブロック供試体では自己収縮ひずみの進行速度と最終値が大きく、この傾向が特に高炉スラグ微粉末を用いた供試体で明確に現れたことがわかる。すなわち、式(4)で計算した有効材齢を用いた比較においても自己収縮ひずみの進行はコンクリートの受ける温度履歴によって傾向が異なり、雰囲気温度を 20°C一定とした実験結果のみからでは高温時の任意材齢における自己収縮ひずみの推定が困難となる可能性が高い。マスコンクリートの温度ひび割れの発生リスクを評価する際には、このような自己収縮ひずみの挙動を適切に考慮する必要があると考えられる。

なお、若材齢の水和発熱と自己収縮に伴う体積変化に起因する拘束応力の発生メカニズムとその評価方法については、付録-9において、鉄筋拘束試験と FEM 解析を行って検討している。

#### 4. まとめ

この付録では、混和材を用いたコンクリートのクリープ・収縮特性の検討例として、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換し、材齢3日の圧縮強度を同程度とした供試体を用いた実験の結果を報告した。この実験の範囲内で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クリープ係数は、載荷開始材齢の違いにかかわらず、早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して同程度か小さくなる傾向にあった。また、載荷開始材齢を遅くすると、クリープ係数は小さくなる傾向にあった。
2. 混和材を用いたコンクリートの乾燥収縮ひずみと自己収縮ひずみの挙動は、早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートとは傾向が異なり、混和材を用いたコンクリートでは乾燥収縮ひずみが減少したが、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートでは自己収縮ひずみが増加した。
3. 自己収縮ひずみは打込み後の温度履歴の影響を受け、簡易断熱によってマスコンクリートを模擬した高温履歴を与えた供試体では、自己収縮ひずみの進行速度と最終値が大きくなった。この傾向は、特に高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートで明確に現れた。

## 参考文献

- 1) 中村英佑, 石井豪, 鈴木雅博, 渡辺博志: 混和材を用いたコンクリートのクリープ・収縮に関する実験的研究, プレストレストコンクリート, Vol.56, No.3, pp.54-60, 2014
- 2) 中村英佑, 鈴木聡, 鈴木雅博, 渡辺博志, 混和材を用いたコンクリートの収縮とクリープに関する実験的研究, 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.503-508, 2013
- 3) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編], 2013
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I 共通編・IIIコンクリート橋編), 2012
- 5) JIS A 1157:2010: コンクリートの圧縮クリープ試験方法, 2010
- 6) ACI 209R-92(Reapproved 2008): Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures, American Concrete Institute, 2008
- 7) AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications, Fifth Edition, 2010
- 8) fib: Model Code for Concrete Structures 2010, First Edition, 2013
- 9) ISO 1920-9: Testing of Concrete—Part 9: Determination of Creep of Concrete Cylinders in Compression, 2009
- 10) CEB: CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, CEB Bulletin No.125E, 1978
- 11) 日本コンクリート工学協会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, pp.93-114, 2008
- 12) 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室, プレストレスト・コンクリート建設業協会: 高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書—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道路橋の設計指針(案)一, 共同研究報告書第138号, pp.29-37, 1995
- 13) 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, Volo.33, No.1, pp.197-202, 2011
- 14) 鶴田浩章, 松下博通, 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
- 15) 日本材料学会: 高炉スラグ微粉末を使用した高耐久性プレストレストコンクリート構造物の開発, pp.24-25, 1998
- 16) 日本コンクリート工学協会: (仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法, 超流動コンクリート研究委員会報告書(II), pp.209-210, 1994

## 付録－9 温度ひび割れに対する抵抗性

### 1. はじめに

この付録では、混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性と温度ひび割れ発生リスクの評価方法について検討した結果を示す。

付録－8 で報告したように、マスコンクリートを模擬した高温履歴を与えた供試体において、特に高炉スラグ微粉末を用いた場合に、自己収縮ひずみの進行速度と最終値が大きくなった。若材齢の温度ひび割れの発生リスクを評価するためには、このような自己収縮ひずみの挙動に加えて、コンクリートの温度変化、クリープによる応力緩和、ヤング係数の発現等の影響を適切に考慮し、若材齢のコンクリートに発生する応力を推定する必要がある。しかし、混和材を用いたコンクリートにおいて、若材齢の水和発熱や自己収縮に伴う体積変化に起因する拘束応力の発生メカニズムや膨張材による温度ひび割れの抑制効果は必ずしも明確ではない。また、FEM 解析によって温度ひび割れの発生リスクを評価するためにはコンクリートの物性値が必要となるが、既存の文献<sup>1), 2)</sup>では、例えば、プレストレストコンクリートへの適用が想定される早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリートの物性値が示されていない。

この付録では、マスコンクリートを模擬した高温履歴を与えた供試体の鉄筋拘束試験を行い、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で置換したコンクリートの初期応力の発生メカニズムと膨張材による温度ひび割れの抑制効果について検討した結果<sup>3)</sup>を示す。また、この実験結果と FEM 解析で得られた拘束応力の推定結果を比較し、FEM 解析による温度ひび割れ発生リスクの評価方法について検討した結果<sup>4)</sup>を示す。

### 2. 鉄筋拘束試験による拘束応力の発生メカニズムの検討

#### 2.1 実験方法

コンクリートの配合と基礎物性を表－1 に示す。付録－8 で報告したように、特に高炉スラグ微粉末を用いた供試体で自己収縮ひずみの進行速度と最終値が大きくなることが確認されたため、膨張材を用いた配合（H35B650EX）を追加して膨張材による温度ひび割れの抑制効果を検討することとした。水結合材比は、付録－8 と同様に材齢 3 日の圧縮強度を同等とするため、早強ポルトランドセメント単味の H40 で 40%とし、その他の配合で 35%とした。

供試体の形状を図－1、鉄筋拘束試験の実施状況を写真－1 に示す。供試体は、拘束供試体と無拘束供試体の 2 種類である。過去の実験<sup>5), 6)</sup>を参考に、拘束供試体では、拘束用鋼材として異形鉄筋（D32）あるいはインバー鋼材（φ30、熱膨張係数  $0.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）を供試体の断面中心に配置した。実構造物になるべく近い状態で応力を測定するため拘束用鋼材の全長で定着を確保し、ひずみゲージと熱電対を拘束用鋼材の長さ方向

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							スランプ (cm)	空気量 (%)	凝結時間 (時:分)		熱膨張係数 (×10 <sup>-6</sup> /°C)	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + EX + FA					S			G	始発		終結
			HPC	BS4	BS6	EX	FA							
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	—	758	968	12.0	4.2	5:45	7:44	12.1
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	—	700		13.5	4.4	5:44	7:28	12.8
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	—	695		12.5	3.7	5:04	6:55	12.6
H35B650EX			226 (48%)	—	226 (48%)	20 (4%)	—	696		13.5	3.0	5:16	7:27	12.5
H35F20			377 (80%)	—	—	—	94 (20%)	682		17.0	4.9	6:36	8:29	11.0

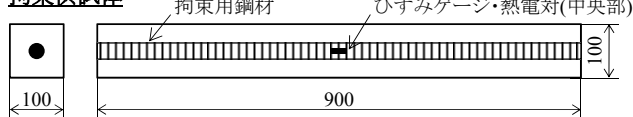
※W: 上水道水(茨城県つくば市), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,600cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,440cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.10%(無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=5,970cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=3.10%(無水せっこう添加)), EX: 膨張材(石灰系, 単位量 20kg/m<sup>3</sup> となるよう HPC と BS6 を均等に置換), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.31g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,000cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産産砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の( )内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

※化学混和剤: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの)と空気連行剤(H35F20 以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, H35F20 で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量を調整

※スランプ: JIS A 1101 に準拠して測定, 空気量: JIS A 1128 に準拠して測定, 凝結時間: JIS A 1147 に準拠して測定

※熱膨張係数: 封緘養生した角柱供試体(100×100×400mm)を用いて材齢 91 日以降に温度範囲 15~55°C で測定

拘束供試体



無拘束供試体

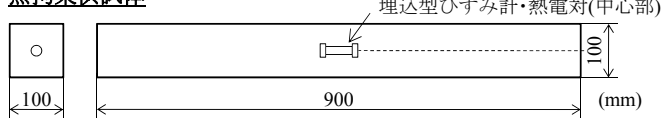


図-1 拘束供試体と無拘束供試体の形状



写真-1 鉄筋拘束試験の実施状況

中央部に設置した。コンクリートの拘束応力は、事前に測定した拘束用鋼材の荷重とひずみの関係を用いて拘束用鋼材のひずみから荷重を求め、この荷重をコンクリートの断面積で除して計算した。一方、無拘束供試体では、埋込型ひずみ計と熱電対を供試体中心部に設置してコンクリートのひずみと温度を測定した。

マスコンクリートの高温履歴を模擬するため、発泡スチロール製型枠(発泡倍率 90 倍, 厚さ 200mm)にコンクリートを打込み、直ちに封緘状態として測定を開始した。供試体の変形を型枠で拘束しないように、型枠内部の底面にテフロンシート、これ以外の型枠と供試体の接触面にポリエステルフィルムを設置した。練混ぜ、打込み、測定は温度 20°C の実験室で行い、その後、材齢 91 日の時点でコンクリート打込み面側の供試体表面でひび割れの発生状況を確認した。

また、若材齢の強度特性の経時的な変化を把握するため、圧縮強度とヤング係数、割裂引張強度を終結直後、注水から材齢 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 7, 28 日の 11 時点で測定した。圧縮強度とヤング係数は、コンクリート打込み直後から温度 20°C の実験室で封緘養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)と JASS 5 T-606<sup>7)</sup>に準拠した発泡スチロール製容器で簡易断熱養生を行った円柱供試体(φ100×200mm)を用い、JIS A 1108 と JIS A 1149 に準拠して測定した。割裂引張強度は、温度 20°C の実験室で封緘養生を行った円柱供試体(φ150×150mm)を用い、JIS A 1113 に準拠して測定した。

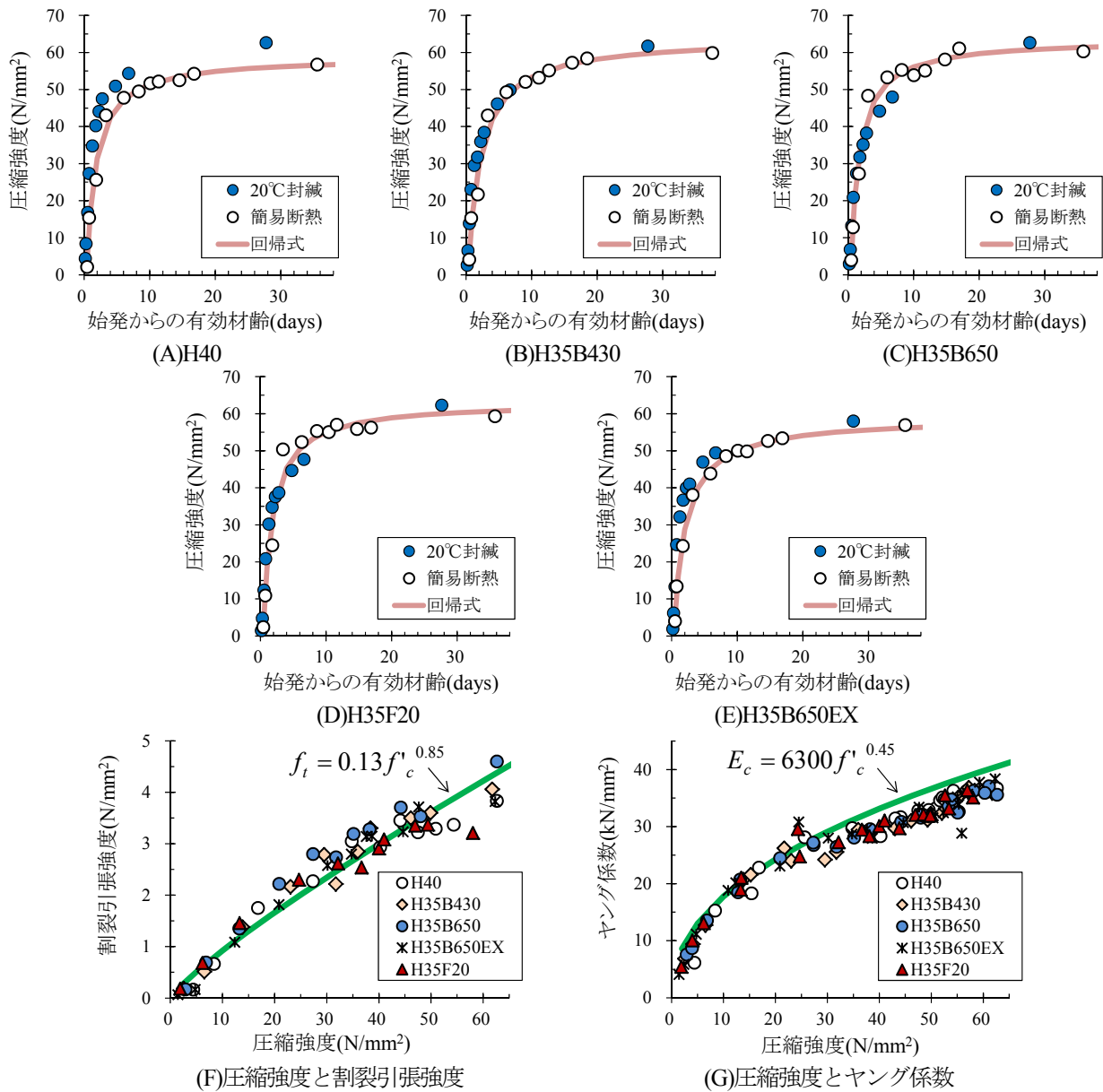


図-2 強度試験の結果

## 2.2 強度試験の結果

圧縮強度の推移を配合ごとに図-2(A)~(E)、圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-2(F)、圧縮強度とヤング係数の関係を図-2(G)に示す。無拘束供試体と簡易断熱養生を行った円柱供試体の最高温度が同程度であったため、図-2(A)~(E)では簡易断熱養生を行った円柱供試体の圧縮強度を式(1)で回帰分析して求めた計算値も併記した。また、図-2(F)には式(2)、図-2(G)には式(3)で文献1)の係数を用いた場合の計算値を併記した。なお、有効材齢は式(4)で求めた。

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b \cdot (t_e - S_f)} f'_c(t_{28}) \quad (1)$$

$$f_t(t_e) = C_1 \cdot f'_c(t_e)^{C_2} \quad (2)$$

$$E_c(t_e) = C_3 \cdot f'_c(t_e)^{C_4} \quad (3)$$

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (4)$$

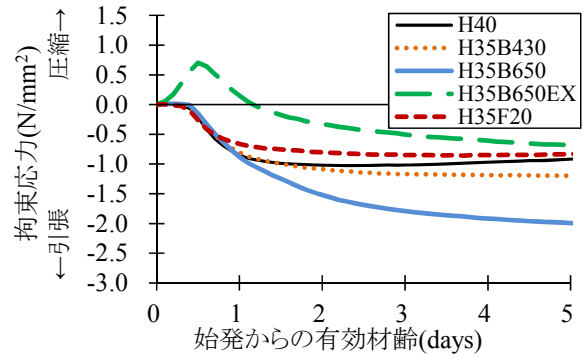
ここに、 $f'_c(t_e)$ : 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $t_e$ : 有効材齢(days),  $f'_c(t_{28})$ : 材齢 28 日の圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $f_t(t_e)$ : 割裂引張強度(N/mm<sup>2</sup>),  $E_c(t_e)$ : ヤング係数(kN/mm<sup>2</sup>),  $\Delta t_i$ : コンクリート温度の継続時間(days),  $T(\Delta t_i)$ :  $\Delta t_i$ の間継続するコンクリート温度(°C),  $T_0$ : 1°C,  $a$ ,  $b$ ,  $S_f$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ : 係数である。

図-2(A)~(E)によると、20°C封緘養生を行った供試体と簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度は、有効材齢で整理すると、初期材齢では温度履歴にかかわらず同様の傾向で増加したことがわかる。高温履歴を受ける場合にも初期材齢の強度発現は有効材齢を用いた推定が可能と考えられる。一方、材齢が長くなると圧縮強度の推移は異なる傾向を示し、混和材を用いた供試体では早強ポルトランドセメント単味の供試体と比較して養生条件の違いによる圧縮強度の差が小さくなった。混和材の使用によって強度発現が継続して、高温履歴を受けた後の強度発現の停滞が緩和されたためと考えられる。

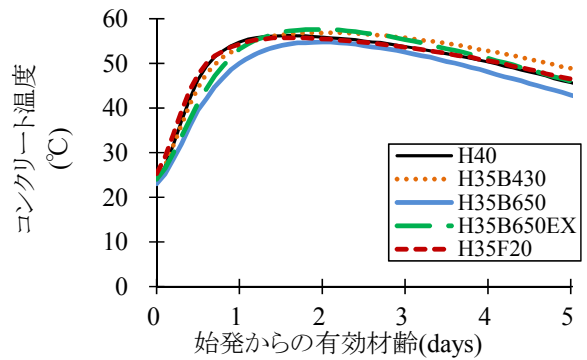
また、圧縮強度と割裂引張強度、ヤング係数の関係は、混和材や膨張材の使用有無にかかわらず、同傾向であった。初期材齢では、式(2)と式(3)を用いて圧縮強度から割裂引張強度とヤング係数を推定できると考えられる。

### 2.3 異形鉄筋を用いた鉄筋拘束試験の結果

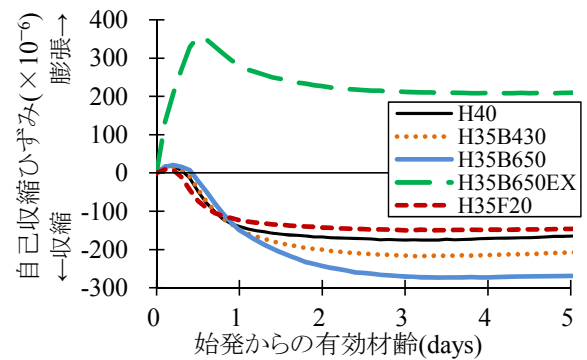
異形鉄筋を用いた拘束供試体の拘束応力とコンクリート温度、無拘束供試体の自己収縮ひずみを図-3に示す。有効材齢 5 日の拘束応力は、早強ポルトランドセメントのみを用いた H40 と比較すると、フライアッシュを用いた H35F20 で同程度、高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 と H35B650 で大きく、



(A) 拘束供試体の拘束応力



(B) 拘束供試体のコンクリート温度



(C) 無拘束供試体の自己収縮ひずみ

図-3 異形鉄筋を用いた拘束試験の結果

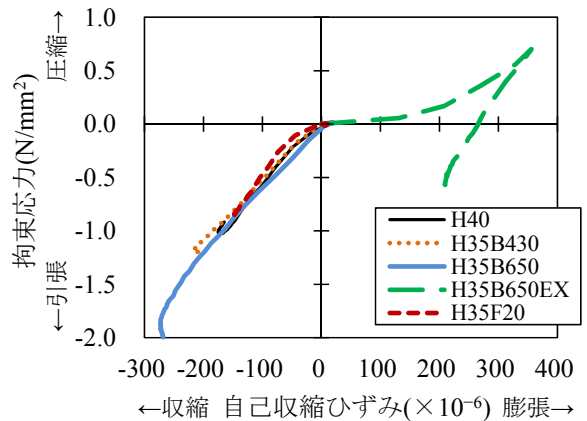


図-4 拘束応力と自己収縮ひずみ

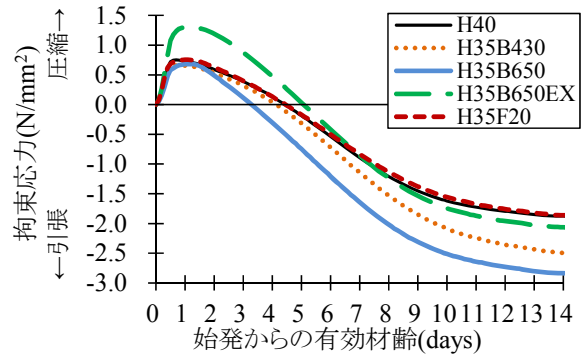
特に高炉スラグ微粉末 6000 を用いた H35B650 で突出して大きくなった。また、拘束応力の大小関係と増加開始時の有効材齢は自己収縮ひずみの傾向とほぼ一致した。コンクリート温度は混和材の置換率が高いほど上昇時の勾配が小さくなったが拘束応力への影響はほとんどなく、自己収縮ひずみが大きいほどコンクリートに発生した拘束応力も大きくなった。

一方、膨張材を用いた H35B650EX の拘束応力は H40 よりも小さく、膨張材の使用による拘束応力の低減効果が認められた。ただし、有効材齢 5 日では H35B650EX の無拘束供試体には膨張ひずみが生じていたが、拘束供試体には引張応力が発生していた。H35B650EX の膨張ひずみは始発から有効材齢 0.5 日程度までの若材齢で生じており、コンクリートのヤング係数が小さいことや若材齢クリープの影響を受けたことによって、若材齢の圧縮応力の発生量よりもその後の収縮による引張応力の発生量が大きくなったためと考えられる。

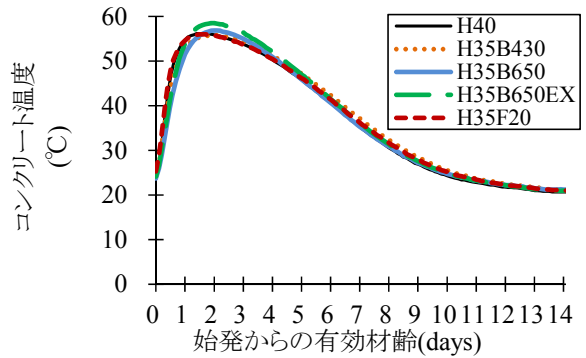
次に、図-3(A)(C)に示した拘束応力と自己収縮ひずみの関係を図-4に示す。H35B650EX 以外の供試体では、混和材の使用有無にかかわらず、自己収縮ひずみと拘束応力の関係の勾配が概ね等しく、自己収縮ひずみの進展とともに拘束応力が増加した。図-3(C)の自己収縮ひずみは、有効材齢 5 日の数値が各配合で異なったが、増加開始時の有効材齢や増加時の勾配は概ね一致した。すなわち、混和材の使用有無にかかわらず、若材齢の自己収縮ひずみの進展と拘束応力の増加は同様の傾向を示し、若材齢クリープによる応力緩和の影響も同程度であったと考えられる。一方、H35B650EX では、前述したように、始発直後に膨張ひずみが急速に発生したが、その際の圧縮応力の増加量は必ずしも大きくなかった。

## 2.4 インバー鋼材を用いた鉄筋拘束試験の結果

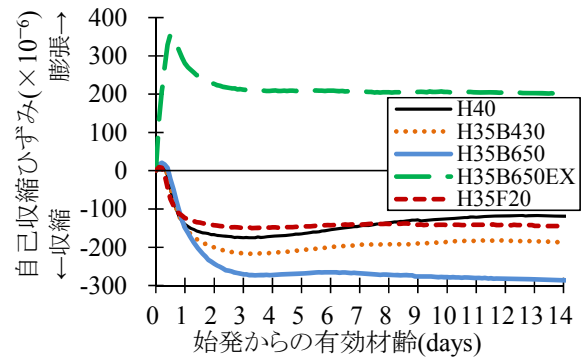
インバー鋼材を用いた拘束供試体の拘束応力とコ



(A) 拘束供試体の拘束応力



(B) 拘束供試体のコンクリート温度



(C) 無拘束供試体の自己収縮ひずみ

図-5 インバー鋼材を用いた拘束試験の結果

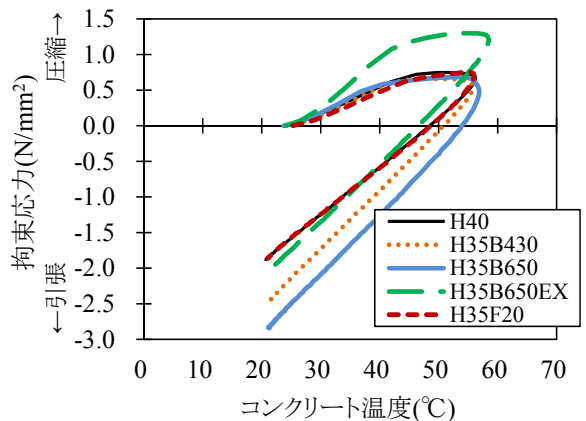


図-6 拘束応力とコンクリート温度



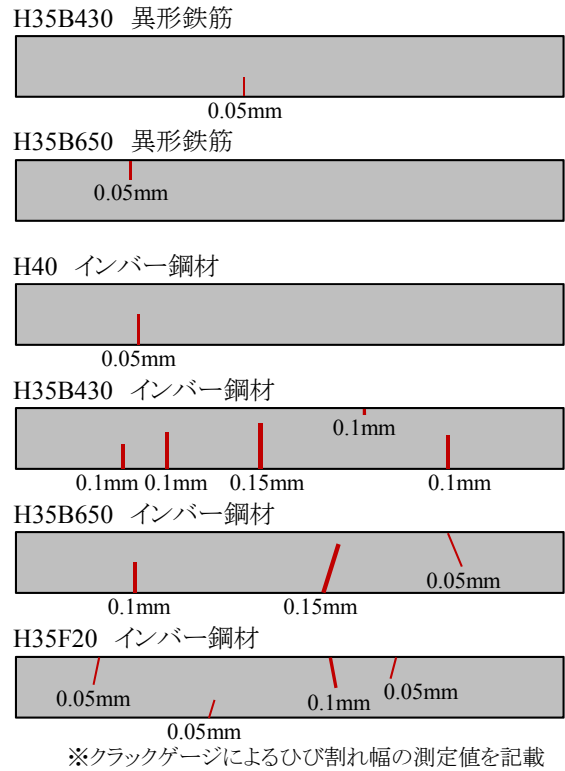
ンクリート温度，無拘束供試体の自己収縮ひずみを図-5に示す。有効材齢14日の拘束応力と自己収縮ひずみは，早強ポルトランドセメントのみを用いたH40と比較すると，異形鉄筋を用いた供試体と同様に，フライアッシュを用いたH35F20で同程度，高炉スラグ微粉末を用いたH35B430とH35B650で大きく，特に高炉スラグ微粉末6000を用いたH35B650で突出して大きくなった。また，材齢3日の圧縮強度を同等とするために水結合材比を調整したことによって，最高温度から有効材齢14日までのコンクリート温度の低下量は配合間でほとんど差がなく，温度降下時の温度ひずみに起因して発生した拘束応力は同程度となったと考えられる。この結果，異形鉄筋を用いた供試体と同様に，自己収縮ひずみが大きい供試体ほど拘束応力も大きくなったと考えられる。

一方，有効材齢14日の膨張材を用いたH35B650EXの拘束応力はH40よりも若干大きくなったがH35B650よりも小さく，膨張材の使用による拘束応力の低減効果が認められた。また，圧縮応力が最大となった後のH35B650EXの拘束応力は，H35B650と概ね平行に推移し，H40よりも変化量が大きくなった。H35B650EXの膨張後の収縮量が同じ期間のH40よりも大きくなったためと考えられる。

次に，図-5(A)(B)に示した拘束応力とコンクリート温度の関係を図-6に示す。若干のばらつきはあるが，コンクリート温度が最高温度に達した後に拘束応力がゼロとなる時点の温度が低いほどその後の引張応力の発生量が小さくなった。文献8)では，コンクリート温度が最高温度に達した後に拘束応力がゼロとなる時点の温度を指標として温度ひび割れに対する抵抗性を定性的に評価する方法が提案されている。自己収縮ひずみが大きくなったH35B430とH35B650では拘束応力がゼロとなる材齢が早くなり，この時点のコンクリート温度も高くなる傾向にあった。このため，拘束応力がゼロとなる時点のコンクリートの温度を比較することによって，自己収縮ひずみの傾向が異なる場合にも引張応力の発生量の違いを定性的に評価できる可能性があると考えられる。

## 2.5 ひび割れ発生状況とひび割れ指数

材齢91日に確認したひび割れの発生状況を図-7，材齢91日までのひび割れ指数の最小値を図-8に示す。



※クラックゲージによるひび割れ幅の測定値を記載  
図-7 供試体上面のひび割れ発生状況

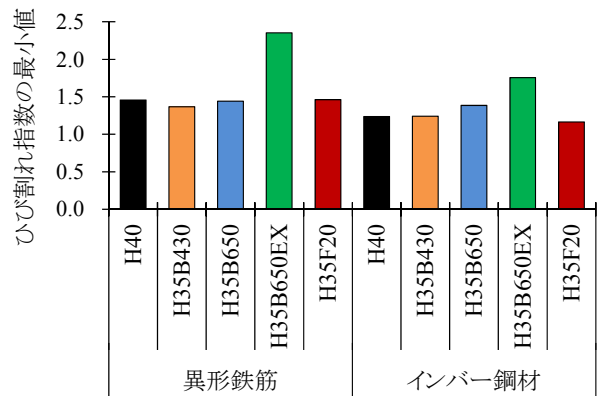


図-8 ひび割れ指数の最小値

ひび割れ指数は、**図-3(A)**と**図-5(A)**に示したコンクリートの拘束応力を割裂引張強度で除して求めた。割裂引張強度は、**図-2(A)~(E)**に示した回帰式を用いて拘束供試体の温度履歴に応じた圧縮強度を推定し、この圧縮強度を配合ごとに求めた式(2)の圧縮強度と割裂引張強度の回帰式に入力して計算した。ここでは発泡スチロール製型枠を用いたためにひび割れの発生を目視で特定することが困難であったが、インバー鋼材を用いた拘束供試体のうち、H35B430では材齢61日、H35B650では材齢57日、H35F20では材齢73日に鋼材ひずみが大幅に変動したため、これらの時点のひび割れ指数を示した。他の拘束供試体は、材齢91日のひび割れ指数が最小となったため、この値を示した。

ひび割れの発生状況に着目すると、異形鉄筋を用いた拘束供試体ではH35B430とH35B650で、インバー鋼材を用いた拘束供試体ではH35B650EX以外の供試体でひび割れが発生したことがわかる。特に高炉スラグ微粉末を用いた拘束供試体ではひび割れの幅が広く、本数が多くなったため、早強ポルトランドセメントのみを用いた拘束供試体と比較して温度ひび割れの発生抑制に向けた配慮が重要であると考えられる。一方、H35B650EXではひび割れの発生は認められず、ひび割れ指数が大きくなり、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末6000で置換した場合にも、膨張材の使用によってひび割れの発生を抑制できたことがわかった。

### 3. FEM 解析による温度ひび割れ発生リスクの評価方法の検討

#### 3.1 解析方法

混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ発生リスクの評価方法を検討するため、前述した実験結果とFEM解析で得られた拘束応力の推定結果を比較する。特に高温履歴を受けた自己収縮ひずみの挙動や膨張材による拘束応力の低減効果の評価方法について検討することとした。

FEM解析は対称性を考慮した**図-9**に示す1/8のモデルを用いて行った。拘束用鋼材（異形鉄筋とインバー鋼材）についても、3次元要素によって断面積が実測値と同一となるようモデル化した。FEM解析の対象期間はコンクリート打込み後28日間とした。

FEM解析に用いるコンクリートの温度履歴や物性値には、可能な限り実測値を用いた。FEM解析に用いたコンクリートの物性値の一覧を**表-2**に示す。若材齢の拘束応力の推定に必要なクリープによる応力緩和の影響については、文献1)の有効ヤング係数法に準拠して考慮した。また、有効材齢については、各供試体のコンクリート温度の実測値から式(4)を用いて求めた。

**付録-8**で報告したように、マスコンクリートを模擬した高温履歴を与えた場合、特に高炉スラグ微粉末を用いた供試体で自己収縮ひずみが大幅に増加したため、自己収縮ひずみの増加挙動の考慮の有無によってFEM解析による拘束応力の推定精度に差が生じる可能性があると考えられた。このため、高温履歴を与えた無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみと**文献 9)**に準拠して20℃一定の環境下で封緘養生した角柱供試体(100×100×400mm)で得られた自己収縮ひずみを用いた場合の拘束応力の推定精度を比較した。

また、膨張材を用いたコンクリートに発生する拘束応力を推定する際には、FEM解析に入力する膨張ひず

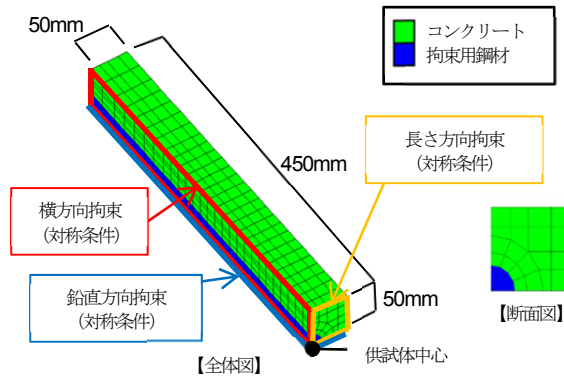


図-9 FEM 解析モデルの概要

表-2 FEM 解析に用いたコンクリートの物性値

物性値	概要
コンクリート温度	各供試体の中央位置でのコンクリート温度の実測値 (図-3(B), 図-5(B)) を使用
圧縮強度	各配合の実測値 (図-2(A)~(E)) を次式 (式(1)) で回帰分析して係数を算出して使用 $f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_{28})$
ヤング係数	各配合の実測値 (図-2(G)) を次式 (式(3)) で回帰分析して係数を算出して使用 $E_c(t_e) = C_3 \cdot f'_c(t_e)^{C_4}$
有効ヤング係数	次式で最高温度時まで $\phi(t_e)=0.42$ , 最高温度に達する有効材齢+1 日以降で $\phi(t_e)=0.65$ として算出して使用 $E_e(t_e) = \phi(t_e) \cdot E_c(t_e)$
自己収縮ひずみ	各配合の無拘束供試体での実測値 (図-3(C), 図-5(C)) を使用
熱膨張係数	実測値 (表-1) を使用
ポアソン比	0.2 (一定値) を使用

表-3 膨張材ひずみの検討ケース

検討ケース	概要
無拘束供試体試験値	無拘束供試体で得られたひずみ (図-3(C), 図-5(C)) を使用
PC 鋼棒拘束供試体試験値	JIS A 6202 附属書 2 と同様に拘束鋼材に PC 鋼棒 $\phi 11$ を用いて簡易断熱養生を行った拘束供試体 (100×100×900mm) で得られたひずみを使用
自己収縮+JIS 試験値	H35B650 の無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみに、JIS A 6202 附属書 2 の試験で得られた膨張ひずみを重ね合わせたひずみを使用
自己収縮+JCI 算定値	H35B650 の無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみに、文献 1) の膨張ひずみ算定式 (早強ポルトランドセメント使用) による算定値を重ね合わせたひずみを使用

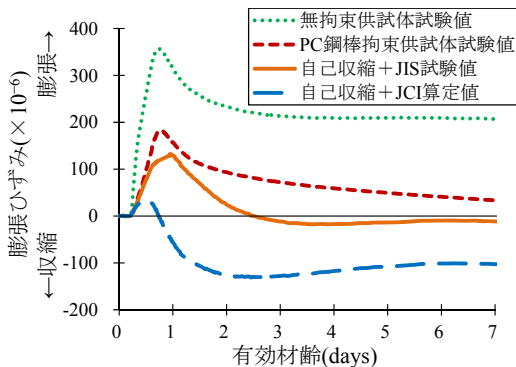


図-10 各検討ケースの膨張ひずみ

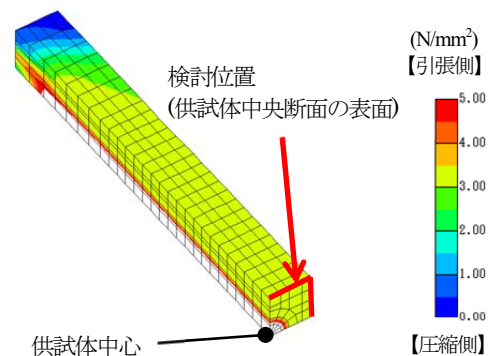


図-11 応力分布の解析結果の一例：H35B650

みを適切に設定する必要がある。この膨張ひずみの設定方法を検討するため、表-3 の 4 種類の検討ケースにおいて拘束応力の推定精度を比較した。各検討ケースの膨張ひずみを図-10 に示す。「無拘束供試体試験

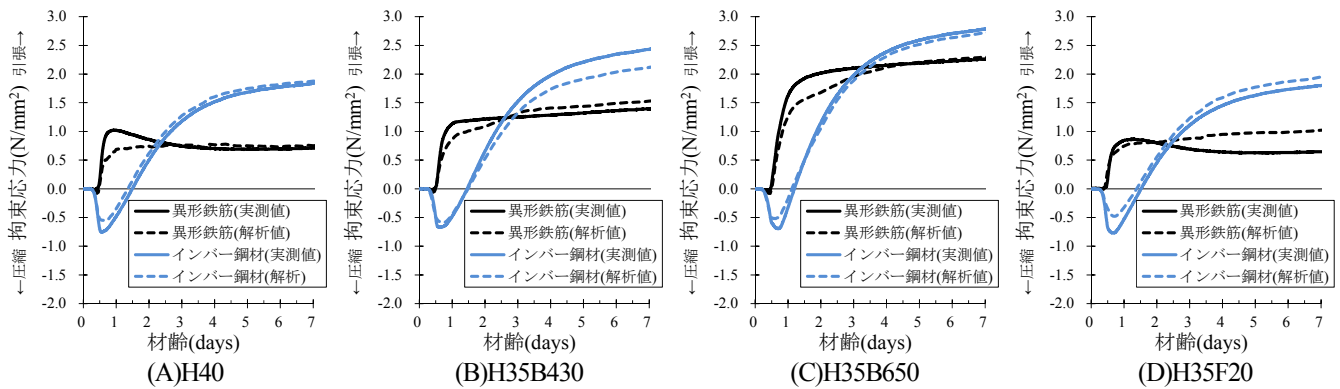


図-12 拘束応力の実測値と解析値

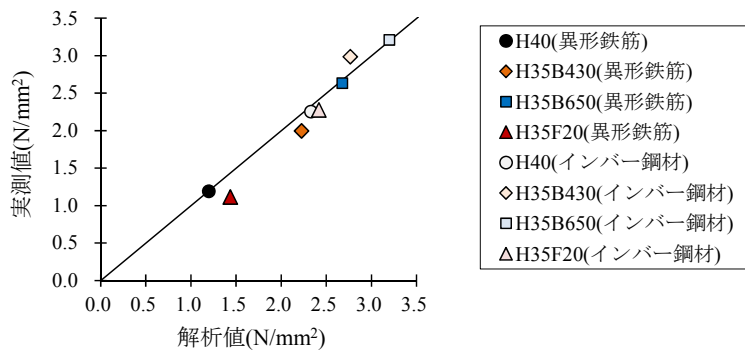


図-13 最大引張応力の実測値と解析値

値」は H35B650EX の無拘束供試体で得られたひずみ、「PC 鋼棒拘束供試体試験値」は JIS A 6202 附属書 2 を参考に拘束鋼材として PC 鋼棒 ( $\phi 11$ ) を用いて簡易断熱養生を行った拘束供試体 ( $100 \times 100 \times 900mm$ ) で得られたひずみを膨張ひずみとして入力して FEM 解析を行った。また、既存の試験方法や算定式を用いる方法として、JIS A 6202 附属書 2 の試験で求める方法と文献 1) の膨張ひずみの算定式で求める方法があるが、これらには自己収縮ひずみの影響が含まれていない。このため、上記の方法で求めた試験値や算定値に膨張材を用いていない H35B650 の無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみを重ね合わせ、これらを膨張ひずみとして入力して FEM 解析を行った（「自己収縮+JIS 試験値」、「自己収縮+JCI 算定値」）。

### 3.2 拘束応力の推定結果

FEM 解析の結果の一例として、H35B650 の長さ方向の応力分布を図-11 に示す。コンクリートと鋼材の境界部と供試体の端部を除くと、コンクリート応力はほぼ一様に分布したことがわかる。この結果を踏まえて、鉄筋拘束試験の結果との比較には、拘束応力の実測位置である供試体の中央断面に着目し、表面の長さ方向の応力の平均値を用いることとした。

膨張材を用いていない 4 種類の配合の供試体の拘束応力の実測値と解析値の推移を図-12、材齢 28 日までの最大引張応力の実測値と解析値の関係を図-13 に示す。実測値と解析値を比較すると、FEM 解析によって異形鉄筋とインバー鋼材を用いた拘束供試体に発生した応力の推移を概ね精度良く推定できたことがわかる。ただし、FEM 解析では材齢 3 日までの異形鉄筋を用いた拘束供試体に発生した応力を過少に評価するケースが多くあった。この原因は、有効ヤング係数法を用いてクリープによる応力緩和の影響を簡易的に考慮

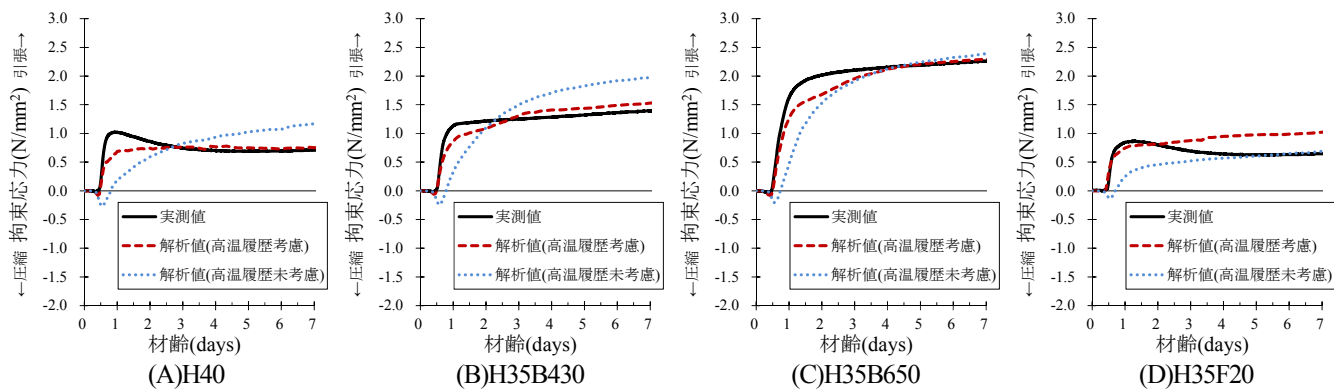


図-14 拘束応力の実測値と解析値：高温履歴下の自己収縮ひずみの考慮の有無

したためと考えられる。また、材齢 28 日までの最大引張応力は実測値と解析値で同等であった。このため、表-2 に示した物性値を FEM 解析に入力することによって、若材齢のコンクリートに発生する拘束応力を概ね精度良く推定することができると考えられる。

### 3.3 高温履歴による自己収縮ひずみの増加挙動の影響

図-12 の拘束応力の解析値は、高温履歴を与えた無拘束供試体の自己収縮ひずみを FEM 解析に入力して得られたものである。ここでは高温履歴による自己収縮ひずみの増加挙動の考慮が拘束応力の推定精度に与える影響を検討するため、主に自己収縮ひずみに起因する拘束応力が測定される異形鉄筋を用いた拘束供試体を対象として、文献 9) に準拠して 20°C 一定の環境下で封緘養生した角柱供試体 (100×100×400mm) の自己収縮ひずみを FEM 解析に入力して解析値を求め、実測値と比較する。

拘束応力の実測値と高温履歴の影響を考慮した自己収縮ひずみを入力した場合と高温履歴の影響を考慮していない自己収縮ひずみを入力した場合の解析値の推移を図-14 に示す。高温履歴の影響を考慮した場合の解析値は、拘束応力の立ち上がり時の材齢とその後の増加の勾配が実測値と同等となった。一方、高温履歴を考慮していない場合の解析値は、拘束応力の立ち上がり時の材齢が実測値よりも遅れ、その後の増加の勾配が実測値よりも小さくなった。FEM 解析ではコンクリートの温度履歴の影響を考慮するために有効材齢を用いて自己収縮ひずみの進展を計算しているが、高温履歴の考慮の有無によって解析値の精度が大きく異なった。高温履歴を受ける場合の若材齢のコンクリートの拘束応力を正確に推定するためには、高温履歴の影響を考慮した自己収縮ひずみを入力することが不可欠と考えられる。

### 3.4 膨張材を用いた場合の膨張ひずみの設定方法

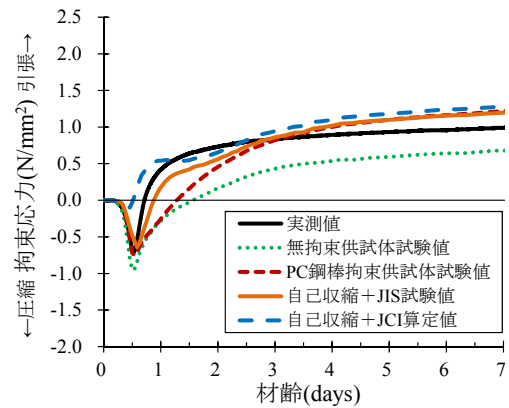
膨張材を用いた供試体の拘束応力の実測値と解析値の推移を図-15(A)(B)、材齢 28 日までの最大引張応力の解析値と実測値の関係を図-15(C)に示す。解析値は、表-3 に示した 4 種類の検討ケースでの結果である。「無拘束供試体試験値」のケースに着目すると、いずれの供試体においても若材齢時に圧縮側の拘束応力を過大に評価し、その後の引張側の拘束応力を過小に評価する傾向にあった。無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみを FEM 解析に入力した場合、膨張材を用いていない供試体では図-12 に示したように拘束応力を概ね精度良く評価できたが、膨張材を用いた供試体では大きく異なる傾向の結果となった。この原因は、図

—10 に示したように若材齢時の無拘束供試体の膨張ひずみが他の検討ケースよりも急激に増加しており、この際のクリープによる応力緩和の影響を適切に評価できなかつたためと考えられる。

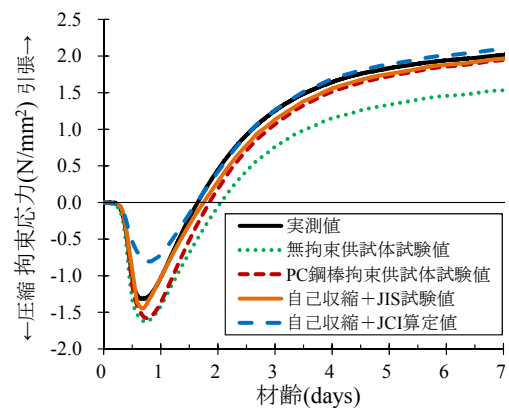
一方、「自己収縮+JIS 試験値」のケースに着目すると、いずれの供試体においても若材齢時からの拘束応力の推移を最も正確に推定できており、材齢 28 日までの最大引張応力の推定値も最も実測値に近いことがわかる。また、「PC 鋼棒拘束供試体試験値」と「自己収縮+JCI 算定値」のケースについては、材齢 3 日までの拘束応力の推定精度が若干劣るが、最大引張応力の推定精度は「自己収縮+JIS 試験値」のケースと同程度であった。これらのことを踏まえると、高炉スラグ微粉末 6000 と膨張材を併用した場合の拘束応力の低減効果を適切に推定するためには、無拘束供試体で測定された膨張ひずみを使用することを避けるとともに、膨張材を使用していない無拘束供試体の自己収縮ひずみに JIS A 6202 附属書 2 の試験で得られた膨張ひずみを重ね合わせたひずみを用いることが望ましいと考えられる。また、この方法よりも若干精度は劣るものの、高温履歴を与えて PC 鋼棒 (φ11) を用いた拘束供試体のひずみ、あるいは、膨張材を使用していない無拘束供試体の自己収縮ひずみに文献 1) の算定式で得られる膨張ひずみを重ね合わせたひずみを用いることでも、最大引張応力を比較的精度良く推定できると考えられる。

#### 4. まとめ

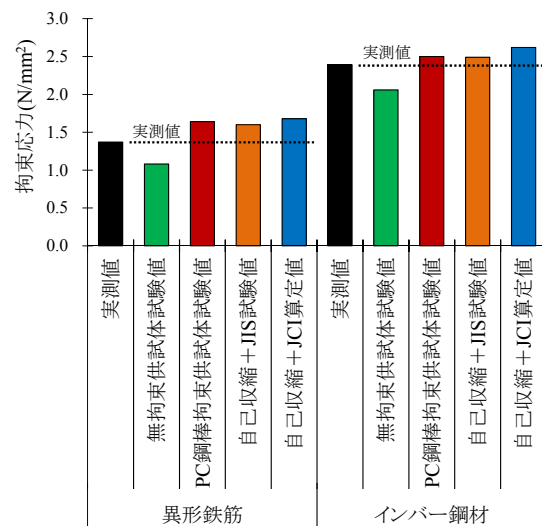
この付録では、混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性と温度ひび割れ発生リスクの評価方法の検討例として、早強ポルトランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュで置換した供試体と膨張材を用いた供試体の鉄筋拘束試験と FEM 解析の結果を示した。この実験及び解析の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。



(A) 異形鉄筋を用いた拘束試験



(B) インバー鋼材を用いた拘束試験



(C) 最大引張応力の比較

図—15 拘束応力の実測値と解析値：H35B650EX

1. マスコンクリートを模擬した高温履歴を与えた供試体の鉄筋拘束試験を行った結果、高炉スラグ微粉末を用いた供試体では自己収縮ひずみが大きくなり、早強ポルトランドセメントのみを用いた供試体と比べて若材齢の拘束応力が大きくなった。ただし、膨張材の併用によって、拘束応力を低減させ、ひび割れの発生を抑制することができた。
2. 混和材や膨張材の使用有無にかかわらず、若材齢の強度発現は有効材齢を用いて推定できること、圧縮強度と割裂引張強度、ヤング係数の関係は同傾向となること、これらの関係を用いて FEM 解析を行うことによって拘束応力を概ね推定できることがわかった。
3. 鉄筋拘束試験で得られた拘束応力の実測値と FEM 解析で得られた拘束応力の解析値を比較した結果、高温履歴下の自己収縮ひずみの増加挙動を考慮することによって、拘束応力を精度良く推定できることがわかった。また、膨張材を用いた供試体では、無拘束状態の供試体で測定された膨張ひずみではなく、拘束状態にある供試体の膨張ひずみを用いて FEM 解析を行うことによって、拘束応力を精度良く推定できることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008
- 2) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2013
- 3) 中村英佑，鈴木雅博，石井豪，古賀裕久：混和材を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する実験的研究，第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.515-520，2015
- 4) 河金甲，中村英佑，鈴木雅博，石井豪：混和材を用いたコンクリートの初期応力推定に関する検討，第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.521-526，2015
- 5) 国土交通省土木研究所材料施工部コンクリート研究室，プレストレスト・コンクリート建設業協会：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法の開発に関する共同研究報告書ー現場打ち高強度コンクリート施工マニュアル（案）ー，共同研究報告書第 266 号，pp.157-168，2001
- 6) 佐藤重一，河野広隆，渡辺博志，丁海文：現場打ち高強度コンクリートの初期ひび割れに関する検討，第 10 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.551-556，2000
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，JASS 5，鉄筋コンクリート工事，2009
- 8) Springenschmid, P., Breitenbücher, R., and Mangold, M.: Development of the cracking frame and the temperature-stress testing machine, Thermal cracking in concrete at early ages, RILEM Proceedings 25, E & FN Spon., pp.137-144, 1994
- 9) 日本コンクリート工学協会：(仮称) 高流動コンクリートの自己収縮試験方法，超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），pp.209-210，1994

## 付録-10 フレッシュコンクリートの性状

### 1. はじめに

この付録では、混和材を用いたコンクリートのフレッシュ性状に関する参考データを示す。

混和材を用いたコンクリートのフレッシュ性状は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、温度の影響を受けやすく、異なる傾向を示すことがある。また、混和材を用いたコンクリート同士と比較でも、セメントと混和材の種類、混和材の置換率、水結合材比等によって異なる傾向を示すことがある。このため、混和材を多量に用いたコンクリートの施工を問題なく行うためには、フレッシュコンクリートの性状を適切に把握しておくことが不可欠である。

この付録では、混和材を用いたコンクリートのフレッシュ性状に関する参考データとして、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリートを製作して、ブリーディング、スランプの経時変化、凝結時間を測定した結果を示す。ただし、これらの測定結果は、コンクリートに用いる材料の品質、配合、化学混和剤の種類と使用量、温度等によって異なる傾向を示す可能性が高いため、実施工となるべく近い条件で試し練りを行ってあらかじめフレッシュコンクリートの性状を確認しておく必要がある。

### 2. ブリーディング

#### 2.1 実験方法

混和材を用いたコンクリートのブリーディングの特徴を把握するため、JIS A 1123 に準拠したブリーディング試験を行った。温度の違いがブリーディングに与える影響も把握するため、練上がり直後と試験時のコンクリートの温度が35℃あるいは20℃となるように恒温恒湿槽内で試験を行った。

コンクリートの配合を表-1、基礎物性を表-2に示す。配合は5種類である。普通ポルトランドセメントのみを用いた配合(C100)を基準として、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を混合セメントB種相当とした配合(B50, F20)及び混合セメントC種相当とした配合(B70, F30)で実験を行った。圧縮強度の差を小さくするため、混和材の置換率の高い配合で水結合材比(W/B)を低減した。混和材の使用による影響を把握するため、全配合で単位水量(165kg/m<sup>3</sup>)と単位粗骨材量(968kg/m<sup>3</sup>)を同一とした。

#### 2.2 実験結果

ブリーディング試験の結果を図-1に示す。ブリーディング量は、35℃よりも20℃の場合に大きくなった。また、混和材を用いたコンクリートのブリーディング量はポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも少なく、この傾向は特に練上がり直後と試験時の温度が35℃の場合に明確に現れた。また、フライアッシュを用いたコンクリートよりも高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートのブリーディング量が少なくな



る傾向にあり、この傾向は特に高炉スラグ微粉末の置換率を70%としたコンクリートで明確に現れた。混和材を用いたコンクリートのブリーディング量はポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも少なく、この傾向は温度が高い場合や高炉スラグ微粉末の置換率が高い場合に明確に現れると考えられる。

表-1 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					s/a (%)	
		W	B = OPC + BS4 + FA			S		G
			OPC	BS4	FA			
C100	50.0	165	330 (100%)	—	—	827	968	47.2
B50	45.0		183 (50%)	183 (50%)	—	784		45.8
B70	40.0		124 (30%)	289 (70%)	—	738		44.3
F20	45.0		293 (80%)	—	73 (20%)	776		45.6
F30	42.5		272 (70%)	—	116 (30%)	745		44.6

※W: 上水道水(茨城県つくば市), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,210cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,440cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.08%(無水せこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.31g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,000cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県空閑産砕石6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の( )内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

※化学混和剤: AE 減水剤 高機能タイプ(リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体を主成分とするもの), 空気連行剤(フライアッシュを用いた配合以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, フライアッシュを用いた配合で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランブ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整, 練上がり目標温度 35℃では遅延形, 20℃では標準形を使用

表-2 コンクリートの基礎物性

配合	練上がり目標温度 35℃				練上がり目標温度 20℃			
	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
C100	12.5	4.5	33.7	38.7	12.5	4.6	20.0	38.5
B50	11.5	5.7	34.3	33.0	12.5	5.3	20.4	35.5
B70	11.0	5.6	34.6	32.9	11.0	5.2	20.3	35.9
F20	13.0	4.2	35.3	42.5	13.0	5.7	20.6	36.3
F30	11.5	4.2	35.3	39.7	12.5	4.5	21.0	34.5

※スランブ: JIS A 1101 に準拠して測定, 空気量: JIS A 1128 に準拠して測定, 温度: 練上がり直後に温度計を用いて測定, 圧縮強度: 封緘養生した円柱供試体(φ100×200mm)を用いて材齢28日にJIS A 1108 に準拠して測定

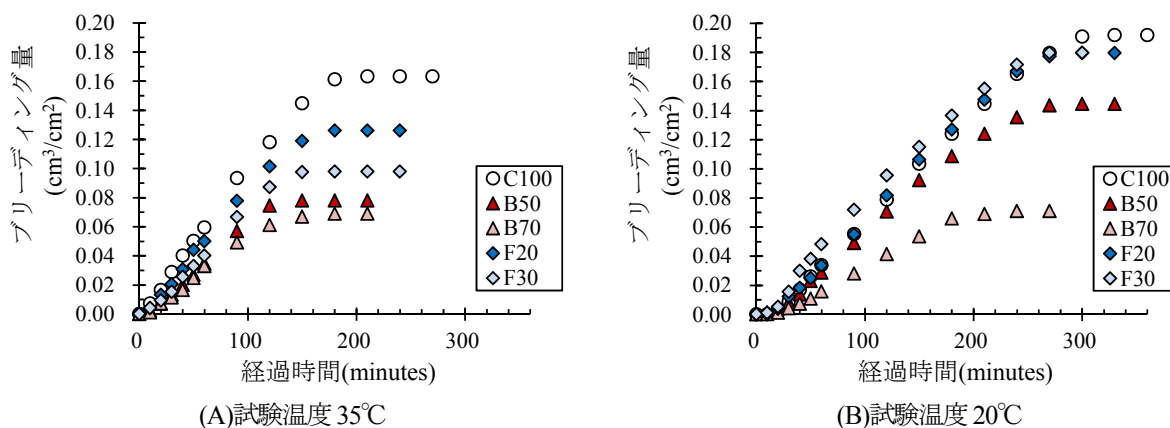


図-1 ブリーディング試験の結果

### 3. スランプの経時変化

#### 3.1 実験方法

混和材を用いたコンクリートにおけるスランプの経時変化の特徴を把握するため、練上がり直後と練上がり 30 分後のスランプを測定した。練上がり 30 分後のスランプについては、練上がりから 30 分間静置したコンクリートを用いて測定した。なお、スランプの測定については、JIS A 1101 に準拠して行った。

コンクリートの配合を表-3に示す。W/Bを50%として普通ポルトランドセメントのみを用いた配合(N50)を基準として、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率、W/Bの2種類の実験パラメータを設定した。高炉スラグ微粉末及びフライアッシュの置換率を実験パラメータとした配合では、混和材の置換率を混合セメントB種相当(N50B50, N50F20)あるいは混合セメントC種相当(N50B70, N50F30)とした。W/Bを実験パラメータとした配合では、混和材の置換率を混合セメントC種相当として、W/Bを35%とした(N35B70, N35F30)。また、混和材の使用による影響を把握するため、全配合で単位水量(165kg/m<sup>3</sup>)と単位粗骨材量(968kg/m<sup>3</sup>)を同一とした。

表-3 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					s/a (%)	
		W	B = OPC + BS4 + FA			S		G
			OPC	BS4	FA			
N50	50	165	330 (100%)	—	—	827	968	47.2
N50B50			165 (50%)	165 (50%)	—	815		46.8
N50B70			99 (30%)	231 (70%)	—	810		46.6
N35B70	35		141 (30%)	330 (70%)	—	688		42.6
N50F20	50		264 (80%)	—	66 (20%)	807		46.6
N50F30			231 (70%)	—	99 (30%)	797		46.2
N35F30			35	330 (70%)	—	141 (30%)		670

※W: 上水道水(茨城県つくば市), OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,340cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,410cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.08%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,810cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石6号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と5号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の( )内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

※化学混和剤: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの, W/B=35%で使用), AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体, W/B=50%で使用), 空気連行剤(フライアッシュを用いた配合以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, フライアッシュを用いた配合で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量をスランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整, 練上がり目標温度 30℃では遅延形, その他では標準形を使用

#### 3.2 実験結果

スランプの測定結果を図-2に示す。スランプの目標値を 12cm としたため、練上がり直後のスランプは 11.0~12.5cm の範囲にあった。練上がり 30 分後のスランプは、いずれの配合においても低下する傾向にあった。ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較すると、W/B を 50%としたコンクリートでは混和材の種類や置換率にかかわらず、スランプの低下量は同程度であった。しかし、W/B を 35%としたコンク

リートではスランプの低下量が大きくなる傾向にあった。混和材を用いたコンクリートでは、W/Bを低減した場合に、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して、スランプの経時的な低下が大きくなる場合があることに留意する必要があると考えられる。

なお、ここではスランプの経時変化の一例として単位水量を一定としたコンクリートでの測定結果を示したが、フレッシュコンクリートの性状の経時変化は材料の品質、配合、化学混和剤の種類と使用量、温度等によって異なる傾向を示す可能性が高いため、実施工となるべく近い条件で試し練りを行ってあらかじめフレッシュコンクリートの性状を確認しておく必要があると考えられる。

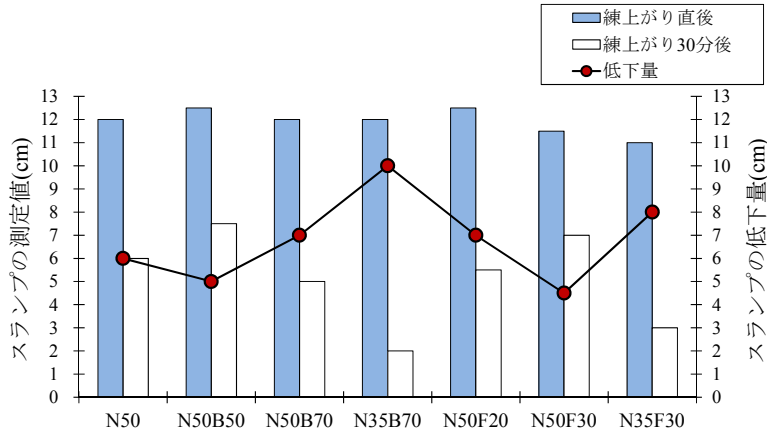


図-2 スランプの測定結果

## 4. 凝結時間

### 4.1 実験方法

混和材を用いたコンクリートのブリーディングの特徴を把握するため、JIS A 1147に準拠した凝結時間試験を行った。

コンクリートの配合を表-4、基礎物性を表-5に示す。配合は4種類である。コンクリートの配合は、早強ポルトランドセメントのみを用いた配合(H40)と、3種類の混和材を用いた配合の計4種類である。混和材を用いた配合では、早強ポルトランドセメント(HPC)の質量に対して、高炉スラグ微粉末4000(BS4)が30%(H35B430)、高炉スラグ微粉末6000(BS6)が50%(H35B650)、フライアッシュⅡ種(FA)が20%(H35F20)の分量となるように混和材を置換した。圧縮強度の差を小さくするため、早強ポルトランドセメントのみを用いた配合でW/Bを40%、混和材を用いた配合でW/Bを35%とした。また、混和材の使用による影響を把握するため、全配合で単位水量(165kg/m<sup>3</sup>)と単位粗骨材量(968kg/m<sup>3</sup>)を同一とした。

温度の違いが凝結時間に与える影響を検討するため、練上がり直後と試験時のコンクリートが30℃、20℃及び10℃となるように管理した恒温恒湿槽内で凝結時間を測定した。

表-4 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						s/a (%)	
		W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA				S		G
			HPC	BS4	BS6	FA			
H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	758	968	45.0
H35B430	35		330 (70%)	141 (30%)	—	—	700		43.0
H35B650			236 (50%)	—	236 (50%)	—	695		42.9
H35F20			377 (80%)	—	—	94 (20%)	682		42.4

※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=3.14g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,580cm<sup>2</sup>/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=4,410cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.08%(無水せっこう添加)), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=6,170cm<sup>2</sup>/g, SO<sub>3</sub>=2.51%(無水せっこう添加)), FA: フライアッシュ II 種(密度=2.08g/cm<sup>3</sup>, 比表面積=3,810cm<sup>2</sup>/g), S: 細骨材(静岡県掛川産陸砂, 密度=2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.43%)と 5 号(密度=2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率=0.46%)を均等に混合), 単位量の()内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

※化学混和剤: 高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物を主成分とするもの), 空気連行剤(フライアッシュを用いた配合以外で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤, フライアッシュを用いた配合で高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とするもの)の使用量を調整, 練上がり目標温度 30℃では遅延形, 10℃と 20℃では標準形を使用

表-5 コンクリートの基礎物性

配合	練上がり目標温度 30℃			練上がり目標温度 20℃			練上がり目標温度 10℃		
	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
H40	14.5	5.7	31.6	15.5	5.7	20.1	11.0	4.4	11.7
H35B430	13.0	5.1	32.7	12.0	4.5	21.0	10.5	4.4	12.6
H35B650	12.5	3.0	32.5	12.0	4.0	21.0	13.5	3.7	12.8
H35F20	11.5	2.7	32.5	14.0	3.8	20.8	9.5	4.5	12.6

※スランプ: JIS A 1101 に準拠して測定, 空気量: JIS A 1128 に準拠して測定, 温度: 練上がり直後に温度計を用いて測定

## 4.2 実験結果

凝結時間試験の結果を図-3 に示す。始発と終結は、混和材の使用有無にかかわらず、試験時の温度が低い/高い場合ほど、遅く/早くなる傾向にあった。また、混和材の種類と置換率の影響に着目すると、始発と終結は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリート (H40) と比較して、高炉スラグ微粉末 4000 の置換率を 30%としたコンクリート (H35B430) では同等、高炉スラグ微粉末 6000 の置換率を 50%としたコンクリート (H35B650) では早く、フライアッシュ II 種の置換率を 20%としたコンクリート (H35F20) では、遅くなる傾向にあった。したがって、凝結時間は、温度の影響を強く受け、混和材の種類や置換率によって異なる傾向を示すと考えられる。

なお、ここでは凝結試験の結果の一例として単位水量を一定としたコンクリートでの凝結試験の結果を示したが、凝結特性は材料の品質、配合、化学混和剤の種類と使用量等によって異なる傾向を示す可能性が高いため、実施工となるべく近い条件で試し練りを行ってあらかじめ凝結特性を確認しておく必要があると考えられる。

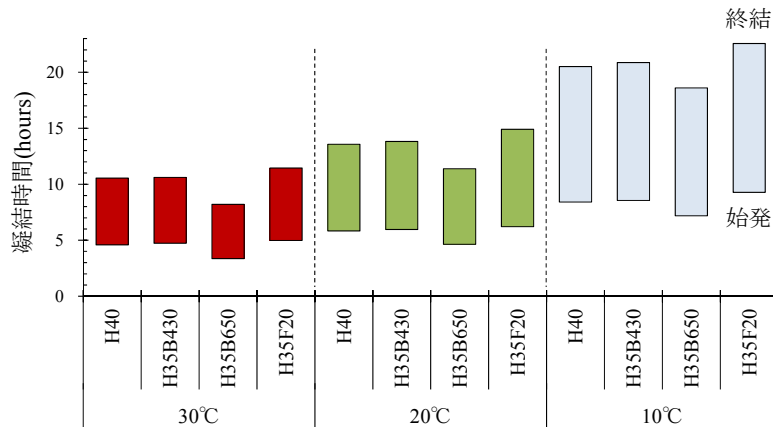


図-3 凝結試験の結果

## 5. まとめ

この付録では、混和材を用いたコンクリートのフレッシュ性状に関する参考データとして、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いたコンクリートを製作して、ブリーディング、スランプの経時変化、凝結時間を測定した結果を示した。これらの測定結果の範囲内で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ブリーディング量は、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも少なく、この傾向は温度が高い場合や高炉スラグ微粉末の置換率が高い場合に明確に現れた。
2. 混和材を用いたコンクリートのスランプの経時変化は、W/B が同一の場合にはポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同程度であったが、W/B を低減した場合にはポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも大きくなった。
3. 混和材を用いたコンクリートの凝結時間は、温度の影響を強く受け、混和材の種類や置換率によって異なる傾向を示した。

なお、この付録で示したフレッシュコンクリートの性状は、コンクリートに用いる材料の品質、配合、化学混和剤の種類と使用量、温度等によって異なる傾向を示す可能性が高いため、実施工となるべく近い条件で試し練りを行ってあらかじめ特徴を確認しておく必要がある。

## 付録－11 二酸化炭素排出削減効果

### 1. はじめに

この付録では、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する方法について検討した結果を示す。

コンクリート構造物の構築に伴って発生する二酸化炭素排出量を定量化する方法としては、大きく分けて次の2種類の方法がある。一つは、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整理したインベントリデータを利用して、材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量を積上げ計算によって算出する方法である。もう一つは、材料の製造だけでなく、コンクリート構造物の建設、供用、解体撤去等、ライフサイクルで発生する二酸化炭素排出量を積上げ計算や産業連関分析によって算出する方法である。これらの方法の基本原則や特徴、適用事例については、表－1に示すISOと報告書等で整理されている。どちらの方法を用いるかによって、対象範囲や計算方法が異なる点に留意する必要がある。

表－1 ISOと報告書等の概要

文献	概要
ISO 13315-1 <sup>1)</sup> ISO 13315-2 <sup>2)</sup>	コンクリート及びコンクリート構造物の構築に伴って発生する環境負荷を評価する際の基本原則、境界条件とインベントリデータの設定方法を示した国際規格である。
国土交通省国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告書第36号 <sup>3)</sup>	社会資本のライフサイクルをととした環境負荷を定量的に評価する方法を構築するため、業界団体による集計値と総務省による産業連関表を統合したデータベースを開発するとともに、この適用性を実際の社会資本整備の事例に基づいて検討している。
プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC構造物の環境負荷低減への取り組み <sup>4)</sup>	プレストレストコンクリート構造物の構築に伴って発生する環境負荷を積上げ計算によって定量化する方法を開発するとともに、実際のプレストレストコンクリート構造物の事例に基づいて、材料製造、施工、供用、解体撤去等の各ステージの環境負荷を定量的に評価している。
日本コンクリート工学協会：コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究小委員会報告書 <sup>5)</sup>	コンクリート構造物のライフサイクルの各ステージにおいて環境負荷低減に向けた検討を行う際の基本原則を規定するとともに、インベントリデータや実際のコンクリート構造物での環境負荷の試算結果等を示している。
土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案） <sup>6)</sup> 、コンクリートの環境負荷評価（その2） <sup>7)</sup> 、コンクリートの環境負荷評価 <sup>8)</sup>	

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、ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材で置き換えてポルトランドセメントの使用を抑制し、ポルトランドセメントの製造時に発生する二酸化炭素排出量を抑制することができると仮定して得られるものである。このため、混和

材を用いたコンクリート構造物の施工方法がポルトランドセメントのみを用いた従来のコンクリート構造物と同様であれば、インベントリデータを利用した材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量の比較のみで、二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価できる。一方、施工方法がポルトランドセメントのみを用いたコンクリート構造物と大幅に異なる場合や材料製造以外も含めたコンクリート工事全体を評価対象とする場合には、コンクリート構造物のライフサイクルをとした二酸化炭素排出量を比較する必要がある。また、二酸化炭素排出量の算出結果は試算に用いる方法やデータ等によって異なる傾向を示す可能性があるため、算出結果を活用するには、試算の対象範囲、試算に用いる方法やデータ等を適切に把握する必要がある。

この付録では、混和材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果を定量的に評価した事例として、インベントリデータを利用して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算出した結果、コンクリート構造物のライフサイクルをとした二酸化炭素排出量を算出した結果を示す。

## 2. 材料製造時の二酸化炭素排出量の定量化

### 2.1 試算方法

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する一つの方法として、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積上げ計算によって算出する方法がある。この方法では、既存のインベントリデータを利用して、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算出する。ここでは、付録-2~4 に示した 26 配合のコンクリートを対象として、コンクリート 1m<sup>3</sup> に用いる材料（ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、天然細骨材、天然粗骨材）の使用量に二酸化炭素排出原単位（各材料 1t を製造する際に発生する二酸化炭素排出量 (kg-CO<sub>2</sub>/t)）を乗じて、材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量を算出した。二酸化炭素排出原単位には、文献 6) を参考として、表-2 の値を用いた。

表-2 二酸化炭素排出原単位と算出方法の概要

材料	二酸化炭素排出原単位 (kg-CO <sub>2</sub> /t)	算出方法の概要
ポルトランドセメント	766.6	(社)セメント協会から提供された 2003 年度の各種原単位に原料輸送と購入電力使用に伴う二酸化炭素排出量を加えて算出された値である。
高炉スラグ微粉末	26.5	高炉スラグ微粉末とフライアッシュの製造時の二酸化炭素排出量をゼロとし、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を考慮して算出された値である。
フライアッシュ	19.6	
天然細骨材	3.7	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を考慮して算出された値である。
天然粗骨材	2.9	

※文献 6) に示される各材料の製造・加工時のエネルギー消費と購入電力を二酸化炭素排出量に換算した値を参考とした。

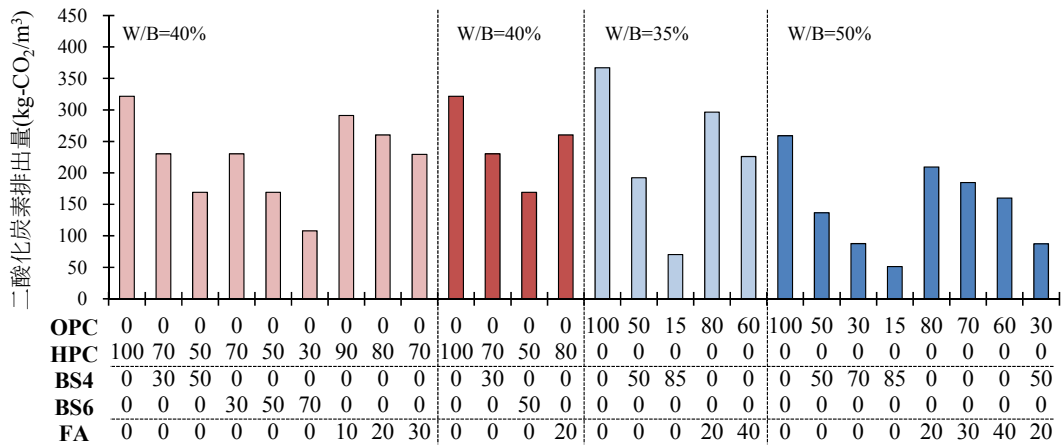


図-1 材料製造時の二酸化炭素排出量の算出結果

※OPC：普通ポルトランドセメント，HPC：早強ポルトランドセメント，BS4：高炉スラグ微粉末4000，BS6：高炉スラグ微粉末6000，FA：フライアッシュⅡ種，W/B：水結合材比，数値は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

付録-2~4に示した26配合のコンクリートでは、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントの2種類のポルトランドセメント，高炉スラグ微粉末4000と高炉スラグ微粉末6000の2種類の高炉スラグ微粉末を用いたが，文献6)に示される二酸化炭素排出原単位がどの材料に該当するものか明確ではなかったため，ここではポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末の違いにかかわらず，前者で表-2の「ポルトランドセメント」，後者で表-2の「高炉スラグ微粉末」の二酸化炭素排出原単位を用いた。

また，化学混和剤については，文献6)では化学混和剤の種類によって二酸化炭素排出原単位の値に幅があることが指摘されていたこと，他の材料と比較して化学混和剤の使用量が少ないこと等を勘案し，ここでは除外して二酸化炭素排出量を算出した。

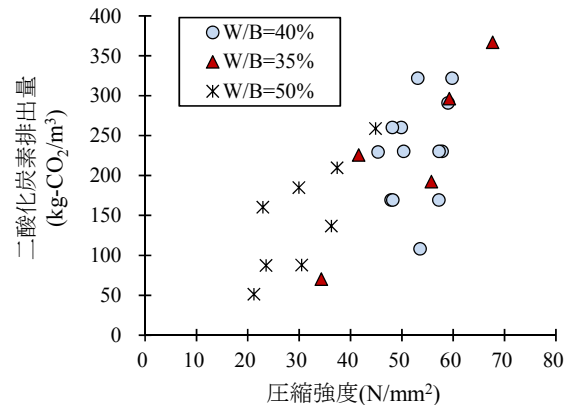


図-2 二酸化炭素排出量と圧縮強度

## 2.2 試算結果

26配合のコンクリート1m<sup>3</sup>に用いる材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量の算出結果を図-1に示す。この結果によると，混和材の置換率を高めるほど，二酸化炭素排出量が少なくなることがわかる。この原因は，表-2に示したポルトランドセメントの二酸化炭素排出原単位が高炉スラグ微粉末の約30倍，フライアッシュの約40倍であり，混和材の置換率を高めてポルトランドセメントの使用量を減少させるほど，二酸化炭素排出削減効果が高くなったためである。

次に，二酸化炭素排出量の算出結果と材齢28日の圧縮強度の関係を図-2に示す。材齢28日の圧縮強度は，20℃の養生槽で材齢28日まで水中養生を行った円柱供試体（φ100×200mm）を用いて，JIS A 1108に準拠して測定したものである。この結果によると，二酸化炭素排出量が少ない配合ほど，材齢28日の圧縮強



度が小さくなる傾向にあることがわかる。ただし、水結合材比（W/B）の違いによる影響を厳密に比較すると、二酸化炭素排出量が同程度の配合においても、W/Bの低い配合で材齢28日の圧縮強度が大きくなった。このため、混和材の置換率の高い配合においても、W/Bを適切に設定することによって、所定の圧縮強度を確保しつつ、二酸化炭素排出削減効果を高めることができると考えられる。

### 2.3 適用にあたっての留意点

ここではコンクリート1m<sup>3</sup>に用いる材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量を積上げ計算によって算出した上で、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の特徴について考察したが、同様の方法を適用する際には、次の3点に留意する必要がある。

- ・シリカフェームや膨張材等、文献6)や既往文献では二酸化炭素排出原単位が示されていない材料もあるため、これらの製造時の二酸化炭素排出量を考慮する際には、信頼できるデータを入手して用いること、信頼できるデータを入手できない場合には各材料の製造過程等を適切に踏まえて二酸化炭素排出原単位を別途設定する必要がある。
- ・高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材の産地には地域的な偏りがあるため、材料の輸送に伴って発生する二酸化炭素排出量を無視できない場合には、これを考慮した二酸化炭素排出原単位を設定する必要がある。
- ・文献6)の二酸化炭素排出原単位は2002年のものであり、材料の製造時の二酸化炭素排出量は産業界の技術革新や化石燃料の使用量によって変化する可能性が高いため、最新の二酸化炭素排出原単位を入手できる場合には、これを用いて二酸化炭素排出量を算出する必要がある。

## 3. コンクリート構造物のライフサイクルをととした二酸化炭素排出量の定量化

### 3.1 試算方法

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するもう一つの方法として、材料の製造だけでなく、コンクリート構造物の建設、供用、解体撤去等、ライフサイクルで発生する二酸化炭素排出量を積上げ計算や産業連関分析によって求める方法がある。ここでは、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がコンクリート構造物のライフサイクル全体で発生する二酸化炭素排出量に与える影響を把握するため、文献4)で開発された方法を準用し、コンクリート構造物のライフサイクルをととした二酸化炭素排出量を算出した。

試算を行うにあたり、次の5点の前提条件を設定した。これら以外の詳細な前提条件及び試算方法については、文献4)と同一とした。

- ・試算対象は、文献4)を参考に、上部構造（プレストレストコンクリート、3種類の構造形式）、下部構造

(鉄筋コンクリート)、舗装で構成されるコンクリート道路橋とした(表-3)。

- ・ 二酸化炭素排出量は、材料製造、建設(施工、輸送)、供用(舗装の維持補修、輸送)、解体撤去(解体、輸送)の各ステージで排出される二酸化炭素排出量を積上げ計算して算出したものとした。
- ・ 供用年数は100年とし、供用期間中に上部構造と下部構造の補修・補強は行わないものとした。
- ・ コンクリートの配合は、ポルトランドセメントのみを用いた場合(ポルトランドセメント単味)、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた場合(高炉スラグ微粉末使用、フライアッシュ使用)の3種類について、上部構造と下部構造のものをそれぞれ設定して計6種類とした(表-4)。上部構造ではプレストレス力の導入時の圧縮強度を早期に確保するため、付録-8で示した配合を参考に、ポルトランドセメントのみを用いた場合にW/Bを40%、混和材を用いた場合にW/Bを35%とし、混和材の置換率を混合セメントB種相当とした。下部構造では早期の強度発現が求められることが比較的少ないため、混和材の使用の有無にかかわらずW/Bを50%とし、混和材の置換率を混合セメントC種相当とした。
- ・ 建設、供用、解体撤去の方法はポルトランドセメントのみを用いた場合と混和材を用いた場合と同様とし、二酸化炭素排出削減効果は3種類の配合の組合せ(ポルトランドセメント単味、高炉スラグ微粉末使用、フライアッシュ使用、表-5)で得られる材料の製造時に起因するもののみとした。

表-3 試算対象のコンクリート道路橋

上部構造	下部構造	舗装
プレテンション方式PC単純T桁橋 橋長20.8m, 全幅員10.7m=0.6m+9.5m+0.6m	直接基礎 橋脚高10m	10年に1回表層切削オーバーレイと全層打ち替えを交互に実施
ポストテンション方式PC連結T桁橋 橋長78m, 桁長75m=3@25m, 全幅員10.7m=0.6m+9.5m+0.6m		
ポストテンション方式PC連続箱桁橋 橋長202m=1m+4@50m+1m, 全幅員10.7m=0.6m+9.5m+0.6m		

表-4 コンクリートの配合と各材料の二酸化炭素排出原単位

対象	配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							s/a (%)	
			W	B = HPC + BS4 + BS6 + FA					S		G
				HPC	OPC	BS4	BS6	FA			
上部構造	H40	40	165	413 (100%)	—	—	—	—	758	968	45.0
	H35B650	35		236 (50%)	—	—	236 (50%)	—	695		42.9
	H35F20			377 (80%)	—	—	—	94 (20%)	682		42.4
下部構造	N50	50		—	330 (100%)	—	—	—	827		47.2
	N50B470			—	99 (30%)	231 (70%)	—	—	810		46.6
	N50F30			—	231 (70%)	—	—	99 (30%)	797		46.2
二酸化炭素排出原単位(kg-CO <sub>2</sub> /t)			—	766.6	766.6	26.5	26.5	19.6	3.7	2.9	—

※W: 水, HPC: 早強ポルトランドセメント, OPC: 普通ポルトランドセメント, BS4: 高炉スラグ微粉末4000, BS6: 高炉スラグ微粉末6000, FA: フライアッシュII種, S: 細骨材, G: 粗骨材, 二酸化炭素排出原単位: 文献6)の値

※単位量の()内の百分率は全結合材に占める各結合材の質量%を表示

表-5 コンクリートの配合の組合せ

配合条件	上部構造	下部構造
ポルトランドセメント単味	H40	N50
高炉スラグ微粉末使用	H35B650	N50B470
フライアッシュ使用	H35F20	N50F30

### 3.2 試算結果

ライフサイクルをとおした二酸化炭素排出量の算出結果を図-3、この結果をポルトランドセメント単味の場合を100%として比較した結果を図-4に示す。これらの図では、3種類の上部構造の構造形式ごとに結果を示した。いずれの構造形式においても、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いることによって、二酸化炭素排出量を削減できることがわかる。また、材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量はライフサイクル全ステージの中で最も多く、ポルトランドセメント単味の場合には材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量が全体の約6割となった。このため、ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換し、ポルトランドセメントの使用を抑制することによって、二酸化炭素排出量を効果的に削減できると考えられる。なお、橋長が長いほど二酸化炭素排出量が多くなったが、この原因は、大規模な構造物ほど、材料製造、施工、供用、解体撤去の各ステージでの二酸化炭素排出量が多くなったためである。

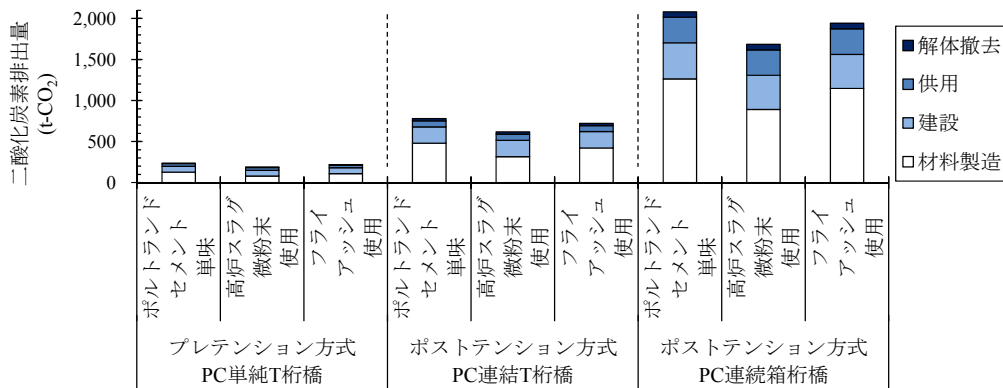


図-3 ライフサイクルをとおした二酸化炭素排出量の算出結果

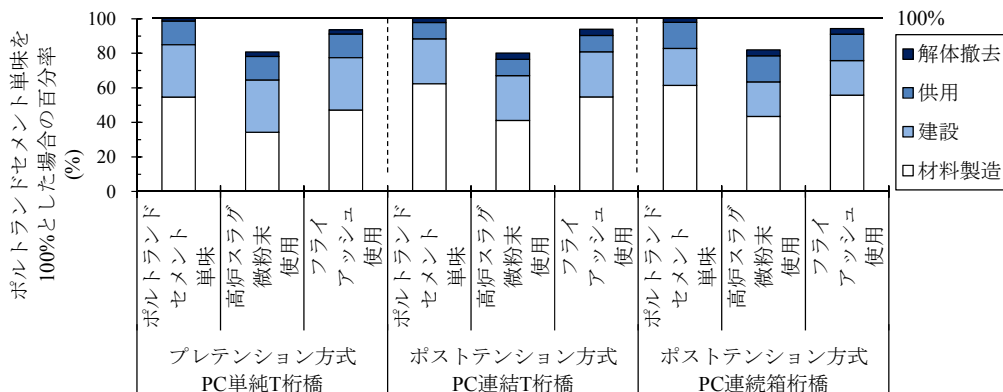


図-4 ライフサイクルをとおした二酸化炭素排出量の割合

次に、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの使用によって得られる二酸化炭素排出量の削減割合を表-6 に示す。ここでは、ポルトランドセメント単味の場合に対する二酸化炭素排出量の削減割合を混和材の種類ごとに示した。この試算で設定した前提条件では、コンクリート構造物のライフサイクル全体で評価しても、高炉スラグ微粉末の使用で約18~21%、フライアッシュの使用で約5~7%の二酸化炭素排出削減効果が得られることがわかる。高炉スラグ微粉末とフライアッシュで二酸化炭素排出削減効果が異なった原因は、どちらの混和材を用いるかによって混和材の置換率とポルトランドセメントの使用量が異なったためである。また、混和材の置換率を表-4 の設定値よりも高めることが可能であれば、さらに多くの二酸化炭素排出量を削減できると考えられる。

表-6 二酸化炭素排出量の削減割合

配合条件	プレテンション方式 PC 単純 T 桁橋	ポストテンション方式 PC 連結 T 桁橋	ポストテンション方式 PC 連続箱桁橋
高炉スラグ微粉末使用	-20.4%	-21.2%	-18.0%
フライアッシュ使用	-7.5%	-7.5%	-5.7%

※ポルトランドセメント単味と比較した場合の二酸化炭素の排出削減割合を表示

### 3.3 適用にあたっての留意点

ここでは文献4)で開発された方法を準用して、コンクリート構造物のライフサイクルをとおして発生する二酸化炭素排出量を算出した上で、混和材の使用によって得られる二酸化炭素排出削減効果を定量的に把握することを試みたが、同様の方法を適用する際には、次の3点に留意する必要がある。

- ・二酸化炭素排出削減効果を定量化する際には、試算の対象範囲、試算に用いた方法やデータ等によって異なる傾向を示す算出結果が得られる可能性があるため、これらを適切に設定する必要がある。特にコンクリート構造物では材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量の割合が多くなるため、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する際には、混和材の置換率、材料の二酸化炭素排出原単位、W/B等を適切に設定することが重要である。
- ・コンクリート構造物のライフサイクルで発生する二酸化炭素排出量を算出する方法としては、文献4)以外にも文献3)で開発された方法があるが、文献3)では、混合セメントB種とこれを用いたコンクリートの二酸化炭素排出原単位を示すに留まっており、混和材の置換率を混合セメントのB種よりも高めた場合については対応策が示されていない。混和材の置換率を混合セメントB種よりも高めた場合に、文献3)の方法を用いて二酸化炭素排出量を算出する際には、混和材の置換率を高めたセメントあるいはこれを用いたコンクリートの二酸化炭素排出原単位を適切に設定する必要がある。
- ・文献4)では、解体撤去時に発生する二酸化炭素排出量も含めた方法が提案されているが、文献3)では、数十年以上先の供用期間終了後の構造物の取り扱い方法は試算段階では明確でないこと、供用後の構造物には解体撤去されないものも存在すること等から、解体撤去時に発生する二酸化炭素排出量を考慮せずに評価を行ってもよいとしている。ライフサイクルをとおした二酸化炭素排出量を定量化する際には、このような試算の前提条件を適切に設定する必要がある。

## 4. まとめ

この付録では、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する方法として、インベントリデータを利用して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算出する方法、コンクリート構造物のライフサイクルをとおして発生する二酸化炭素排出量を算出する方法を取り上げ、それぞれの適用事例と適用にあたっての留意点を示した。この試算の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

1. 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算出した結果、混和材の置換率を高めるほど、二酸化炭素排出量を削減できることがわかった。ただし、混和材の置換率の高いコンクリートでは、圧縮強度が小さくなる傾向にあったため、所定の圧縮強度が得られるよう W/B を適切に設定することが必要と考えられた。
2. コンクリート構造物のライフサイクルをとおした二酸化炭素排出量を算出した結果、材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量の割合が多く、混和材の使用によって二酸化炭素排出量を効果的に削減できることがわかった。供用期間を 100 年として、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較すると、混和材の使用によって最大で約 21% の二酸化炭素排出削減効果が得られることがわかった。
3. 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する際には、試算の対象範囲、試算に用いた方法やデータ等によって異なる傾向を示す結果が得られる可能性があること、コンクリート構造物では材料の製造時に発生する二酸化炭素排出削減効果の割合が多くなることから、混和材の置換率、材料の二酸化炭素排出原単位、W/B 等を適切に設定する必要があると考えられた。

## 参考文献

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



---

共同研究報告書  
Cooperative Research Report of PWRI  
No.471 January 2016

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754