

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)－

平成 28 年 1 月

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

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(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)—

国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター

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

大成建設株式会社

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

前田建設工業株式会社

舟橋 政司
梶田 秀幸
白根 勇二
笹倉 伸晃
宮野 和樹
太田 健司 (2015.4～)

要 旨

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

この共同研究報告書では、ポルトランドセメントの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の設計及び施工について標準的な方法を示した「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)」を提案するとともに、検討の過程で得られた研究成果をとりまとめた。

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

はじめに

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

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

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

低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書の構成と概要

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

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

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

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

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

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

混和材を用いたプレストレストコンクリート橋の設計・施工マニュアル (案)

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

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

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

混和材を高含有した低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル (案)

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

国立研究開発法人土木研究所、株式会社大林組

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所、大成建設株式会社、前田建設工業株式会社

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所、戸田建設株式会社、西松建設株式会社

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

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

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

国立研究開発法人土木研究所、大成建設株式会社

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

参考文献

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

目次

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

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

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

第Ⅱ部 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)

1章 総則	39
1.1 適用の範囲	39
1.2 用語の定義	40
1.3 スーパーグリーンコンクリートの特徴	41
2章 材料	43
2.1 一般	43
2.2 セメント	43
2.3 混和材	44
2.4 化学混和剤	45
3章 配合	46
3.1 一般	46
3.2 配合設計の手順	47
3.3 スランプ	48
3.4 水結合材比	48
4章 設計及び照査	49
4.1 一般	49
4.2 強度特性	49
4.3 中性化に対する照査	50
4.4 塩害に対する照査	51
4.5 凍害に対する照査	53
4.6 アルカリシリカ反応に対する抵抗性	53
4.7 長期的な安定性の評価	54
4.8 温度ひび割れに対する照査	54
4.9 二酸化炭素排出削減効果の定量化	56
5章 製造, 施工及び品質管理	58
5.1 一般	58
5.2 計量	58
5.3 練混ぜ	59
5.4 運搬・打込み・締固め	59

5.5 仕上げ・養生.....	60
5.6 品質管理.....	61

第Ⅲ部 付録資料

付録-1 スーパーグリーンコンクリートの配合.....	63
付録-2 スーパーグリーンコンクリートの暴露試験.....	65
付録-3 スーパーグリーンコンクリートの強度特性.....	70
付録-4 スーパーグリーンコンクリートの耐久性.....	77
付録-5 スーパーグリーンコンクリートの温度特性及び収縮・膨張特性.....	100
付録-6 スーパーグリーンコンクリートの温度ひび割れ抵抗性.....	107
付録-7 スーパーグリーンコンクリートの湿潤養生期間.....	119
付録-8 構造物への適用事例.....	123
付録-9 技術公表の一覧.....	130

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）。

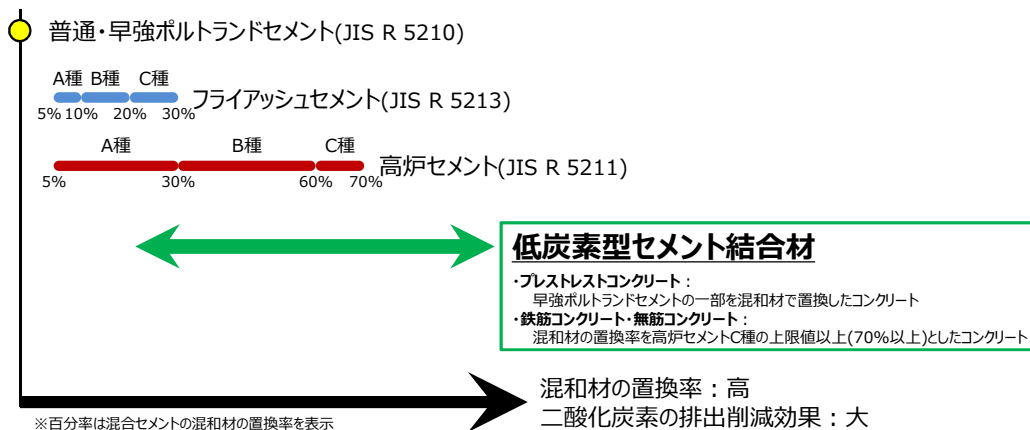


図-1.1 低炭素型セメント結合材の位置づけ

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/m³)、 B ：単位結合材量(kg/m³)である。

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

置換率について

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

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

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

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

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

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日より早期の段階でコンクリートの強度を確認する必要がある場合には、実際の部材となるべく近い条件で養生を行った供試体の試験強度に基づいて強度を確認することが望ましい。

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

(3)について

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

5.3 クリープ・収縮

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

【解説】

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

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

5.4 中性化に対する抵抗性

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

【解説】

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

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

中性化深さの推定方法について

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

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

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

暴露試験の結果に基づく中性化速度係数の設定について

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

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

促進中性化試験の結果に基づく中性化速度係数の設定について

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

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

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

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

中性化残りの設定について

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

中性化速度係数の予測式の適用性について

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

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

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

環境条件の考慮について

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

5.5 塩化物イオン浸透に対する抵抗性

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

【解説】

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

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

かぶりの最小値について

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

コンクリート内部の塩化物イオン濃度の推定方法について

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

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

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

塩化物イオンの見掛けの拡散係数について

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

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

鋼材腐食発生限界濃度の設定について

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

環境条件の考慮について

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

5.6 凍結融解に対する抵抗性

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

【解説】

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

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

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

5.7 温度ひび割れに対する抵抗性

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

【解説】

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

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

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

5.8 二酸化炭素排出削減効果

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

【解説】

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

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

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

参考文献

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

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

6章 製造及び施工

6.1 一般

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

【解説】

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

低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートのフレッシュ性状は、セメント及び混和材の種類や混和材の置換率によって、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと異なる傾向を示す場合がある。例えば、高炉スラグ微粉末の置換率の高いコンクリートや水結合材比の小さいコンクリートではフレッシュコンクリートの粘性が高くなること、フレッシュ性状や凝結時間が施工時の気温の影響を受けやすく、特に施工時の気温が高いとワーカビリティの経時的な低下の程度が大きくなる可能性がある。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±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¹⁾ではセメントの種類ごとに湿潤養生期間の標準を示しているが、高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を高炉セメントC種相当以上あるいはフライアッシュセメントC種相当以上としたコンクリート、複数の混和材を同時に用いたコンクリート、早強ポルトランドセメントの一部を混和材で置換したコンクリート等については、湿潤養生期間の標準は明確ではない。このため、低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートでは、試験等に基づき、適切な湿潤養生期間を設定する必要がある。

湿潤養生期間の設定方法について

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

・所要の品質を担保できる湿潤養生期間を試験によって設定する

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

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

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

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

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

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

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

(3)について

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

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

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

参考文献

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

7章 品質管理

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

【解説】

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

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

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。

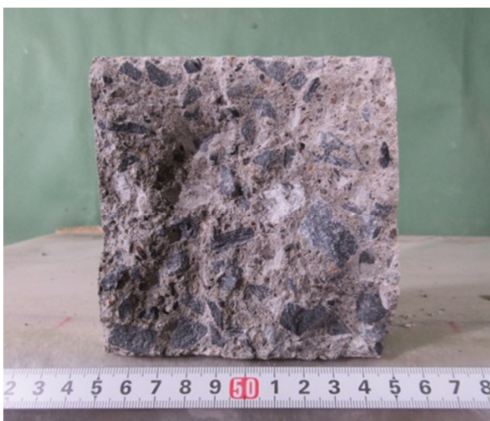
【解説】

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。

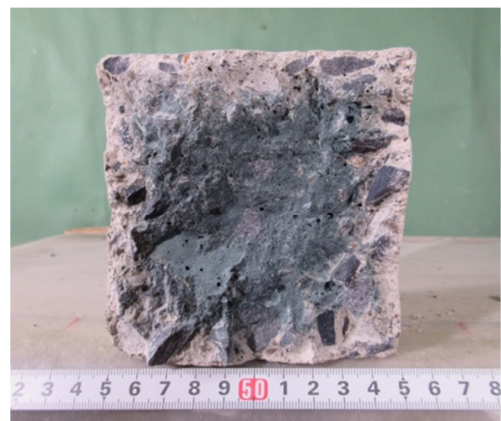
低炭素型セメント結合材を用いたコンクリートの検査は、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの品質の特徴を適切に把握した上で、ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと同様の方法で行ってよい。

【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
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）

担当：大成建設株式会社・前田建設工業株式会社

1 章 総則

1.1 適用の範囲

- (1) 「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）（以下、このマニュアル（案）という）」は、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、シリカフェーム、せっこうの一部または全部を組み合わせ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（以下、SG コンクリートという）」を用いたコンクリート構造物の設計及び施工の標準的な方法を示したものである。
- (2) このマニュアル（案）とガイドライン（案）に記載のない事項は、土木学会「コンクリート標準示方書」に従ってよい。
- (3) SG コンクリートの適用にあたっては、当事者がこのマニュアル（案）に従って試験等を行い、SG コンクリートの品質を適切に把握しておかなければならない。

【解説】

(1)について

このマニュアル（案）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）（以下、ガイドライン（案）という）」に適合する SG コンクリートを用いたコンクリート構造物の設計及び施工において、その標準的な方法及び配慮すべき事項を示したものであり、図-1.1 のように構成される。SG コンクリートの設計及び施工は、このマニュアル（案）及びガイドライン（案）に基づいて行う必要がある。

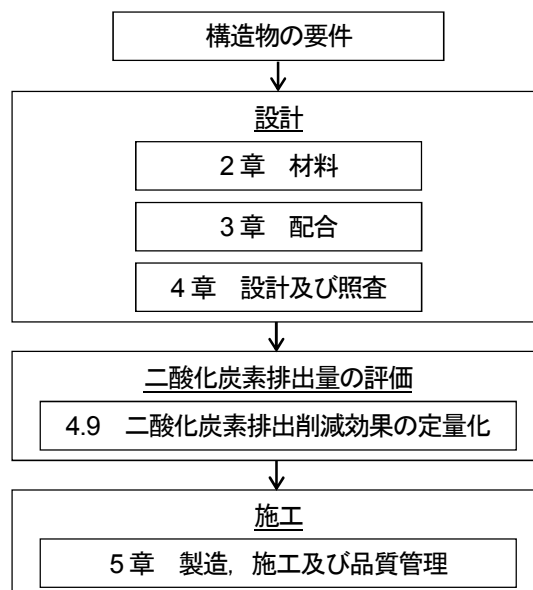


図-1.1 多成分からなる結合材を用いた低炭素型のコンクリートの設計・施工マニュアル（案）の構成

(2)について

このマニュアル（案）とガイドライン（案）に記載のない事項は、一般的なコンクリートと同様の考え方または手法によって設計及び施工を行うことができるため、コンクリート構造物全体として確実な設計及び施工を実現するための基本が示されている最新の土木学会「コンクリート標準示方書」を参考に検討を進めてよい。このマニュアル（案）の発刊時（2016年1月）では、「2012年制定コンクリート標準示方書」が最新であるが、改定された場合には、改定の内容を適切に考慮した上で改訂版を参照してよい。

(3)について

SG コンクリートは使用実績が少ないため、品質の確認のための試験等については当事者のいずれかが行い、SG コンクリートの誤用を避けることとした。当事者とは、SG コンクリートを適用する構造物の事業者、設計者と、SG コンクリートの製造者、施工者及び施工監理者である。将来、SG コンクリートを適用する予定のある者、SG コンクリートの適用を希望する者も、そのSG コンクリートを適用する構造物の当事者とする。また、当事者から直接、依頼を受けた者、例えば試験機関等も当事者とみなしてよい。複数の者で試験等を共同で実施する場合、実施する者の一部に当事者が含まれれば、実施する者のすべてが当事者でなくとも、当事者によって実施されたものとみなしてよい。

なお、このマニュアル（案）では、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の3者（以後、このマニュアルの作成者という）が共同で行ったSG コンクリートに関する試験の結果を付録資料（第Ⅲ部）に示し、一部を本文または解説（第Ⅱ部）に引用した。

1.2 用語の定義

このマニュアル（案）では、次のように用語を定義する。

- ・**混和材**：このマニュアル（案）では、潜在水硬性あるいはポズラン反応性を示す無機物質にせっこうと膨張材を加え、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェーム、せっこう及び膨張材を指す。
- ・**結合材**：このマニュアル（案）では、ポルトランドセメントと混和材を指す。

【解説】

混和材及び結合材について

このマニュアル（案）で対象とする混和材は高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、シリカフェーム、せっこう及び膨張材である。ガイドライン（案）に示されるとおり、混和材は高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の潜在水硬性やポズラン反応性を示す物質であるが、このマニュアル（案）ではせっこうや膨張材も混和材として扱うこととするため、ここで再度、定義した。これらの材料が有する品質については2章に、配合選定に関する事項については3章に示した。

1.3 スーパーグリーンコンクリートの特徴

- (1) SG コンクリートは、結合材に占めるポルトランドセメントの割合が30%以下であり、混和材の割合が70%以上である。
- (2) SG コンクリートは、使用する材料の製造時に発生する二酸化炭素排出量を、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比55%のコンクリートの20~40%に削減することができる。
- (3) SG コンクリートは、設計基準強度が18~36N/mm²であり、特に、低発熱性、塩化物イオン浸透抵抗性、アルカリシリカ反応の抑制効果に優れる。
- (4) SG コンクリートは、無筋及び鉄筋コンクリート構造物に用いることができる。

【解説】

(1)について

ガイドライン（案）で取り扱う低炭素型セメント結合材と、このマニュアル（案）によるSGコンクリートの結合材の位置づけを図-1.2に示す。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」と定義している。SGコンクリートの結合材は、ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを基本として、必要に応じてシリカフュームやせっこう等の混和材から成る3~4成分の低炭素型セメント結合材である。結合材に占めるポルトランドセメントの割合は30%以下としており、JIS R 5211に規定される高炉セメントC種よりも小さく、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である。混和材が有するべき品質や標準とする配合については、2章及び3章に示した。

このマニュアル（案）で標準とする材料及び配合条件のSGコンクリートは、試験によりワーカビリティ、強度特性、耐久性、水和発熱特性等の品質を確認しており、このマニュアル（案）に従って設計、製造及び施工を行うことができる。

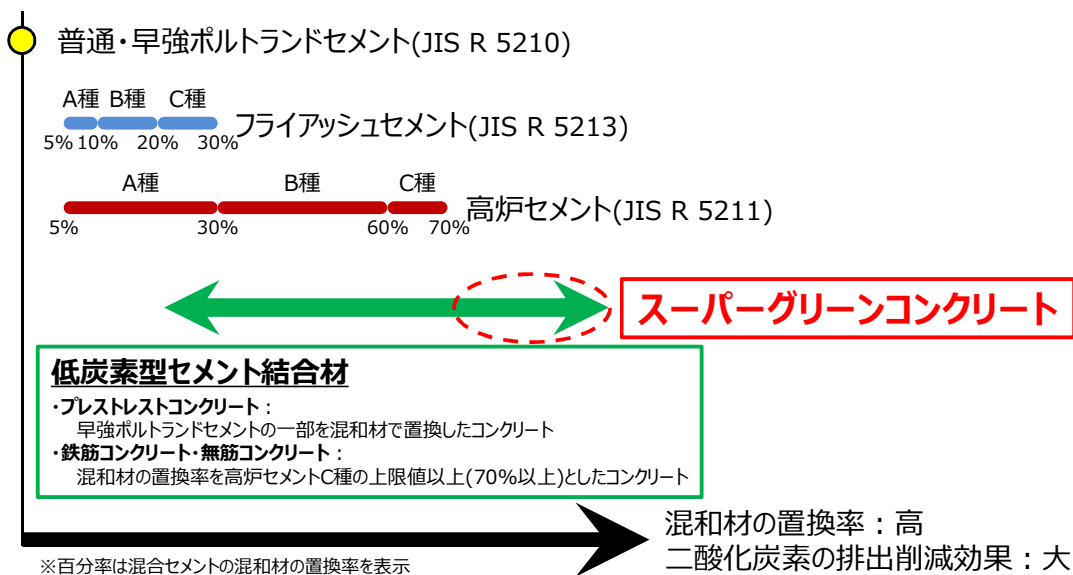


図-1.2 スーパーグリーンコンクリートの結合材の位置づけ

(2)について

SG コンクリートは複数の混和材を結合材とすることでポルトランドセメントの割合を大幅に削減したものである。これにより、コンクリートに用いる材料の製造にかかわる二酸化炭素排出量を、普通ポルトランドセメントを用いた水結合材比55%のコンクリートの20~40%に削減できることを特徴とする。

(3)について

SG コンクリートの設計基準強度は18~36N/mm²とする。設計基準強度が24N/mm²（呼び強度24相当）のSG コンクリートについては、各種試験を実施して強度特性、収縮特性、温度物性、耐久性、水和発熱特性等の品質を確認している。SG コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた水結合材比55%のコンクリートと比較して、優れた低発熱性、塩化物イオンの浸透抵抗性及びアルカリシリカ反応の抑制効果を有することを特徴とする。なお、収縮特性及び凍結融解抵抗性は普通ポルトランドセメントを用いた水結合材比55%のコンクリートと同等であり、中性化抵抗性は若干低い。

(4)について

SG コンクリートは、無筋及び鉄筋コンクリート構造物に用いることを想定しており、プレストレストコンクリート構造物に用いることは想定していない。(3)に示す品質を有することを理解して、マスコンクリートや、地中埋設構造物、沿岸構造物及び海洋構造物等にSG コンクリートを用いるとその特徴を活かすことができる。

SG コンクリートは、スランプが18cm以下であるコンクリートや高流動コンクリートとして用いることを想定している。水中コンクリート、吹付けコンクリート、蒸気養生による二次製品用のコンクリート等としても用いることができるが、適用にあたってはあらかじめ試験等による品質の確認が必要である。

2章 材料

2.1 一般

SG コンクリートに用いる材料は、SG コンクリートの品質と構造物の性能が確保されるように、品質が確かなものを選定しなければならない。

【解説】

SG コンクリートの強度特性、収縮特性、温度物性、耐久性、水和発熱特性等の品質を確保するためには、適切な材料を選定することが重要である。セメント、混和材、骨材、練混ぜ水、化学混和剤等の材料は、JIS ならびに土木学会規準等の品質規格に適合した材料を選定することが望ましい。それ以外の材料を用いる場合には、品質の適否を試験によって確認する必要がある。

2.2 セメント

ポルトランドセメントは、JIS R 5210 に適合した早強ポルトランドセメントを用いることを標準とする。

【解説】

SG コンクリートに用いるポルトランドセメントは、初期強度の確保、材齢 28 日で強度管理を行うことを前提とした強度の確保及び中性化抵抗性の向上を目的として、早強ポルトランドセメントを用いることを標準とした。その他にも普通、早強、中庸熱、低熱及び耐硫酸塩ポルトランドセメントを用いることができるが、これらを用いる場合にはコンクリートの品質をあらかじめ確認する必要がある。なお、超早強ポルトランドセメントは現場打ちコンクリートへ適用できないため、使用可能なセメントから除外した。

また、SG コンクリートの結合材の一部として JIS に規定される混合セメント（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）を用いることができるが、これらを用いる場合にはコンクリートの品質をあらかじめ確認する必要がある。混合セメントを用いる場合、結合材の構成の確認及び二酸化炭素排出削減効果の定量化のため、混合セメントに用いられているポルトランドセメントの種類や混和材の分量を確認することが望ましい。

2.3 混和材

- (1) 高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206 に適合した高炉スラグ微粉末 4000 を標準とする。
- (2) フライアッシュは、JIS A 6201 に適合したフライアッシュ II 種を標準とする。
- (3) シリカフェームは、JIS A 6207 に適合した粉体シリカフェーム及び粒体シリカフェームを標準とする。
- (4) せっこうは、JIS R 9151 に適合したものを標準とする。
- (5) 膨張材は、JIS A 6202 に適合したものを標準とする。

【解説】

(1)について

JIS A 6206 に適合する高炉スラグ微粉末 4000 を用いた SG コンクリートは、適切なフレッシュ性状、強度発現性及び耐久性を有し、収縮も過大にならないこと等を試験により確認したため、これを標準とした。その他の高炉スラグ微粉末を用いる場合には、それらの品質が適切であることを試験によって確認する必要がある。高炉スラグ微粉末の比表面積を大きくすると、強度や耐久性を高めることができるが、コンクリートの粘性が増加し、所定のワーカビリティを得るために必要となる単位水量や化学混和剤の添加量が多くなるほか、水和発熱量や自己収縮が大きくなる可能性があることに留意が必要である。

(2)について

JIS A 6201 に適合するフライアッシュ II 種を用いた SG コンクリートは、フレッシュ性状、収縮性状、強度発現性、耐久性等が適切であることを試験により確認したため、これを標準とした。その他のフライアッシュを用いる場合には、それらの品質が適切であることを試験によって確認する必要がある。

(3)について

JIS A 6207 に適合する粉体シリカフェーム及び粒体シリカフェームを用いた SG コンクリートは、適度なフレッシュ性状、収縮性状、強度発現性、耐久性等を確保できることを試験により確認したため、これらを標準とした。シリカフェームスラリーを用いる場合には、それらの品質が適切であることを試験によって確認する必要がある。

(4)について

JIS R 9151 に適合するせっこうを用いた SG コンクリートは、初期強度の増進及び自己収縮の低減効果を試験により確認したため、これを標準とした。

(5)について

JIS A 6202 に適合する膨張材を用いた SG コンクリートには、自己収縮によるひずみを低減できることを試験により確認したため、これを標準とした。

2.4 化学混和剤

化学混和剤は、JIS A 6204 に適合したものを標準とする。

【解説】

JIS A 6204 に適合に適合する化学混和剤を用いた SG コンクリートは、フレッシュ性状、収縮性状、強度発現性、耐久性等の品質が適切であることを試験により確認したため、これを標準とした。

SG コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも同一強度を得るための水結合材比が低く、単位結合材量が多くなるため、粘性が高くなる場合やスランプの保持時間が短くなる場合があるので、化学混和剤の選定には留意が必要である。特に、気温が高い時期にスランプの低下が早くなることがあるため、季節に応じて AE 減水剤や高性能 AE 減水剤を遅延形とすることや遅延形の減水剤を用いることで、施工に支障のないワーカビリティを得られること及び時間の経過によるスランプの低下を抑えられることを試験によって確認している。

また、必要に応じて AE 剤を併用するとよい。AE 剤の種類によって凍害に対する抵抗性が変化することがあるため、選定には留意が必要である。特に、フライアッシュを用いる場合には、空気連行性を確保するためにフライアッシュに有効な AE 剤を用いることが望ましい。

3 章 配合

3.1 一般

(1) SG コンクリートの結合材の構成は、表-3.1 を標準とする。

表-3.1 結合材の構成の標準 (質量%)

	早強 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	シリカ フューム	せっこう	膨張材
H25B45F30	25	45	30	—	—	必要に応じて 結合材の一部 として置換
H10B85S5	10	85	—	5	—	
H25B45F25S5	25	45	25	5	—	
H25B45F25A5	25	45	25	—	5	使用できない

(2) SG コンクリートの呼び強度は、管理材齢 28 日において 24 を標準とする。

(3) (1)及び(2)を満足する SG コンクリートを「標準の SG コンクリート」とする。

(4) 膨張材を用いる場合は、あらかじめコンクリートの収縮量（または膨張量）及び強度について、試験を行って確認しなければならない。

(5) この章に記載のない事項は、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編]」4章に従ってよい。

【解説】

(1),(2)及び(3)について

SG コンクリートは、表-3.1 に示す結合材の構成で、かつ、呼び強度 24 であれば、強度特性、耐久性、水和発熱特性等の品質が適切であることを試験により確認しており、これを「標準の SG コンクリート」と定義した。

結合材の構成は、早強ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュを用いた H25B45F30 を基本とし、要求される品質に応じてポルトランドセメント量の削減や、シリカフューム、せっこう及び膨張材の添加を行うものとした。

二酸化炭素排出量を更に削減する場合には、早強ポルトランドセメントの割合を小さくするとよい。早強ポルトランドセメントの割合を 10% とすると、H25B45F30 と比較して二酸化炭素排出量は約 50% に削減される。ただし、自己収縮が大きく、中性化の進行が速くなることに留意が必要である。

同一強度で水結合材比を大きくする場合には、シリカフュームを用いるとよい。シリカフュームの割合を 5% とすると、同一強度を得るための水結合材比を若干大きくすることができる。

初期の初期強度を高める場合、または自己収縮を低減する場合には、せっこうを用いるとよい。せっこうの割合を5%とすると、材齢7日の強度を約25%大きくすることができ、自己収縮を約 100×10^{-6} 小さくすることができる。

SG コンクリートの呼び強度は、管理材齢28日において24を標準としたが、適切に養生された場合には長期的に強度が増加する。構造物に荷重が作用する時期等を考慮して管理材齢を延長することで、水結合材比を大きくして、ポルトランドセメントの割合を更に低減することが可能となり、二酸化炭素排出量の削減、温度ひび割れ抵抗性及び経済性に有利となる場合がある。そのような場合には、コンクリートの耐久性等の品質や工程等を考慮した上で適切な管理材齢を任意に設定してもよい。

標準ではない結合材の構成、呼び強度及び管理材齢で使用する場合は、所要のワーカビリティ、強度特性、収縮量、耐久性等を有することを試験によって確認する必要がある。

(4)について

SG コンクリートは、ひび割れの抑制及び膨張コンクリートとして使用するために膨張材を併用することができる。この場合、膨張材は、表-3.1 に示す膨張材以外の結合材の構成比を維持して置換することが望ましい。例えば、ポルトランドセメントのみを膨張材で置換するとポルトランドセメントの単位量が過度に減少するため望ましくない。膨張材の使用量は、膨張材の製造者が指定する標準使用量でも過大に膨張する場合があるため、強度や収縮（膨張）量をあらかじめ試験により確認して、決定する必要がある。参考としてH25B45F30における膨張材の使用量と収縮（膨張）量の関係を第Ⅲ部付録-5に示した。膨張材は、せっこうが添加された高炉スラグ微粉末と併用してもよい。ただし、せっこうを混和材として用いた結合材の構成（H25B45F25A5）ではせっこうの割合が5%と高く、膨張材との併用による長期的な影響について十分に確認されていないため、膨張材は使用しないこととする。

3.2 配合設計の手順

- (1) SG コンクリートの配合設計にあたっては、二酸化炭素排出削減効果を含むコンクリートに求められる品質を確認し、配合条件及び結合材の構成を設定する。
- (2) 設定した配合条件及び結合材の構成に基づき、試し練りの基準となる暫定の配合を設定する。
- (3) 設定した暫定の配合を基に、実際に使用する材料を用いて試し練りを行い、コンクリートが所要の品質を有することを確認する。

【解説】

(1)について

設計図書等に示される構造物の構造性能や耐久性に基づいて設定されたコンクリートの設計基準強度、耐久性の特性値及び二酸化炭素排出削減効果を確認し、粗骨材最大寸法、配合強度及び空気量等の配合条件を設定する。結合材の構成、水結合材比及びスランプは、この章に従って設定する。

(2)及び(3)について

試し練りの結果、コンクリートが所要の品質を有していない場合は、材料の変更や配合の修正を行う。ただし、配合の修正は、結合材の構成を変えずに行う。結合材の構成を変更する場合は、3.2(1)に戻り再度設定する。

3.3 スランプ

SG コンクリートの打込みの最小スランプは、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕」に従って設定される値よりも2～3cm大きくすることを標準とする。

【解説】

SG コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた同一強度レベルのコンクリートと比較すると水結合材比が小さく、単位結合材量が大きくなるため、粘性が高くなる傾向にある。このため、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕」に記載される打込みの最小スランプよりも2～3cm大きく設定することを標準とした。

3.4 水結合材比

SG コンクリートの水結合材比は、呼び強度 24 となるように設定することを標準とする。

【解説】

土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕」における水セメント比は、コンクリートに求められる強度、耐久性及び水密性を考慮して、これらから定まる水セメント比のうちで最小の値を設定することとしている。しかし、このマニュアル（案）の発刊時（2016年1月）では、SG コンクリートの水結合材比と耐久性及び水密性に関するデータの蓄積が十分でないため、SG コンクリートの水結合材比については、呼び強度に基づいて設定することを標準とした。したがって、SG コンクリートの水結合材比は、圧縮強度試験を行って結合材水比と圧縮強度の関係を求め、これを参考に設定することができる。なお、SG コンクリートに耐久性及び水密性が求められる場合には、4章に従って照査を行う、あるいは、試験によって確認するものとする。

4 章 設計及び照査

4.1 一般

- (1) SG コンクリートは、試験等に基づき特性値を適切に設定し、これを用いて設計及び照査を行わなければならない。
- (2) このマニュアル（案）に記載のない事項は、土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕」に従ってよい。

【解説】

(1)について

この章では、マニュアル作成者が行った試験等の結果から得た SG コンクリートの特性値を例として示す。

4.2 強度特性

- (1) SG コンクリートの強度の特性値は、材齢 28 日における試験強度に基づいて定めることを標準とする。
- (2) SG コンクリートの割裂引張強度、曲げひび割れ強度及びヤング係数は、試験等に基づき適切に設定することを標準とする。
- (3) SG コンクリートのポアソン比は、試験等に基づき適切に設定することを標準とする。
- (4) 標準の SG コンクリートの圧縮強度の特性値は、 24N/mm^2 としてよい。

【解説】

(1)について

SG コンクリートの強度の特性値は、「2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕」に従って、材齢 28 日における試験強度に基づいて定めることができる。ただし、構造物の種類や使用目的等によって材齢 28 日以外における試験強度から特性値を定めてよい。

(2)について

割裂引張強度、曲げひび割れ強度及びヤング係数は、試験等に基づき適切に設定することを標準とした。

なお、マニュアル作成者が行った試験では、標準の SG コンクリートの割裂引張強度、曲げひび割れ強度及びヤング係数は、「2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕」に示される圧縮強度に基づいた式を用いて定めることができることを確認している（第Ⅲ部付録-3 参照）。

(3)について

SG コンクリートのポアソン比は、試験等に基づき適切に設定することを標準とした。

なお、マニュアル作成者が行った試験では、標準の SG コンクリートのポアソン比は、弾性範囲内では 0.2 としてよいことを確認している（第Ⅲ部付録-3 参照）。

(4)について

標準の SG コンクリートの圧縮強度の特性値は、呼び強度と同一の 24N/mm^2 としてよいこととした。

4.3 中性化に対する照査

- (1) SG コンクリートの中性化に対する照査は、土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編〕」に従って行うことを標準とする。
- (2) SG コンクリートの中性化速度係数の特性値は、試験等から得られた値を用いてよい。

【解説】

(1)について

中性化に対する照査は、供用時に構造物が置かれる環境条件を考慮して行うとよい。無筋構造物、水中及び地中の構造物に適用する鉄筋コンクリート構造物では中性化の影響がないことが明らかであり、このような場合には中性化に対する照査を省略してよい。

中性化に対する照査が必要な場合は、最新の土木学会「コンクリート標準示方書」に従って照査を行う。「2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕」の「2.1.3 中性化に対する照査」によれば、中性化残りを通常環境で 10mm、塩害環境で 10~25mm としており、塩化物イオンの供給がある環境では中性化残りを大きくするのがよいとされている。また、ガイドライン（案）では、暴露試験の結果において中性化深さよりも 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たため、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とされている。塩害環境に暴露した SG コンクリートは、塩化物イオンが中性化深さを超えて浸透し、先行の程度は最大でも 10mm 以下であった。このため、中性化残りは、通常環境で 10mm、塩害環境では 15mm としてよい。ただし、今後、十分な信頼性を有するデータを試験により取得できた場合には、その値を用いてよい。

(2)について

混和材の置換率が 70%を超えたコンクリートの中性化速度係数は、それ以下の置換率のコンクリートと比較して顕著に大きくなる場合があるため、中性化速度係数の特性値は土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕」に示される有効水結合材比と結合材種類を考慮した予測式を使用して設定することができない。

SG コンクリートの中性化速度係数の特性値は、構造物が供用される環境と同等の環境条件で、少なくとも 2 年以上の期間にわたって実施した暴露試験の結果を用いて設定する。

マニュアル作成者が行った暴露試験の結果から得た標準の SG コンクリートの中性化速度係数の特性値を、例として表-4.1 に示す。なお、今後、更に長期の試験期間における中性化速度係数が得られた場合には、その値を用いてよい。当事者が行う試験等においても同様の手順で特性値を定めてよい。

表-4.1 標準の SG コンクリートについてマニュアル作成者が取得した中性化速度係数の特性値

結合材の構成	中性化速度係数 (mm/√年)
H25B45F30	3.4
H10B85S5	6.5
H25B45F25S5	4.1
H25B45F25A5	4.8

※つくば・新潟・沖縄に約2年間暴露した試験体による測定値の最大値（第Ⅲ部付録-4 参照）。

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実施し、この結果を用いて式 (4.1) から中性化速度係数を定めてよい。促進試験から定めた中性化速度係数は、屋外環境における暴露試験から得られた特性値よりも大きくなる傾向にあるため、促進試験の結果から中性化速度係数を定めても照査を行うことができる（第Ⅲ部付録-4 参照）。

$$\alpha_{ACT} = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO_2 / CO_{2,ACT}} \quad (4.1)$$

ここに、 α_{ACT} ：二酸化炭素濃度の差を補正した中性化速度係数(mm/√年)、 A_{ACT} ：促進中性化試験から得られる中性化速度係数(mm/√年)、 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。

4.4 塩害に対する照査

- (1) SG コンクリートの塩害に対する照査は、土木学会「コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕」に従って行うことを標準とする。
- (2) SG コンクリートの塩化物イオン拡散係数の特性値は、試験等から得られた値を用いてよい。

【解説】

(1)について

塩害に対する照査は、供用時に構造物が置かれる環境条件を考慮して行うとよい。無筋コンクリートや外来の塩化物イオンの影響を受けない環境にある鉄筋コンクリートでは、塩害の影響がないことが明らかであり、このような場合には塩害に対する照査を省略してよい。

SG コンクリートは、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ、あるいはシリカフューム等の混和材を用いており、塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が向上することが期待されるが、照査に必要な塩化物イオンの鋼

材腐食発生限界濃度に関するデータは取得できていない。したがって、現状では、塩化物イオンの鋼材腐食発生限界濃度は、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕」に示される最小の値である 1.2kg/m^3 とするのがよい。今後、十分な信頼性を有するデータを試験により取得できた場合には、その値を用いてよい。

また、照査にあたっては、表面塩化物イオン濃度が必要である。土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕」では、構造物の立地する地域区分と海岸からの距離に応じて、表面塩化物イオン濃度を定めている。SGコンクリートは、普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートよりも表面塩化物イオン濃度が小さくなるのが、浸せき試験により確認されている。しかし、このマニュアル（案）の発刊時（2016年1月）では、SGコンクリートの表面塩化物イオン濃度に関するデータの蓄積が十分でないため、表面塩化物イオン濃度は土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕」に示される値を採用するのがよい。今後、十分な信頼性を有するデータを試験により取得できた場合には、その値を用いてよい。

(2)について

SGコンクリートの塩化物イオン拡散係数の特性値は、構造物が供用される環境と同等の環境条件で少なくとも2年以上の期間にわたって実施した暴露試験の結果を用いて設定する。なお、SGコンクリートでは、中性化と塩化物イオンの浸透が同時に作用する環境において塩化物イオンが中性化による影響を受けて移動・濃縮することが確認されている。中性化の進行が無視できない場合には、中性化による濃縮領域を考慮して塩化物イオン拡散係数を求め、特性値を設定するとよい。暴露試験の結果を入手できない場合には、浸せき試験を実施して見掛けの拡散係数を求め、特性値を設定してよい。

マニュアル作成者が行った2年間の暴露試験では、塩化物イオンの浸透が十分でなかったため、適切な拡散係数を得るに至らなかった（第Ⅲ部付録-4参照）。このため、標準のSGコンクリートの塩化物イオン拡散係数の特性値は、2年間の浸せき試験の結果から設定し、表-4.2に示す値とした。なお、今後、さらに長期の試験において、塩化物イオン拡散係数が得られた場合には、その値を用いてよい。当事者が行う試験等においても同様の手順で特性値を定めてよい。

表-4.2 標準の SG コンクリートについてマニュアル作成者が取得した塩化物イオン拡散係数の特性値

結合材の構成	塩化物イオン拡散係数の特性値 (cm ² /年)
H25B45F30	0.22
H10B85S5	0.16
H25B45F25S5	0.34
H25B45F25A5	0.24

※JSCE-G 572-2013 に従った。ただし、NaCl 溶液の濃度を 10%から 3%に変更した。

※浸せき試験及び暴露試験による測定結果を第Ⅲ部付録-4 に示した。

4.5 凍害に対する照査

SG コンクリートの凍害に対する照査は、土木学会「コンクリート標準示方書 [設計編]」に示される方法に従って行うことを標準とする。

【解説】

凍害に対する照査は、供用時に構造物が置かれる環境条件を考慮して行うとよい。凍結融解作用を受けない環境に設置するコンクリート構造物は凍害の影響がないことが明らかであり、このような場合には凍害に対する照査を省略してよい。

SG コンクリートの凍害に対する照査を土木学会「2102 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]」に示される方法に従ってマニュアル作成者が実施した例では、空気量が 4.5±1.5%である標準の SG コンクリートは、JIS A 1148 (A 法) による相対動弾性係数が 90%以上であることを確認した。このため、土木学会「2102 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]」に示される一般の構造物に用いる場合には、4.5±1.5%以上の空気量を確保していれば、内部損傷及び表面損傷（スケーリング）に対する照査を省略できることとした。

4.6 アルカリシリカ反応に対する抵抗性

SG コンクリートはアルカリシリカ反応の抑制効果を有するとみなしてよい。

【解説】

SG コンクリートは結合材に含まれるポルトランドセメントの割合が 30%以下であり、高炉セメント C 種やフライアッシュセメント C 種よりも混和材の割合が高いため、アルカリシリカ反応の抑制効果を有しているとみなしてよいこととした。

4.7 長期的な安定性の評価

SG コンクリートは長期的な安定性を有するとみなしてよい。

【解説】

高炉スラグ微粉末の置換率を JIS R 5211 の高炉セメント C 種よりも高くしたコンクリートでは、コンクリートの表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。また、若材齢で高温履歴を受けるようなコンクリートでは、エトリングタイトの遅れ生成 (DEF) の発生が懸念される。標準の SG コンクリートについて、つくば、新潟及び沖縄で 2 年間実施した暴露試験において、アブサンデン現象及び DEF が生じないことを確認した。また、結合材の構成を標準の SG コンクリートと同様とし、水結合材比を 45% に高くした SG コンクリートについて、つくば、新潟及び沖縄で実施した 4 年間の暴露試験においても、アブサンデン現象及び DEF が生じないことを確認した (第Ⅲ部付録-4 参照)。これらのことから、実環境においてアブサンデン現象や DEF によって硬化体の安定性が損なわれることがないと判断してよいこととした。ただし、蒸気養生等の特殊な製造方法で作製された SG コンクリートでは、試験により別途確認する必要がある。

4.8 温度ひび割れに対する照査

- (1) SG コンクリートの温度ひび割れに対する照査は、土木学会「コンクリート標準示方書 [設計編]」、あるいは日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針」に示される方法に従って行うことを標準とする。
- (2) 温度応力解析を実施する場合、SG コンクリートの強度特性、熱特性、水和発熱特性及び収縮特性は、養生条件や環境条件を適切に考慮し、試験等から得られた値を用いてよい。

【解説】

(1)について

SG コンクリートはポルトランドセメントの割合が少ないため温度上昇量が小さいが、強度発現が小さく、自己収縮ひずみが大きいと、温度ひび割れ抵抗性に対して相反する特徴を有する。このため、コンクリートの配合、構造物の断面形状、施工方法、養生方法、環境温度等によっては温度ひび割れの発生が懸念される。温度ひび割れに対する照査が必要な場合には、試験等により取得した SG コンクリートの物性値を用いて、土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]」、あるいは日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」に従って行うこととした。

(2)について

SG コンクリートの強度特性、熱特性、水和発熱特性及び収縮特性は、養生条件や環境条件を適切に考慮し、試験等により得られた値を用いてよいこととした。

標準の SG コンクリートについて、マニュアル作成者が行った試験により得られた物性値及び推定式を、表-4.3 及び表-4.4 に例として示す（第Ⅲ部付録-4 参照）。自己収縮ひずみは、H25B45F30、H10B85S5 及び H25B45F25S5 では収縮成分のみの式で推定が可能であるが、せっこうを混合した H25B45F25A5 は収縮成分の推定式と膨張成分の推定式を重ね合わせることで自己収縮ひずみを推定できることを確認している。また、マニュアル作成者が行った試験により、引張強度とヤング係数は、土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]」、あるいは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」に示される圧縮強度による式を用いて推定できることを確認している。当事者が行う試験等においても同様の手順で特性値及び推定式を定めてよい。

表-4.3 標準の SG コンクリートについてマニュアル作成者が取得した
圧縮強度、熱膨張係数及び断熱温度上昇特性

結合材の構成	圧縮強度(N/mm ²)					熱膨張係数 (×10 ⁻⁶ /°C)	断熱温度上昇特性 $Q(t)=Q_{\infty}[1-\exp\{-r(t-t_{0,Q})\}]$		
	7 日	28 日	56 日	91 日	182 日		Q_{∞}	r	$t_{0,Q}$
H25B45F30	13.9	28.0	32.8	38.9	47.5	11.6	44.8	0.636	0.100
H10B85S5	14.8	29.0	37.9	42.4	47.3	11.5	26.6	0.942	0.116
H25B45F25S5	15.1	29.7	38.0	43.0	49.8	10.8	42.7	0.734	0.112
H25B45F25A5	21.5	31.7	35.3	38.8	44.8	9.9	38.0	1.195	0.131

t : 材齢 (日), $Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (°C), Q_{∞} : 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)

表-4.4 標準の SG コンクリートについてマニュアル作成者が取得した自己収縮ひずみの推定式

結合材の構成	自己収縮ひずみ $\epsilon(t)=\epsilon_{sh}(t)+\epsilon_{ex}(t)$					
	収縮成分の推定式 $\epsilon_{sh}(t)=\epsilon_{sh\infty}[1-\exp\{-a_{sh}(t-t_0)^{b_{sh}}\}]$			膨張成分の推定式 $\epsilon_{ex}(t)=\epsilon_{ex\infty}[1-\exp\{-a_{ex}(t-t_0)^{b_{ex}}\}]$		
	$\epsilon_{sh\infty}$	a_{sh}	b_{sh}	$\epsilon_{ex\infty}$	a_{ex}	b_{ex}
H25B45F30	190	0.28	0.61	—	—	—
H10B85S5	305	0.26	0.79	—	—	—
H25B45F25S5	203	0.64	0.48	—	—	—
H25B45F25A5	112	0.04	1.31	125	5.18	2.19

t : 有効材齢 (日), $\epsilon_{sh}(t)$: 有効材齢 t 日までの自己収縮ひずみの収縮成分 (×10⁻⁶),
 $\epsilon_{sh\infty}$: 自己収縮ひずみの収縮成分の終局値 (×10⁻⁶), t_0 : 凝結の始発 (有効材齢 (日)),
 a_{sh} 及び b_{sh} : 自己収縮ひずみの収縮成分の係数, $\epsilon_{ex}(t)$: 材齢 t 日までの自己収縮ひずみの膨張成分 (×10⁻⁶),
 $\epsilon_{ex\infty}$: 自己収縮ひずみの膨張成分の終局値 (×10⁻⁶), a_{ex} 及び b_{ex} : 自己収縮ひずみの膨張成分の係数

4.9 二酸化炭素排出削減効果の定量化

- (1) SG コンクリートの二酸化炭素排出削減効果は、コンクリートに用いる材料の製造にかかわる二酸化炭素排出量を対象とし、積上げ法により二酸化炭素排出量を算出して評価することを標準とする。
- (2) SG コンクリートの二酸化炭素排出削減効果は、結合材を普通ポルトランドセメントとしたコンクリートと比較して評価することを標準とする。

【解説】

(1)について

SG コンクリートの二酸化炭素排出削減効果は、コンクリートに用いる材料の製造を対象範囲として評価することを標準とした。

使用材料の製造にかかわる二酸化炭素排出原単位は信頼性の高いものを採用する必要がある。SG コンクリートの二酸化炭素排出削減効果の評価に用いる材料の二酸化炭素排出原単位の例を表-4.5 に示す。シリカフェーム、せっこうについては、二酸化炭素排出原単位が整備されていない。このため、シリカフェームは製造過程が主に分級のみであるためフライアッシュと同一とし、せっこうは天然鉱石を粉砕・分級する工程が石灰石微粉末の製造工程と類似であるため石灰石微粉末の二酸化炭素排出量と同一と仮定した。また、化学混和剤の二酸化炭素排出原単位は50~350kg/tであるが、使用量が5kg/m³以下と少ないため考慮しないこととした。新たに信頼性のある二酸化炭素排出原単位が公開された場合には、その都度、更新することが望ましい。

表-4.5 標準のSG コンクリートの使用材料の二酸化炭素排出原単位の例

材料	二酸化炭素排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	出典
ポルトランドセメント	764.3	1)
高炉スラグ微粉末	26.5	2)
フライアッシュ	19.6	2)
シリカフェーム	19.6	—
せっこう	16.1	—
細骨材	2.9	2)
粗骨材	3.7	2)
水	0.2	3)
AE 減水剤	—	—
空気量調整剤	—	—

- 1) セメント協会：セメントの LCI データの概要，2013
- 2) 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，pp.39-40，2004
- 3) 東京都水道局：環境報告書2012，p.3，2012

(2)について

標準のSGコンクリート1m³あたりの二酸化炭素排出量を求めた例を表-4.6に示す。SGコンクリートの二酸化炭素排出削減効果を評価するための基準は、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比55%、単位セメント量300kg/m³のコンクリートとした。早強ポルトランドセメントを25%及び10%としたSGコンクリートの二酸化炭素排出量の削減率は、61～64%及び81%であり、いずれも二酸化炭素排出量の削減に非常に有効であるといえる。

表-4.6 標準のSGコンクリートの1m³あたりの二酸化炭素排出量の削減率の算出例

結合材の構成	二酸化炭素排出量 (kg-CO ₂ /m ³)	二酸化炭素排出量 の削減率 (%)
H25B45F30	91	▲61
H10B85S5	44	▲81
H25B45F25S5	87	▲63
H25B45F25A5	85	▲64
N100	235	基準

5 章 製造，施工及び品質管理

5.1 一般

- (1) SG コンクリートの製造及び施工は，所要の品質が得られるように，適切な製造方法，施工方法及び養生方法を選定し，適切な品質管理のもとで実施しなければならない。
- (2) この章に記載のない事項は，土木学会「コンクリート標準示方書 [施工編]」に従ってよい。

【解説】

(1)について

SG コンクリートは，ポルトランドセメントと2～3種類の混和材で構成されること，結合材量が多いため粘性が高くなる傾向にあること，凝結や強度発現が遅いこと，初期養生条件が硬化後の品質に影響を及ぼすこと等が懸念される。このため，SG コンクリートの製造及び施工にあたっては，これらの特徴を考慮した製造方法，施工方法及び養生方法を検討するとともに，適切な品質管理を行う必要がある。

5.2 計量

- (1) SG コンクリートに用いる材料は，1バッチ分ずつ質量で計量する。
- (2) 結合材の計量誤差は，±1%を標準とする。
- (3) 原則として，累加計量は行わない。

【解説】

(1)について

SG コンクリートに用いる結合材は，材料ごとに用いる場合と，プレミックス材料として用いる場合がある。どちらの場合も，結合材の計量誤差が大きくなると，コンクリートのフレッシュ性状，強度特性及び耐久性に影響を及ぼすことが懸念される。したがって，結合材の計量は，連続計量を避け，1バッチ分ずつ質量で行うものとする。

(2)について

結合材を材料ごとに用いる場合には，それぞれの結合材の計量誤差は±1%を標準とした。ただし，計量値が小さくなると計量設備に装備された計量器の精度では所定の計量誤差を確保できない可能性がある。あらかじめ計量設備の精度や計量下限値を把握し，その計量誤差がSG コンクリートの品質に及ぼす影響を無視してよいと判断できる場合には，結合材の構成の割合が10%以下の結合材の計量誤差を±2%としてよい。計量誤差が±2%を超え，計量が難しい場合には，別途，計量する。また，結合材の一部または全部をプレミックス材料として用いる場合には，プレミックス材料の計量誤差は±1%とする。

(3)について

使用量の少ない粉体材料については、累加計量を行うと計量誤差が大きくなる。したがって、原則として、累加計量は行わないこととした。しかし、貯蔵設備や計量設備に制約があり単独に計量することができない場合には、あらかじめ累加計量時の計量誤差を把握し、各材料が(2)に示す計量誤差を満たすことを確認できる場合には、累加計量を行ってもよい。

5.3 練混ぜ

- (1) SG コンクリートの練混ぜには、バッチ式の強制練りミキサーを用いることを標準とする。
- (2) SG コンクリートの練混ぜ時間は、試し練りによって定めることを標準とする。

【解説】

(1)及び(2)について

SG コンクリートは複数の粉体材料を混合するため、材料を均一に分散させることが重要である。また、単位結合材量が多く、粘性が高くなる傾向にあるため、SG コンクリートの練混ぜには練混ぜ性能が高い強制練りミキサーを用い、練混ぜ時間を当該設備による試し練りによって決定することを標準とした。

5.4 運搬・打込み・締固め

- (1) SG コンクリートの現場までの運搬は、攪拌機能があるトラックミキサーやトラックアジテーターを用いて行うことを標準とする。
- (2) SG コンクリートのポンプによる圧送方法は、コンクリートの圧送性と圧送後のコンクリートの品質を考慮して選定する。
- (3) SG コンクリートは、コールドジョイントや充填不良が生じないように、適切な施工計画に従って連続して打ち込み、締め固めなければならない。

【解説】

(1)について

プレキャスト製品のように工場内でSG コンクリートを製造して場内運搬をする場合は、ミキサーからコンクリートを排出してから製作場所までの運搬距離及び運搬時間が短いと想定される。このような場合には、バケットを用いて運搬してよい。

(2)について

SG コンクリートは単位結合材量が多く、粘性が高くなる傾向にあるため、圧送時の管内圧力損失やコンクリートポンプの負荷が大きくなる可能性がある。あらかじめ施工条件に近い配管条件で圧送試験を行い、

圧送性や圧送後のコンクリートの品質を確認して圧送方法を選定するのが望ましい。特に、長距離圧送や上向き圧送時には留意が必要である。

(3)について

SG コンクリートは、スランプの低下が速い傾向にあること、単位結合材量が多く、同一スランプのコンクリートに比べて粘性が高くなる傾向にあることに留意して、施工計画を立てる必要がある。なお、自己充填性を有する高流動コンクリートとした場合には、締固めを必須としない。

5.5 仕上げ・養生

- (1) SG コンクリートの仕上げにあたり、あらかじめ適切な仕上げの時期を確認する。
- (2) SG コンクリートは、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、所要の品質を確保できるように湿潤養生する必要がある。通常のコンクリート工事における SG コンクリートの湿潤養生期間は、試験等に基づき、その標準を定めてよい。

【解説】

(1)について

SG コンクリートはポルトランドセメントの量が少なく、高機能タイプの AE 減水剤または高性能 AE 減水剤を用いるため、凝結時間がやや遅くなる傾向にある。このため、あらかじめ適切な仕上げ時期を確認しておく必要がある。

また、SG コンクリートはブリーディングが少ない傾向にあるため、必要に応じて仕上げ補助剤や乾燥防止剤を用いてもよい。ただし、あらかじめ効果を確認しておくこととする。

(2)について

SG コンクリートは、所要の品質を確保するために、気温に応じて適切な湿潤養生期間を設定する必要がある。湿潤養生期間の標準は、湿潤養生期間及び養生温度が強度発現に及ぼす影響を試験により検討して定めてよいこととした。

なお、マニュアル作成者が試験により設定した標準の SG コンクリートの湿潤養生期間の標準を、例として表-5.1 に示す。この湿潤養生期間は、「2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編：施工標準]」の「8.2 湿潤養生」に定める混合セメント B 種のもものと同一である。SG コンクリートの強度特性に湿潤養生期間と養生温度が及ぼす影響について検討した試験結果については、第Ⅲ部付録-7 に示した。当事者においても同様に試験等を行い、通常のコンクリート工事における湿潤養生期間の標準を定めてよい。

表-5.1 マニュアル作成者が実施した試験により定めた湿潤養生期間の標準

日平均気温	湿潤養生期間
15°C以上	7日
10°C以上	9日
5°C以上	12日

5.6 品質管理

SG コンクリートの品質管理は、土木学会「コンクリート標準示方書 [施工編：施工標準]」に従い、必要とされる管理項目を選定し、適切な方法によって行わなければならない。

【解説】

SG コンクリートの製造方法、施工方法及び養生方法は、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編：施工標準]」に示す一般的なコンクリート工事と同様に取り扱うことができるため、SG コンクリートの品質管理における試験方法、試験項目、試験頻度及び許容差も土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編：施工標準]」に従ってよい。

なお、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編：施工標準]」に示される一般的なコンクリート工事とは、設計基準強度が 50N/mm^2 未満、打込みの最小スランプが 16cm 以下であるコンクリートについて、トラックアジテーターによる場外運搬、コンクリートポンプによる 300m 未満の距離の圧送、棒状バイブレーターによる締固め等を想定したものである。

第Ⅲ部
付録資料

担当：大成建設株式会社・前田建設工業株式会社

付録ー1 スーパーグリーンコンクリートの配合

1. はじめに

この付録では、このマニュアル（案）で定める「標準のスーパーグリーンコンクリート（SG コンクリート）」の配合条件について示す。以降の付録に示す SG コンクリートの暴露試験及び室内試験における強度特性や耐久性等に関する試験は、特に断りがない場合、ここに示す配合条件で実施した。

2. SG コンクリートの配合

暴露試験及び室内試験での SG コンクリートの使用材料を表ー1 に、結合材の構成を表ー2 に、配合条件を表ー3 に示す。水結合材比は、呼び強度 24 となるものを選定した。SG コンクリートは、早強ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末及びフライアッシュを結合材に用いた H25B45F30 を基本配合とし、要求される品質に応じて、ポルトランドセメントの割合を削減したもの（H10B85S5）及び、フライアッシュの一部をシリカフェーム（H25B45F25S5）またはせっこう（H25B45F25A5）で置換したものとした（表ー2）。

SG コンクリートは、幅広い土木構造物に適用できるように呼び強度を 24 とし、かつ材齢 28 日で強度管理を行うことを前提として配合を決定した。目標スランプは $12 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とした。

なお、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート（N100）は比較用とした。水結合材比は、土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準]」¹⁾の 2 編 3 章に示される、一般環境下において耐久性を満足する最大水セメント比（橋脚の値）を参考に、55%とした。

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

表-1 暴露試験及び室内試験に供した SG コンクリートの使用材料

材料	記号	仕様
早強ポルトランドセメント	H	JIS R 5210, 密度 3.14g/cm ³ , 比表面積 4490cm ² /g
高炉スラグ微粉末 4000	B	JIS A 6206, プレーン値 4500cm ² /g, 密度 2.90g/cm ³ , せつこう無添加
フライアッシュ II 種	F	JIS A 6201, 密度 2.30 g/cm ³ , 比表面積 4280cm ² /g
シリカフューム	S	JIS A 6207, 粉体シリカフューム, 密度 2.25 g/cm ³ , 比表面積 16.5m ² /g
せつこう	A	JIS R 9151, 密度 2.90 g/cm ³ , 比表面積 3600cm ² /g
普通ポルトランドセメント	N	JIS R 5210, 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3340cm ² /g
細骨材	S1	JIS A 5005, 静岡県掛川産, 表乾密度 2.59g/cm ³ , 吸水率 2.23%, 粗粒率 2.80
粗骨材	G1	JIS A 5005, 茨城県笠間産 5 号, 表乾密度 2.67 g/cm ³ , 吸水率 0.43%, 粗粒率 7.12 JIS A 5005, 茨城県笠間産 6 号, 表乾密度 2.67 g/cm ³ , 吸水率 0.46%, 粗粒率 6.16 ※5 号 : 6 号=1 : 1 (体積比) で使用
AE 減水剤	Ad1	JIS A 6204, 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
AE 減水剤 (N100 に使用)	Ad2	JIS A 6204, リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
AE 剤	Ad3	JIS A 6204, 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
	Ad4	JIS A 6204, 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 暴露試験及び室内試験に供した SG コンクリートの結合材の構成 (質量%)

結合材の構成	結合材の分類	ポルトランドセメント		混和材			
		普通 N	早強 H	高炉スラグ微粉末 B	フライアッシュ F	シリカフューム S	せつこう A
H25B45F30	3 成分系	—	25	45	30	—	—
H10B85S5		—	10	85	—	5	—
H25B45F25S5	4 成分系	—	25	45	25	5	—
H25B45F25A5		—	25	45	25	—	5
N100	比較用	100	—	—	—	—	—

表-3 暴露試験及び室内試験に供した SG コンクリートの配合条件

結合材の構成	呼び強度	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m ³)
H25B45F30	24	12±2.5	4.5±1.5	20	45	165
H10B85S5						
H25B45F25S5						
H25B45F25A5						
N100						

付録ー2 スーパーグリーンコンクリートの暴露試験

1. はじめに

実環境での強度増進の確認，表面の変状の有無などの長期安定性の確認，中性化や塩化物イオンの浸透に関する実態の把握，及び，これらの室内の促進試験との比較を主な目的として，標準のSGコンクリートを用いて，つくば，新潟，沖縄の3ヶ所で暴露試験を実施した。この付録では，暴露試験体の養生条件，暴露試験の実施方法，暴露場の気象条件等を示す。物性や耐久性に関する試験結果は，室内試験の結果と合わせて評価するため，それぞれの付録に記述した。

2. 暴露試験の概要

2.1 暴露場所及び暴露試験期間

暴露試験は下記の3ヶ所の暴露場で実施した。つくば暴露場は内陸で主に中性化が作用する環境であり，新潟暴露場と沖縄暴露場は海岸沿いの塩害環境である。

- ①つくば：茨城県つくば市南原（土木研究所内）
- ②新潟：新潟県上越市名立区（国道8号線沿）
- ③沖縄：沖縄県国頭郡大宜味村（国道58号線沿）

試験期間及び分析のための回収日を表ー1に示す。

表ー1 暴露試験の開始と試験体回収日

暴露場	試験体製作	暴露試験開始	2年次分析 (約20ヶ月)
つくば	2013.08.23	2013.10.29	2015.06.15 (暴露594日)
新潟		2013.10.18	2015.06.22 (暴露612日)
沖縄		2013.10.08	2015.07.02 (暴露632日)

2.2 配合条件

暴露試験には4種類のSGコンクリート及び比較用のコンクリートを用いた。使用材料，結合材の構成及び配合条件については付録ー1に示した。

2.3 暴露試験体の製作及び養生方法

試験体の製作から暴露試験までの手順を図-1に示す。SG コンクリートを練り混ぜ、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱型枠と $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の角柱型枠に打ち込み、成型した。

SG コンクリートの養生は、材齢28日まで水温 20°C で養生したもの（以降、水中28日養生）と、材齢14日まで湿らせた養生マットで覆った後に（温度 20°C ）、恒温恒湿室（温度 20°C 、RH60%）で養生したもの（以降、マット14日養生）の2種類とした。脱型は材齢3日で行った。

角柱試験体は、材齢28日以降に半分に切断して $10 \times 10 \times 20\text{cm}$ に整形し、型枠側面の1面を暴露面として残り5面をエポキシ樹脂でコーティングした後、暴露した。円柱試験体はコーティングせずに暴露した。試験体製作から暴露試験開始までの期間は、暴露場により材齢1.5~2ヶ月であった。

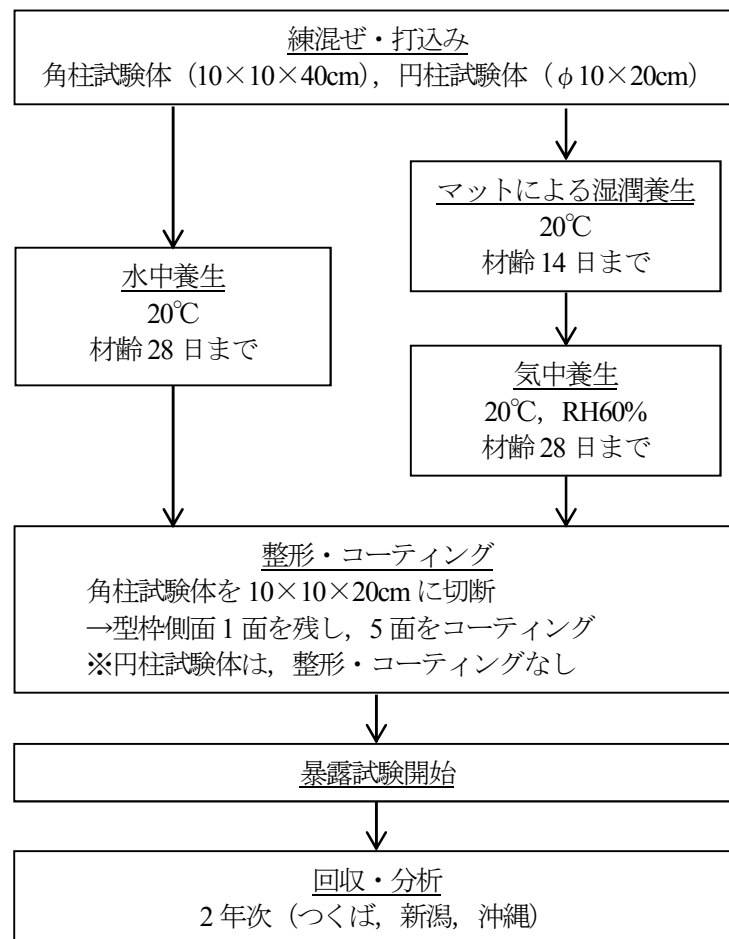


図-1 試験体製作から分析までの手順

2.4 暴露試験体の分析

暴露後の試験体の分析項目及び実施時期を表-2に示す。また、角柱試験体の分析方法を図-2に示す。

表-2 暴露試験体の分析方法及び実施時期

試験項目	試験方法	試験体形状	つくば	新潟	沖縄
圧縮強度	JIS A 1108	円柱 φ10×20cm	2年次	2年次	2年次
透気係数	Torrent法	角柱 10×10×20cm	2年次	2年次	2年次
中性化深さ	JIS A 1152		2年次	2年次	2年次
塩化物イオン濃度分布	JIS A 1154 電位差滴定法		塩害環境でな いため未実施	2年次	2年次

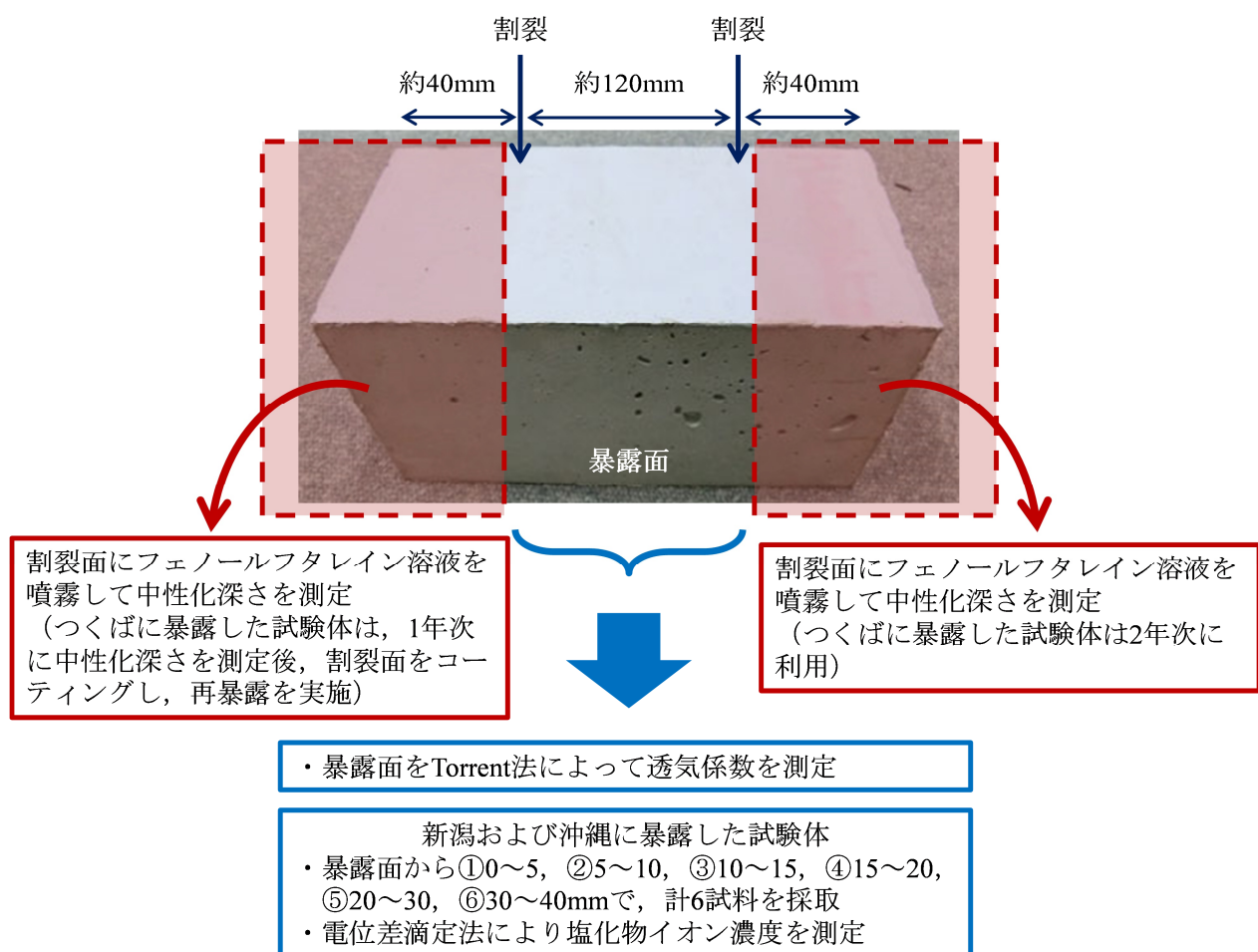


図-2 暴露試験体の解体分析の方法

3. 暴露試験の状況及び暴露環境

3.1 暴露試験の状況

つくば、新潟及び沖縄での暴露試験の状況を図-3～図-5に示す。



図-3 つくばでの暴露試験の状況



図-4 新潟での暴露試験の状況



図-5 沖縄での暴露試験の状況

3.2 暴露試験期間中の温湿度及び降水量

暴露試験期間中の温度の測定値及び、アメダスによる当該地区の湿度と降水量を図-6～図-8に示す。

気温：温湿度計による日平均気温

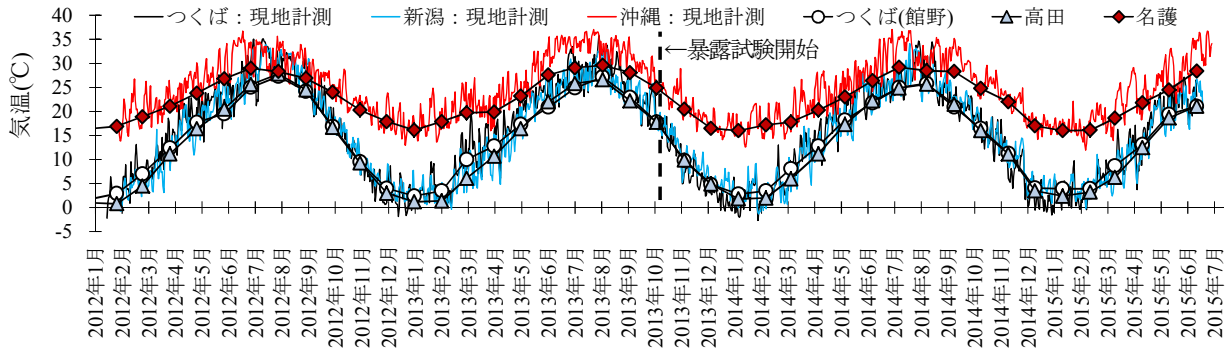


図-6 暴露試験期間中の気温

湿度：アメダスデータ

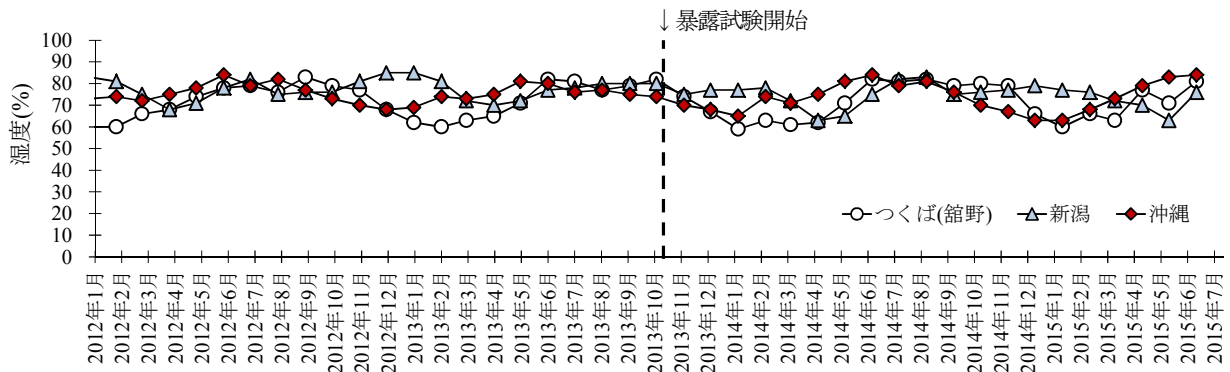


図-7 暴露試験期間中の湿度

降水量：アメダスデータ

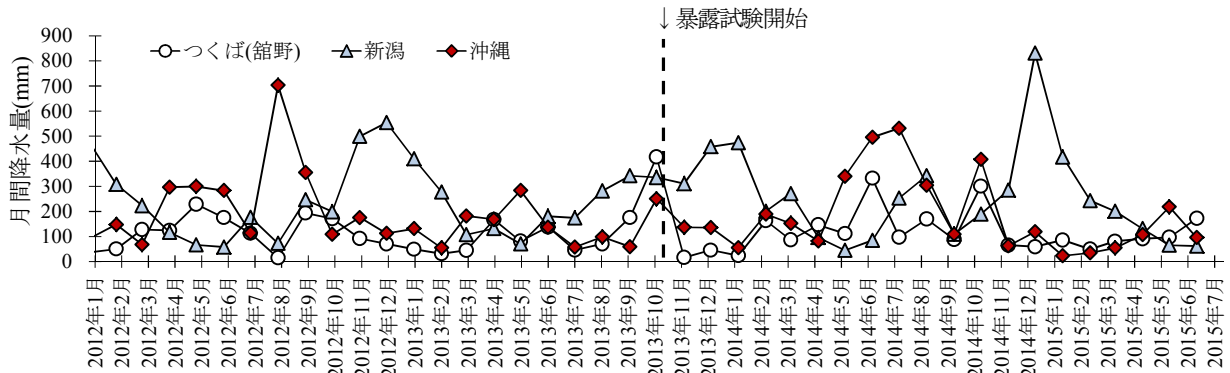


図-8 暴露試験期間中の降水量

付録ー3 スーパーグリーンコンクリートの強度特性

1. はじめに

この付録では、SG コンクリートの水結合材比と圧縮強度の関係を示す。また、圧縮強度と割裂引張強度、曲げひび割れ強度、ヤング係数及びポアソン比との関係を示し、このマニュアル（案）の「4.2 強度特性」のとおり土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕」¹⁾に示される式や設計値を用いることができることを示す。また、SG コンクリートは実環境中で長期にわたり強度が増進してくことを、暴露試験の結果から示す。

2. 圧縮強度と水結合材比の関係

2.1 配合条件

水結合材比と圧縮強度の関係を得ることを目的として、水結合材比を変化させてSG コンクリートの圧縮強度を測定した。配合条件は表ー1とし、化学混和剤の添加量でスランプ及び空気量を調整した。

表ー1 配合条件

結合材の構成※	水結合材比 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)
H25B45F30	45, 40, 35	12±2.5	4.5±1.5	20
H10B85S5				
H25B45F25S5				
H25B45F25A5				
N100	55, 50, 45			

※H：早強ポルトランドセメント，B：高炉スラグ微粉末，F：フライアッシュ，S：シリカフェーム，A：せつこう，N：普通ポルトランドセメント
アルファベットに続く数字は各混和材の割合

2.2 試験方法

20℃の室内で練混ぜ、φ10×20cmの円柱試験体を製作した。材齢3日で脱型後、水中養生を行い、材齢28日でJISA 1108に準じて圧縮強度を測定した。

2.3 圧縮強度と水結合材比の関係

SG コンクリートは強度管理を材齢28日で行うことを標準としている。結合材水比（水結合材の逆数）と

材齢 28 日における圧縮強度の関係を図-1 に示す。ここでは、空気量のばらつきが強度に与える影響を取り除くために、練上がり時の空気量が 1% 変動すると強度が 5% 変化するものとして、空気量を 4.5% 相当とした場合の圧縮強度に補正した。SG コンクリートの圧縮強度は、結合材水比と比例関係にあり、両者の関係式を求めることで、要求される圧縮強度に対する水結合材比を設定することができる。

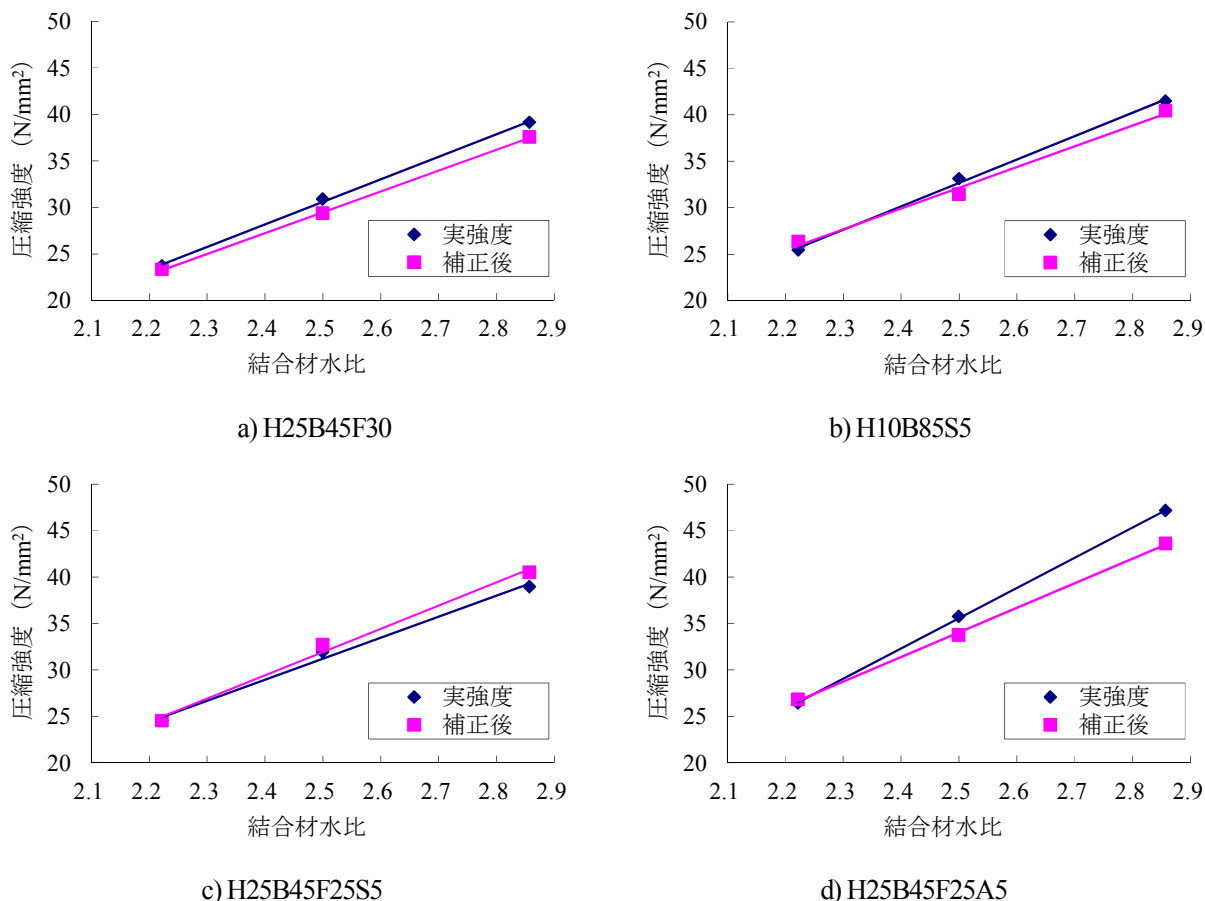


図-1 材齢 28 日における圧縮強度と結合材水比の関係

二酸化炭素排出量を大幅に削減したい場合には、フライアッシュを使用せずに高炉スラグ微粉末の量を多くし、かつシリカフュームを使用することで、早強ポルトランドセメントの使用量を 10% まで低減することが可能である。H10B85S5 は、H25B45F30 と同程度の水結合材比で呼び強度 24 を得ることができ、二酸化炭素排出量は H25B45F30 の約 50% に削減される。

シリカフュームを使用した H25B45F25S5 の圧縮強度は、H25B45F30 よりも大きくなり、水結合材比を若干大きくできる。

せっこうを使用した H25B45F25A5 の圧縮強度は、材齢 14 日までの増進が大きく、材齢 28 日では H25B45F30 とほぼ同程度の圧縮強度になるため、水結合材比を低下させずに初期強度を高めたい場合にはせっこうの使用が有効である。

3. 強度発現性

3.1 配合条件

標準の SG コンクリートの圧縮強度の変化を、室内におけるマット及び水中養生と、約 2 年間の暴露試験をとおして確認した。SG コンクリートの配合条件については付録-1 に示した。

3.2 試験方法

暴露試験の方法については付録-2 に示した。

3.3 強度発現性

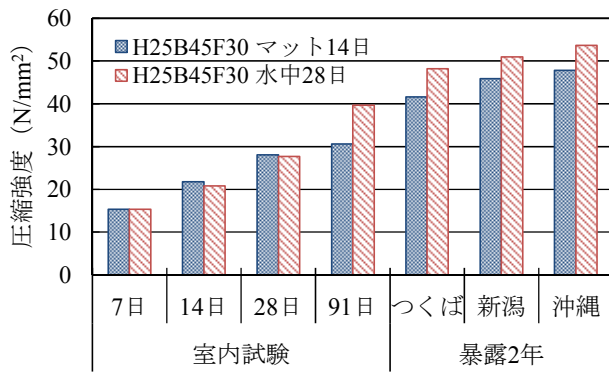
室内試験と暴露試験による圧縮強度を、表-2 及び図-2 に示す。SG コンクリートは、材齢 28 日で呼び強度 24 を満足する。また、SG コンクリートは N100 と比較して、材齢 28 日以降の強度の伸びが大きい特徴があり、このマニュアル(案)の「3.1 一般」に示したように、管理材齢を延長してポルトランドセメントの使用量をさらに低減することで、二酸化炭素排出量の削減、温度ひび割れ抵抗性及び経済性に有利となる場合がある。

SG コンクリートは、いずれの配合も約 2 年間の暴露試験期間中に強度が大きく増進し、材齢 28 日における強度の 1.3~2.0 倍に達した。ただし、初期の養生方法の違いにより生じた強度差は、2 年の暴露を経ても解消していない。

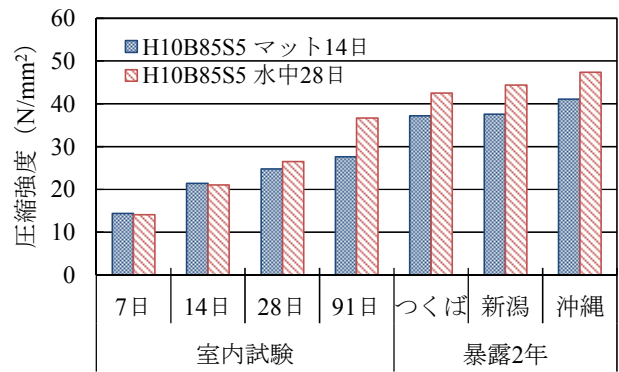
表-2 暴露後の圧縮強度

結合材の構成	養生	室内試験				暴露 2 年		
		7 日	14 日	28 日	91 日	つくば	新潟	沖縄
H25B45F30	マット 14 日	15.4	21.9	28.1	30.6	41.7	45.9	47.8
	水中 28 日	15.3	20.8	27.7	39.7	48.2	51.0	53.7
H10B85S5	マット 14 日	14.4	21.5	24.8	27.6	37.2	37.6	41.1
	水中 28 日	14.1	21.1	26.5	36.7	42.6	44.4	47.4
H25B45F25S5	マット 14 日	16.3	21.3	27.4	29.2	40.3	44.0	44.8
	水中 28 日	14.4	20.9	25.5	38.1	48.6	48.4	51.2
H25B45F25A5	マット 14 日	21.9	27.2	31.3	33.8	41.3	43.3	44.1
	水中 28 日	19.5	25.3	29.6	36.0	44.8	45.5	47.8
N100	マット 14 日	28.5	33.5	41.3	41.9	49.5	49.8	53.4
	水中 28 日	26.7	32.1	36.6	42.7	50.0	51.3	52.0

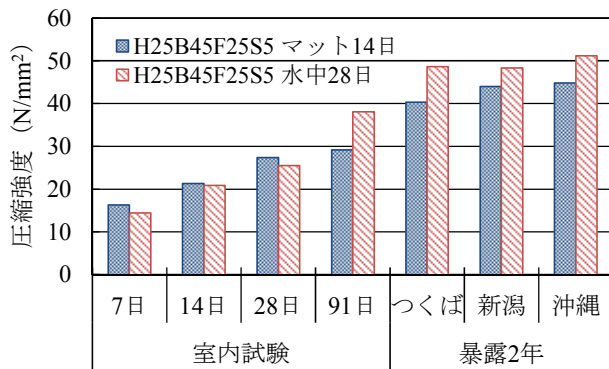
単位：N/mm²



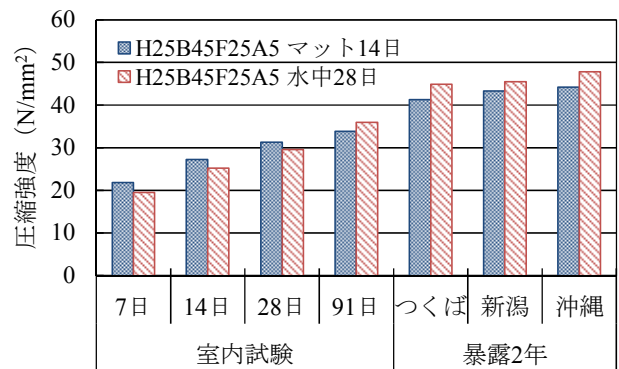
a) H25B45F30



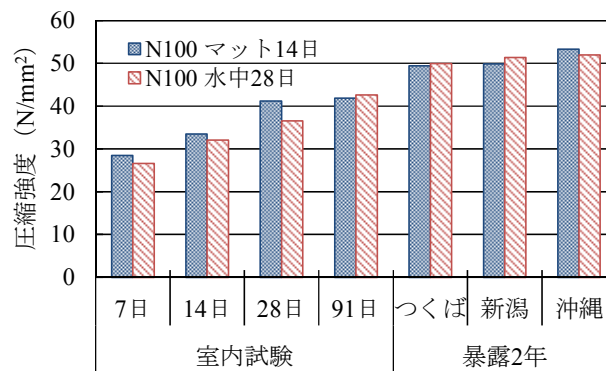
b) H10B85S5



c) H25B45F25S5



d) H25B45F25A5



e) N100

図-2 実環境暴露による圧縮強度の増加

4. 圧縮強度と割裂引張強度，曲げ強度，ヤング係数及びポアソン比の関係

4.1 配合条件

標準の SG コンクリートを用いて、圧縮強度と各物性値（ヤング係数，割裂引張強度，曲げ強度及びポアソン比）の関係を確認した。コンクリートの使用材料，結合材の構成及び配合条件については付録-1 に示した。

4.2 試験方法

強度特性は次の JIS の試験方法に準じて測定した。

- ・圧縮強度（JIS A 1108）， $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱試験体
- ・ヤング係数，ポアソン比（JIS A 1149：ひずみゲージ法）， $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱試験体
- ・割裂引張強度（JIS A 1113）， $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 円柱試験体
- ・曲げ強度（JIS A 1106）， $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の試験体を 3 等分点載荷

4.3 圧縮強度と割裂引張強度，曲げ強度，ヤング係数及びポアソン比の関係

4.3.1 試験結果の一覧

強度特性の試験結果の一覧を表-3 に示す。

表-3 強度特性の試験結果の一覧

結合材の構成	圧縮強度 (N/mm ²)			ヤング係数 (kN/mm ²)			曲げ強度 (N/mm ²)			割裂引張強度 (N/mm ²)			ポアソン比		
	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日	91 日	7 日	28 日	91 日
H25B45F30	14.1	26.5	40.3	19.0	28.9	35.9	2.47	3.93	5.97	1.48	2.08	3.03	0.17	0.18	0.22
H10B85S5	15.2	29.6	42.9	16.4	27.5	33.6	2.72	4.47	5.78	1.52	2.54	3.39	0.17	0.18	0.20
H25B45F30S5	14.3	26.6	40.6	17.6	26.3	33.7	2.50	3.76	5.38	1.17	2.00	3.00	0.16	0.18	0.19
H25B45F30A5	17.6	26.4	34.0	23.1	27.4	32.4	3.80	4.42	5.39	1.41	1.80	3.18	0.19	0.19	0.20
N100	26.3	33.6	39.7	29.5	30.5	35.1	4.68	5.03	5.85	2.79	3.08	3.46	0.18	0.19	0.18

4.3.2 圧縮強度とヤング係数の関係

圧縮強度とヤング係数の関係を図-3 に示す。図中の実線は土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編：本編]」の「5章 材料の設計値」に示される式から計算したものである。SG コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係は、示方書の式から計算した値とほぼ一致する傾向にあることから、設計にあたってはこの式を用いて設定してよいこととした。

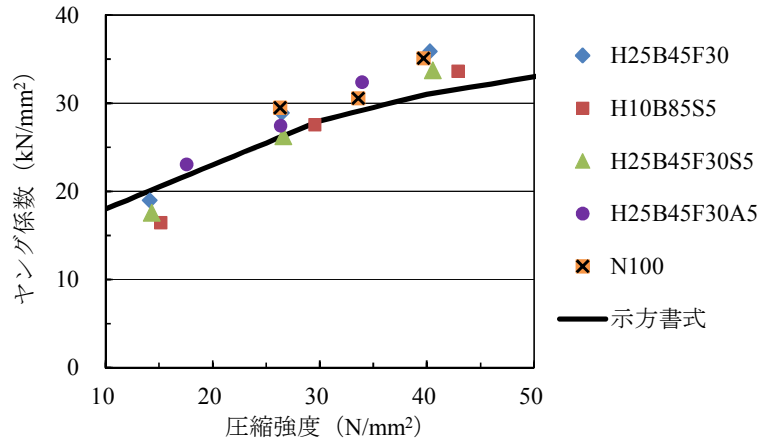


図-3 圧縮強度とヤング係数の関係

4.3.3 圧縮強度と割裂引張強度の関係

圧縮強度と割裂引張強度の関係を図-4に示す。図中の実線は、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕」の「5章 材料の設計値」に示される式から計算したものである。SGコンクリートの割裂引張強度は、圧縮強度が25N/mm²以上では示方書の式から計算した値よりも大きい、概ね同じ傾向であることから設計にあたってはこの式を使用して設定してよいこととした。

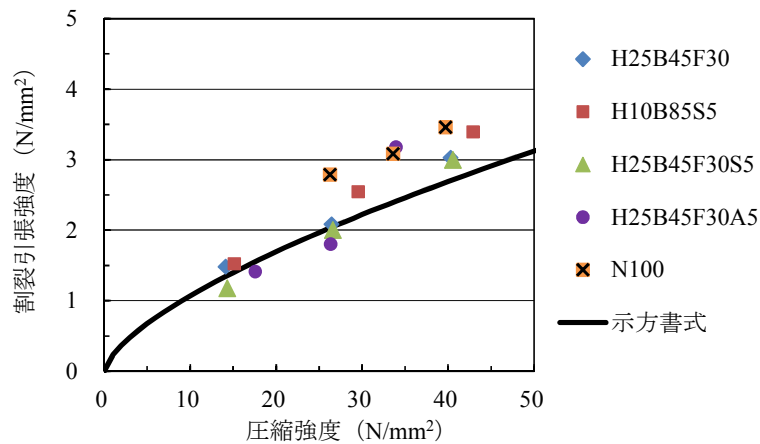


図-4 圧縮強度と割裂引張強度の関係

4.3.4 圧縮強度と曲げ強度の関係

圧縮強度と曲げ強度の関係を図-5に示す。図中の実線は、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕」の「5章 材料の設計値」に示される式から計算した曲げひび割れ強度である。SGコンクリートの曲げ強度は、示方書の式から計算した曲げひび割れ強度よりも高くなる。曲げひび割れ強度は、部材寸法などの影響を受けるため、実験結果と示方書の式から得られる値を単純に比較することはできないが、設計における曲げひび割れ強度は示方書の式を用いて設定してよいものとした。

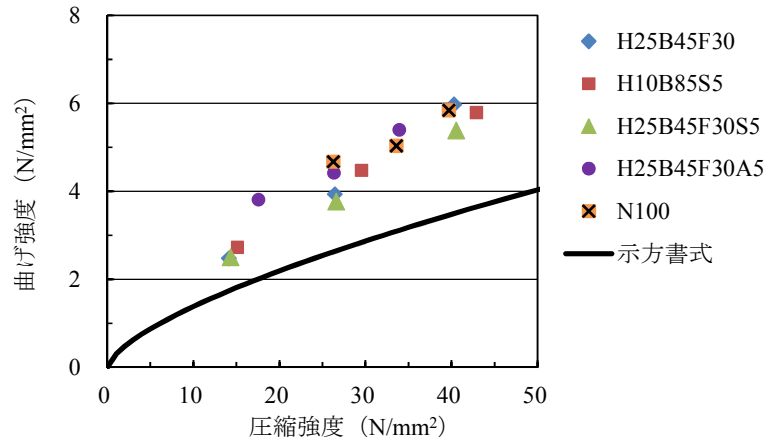


図-5 圧縮強度と曲げ強度の関係

4.3.5 ポアソン比

圧縮強度とポアソン比の関係を図-6に示す。土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：本編〕」の「5章 材料の設計値」では、弾性範囲内のポアソン比は0.2としてよいとされている。SGコンクリートのポアソン比は圧縮強度20N/mm²以上では概ね0.2であり、設計においてはこの値を用いてよいこととした。

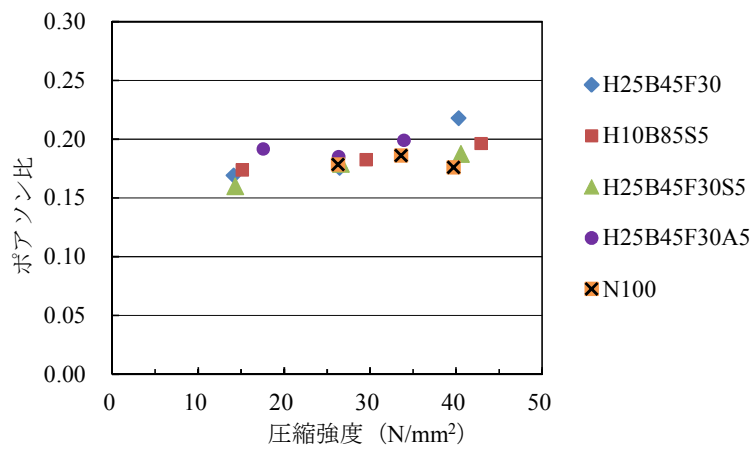


図-6 圧縮強度とポアソン比の関係

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-4 スーパーグリーンコンクリートの耐久性

1. はじめに

この付録では、標準の SG コンクリートの耐久性について、マニュアル（案）に記載した中性化及び塩害の照査に用いる特性値の根拠となるデータ、及び、凍結融解試験によって凍害に対する抵抗性を評価した結果を示す。また、長期安定性として、アブサンデン現象及びエトリングタイトの遅れ生成（DEF）による表面の変状が生じないことを、2年間の暴露試験を通して確認した結果を示す。

2. 中性化速度係数

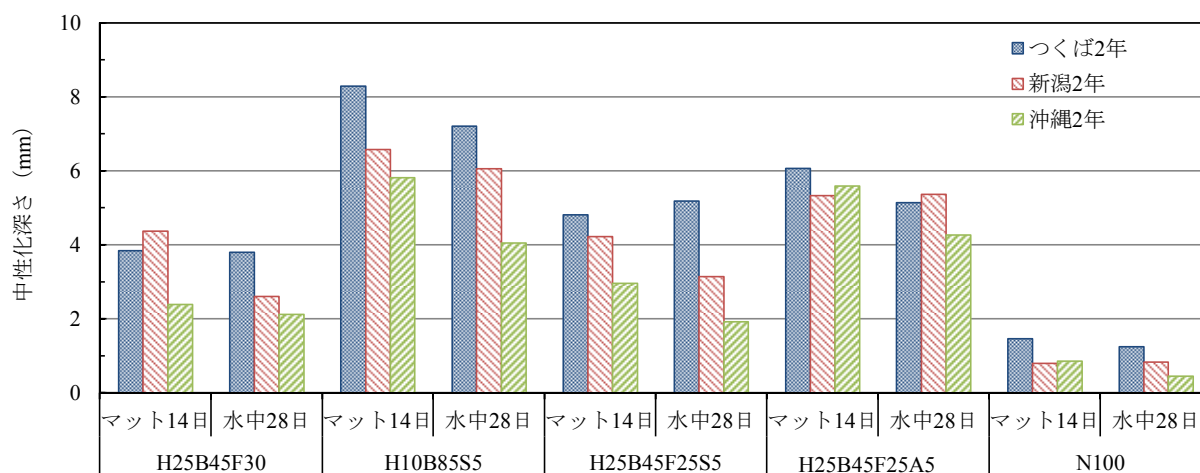
2.1 暴露試験による中性化速度係数

2.1.1 試験方法

SG コンクリートの配合条件については付録-1 に示し、試験体の形状、養生方法及び暴露試験の方法については付録-2 に示した。

2.1.2 中性化速度係数

つくば、新潟及び沖縄で2年間暴露した SG コンクリートの中性化深さを図-1 に示す。中性化深さが暴露期間の平方根に比例すると仮定 ($d=A\sqrt{t}:\sqrt{t}$ 則) し、暴露期間2年における中性化深さ d から計算した中性化速度係数 A を表-1 に示す。SG コンクリートの結合材の構成で中性化速度係数 A を比較すると、 $H10B85S5 > H25B45F25A5 > H25B45F25S5 \approx H25B45F30$ であった。



図一 暴露試験による中性化深さ

表一 暴露試験における中性化速度係数 (mm/√年)

結合材の構成・養生方法		つくば2年	新潟2年	沖縄2年
H25B45F30	マット14日	3.0	3.4	1.8
	水中28日	3.0	2.0	1.6
H10B85S5	マット14日	6.5	5.1	4.4
	水中28日	5.7	4.7	3.1
H25B45F25S5	マット14日	3.8	3.3	2.2
	水中28日	4.1	2.4	1.5
H25B45F25A5	マット14日	4.8	4.1	4.2
	水中28日	4.0	4.1	3.2

2.2 促進試験による中性化速度係数

2.2.1 試験方法

SG コンクリートの配合条件については付録一に示した。コンクリートを練り混ぜ、10×10×40cmに成型し、次に示す促進中性化試験を行った。

- ・ 準拠規格 : JIS A 1153 「コンクリートの促進中性化試験方法」
- ・ 試験体寸法 : 10×10×40cm 角柱試験体
- ・ 養生方法 : ①マット14日養生

材齢14日まで温度20℃の室内において、養生マットを用いて湿潤養生(材齢3日で脱型)。以降、温度20℃、RH60%の恒温恒湿室で保管。

②水中28日養生

材齢28日まで水中養生(材齢3日で脱型)した後、温度20℃、RH60%の恒温恒湿室で保管。

- ・ 試験手順 : 材齢7週以降、型枠側面1面を解放面として残りの5面をコーティング。

材齢 8 週経過後から促進中性化装置に静置。

- ・促進条件 : 温度 20℃, 相対湿度 60%, CO₂濃度 5%
- ・促進期間 : 4, 8, 13, 26, 52 週

2.2.2 中性化速度係数

促進中性化試験の結果を図-2 および図-3 に、促進期間 1 年までの複数の測定点を最小自乗法により \sqrt{t} 則 ($d=A\sqrt{t}$) で回帰して求めた中性化速度係数 A を表-2 に示す。この際、中性化深さが 80mm 以上の測定点は回帰から除外した。

SG コンクリートの結合材の構成で中性化速度係数 A を比較すると、 $H10B85S5 > H25B45F25A5 \approx H25B45F25S5 > H25B45F30$ であった。

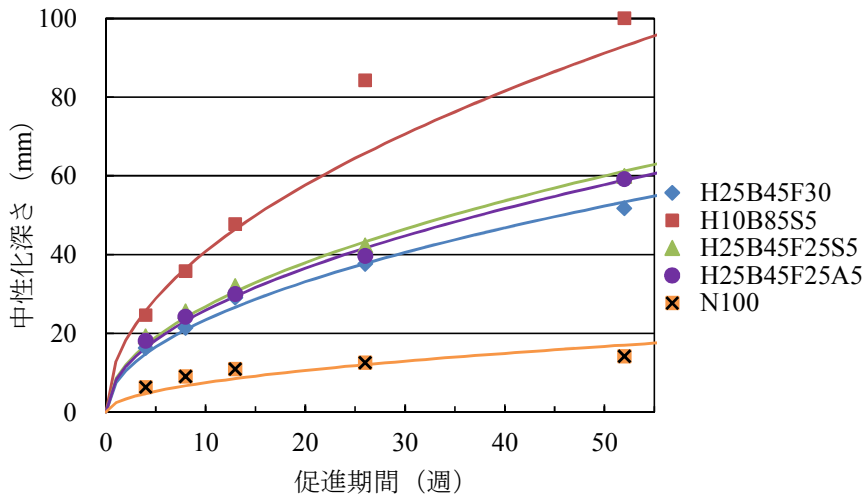


図-2 促進試験による中性化深さ (マット 14 日養生)

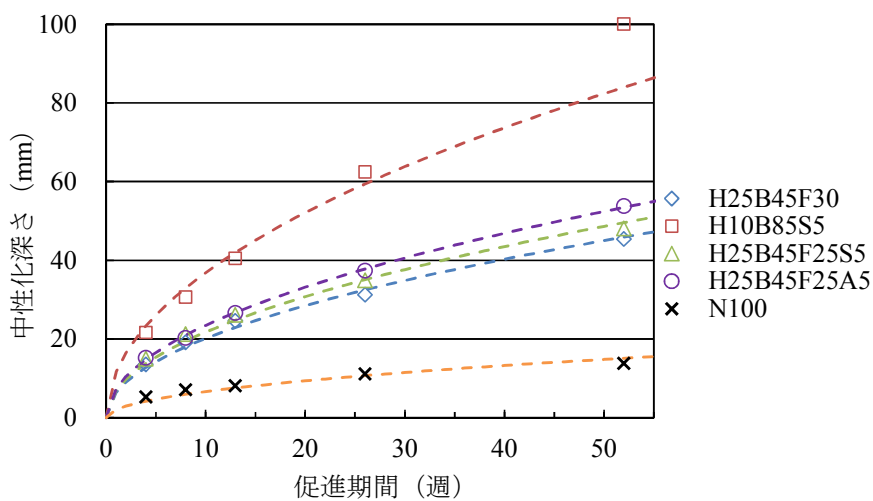


図-3 促進試験による中性化深さ (水中 28 日養生)

表-2 促進試験による中性化速度係数

結合材の構成	マット 14 日 (mm/√年)	水中 28 日 (mm/√年)
H25B45F30	53.4	45.9
H10B85S5	93.0	84.0
H25B45F25S5	61.2	49.6
H25B45F25A5	58.9	53.3
N100	17.0	15.1

2.3 中性化速度係数の特性値

SG コンクリートの中性化の照査に使用する中性化速度係数の特性値は、3ヶ所で実施した暴露試験における最大値とした。結果を表-3に示す。

表-3 標準のSG コンクリートの中性化速度係数の特性値 (mm/√年)

結合材の構成	中性化速度係数の特性値 (mm/√年)
H25B45F30	3.4
H10B85S5	6.5
H25B45F25S5	4.1
H25B45F25A5	4.8

参考として、促進試験による中性化速度係数から、式(1)を用いて、実環境における速度係数を推定した結果を図-4に示す。促進試験から推定される中性化速度係数は、暴露試験のものよりも大きいことから、安全側の評価となることが確認できた。したがって、暴露試験の結果が利用できない場合には、促進試験から式(1)を用いて実環境における中性化速度係数の特性値を設定することができる。

$$A = A' \sqrt{\frac{CO_2}{\alpha CO_2}} \quad (1)$$

ここで、 A ：実環境における中性化速度係数の推定値 (mm/√年)、 A' ：促進中性化試験による中性化速度係数 (mm/√年)、 CO_2 ：実環境の二酸化炭素濃度 (ここでは 0.04%とした)、 αCO_2 ：促進中性化試験の二酸化炭素濃度 (5%) である。

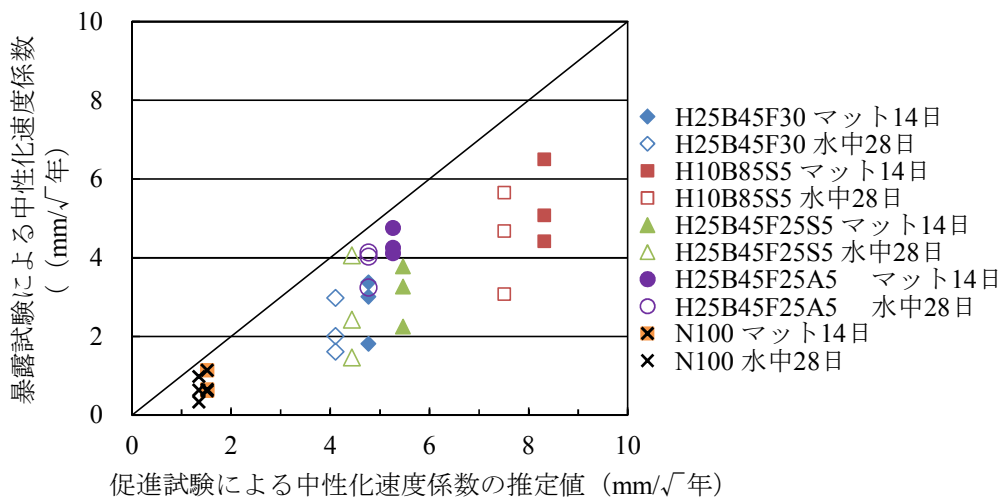


図-4 試験方法の違いによる中性化速度係数の比較

3. 塩化物イオン拡散係数

3.1 暴露試験による塩化物イオン拡散係数

3.1.1 試験方法

SG コンクリートの配合条件については付録-1 に示し、試験体の形状、養生方法及び暴露試験の方法については付録-2 に示した。塩化物イオン濃度分布は、JSCE-G 573 「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法」¹⁾に従って測定した。

3.1.2 塩化物イオン拡散係数

新潟及び沖縄に2年間暴露した試験体の塩化物イオン濃度分布を図-5 に示す。SG コンクリートはN100と比較して、特に沖縄のような厳しい塩害環境において塩化物イオンの浸透量が小さく、高い塩化物イオンの浸透抵抗性を有することが示された。ただし、中性化によって塩化物イオンが内部で濃縮する傾向がN100よりも顕著に表れている。暴露試験における塩化物イオンの浸透量は小さく、また、中性化による濃縮現象も見られたため、この結果からJSCE-G-573 付属書2 (参考) 「コンクリート中の全塩化物イオン濃度分布に基づいた見掛けの拡散係数の算出方法」¹⁾に従って塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出することはできなかった。

暴露試験2年の段階では、塩化物イオンは中性化領域よりも内部10mm以下の範囲で濃縮していた。これを受けて、マニュアル(案)の中性化の照査では、塩害環境下での中性化残りを当面、15mmとした。今後、十分な信頼性を有するデータを取得できた場合には、その値を使用してよいものとした。

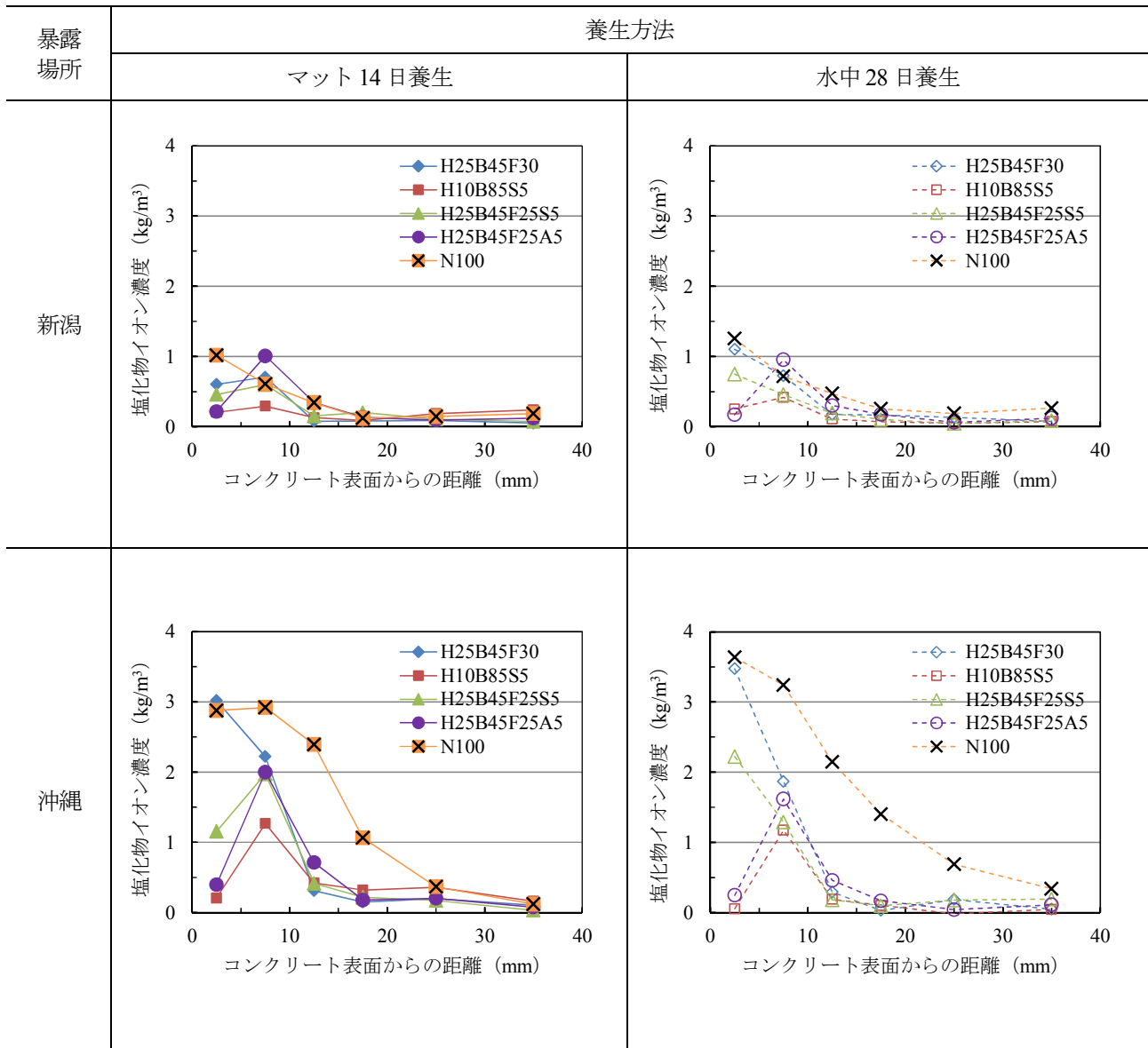


図-5 暴露 2 年における塩化物イオン濃度分布

3.2 浸せき法による塩化物イオンの拡散係数

3.2.1 試験方法

SG コンクリートの配合条件については付録-1 に示した。コンクリートを練り混ぜ、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱形に成型した。養生は、湿らせた養生マットで 14 日間覆った後に温度 20°C 、RH60%の恒温恒湿室で材齢 28 日まで保管して養生したもの（以降、マット 14 日養生）と、水中で材齢 28 日まで養生したもの（以降、水中 28 日養生）の 2 種類とした。養生終了後、以降に示す浸せき試験を行った。

・参考規準 : 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)」

1)

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」の電位差滴定法

・試験方法 : マット 14 日養生または水中 28 日養生終了後、温度 20°C 、RH60%の恒温恒湿室で乾燥した。

乾燥後、試験体の両端から 25mm を切断し、打込み面側の切断面を暴露面として、底面側の切断面と柱面をエポキシ樹脂でコーティングした。20°C の水中に 1 日浸せきした後、塩化ナトリウム水溶液へ浸せきした。

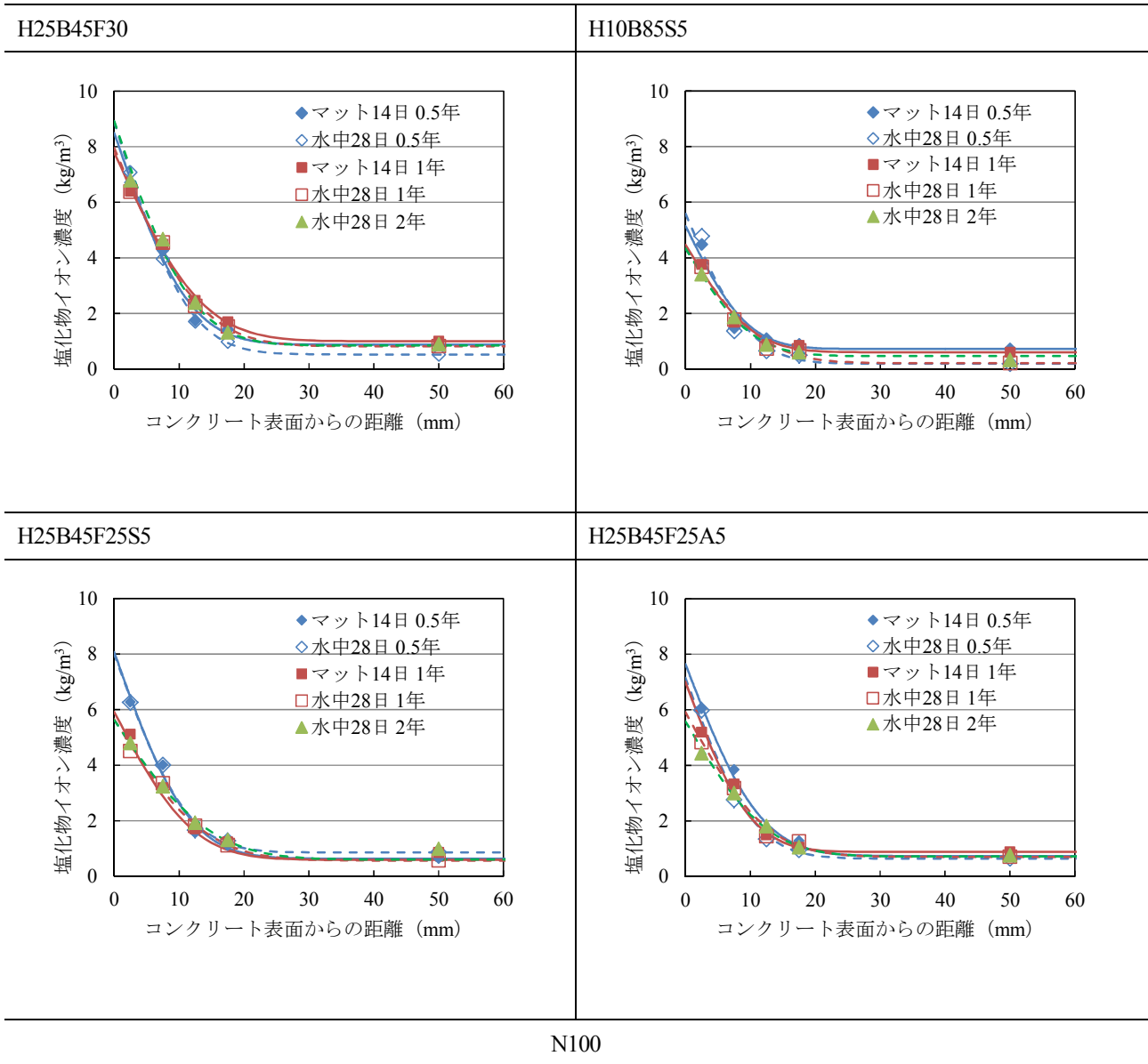
- ・浸せき条件 : 3%塩化ナトリウム水溶液, 試験温度 20°C
- ・浸せき期間 : 6 ヶ月, 1, 2 年

3.2.2 塩化物イオン拡散係数

浸せき期間 6 ヶ月, 1, 2 年における塩化物イオンの濃度分布を図-6 に示す。また, Fick の拡散方程式で回帰して求めた各配合の表面塩化物イオン濃度及び見掛けの拡散係数を表-4 に示す。

図-6 より, SG コンクリートはいずれも, N100 と比較して, 塩化物イオンの浸透が顕著に抑制されていた。特に, ポルトランドセメントの少ない H10B85S5 で抑制効果が高い。表-4 に示すとおり, 見掛けの拡散係数だけでなく, 表面塩化物イオン濃度も顕著に低下する。

N100 では浸せき期間の経過とともに塩化物イオンが内部まで浸透したのに対し, SG コンクリートでは, 浸せき 6 ヶ月以降の濃度分布がほとんど変化せず, 浸透が停滞している。このため, 浸せき期間が長いほど見掛けの拡散係数は小さく計算される(表-4)。これは SG コンクリートの特筆すべき特徴である。この特徴を正確に評価するには, 試験期間はできるだけ長いほうがよいと考えられるため, マニュアル(案)ではさらに長期の試験により塩化物イオン拡散係数が得られた場合には, その値を用いてよいこととした。



N100

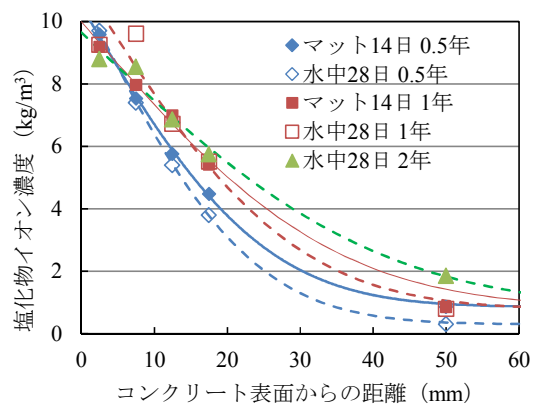


図-6 浸せき法による塩化物イオンの濃度分布

表-4 浸せき法による表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数

結合材の構成	養生	浸せき6ヶ月		浸せき1年		浸せき2年	
		表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	見掛けの拡散係数 (cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	見掛けの拡散係数 (cm ² /年)	表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	見掛けの拡散係数 (cm ² /年)
H25B45F30	マット14日	7.61	0.81	6.79	0.56	—	—
	水中28日	8.37	0.79	7.13	0.54	8.07	0.22
H10B85S5	マット14日	4.42	0.56	3.87	0.32	—	—
	水中28日	5.39	0.63	4.13	0.45	3.87	0.16
H25B45F25S5	マット14日	7.43	0.81	5.32	0.45	—	—
	水中28日	7.16	0.76	5.08	0.60	5.02	0.34
H25B45F25A5	マット14日	6.91	0.83	6.12	0.31	—	—
	水中28日	6.51	0.69	5.21	0.48	4.87	0.24
N100	マット14日	9.63	3.78	9.14	3.61	—	—
	水中28日	10.5	3.22	10.5	2.51	8.82	2.51

3.3 塩化物イオン拡散係数の特性値

塩害の照査に用いるSGコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、3.1に示したように、暴露試験においては塩化物イオンの浸透が進行せず、また中性化の影響が大きく拡散係数の計算が困難であったため、表-5に示す浸せき2年の値を使用することとした。

表-5 標準のSGコンクリートの見掛けの拡散係数の特性値

結合材の構成	見掛けの拡散係数 (cm ² /年)
H25B45F30	0.22
H10B85S5	0.16
H25B45F25S5	0.34
H25B45F25A5	0.24

なお、表面塩化物イオン濃度は表-4に示したように、通常のコンクリート(N100)よりも明らかに小さくなるが、現状では、SGコンクリートの表面塩化物イオン濃度に関するデータの蓄積が十分でないため、表面塩化物イオン濃度は土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準]」²⁾に示される、構造物の立地する地域区分と海岸からの距離に応じて設定された値を用いることとした。

4. 凍結融解抵抗性

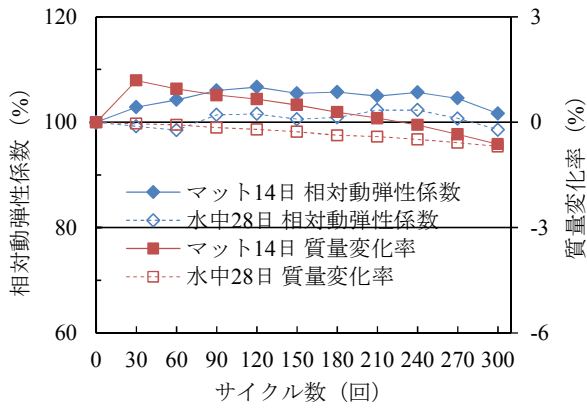
4.1 試験方法

SG コンクリートの配合条件については付録-1 に示した。SG コンクリートの凍結融解に対する抵抗性の確認は次の方法で行った。

- ・試験規準 : JIS A 1148 「コンクリートの凍結融解試験法」 A 法 (水中凍結融解試験方法)
- ・試験体寸法 : 10×10×40cm 角柱試験体
- ・養生方法 : マット 14 日養生及び水中 28 日養生
- ・試験条件 : 5℃→-18℃→5℃を 1 サイクルとし, 6 サイクル/日で 300 サイクルまで実施
- ・測定頻度 : 動弾性係数及び質量を 30 サイクル毎に測定

4.2 凍結融解試験による相対動弾性係数, 質量変化率及びスケーリング

図-7～図-9 に凍結融解試験における相対動弾性係数, 質量変化率及び 300 サイクル終了後の試験体のスケーリングの状況を示す。

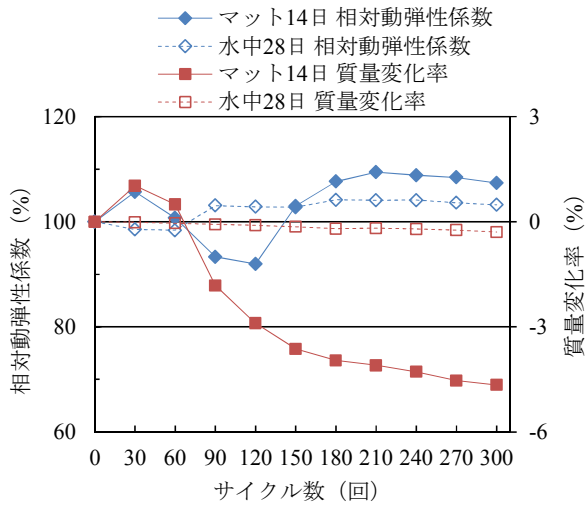


300 サイクル終了後

マット 14 日養生



水中 28 日養生



300 サイクル終了後

マット 14 日養生



水中 28 日養生

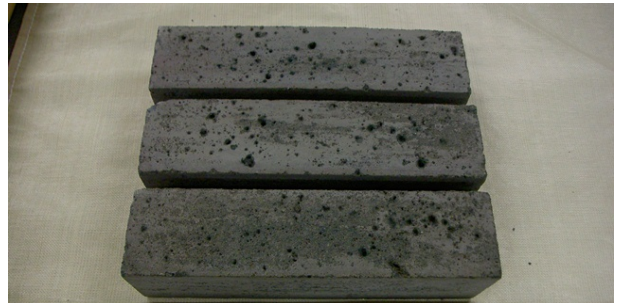
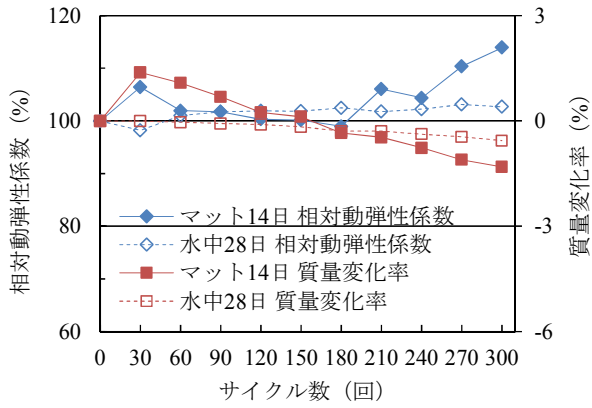


図-7 凍結融解試験における相対動弾性係数, 質量変化率及びスケーリングの状況 (1)

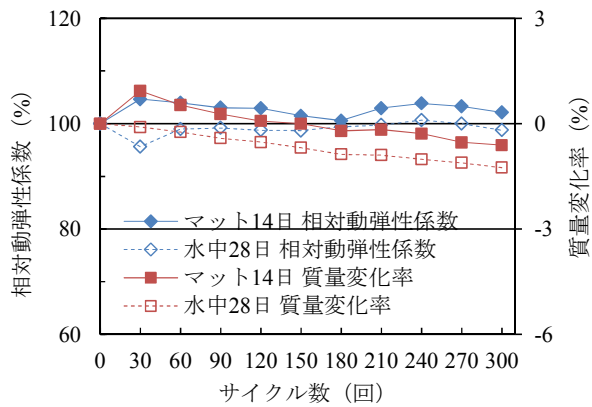


300 サイクル終了後

マット 14 日養生



水中 28 日養生



300 サイクル終了後

マット 14 日養生



水中 28 日養生



図-8 凍結融解試験における相対動弾性係数、質量変化率及びスケーリングの状況 (2)

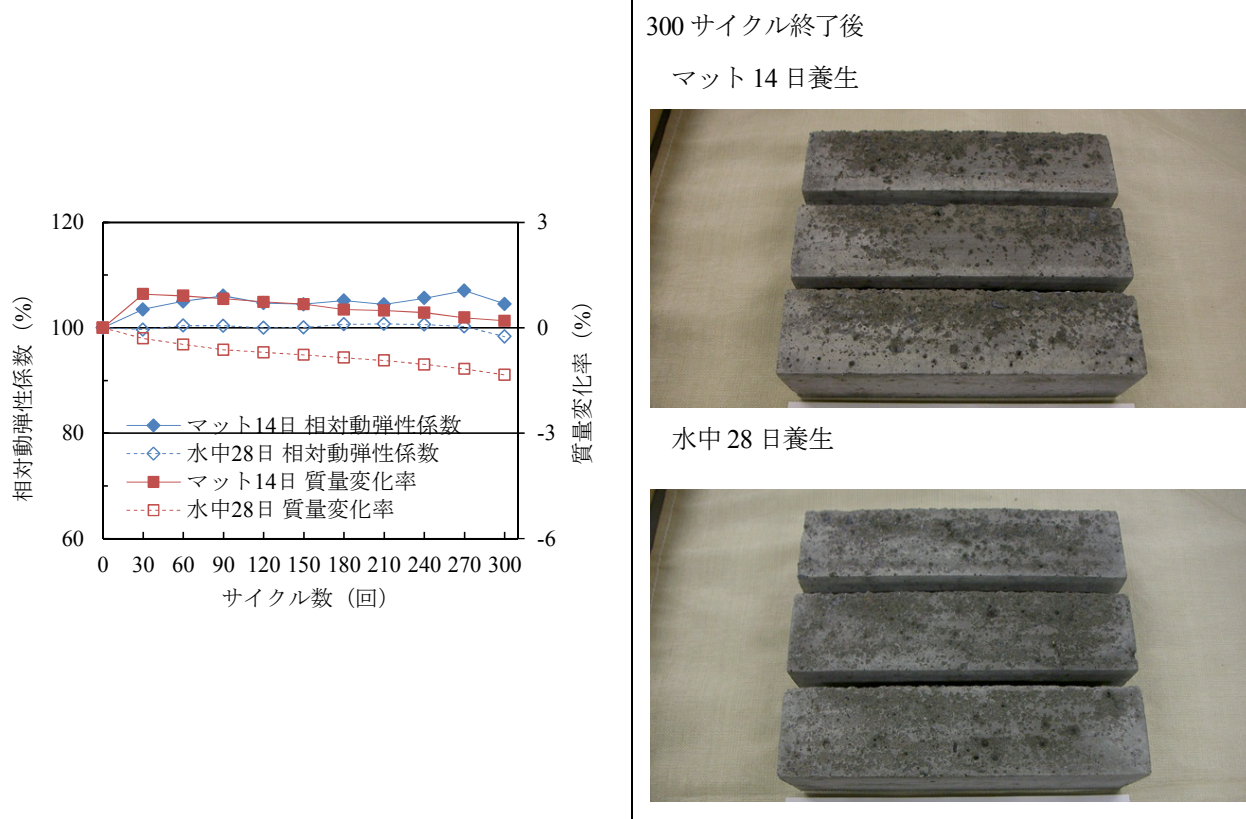


図-9 凍結融解試験における相対動弾性係数，質量変化率及びスケーリングの状況（3）

4.3 凍結融解抵抗性の評価

凍結融解試験後の標準の SG コンクリートの相対動弾性係数は，いずれの配合でもほぼ 100%であった。したがって，土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準]」によると，一般の構造物に適用する場合は凍害の内部損傷及び表面損傷（スケーリング）に対する照査を省略することができると判断される。

5. 長期的な安定性







5.1 試験方法

高炉スラグ微粉末の置換率を JIS R 5211 の高炉セメント C 種よりも高くしたコンクリートでは，コンクリートの表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。また，若材齢で高温履歴を受けるようなコンクリートでは，エトリングタイトの遅れ生成 (DEF) の発生が懸念される。SG コンクリートの長期的な安定性として，アブサンデン現象及びエトリングタイトの遅れ生成 (DEF) について，2 年間の暴露試験後のコンクリートの目視観察により評価した。SG コンクリートの配合条件については付録

ー1に示し、試験体の形状、養生方法及び暴露試験の方法については付録ー2に示した。

5.2 アブサンデン現象及びエトリンタイトの遅れ生成（DEF）に対する安定性

暴露2年における標準のSGコンクリートの表面の状況を図ー10～図ー14示す。表面のペーストの脱落による骨材の露出やひび割れなどの変状は生じておらず、健全であった。このことから、標準のSGコンクリートは、アブサンデン現象及びエトリンタイトの遅れ生成（DEF）に対する安定性は確保されているものと判断した。

H25B45F30		
つくば マット 14日養生	新潟 マット 14日養生	沖縄 マット 14日養生
		
つくば 水中 28日養生	新潟 水中 28日養生	沖縄 水中 28日養生
		

図一10 暴露2年におけるH25B45F30の状況



















HI0B85S5		
つくば マット 14日養生	新潟 マット 14日養生	沖縄 マット 14日養生
		
つくば 水中 28日養生	新潟 水中 28日養生	沖縄 水中 28日養生
		


図-11 暴露2年におけるHI0B85S5の状況

H25B45F25SS		
つくば マット 14日養生 	新潟 マット 14日養生 	沖縄 マット 14日養生 
つくば 水中 28日養生 	新潟 水中 28日養生 	沖縄 水中 28日養生 

図一12 暴露2年におけるH25B45F25SSの状況

H25B45F25A5		
つくば マット 14日養生 	新潟 マット 14日養生 	沖縄 マット 14日養生 
つくば 水中 28日養生 	新潟 水中 28日養生 	沖縄 水中 28日養生 

図一13 暴露2年におけるH25B45F25A5の状況

N100		
つくば マット 14日養生	新潟 マット 14日養生	沖縄 マット 14日養生
		
つくば 水中 28日養生	新潟 水中 28日養生	沖縄 水中 28日養生
		

図一14 暴露2年におけるN100の状況

暴露2年におけるTorrent法による透気係数³⁾を図-15に示す。いずれの暴露地点でも透気係数は概ね $0.01 \sim 0.1 \times 10^{-16}$ の範囲であり、Torrent法における等級はgoodからnormalとなった。表面の変状が認められないことと合わせて、コンクリート表面は健全な状態を維持していると評価でき、標準のSGコンクリートの長期的な安定性は確保されているものと判断した。

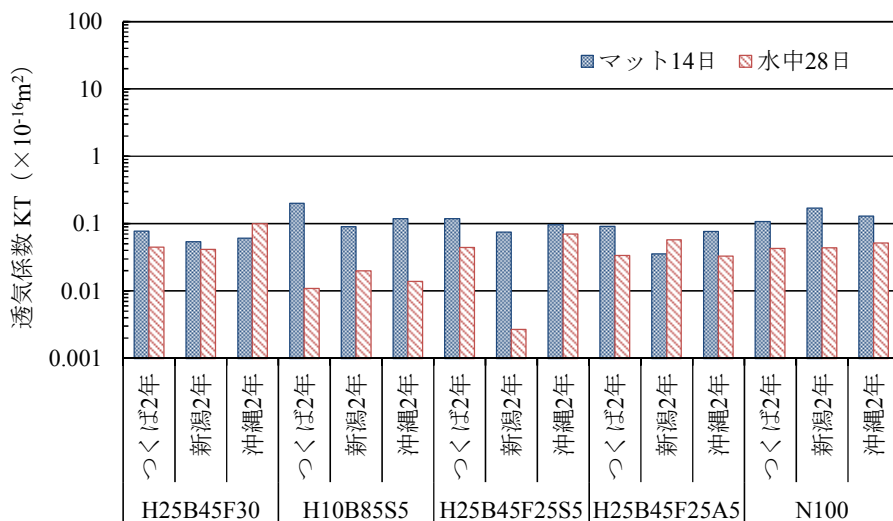


図-15 暴露2年における標準のSGコンクリートの透気係数

5.3 標準ではないSGコンクリートの暴露試験における表面の変状

ここまでの結果は、このマニュアル(案)で標準とするSGコンクリートを用いたものであった。SGコンクリートの長期的安定性について、より安全側の評価を行うために、呼び強度を標準とする24よりも小さくしたSGコンクリートにより、4年間の暴露試験を行い、表面の状況及び透気係数の確認を行った。配合条件を表-6に示す。暴露試験の方法は付録-2に示す標準のSGコンクリートの場合と同一とした。

表-6 暴露試験に使用した水結合材比45%の試験体の配合条件

結合材の構成	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材 最大寸法 (mm)	28日強度 (N/mm ²)
H25B45F30	12±2.5	4.5±1.5	20	23.7
H10B85S5				25.4
H25B45F25S5				24.5
H25B45F25A5				26.4
N100				45.6

暴露後の試験体の状況を図-16及び図-17に示す。呼び強度が24よりも小さいSGコンクリートにおいても、表面のペーストの脱落による骨材の露出及びひび割れなどの変状は生じておらず、健全であった。







H25B45F30 (標準外)		
つくば		
新潟		沖縄
H10B85S5 (標準外)		
つくば		
新潟	沖縄	

図-16 標準に満たない呼び強度の H25B45F30 及び H10B85S5 の暴露 4 年における状況

H25B45F25S5 (標準外)		
つくば		
新潟		沖縄
H25B45F25A5 (標準外)		
つくば		
新潟		沖縄

図一17 標準に満たない呼び強度の H25B45F25S5 及び H25B45F25A5 の暴露 4 年における状況

暴露4年における Torrent 法による透気係数を図-18 に示す。いずれの暴露地点でも透気係数は概ね $0.05 \sim 0.5 \times 10^{-16}$ の範囲であり、Torrent 法によるランクは good から normal となった。表面の変状が認められないこととあわせて、コンクリート表面は健全な状態を維持していると評価でき、強度が標準に満たない呼び強度の SG コンクリートにおいても長期的な安定性は確保されているものと判断した。

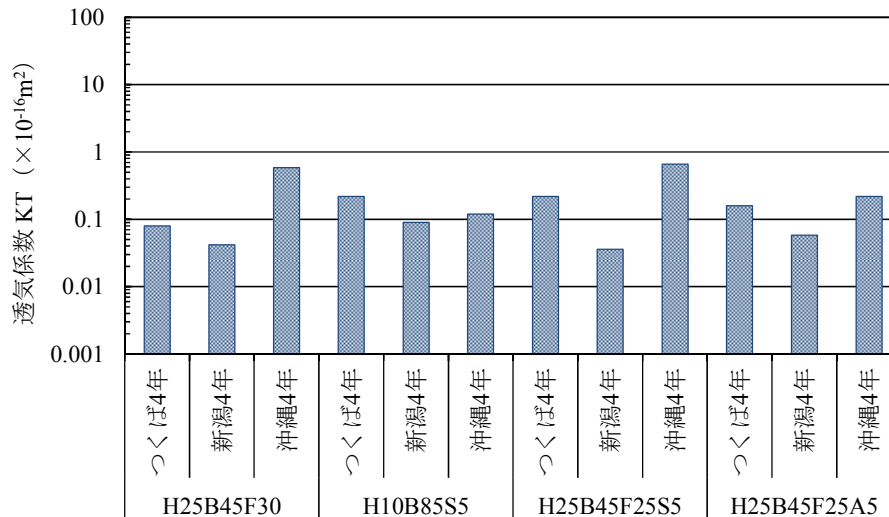


図-18 標準に満たない呼び強度の SG コンクリートの暴露4年における透気係数

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [規準編] 土木学会規準および関連規準，2013
- 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) R.J.Torrent and G.Frenzer: A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of concrete, Proceedings of International Symposium Non-destructive Testing in Civil Engineering, pp.985-992, 1995

付録ー5 スーパーグリーンコンクリートの温度特性及び収縮・膨張特性

1. はじめに

この付録では、標準のSGコンクリートの温度特性及び収縮・膨張特性について示す。また、SGコンクリートに膨張材を添加した場合の収縮ひずみの低減効果について示す。

SGコンクリートは、市販の膨張材を使用して収縮の抑制を行うことができるが、メーカー推奨の標準使用量では膨張率が過大となる恐れがあり、試験により確認した上で使用するのがよい。SGコンクリートのひび割れ抵抗性を検討する場合、ここに示す物性値を用いることができる。

2. 熱膨張係数及び断熱温度上昇特性

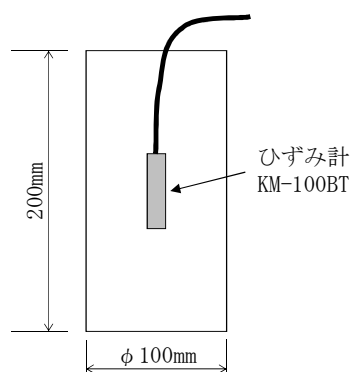
2.1 配合条件

熱膨張係数及び断熱温度上昇特性の検討には、4種類の標準のSGコンクリート及び比較用のコンクリートを用いた。使用材料、結合材の構成及び配合条件等については付録ー1に示した。

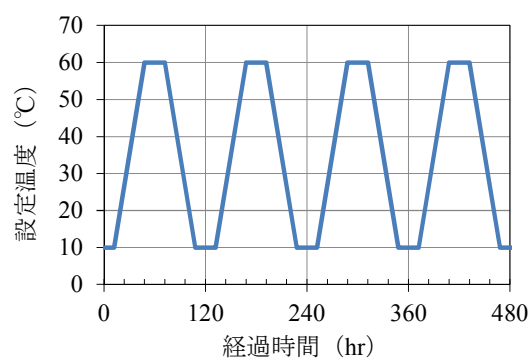
2.2 試験方法

熱膨張係数の測定に用いた試験体は、図ー1に示すφ10cm×20cmの円柱試験体とし、中心に埋込み型ひずみ計を埋設した。材齢3日まで室温20°Cの環境で湿潤養生した後、型枠を外し、20°C環境にて封緘養生を行った。材齢28日経過後に、図ー2に示す温度履歴（10～60°C、4サイクル、温度変化約1.4°C/hr）を与えてひずみを測定した。

断熱温度上昇特性は簡易断熱試験によって求め、図ー3に示す断熱材（厚さ20cm）と型枠で覆った45cm×45cm×45cmのマスブロック内に熱電対を埋設して、コンクリート打込み直後から温度を測定した。断熱温度上昇特性の推定は、ブロック中心温度と外気温の差による熱損失分（放熱温度）を算出して、中心温度に放熱温度を随時加算する方法で推定した。



図ー1 熱膨張係数測定試験体の概要



図ー2 熱膨張係数測定時の温度変化

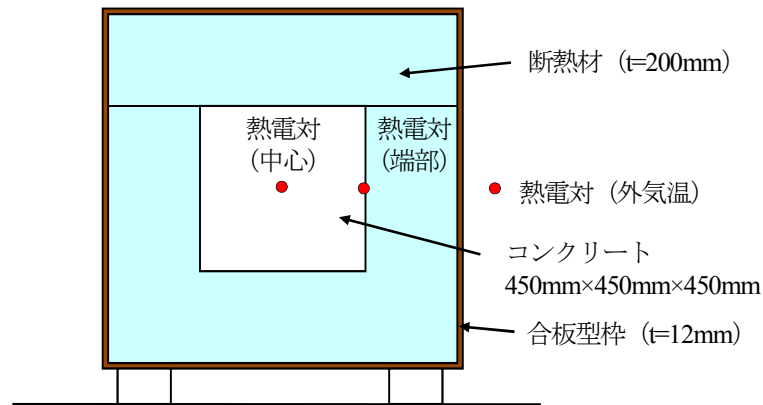


図-3 簡易断熱温度試験の概要図

2.3 熱膨張係数

表-1 に熱膨張係数の試験結果を示す。1 回目の測定で、測定値が乾燥収縮の影響を受け、2 回目の測定前に封緘に用いたビニル袋を覆い直したため、2~4 回目の平均値を示している。SG コンクリートの熱膨張係数は、比較用コンクリート (N100) よりも大きく、 $10\sim 12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であった。一般的に、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの熱膨張係数は、ポルトランドセメントを用いた場合よりも大きく、 $12\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度あることが知られているが、SG コンクリートも高炉セメント B 種を用いたコンクリートと同程度であった。また、シリカフュームを混合した H25B45F25S5 やせっこうを混合した H25B45F25A5 の熱膨張係数は、H25B45F30 よりも小さくなる傾向が認められた。

表-1 標準の SG コンクリートの熱膨張係数

結合材の構成	サイクル	熱伝達係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		
		上昇時	降下時	平均
H25B45F30	2 回目	11.11	11.65	11.6
	3 回目	11.12	12.10	
	4 回目	11.28	12.23	
H10B85S5	2 回目	11.37	11.22	11.5
	3 回目	11.15	11.85	
	4 回目	11.41	11.80	
H25B45F25S5	2 回目	10.04	10.75	10.8
	3 回目	10.36	11.43	
	4 回目	10.60	11.47	
H25B45F25A5	2 回目	9.76	9.74	9.9
	3 回目	9.35	10.34	
	4 回目	9.83	10.53	
N100	2 回目	8.48	8.48	8.4
	3 回目	8.30	8.56	
	4 回目	8.24	8.61	

2.4 断熱温度上昇特性

図-4 に簡易断熱試験の結果と、試験結果をもとに推定した断熱温度上昇特性の推定履歴を示す。また、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」¹⁾に示される断熱温度上昇特性の推定式に回帰し、各係数を求めた。その結果を表-2 に示す。H25B45F30 に対してフライアッシュをシリカフェームまたはせっこうで置換した H25B45F25S5 および H25B45F25A5 は、H25B45F30 よりも終局断熱温度上昇量 Q_{∞} が小さくなった。また、ポルトランドセメントの割合を 10% とした H10B85S5 の終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は、更に小さい 26.6°C で、水和発熱の抑制効果が非常に高いことがわかる。

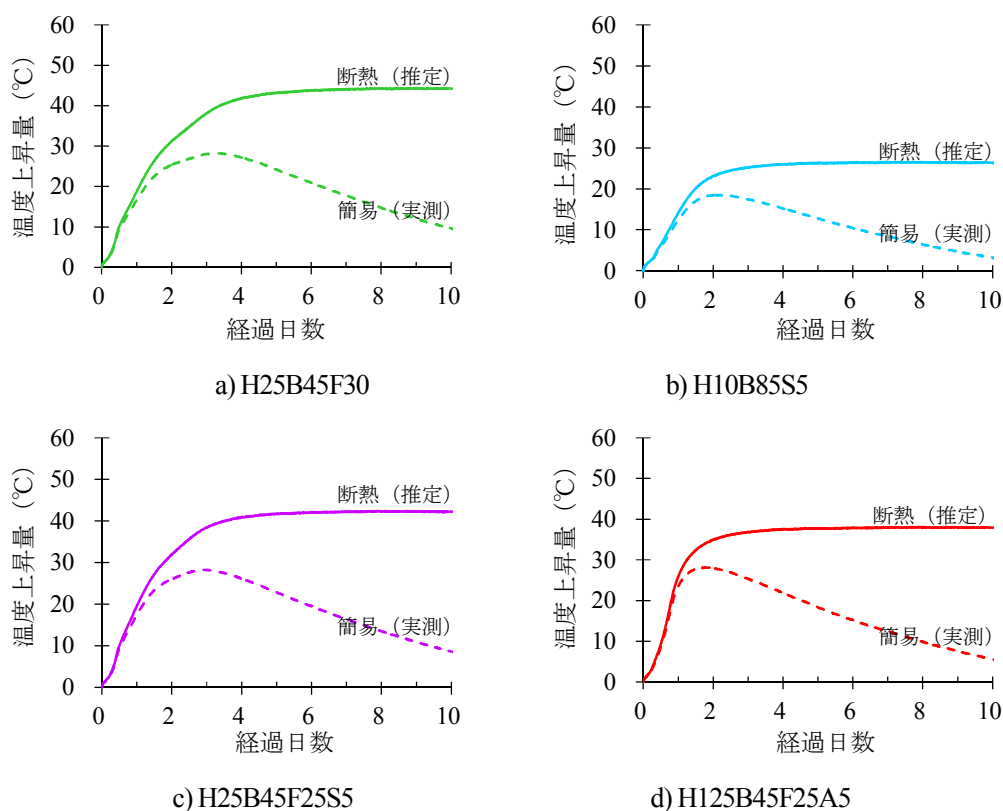


図-4 簡易断熱温度試験による温度履歴及び断熱温度の推定値

表-2 標準の SG コンクリートの断熱温度上昇特性

結合材の構成	$Q(t)=Q_{\infty}[1-\exp\{-r(t-t_{0,Q})^s\}]$			
	Q_{∞}	r	$t_{0,Q}$	s
H25B45F30	44.8	0.636	0.100	1.000
H10B85S5	26.6	0.942	0.116	1.000
H25B45F25S5	42.7	0.734	0.112	1.000
H25B45F25A5	38.0	1.195	0.131	1.000

t : 材齢 (日), $Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (°C), Q_{∞} : 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), s : 断熱温度上昇特性に関する係数

3. 収縮特性

3.1 配合条件

収縮特性として自己収縮に関する試験を実施した。試験には4種類の標準のSGコンクリート及び比較用のコンクリートを用いた。使用材料、結合材の構成及び配合条件等は付録-1に示した。

3.2 試験方法

自己収縮試験は、養生温度20°Cの環境と簡易断熱の環境で行い、このときに発生した収縮ひずみの評価を行った。養生温度20°Cの環境における試験は、超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅱ)²⁾を参考にした試験を実施した。10×10×40cmの角柱試験体内にひずみ計を埋め込み、各配合3体の試験体を作製後、水分の逸散のないように密封し、室温20°Cの室内に静置して約1ヶ月間、コンクリートのひずみと温度を測定した。簡易断熱温度環境下における試験は、図-3に示した簡易断熱試験を実施する際に、内部にひずみ計を埋設してひずみの測定を行った。

3.3 自己収縮試験の試験結果

図-5及び図-6に、自己収縮ひずみの試験結果を示す。図は膨張をプラス、収縮をマイナスで示した。自己収縮ひずみは、温度及び表-1に示す熱膨張係数による補正を行ったものである。

SGコンクリートの自己収縮ひずみは配合により異なる傾向を示し、20°C環境下におけるH25B45F30及びH25B45F25S5の自己収縮ひずみは、一般的なコンクリートと同様に打込み後数日で収束し、 80×10^{-6} 程度となった。しかし、H10B85S5の自己収縮ひずみの収束期間は遅れる傾向にあり、20°C環境下では材齢30日で 250×10^{-6} に達した。一方、せっこうを混合したH25B45F25A5は初期の膨張が現れ、20°C環境下では材齢30日においても 30×10^{-6} の膨張ひずみが残存した。

また、簡易断熱温度環境下の自己収縮ひずみは、20°C環境下に較べて自己収縮ひずみが大きくなる傾向を示した。特に、H10B85S5は自己収縮ひずみが単調に増加し、材齢30日には 300×10^{-6} に達した。

更に、得られた試験データをもとに、簡易断熱温度環境下における自己収縮ひずみの定式化を行った。結果を表-3に示す。また、図-6には定式化による推定値を図示した。H25B45F30、H10B85S5及びH25B45F25S5は、収縮成分のみの推定式で、H25B45F25A5は収縮成分と膨張成分を重ね合わせた推定式で定式化が可能となった。

以上より、SGコンクリートをマスコンクリートに適用し、温度ひび割れ抵抗性の検討を行う場合には、自己収縮ひずみの温度依存性を考慮する必要があることが明らかとなった。また、温度ひび割れ抵抗性を向上させたい場合には、せっこうの使用を検討するとよい。

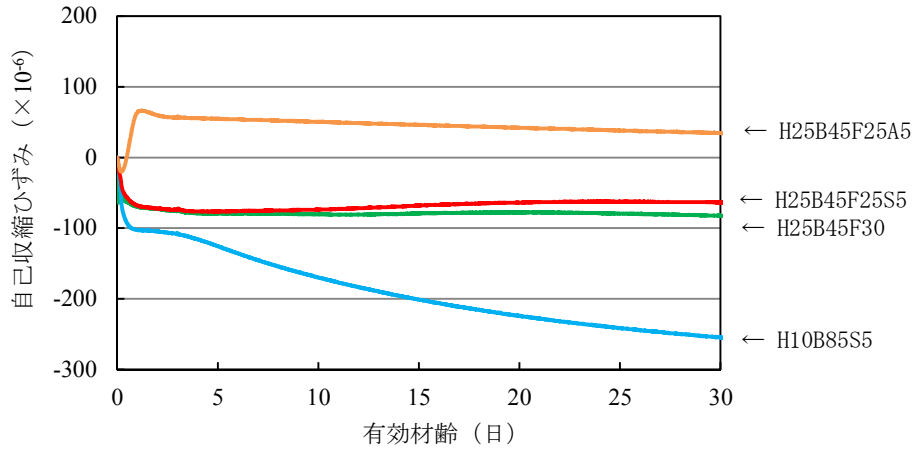


図-5 標準の SG コンクリートの自己収縮特性 (20°C養生時)

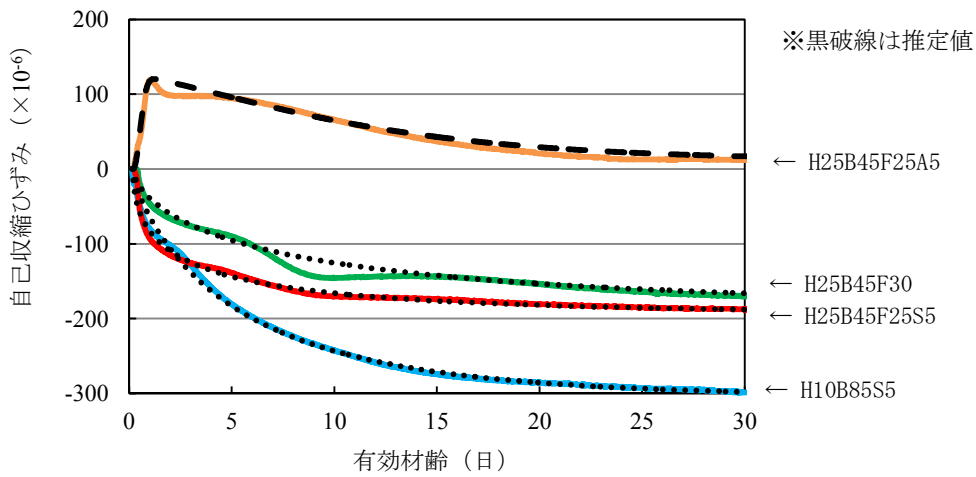


図-6 標準の SG コンクリートの自己収縮特性 (簡易断熱養生時)

表-3 標準の SG コンクリートの自己収縮ひずみの推定式

結合材の構成	収縮成分の推定式 $\epsilon_{sh}(t) = \epsilon_{sh\infty} [1 - \exp\{-a_{sh}(t-t_0)^{b_{sh}}\}]$			膨張成分の推定式 $\epsilon_{ex}(t) = \epsilon_{ex\infty} [1 - \exp\{-a_{ex}(t-t_0)^{b_{ex}}\}]$		
	ϵ_{∞}	a_{sh}	b_{sh}	$\epsilon_{ex\infty}$	a_{ex}	b_{ex}
H25B45F30	190	0.28	0.61	—	—	—
H25B45F25S5	203	0.64	0.48	—	—	—
H25B45F25A5	112	0.04	1.31	125	5.18	2.19
H10B85S5	305	0.26	0.79	—	—	—

t : 有効材齢 (日), $\epsilon_{sh}(t)$: 有効材齢 t 日までの自己収縮ひずみの収縮成分 ($\times 10^{-6}$),
 $\epsilon_{sh\infty}$: 自己収縮ひずみの収縮成分の終局値 ($\times 10^{-6}$), t_0 : 凝結の始発 (有効材齢 (日)),
 a_{sh} 及び b_{sh} : 自己収縮ひずみの収縮成分の係数, $\epsilon_{ex}(t)$: 有効材齢 t 日までの自己収縮ひずみの膨張成分 ($\times 10^{-6}$),
 $\epsilon_{ex\infty}$: 自己収縮ひずみの膨張成分の終局値 ($\times 10^{-6}$), a_{ex} 及び b_{ex} : 自己収縮ひずみの膨張成分の係数

4. 膨張材の収縮低減効果

4.1 配合条件

膨張材の収縮低減効果に関する試験は、標準の SG コンクリートのうち、H25B45F30 を用いて実施した。使用した材料及び配合を表-4 に示す。膨張材の使用量を標準使用量の 20kg/m^3 とした配合と、標準使用量の半分 (10kg/m^3) とした配合で膨張材の添加効果を比較した。膨張材は、ポルトランドセメントではなく、結合材全体の質量に対して置換した。

表-4 膨張材の収縮低減効果の検討に使用した材料

材料	記号	仕様
早強ポルトランドセメント	H	JIS R 5210, 密度 3.14g/cm^3 , 比表面積 $4490\text{cm}^2/\text{g}$,
高炉スラグ微粉末 4000	B	JIS A 6206, ブレーン値 $4360\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 2.89g/cm^3 , せっこう添加
フライアッシュ II 種	F	JIS A 6201, 密度 2.29g/cm^3 , 比表面積 $3830\text{cm}^2/\text{g}$
膨張材	HE	JIS A 6202, 密度 3.15g/cm^3 , 石灰系膨張材
細骨材	S	JIS A 5005, 茨城県神栖産, 表乾密度 2.61g/cm^3 , 吸水率 1.88%, 粗粒率: 2.70
粗骨材	G	JIS A 5005, 茨城県岩瀬産, 表乾密度 2.64g/cm^3 , 吸水率 0.65%
AE 減水剤遅延形	Ad1	JIS A 6204, 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
AE 剤 (フライアッシュ用)	Ad2	JIS A 6204, 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

4.2 試験方法

測定項目は、自己収縮量及び圧縮強度とした。自己収縮試験は、この付録の 3.2 に示す試験方法と同様とした。測定した結果を、H25B45F30 (膨張材無添加) の熱膨張係数 ($11.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) で補正して、収縮量を求めた。圧縮強度用の試験体は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の型枠に成型し、3 日で脱型後、水中養生を施した。

4.3 膨張材の収縮低減効果

H25B45F30 に膨張材を $0, 10, 20\text{kg/m}^3$ 使用した SG コンクリートの自己収縮ひずみの測定結果を図-7 に、これらのコンクリートの水中養生下における圧縮強度の測定結果を図-8 に示す。

膨張材を添加しない場合、材齢 28 日までの自己収縮ひずみは 130×10^{-6} 程度であった。これは決して大きな収縮ではないが、SG コンクリートの使用にあたっては、自己収縮量に温度依存性があり、断熱養生下では自己収縮ひずみが $20 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度大きくなる傾向があることに留意が必要である (3.3 参照)。また、膨張材を標準使用量である 20kg/m^3 添加すると、 800×10^{-6} を超える膨張ひずみが発生し、これは明らかに過剰な膨張量であり、膨張材の使用にあたっては留意が必要である。使用量を 10kg/m^3 とすれば膨張ひずみは 170×10^{-6} となり、土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]」³⁾ に示される収縮補償用コンクリートの膨張率の標準 ($150 \times 10^{-6} \sim 250 \times 10^{-6}$) の範囲とすることができた。

圧縮強度は、膨張材を結合材に置換したため、膨張材の使用により若干高くなる傾向となった。また、大

きな膨張を示した膨張材の添加量 20 kg/m^3 でも圧縮強度の低下は見られなかった。

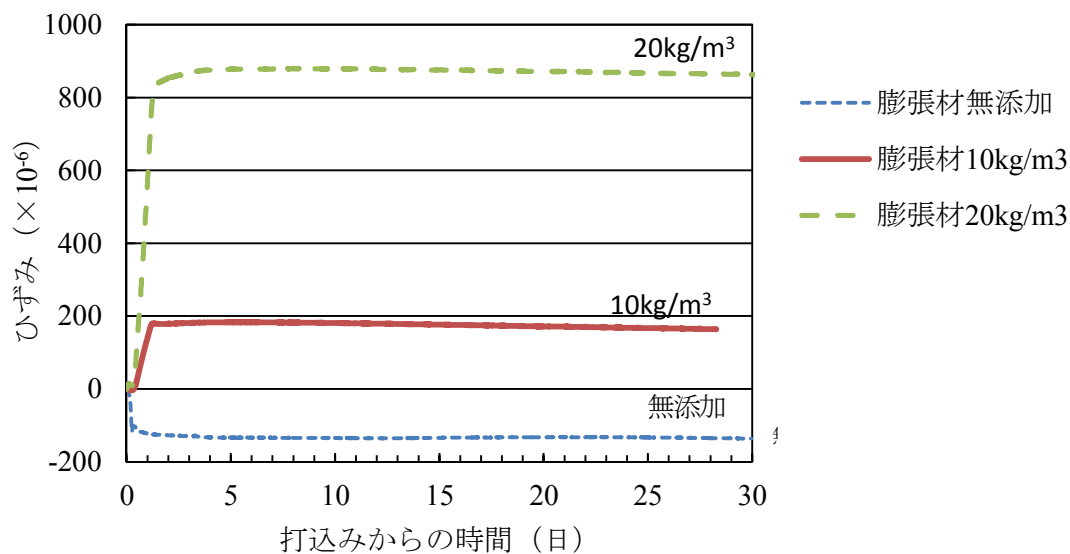


図-7 膨張材の添加量と自己収縮ひずみ（膨張ひずみ）の関係

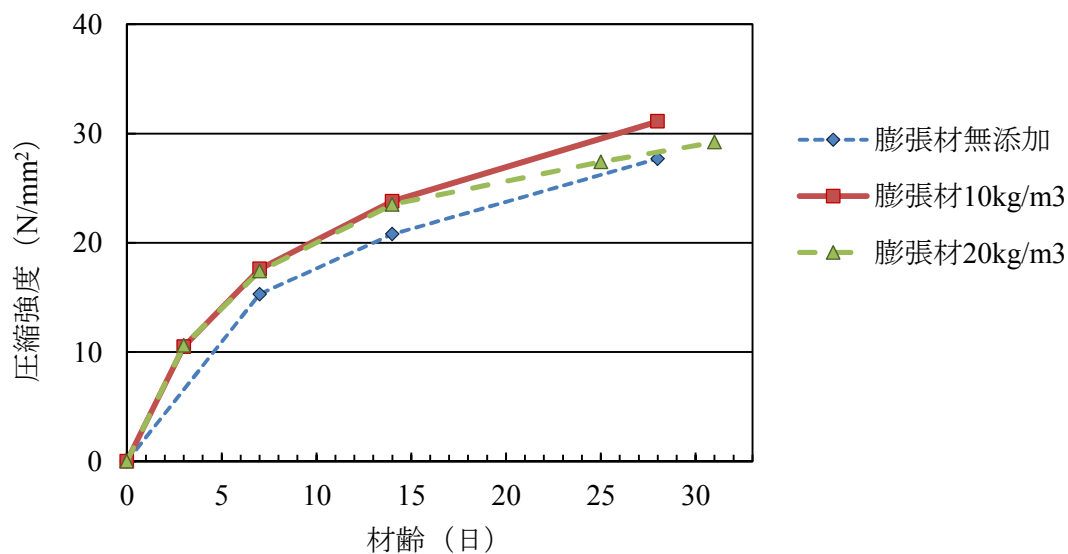


図-8 膨張材の添加量と圧縮強度の関係

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008
- 2) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書（Ⅱ），pp.209-210, 1994
- 3) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，2013

付録ー6 スーパーグリーンコンクリートの温度ひび割れ抵抗性

1. はじめに

この付録では、標準のSGコンクリートの温度ひび割れ抵抗性について示す。SGコンクリートは、結合材に占めるポルトランドセメントの割合が30%以下であり、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材の割合が70%以上のコンクリートであるため、従来のコンクリートと比較して水和発熱による温度上昇量が低減され、温度ひび割れ抑制の効果を期待できる。そのため、マスコンクリートへの適用が想定され、SGコンクリートの強度特性、熱特性及び断熱温度上昇の実験結果に基づいて、3次元有限要素法による温度応力解析を実施し、温度ひび割れ抵抗性の検討を行った。

2. 温度ひび割れ抵抗性の検討概要

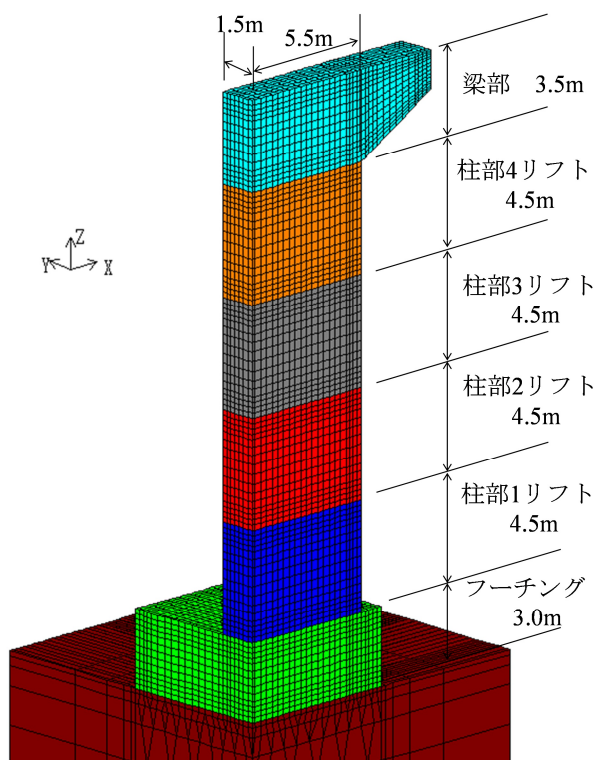
2.1 温度ひび割れ抵抗性の評価方法

温度応力解析は、温度応力解析プログラム ASTEA-MACS Ver.8 を用い、土木学会「2012年制定コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕」¹⁾の「6編 温度ひび割れに対する照査」、及び、JCI「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」²⁾に示される方法に準拠し、ひび割れ指数 I_{cr} によって評価を行った。

2.2 解析モデル

温度ひび割れには、コンクリート表面と内部との温度差に起因する内部拘束型の温度ひび割れと、コンクリートが温度降下する際に地盤や既設コンクリートによって収縮が拘束される外部拘束型の温度ひび割れがある。解析モデルは両者のひび割れ形態を評価可能なモデルとして、橋梁下部構造を選定した。解析モデル図を図ー1に示す。フーチングは13.0m×12.0m×高さ3.0m、脚部は幅3.0m×長さ11.0m×高さ21.5mの対称形とし、1/4断面をモデル化した。

コンクリートの施工リフトは全6回とし、柱部は各リフトの高さを4.5mとした。リフト間のコンクリート打込み間隔は28日に統一した。



図ー1 解析モデル図

2.3 検討ケース

以下の2シリーズに分けて温度ひび割れ抵抗性の検討を実施した。

シリーズI

SG コンクリートと JIS のセメントを用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性の比較検討

シリーズII

SG コンクリートの養生方法を変化させた場合の温度ひび割れ抑制効果の確認

シリーズIの検討ケースを表-1に示す。シリーズIでは、標準のSGコンクリートを4ケース、JISのセメントを用いたコンクリート（比較ケース）を4ケースとした。標準のSGコンクリートは呼び強度を24とした配合で、比較ケースの水セメント比は橋脚の耐久性を満足する上限値55%、かつ、呼び強度24を満足する水セメント比とした。

一方、シリーズIIは、シリーズIの温度ひび割れ抵抗性が最も高かったH25B45F25A5を対象に、材齢14日まで保温養生を実施することによる効果を検討したもので、型枠面と仕上げ面の熱伝達係数を変化させた。

表-1 検討ケース

結合材の構成	粉体（質量%）								
	セメント					混和材			
	N	BB	M	L	H	B	F	S	A
H25B45F30	-	-	-	-	25	45	30	-	-
H10B85S5	-	-	-	-	10	85	-	5	-
H25B45F25S5	-	-	-	-	25	45	25	5	-
H25B45F25A5	-	-	-	-	25	45	25	-	5
N	100	-	-	-	-	-	-	-	-
BB	-	100	-	-	-	-	-	-	-
M	-	-	100	-	-	-	-	-	-
L	-	-	-	100	-	-	-	-	-

2.4 温度解析条件

各ケースの断熱温度上昇特性を表-2に示す。SGコンクリートの断熱温度上昇特性は、簡易断熱試験から得られた断熱温度上昇式を用いた。比較ケースのN, BB, M, Lの断熱温度上昇特性は、JCI「マスコンクリートのひび割れ制御指針2008」に従い、打込み温度20°Cにおける断熱温度上昇式を算定した。

表-3に、コンクリート及び地盤の熱物性値を示す。各ケースで同条件とした。

表-4及び図-2に温度境界条件を示す。シリーズIでの熱伝達係数は全ケースで同一とし、型枠面の熱伝達係数は材齢7日まで8W/m²C、以降14W/m²Cとした。シリーズIIでは、保温養生の効果を確認するため、H25B45F25A5の型枠面と仕上げ面の熱伝達係数を材齢7日または14日まで6W/m²Cとした。なお、外気温は解析期間中20°C一定とし、コンクリートの打込み温度は20°Cとした。

表-2 各ケースの断熱温度上昇特性

結合材の構成	$Q(t)=Q_{\infty}[1-\exp\{-r(t-t_{0,Q})^s\}]$			
	Q_{∞}	r	$t_{0,Q}$	s
H25B45F30	44.8	0.636	0.100	1.000
H10B85S5	26.6	0.942	0.116	1.000
H25B45F25S5	42.7	0.734	0.112	1.000
H25B45F25A5	38.0	1.195	0.131	1.000
N	50.3	1.250	0.171	1.000
BB	51.3	0.809	0.075	1.000
M	43.9	0.657	0.338	1.000
L	40.9	0.637	0.308	0.545

t : 材齢 (日), $Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (°C), Q_{∞} : 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), s : 断熱温度上昇特性に関する係数

表-3 熱物性値

項目	コンクリート	地盤
比熱	1.15 J/g°C	0.79 J/g°C
熱伝導率	2.7 W/m°C	3.45 W/m°C

表-4 温度境界条件

部位	境界面	境界条件	熱伝達係数	
			シリーズ I	シリーズ II
地盤	対象面・側面	断熱境界	—	—
	上面	対流境界	14W/m ² °C	14W/m ² °C
橋脚部	対象面	断熱境界	—	—
	型枠面	対流境界	材齢 7 日まで 8W/m ² °C 以降 14W/m ² °C	<ul style="list-style-type: none"> • H25B45F25A5 材齢 7 日まで 8W/m²°C 以降 14W/m²°C • H25B45F25A5(λ 6-7d) 材齢 7 日まで 6W/m²°C 以降 14W/m²°C • H25B45F25A5(λ 6-14d) 材齢 14 日まで 6W/m²°C 以降 14W/m²°C
	仕上げ面	対流境界	14W/m ² °C	<ul style="list-style-type: none"> • H25B45F25A5 14W/m²°C • H25B45F25A5(λ 6-7d) 材齢 7 日まで 6W/m²°C 以降 14W/m²°C • H25B45F25A5(λ 6-14d) 材齢 14 日まで 6W/m²°C 以降 14W/m²°C

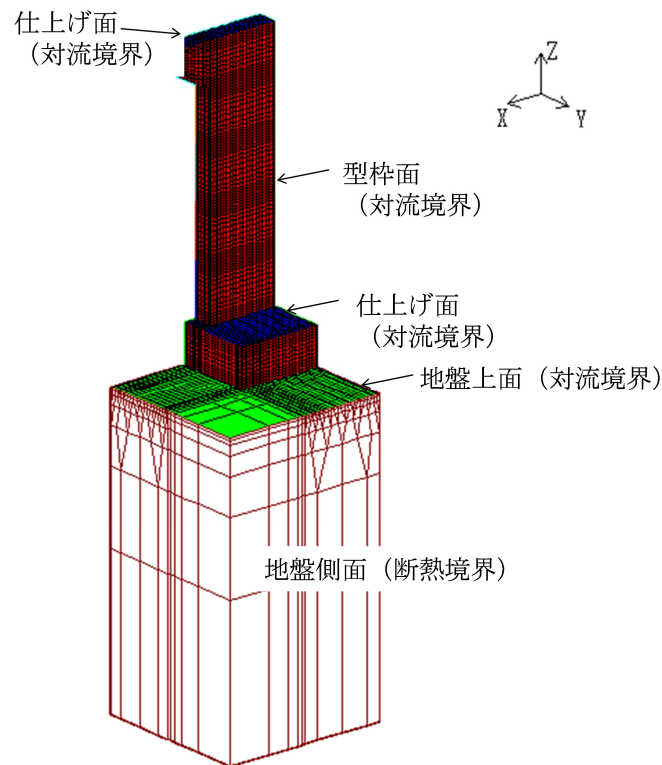


図-2 温度境界面

2.5 応力解析条件

SG コンクリートの圧縮強度を図-3 に示す。圧縮強度は試験結果に基づいて定め、材齢 182 日以降は一定とした。また、引張強度及びヤング係数は、土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編:標準]」の「6 編 温度ひび割れに対する照査」に示される推定式を用いて算出した。比較の JIS セメントを用いたケースの強度特性は、土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編:標準]」の「6 編 温度ひび割れに対する照査」に従い設定した。ポアソン比は、コンクリートが 0.2、地盤は 0.25 とし、地盤のヤング係数は 3000N/mm^2 とした。

SG コンクリートの熱膨張係数は、表-5 に示す試験で得られた値を用いた。JIS のセメントを用いたケースは、N, M, L は $10 \times 10^{-6}/\text{C}$ とし、BB は $12 \times 10^{-6}/\text{C}$ とした。地盤の熱膨張係数は $10 \times 10^{-6}/\text{C}$ とした。

表-6 に SG コンクリートの自己収縮の推定式を示す。推定式は、簡易断熱温度試験時に測定したひずみであり、水和発熱による温度履歴を考慮したものとなっている。H25B45F25A はせっこうによる膨張ひずみが生じており、自己収縮の推定式は、収縮成分を考慮した推定式と膨張成分を考慮した推定式を重ね合わせることで考慮した (付録-5 参照)。

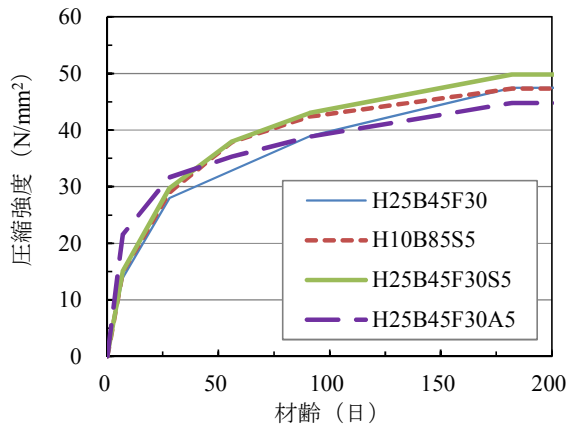


図-3 SG コンクリートの圧縮強度

表-5 SG コンクリートの熱膨張係数

ケース名	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}$)
H25B45F30	11.6
H10B85S5	11.5
H25B45F25S5	10.8
H25B45F25A5	9.9
N, M, L	10.0
BB	12.0

表-6 SG コンクリートの自己収縮ひずみの推定式

結合材の構成	収縮成分の推定式 $\varepsilon_{sh}(t) = \varepsilon_{sh\infty} [1 - \exp\{-a_{sh}(t-t_0)^{b_{sh}}\}]$			膨張成分の推定式 $\varepsilon_{ex}(t) = \varepsilon_{ex\infty} [1 - \exp\{-a_{ex}(t-t_0)^{b_{ex}}\}]$		
	$\varepsilon_{sh\infty}$	a_{sh}	b_{sh}	$\varepsilon_{ex\infty}$	a_{ex}	b_{ex}
H25B45F30	190	0.28	0.61	—	—	—
H25B45F25S5	203	0.64	0.48	—	—	—
H25B45F25A5	112	0.04	1.31	125	5.18	2.19
H10B85S5	305	0.26	0.79	—	—	—

t : 有効材齢 (日), $\varepsilon_{sh}(t)$: 有効材齢 t 日までの自己収縮ひずみの収縮成分 ($\times 10^{-6}$),

$\varepsilon_{sh\infty}$: 自己収縮ひずみの収縮成分の終局値 ($\times 10^{-6}$), t_0 : 凝結の始発 (有効材齢 (日)),

a_{sh} 及び b_{sh} : 自己収縮ひずみの収縮成分の係数, $\varepsilon_{ex}(t)$: 材齢 t 日までの自己収縮ひずみの膨張成分 ($\times 10^{-6}$),

$\varepsilon_{ex\infty}$: 自己収縮ひずみの膨張成分の終局値 ($\times 10^{-6}$), a_{ex} 及び b_{ex} : 自己収縮ひずみの膨張成分の係数

3. 温度ひび割れ抵抗性の検討結果

3.1 SG コンクリートの温度ひび割れ抑制効果 (シリーズ I)

シリーズ I の温度応力解析は、標準の SG コンクリートと JIS のセメントを用いたコンクリートについて実施し、それぞれの温度ひび割れ抵抗性について比較した。比較にあたっては、図-4 に示す位置のコンクリートの最高温度と最小ひび割れ指数に着目し、最小ひび割れ指数はコンクリート表面部で内部拘束型の温度ひび割れに、構造物内部で外部拘束型のひび割れに着目した。

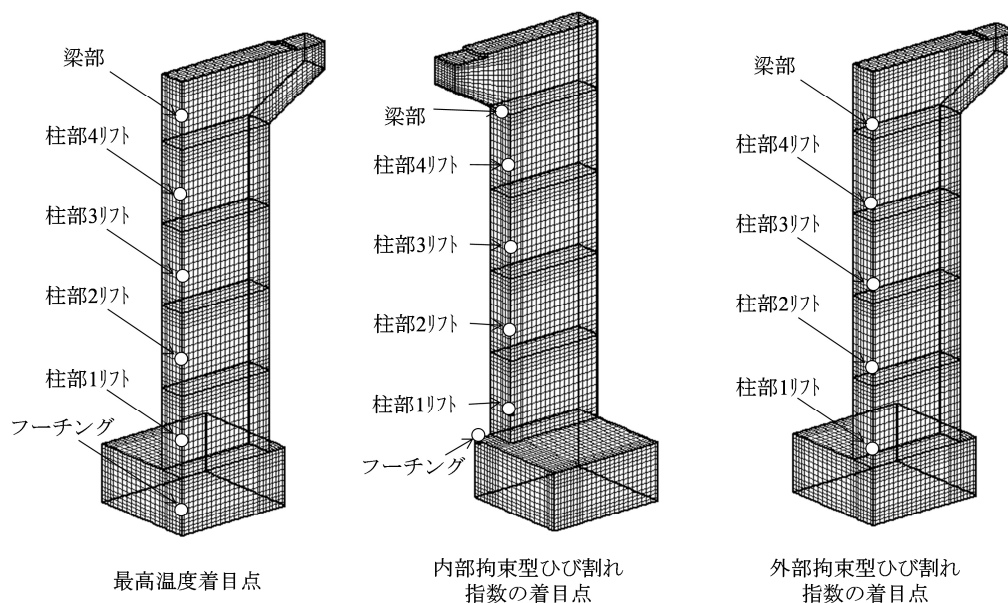


図-4 解析結果の着目点

表-7, 図-5 及び図-6 にコンクリートの最高温度の結果を示す。結合材中の早強ポルトランドセメントの割合が 25%の SG コンクリートのフーチングのコンクリート最高温度は, 56°C~60°Cとなり, 普通ポルトランドセメント及び高炉セメント B 種のコンクリート温度よりも低く, 中庸熱ポルトランドセメントと同程度となった。同様に, 結合材中の早強ポルトランドセメントの割合が 10%の SG コンクリートの最高温度は, 45°Cで低熱ポルトランドセメントよりも 5°C程度低くなった。この傾向は, 柱部と梁部においても同様に, SG コンクリートの水和発熱の抑制効果が高いことが確認された。

表-7 各リフトの最高温度の比較

結合材の構成	コンクリート最高温度(°C)					
	フーチング	柱部 1リフト	柱部 2リフト	柱部 3リフト	柱部 4リフト	梁部
H25B45F30	60.1 (4.7)	60.3 (4.7)	60.3 (4.7)	60.3 (4.7)	60.3 (4.7)	59.6 (4.7)
H10B85S5	44.9 (3.7)	45.1 (3.7)	45.1 (3.7)	45.1 (3.7)	45.1 (3.7)	44.9 (3.7)
H25B45F25S5	58.9 (4.7)	59.1 (4.7)	59.1 (4.7)	59.1 (4.7)	59.1 (4.7)	58.7 (4.0)
H25B45F25A5	56.3 (3.3)	56.5 (3.3)	56.5 (3.3)	56.5 (3.3)	56.5 (3.3)	56.4 (3.3)
N	68.3 (3.3)	68.6 (3.3)	68.5 (3.3)	68.5 (3.3)	68.5 (3.3)	68.3 (3.3)
BB	67.3 (4.7)	67.5 (4.0)	67.5 (4.0)	67.5 (4.0)	67.5 (4.0)	67.1 (4.0)
M	59.4 (4.7)	59.6 (4.7)	59.6 (4.7)	59.6 (4.7)	59.6 (4.7)	59.1 (4.7)
L	49.8 (6.0)	49.6 (5.3)	49.6 (5.3)	49.6 (5.3)	49.6 (5.3)	48.9 (4.7)

() 内は, 最高温度到達時の材齢 (日) を示す。

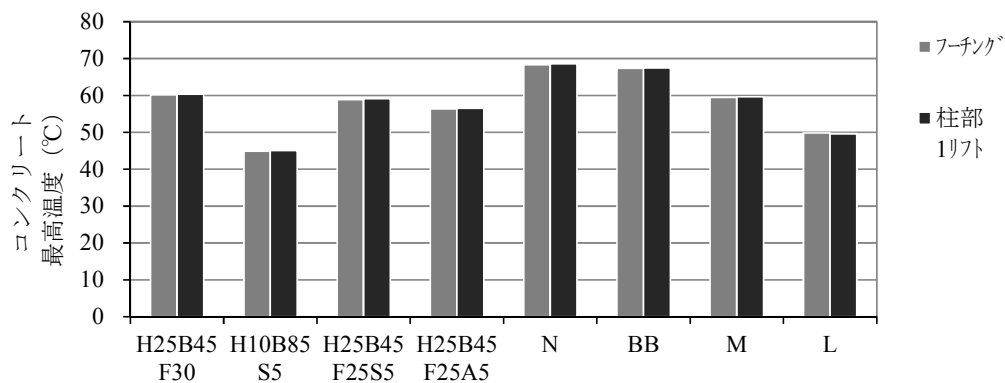


図-5 コンクリート最高温度 (フーチング及び柱部1リフト)

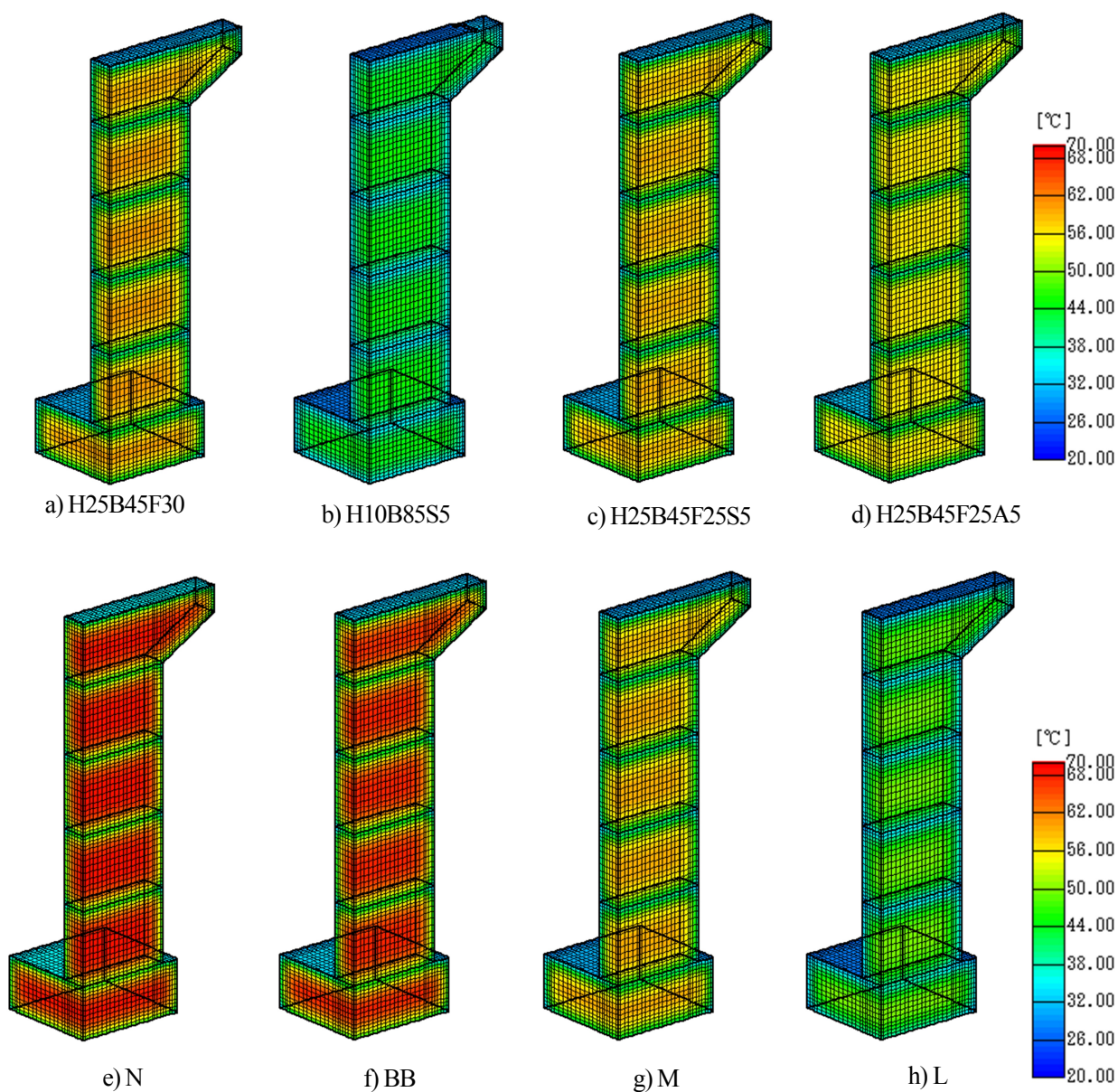


図-6 コンクリートの最高温度分布図

表-8 及び図-7～図-10 に、ひび割れ指数の結果を示す。

まず、コンクリート表面の内部拘束型の温度ひび割れに着目する。H25B45F30 の内部拘束型のひび割れ指数は、フーチングで0.60、柱部1リフトで0.69 となり、JIS のセメントと比べるといずれのセメントよりもひび割れ指数が小さくなり、内部拘束型のひび割れが発生する可能性が高い結果となった。これは、コンクリートの水和発熱が抑制されるものの、初期強度の発現が鈍いためと考えられる。しかし、せっこうを混合した H25B45F25A5 の内部拘束型のひび割れ指数は、フーチングで0.96、柱部1リフトで0.88 となり、ひび割れ指数が大幅に改善された。これは、せっこうを混合することで初期強度の発現が大きくなったためと考えられる。また、結合材中の早強ポルトランドセメントの割合を10%とした H10B85S5 は、内部拘束型のひび割れ指数が、フーチングで1.16、柱部1リフトで1.49 となり、低熱ポルトランドセメントよりもひび割れ抑制効果が大きいことがわかった。したがって、内部拘束型の温度ひび割れの発生が懸念される場合には、早強ポルトランドセメントの割合を10%とした H10B85S5 や、せっこうを使用した H25B45F25 A5 の適用を検討するとよい。

次に、外部拘束型の温度ひび割れに着目する。H25B45F30 の外部拘束型のひび割れ指数は、柱部1リフトで0.90 となり、普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種を用いたコンクリートよりもひび割れ抵抗性が高いことがわかった。更に、結合材中の早強ポルトランドセメントの割合を10%とした H10B85S5、シリカフェームを使用した H25B45F25S5 を適用することで、柱部1リフトのひび割れ指数はそれぞれ1.02 及び1.03 となり、中庸熱ポルトランドセメントと同程度の温度ひび割れ抵抗性に向上した。また、せっこうを添加した H25B45F25A5 の柱部1リフトのひび割れ指数は1.38 まで向上し、高い温度ひび割れ抵抗性を示した。

表-8 各リフトの最小ひび割れ指数の比較

結合材の構成	ひび割れ指数										
	内部拘束型ひび割れ						外部拘束型ひび割れ				
	フーチング*	柱部 1リフト	柱部 2リフト	柱部 3リフト	柱部 4リフト	梁部	柱部 1リフト	柱部 2リフト	柱部 3リフト	柱部 4リフト	梁部
H25B45F30	0.60 (3.7)	0.69 (3.3)	0.64 (3.0)	0.63 (3.0)	0.63 (3.0)	0.61 (3.0)	0.90 (35)	0.87 (36)	0.86 (36)	0.86 (36)	0.89 (48)
H10B85S5	1.16 (2.3)	1.49 (2.0)	1.39 (2.0)	1.38 (2.0)	1.38 (2.0)	1.48 (2.3)	1.02 (31)	0.99 (31)	0.99 (31)	0.99 (31)	1.00 (43)
H25B45F25S5	0.67 (3.7)	0.80 (3.0)	0.74 (3.0)	0.73 (3.0)	0.73 (3.0)	0.72 (3.0)	1.03 (35)	1.00 (36)	0.98 (36)	0.99 (37)	1.02 (48)
H25B45F25A5	0.96 (2.3)	0.88 (2.0)	0.80 (2.0)	0.79 (2.0)	0.79 (2.0)	0.66 (1.8)	1.38 (33)	1.32 (36)	1.30 (36)	1.30 (36)	1.36 (53)
N	0.90 (2.3)	0.96 (1.8)	0.88 (2.0)	0.88 (2.0)	0.88 (2.0)	0.83 (1.8)	0.83 (35)	0.79 (37)	0.78 (37)	0.78 (37)	0.77 (74)
BB	0.75 (3.0)	0.82 (2.7)	0.75 (2.7)	0.75 (2.7)	0.75 (2.7)	0.68 (2.7)	0.72 (36)	0.7 (37)	0.69 (37)	0.69 (39)	0.69 (64)
M	0.91 (3.3)	0.93 (2.7)	0.86 (2.7)	0.85 (2.7)	0.85 (2.7)	0.77 (3.0)	1.02 (36)	1.02 (37)	1.01 (37)	1.01 (39)	1.03 (53)
L	0.97 (3.0)	1.04 (2.3)	0.95 (2.3)	0.94 (2.3)	0.94 (2.3)	0.85 (2.7)	1.57 (40)	1.53 (40)	1.50 (41)	1.50 (41)	1.52 (53)

() 内は、当該指数時の材齢 (日) を示す。

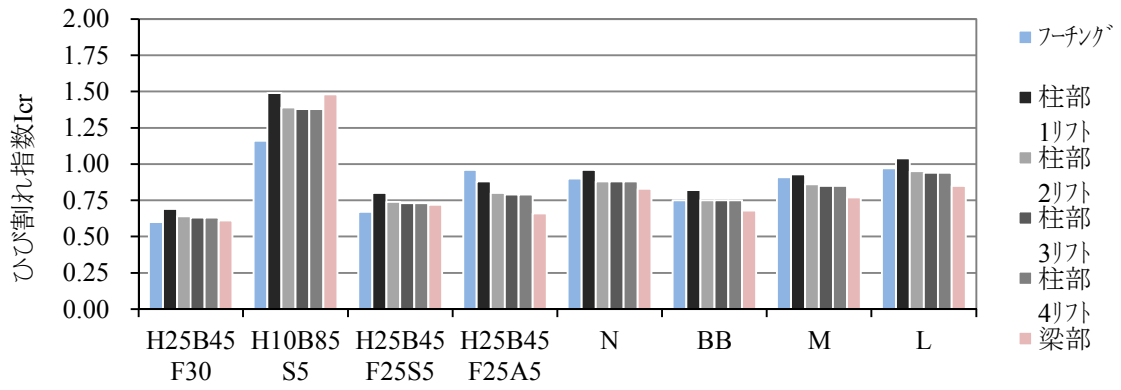


図-7 結合材の違いによる内部拘束型のひび割れ指数の比較

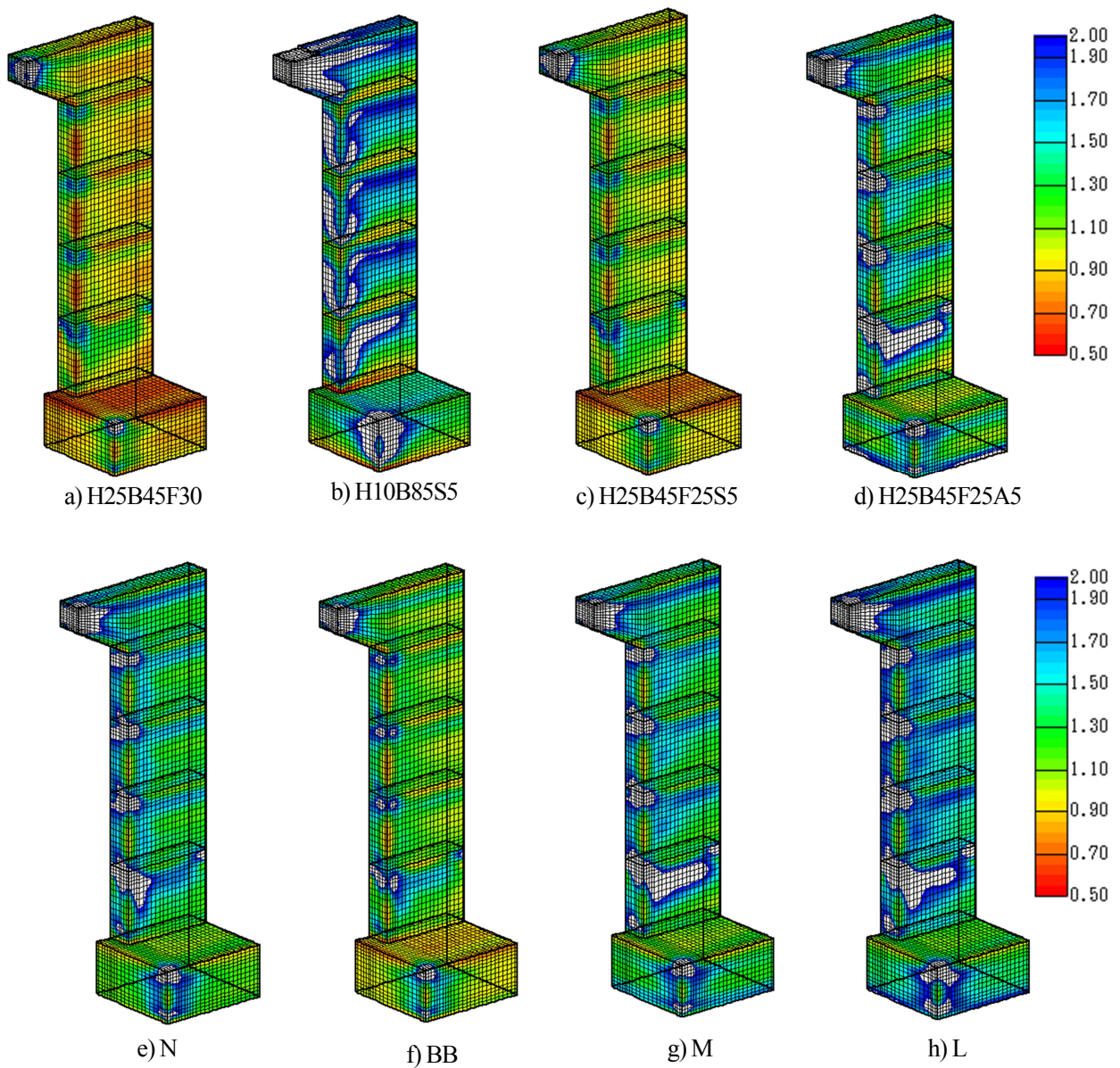


図-8 コンクリート表面の最小ひび割れ指数分布図 (内部拘束型に着目)

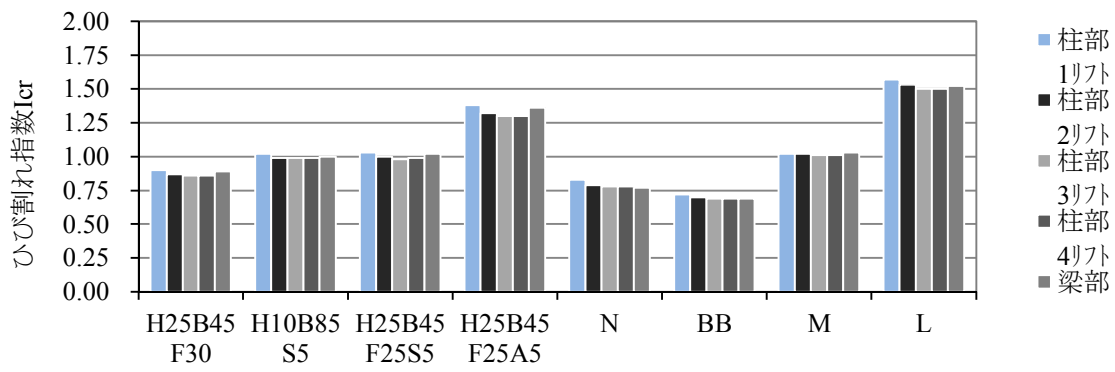


図-9 結合材の違いによる外部拘束型のひび割れ指数の比較

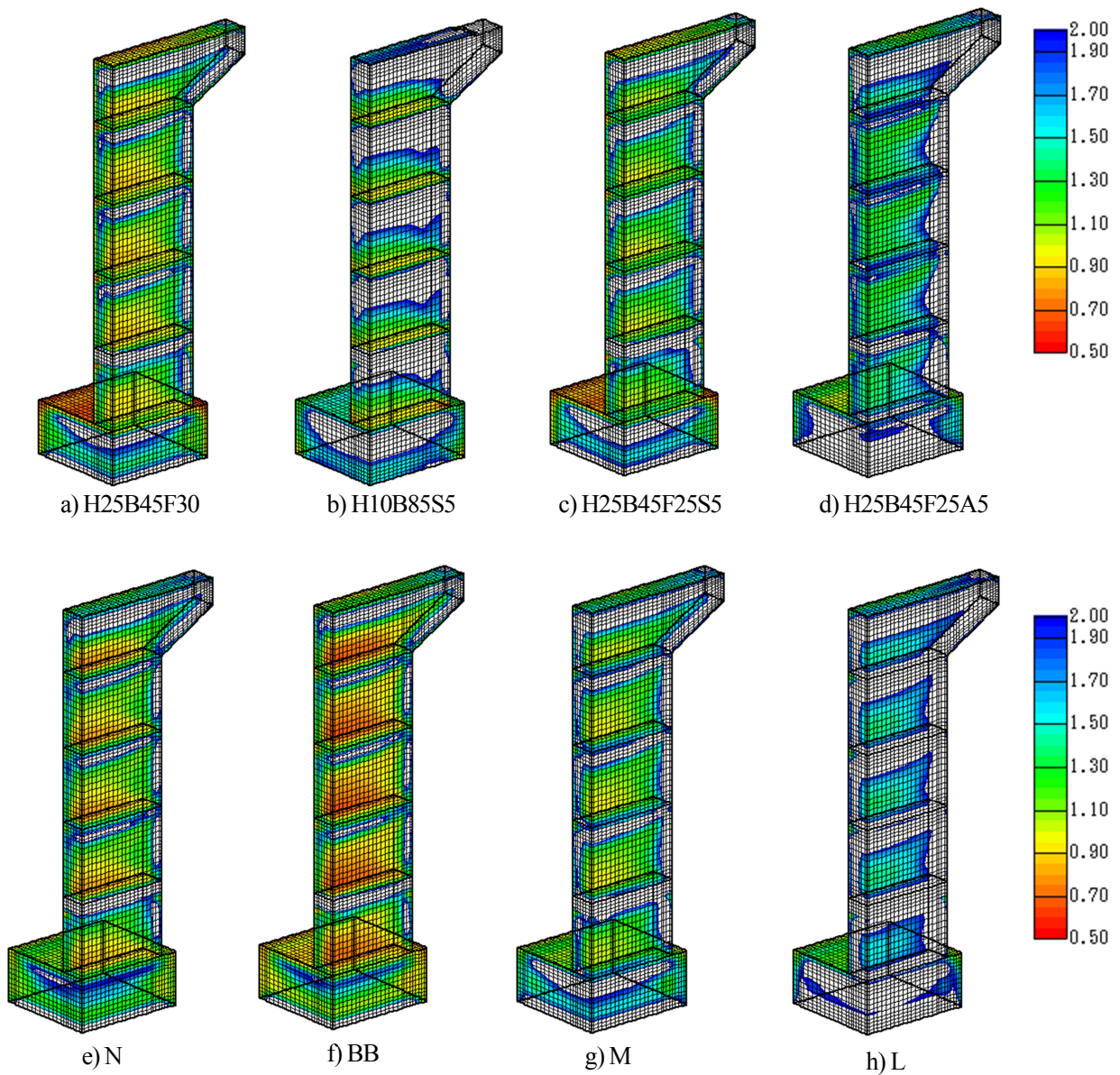


図-10 コンクリート内部の最小ひび割れ指数分布図 (外部拘束型に着目)

3.2 SG コンクリートの養生方法が温度ひび割れ抑制効果に与える影響（シリーズII）

シリーズIIの温度応力解析は、シリーズIの温度ひび割れ抵抗性が最も高かったH25B45F25A5を対象に、材齢7日または14日まで保温養生を実施することによる効果を検討したものである。ひび割れ指数の結果を表-9、図-11及び図-12に示す。各リフトの型枠面と仕上げ面の保温（熱伝達係数 $6\text{W/m}^2\text{C}$ ）を7日間行うことで、内部拘束型のひび割れ指数が向上し、フーチングで0.96から1.12に、柱部1リフトで0.97となった。同様に、外部拘束型のひび割れ指数は柱部1リフトで1.38から1.46に向上した。また、保温養生を材齢14日まで延長することで、外部拘束型のひび割れ指数は更に向上し、柱部1リフトで1.51となった。これらのことから、SGコンクリートの温度ひび割れの抑制効果を検討する場合、必要に応じて保温養生の実施やその実施期間を検討するとよい。

表-9 解析結果一覧（シリーズII）

結合材の構成	ひび割れ形態	ひび割れ指数					
		フーチング	柱部1リフト	柱部2リフト	柱部3リフト	柱部4リフト	梁部
H25B45F25A5	内部拘束	0.96 (2.3)	0.88 (2.0)	0.80 (2.0)	0.79 (2.0)	0.79 (2.0)	0.66 (1.8)
	外部拘束	—	1.38 (33)	1.32 (36)	1.30 (36)	1.30 (36)	1.36 (53)
H25B45F25A5 ($\lambda 6-7\text{d}$)	内部拘束	1.12 (3.0)	0.97 (2.0)	0.89 (2.0)	0.88 (2.0)	0.88 (2.0)	0.75 (1.8)
	外部拘束	—	1.46 (35)	1.38 (37)	1.35 (37)	1.36 (37)	1.44 (53)
H25B45F25A5 ($\lambda 6-14\text{d}$)	内部拘束	1.12 (3.0)	0.97 (2.0)	0.89 (2.0)	0.88 (2.0)	0.88 (2.0)	0.75 (1.8)
	外部拘束	—	1.51 (36)	1.41 (39)	1.38 (39)	1.39 (39)	1.46 (53)

() 内は、当該指数時の材齢（日）を示す。

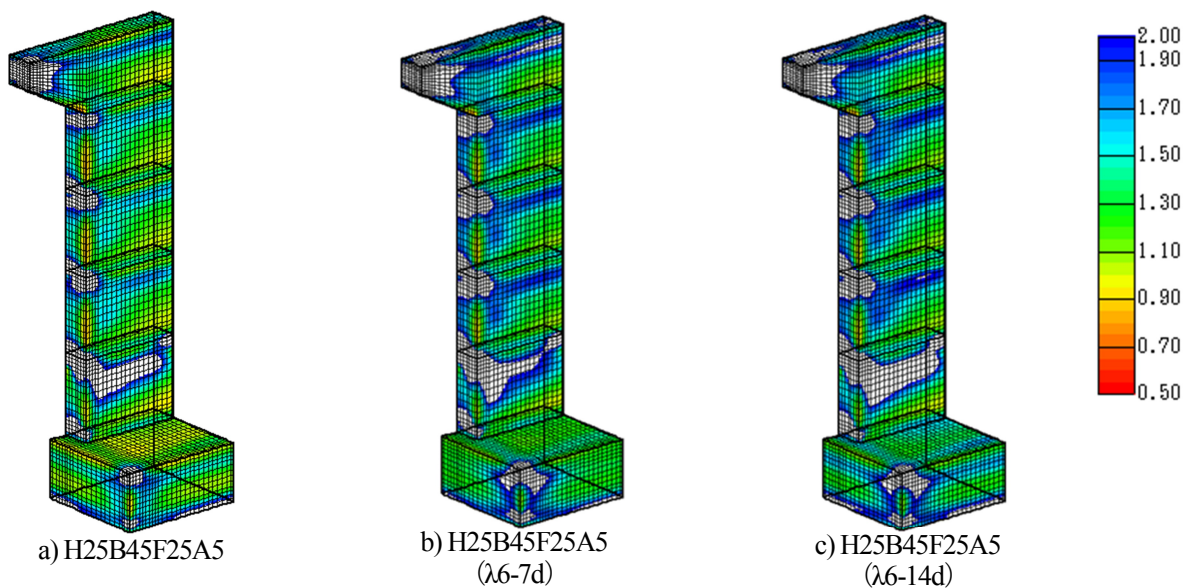


図-11 コンクリート表面の最小ひび割れ指数分布図（内部拘束型に着目）

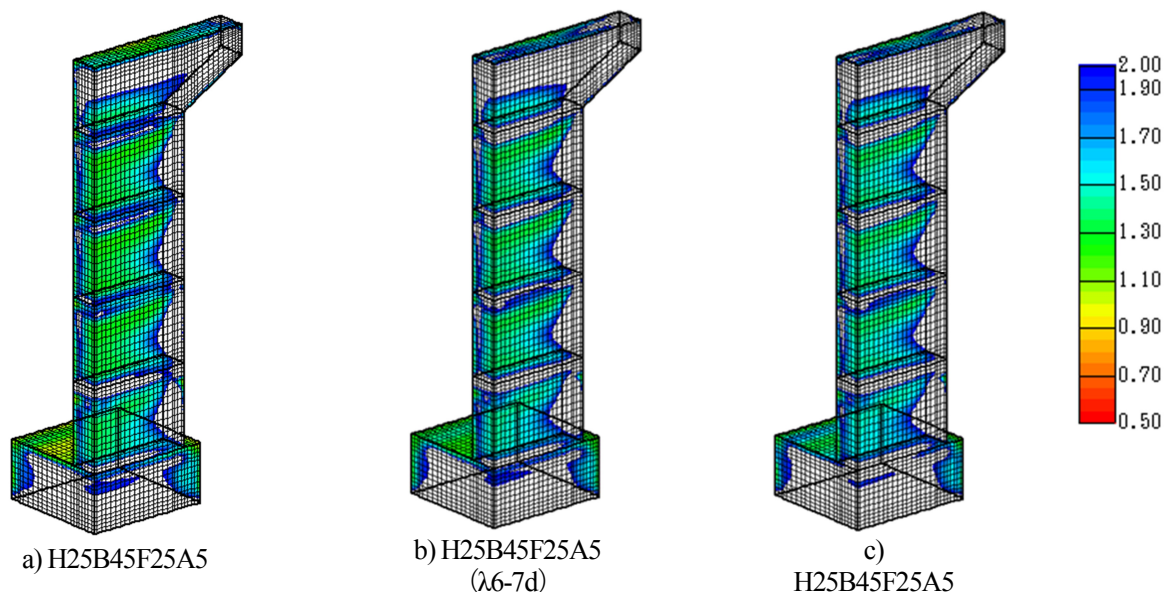


図-12 コンクリート内部の最小ひび割れ指数分布図（外部拘束型に着目）

4. まとめ

橋梁下部構造をモデルとして、標準のSGコンクリートの温度ひび割れ抵抗性について、JISのセメントを用いたコンクリートと比較し、検討を行った。今回の検討の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) SGコンクリートは水和発熱による温度上昇量が抑制される。結合材の早強ポルトランドセメントの割合を25%としたSGコンクリートの水和発熱による温度上昇量は、中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリート(W/C=55%)と同程度となり、同様に10%としたSGコンクリートの温度上昇量は低熱ポルトランドセメントよりも小さくなる。
- (2) SGコンクリートは材齢初期の強度発現が遅く、内部拘束型の温度ひび割れの発生リスクが高くなる傾向にある。しかし、早強ポルトランドセメントの割合を10%にすること、あるいは、せっこうを混合することで、水和発熱量の低減や初期強度発現の改善が図られ、内部拘束型の温度ひび割れ抵抗性が向上する。
- (3) いずれのSGコンクリートも普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種を用いたコンクリートよりも、外部拘束型のひび割れに対する抵抗性は優れている。特に、せっこうを混合したSGコンクリートの優位性が顕著である。
- (4) SGコンクリートの更なる温度ひび割れ抑制効果を図りたい場合は、保温養生の実施やその実施期間の延長を検討するとよい。

参考文献

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

付録ー7 スーパーグリーンコンクリートの湿潤養生期間

1. はじめに

この付録では、標準のSGコンクリートの湿潤養生期間を外気温ごとに設定することを目的として、5、10、20℃の環境下における圧縮強度を測定した結果を示す。

2. 試験方法

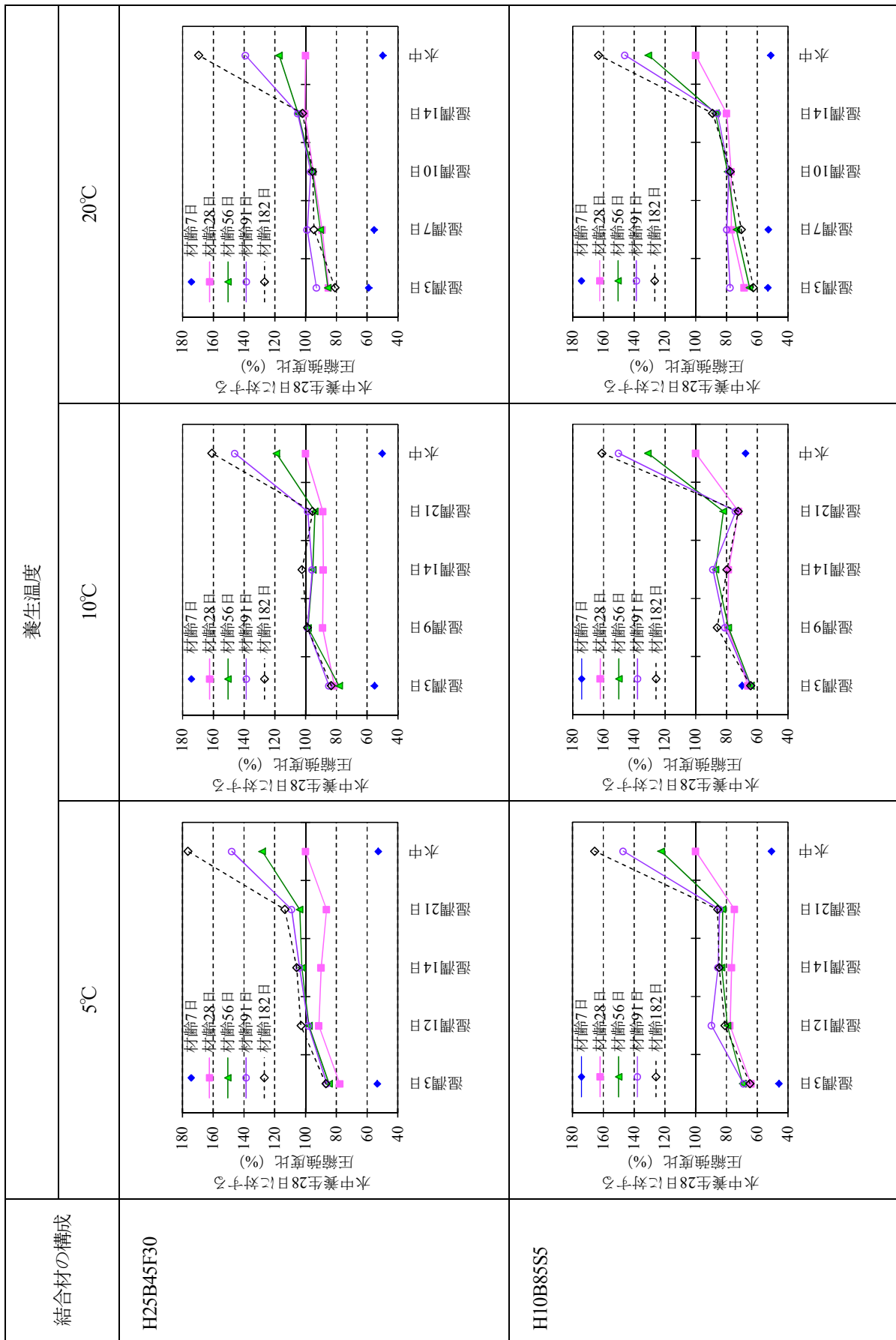
SGコンクリートの使用材料、結合材の構成及び配合条件等は付録ー1に示した。試験体はφ10cm×20cmの円柱試験体とし、20℃の室内で製作した。製作直後に試験体を5、10及び20℃の恒温室に移し、湿らせた養生マットで覆って定期的に散水して湿潤養生した。この湿潤養生の期間を表ー1に示した。湿潤養生後は温度20℃、RH60%の恒温恒湿室で保管し、所定の材齢でJISA 1108に従って圧縮強度を測定した。なお、脱型は材齢3日で行った。比較用の試験体は圧縮強度試験まで20℃の水中で養生した。

表ー1 養生温度と湿潤養生期間

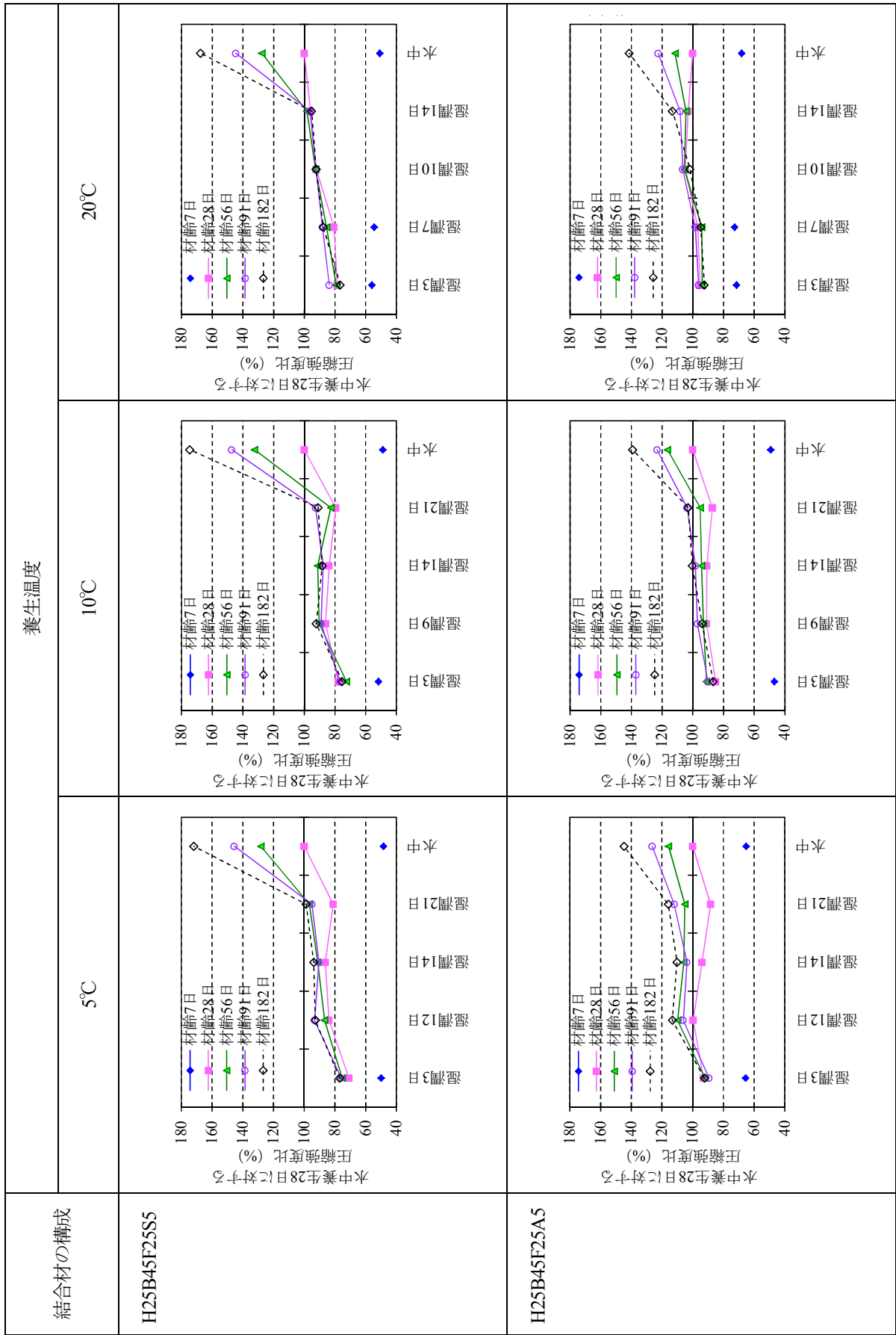
結合材の構成	養生温度	湿潤養生期間	湿潤養生後から強度試験まで
H25B45F30 H10B85S5 H25B45F25S5 H25B45F25A5	5℃	湿潤 3 日	20℃, RH60% 気中保管
		湿潤 12 日	
		湿潤 14 日	
		湿潤 21 日	
	10℃	湿潤 3 日	20℃, RH60% 気中保管
		湿潤 9 日	
		湿潤 14 日	
		湿潤 21 日	
	20℃	湿潤 3 日	20℃, RH60% 気中保管
		湿潤 7 日	
		湿潤 10 日	
		湿潤 14 日	
	20℃	水中 (比較用)	

3. 湿潤養生期間

それぞれの配合について、20℃で28日間水中養生した試験体の圧縮強度を測定し、基準とした。各湿潤養生条件で圧縮強度を測定し、基準の圧縮強度で除した比率（以降、水中養生28日に対する比率）を図ー1及び図ー2に示す。



図一1 H25B45F30 及び H10B85S5 の 20°C水中養生 28 日に対する圧縮強度の比率



図一2 H25B45F25S5 及び H25B45F25A5 の 20°C水中養生28日に対する圧縮強度の比率

日本建築学会の JASS5¹⁾に規定される湿潤養生期間は混合セメント B 種相当で 7 日以上である。湿潤養生を 7 日で打ち切った場合、材齢 28 日における圧縮強度の水中養生 28 日に対する比率は 80%より若干高い程度であることが示されている。このことから水中養生 28 日に対する比率が概ね 80%となることを湿潤養生期間の目安とした。

養生温度 5℃において、湿潤養生期間が 3 日の場合は、材齢 28 日における水中養生 28 日に対する比率は 80%を下回る場合があった。一方、12 日間の湿潤養生を行った場合には、いずれの配合においても材齢 28 日以降における水中養生 28 日に対する比率が 80%以上となった。このため、5℃における湿潤養生期間は 12 日が適当と考えられる。

養生温度 10℃においては、湿潤養生期間が 3 日の場合には、材齢 28 日における水中養生 28 日に対する比率は 80%を下回る場合があったが、9 日間の湿潤養生を行った場合には、いずれの配合においても材齢 28 日以降における水中養生 28 日に対する比率が 80%以上となった。このため、10℃における湿潤養生期間は 9 日が適当と考えられる。

養生温度 20℃においては、湿潤養生期間が 3 日の場合には、材齢 28 日における水中養生 28 日に対する比率は 80%を下回る場合があったが、7 日間の湿潤養生を行った場合には、いずれの配合においても材齢 28 日以降における水中養生 28 日に対する比率が概ね 80%以上となった。このため、20℃における湿潤養生期間は 7 日が適当と考えられる。

以上のことは、SG コンクリートは、土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]」²⁾に示される混合セメント B 種の湿潤養生期間の標準を満足すればよいことを示している。このため、SG コンクリートの湿潤養生期間は、コンクリート標準示方書と同一の表-2 のとおりとした。

なお、SG コンクリートの強度が長期的に増加していくことは、2 年間の暴露試験により確認している（付録-3 参照）。

表-2 SG コンクリートの湿潤養生期間の標準

日平均気温	湿潤養生期間の標準
15℃以上	7 日
10℃以上	9 日
5℃以上	12 日

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，2015
- 2) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，2013

付録ー8 構造物への適用事例

1. はじめに

この付録では、標準のSGコンクリートをコンクリート二次製品工場のスラブに適用した事例を紹介する。施工に先立って、室内での試し練りにより化学混和剤の種類と添加量を設定し、続いて実機による試し練りによって練混ぜ方法の設定と練上がりの性状の確認を行ったうえで、施工を行った。

2. 施工条件とコンクリートの配合条件

2.1 適用場所の概要と施工条件

二次製品工場の床スラブにSGコンクリートを適用した。SGコンクリートは、工場での二次製品の製造方法と同様に、敷地内のバッチャープラントで製造したコンクリートをバケットで場内運搬して打ち込んだ。施工条件を以下に、施工前の現地の状況を写真ー1に示す。

- ・施工時期：2015年9月下旬
- ・コンクリートの製造設備：工場敷地内のバッチャープラント
- ・ミキサー：容量2m³，強制二軸式ミキサー
- ・場内運搬・打込み方法：バケット（施工場所はプラントと同じ工場敷地内）
- ・施工範囲：縦5.7m×横3.1m×厚さ0.10～0.20m（無筋）
- ・コンクリート施工数量：約2.3m³



写真ー1 施工前の状況

2.2 SG コンクリートの配合条件

SG コンクリートの配合条件は下記とした。SG コンクリートには、下層のコンクリートの拘束による影響が大きいこと、及び、乾燥を受けやすいことを考慮して、収縮補償のために膨張材を 10kg/m^3 使用することとした。膨張材を添加したときの膨張量については付録-5 に示した。

- ・呼び強度：24
- ・結合材の構成：H25B45F30（膨張材添加）
- ・荷卸しのスランプ： $15\pm 2.5\text{cm}$
- ・空気量： $4.5\pm 1.5\text{cm}$

3. 試し練り

3.1 室内での試し練り

室内の試し練りは、工場で常用する骨材及び高炉スラグ微粉末を用いた SG コンクリートが、適切なワーカビリティとなるように化学混和剤の添加量を決定すること、及び、強度を確認することを目的として行った。室内の温度は $29\sim 30^\circ\text{C}$ であった。使用材料を表-1 に、配合条件を表-2 に示す。

表-1 使用材料

材料	記号	仕様
早強ポルトランドセメント	H	JIS R 5210, 密度 3.14g/cm^3 , 比表面積 $4490\text{cm}^2/\text{g}$,
高炉スラグ微粉末 4000	B	JIS A 6206, ブレーン値 $4360\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 2.89g/cm^3 , せっこう添加
フライアッシュ II 種	F	JIS A 6201, 密度 2.29g/cm^3 , 比表面積 $3830\text{cm}^2/\text{g}$
膨張材	HE	JIS A 6202, 密度 3.15g/cm^3 , 石灰系膨張材
細骨材	S	JIS A 5005, 茨城県神栖産, 表乾密度 2.61g/cm^3 , 吸水率 1.88%, 粗粒率：2.70
粗骨材	G	JIS A 5005, 茨城県岩瀬産, 表乾密度 2.64g/cm^3 , 吸水率 0.65%
AE 減水剤遅延形	Ad1	JIS A 6204, 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
AE 剤	Ad2	JIS A 6204, 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

表-2 配合条件

結合材の構成	呼び強度	スランプ (cm)	空気量 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)	単位水量 (kg/m^3)
H25B45F30	24	12 ± 2.5	4.5 ± 1.5	20	45	165

スランブ及び空気量の経時変化を表-3に示す。練上がりのスランブが12cmの場合にはスランブの低下が速かったことから、練上がりのスランブを15cmに変更した。

表-3 室内の試し練りにおけるスランブおよび空気量

練上がりのスランブ (cm)	練上がりからの時間 (分)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
12±2.5cm	直後	11.5	4.7	29
	30	8.0	4.2	29
	60	6.5	3.3	29
15±2.5cm	直後	15.0	5.2	29

圧縮強度の試験結果を図-1に示す。圧縮強度は、材齢28日において呼び強度24（配合強度28.8N/mm²）を満足した。

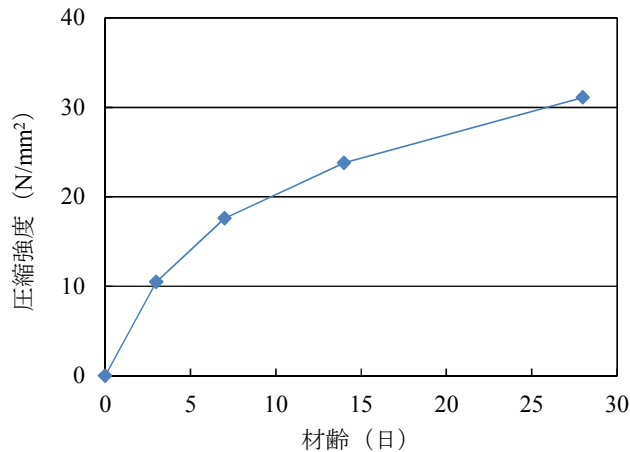


図-1 膨張材使用量と圧縮強度の関係

3.2 実機による試し練り

実機による試し練りは、化学混和剤の添加量を決定すること、及び、練混ぜ条件を決定することを目的として、施工で使用する工場内のバッチャープラントで行った。外気温は23°Cであり、室内での試し練り時よりも低かった。高炉スラグ微粉末と骨材は工場のセメントサイロに常用するものを使用し、高炉スラグ微粉末以外の混和材、早強ポルトランドセメント及び化学混和剤は手投入した。練混ぜ量は1m³/バッチとした。

練混ぜ中のミキサーの負荷値を図-2に示す。注水後、概ね60秒で負荷値が安定するが、少量の粉体材料を均一に混合することを考慮して、施工時の練混ぜ時間は90秒間に設定した。

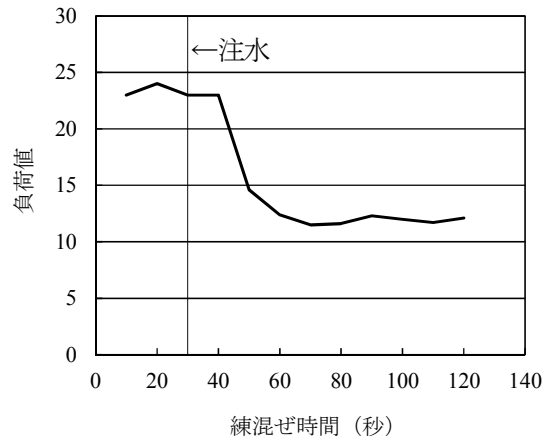


図-2 練混ぜ時のミキサーの負荷値

スランプ及び空気量の経時変化を表-4に示す。練上がり直後から60分後まで、荷卸し時の目標値を満足した。なお、圧縮強度は、材齢7日及び14日で 14.8N/mm^2 及び 21.7N/mm^2 であり、室内での試し練り時とほぼ同等であった。

表-4 実機試し練りにおけるスランプおよび空気量の変化

練上がりのスランプ (cm)	練上がりからの時間 (分)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
15±2.5cm	直後	15.5	5.8	26
	30	14.0	5.6	26
	60	13.5	5.5	26

4. 施工

コンクリート二次製品工場のスラブへのSGコンクリートの施工は、試し練りによって定めた配合条件及び手順に従ってコンクリートを製造し、バケツで場内運搬して打込みを行った。当日の気温は 22°C 、コンクリート温度は 25°C であった。荷卸し時のスランプ及び空気量の測定結果を表-5に示す。2バッチともに荷卸し時の目標値を満足した。また、1バッチ目では、荷卸しの試験時に分取したコンクリートを用いて、練上がりから60分後までの経時変化を測定したが、これらも荷卸し時の目標値をほぼ満足した。

表-5 施工時のスランプおよび空気量

バッチ	練上がりからの時間 (分)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)
1 バッチ	直後 (荷卸し)	16.0	6.0	25
	30	13.5	5.8	25
	60	12.0	5.4	25
2 バッチ	直後 (荷卸し)	13.0	5.9	25

荷卸し時にスランプ及び空気量の確認を行った後、バケットを門型クレーンで吊り上げてSGコンクリートを打ち込んだ。打込み、締固め、均し及び仕上げの作業は、通常のコンクリートと同様に行うことができた。施工の状況を写真-2に示す。



a) バケットによる打込み状況



b) 締固め及び均しの状況

写真-2 施工状況

仕上げ作業の実施時期は、気温や化学混和剤の種類によって異なるが、今回は遅延形の AE 減水剤を用いたこともあり凝結がやや遅く、練上がりから約7時間後に行った。

打込み翌日から濡らした養生マットと水の逸散を防止するシートの順に打込み面を覆い、マニュアル(案)5章で定めたとおり、材齢7日まで湿潤養生を行った。

養生終了後の表面の仕上がりは良好であり、施工後初期にひび割れは発生しなかった。養生終了後の状況を写真-3に示す。



写真-3 養生完了後の状況

施工時に採取した試験体は、20℃の水中養生及び現場と同一の養生（現場養生：材齢7日まで養生マットによる湿潤養生を行った後、現場に保管）を行った。試験体の圧縮強度を図-3に示す。材齢28日の圧縮強度は30N/mm²であり、呼び強度24を満足した。

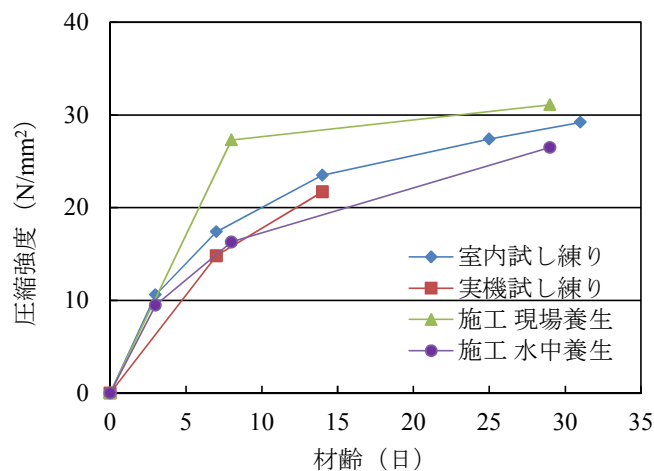


図-3 施工時に採取した試験体の圧縮強度

5. まとめ

この付録では、標準の SG コンクリートをコンクリート二次製品工場のスラブに適用した事例について紹介した。以下に、適用にあたって得た知見を示す。

- SG コンクリートは、通常のコンクリートプラントの設備で製造でき、打込み、締固め、均し、仕上げ及び養生は、土木学会「コンクリート標準示方書 [施工編]」¹⁾で対象とする通常のコンクリートと同じように行うことができた。
- SG コンクリートは、このマニュアル（案）に従って、配合選定、製造及び施工することで、ひび割れなどの欠陥のない構造物を構築することができた。
- SG コンクリートは、施工を円滑に行うために、あらかじめ試し練りによって品質を確認し、配合条件や製造方法を決定することが望ましい。
- SG コンクリートは、使用量の少ない混和材がありまた、単位結合材量が多く粘性がやや高いため、注水後の練混ぜ時間をやや長く設定することが望ましい。出荷計画においては留意する必要がある。
- SG コンクリートは、仕上げの開始時期が通常のコンクリートよりも遅れる場合があるので、これを見込んだ施工計画とする必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，2013

付録ー9 技術公表の一覧

2016年1月現在

- 1) 笹倉伸晃, 白根勇二, 宮原茂禎, 中村英佑: 養生条件が低炭素型のコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.205-210, 2015
- 2) 荻野正貴, 大脇英司, 白根勇二, 中村英佑: 低炭素型のコンクリートの耐久性と性能評価方法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.211-216, 2015
- 3) 白根勇二, 梶田秀幸, 宮原茂禎, 荻野正貴, 中村英佑: 低炭素型のコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する検討, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, V-496, pp.991-992, 2015
- 4) 荻野正貴, 大脇英司, 白根勇二, 舟橋政司, 中村英佑: 低炭素型のコンクリートの収縮特性, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, V-497, pp.993-994, 2015
- 5) 荻野正貴, 大脇英司, 白根勇二, 中村英佑: 複数の環境に約2年間曝露した低炭素型のコンクリートの強度と耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.220-225, 2014
- 6) 舟橋政司, 白根勇二, 荻野正貴, 中村英佑: 低炭素コンクリートの配合設計手法および硬化特性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.232-237, 2014
- 7) 荻野正貴, 大脇英司, 白根勇二, 宮野和樹, 中村英佑: 実環境に約2年間曝露した低炭素型のコンクリートの塩分浸透, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, V-189, pp.377-378, 2014
- 8) 白根勇二, 宮野和樹, 荻野正貴, 大脇英司, 中村英佑: 低炭素型のコンクリートの熱膨張係数および断熱温度上昇特性に関する検討, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, V-190, pp.379-380, 2014

共同研究報告書
Cooperative Research Report of PWRI
No.474 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