

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(VII)  
ーフライアッシュコンクリートの基本的性状に関する検討ー

平成 29 年 2 月

国立研究開発法人土木研究所  
電源開発株式会社

Copyright © (2017) 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(VII)

—フライアッシュコンクリートの基本的性状に関する検討—

国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター

グループ長	渡辺 博志
上席研究員	古賀 裕久 (2015.4～)
特任研究員	森濱 和正 (～2016.12)
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)

電源開発株式会社 技術開発部 茅ヶ崎研究所

	上席研究員	石川 嘉崇
土木技術研究室	サブリーダー	鷺尾 朝昭 (2013.4～2016.6)
	メンバー	石川 学 (2015.4～)
	メンバー	今岡 知武 (2012.4～2015.3)
	サブリーダー	佐藤 道生 (～2013.3)
	メンバー	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)」を示すとともに、フライアッシュコンクリートの基本的性状について実験を行って検討した結果をとりまとめた。

**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、塩化物イオン浸透に対する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、フレッシュ時及び硬化後のコンクリートの品質が異なる場合もあり、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認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、平成28年1月に、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)」(共同研究報告書第471号)、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)」(共同研究報告書第472～476号)を発刊した。

この共同研究報告書は、この共同研究で提案した「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)」(共同研究報告書第471号)の抜粋(第I部)を示すとともに、フライアッシュコンクリートの基本的性状を体系的に把握するために、フライアッシュ置換率や水結合材比、養生条件、空気量など種々の条件を変化させて行った実験の結果(第II部)をまとめたものである。

全7編の共同研究報告書の構成と概要を次のページに示す。

## 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 (2016年1月発刊)

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 (2016年1月発刊)

### 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 (2016年1月発刊)

### 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 (2016年1月発刊)

### 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 (2016年1月発刊)

### 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 (2016年1月発刊)

### 共同研究報告書 第487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 (VII)

#### フライアッシュコンクリートの基本的性状に関する検討

フライアッシュコンクリートの基本的性状について, 実験を行って検討した結果をとりまとめた。

国立研究開発法人土木研究所, 電源開発株式会社 (2017年2月発刊)

## 参考文献

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

# 目次

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

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

5.6	凍結融解に対する抵抗性	26
5.7	温度ひび割れに対する抵抗性	27
5.8	二酸化炭素排出削減効果	28
6	章 製造及び施工	30
6.1	一般	30
6.2	計量	30
6.3	練混ぜ	31
6.4	運搬・打込み・締固め・仕上げ	32
6.5	湿潤養生	33
7	章 品質管理	35
8	章 検査	36
9	章 記録	37



## 第II部 フライアッシュコンクリートの基本的性状

1章 検討の背景と目的.....	39
2章 フライアッシュコンクリートの基本的性状.....	41
2.1 はじめに.....	41
2.2 使用材料及びコンクリートの配合.....	41
2.2.1 使用材料.....	41
2.2.2 コンクリートの配合.....	41
2.3 フライアッシュコンクリートの基本的性状.....	44
2.3.1 フレッシュ性状.....	44
2.3.2 圧縮強度試験.....	46
2.3.3 促進中性化試験.....	48
2.3.4 塩水浸せき試験.....	50
2.3.5 長さ変化試験.....	52
2.3.6 自己収縮試験.....	52
2.3.7 断熱温度上昇試験.....	53
2.3.8 凍結融解試験.....	54
2.4 まとめ.....	55
3章 養生条件の異なるフライアッシュコンクリートの基本的性状.....	56
3.1 はじめに.....	56
3.2 養生期間がフライアッシュコンクリートの基本的性状に及ぼす影響.....	56
3.2.1 コンクリートの配合及び養生条件.....	56
3.2.2 コンクリートの試験及び試験結果.....	57
3.3 養生方法及び養生温度がフライアッシュコンクリートの基本的性状に及ぼす影響.....	60
3.3.1 コンクリートの養生条件及び配合.....	60
3.3.2 コンクリートの試験及び試験結果.....	61
3.4 まとめ.....	64
4章 Non-AE としてのフライアッシュコンクリートの基本的性状.....	65
4.1 はじめに.....	65
4.2 コンクリートの配合及びフレッシュ性状.....	65
4.2.1 コンクリートの配合.....	65
4.2.2 スランブ試験・空気量測定.....	66
4.3 コンクリートの試験及び試験結果.....	66

4.3.1 ブリーディング試験・凝結時間試験.....	66
4.3.2 圧縮強度試験.....	67
4.3.3 促進中性化試験.....	68
4.3.4 塩水浸せき試験.....	68
4.4 まとめ.....	70
5章 結論.....	71
参考文献.....	72
技術公表の一覧.....	73

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）

（※共同研究報告書第 471 号（2016 年 1 月発刊）の抜粋）

担当：国立研究開発法人土木研究所



# 1章 総則

## 1.1 適用の範囲

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

### 【解説】

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

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

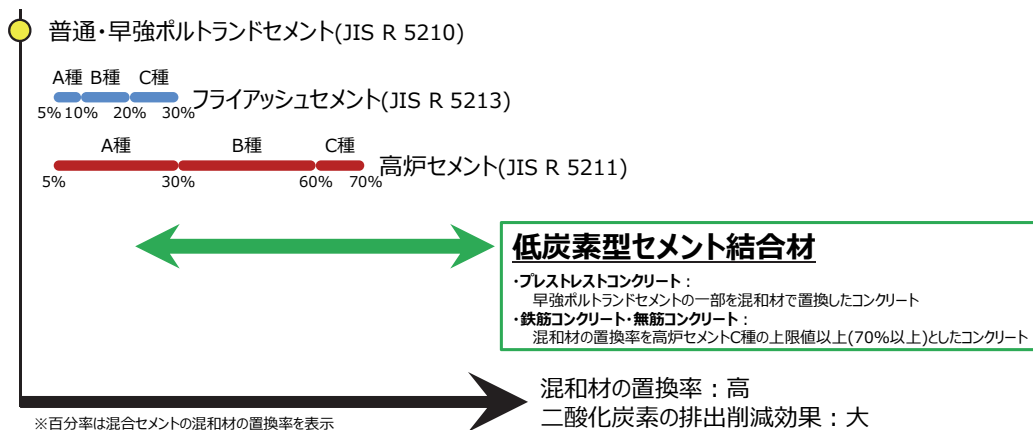


図-1.1 低炭素型セメント結合材の位置づけ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所, 株式会社大林組

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所, 大成建設株式会社, 前田建設工業株式会社

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所, 戸田建設株式会社, 西松建設株式会社

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所, 大成建設株式会社

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

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

【参考】

混和材を用いたコンクリートの品質の一般的な傾向について

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

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

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

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



## 1.2 用語の定義

このガイドライン（案）では、次のように用語を定義する。

- ・ **低炭素型セメント結合材 (Low-carbon Cementitious Binders)**：プレストレストコンクリート，鉄筋コンクリート，無筋コンクリート等の対象とする構造物の種別に応じて，日本国内において一般的に用いられているセメントよりも混和材の置換率を高めて材料製造時の二酸化炭素排出量を削減し，フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートがこのガイドライン（案）に示す所要の品質を有する結合材。
- ・ **混和材 (Supplementary Cementitious Materials)**：ポルトランドセメントの代替として用い，潜在水硬性あるいはポ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。これら的高炉スラグ微粉末は比表面積や活性度指数等が異なるため、いずれの高炉スラグ微粉末を用いるかによって、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、硬化コンクリートの強度、耐久性、ひび割れ抵抗性に与える影響が異なる可能性がある。したがって、対象とする構造物の種別、施工条件、環境条件等を考慮して、適切な高炉スラグ微粉末を選定して用いる必要がある。

### (2)について

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

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

### (3)について

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

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

### 3.5 化学混和剤

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

#### 【解説】

#### (1)について

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

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

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

#### (2)について

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

## 4章 配合

### 4.1 一般

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

#### 【解説】

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

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

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

### 4.2 セメントと混和材の種類及び混和材の置換率

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

#### 【解説】

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

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

### 4.3 水結合材比

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

#### 【解説】

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

## 5 章 設計

### 5.1 一般

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

#### 【解説】

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

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

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

### 5.2 強度

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

#### 【解説】

##### (1)について

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

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

## (2)について

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

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

## (3)について

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



### 5.3 クリープ・収縮

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

#### 【解説】

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

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

### 5.4 中性化に対する抵抗性

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

#### 【解説】

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

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

### 中性化深さの推定方法について

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

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

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

### 暴露試験の結果に基づく中性化速度係数の設定について

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

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

### 促進中性化試験の結果に基づく中性化速度係数の設定について

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

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

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

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

### 中性化残りの設定について

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

### 中性化速度係数の予測式の適用性について

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

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

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

### 環境条件の考慮について

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

## 5.5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

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

### 【解説】

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

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

### かぶりの最小値について

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

### コンクリート内部の塩化物イオン濃度の推定方法について

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

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

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

### 塩化物イオンの見掛けの拡散係数について

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

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

### 鋼材腐食発生限界濃度の設定について

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

## 環境条件の考慮について

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

### 5.6 凍結融解に対する抵抗性

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

#### 【解説】

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

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性の評価は、JIS A 1148 の A 法に準拠した凍結融解試験による相対動弾性係数の測定値に基づいて行ってよい。コンクリート標準示方書<sup>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。

## 5.7 温度ひび割れに対する抵抗性

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

### 【解説】

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

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

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

## 5.8 二酸化炭素排出削減効果

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

### 【解説】

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

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

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

### 参考文献

- 1) fib: Model Code for Concrete Structures 2010, First Edition, 2013
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説，2004
- 3) 日本建築学会：高耐久性コンクリート造設計施工指針（案）・同解説，1991
- 4) 気象庁ホームページ：二酸化炭素濃度の経年変化，[http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2\\_trend.html](http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html)
- 5) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2013
- 6) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針2008，2008
- 7) ISO 13315-1: Environmental Management for Concrete and Concrete Structures – Part 1 General Principles, 2014
- 8) ISO 13315-2: Environmental Management for Concrete and Concrete Structures – Part 2 System Boundary and Inventory Data, 2014



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

## 6章 製造及び施工

### 6.1 一般

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

#### 【解説】

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

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのフレッシュ性状は、セメント及び混和材の種類や混和材の置換率によって、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと異なる傾向を示す場合がある。例えば、高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートではフレッシュコンクリートの粘性が高くなること、フレッシュ性状や凝結時間が施工時の気温の影響を受けやすく、特に施工時の気温が高いとワーカビリティの経時的な低下の程度が大きくなることもある。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±1%、混和材で±2%（高炉スラグ微粉末で±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ことがあるため、コンクリートポンプを用いて圧送する場合には、必要に応じて実施工となるべく近い条件で試験を行い、圧送計画を入念に検討するとともに、圧送後のコンクリートの品質が低下しないよう配慮する必要がある。

#### (3)について

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

#### (4)について

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

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

## 6.5 湿潤養生

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

### 【解説】

#### (1)について

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

#### (2)について

コンクリート標準示方書<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とよい。

### (3)について

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

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

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

### 参考文献

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

## 7章 品質管理

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

### 【解説】

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

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

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。

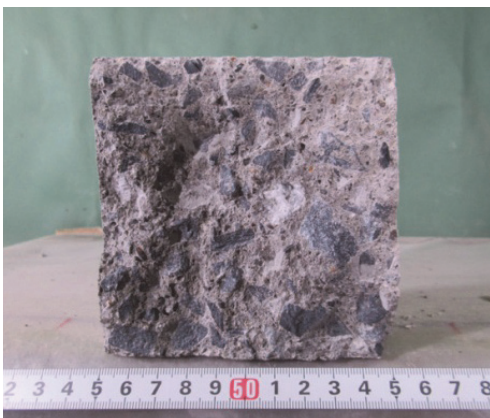
### 【解説】

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。

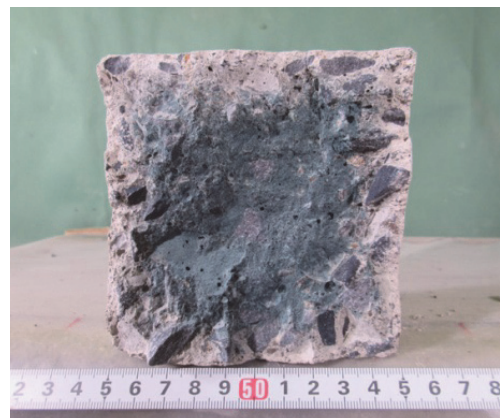
低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの検査は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質の特徴を適切に把握した上で、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様の方法で行ってよい。

### 【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  
フライアッシュコンクリートの基本的性状

担当：電源開発株式会社



## 1 章 検討の背景と目的

第Ⅱ部では、フライアッシュコンクリートの基本的性状に着目して、電源開発株式会社と国立研究開発法人土木研究所で行った実験及び検討の結果をとりまとめた。

一般に、フライアッシュコンクリートの特長として、フレッシュ性状の改善、長期強度の増進、水和熱の低減、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上、アルカリシリカ反応の抑制等が知られており、コンクリートの耐久性を向上させるためにフライアッシュを積極的に利用していくことが期待されている。しかし、日本国内で排出される石炭灰（平成26年度実績：約1,200万t<sup>1)</sup>）の主な用途はセメントの原材料であり、混和材としてフライアッシュコンクリートで利用される石炭灰は全体の数%に留まっている。フライアッシュコンクリートは、これまでダムや原子力発電所等の特定のコンクリート構造物において利用されてきた実績を有するが、一般的なコンクリート構造物において汎用的に利用されるには至っていない。過去のアンケート調査の結果<sup>2)</sup>によると、フライアッシュコンクリートの普及が進まない理由の一つとして、初期材齢での強度が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小さいことが挙げられている。また、実施工においては、AE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やフライアッシュ自体の品質変動が大きいこと等がフライアッシュコンクリートの普及を進める際の課題となっている。

そこで、第Ⅱ部では、普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換したフライアッシュコンクリートの基本的性状を体系的に検討するとともに、フライアッシュコンクリートの初期材齢の強度発現を改善することを目的として、早強ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換したフライアッシュコンクリートの基本的性状についても検討した。また、凍結融解作用を受けない温暖な地域ではコンクリートの凍結融解に対する抵抗性の確保の観点からはエントレインドエアを導入することの必要性が必ずしも高くなく、フライアッシュコンクリートの普及を進める際の課題の一つである空気量調整の困難さが軽減される可能性がある。そこで、Non-AEとした(AE剤を用いない)フライアッシュコンクリートの基本的性状について検討した。

第Ⅱ部は全5章で構成されており、2章以降の概要は以下のとおりである。

### 2 章 フライアッシュコンクリートの基本的性状

フライアッシュコンクリートのフレッシュ性状、圧縮強度、中性化、塩化物イオン浸透、乾燥収縮ひずみ、自己収縮ひずみ、断熱温度上昇、凍結融解に関する各種試験を実施し、普通ポルトランドセメントあるいは早強ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換したフライアッシュコンクリートの基本的性状について検討した。

### 3章 養生条件の異なるフライアッシュコンクリートの基本的性状

初期材齢における湿潤養生期間や養生方法，養生温度等の養生条件の違いがフライアッシュコンクリートの基本的性状に与える影響について検討した。

### 4章 Non-AE としてのフライアッシュコンクリートの基本的性状

Non-AE としての(AE 剤を用いない)フライアッシュコンクリートの基本的性状について検討した。

### 5章 結論

2章～4章で得られた知見をとりまとめた。

この共同研究報告書がフライアッシュコンクリートの普及に寄与し，コンクリート構造物の構築に伴って発生する環境負荷の低減とコンクリート構造物の耐久性の向上や長寿命化の一助となれば幸いである。

## 2 章 フライアッシュコンクリートの基本的性状

### 2.1 はじめに

この章では、フライアッシュコンクリートの基本的性状について検討した結果を示す。

ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換することによって、単位水量の低減、フレッシュ性状の改善、長期材齢での強度増進、水和熱の低減、塩化物イオン浸透に対する抵抗性の向上等を期待できるが、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での強度発現が遅延することや中性化に対する抵抗性が低下することが懸念されている。このため、セメント種別、水結合材比（以下、W/B という）、フライアッシュ置換率の異なる供試体を製作し、普通ポルトランドセメントあるいは早強ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換したフライアッシュコンクリートの基本的性状を体系的に検討した<sup>3)</sup>。

### 2.2 使用材料及びコンクリートの配合

#### 2.2.1 使用材料

コンクリートに用いた材料を表-2.1 に示す。セメントには、普通ポルトランドセメント（OPC）または早強ポルトランドセメント（HPC）を用いた。フライアッシュには、JIS A 6201 に適合したフライアッシュⅡ種（FA）を用いた。細骨材には静岡県掛川産陸砂（S）、粗骨材には茨城県笠間産砕石の5号及び6号を均等に混合したもの（G）を用いた。粗骨材の最大寸法は20mmである。化学混和剤には、スランプ及び空気量の調整のため、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を主成分とするもの（WR）、W/B=50%で使用）または高性能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（SP）、W/B=35%、40%で使用）を用い、AE剤（ポルトランドセメントのみを用いた配合で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とするもの（AE1）、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（AE2））を添加した。

#### 2.2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合（A0配合、B0配合）を表-2.2、2.3 に示す。コンクリートの練混ぜには、水平二軸型強制練りミキサを用いた。セメント、細骨材、粗骨材を加えて30秒間の空練りを行った後、水と化学混和剤を加えて90秒間の練混ぜを行った。A0配合では、全配合で単位水量を165kg/m<sup>3</sup>、単位粗骨材量を968kg/m<sup>3</sup>に統一した。A0配合の配合条件は、以下のとおりである。

- N50 シリーズ…W/B を 50%，ベースセメントを普通ポルトランドセメント，フライアッシュ置換率を 0%，20%，30%，40%とした配合
- N35 シリーズ…W/B を 35%，ベースセメントを普通ポルトランドセメント，フライアッシュ置換率を 0%，20%，40%とした配合
- H40 シリーズ…W/B を 40%，ベースセメントを早強ポルトランドセメント，フライアッシュ置換率を 0%，10%，20%，30%とした配合

一方，B0 配合では，全配合で W/B を 50%に統一した上で，フライアッシュの置換によるフレッシュコンクリートの流動性の改善を見込み，単位水量を低減した配合とした。単位水量については，試し練りを行い，スランプ  $12 \pm 2.5\text{cm}$ ，空気量  $4.5 \pm 1.5\%$ となるように設定した。B0 配合の配合条件は，以下のとおりである。

- NF シリーズ…ベースセメントを普通ポルトランドセメント，フライアッシュ置換率を 0%，20%，30%とした配合
- HF シリーズ…ベースセメントを早強ポルトランドセメント，フライアッシュ置換率を 20%，30%，40%とした配合

表-2.1 使用材料

材料		品質
W	上水道水	—
OPC	普通ポルトランドセメント	密度 = $3.16\text{g/cm}^3$ ，比表面積 = $3,300\text{cm}^2/\text{g}$
HPC	早強ポルトランドセメント	密度 = $3.14\text{g/cm}^3$ ，比表面積 = $4,490\text{cm}^2/\text{g}$
FA	フライアッシュ II 種	密度 = $2.30\text{g/cm}^3$ ，比表面積 = $4,280\text{cm}^2/\text{g}$
S	静岡県掛川産陸砂	密度 = $2.56\text{g/cm}^3$ ，吸水率 = 2.23%
G	茨城県笠間産砕石 5 号	密度 = $2.67\text{g/cm}^3$ ，吸水率 = 0.46%
	茨城県笠間産砕石 6 号	密度 = $2.67\text{g/cm}^3$ ，吸水率 = 0.43%



表-2.2 コンクリートの配合 (A0 配合)

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						s/a (%)	化学混和剤(%)				スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	OPC	HPC	FA	S	G		WR	SP	AE1	AE2		
N50	50	165	330	—	—	827	968	47.2	0.2650	—	0.0020	—	14.0	5.2
N50F20			264	—	66	807		46.6	0.0795	—	—	0.020	11.5	4.4
N50F30			231	—	99	797		46.2	0.0398	—	—	0.030	11.0	4.6
N50F40			198	—	132	787		45.9	0.0265	—	—	0.040	14.5	4.0
N35	35	165	471	—	—	713	968	43.5	—	0.65	0.0010	—	14.5	4.7
N35F20			377	—	94	684		42.5	—	0.50	—	0.005	12.0	3.5
N35F40			283	—	189	655		41.4	—	0.40	—	0.025	14.5	4.5
H40	40	165	—	413	—	758	968	45.0	—	0.65	0.0035	0.015	11.5	4.6
H40F10			—	371	41	746		44.6	—	0.50	—	0.025	9.5	4.2
H40F20			—	330	83	734		44.2	—	0.45	—	0.025	14.0	4.5
H40F30			—	289	124	721		43.8	—	0.40	—	0.035	12.0	4.3

※養生方法：打込み翌日に脱型して材齢 28 日まで標準養生を行った。標準養生終了後、温度 20℃、湿度 60%の室内で試験実施まで静置した。

※AE 減水剤 (W/B=50%, WR), 高性能 AE 減水剤(W/B=35%, 40%, SP), AE 剤 (AE1, AE2) の使用量をスランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整した。化学混和剤の使用量については結合材に対する割合で表示した。

表-2.3 コンクリートの配合 (B0 配合)

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						s/a (%)	化学混和剤(%)			スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	OPC	HPC	FA	S	G		WR	AE1	AE2		
NF0	50	165	330	—	—	828	966	47.2	0.25	0.0014	—	11.5	5.4
NF20		159	254	—	64	814	988	46.2	0.25	—	0.0104	11.5	4.8
NF30		156	218	—	94	806	1000	45.7	0.25	—	0.0151	11.0	5.0
HF0	50	170	—	340	—	830	954	47.2	0.25	0.0059	—	10.5	5.3
HF20		164	—	262	66	803	976	46.2	0.25	—	0.0122	13.5	5.3
HF30		161	—	225	97	796	986	45.7	0.25	—	0.0165	12.5	4.8
HF40		158	—	190	126	789	998	45.2	0.25	—	0.0222	13.5	5.4

※養生方法：打込み翌日に脱型して材齢 28 日まで標準養生を行った。標準養生終了後、温度 20℃、湿度 60%の室内で試験実施まで静置した。

※AE 減水剤 (WR), AE 剤 (AE1, AE2) の使用量をスランプ 12±2.5cm, 空気量を 4.5±1.5%となるよう調整した。化学混和剤の使用量については結合材に対する割合で表示した。

## 2.3 フライアッシュコンクリートの基本的性状

### 2.3.1 フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状を把握するため、スランプ試験（JIS A 1101「コンクリートのスランプ試験方法」）と空気量測定（JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力方法）」）を実施した。また、フライアッシュコンクリートを用いて構造物を構築する際には、フライアッシュの特長である単位水量低減効果を考慮して配合設計が行われるため、B0配合では、実施工へのフライアッシュコンクリートの適用を想定して、ブリーディング試験（JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」）と凝結時間試験（JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」）も併せて実施した。

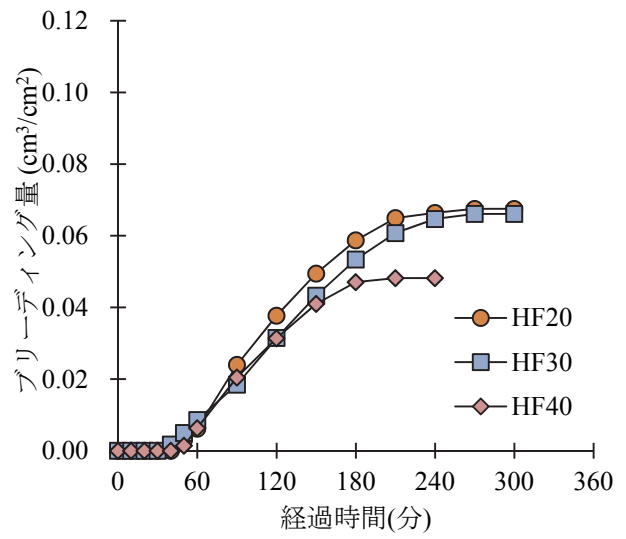
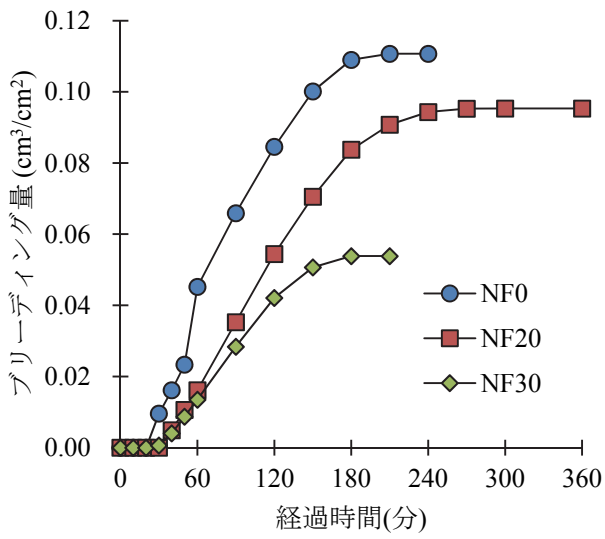
#### (1) スランプ試験・空気量測定

スランプ試験及び空気量測定の結果を前述の表-2.2, 2.3に併記した。いずれの配合においても、スランプは $12\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.5\pm 1.5\%$ となった。化学混和剤の種類を選定と使用量の調整を適切に行うことによって、セメント種別やフライアッシュ置換率にかかわらず、所定のスランプと空気量を確保することができたと考えられる。

#### (2) ブリーディング試験・凝結時間試験

ブリーディング試験結果を図-2.1に示す。ブリーディング量の測定間隔は、試験開始から1時間後までは10分、1時間後から試験終了までは30分とした。NFシリーズでは、最終ブリーディング量は、フライアッシュ置換率を高くするほど小さくなった。NF20とNF30では、NF0と比較して、ブリーディング量がそれぞれ約15、50%小さくなった。これは、フライアッシュを用いることで、単位水量の低減が可能となり、ブリーディングが抑制されたためと考えられる。一方、HFシリーズでも、NF0と比較してブリーディング量が小さくなった。また、HF20とHF30の比較ではHF30のブリーディング量が若干小さくなり、HF40では150分以降のブリーディング量が小さくなった。

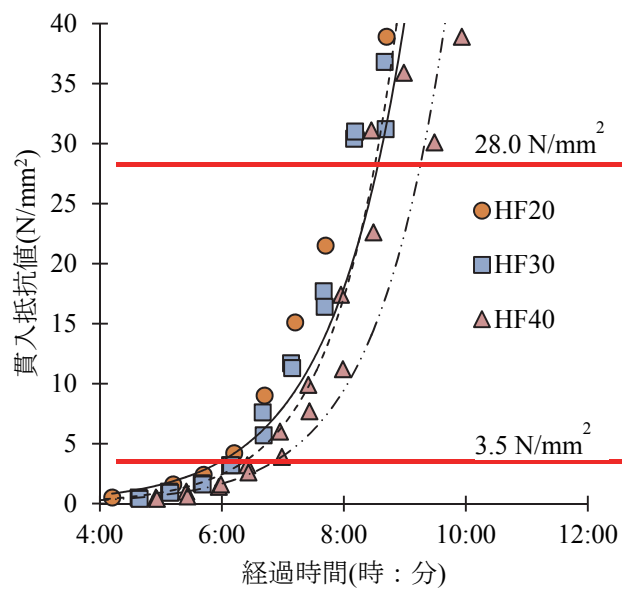
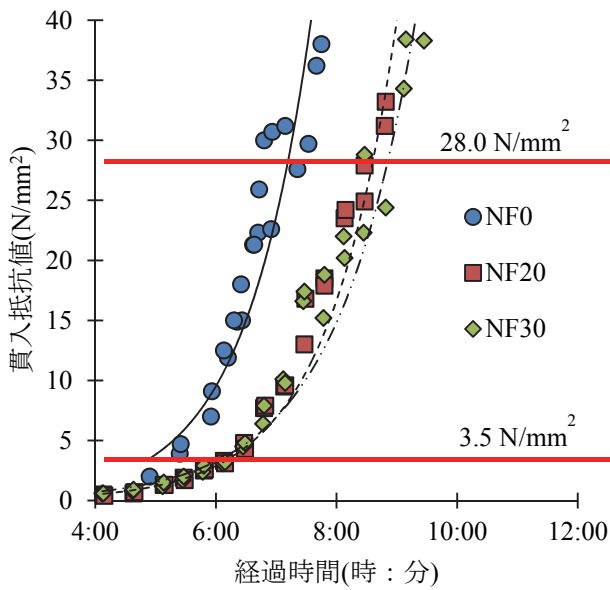
凝結時間試験結果を図-2.2に示す。同図では、貫入抵抗値 $3.5\text{N/mm}^2$ 及び $28.0\text{N/mm}^2$ を直線で示しており、これらの直線と試験結果の回帰線との交点が始発時間及び終結時間となる。ここでは、貫入抵抗値が $28.0\text{N/mm}^2$ を超えるまで複数回の測定を行った。NFシリーズに着目すると、NF20では、NF0と比較して、始発時間が約1時間45分、終結時間が約1時間30分遅延した。ただし、NF20とNF30では、始発時間及び終結時間に大きな差は生じなかった。一方、HFシリーズに着目すると、フライアッシュ置換率を高くするほど凝結時間が遅延した。また、HFシリーズでは、フライアッシュ置換率が同一の場合、NFシリーズと比較して、始発時間及び終結時間が早くなった。フライアッシュの置換によって、始発時間及び凝結時間は遅延する傾向にあったが、早強ポルトランドセメントを用いることによって、始発時間及び凝結時間の遅延の程度が小さくなったと考えられる。



(A)NF シリーズ

(B)HF シリーズ

図-2.1 プリーディング試験結果



(A)NF シリーズ

(B)HF シリーズ

図-2.2 凝結時間試験結果

### 2.3.2 圧縮強度試験

圧縮強度試験を JIS A 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して実施した。A0 配合では、材齢 7, 28, 91 日の 3 時点で圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験結果を図-2.3 に示す。いずれのシリーズにおいても、セメント種別及び W/B が同一の場合には、フライアッシュ置換率の増加に伴って圧縮強度が小さくなった。N50 シリーズ及び N35 シリーズでは、材齢 7 日におけるフライアッシュの置換による圧縮強度の低下が、他の材齢よりも顕著であった。一方、H40 シリーズでは、材齢 7 日における圧縮強度の低下が、N50 シリーズ及び N35 シリーズよりも小さくなった。そこで、B0 配合において、W/B を一定として、ベースセメントを普通ポルトランドセメントあるいは早強ポルトランドセメントとして、初期材齢での強度発現を比較することとした。

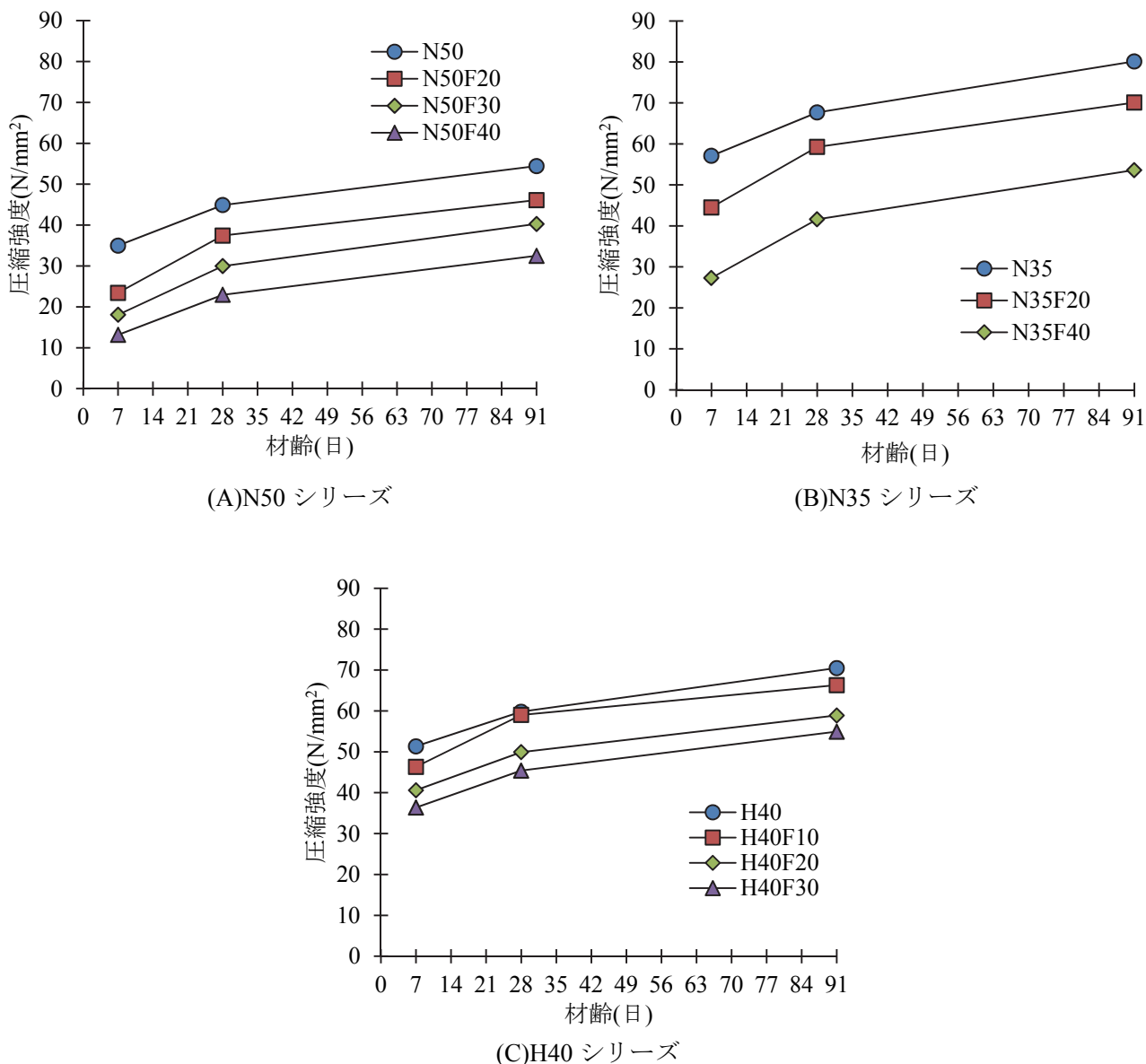


図-2.3 圧縮強度試験結果

B0 配合では、材齢 3, 7, 28 日の 3 時点で圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験結果を図-2.4 に示す。また、フライアッシュを用いた配合の圧縮強度を NF0（フライアッシュを用いていない配合）の圧縮強度に対する比率で整理した結果を図-2.5 に示す。早強ポルトランドセメントを用いることによって、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも初期材齢の圧縮強度が大きくなった。HF20 では、NF0 に対する圧縮強度の比率が材齢 3 日で 1.1、材齢 7 日で 0.9 となり、初期材齢の圧縮強度が NF0 の 90%以上になった。すなわち、HF20 では、早強ポルトランドセメントの使用によって、初期材齢の圧縮強度が NF0 と同程度になったと考えられる。また、HF20 よりもフライアッシュ置換率を高めた HF30 においても、初期材齢の圧縮強度が NF0 の 70%以上になった。早強ポルトランドセメントの使用によって、フライアッシュコンクリートの初期材齢での強度発現性を改善できると考えられる。

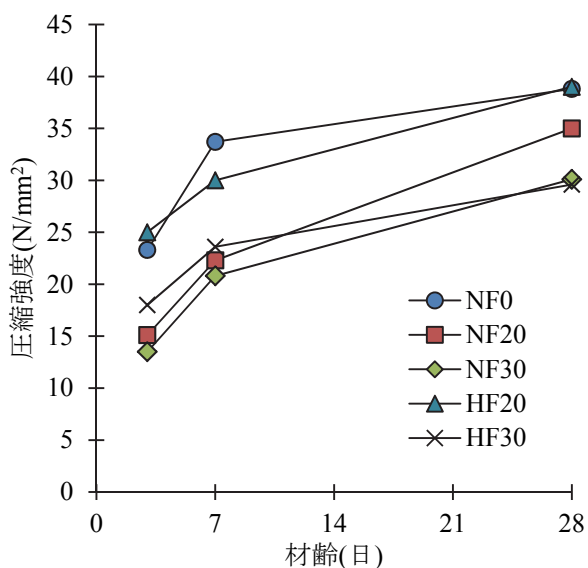


図-2.4 圧縮強度試験結果

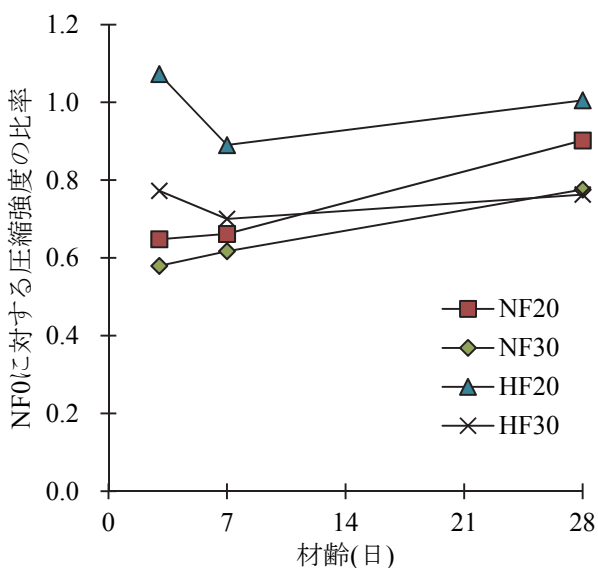


図-2.5 NF0 に対する圧縮強度の比率

### 2.3.3 促進中性化試験

促進中性化試験を JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して実施した。中性化深さの測定については、促進 1, 4, 8, 13, 26 週後の 5 時点において、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して実施した。その後、中性化深さの測定結果と式(2.1)を用いて、中性化速度係数を求めた。

$$y = \alpha \cdot \sqrt{t} \quad (2.1)$$

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

促進中性化試験から得られた中性化速度係数を図-2.6 に示す。セメント種別及び W/B が同一の場合には、フライアッシュ置換率を高くするほど中性化速度係数が大きくなった。N50 シリーズと N35 シリーズでは、フライアッシュ置換率が同一の場合には W/B が低いほど中性化速度係数が小さくなった。また、N35 シリーズと H40 シリーズを比較すると、H40 シリーズでは、N35 シリーズよりも W/B が高いが、フライアッシュ置換率を 20%とした試験結果を比較すると、H40 シリーズで中性化速度係数が小さくなった。さらに、NF シリーズと HF シリーズを比較すると、フライアッシュ置換率が同一の場合には、HF シリーズにおいて中性化速度係数が小さくなった。

材齢 28 日の圧縮強度と促進 4 週後の中性化速度係数の関係を図-2.7 に示す。圧縮強度が大きいほど中性化速度係数が小さくなった。

NF シリーズと HF シリーズの中性化速度係数の経時変化を図-2.8 に示す。中性化速度係数は、各試験期間における中性化深さを試験期間の平方根で除して求めた。促進 1 週後の時点では、HF シリーズの中性化速度係数が、NF シリーズの中性化速度係数よりも大幅に小さくなった。この原因は、早強ポルトランドセメントを用いた供試体では、普通ポルトランドセメントを用いた供試体と比較して、初期材齢での圧縮強度が大きく、中性化の進行速度が小さくなったためと考えられる。その後、両シリーズの中性化速度係数の差は徐々に小さくなったが、促進 26 週後においても、HF シリーズの中性化速度係数が NF シリーズの中性化速度係数よりも小さくなった。

以上の結果から、フライアッシュコンクリートにおいても、W/B が低く、また、材齢 28 日の圧縮強度が大きいほど中性化に対する抵抗性が向上することを確認した。また、フライアッシュ置換率が高いほど中性化速度係数が大きくなったが、早強ポルトランドセメントを用いることによって中性化に対する抵抗性を改善できる可能性があることを確認した。

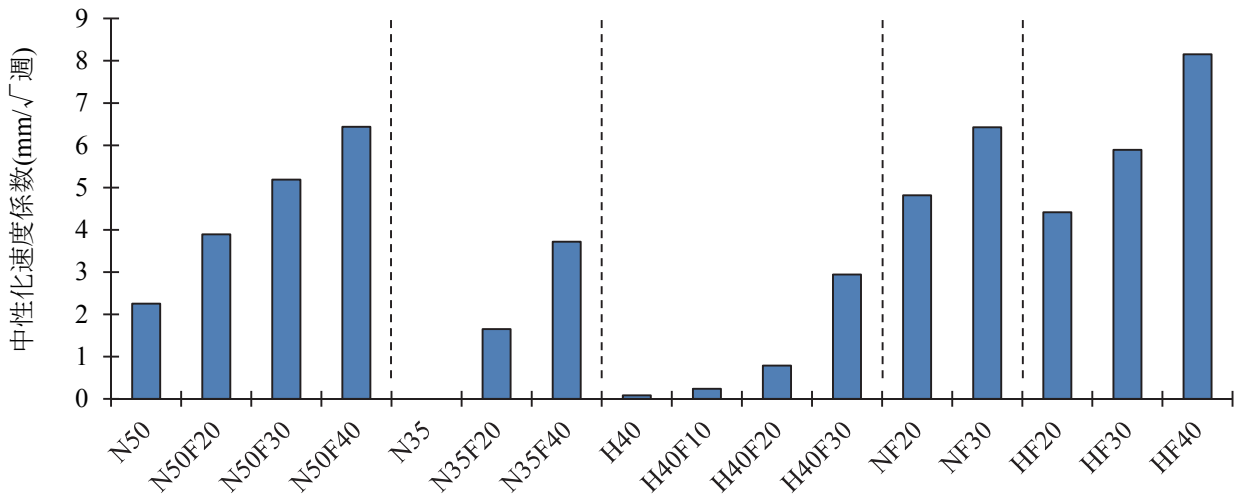


図-2.6 中性化速度係数の比較

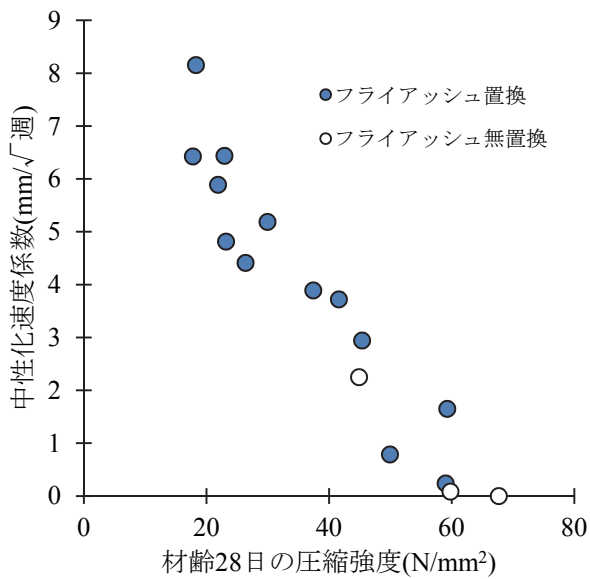


図-2.7 圧縮強度と中性化速度係数の関係

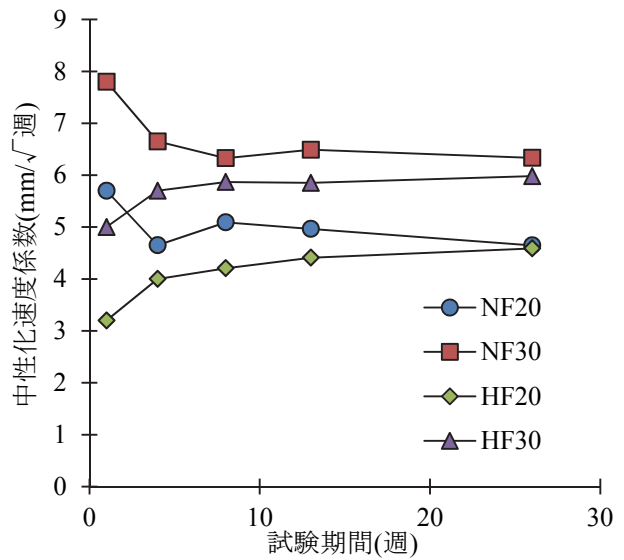


図-2.8 中性化速度係数の経時変化

#### 2.3.4 塩水浸せき試験

塩水浸せき試験を JSCE-G 572 「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に準拠して実施した。浸せき期間については、N50 シリーズと N35 シリーズ、H40 シリーズで 20 ヶ月間、NF シリーズと HF シリーズで 24 ヶ月間とした。塩化物イオン濃度の測定については、JIS A 1154 「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して実施した。測定深度については、A0 配合では 0～10, 10～20, 20～30, 30～40, 40～50, 50～60mm の 6 深度、B0 配合ではコンクリートカッターの切りしろを考慮して 0～10, 14～24, 28～38, 42～52, 56～66mm の 5 深度とした。

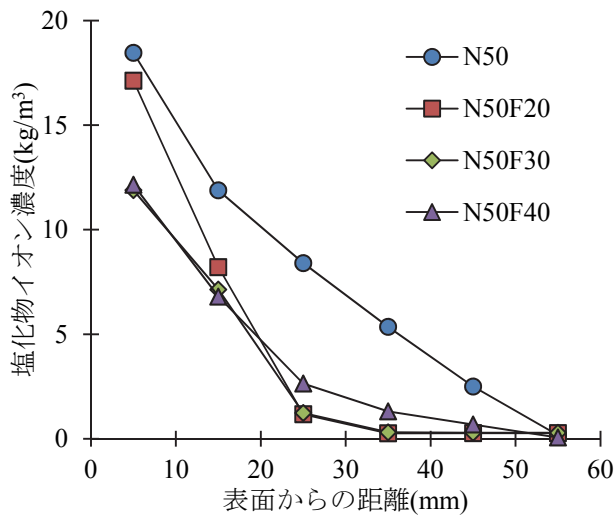
塩化物イオン濃度の分布を図-2.9 に示す。いずれのシリーズにおいても、フライアッシュの使用の有無による差が明確に現れており、フライアッシュコンクリートでは塩化物イオンの浸透が大幅に抑制された。

N50 シリーズにおいて、フライアッシュを用いた N50F20, N50F30, N50F40 では、フライアッシュを用いていない N50 と比較して、表面からの距離が 20～30mm の位置の塩化物イオン濃度が 15～30% となり、塩化物イオンの浸透が抑制された。また、N50 シリーズよりも W/B を小さくした N35 シリーズにおいて、フライアッシュを用いた N35F20, N35F40 では、塩化物イオンの浸透が表面からの距離 20mm までに留まっており、W/B の低減によって塩化物イオンの浸透がさらに抑制された。H40 シリーズにおいても、フライアッシュの使用によって塩化物イオンの浸透が抑制された。

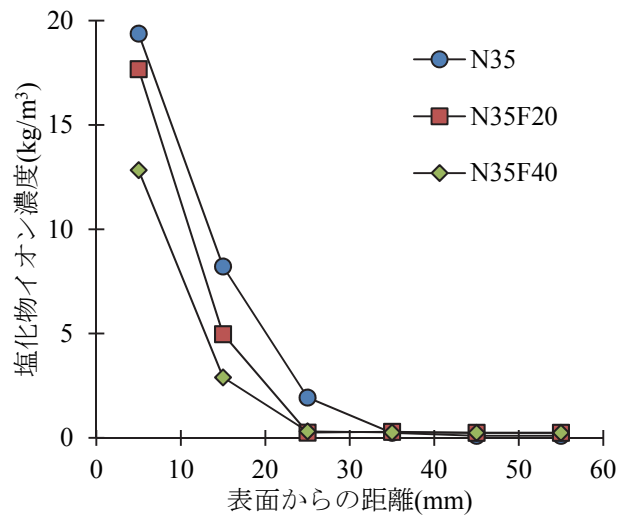
一方、NF シリーズと HF シリーズの結果によると、W/B 及びフライアッシュ置換率が同一の場合には、セメント種別の違いによって塩化物イオンの浸透状況には大幅な差がなかった。したがって、セメント種別がフライアッシュコンクリートの塩化物イオン浸透に対する抵抗性に与える影響は小さいと考えられる。

以上の結果から、フライアッシュコンクリートでは、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塩化物イオン浸透に対する抵抗性が大幅に向上することを確認した。また、W/B やフライアッシュ置換率が同一の場合には、セメント種別の違いが塩化物イオン浸透に対する抵抗性に与える影響は小さいと考えられる。

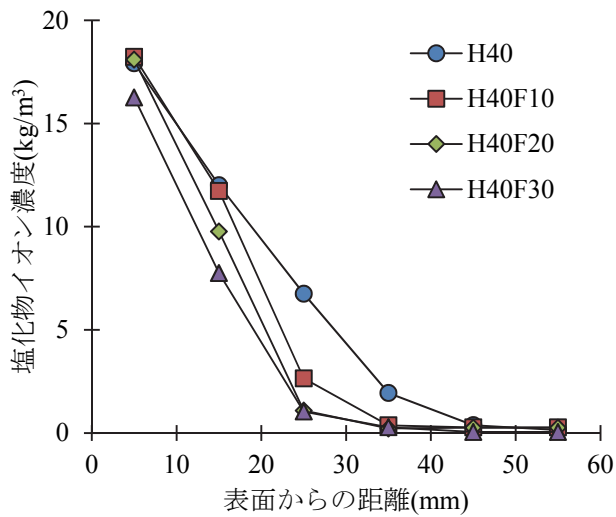




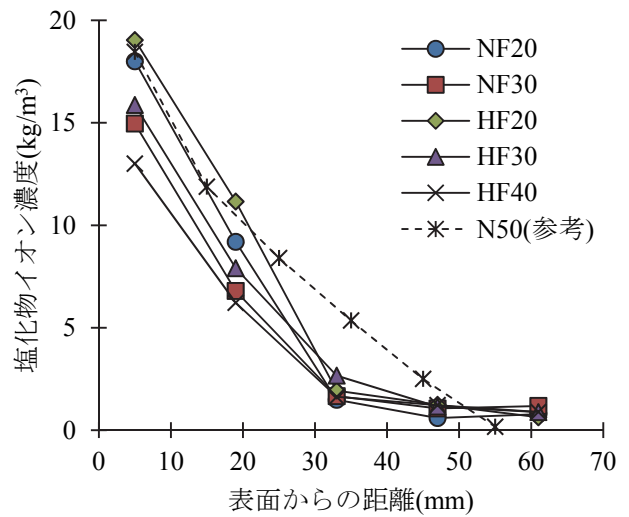
(A)N50 シリーズ



(B)N35 シリーズ



(C)H40 シリーズ



(D)NF シリーズ・HF シリーズ

図-2.9 塩化物イオン濃度の分布

### 2.3.5 長さ変化試験

NFシリーズとHFシリーズを対象として、長さ変化試験をJIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法 第3部：ダイヤルゲージ方法」に準拠して実施した。材齢7, 14, 28, 56, 91, 182, 273日及び1年の8時点において、供試体の中心軸のひずみを測定した。

長さ変化試験結果を図-2.10に示す。いずれの配合においても、材齢91日まで収縮が進行し、その後の収縮ひずみの変化は僅かであった。NFシリーズでは、NF20とNF30の収縮ひずみが同等となり、NF0と比較して収縮ひずみが約15%小さくなった。フライアッシュを用いることによって、配合上では単位水量の低減が図られたため、収縮ひずみの抑制効果が得られた。一方、HFシリーズでは、NFシリーズと比較して収縮ひずみが小さく、早強ポルトランドセメントを用いることによって、収縮ひずみがさらに抑制されたことがわかる。また、HFシリーズにおいても、フライアッシュ置換率の違いによる収縮ひずみの差はほとんど生じなかった。

### 2.3.6 自己収縮試験

NFシリーズとHFシリーズを対象として、フライアッシュコンクリートの自己収縮特性に関する基礎データを得るため、自己収縮試験を「(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法」<sup>4)</sup>に準拠して実施した。材齢7, 14, 28, 56, 91, 182, 273日及び1年の8時点で得られた埋込み型ひずみ計の値を温度補正して自己収縮ひずみを求めた。

自己収縮試験結果を図-2.11に示す。セメント種別にかかわらず、フライアッシュ置換率を高くするほど自己収縮ひずみが小さくなった。また、HFシリーズでは、NFシリーズよりも自己収縮ひずみが小さく、早強ポルトランドセメントを用いることによって、自己収縮ひずみが抑制されたことがわかる。ただし、ここで得られた自己収縮ひずみは、前述した収縮ひずみよりも大幅に小さい値であった。

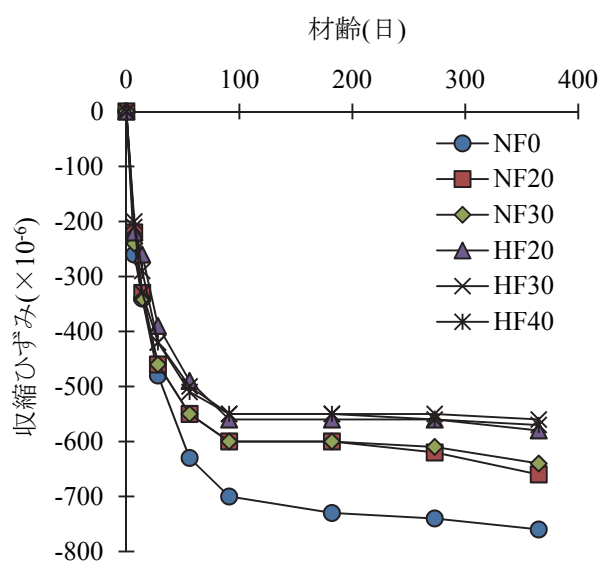


図-2.10 長さ変化試験結果

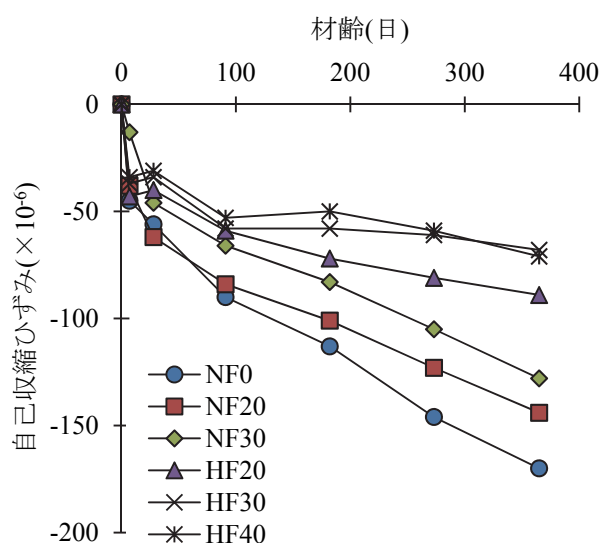


図-2.11 自己収縮試験結果

### 2.3.7 断熱温度上昇試験

NFシリーズとHFシリーズを対象として、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」<sup>5)</sup>の JCI - SQA3「コンクリートの断熱温度上昇試験 (案)」に準拠して断熱温度上昇試験を実施した。ここでは、材齢 14 日までの断熱温度上昇量を測定した。

断熱温度上昇試験結果を図-2.12 に示す。NFシリーズとHFシリーズのいずれにおいても、ポルトランドセメントの一部をフライアッシュで置換することによって、終局断熱温度上昇量が小さくなった。フライアッシュコンクリートでは、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、単位セメント量が少なく、セメントの水和に伴う発熱が抑制されたためと考えられる。また、フライアッシュ置換率を高めるほど終局断熱温度上昇量が低下する傾向にあった。この結果、NF0 と HF20 は、同様の断熱温度上昇特性を示した。

コンクリートの断熱温度上昇特性予測式の一つとして、式(2.2)の「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」の断熱温度上昇特性式がある。式(2.2)を用いて得られた断熱温度上昇特性の予測値は、図-2.12 に示した測定値よりも若干大きい値となった。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-r(t-t_{0,Q})}) \quad (2.2)$$

ここに、 $t$ : 材齢 (日)、 $Q(t)$ : 材齢  $t$  日までの断熱温度上昇量 (°C)、 $Q_{\infty}$ : 終局断熱温度上昇量 (°C)、 $r$ : 断熱温度上昇速度に関する係数、 $t_{0,Q}$ : 発熱開始材齢 (日) である。

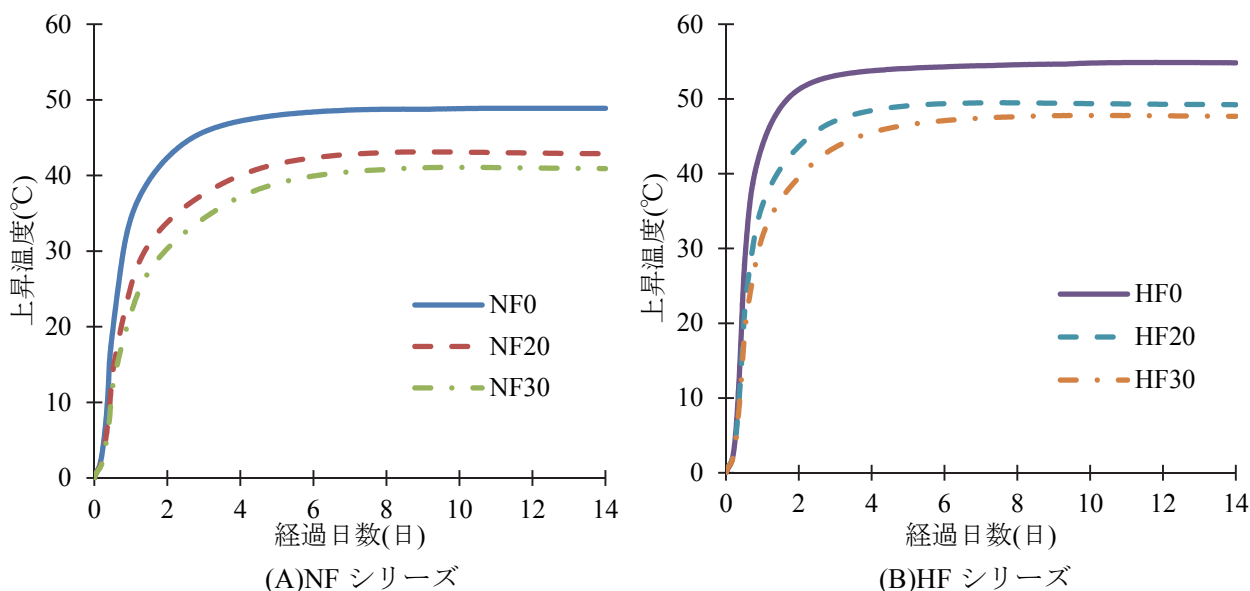


図-2.12 断熱温度上昇試験結果

### 2.3.8 凍結融解試験

N50F40を除くN50シリーズの供試体を対象として、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」のA法に準拠して凍結融解試験を実施した。材齢28日の標準養生終了直後から凍結融解試験を開始した。ただし、相対動弾性係数と質量の測定については、凍結融解0、30、60、90、120、150、180、240、300サイクル後に行った。

いずれの配合においても、AE剤を用いて空気量の目標を $4.5 \pm 1.5\%$ とした。供試体の製作時期が異なったため、凍結融解試験に用いた供試体のスランプと空気量の測定値は、表-2.2の値とは異なり、N50で11.0cm、4.8%、N50F20で12.0cm、5.0%、N50F30で12.0cm、4.4%であった。

凍結融解試験で得られた相対動弾性係数を図-2.13、質量変化率を図-2.14に示す。いずれの配合においても、相対動弾性係数は90%以上で推移しており、ほとんど低下することはなかった。フライアッシュコンクリートにおいてもAE剤を用いて所定の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比較して、凍結融解による内部損傷に対して同等の抵抗性を保持できると考えられる。質量減少率については、凍結融解サイクル数180付近まで大きな差は見られなかったが、凍結融解サイクル数180以降では、フライアッシュ置換率を高くするほど質量減少率が大きくなった。フライアッシュコンクリートでは、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、供試体表面においてスケーリングによる損傷の程度が大きくなったことが原因と考えられる。

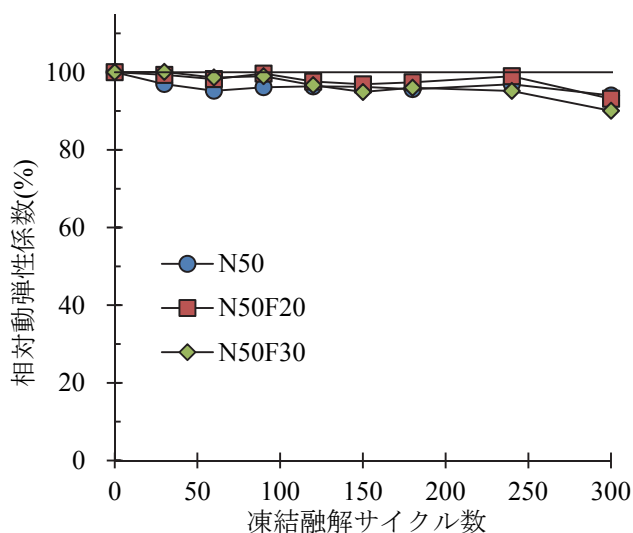


図-2.13 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

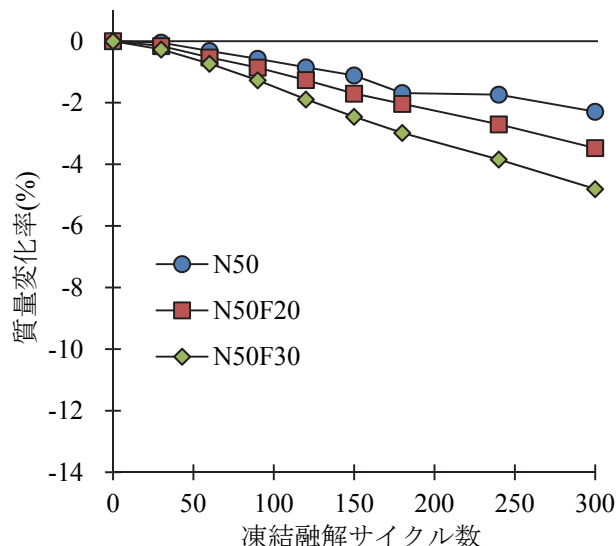


図-2.14 凍結融解試験結果 (質量変化率)

## 2.4 まとめ

この章では、フライアッシュコンクリートの基本的性状について検討した結果を示した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) フライアッシュコンクリートでは、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、単位水量を低減できた。また、フライアッシュコンクリートでは、セメント種別の違いにかかわらず、ブリーディング量を低減できた。ブリーディング量の低減の程度は早強ポルトランドセメントを用いた場合に小さくなった。
- (2) フライアッシュコンクリートの始発時間及び終結時間は、フライアッシュ置換率を高くするほど遅延した。ただし、早強ポルトランドセメントを用いると、普通ポルトランドセメントを用いたフライアッシュコンクリートと比較して、始発時間及び終結時間の遅延の程度が小さくなった。
- (3) 早強ポルトランドセメントを用いることによって、フライアッシュコンクリートの初期材齢での強度発現の遅延を改善できた。W/B が同一の場合、早強ポルトランドセメントの 20%をフライアッシュで置換し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同等であった。
- (4) 促進中性化試験の結果、フライアッシュコンクリートの中性化速度係数は、フライアッシュ置換率を高くするほど大きくなった。早強ポルトランドセメントを用いると、普通ポルトランドセメントを用いたフライアッシュコンクリートと比較して、初期材齢での中性化速度係数が小さくなった。
- (5) 塩水浸せき試験の結果、フライアッシュコンクリートでは、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、塩化物イオン浸透を大幅に抑制することができた。この傾向は、セメント種別の違いにかかわらず、確認することができた。
- (6) 長さ変化試験の結果、フライアッシュコンクリートでは、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、収縮ひずみが小さくなった。また、早強ポルトランドセメントを用いると、普通ポルトランドセメントを用いたフライアッシュコンクリートと比較して、収縮ひずみが小さくなった。
- (7) 断熱温度上昇試験の結果、フライアッシュコンクリートでは、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、終局断熱温度上昇量が小さくなった。早強ポルトランドセメントを用い、かつ、フライアッシュ置換率を 20%としたフライアッシュコンクリートの断熱温度上昇特性は、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同等となった。
- (8) 凍結融解試験の結果、AE 剤を用いて空気量  $4.5 \pm 1.5\%$ としたフライアッシュコンクリートの凍結融解による内部損傷に対する抵抗性は、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同等であった。

## 3 章 養生条件の異なるフライアッシュコンクリートの基本的性状

### 3.1 はじめに

この章では、初期材齢における湿潤養生期間や養生方法、養生温度等の養生条件の違いがフライアッシュコンクリートの基本的性状に与える影響について検討した結果を示す。

フライアッシュコンクリートの初期材齢での強度発現は、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遅くなることが多い。このため、例えば、コンクリート標準示方書<sup>6)</sup>では、混合セメント B 種を用いる場合には普通ポルトランドセメントを用いる場合よりも湿潤養生期間を 2~3 日間長くすることが推奨されている。すなわち、フライアッシュコンクリートでは、初期材齢における湿潤養生期間や養生方法、養生温度等の養生条件の違いが、強度特性や耐久性に大きく影響を与える可能性がある。そこで、セメント種別、W/B、フライアッシュ置換率の異なる供試体を製作し、初期材齢における養生条件の違いがフライアッシュコンクリートの強度特性と耐久性に与える影響について検討した<sup>7), 8)</sup>。

### 3.2 養生期間がフライアッシュコンクリートの基本的性状に及ぼす影響

#### 3.2.1 コンクリートの配合及び養生条件

##### (1) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-3.1 に示す。普通ポルトランドセメントを用いた配合は、W/B を 50% としてフライアッシュ置換率を 0%, 20%, 30%とした N50 シリーズ (N50, N50F20, N50F30), W/B を 35%としてフライアッシュ置換率を 30%とした N35F30 の計 4 種類とした。また、早強ポルトランドセメントを用いた配合は、W/B を 50%としてフライアッシュ置換率を 30%とした H50F30 の 1 種類とした。なお、単位水量については  $165\text{kg/m}^3$ , 単位粗骨材量については  $968\text{kg/m}^3$  で一定とした。

セメントには、普通ポルトランドセメント (OPC) または早強ポルトランドセメント (HPC) を用いた。フライアッシュには JIS A 6201 に適合したフライアッシュ II 種 (FA) を用いた。細骨材には静岡県掛川産陸砂 (S), 粗骨材には茨城県笠間産碎石の 5 号及び 6 号を均等に混合したもの (G) を用いた。粗骨材の最大寸法は 20mm である。いずれの配合も、スランプ  $12\pm 2.5\text{cm}$ , 空気量  $4.5\pm 1.5\%$  となるよう化学混和剤の使用量を調整した。化学混和剤には、スランプ及び空気量の調整のため、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を主成分とするもの (WR), W/B=50%で使用) または高性能 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 (SP), W/B=35%で使用) を用い、必要に応じて AE 剤 (ポルトランドセメントのみを用いた配合で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とするもの (AE1), 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 (AE2) を添加した。

表-3.1 コンクリートの配合 (A1 配合)

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						s/a (%)	化学混和剤(%)				スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	OPC	HPC	FA	S	G		WR	SP	AE1	AE2		
N50	50	165	330	—	—	827	968	47.2	0.2650	—	0.002	—	14.0	5.2
N50F20			264	—	66	807		46.6	0.1325	—	—	0.018	11.5	4.4
N50F30			231	—	99	797		46.2	0.0663	—	—	0.025	11.0	4.6
H50F30	50	165	—	231	99	796	968	46.2	0.1590	—	—	0.025	12.0	4.8
N35F30	35	165	330	—	141	670	968	42.0	—	0.475	—	0.015	14.5	5.4

※AE 減水剤 (W/B=50%, WR), 高性能 AE 減水剤(W/B=35%, SP), AE 剤 (AE1, AE2) の使用量をスランプ 12±2.5cm, 空気量 4.5±1.5%となるよう調整した。化学混和剤の使用量については結合材に対する割合で表示した。

## (2) 養生条件

フライアッシュコンクリートの強度や耐久性に初期材齢における湿潤養生期間や養生方法が与える影響を明らかにするため、表-3.2 に示す 6 種類の養生条件を設定した。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を行った後、十分に湿らせた養生マットで被覆して湿潤養生を行い、材齢 3 日に脱型した。その後、表-3.2 に示す養生条件で養生を行った後、試験時まで温度 20°C, 湿度 60%の室内に静置した。

表-3.2 養生条件

養生条件		養生方法
標準養生	W	材齢 28 日まで水中養生した後、試験時まで温度 20°C, 湿度 60%の室内に静置
気中養生	D	脱型後から試験時まで温度 20°C, 湿度 60%の室内に静置
湿潤養生	C5	材齢 5 日まで湿潤養生した後、試験時まで温度 20°C, 湿度 60%の室内に静置
	C7	材齢 7 日まで湿潤養生した後、試験時まで温度 20°C, 湿度 60%の室内に静置
	C10	材齢 10 日まで湿潤養生した後、試験時まで温度 20°C, 湿度 60%の室内に静置
	C14	材齢 14 日まで湿潤養生した後、試験時まで温度 20°C, 湿度 60%の室内に静置

## 3.2.2 コンクリートの試験及び試験結果

### (1) スランプ試験・空気量測定

スランプ試験及び空気量測定の結果を前述の表-3.1 に併記した。スランプは 12±2.5cm, 空気量は 4.5±1.5%となった。セメント種別やフライアッシュ置換率にかかわらず、化学混和剤の種類の設定と使用量の調整を適切に行うことによって、所定のスランプと空気量を確保できた。

## (2) 圧縮強度試験

材齢 28, 91 日において、圧縮強度試験を JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して実施した。供試体の寸法は  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  である。

圧縮強度試験結果を図-3.1 に示す。いずれの配合においても、初期材齢での湿潤養生期間が長いほど材齢 91 日の圧縮強度が大きくなった。また、材齢 28 日の圧縮強度に対する材齢 91 日の圧縮強度の比率を図-3.2 に示す。標準養生を行った供試体では材齢 28 日から材齢 91 日までの圧縮強度の増加が顕著であったが、気中養生や湿潤養生を行った供試体では材齢 28 日から材齢 91 日までの圧縮強度の増加は僅かであった。初期材齢での湿潤養生期間の長短は、長期的な強度発現に影響を与えらる。

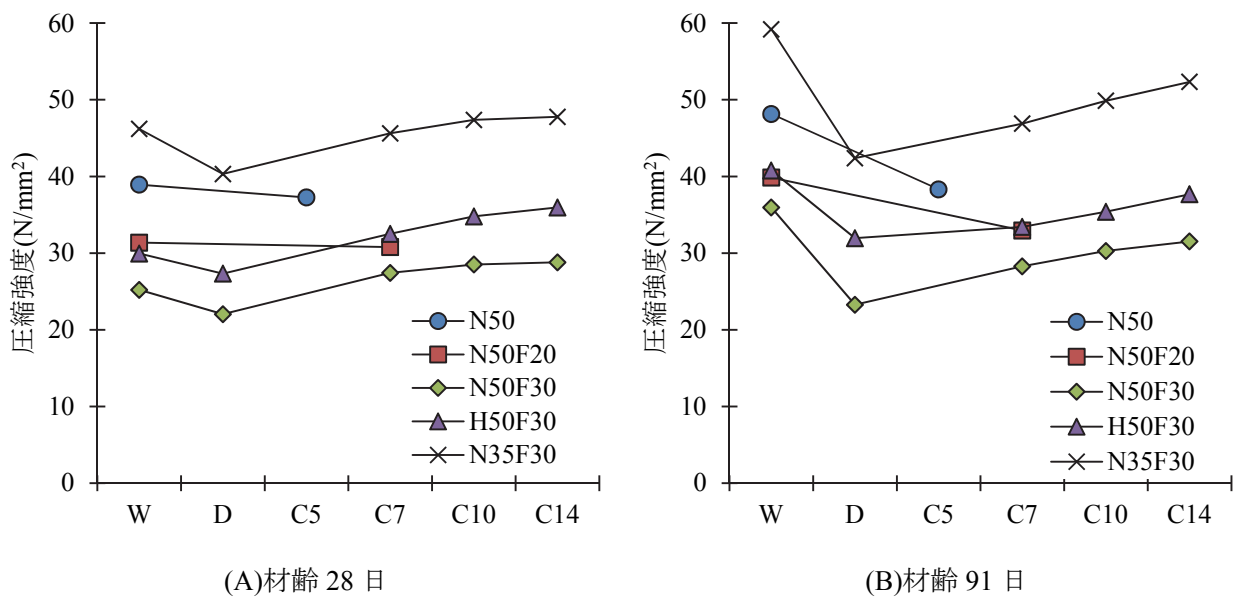


図-3.1 圧縮強度試験結果

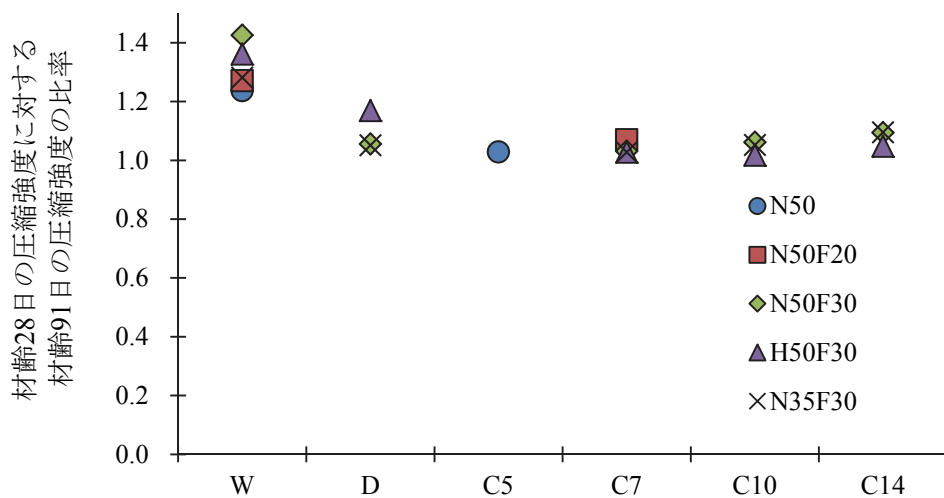


図-3.2 材齢 28 日の圧縮強度に対する材齢 91 日の圧縮強度の比率



### (3) 促進中性化試験

促進中性化試験を JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して実施した。中性化深さの測定については、促進 1, 4, 8, 13, 26 週後の 5 時点において、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して実施した。中性化深さの測定結果と式(2.1)を用いて、中性化速度係数を求めた。ただし、供試体の養生については表-3.2 に示す養生条件で行い、材齢 56 日から促進中性化試験を開始した。

促進中性化試験から得られた中性化速度係数を図-3.3 に示す。いずれの配合においても、気中養生 D とした場合に中性化速度係数が大きくなった。また、若干のばらつきは認められるが、湿潤養生期間を長くするほど中性化速度係数が小さくなる傾向にあった。

次に、材齢 28 日の圧縮強度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-3.4 に示す。湿潤養生期間や養生方法が異なる場合においても、フライアッシュ置換率を 20~30%としたフライアッシュコンクリートを対象とした今回の実験結果の範囲内では、前章の結果と同様に圧縮強度が大きいほど中性化速度係数が小さくなる傾向にあったことを確認できる。

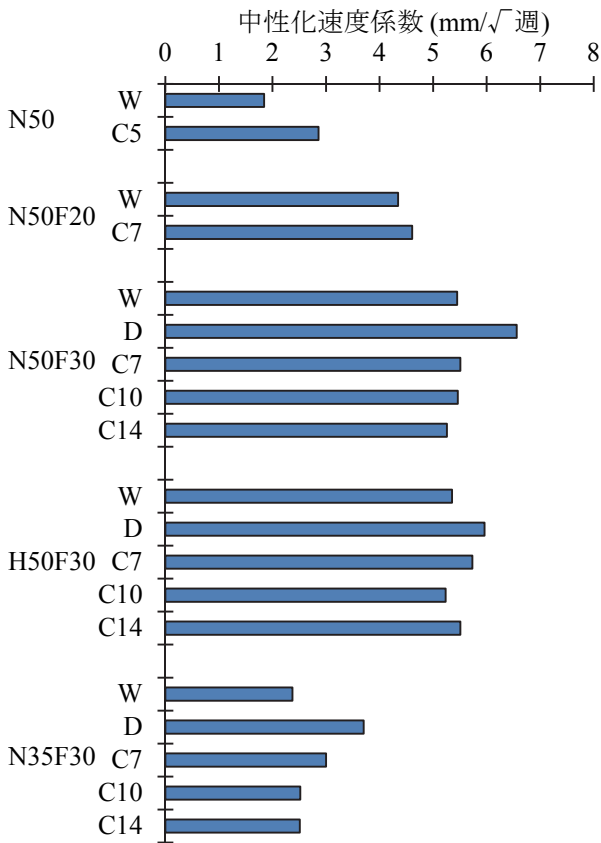


図-3.3 中性化速度係数の比較

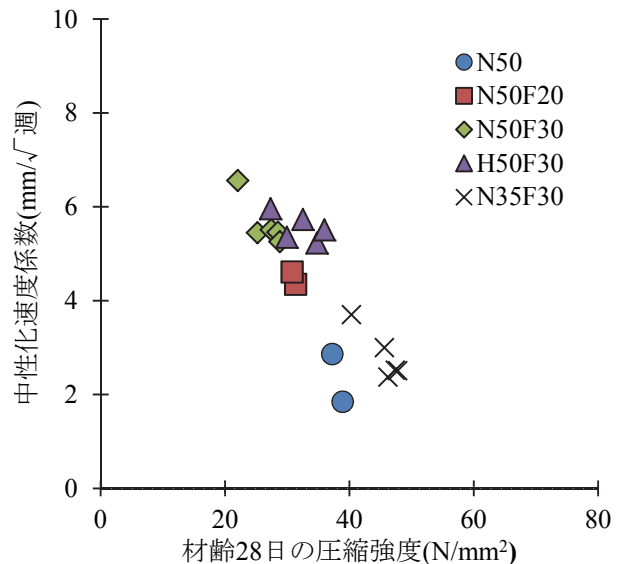


図-3.4 圧縮強度と中性化速度係数の関係

### 3.3 養生方法及び養生温度がフライアッシュコンクリートの基本的性状に及ぼす影響

#### 3.3.1 コンクリートの配合及び養生条件

##### (1) コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-3.3に示す。普通ポルトランドセメントを用いたNFシリーズと早強ポルトランドセメントを用いたHFシリーズがあり、どちらのシリーズにおいても、W/Bを50%として、フライアッシュ置換率を0%、20%、30%とした。フライアッシュの使用による単位水量の低減効果を見込み、フライアッシュを用いた配合ではポルトランドセメントのみを用いた配合よりも単位水量を小さくした。

セメントには、普通ポルトランドセメント（OPC）または早強ポルトランドセメント（HPC）を用いた。フライアッシュには、JIS A 6201に適合したフライアッシュⅡ種（FA）を用いた。細骨材には静岡県掛川産陸砂（S）、粗骨材には茨城県笠間産砕石の5号及び6号を均等に混合したもの（G）を用いた。粗骨材の最大寸法は20mmである。いずれの配合も、スランプ $10\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5\pm 1.5\%$ となるよう化学混和剤の使用量を調整した。化学混和剤には、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（WR））を用い、必要に応じてAE剤（ポルトランドセメントのみを用いた配合で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤（AE1）、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（AE2））を添加した。

表-3.3 コンクリートの配合（B1配合）

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						s/a (%)	化学混和剤(%)			スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	OPC	HPC	FA	S	G		WR	AE1	AE2		
NF0	50	165	330	—	—	828	966	47.2	0.25	0.0040	—	9.5	5.3
NF20		159	254	—	64	814	988	46.2	0.25	—	0.0157	11.0	4.8
NF30		156	218	—	94	806	1000	45.7	0.25	—	0.0224	9.0	3.5
HF0	50	170	—	340	0	830	954	47.2	0.25	0.0059	—	10.5	5.3
HF20		164	—	262	66	812	970	46.2	0.25	—	0.0213	8.5	4.0
HF30		161	—	225	97	803	980	45.7	0.25	—	0.0326	9.0	5.5

※AE減水剤（WR）、AE剤（AE1、AE2）の使用量をスランプ $10\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5\pm 1.5\%$ となるよう調整した。化学混和剤の使用量については結合材に対する割合で表示した。

##### (2) 養生方法及び養生温度

養生方法は、水中養生と封緘養生の2種類とした。封緘養生では、脱型後の供試体をラップで覆うことによって乾燥を防止した。養生温度については、フライアッシュコンクリートの低温時の強度発現を確認するため、5°C、10°C、20°Cの3種類とした。ただし、養生温度5°Cについては、水中養生を行った供試体のみとした。また、練上がり温度を養生温度と同程度とするため、コンクリートに用いた材料の保管と練混ぜについては、養生温度と同じ温度とした恒温槽内において実施した。

### 3.3.2 コンクリートの試験及び試験結果

#### (1) スランプ試験・空気量測定

スランプ試験及び空気量測定の結果を前述の表-3.3 に併記した。これらの結果は、温度 20℃の環境で得られたものである。いずれの配合においても、スランプは  $10 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量  $4.5 \pm 1.5\%$  となった。化学混和剤の種類を選定と使用量の調整を適切に行うことによって、所定のスランプと空気量を確保することができた。

#### (2) 圧縮強度試験・ヤング係数試験

材齢 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91 日において、圧縮強度試験を JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して実施した。また、材齢 28, 56, 91 日の圧縮強度試験と同時に、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して、ヤング係数を測定した。供試体の寸法は  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  である。

圧縮強度試験結果を図-3.5 に示す。いずれの配合においても、養生温度が高いほど圧縮強度が大きくなった。また、養生温度が同一の場合、水中養生を行った供試体の圧縮強度が封緘養生を行った供試体よりも大きくなった。

普通ポルトランドセメントを用いた NF シリーズでは、フライアッシュ置換率を高くするほど圧縮強度が小さくなった。フライアッシュ置換率を 20%とした NF20 では、養生温度を 10℃以上とした場合に、材齢 3 日の圧縮強度が  $10\text{N/mm}^2$  以上となった。一方、早強ポルトランドセメントを用いた HF シリーズにおいては、フライアッシュ置換率を 20%あるいは 30%とした HF20 と HF30 では、いずれの養生温度の場合においても、材齢 3 日の圧縮強度が  $10\text{N/mm}^2$  以上となった。打込み後のフライアッシュコンクリートを 5℃や 10℃の低温環境で養生した場合においても、早強ポルトランドセメントを用いることによって初期材齢での十分な強度発現を確保することができると考えられる。

次に、材齢 28, 56, 91 日の圧縮強度とヤング係数の関係を図-3.6 に示す。同図では、コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に示される圧縮強度とヤング係数の関係を「土木学会式」として併記した。フライアッシュの使用の有無にかかわらず、圧縮強度が大きくなるほどヤング係数も大きくなり、両者の関係は土木学会式とも概ね一致した。フライアッシュ置換率やセメント種別、養生温度の違いにかかわらず、フライアッシュコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係は同様の傾向を示した。

#### (3) 引張強度試験

養生温度を 20℃とした供試体を対象として、材齢 28 日の引張強度試験を JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準拠して実施した。圧縮強度と引張強度の関係を図-3.7 に示す。同図では、コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に示される圧縮強度と引張強度の関係を「土木学会式」として併記した。

フライアッシュの置換率やセメント種別、養生方法の違いにかかわらず、圧縮強度と引張強度の関係は同様の傾向を示し、土木学会式とも概ね一致した。

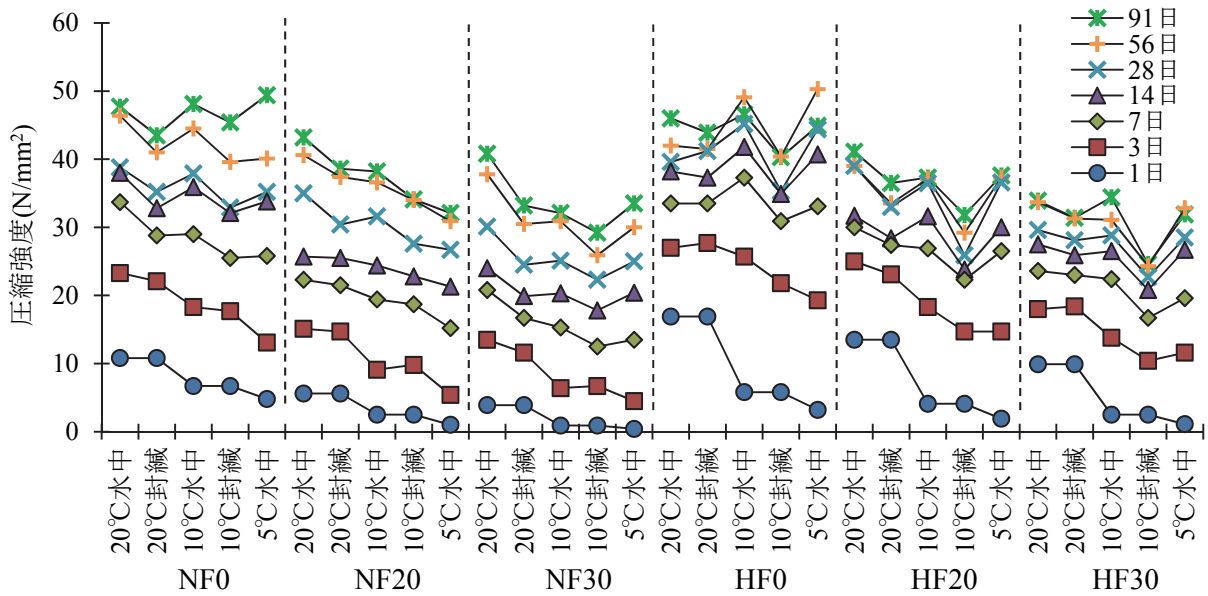


図-3.5 圧縮強度試験結果

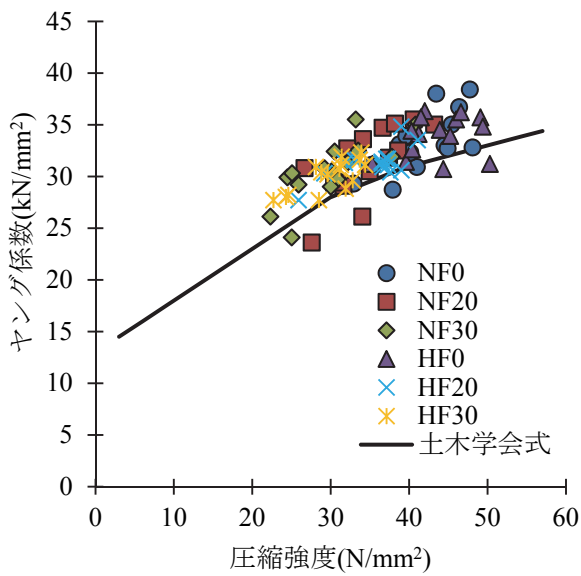


図-3.6 圧縮強度とヤング係数の関係

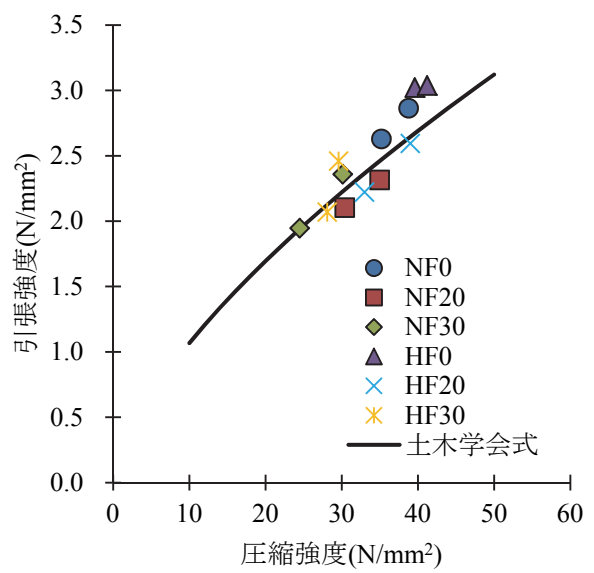


図-3.7 圧縮強度と引張強度の関係

#### (4) 促進中性化試験

促進中性化試験を JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して実施した。中性化深さの測定については、促進 1, 4, 8, 13, 26 週後の 5 時点において、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して実施した。中性化深さの測定結果と式(2.1)を用いて、中性化速度係数を求めた。ただし、供試体の養生については材齢 28 日まで各養生方法及び養生温度で行い、材齢 28 日から材齢 56 日までは温度 20℃、湿度 60%の室内に保管し、その後、材齢 56 日から促進中性化試験を開始した。

促進中性化試験から得られた中性化速度係数を図-3.8 に示す。フライアッシュコンクリートの中性化速度係数は、若干のばらつきが認められるが、養生温度が低いほど大きくなる傾向にあった。この原因を検討するため、材齢 28 日の圧縮強度と中性化速度係数の関係を図-3.9 に示す。この結果によると、圧縮強度が小さいほど中性化速度係数が大きくなったことを読み取れる。すなわち、養生温度の低い供試体では、圧縮強度が小さく、中性化に対する抵抗性が比較的低い時点で促進中性化試験を行ったため、中性化速度係数が大きくなったと推察される。

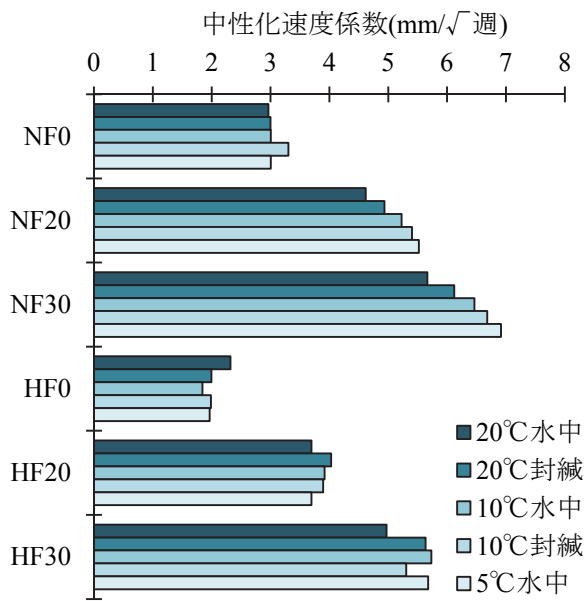


図-3.8 中性化速度係数の比較

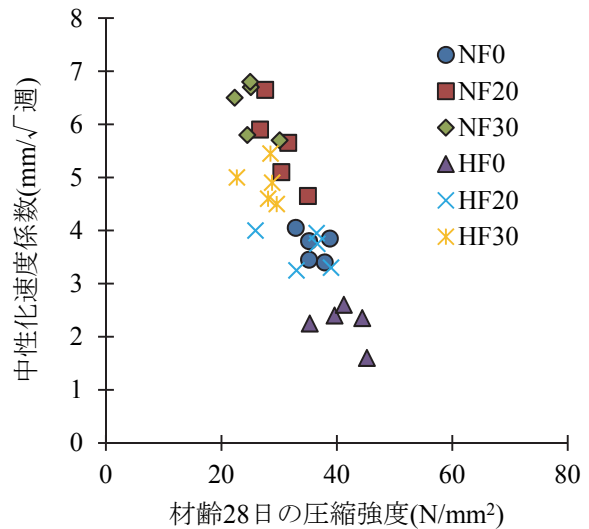


図-3.9 圧縮強度と中性化速度係数の関係

### 3.4 まとめ

この章では、初期材齢における湿潤養生期間や養生方法、養生温度等の養生条件の違いがフライアッシュコンクリートの基本的性状に与える影響について検討した結果を示した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) フライアッシュコンクリートでは、セメント種別や W/B の違いにかかわらず、初期材齢の湿潤養生期間を長くするほど圧縮強度が大きくなった。
- (2) フライアッシュコンクリートでは、セメント種別や W/B の違いにかかわらず、初期材齢の湿潤養生期間を長くするほど中性化速度係数が小さくなった。湿潤養生期間を長くすることによって、圧縮強度の増加に加えて、中性化に対する抵抗性を改善できることを確認した。
- (3) フライアッシュコンクリートの養生温度が 5℃や 10℃の低温となる場合、早強ポルトランドセメントを用いることによって初期材齢の強度発現の遅延を改善できることを確認した。また、セメント種別や養生温度、養生方法の違いにかかわらず、圧縮強度とヤング係数や引張強度の関係は同様の傾向を示すことを確認した。

## 4 章 Non-AE としたフライアッシュコンクリートの基本的性状

### 4.1 はじめに

この章では、Non-AE とした（AE 剤を用いない）フライアッシュコンクリートの基本的性状について検討した結果を示す。

前述したように、フライアッシュコンクリートの普及を進める際の課題の一つとして、AE 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が挙げられている。凍結融解作用を受けない温暖な地域ではコンクリートの凍結融解に対する抵抗性の確保の観点からはエントレインドエアを導入することの必要性が必ずしも高くなく、フライアッシュコンクリートの普及を進める際の課題の一つである空気量調整の困難さが軽減される可能性があると考えられる。そこで、Non-AE とした（AE 剤を用いない）フライアッシュコンクリートの基本的性状について検討した。

### 4.2 コンクリートの配合及びフレッシュ性状

#### 4.2.1 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表-4.1 に示す。前述の 2 章で示した NF0, N50, NF20, NF30 の 4 配合に加えて、NF20 と NF30 で AE 剤を用いない Non-AE コンクリート（NF20(Non-AE), NF30(Non-AE)）を対象として検討した。Non-AE コンクリートでは、AE 剤を無添加とした。Non-AE コンクリートの単位水量については、試し練りを行い、スランプ  $12 \pm 2.5\text{cm}$  となるように選定した。

いずれの供試体も打込み翌日に脱型し、温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度 100%の室内で材齢 28 日まで標準養生を行った。養生終了後から試験時までには、温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度 60%の室内で供試体を保管した。

セメントには、普通ポルトランドセメント（OPC）または早強ポルトランドセメント（HPC）を用いた。フライアッシュには、JIS A 6201 に適合したフライアッシュ II 種（FA）を用いた。細骨材には静岡県掛川産陸砂（S）、粗骨材には茨城県笠間産碎石の 5 号及び 6 号を均等に混合したもの（G）を用いた。粗骨材の最大寸法は  $20\text{mm}$  である。必要に応じて、スランプ  $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量  $4.5 \pm 1.5\%$  となるよう化学混和剤の使用量を調整した。化学混和剤には、AE 減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリオールとの複合体を主成分とするもの（WR））を用い、AE 剤（ポルトランドセメントのみを用いた配合で変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤を主成分とするもの（AE1）、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（AE2））を添加した。

#### 4.2.2 スランプ試験・空気量測定

スランプ試験及び空気量測定の結果を表-4.1に併記した。AE コンクリートとした場合、スランプは  $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は  $4.5 \pm 1.5\%$  となった。一方、Non-AE コンクリートとした場合、AE 剤を無添加として単位水量を調整することによって、スランプは  $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は  $2.0\%$  以下となった。

表-4.1 コンクリートの配合

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					s/a (%)	化学混和剤(%)			スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	OPC	FA	S	G		WR	AE1	AE2		
NF0	50	165	330	—	828	966	47.2	0.250	0.0014	—	11.5	5.4
N50		165	330	—	827	968	47.2	0.265	0.0020	—	14.0	5.2
NF20		159	254	64	814	988	46.2	0.250	—	0.0104	11.5	4.8
NF30		156	218	94	806	1000	45.7	0.250	—	0.0151	11.0	5.0
NF20 (Non-AE)	50	169	270	68	835	974	47.2	0.250	—	—	11.5	1.9
NF30 (Non-AE)		165	231	99	830	988	46.7	0.250	—	—	13.0	1.6

※養生方法：打込み翌日に脱型して材齢 28 日まで標準養生を行った。標準養生終了後、温度 20℃、湿度 60%の室内で試験実施まで静置した。

※AE 減水剤 (WR)、AE 剤 (AE1、AE2) の使用量をスランプ  $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量  $4.5 \pm 1.5\%$  となるよう調整した。化学混和剤の使用量については結合材に対する割合で表示した。

#### 4.3 コンクリートの試験及び試験結果

##### 4.3.1 ブリーディング試験・凝結時間試験

JIS A 1123 「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠して実施したブリーディング試験結果を図-4.1に示す。Non-AE としたフライアッシュコンクリートにおいても、フライアッシュ置換率を高くするほどブリーディング量が小さくなった。また、AE コンクリートとした場合と Non-AE コンクリートとした場合のフライアッシュコンクリートのブリーディング量を比較すると、Non-AE コンクリートとした場合の単位水量が AE コンクリートとした場合よりも大きくなったが、ブリーディング量は同程度となった。

JIS A 1147 「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠して実施した凝結時間試験結果を図-4.2に示す。同図では、貫入抵抗値  $3.5\text{N/mm}^2$  及び  $28.0\text{N/mm}^2$  を直線で示しており、これらの直線と試験結果の回帰線との交点が始発時間及び終結時間となる。AE コンクリートとした場合と Non-AE コンクリートとした場合のフライアッシュコンクリートの始発時間と終結時間は同程度であり、空気量の違いが凝結時間に与える影響は小さいと考えられる。



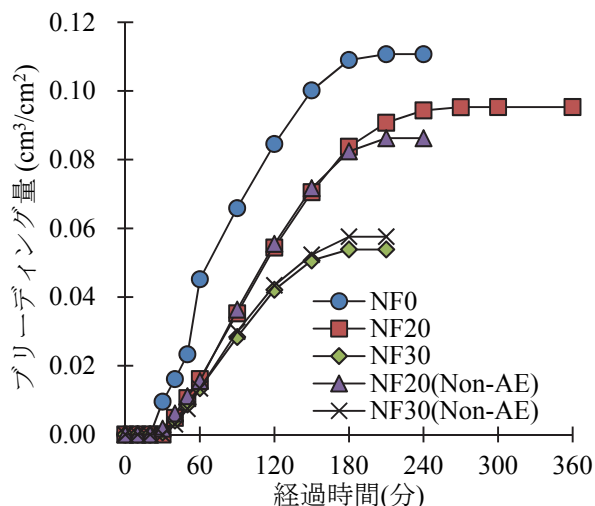


図-4.1 ブリーディング試験結果

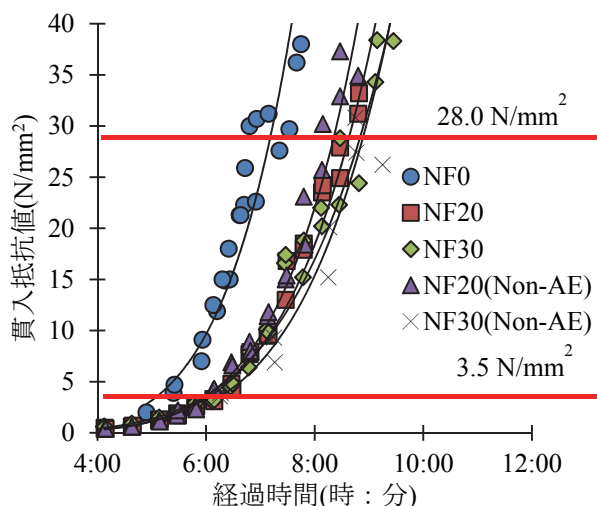


図-4.2 凝結時間試験結果

#### 4.3.2 圧縮強度試験

材齢 3, 5, 7, 28, 91 日において、圧縮強度試験を JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して実施した。供試体の寸法は  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  である。

圧縮強度試験結果を図-4.3 に示す。材齢 28 日の圧縮強度に着目すると、N50 と NF20(Non-AE)、NF20 と NF30(Non-AE)において、圧縮強度が同程度となった。Non-AE コンクリートとすることによってフライアッシュコンクリートの圧縮強度が大きくなったためと考えられる。また、フライアッシュ置換率が同一の NF20 と NF20(Non-AE)、NF30 と NF30(Non-AE)を比較すると、Non-AE コンクリートとすることによって、圧縮強度はフライアッシュ置換率 20%の場合に約 18%、フライアッシュ置換率 30%の場合に約 19%大きくなった。一般に、水セメント比が一定の条件下では、空気量を 1%小さくすることによって圧縮強度が 4~6%増加するとされている<sup>6)</sup>。表-4.1 によると、Non-AE コンクリートとした場合の空気量が AE コンクリートとした場合よりも約 3%小さくなったため、圧縮強度は約 15%増加すると予測される。図-4.3 の結果によると、Non-AE コンクリートとすることによって空気量の減少量から予測される程度の圧縮強度の増加が得られたと考えられる。これらの結果を踏まえると、Non-AE としたフライアッシュコンクリートでは、圧縮強度の増加が期待でき、初期材齢の強度発現の遅延を改善できる可能性があると考えられる。

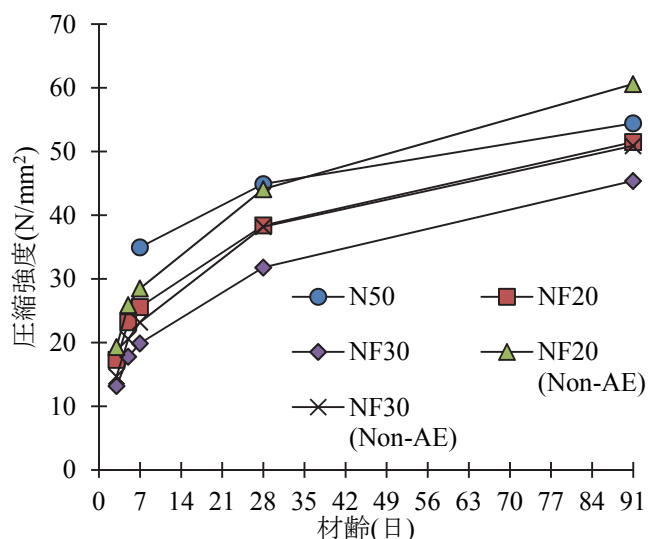


図-4.3 圧縮強度試験結果

#### 4.3.3 促進中性化試験

促進中性化試験を JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して実施した。中性化深さの測定については、促進 1, 4, 8, 13, 26 週後の 5 時点において、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さ測定方法」に準拠して実施した。中性化深さの測定結果と式(2.1)を用いて、中性化速度係数を求めた。

促進中性化試験から得られた中性化速度係数を図-4.4 に示す。フライアッシュ置換率が同一の NF20 と NF20(Non-AE), NF30 と NF30(Non-AE)を比較すると、Non-AE とすることによって中性化速度係数が若干小さくなったことを確認できる。Non-AE として空気量を少なくすることによって、硬化体が緻密になり、中性化に対する抵抗性が高まったためと推察される。

#### 4.3.4 塩水浸せき試験

塩水浸せき試験を JSCE-G 572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (案)」に準拠して実施した。浸せき期間については、N50 では 20 ヶ月間、その他では 24 ヶ月間とした。塩化物イオン濃度の測定については、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠して実施した。測定深度については、N50 では 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~60mm の 6 深度、その他の供試体ではコンクリートカッターの切りしろを考慮して 0~10, 14~24, 28~38, 42~52, 56~66mm の 5 深度とした。

塩化物イオン濃度の分布を図-4.5 に示す。フライアッシュコンクリートでは、空気量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 N50 と比較して、塩化物イオンの浸透量が少なくなった。また、フライアッシュ置換率が同一の NF20 と NF20(Non-AE), NF30 と NF30(Non-AE)を比較すると、塩化物イオン濃度の分布形状が概ね等しく、空気量の違いにかかわらず、塩化物イオンの浸透量は同程度となったことがわかる。

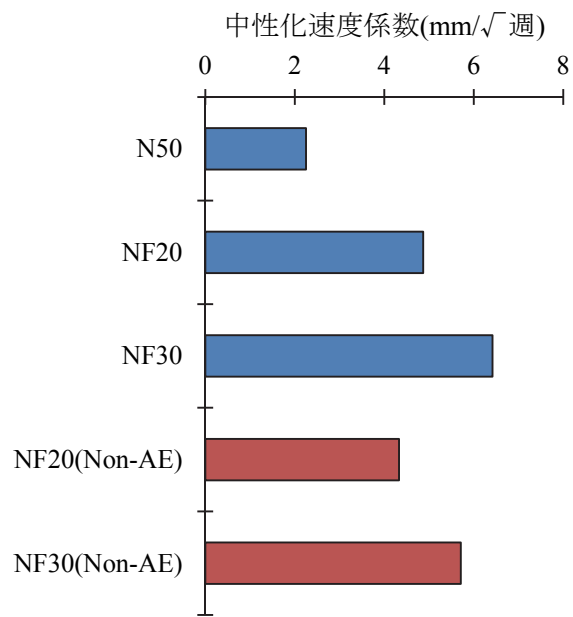


図-4.4 中性化速度係数の比較

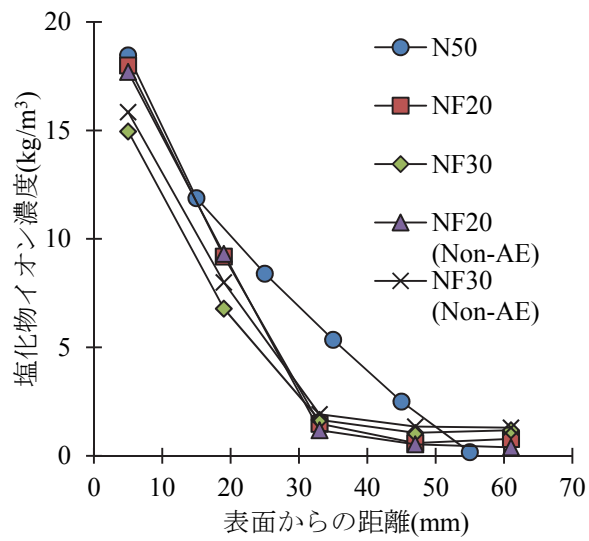


図-4.5 塩化物イオン濃度の分布

#### 4.4 まとめ

この章では, Non-AE としたフライアッシュコンクリートの基本的性状について検討した結果を示した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) Non-AE としたフライアッシュコンクリートでは, AE 剤を用いて所定の空気量を確保した場合よりも単位水量が大きくなったが, ブリーディング量は同程度となった。
- (2) Non-AE としたフライアッシュコンクリートでは, AE 剤を用いて所定の空気量を確保した場合よりも圧縮強度が大きく, 中性化速度係数が小さくなった。
- (3) Non-AE としたフライアッシュコンクリートの塩化物イオン浸透量は, AE 剤を用いて所定の空気量を確保した場合と同程度となった。

## 5 章 結論

第Ⅱ部では、電源開発株式会社と国立研究開発法人土木研究所で行った実験の結果に基づき、フライアッシュコンクリートの基本的性状を体系的に検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) フライアッシュコンクリートでは、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、塩化物イオン浸透に対する抵抗性が向上すること、収縮ひずみが小さくなること、終局断熱温度上昇量が小さくなること等を確認した。
- (2) 早強ポルトランドセメントを用いたフライアッシュコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを用いたフライアッシュコンクリートと比較して、初期材齢の強度発現の遅延を改善できること、中性化に対する抵抗性を改善できること、ブリーディング量を低減できること、収縮ひずみを低減できることを確認した。
- (3) フライアッシュコンクリートは、初期材齢における養生条件によって強度特性や中性化に対する抵抗性が異なる傾向を示した。フライアッシュコンクリートにおいて所定の強度特性と中性化に対する抵抗性を確保するためには、適切な湿潤養生期間を確保する必要があることを確認した。また、低温環境下においても、早強ポルトランドセメントを用いることによって初期材齢での強度発現の遅延を改善できることを確認した。
- (4) Non-AE としてフライアッシュコンクリートでは、AE 剤を用いて所定の空気量を確保したフライアッシュコンクリートと比較して、単位水量は大きくなったが、ブリーディング量は同程度、圧縮強度は大きく、中性化速度係数は小さく、塩化物イオン浸透に対する抵抗性は同程度となった。

## 参考文献

- 1) 一般財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書（平成 26 年度実績），2016
- 2) 経済産業省：セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－報告書，2009
- 3) 佐藤道生，今岡知武，安田幸弘，中村英佑：フライアッシュを混和したコンクリートの初期強度改善に関する基礎検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.169-174，2013
- 4) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），1994
- 5) 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
- 6) 土木学会：2012 年度制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2013
- 7) 石川嘉崇，今岡知武，鷺尾朝昭，中村英佑：初期強度改善を目的とした早強ポルトランドセメントベースのフライアッシュコンクリートにおける養生と強度発現性，土木学会第 69 回年次学術講演会，V-199，pp.397-398，2014
- 8) 今岡知武，石川嘉崇，鷺尾朝昭，中村英佑：早強セメントをベースセメントとした養生条件が異なるフライアッシュコンクリートの物性，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.151-156，2015
- 9) 土木学会：2012 年度制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2013

## 技術公表の一覧

- 1) 佐藤道生, 今岡知武, 安田幸弘, 中村英佑: フライアッシュを混和したコンクリートの初期強度改善に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.169-174, 2013
- 2) 石川嘉崇, 今岡知武, 鷺尾朝昭, 中村英佑: 初期強度改善を目的とした早強ポルトランドセメントベースのフライアッシュコンクリートにおける養生と強度発現性, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-199, pp.397-398, 2014
- 3) 今岡知武, 石川嘉崇, 鷺尾朝昭, 中村英佑: 暴露試験と促進中性化試験から得られたフライアッシュコンクリートの中性化深さと塩化物イオン濃度分布について, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-200, pp.399-400, 2014
- 4) 今岡知武, 石川嘉崇, 鷺尾朝昭, 中村英佑: 早強セメントをベースセメントとした養生条件が異なるフライアッシュコンクリートの物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.151-156, 2015
- 5) 石川嘉崇: AE 剤を用いないフライアッシュコンクリートの基本的性質と耐久性の検証, 第 69 回セメント技術大会講演要旨, 3208, pp.240-241, 2015
- 6) 石川学, 石川嘉崇, 鷺尾朝昭: 品質の異なるフライアッシュを用いたコンクリートの比抵抗とフライアッシュの活性度指数に関する考察, 第 70 回セメント技術大会講演要旨, 1305, pp.96-97, 2016
- 7) 石川学, 石川嘉崇, 中村英佑: 単位水量低減効果を見込んだ早強セメントをベースセメントとしたフライアッシュコンクリートの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.87-92, 2016





---

共同研究報告書

Cooperative Research Report of PWRI

No.487 February 2017

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