

## 委員会報告 混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会

名和豊春<sup>\*1</sup>, 山田一夫<sup>\*2</sup>, 閑田徹志<sup>\*3</sup>, 久田真<sup>\*4</sup>, 石川嘉崇<sup>\*5</sup>

**要旨:** 環境負荷低減やCO<sub>2</sub>削減の観点から、石灰石微粉末、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなど混和材料の利用促進が不可欠となる。本委員会では、これらの材料の普及の課題のひとつであるひび割れ抵抗性を定量的に評価する試験方法について提案をおこない、その妥当性を検証するとともに、混和材料の効果について共通試験を実施した。また多成分の混和材料を同時に使用する場合のセメントに品質規定について、個々の品質の規定が不要なセメントの本質的性能に基づく性能照査型の混合セメント規格の提案も行った。さらに、施工条件と耐久性の関連、混合セメント利用の現状について文献を中心に取りまとめを行った。

**キーワード:** 混和材料, ひび割れ抵抗性, 耐久性, 性能照査型品質規格, 施工条件, 利用状況

### 1. はじめに

環境負荷低減やCO<sub>2</sub>削減の観点から、石灰石微粉末や産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材料による混合セメント化や低CO<sub>2</sub>排出型の新セメントの開発は不可欠である。しかし、これらの混合セメントを用いたコンクリートで、早期にひび割れが生じるなどの不具合が生じた事例が報告されている。また、これらの混和材料どうし、もしくは機能性の有機系混和剤や膨張材を複合使用した場合のコンクリート性能は必ずしも明らかではない。そこで本委員会では、これら混和材料を使用したコンクリートのひび割れ発生防止および耐久性向上のための総合的な混合セメントを用いたコンクリートの性能について、実験および文献調査などで検証し、その有効利用に関する技術を進展させることを目指した。

本委員会では以下の四つのWGを設置し活動を進めた。表-1にWG別に構成委員の一覧を示す。

品質・性能(ひび割れ)WG(WG1)では、ひび割れ抵抗性の試験方法を提案し、各種セメントや配調合の影響の評価を行った。品質・性能(耐久性)WG(WG2)では、混合セメントに求められる性能を再考し、性能照査型の品質規格案を提案した。規格・施工WG(WG3)では、混和材料使用による初期強度低下と施工条件(特に養生)の関連について調査を行った。利用検討WG(WG4)では、収縮ひび割れと中性化に焦点を絞って混和材料の特長を文献調査するとともに、施工実績や指針類の整備についても調査を行い、混和材料の利用の現状について取りまとめた。

本委員会の報告は、各WGからの四部構成となる予定である。以下、各WGの活動状況をまとめる。

表-1 構成委員一覧

委員長 名和豊春(北海道大学)	委員(WG2) 兼松学(東京理科大学)
幹事長 山田一夫(太平洋セメント(株), WG2 主査)	川端雄一郎(独)港湾航空技術研究所)
WG1 主査 閑田徹志(鹿島建設(株))	吉田夏樹((財)日本建築総合試験所)
WG3 主査 久田真(東北大学大学院)	高橋茂((社)セメント協会)
WG4 主査 石川嘉崇(電源開発(株))	委員(WG3) 蔵重勲(電力中央研究所)
幹事 壇康弘(新日本製鉄(株))	野々目洋(戸田建設(株))
竹田宣典((株)大林組)	陣内浩(大成建設(株))
委員(WG1) 石川雅美(東北学院大学)	委員(WG4) 白井達哉(大成建設(株))
今本啓一(東京理科大学)	福留和人((株)間組)
谷村充(太平洋セメント(株))	廣島明男((株)デイ・シイ, 交代)
浅本晋吾(埼玉大学)	二戸信和((株)デイ・シイ, 新)
井上和政((株)竹中工務店)	小田部裕一(住友大坂セメント(株))
大谷俊浩(大分大学)	中山英明((株)宇部・三菱セメント研究所)
委員(WG2) 丸山一平(名古屋大学大学院)	通信委員 百瀬晴基(鹿島建設(株))
半井健一郎(群馬大学)	船本憲治(九州電力(株))
佐伯竜彦(新潟大学)	

\*1 北海道大学大学院 教授 博士(工学) (正会員)

\*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 博士(工学) (正会員)

\*3 鹿島建設(株) 研究技術開発本部 博士(工学) (正会員)

\*4 東北大学大学院 教授 博士(工学) (正会員)

\*5 電源開発(株) 茅ヶ崎研究所 博士(工学) (正会員)

2. 各種混和材料を用いたコンクリートの収縮ひび割れ評価(WG1)  
 2.1 収縮ひび割れ評価試験法の検討  
 (1) 収縮ひび割れ抵抗性の評価試験法の現状と課題

コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の評価を目的とする試験方法には多くの提案があるが、その中でも鋼材を用いた外拘束による JIS A 1151 が標準試験として用いられ、収縮ひび割れ抵抗性の評価の一般化に大きく寄与してきた。しかし、JIS A 1151 では、専用に用いる鋼製の型枠と拘束治具が必要で、試験実施に要する初期コストと労力が比較的大きいという課題がある。一方で、収縮ひび割れ制御に対する関心の高まりから、収縮ひび割れ抵抗性を定量的に、かつ比較的簡易に評価することが実務レベルで要求されることが増えており、この要求を満たす試験方法について検討した。

(2) 改良試験法の概要

検討した試験方法（以下改良試験法）は、コンクリートの自己収縮応力試験方法<sup>1)</sup>（以下、自己収縮応力試験法と称する）を応用したもので、拘束試験体の概要を図-1に示す。拘束試験体では、大径の鉄筋を断面中央部に配してコンクリートの収縮を拘束し、拘束鉄筋のひずみからひび割れ発生までの収縮拘束応力の履歴を把握することが可能となる。また、拘束試験体に加え、自由収縮ひずみを得るための自由収縮試験体も一組で試験を実施し、クリープ特性やひび割れ発生条件についても解析することが可能となる。

(3) 試験法の妥当性検証

改良試験法の妥当性について、拘束試験体で測定したひずみ挙動から次の2点に焦点を当て検討を行った。

1 点目は、改良試験法の原型となったコンクリートの自己収縮応力試験法の拘束試験体は、乾燥を想定していない自己収縮応力の測定を目的としており、コンクリート内部のひずみは断面内で均一なのに対し、乾燥収縮の場合には断面内で収縮ひずみが分布するため、拘束鉄筋のひずみとコンクリートのひずみの適合が担保されているか懸念があった。2 点目は、試験を容易にするため、拘束試験体をコンパクトにすることが求められ、自己収縮応力試験方法と比べ試験体長さを400mm短い100mmとしたことによる定着不足への懸念である。

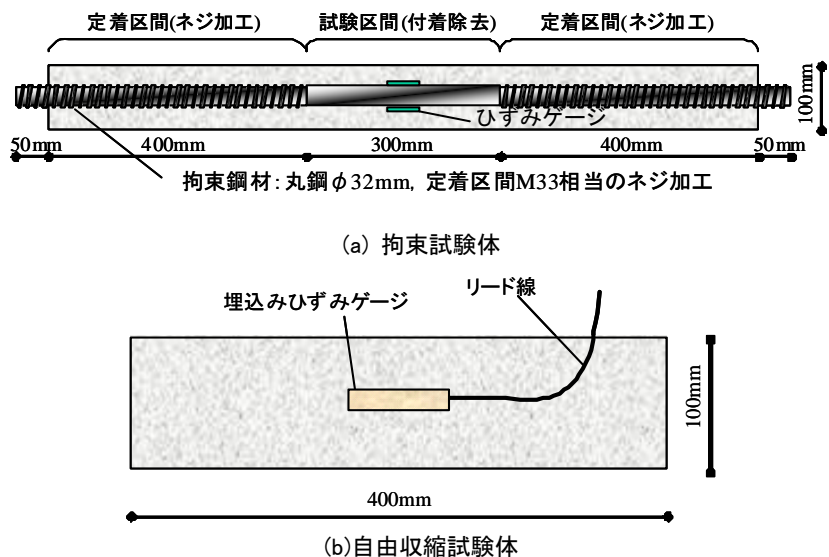


図-1 収縮ひび割れ評価試験の試験体概要  
 (供試体断面はいずれも 100x100mm)

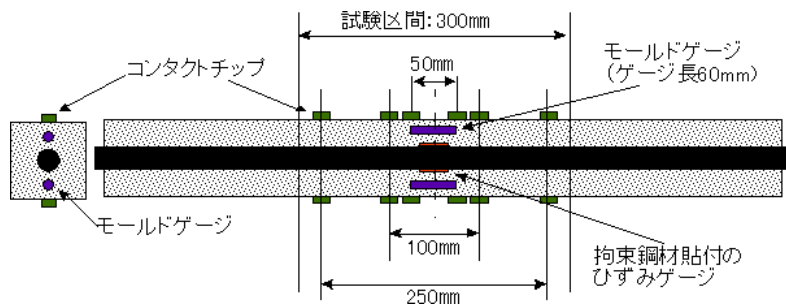


図-2 コンクリートと拘束鋼材のひずみ適合性の検討概要

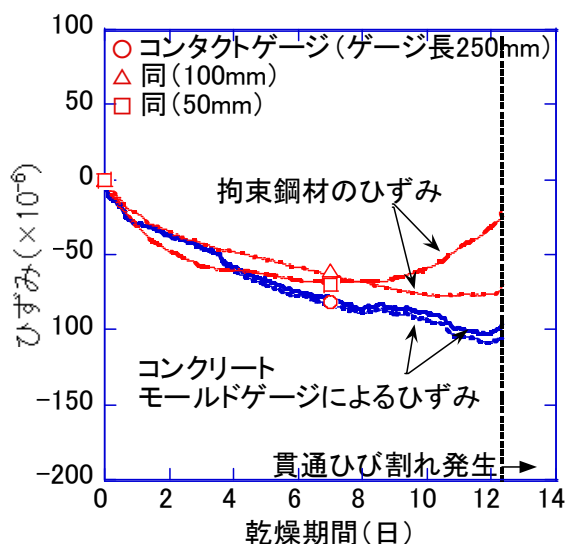


図-3 ひずみ適合性検討の結果例

第1点目の拘束鋼材とコンクリートのひずみの適合性が確保されているかについては、図-2に示すようにコンクリートに埋め込んだモールドゲージ、およびコンクリート表面のコンタクトゲージのひずみ計測結果を鋼材ひずみと比較する実験を実施し検証した。試験体の定着

表-2 共通試験の概要

実験要因	水準または範囲
混和材料種類	フライアッシュ、高炉スラグ、シリカフェーム前記材料の混合
混和材料の混和率(結合材中の質量比)	0~62%
乾燥までの養生期間(乾燥開始材齢)	3, 7, 14日
環境温度	10, 20, 30°C

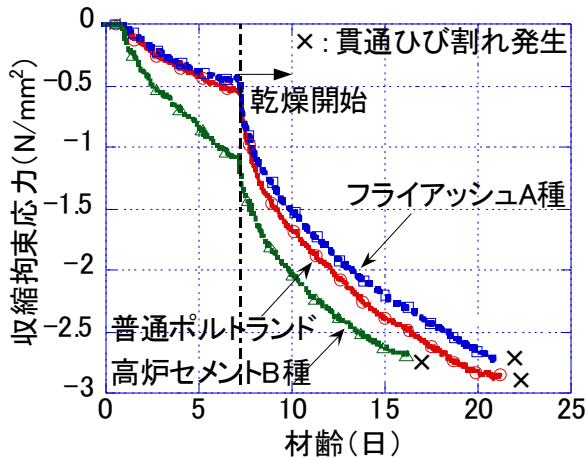


図-4 収縮ひび割れ抵抗性評価の改良試験法による結果の例

区間と試験区間の寸法は図-1と同じである。この実験では、材齢7日まで型枠を存置して封かん養生とし、その後 20°C CRH60%の環境条件にて供試体全面を気中に曝した。図-3はその結果の例である。この図は材齢7日以降の乾燥期間に対するひずみの経時変化を表しており、貫通ひび割れが発生した乾燥期間12日近くを除き、拘束鋼材のひずみとコンクリートモールドゲージのひずみの差は比較的小さいことがわかる。貫通ひび割れが発生する材齢近くでは、表面ひび割れによりコンクリートのひずみの局所化や、コンクリート剛性の低下に伴う鋼材ひずみの緩和の可能性がある。また、図-3で、コンタクトゲージによるひずみは、乾燥期間7日の時点で、拘束鋼材のひずみおよびコンクリートモールドゲージのひずみと概ね一致している。これらから、拘束鋼材とコンクリートのひずみは試験区間において適合していると見做してよいと判断した。

試験体の定着区間長さの影響についても同様の実験検討を行った。検討では、図-2の試験体に加え、試験区間はそのまま定着区間長さを600および200mmとした試験体にて実験を行った。定着区間600mmは自己収縮応力試験法と同一である。その結果、貫通ひび割れが発生する材齢、および収縮拘束応力の発現性状への定着区間長さの影響は、この範囲では顕著でないことが明らかとなった。これを受け、安全を見て定着区間400mm

にて試験体形状を決定した。

## 2.2 収縮ひび割れ抵抗性の評価に関する共通試験

### (1) 共通試験の概要

改良試験法に基づき、委員が所属する13の研究機関の参加を得て混和材料が収縮ひび割れ抵抗性に与える影響を明らかとすべく共通試験を実施した。実験要因と水準の概要を表-2に示す。共通試験では、セメント、混和材料、骨材などの材料を配布し、予め試練りで決定した基本となる配(調)合を水結合材比50%、細骨材率47%、単位水量175kg/m<sup>3</sup>に定め各機関で統一して実施した。

### (2) 共通試験の結果例

図-4に改良試験法による収縮拘束応力の経時変化の実験結果例を示す。収縮拘束応力は、拘束鋼材のひずみから、鉄筋とコンクリート断面の力の釣合いに基づき算出した。同図のデータは、乾燥開始材齢7日、20°C CRH60%の環境条件にてフライアッシュセメントA種相当、および高炉セメントB種相当のコンクリートの結果を普通ポルトランドセメントと比較して表している。

この図から、貫通ひび割れ発生までの材齢、乾燥開始までの収縮拘束応力の発現性状などに、明らかに混和材料の影響が見取れ、これら得られた結果は実施工での経験による知見と一致していた。この結果は、比較的容易に多様な混和材料を用いた際の収縮ひび割れ抵抗性を把握することができ、実務レベルでの収縮ひび割れ制御を行うことが可能となると期待される。

### (3) 共通試験の結果から期待される成果

共通試験データの解析を今後予定しており、各種混和材料を用いたコンクリートの収縮ひび割れ挙動について次の成果を予定している。

- ・ 収縮ひび割れ挙動に影響を及ぼす要因とその影響度の把握
- ・ 引張クリープ挙動、ひび割れ発生条件の解明
- ・ 建築用壁部材を対象としたひび割れ挙動予測解析

## 3. 多成分系混合セメントなど多様なセメントのための性能照査型セメント品質規格(WG2)

### 3.1 性能照査型セメント品質規格の必要性

混和材料を従来のように高炉セメントやフライアッシュセメントとして、普通ポルトランドセメントとの二成分系で用いるとすれば従来の規格で対応可能である。しかし、石灰石微粉末やその他の混和材料を含めた多成分系のセメントの設計を考えると、それを規定する規格は国内には現存せず、また、各成分ごとに規格を作るのはあまりに材料が多岐にわたるため現実的ではない。さらに従来とは異なる新しい成分系のセメントもありえる。そこで、セメントに求められる本質的性能を再考察することでセメントの性能照査型の品質規格を提案し、セメ

表-3 性能照査型セメント品質規格(案)の目次

1. 範囲
2. 参考文献
3. 用語
4. 定義
5. 分類と用途
5.1 はじめに
5.2 分類
5.3.1 汎用
5.3.2 耐硫酸塩性
5.3.3 耐酸性
5.3.4 ひび割れ抵抗性
5.3.5 遮塩性
5.3.6 遮水性
5.3 付加性能
5.3.7 耐中性化
5.3.8 耐アルカリ骨材反応性
6. セメントの指定方法
6.1 セメント分類
6.2 セメント強さ
6.3 付加性能の指定
7. 化学組成*
8. 物理特性**)
9. 試験方法***)
付属書：性能評価法
(1) 促進中性化試験
(2) 耐アルカリ骨材反応性試験
(3) 耐硫酸塩性試験
(4) 耐酸性試験
(5) ひび割れ抵抗性モルタル試験(温度, 収縮)
(6) 遮塩性試験

\*) 本規格では定めない。

\*\*\*) 粉末度, 安定性, 偽凝結, 凝結時間, および各性能分類と付加性能に対応した項目および性能クラスごとの基準値を表で提示。

\*\*\*\*) 既存規格があるものは引用し, 無いものは付属書で提示。

ントの多様化への可能性を開くことは意義深いと考える。

WG2の報告では, まず海外の性能照査型セメント品質規格を調べ, 米国規格については制定の背景と現実の利用状況を調査し, 現状をまとめる。ついで独自の性能照査型の品質規格案を提示する。セメントへの本質的要求性能を, すべてのセメントに共通で求められる項目と用途ごとに特に規定すべき項目に分け, 評価方法とクラス分けの案を示す。現時点で考えられる範囲で提案したが, 当然, 今後の検討が必要な事項もあるし, 今後の検討には規格を提案した技術的背景の明示が不可欠である。このため, 規格案の後に技術的背景を説明する。最後に今後の展望についてまとめる。

### 3.2 海外での性能照査型セメント規格

海外の性能照査型セメント規格は, ASTM C1157 のほか, オーストラリア, ニュージーランドにもある。C1157では, セメントを性能の観点から, 一般用途 GU, 早強

HE, 中耐硫酸塩 MS, 高耐硫酸塩 HS, 中庸熱 MH, 低熱 LH に区分し, それぞれの性能を評価する試験方法と基準値を示している。各セメントに対して, 耐アルカリ骨材反応性となる場合はオプションとして R を表示する。粉末度, 強度(材齢は用途により異なる指定が可能), 凝結, 安定性は共通である。

米国における規格制定の思想と現実の使用状況をポルトランドセメント協会(PCA)へヒアリングした。

既存の混合セメント規格は使用可能な材料と組成範囲に限界があり, 革新や持続的発展のための最適化を許容するものではない。性能規格へと移行することで, 理想的には, 利用者は中身を気にすることなく最大限求める性能を得ることができ, 製造者は不必要な制約なしにいかなる材料も製品が機能するように複合化することができる。言い換えれば, 最適なセメントを作るのに入手可能な材料を最適化して用いることができる。

多様性を求めてセメント業界が提案したが, 残念ながら現実には全セメントの 1%に満たない利用状況である。建築分野での使用は各州で認められているが, 道路関係では使用できる州は限定的である。使用者側は新しいセメントの使用に関するリスクを望まないようである。

### 3. 日本版性能照査型セメント品質規格の提案

端的な成果として, 完成度は未熟であっても今後の議論のために規格原案を提示する。表-3に性能照査型セメント品質規格(案)の目次を示す。委員会報告書では以下の順に記述する予定である。

1. 範囲：本規格が目指すものを示す。
2. 分類と用途：セメントが共通に持つべき性能と特定用途で求められる性能に分けて規定する。
  - 2.1. 共通事項
    - 2.1.1. 用語と定義
    - 2.1.2. 共通試験：強さ試験(レベルや材齢など多様化), 凝結, サンプルング, 試験の実施方法, 報告など。
    - 2.1.3. セメントの指定に関わる事項
    - 2.1.4. 関連規格・試験方法：性能規格は試験法規準と一体である。未整備の性能は試験方法の提案も伴う。
    - 2.1.5. 耐中性化：鉄筋コンクリートに主に使用されるので, 最も厳しい環境条件での性能の評価方法を提案する。
    - 2.1.6. 耐アルカリ骨材反応性(ASR)：全コンクリートで ASR 膨張は避けるべきである。確実に安全な骨材を得ることは困難であるが, 骨材の反応性も勘案して必要な ASR 抑制効果の程度を提示したい。
  - 2.2. 汎用：汎用品でも最低限必要な事項を定める。
  - 2.3. 耐硫酸塩性：物理的硫酸塩劣化を加え, 硫酸塩による化学的侵食への抵抗性を考慮する。
  - 2.4. 耐硫酸性：下水道関連設備などへの対応を考慮する。

2.5. ひび割れ抵抗性(熱, 収縮): 温度と収縮によるひび割れはセメント種類の影響を受けるので, 材料としてのひび割れ抵抗性を評価することを提案する。

2.6. 遮塩性: コンクリートの遮塩性はコンクリート配合による影響も強いが, セメント種類による部分も多い。したがってセメントの基本的遮塩性能を評価するのは意義があると考えその評価方法を提案する。

2.7. 透水性: 今回は検討の範囲外であるが, 重要な性能のひとつとして項目は提示する。

### 3.4 性能照査型セメント品質規格(案)の技術的背景

上記の提案単体では, その背景も分からず妥当性を判断できない。よって提案するに至った技術的根拠をまとめる。さらに, セメントの基本性能がコンクリートで発揮されるには, セメント性能を生かすようなコンクリートの設計が必要である。このための課題を取りまとめる。

#### (1) 中性化

混合セメントの中性化は促進炭酸化試験では実構造物で観察されるよりも普通ポルトランドセメントとの差が極端に大きくなるという意見もある。しかし, セメントが持つポテンシャルそのものとしては極端な使用条件も想定すべきなので, セメントの評価試験としてはモルタルの促進炭酸化試験を提案したい。分類としては, ポルトランドセメント, 高炉 B 種セメント, 高炉 C 種セメントに相当するようなクラス分けを考える方針である。

#### (2) 耐 ASR セメント

同じ反応性の骨材を準備するのは容易ではないので, パイレックスガラスを標準骨材とする。等価アルカリ量を 1.0%としたセメントによるモルタルバー試験で材齢 14 日での膨張量を指標に, 0.10%以下をオプション R(耐 ASR 性), 0.05%以下をオプション HR(高耐 ASR 性)とする。R は高炉 B 種など現在の混合セメントでの対策に相当する。HR は, R では対処できない高反応性鉱物によるペシマム配合や凍結防止剤などの濃厚アルカリ溶液の供給が懸念される場合を想定している。

#### (3) 耐硫酸塩性および耐酸性

まず, 耐硫酸塩性と耐酸性を区別・認識すべきである。

耐硫酸塩性には複数の機構が存在し, 大きくは化学変化による劣化と物理的作用による劣化がある。前者は硫酸塩溶液への浸漬試験, 後者は部分浸漬試験を適用する。

化学変化による劣化であっても,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  と  $\text{MgSO}_4$  では作用機構が異なる。さらに Thaumassite 劣化は低温のみ起きるし, 通常の硫酸塩劣化も低温で加速する。したがって浸漬試験では, 目的に応じて浸漬液の種類と温度を変化させることが必要である。さらに劣化の機構により, 評価項目を長さ変化(エトリンサイト生成による膨張の場合)もしくは外観観察(C-S-H の変質の場合)とする。

部分浸漬試験では外観観察と質量変化を指標とする。

上記はいずれも試験結果と現実の劣化状況の対応の情報に欠けており, 性能の優劣を定める絶対値を提示しにくいのが現状であるが, 目安は示す。

耐酸性試験については, 溶液種類や循環など難しい点もあり, 問題提起に止まる。

#### (4) ひび割れ抵抗性

ひび割れは温度応力とセメントペーストの長さ変化による拘束応力が組み合わさって発生する。温度応力の影響はモルタルによる断熱熱量計による測定により評価し, 低熱, 普通, およびそれ以上に相当する 3 区分とする。温度と拘束応力の影響は擬似断熱条件下におけるモルタルの拘束試験で評価し, 発生応力とひび割れの有無で 3 段階に区分する。

#### (5) 遮塩性

モルタルの浸漬試験を基本として, 浸漬試験による見かけの拡散係数を求め評価する。混合セメント B 種, 同 C 種が該当するような値を設定し 3 区分とする。

## 4. 施工・養生が混和材料を用いたコンクリートの性能に及ぼす影響に関する既往の知見と今後の課題 (WG3)

### 4.1 概説

コンクリート構造物がメンテナンスフリーなものではなく, 逆に早期劣化が生じる場合もあることが指摘され, 設計耐用期間において十分な耐久性を確保させることがコンクリート構造物に対する要求性能としてきわめて重要となった。このような耐久性重視への移行の中で, コンクリート構造物の施工工程で最も基本的な作業のひとつである「養生」がどうあるべきかという議論が活発化している。WG3 では, 混和材料を用いた場合の施工段階における養生のあり方を考える上で重要な諸点について, 既往の知見と今後の課題をまとめた。

### 4.2 混和材料を用いたコンクリートの性能について

#### (1) 細孔構造

図-5に, 普通ポルトランドセメント(OPC)とフライアッシュ(FA), 高炉スラグ(SI)の3種類の結合材を用いた硬化コンクリートの細孔構造に及ぼす養生条件の影響の一例を示す<sup>2)</sup>。この実験では, 合計で 180 日間の養生期間における気中養生(20°C, RH60%, 図中の記号 A)と水中養生(20°C, 図中の記号 W)の組合せをパラメータとし, 材齢 180 日における細孔分布を測定している。図-5によれば, いずれのコンクリートでも, 初期材齢における水中養生期間が短くなると大きな径の細孔量が増加することがわかる。また, 普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュ, 高炉スラグ微粉末のような混和材料に置換すると, 初期養生が細孔量の増加に及ぼす影響が顕在化することも同時に認められ, 混和材料を用い

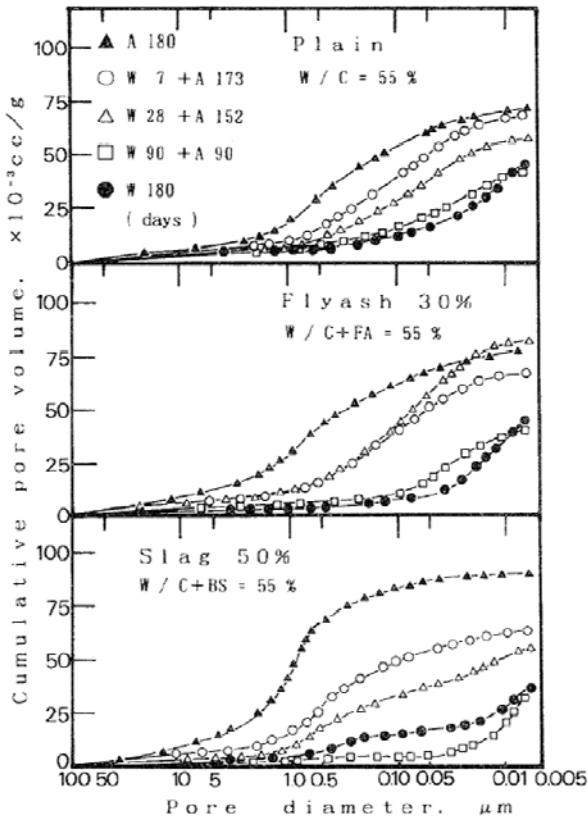


図-5 水中養生の期間がコンクリートの細孔構造に及ぼす影響<sup>2)</sup>

たコンクリートほど初期養生の重要性が高まるのがわかる。

### (2) 圧縮強度

洪, 嵩ら<sup>3)</sup>は、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、フライアッシュセメント B 種、高炉セメント B 種の 4 種類の結合材を用いて、水セメント比 55% のコンクリートを打ち込んだ供試体の脱型時期が、その後の強度発現に及ぼす影響について、脱型時期を材齢 2 日から 28 日に変化させて検討している。なお、脱型後の供試体は 20°C 恒温恒湿室に保管したことが述べられているが、湿度条件は明確ではない。

脱型時期と材齢 28 日 20°C 水中養生圧縮強度に対する強度比の関係を図-6<sup>3)</sup>に示す。材齢 2 日から 28 日の間に脱型した供試体の強度発現性状は、翌日脱型して 20°C 恒温恒湿室に保管したものと、全期間 20°C 水中養生したものの間に分布する。また、フライアッシュセメント B 種、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの強度比の分布幅は、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも広く、低熱ポルトランドセメントを用いた場合よりも狭い。よってフライアッシュセメント B 種、高炉セメント B 種を用いた場合は、初期の湿潤養生の影響が普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも顕著となると考えられる。

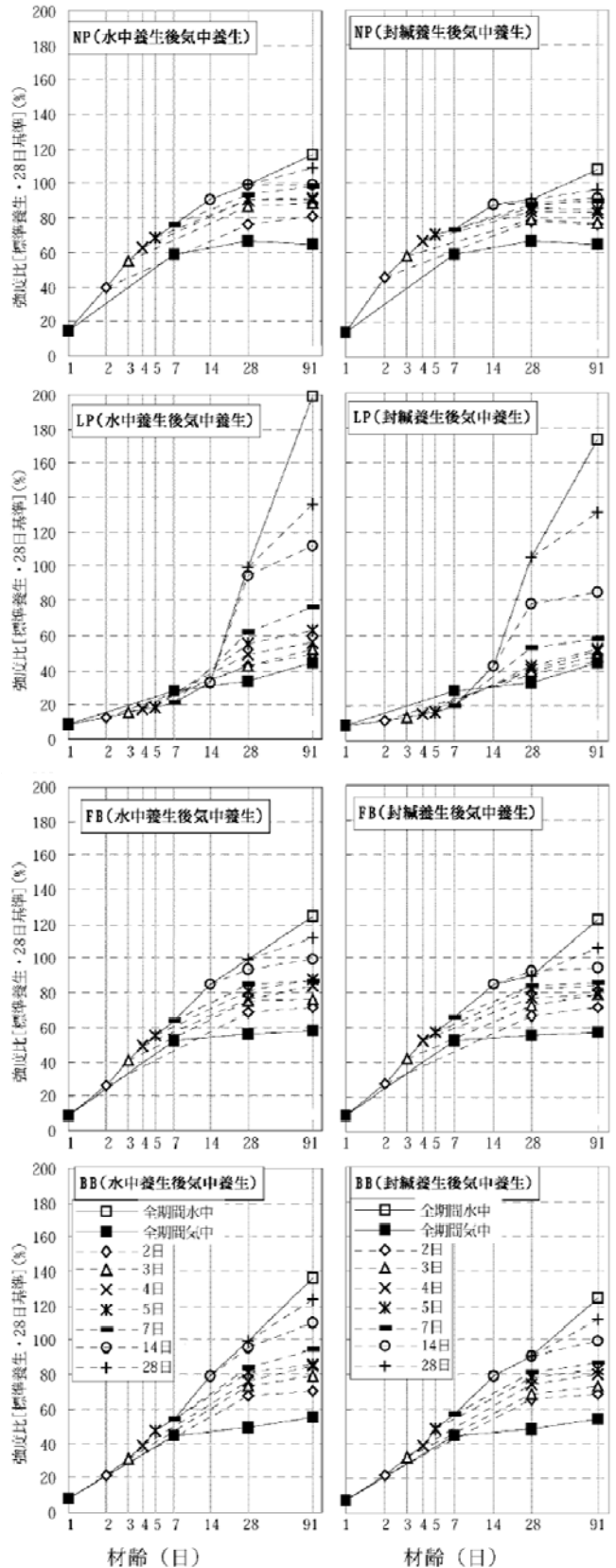


図-6 供試体の脱型時期が圧縮強度に及ぼす影響<sup>3)</sup>

### (3) 凍結融解抵抗性

上田, 濱ら<sup>4,5)</sup>は、普通ポルトランドセメント 100%、普通ポルトランドセメント:フライアッシュ=85:15 の 2 種類の結合材を用いて材齢 28 日まで 20°C 水中養生を行



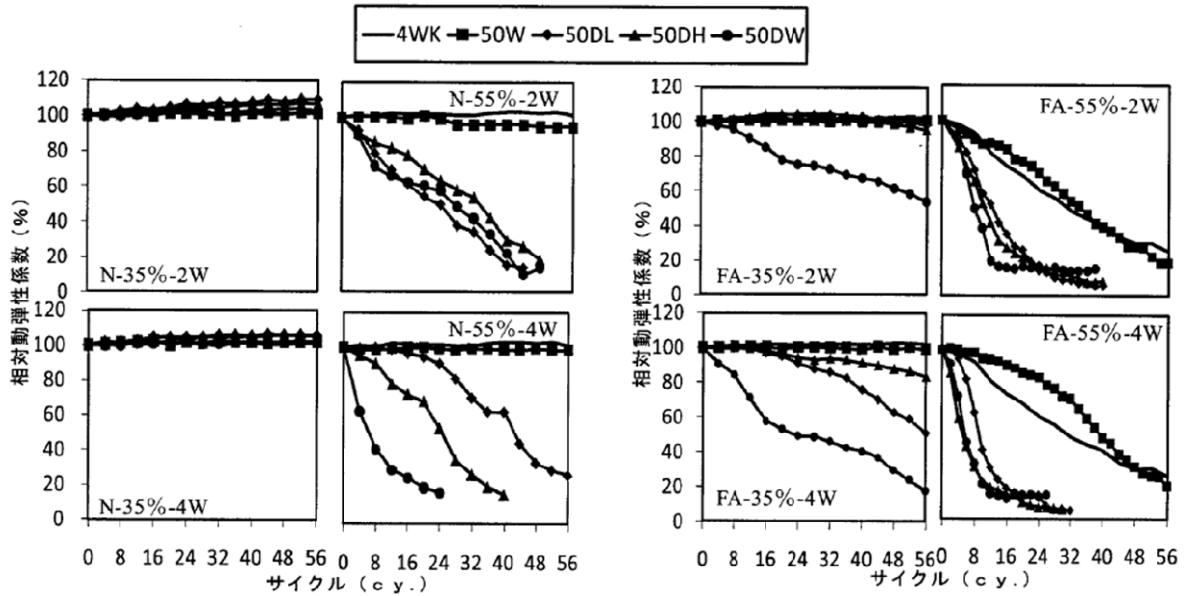


図-7 28日間の水中養生以降の養生条件と凍結融解抵抗性の関係 (左: OPC, 右: OPC/FA=85/15) <sup>4)</sup>

った水結合材比 35%および 55%のモルタル供試体 (40×40×160mm) を多数作製し, 28日以降の養生条件の違いが凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検討した。文献4に示されている28日間の水中養生以降の養生条件と凍結融解抵抗性の関係を図-7に示す。なお, 28日以降の養生条件は, 50℃水中 (図中の記号 50W), 温度 50℃, 湿度 5% (図中の記号 50DL), 温度 50℃, 湿度 60% (図中の記号 50DH), 温度 50℃, 乾湿繰返し (温度 50℃湿度 5%で3日, 50℃水中0.5日の繰返し, 図中の記号 50DW) の4種類であり, 試験材齢は28日以降の養生開始から2週間後と4週間後である。

図-7より, 水結合材比 35%という条件では, 普通ポルトランドセメントを 100%使用したモルタルの凍結融解抵抗性は, 28日以降の養生の影響を受けないことを明らかにした。しかしながら, フライアッシュを用いた水結合材比 35%のモルタルは, 28日以降に乾燥されると凍結融解抵抗性が低下する傾向が見られ, また, 水結合材比が 55%に大きくなると, この傾向はさらに顕著になっていることを示した。

### (3) 中性化抵抗性, 含水率, 透気性

石川ら <sup>6)</sup>は, 表-3に示すような水セメント比, 普通ポルトランドセメントに対するフライアッシュ置換率をパラメータとしたコンクリートで 600×600×250mm の壁試験体を製作し, 脱型時期を1日, 4日, 28日とした場合の各種物性を調べている。

材齢 91日 で壁試験体から採取した Φ150mm×250mm のコア供試体を採取し, 側面をコーティングした後に促

表-3 調合一覧 <sup>6)</sup>

	調合記号	W/C (%)	W/B (%)	S/a (%)	粗骨材かさ容積(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
						W	C	Fa	S	G
シリーズ I	P65	65	65	47.7	0.59	170	263	0	868	973
	F55-65		55	46.2			263	46	816	973
	F45-65		45	43.6			261	117	736	973
	P55	55	55	46.6			309	0	829	973
	F45-55		45	44.1			310	68	751	973
	P45		45	44.8			378	0	772	973
シリーズ II	P40	40	40	43.6	0.59	425	0	736	973	
	F30-40		30	40.9	0.52	425	142	624	922	
	P30	30	42.6	0.52	567	0	668	922		

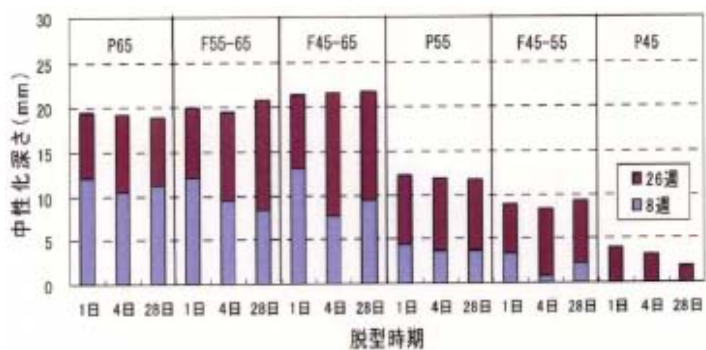


図-8 脱型時期と中性化深さの関係 <sup>6)</sup>

進中性化 (温度 20℃, 湿度 60%, CO<sub>2</sub> 濃度 5%) を行った結果を図-8に示す <sup>6)</sup>。この試験では, 測定材齢を促進期間 8週および 26週としており, 各材齢でそれぞれ 1本ずつのコア供試体を割裂して中性化深さを確認している。図-8より, 材齢 8週では脱型時期が早いと中性化深さが大きくなる傾向が見られるが, 材齢 26週になるとほとんど変わらない結果となったことがわかる。

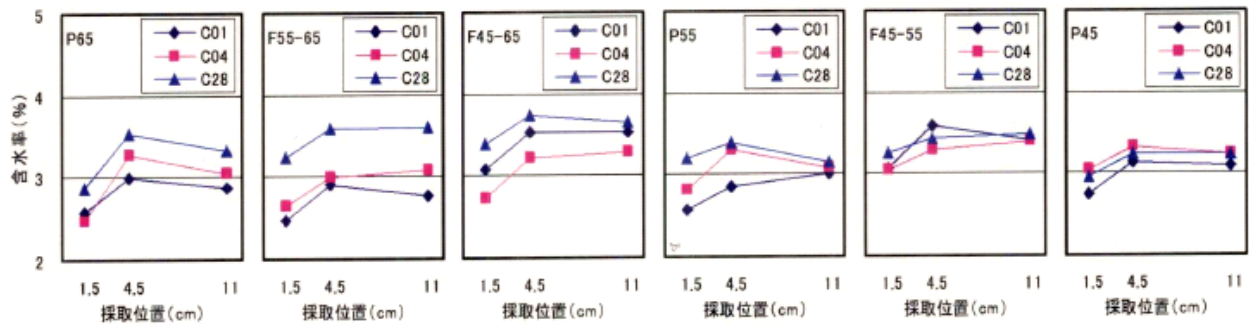


図-9 脱型時期と含水率の関係<sup>6)</sup>

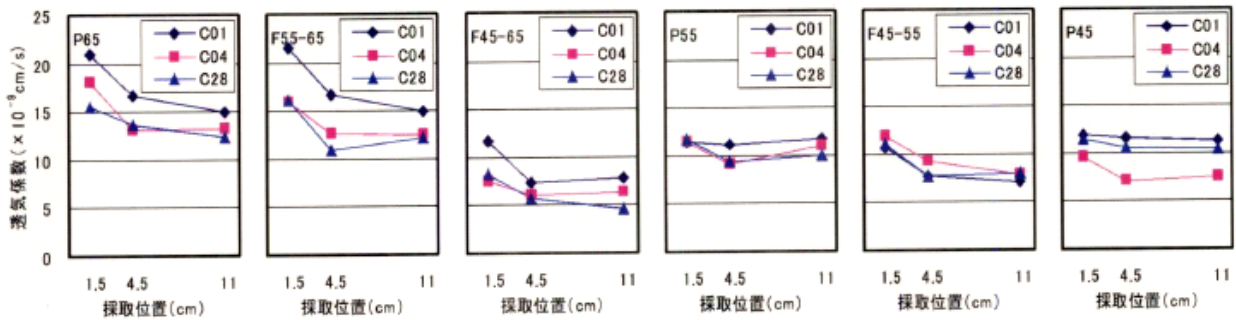


図-10 脱型時期と透気係数の関係<sup>6)</sup>

材齢 91 日で壁試験体から採取した  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  のコア供試体を切断し、 $105^\circ\text{C}$  乾燥で深さ方向の含水状態の違いを調べた結果を図-9<sup>6)</sup>に、透気係数を調べた結果を図-10<sup>6)</sup>に示す。測定結果にばらつきはあるものの、これらの図より、脱型時期が早いと材齢 91 日での含水率は小さくなり、透気係数は大きくなる傾向が見られる。この結果からは、少なくとも脱型が早いことが中性化抵抗性に良い影響は及ぼさないことが推察できる。

### 4.3 混和材料を用いたコンクリートの施工上の課題

#### (1) コンクリートの性能と施工・養生の関係から

WG3 では、コンクリート構造物の施工作業のうち、特に養生を中心として混和材料を用いたコンクリートの性能の評価に関する検討を行ってきたが、審議を進めるにしたがって、以下のような議論に帰着することとなった。

すなわち、混和材料を使用したコンクリートは、適切な養生をしっかりと行えば、普通ポルトランドセメントを単独で使用したコンクリートよりも優れたパフォーマンスを示すことは明らかである。しかしながら、混和材料を用いたコンクリートが本来の性能を発揮するために必要な養生が不十分であると、その性能が十分に発揮できないだけでなく、場合によっては普通ポルトランドセメントを単独で使用したコンクリートよりも低い性能しか発揮できない場合がある。

ここで、セメントの水和反応の経時的な進行を考慮すると、セメント硬化体という複合材料は時系列的に性能が変化すると考えるのが妥当であり、したがって、施工

時に養生不足であっても、供用開始段階あるいは供用期間中の水和反応の進行により、初期段階において獲得できなかった性能が補完されることが期待できそうである。

しかしながら、既往の研究報告の事例からは、このような性能の補完は、細孔構造、圧縮強度さらには耐久性に関わる物性に至るまで期待できず、特に耐久性に関しては、いわば後遺症のごとくに初期の養生不足の影響が露骨に現れてしまうことが明らかである。

以上のことから、混和材料を用いたコンクリートについては、普通ポルトランドセメントを単独で使用したコンクリートよりも、より入念に養生条件などを吟味し、本来の性能が発揮できるような施工方法を堅持することが肝要であることが結論付けられた。

#### (2) 評価法について

混和材料を用いたコンクリートの諸物性に関する既往の研究報告のレビューの結果、これまで暗黙知のように一般的に認識されてきた「強度が確保されれば耐久性も同様に確保される」という考え方については、特に混和材料を用いたコンクリートに関してはあてはまらない事例が多かった。したがって、コンクリートの性能の評価についても、従来の脱型強度や設計基準強度などの強度による管理・評価だけでなく、耐久性に関する評価を区別して実施工にも取り込み、積極的に評価していく必要があると思われる。

例えば、外来劣化因子から鉄筋を保護する上で重要となる表層部分(かぶり)については、強度よりむしろ耐



久性が要求される部分であり、一方で主筋より内部にあるコンクリートについては、力学的性能の確保の観点から、強度が要求される部分と見なすことができよう。このように、コンクリート構造物の性能評価においては、部分ごとでコンクリートに求められる性能が異なるので、これらを区別して評価するような体系の構築が望ましいと考えられる。

残念ながら、現段階ではこのような提案に対して明確に対応することが可能な評価体系は構築されていないのが現状であろう。しかしながら、近年、表層部コンクリートの耐久性については、トレント法やコンクリートの電気的性質を応用した方法などの知見が得られつつあり、これらの手法を中心とした評価体系の構築に期待が持てると思われる。

## 5. 混和材料を用いたコンクリートの物性に関する研究の現状および施工実績と指針類の整備状況(WG4)

### 5.1 活動概要

WG4では、混和材料として高炉スラグ、フライアッシュ、シリカフェームおよびそれらを組み合わせた多成分系材料を取り上げ、それらの材料を用いたコンクリートの性質のうち収縮特性と中性化特性を中心として研究の現状を取りまとめた。また、それらの材料を用いた施工事例の収集および指針や各種仕様書などでの取扱い方について調査を行った。最後に、これらの材料の今後の利用に向けての展望に関して提案を行った。

### 5.2 混和材料を用いたコンクリートの性能調査

#### (1) 対象としたコンクリートの要求性能と調査範囲

コンクリートに要求される性能は数多くある。その中で混和材料を用いたコンクリートでは乾燥収縮と中性化が問題となっている。すなわち、高炉スラグを用いたコンクリートについては、近年スラグ微粉末の粉末度が上がりそのため、収縮量が大きくなっていることが指摘されている。また、中性化については一般に中性化速度が普通ポルトランドセメントを用いたものよりも速いとされている。一方、フライアッシュを用いたコンクリートでは、単位水量の低減効果と併せて乾燥収縮が低減でき、ひび割れの抑制効果があるとされている。しかし、フライアッシュを用いたコンクリートの中性化速度は、一般に普通ポルトランドセメントを用いたものよりも速いとされている。シリカフェームは、わが国では、主に流動性および強度の改善を目的として低水結合材比の高強度コンクリートに用いられている。そこでは、自己収縮の増大が指摘されている。

以上より、混和材料を用いたコンクリート要求性能とし

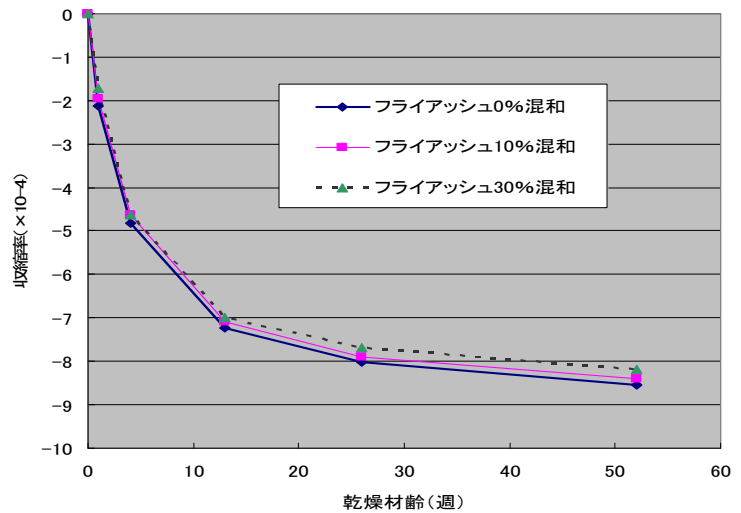


図-11 乾燥収縮試験結果(単位水量一定)<sup>7)</sup>

ては、高炉スラグおよびフライアッシュでは、収縮特性と中性化特性に絞ることとした。また、シリカフェームについては収縮特性のみを対象とすることにした。さらに、これらを組み合わせた多成分系については、一般的にいろいろな要素が絡み合うため、これらの特性にこだわらずに全ての要求性能を対象とした。

対象とした既往文献は、1993～2008 までの約 15 年間に発行された土木学会論文集、土木学会年次学術講演梗概集、日本建築学会論文報告集、日本建築学会学術講演会梗概集、日本コンクリート工学協会年次論文報告集である。なお、高炉スラグおよびフライアッシュの収縮については、同様な比較検討を実施するため、コンクリートでの乾燥収縮試験の 26 週値が計測されているものを基本とした。また、乾燥収縮試験結果と前提となる配調合条件、骨材条件を一体としてデータベースを構築するように努めた。

#### (2) 文献調査のまとめ

##### 1) 収縮特性について

混和材料を用いてコンクリートの収縮量を計測している研究は少なく、乾燥収縮と自己収縮を同時に計測している研究はさらに少なかった。

##### i) 高炉スラグ

高炉スラグを用いたコンクリートの乾燥収縮量は普通ポルトランドセメントコンクリートと同程度であるが、養生期間の影響が大きく、養生期間を十分にとった場合に乾燥収縮量は小さくなる。また、小さい水結合材比で粉末度が高いほど、自己収縮は大きい傾向が報告されている。

##### ii) フライアッシュ

フライアッシュを用いたコンクリートに関しては、配(調)合の決定方法が2通りあり、単位水量一定の場合と、スランプ・フロー一定の場合に分類して整理・検討

した。単位水量一定の場合は、図-11<sup>7)</sup>に示す例のようにフライアッシュの混和量を変化させたとしても大きな違いは生じない結果を示すものが多かったが、少なくなるという結果も見受けられた。一方、スランプ・フロー一定とした場合は、フライアッシュの形状効果から生じる単位水量低減効果が見込まれるため、フライアッシュを混和したもののほうが、乾燥収縮量が小さくなる傾向が見られた。しかし、混和率による収縮低減率を定量的に推定するにはデータが不足しており、また自己収縮の試験データも少なく、今後は収縮量データの蓄積を図っていくことが望まれる。

### iii) シリカフェーム

シリカフェーム混和コンクリートでは、水和反応およびポズラン反応の進行に伴う水分消費が起るが、硬化体組織が緻密になるため、水分移動が起り難い。従って硬化体内部で自己乾燥が生じ自己収縮が起り易くなるため、シリカフェームの混和により自己収縮は大きくなるとの報告が多い。また、シリカフェームの品質が自己収縮に影響を及ぼすことも報告されている。

### iv) 多成分系

高炉セメントB種にフライアッシュを20%置換することによって、材齢13週の乾燥収縮量は大幅に低減され、その低減率は高炉セメントB種を使用したケースに比べて50%程度に達するとの試験報告がある。また、フライアッシュを置換することにより、ひび割れ抵抗性が改善されることも確認されている。ただし、試験条件として、高炉セメントB種とフライアッシュ混合高炉セメントをそれぞれ使用したコンクリートの単位水量および水結合材比が異なっているため、上述したような収縮低減およびひび割れ抵抗性の改善は一概にフライアッシュによる効果であると断定することはできない。

事実、単位水量と単位結合材量を同一条件とした場合、高炉セメントにフライアッシュを置換することによる収縮低減は10%程度に過ぎないといった事例も報告されている。いずれにしろ、今後このような多成分系の試験例を増やし、収縮量の低減効果の検証をし、その可能性を模索していくことが重要である。

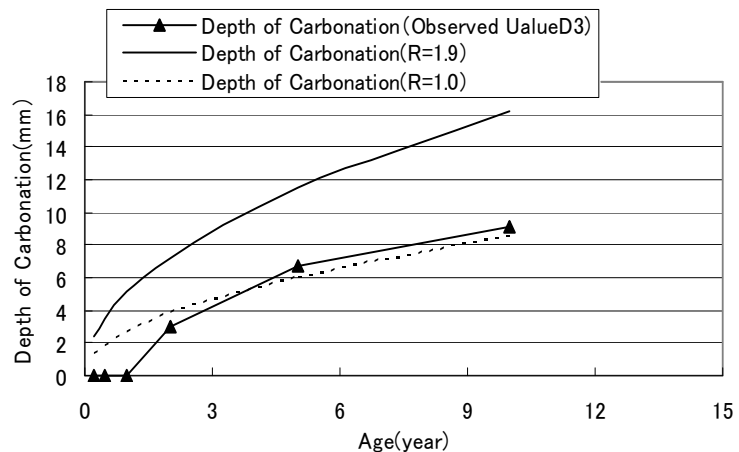


図-12 曝露試験体の中性化 (岸谷式: R=1.9 (FA), R=1.0 (OPC))<sup>8)</sup>

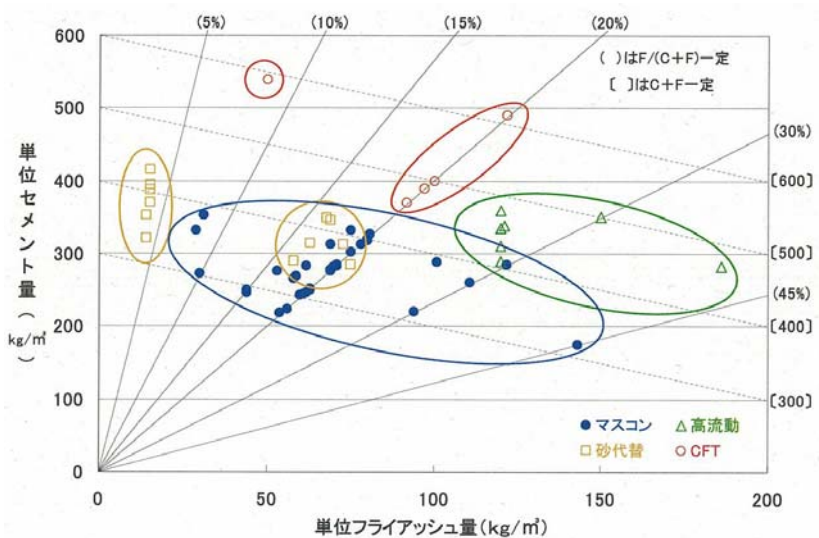


図-13 単位フライアッシュ量と施工分野の関係

### 2) 中性化特性について

中性化については、促進試験ではなく、屋外曝露試験体および実構造物から採取した試験体の中性化を取り上げた。特にフライアッシュ等の混和材料を用いる場合は、コンクリートの強度発現が遅れ、組織が緻密化する以前に、促進試験の過酷な状況下におかれるため、実構造物での中性化より中性化速度を過大に評価してしまう傾向があるためである。

混和材料を用いた屋外曝露試験体および実構造物から採取した試験体の中性化の計測事例は少ないが、本WGでは、文献対象期間にかかわらずできるかぎりデータを収集した。フライアッシュでの計測事例の一例として、図-12<sup>8)</sup>に示す10年までのデータを報告する。ほぼ普通ポルトランドセメントと同様な中性化速度係数が得られるものと考えられる。今後、これらの計測事例を増やし混和材料を用いたコンクリートの中性化特性の評価を変えていく必要があるものと思われる。

### 5.3 混和材料を用いたコンクリートの利用状況

#### (1) 施工実績の収集と使用用途の解析

主に国内での施工例を中心として、混和材料を用いた実施工の事例をできるかぎり配調合のデータを合わせて収集し、整理した。

高炉スラグについては、高炉スラグ微粉末の混和率がほぼ一定のため明確な傾向分析はできなかったが、フライアッシュについては、図-13に示すように混和したフライアッシュの単位量により、その工事の用途が大まかに区分できることが明確になった。多成分系については明石海峡大橋、ランドマークタワー等の施工について調査した。

また、海外事例については、中国を中心として三峡ダム、上海ファイナンスビルディング、煙台でのセメント工場での用途別配調合の例などのデータを収集し、海外では、我が国に比べて混合セメントの使用比率が高く、一般的に使用されていること確認した。

#### (2) 混和材料の指針・仕様書の整備状況

国内の学会、協会等の指針、仕様書の中で混和材料がどのように使われているのかを調査した。高炉スラグについては、土木関連の工事仕様書に使用が明記されているものが多いが、フライアッシュについては記載されているものはあまりなかった。一方、建築関連では工事に積極的に混和材料を使用するというような記載をしている例はほとんど見られないが、「住宅の品質確保の促進等に関する法律（住宅品質法）」では、フライアッシュおよび高炉スラグの記載がある。しかし、告示に従うと高炉セメントの場合では水セメント比を7~8%小さくする必要があり、単位セメント量が著しく増加し、コンクリートの品質および経済的にも不利となることが予想され、鉄鋼スラグ協会では国土交通大臣の特別評価方法認定を取得して高炉スラグの使用を緩和している。一方、フライアッシュについては、「フライアッシュセメントを使用する場合にあっては混合物を除いた部分」となっており、フライアッシュの混和の効果が考慮されておらず高炉スラグに比較して対応が遅れていると言える。

### 6. まとめと将来に向けてのコメント

セメントは、その主原料である石灰石が地球上に比較的均一かつ大量に分布しているため、世界中で同じ品質のものが得られ、建設産業の主要な素材の地位を確立している。しかし、最近の地球規模での温暖化問題が指弾されるのに伴い、セメント産業から発生するCO<sub>2</sub>排出量が多いことが問題視され、高炉スラグやフライアッシュなどの水硬性を有する混和材料の使用が望まれてきている。なお、混和材料の有効利用は、石灰石資源の枯渇防止のため古くから研究や実用化がなされてきているが、

わが国であり普及していない。

その原因の一つとして、中性化速度が速い、収縮ひび割れが顕在化するなどの問題点が指摘されている。

本委員会でも、WG1でコンクリートのひび割れ抵抗性に関して検討を行い、コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性は乾燥収縮量のみでは判断できず、クリープや収縮ひび割れの発現速度なども大きな影響を与えるため、拘束ひび割れ試験による評価が適していることを示した。WG1で検討した改良試験法は、比較的容易に収縮ひび割れ抵抗性を把握することができ、多様な混和材料を用いた際に、収縮ひび割れの実務レベルでの制御を行うため、構造と施工の適切な計画の立案に寄与することから、混和材料の適用拡大への貢献が期待される。

また、改良試験法を用いた共通試験の結果の分析に基づき、従来系統的な知見に乏しかったひび割れ抵抗性を与える混和材料の影響について、定量的解明への糸口が得られると考えられる。

一方、WG4では混和材料を使用したコンクリートについて、収縮特性および中性化特性を中心として、基本的な性状をとりまとめ、現状の課題を整理し得た。その結果、混和材料を用いたコンクリートの収縮特性および中性化特性についての基礎的なデータ、特に実構造物でのデータが不足してことが判明した。その中で、屋外曝露試験体および実構造物から採取した試験体の中性化データから、フライアッシュを用いても普通ポルトランドセメントと同様な中性化速度係数が得られるという既往の室内での促進試験結果と異なる知見も得られ、今後さらなるデータ蓄積を図り、混和材料の影響の実態を把握することが急務と考えられる。

なお、海外での事例調査から、海外では我が国に比べて混合セメントが一般的に使用されており、わが国の実態が特異であることが確認された。その原因として、近年における施工の急速化や普通ポルトランドセメント中心のコンクリートの製造・施工システムから混合セメント中心のシステムへの移行に対する制度上の問題点や認識の低さが挙げられる。

高炉スラグやフライアッシュなどの混和材料は、一般に普通ポルトランドセメントに比べ水和反応が遅いため初期の強度発現が遅く、混和材料の長所を十分に発揮させるためには、普通ポルトランドセメントより養生期間を長くとる必要があり、これが普及の大きな障害となっていた。このため、粉末度を高めるなどの措置がなされたが、反面収縮ひび割れの誘因ともなり、施工からの見直しが必要と考えられていた。本委員会でも、WG3において施工・養生が混和材料を用いたコンクリートの性能に及ぼす影響について検討しており、「本来」有する性能と「実際」に有する性能との観点から施工を見直してい

る。すなわち、従来のコンクリートの品質管理では、20℃の水中で養生するという条件が原則となっている。しかし、20℃の水中で十分に養生されたコンクリートが示す諸物性値は、その材料が「本来」持っている性能である。したがって、その性能はプラントで製造されたコンクリートが現場まで運搬され、圧送、打込み、締固め、仕上げ、脱型そして養生の各工程を経て施工されたコンクリートの「実際」の性能を有しているかを直接表現しているものではない。

なお、水和反応速度の遅い混和材料を用いた場合には、施工時に養生不足であっても、供用開始段階あるいは供用期間中の水和反応の進行により、初期段階において獲得できなかった性能が補完されることが期待される。しかし、既往の研究事例からは、混和材料を用いたコンクリートの耐久性に関しては初期の養生不足の影響がむしろ顕在化することが明らかになり、普通ポルトランドセメントを単独で使用したコンクリートよりも、より入念に養生条件などを吟味し、本来の性能が発揮できるような施工方法を堅持することが肝要であることが判明した。

ここで、「構造物で具体化されたコンクリートの性能を適切に把握するにはどうすればよいか？」さらに、「混和材料を用いたコンクリートの場合にはどのような点に留意すればよいか？」との疑問が湧くが、この問いに対しては、現段階にあっても統一見解をまとめるには至っておらず、従来の強度による管理・評価だけでなく、耐久性に関する評価を区別して実施にも取り込み、積極的に評価していく必要があると思われる。

さらに、混和材料の積極的な活用には制度の整備も重要である。本委員会のWG4の調査結果によれば、有効利用ができていない原因として、発注側の仕様規定の中に、混和材料を用いることに対する制限が存在していることがあげられる。混和材料を使用したコンクリートの性状についての十分なデータ蓄積を行い、明確な性能保証を提案するとともに、制度上の制限を緩和していかなければならない。

高炉スラグ、フライアッシュ、石灰石微粉末、シリカフェームほかを単独で使用せずに多成分系で使用する場合も想定される。このような場合、成分系ごとの規格策定はあまりに組合せが多く非現実的である。そこでセメントに求められる本質的な性能を照査する品質規格が必要となる。本委員会でも、WG2において米国のASTM C1157を雛形にして、本質的な要求性能を満たす多様なセメントに対応した性能照査型セメント品質規格の試案を提案した。評価項目によっては作用機構が完全に解明されていない点、各項目の評価法が確立していない点、コンクリートの挙動と評価方法の対比データの欠如による品質クラスの指標値の不確実性、さらにセメント性能

のコンクリートでの発揮のさせ方など不明確な点は多々あるが、その点は十分に説明することとし、現状での技術レベルから提案を行った。このような、革新的提案は現状の市場原理に必ずしも沿うものではなく、将来の循環型社会での市場をにらんだ理想論的なものである。

事実、ASTM C1157の利用は必ずしも進んでおらず、米国やカナダでは革新的規格ではなく、現実のセメント規格を拡張すること、たとえば石灰石微粉末の添加範囲の拡大などで混合材料の添加範囲を緩和していく方策に傾いており、混和材料の利用拡大の一つの方向性を示すものと考えられる。

以上述べたように、今後使用者や施工者の同意を得て普通ポルトランドセメント中心のコンクリートの製造・施工システムから混合セメント中心のシステムへの移行し混和材料の普及を促進するためには、混和材料の「本来」の性能を発揮させるための作用機構など基礎研究の充実と、実構造物での「実際」の性能を担保できる施工システムの構築や制度や規定面での緩和など、産学官が一体になった多面的からの検討が必要と考える。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告，2002
- 2) 川村満紀，鳥居和之，五十嵐心一，藤井 剛：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートにおける養生条件の塩素イオン透過性に及ぼす影響，材料，第38号，第431号，pp.79-84，1989.8
- 3) 洪 杰，假屋園礼文，全 洪珠，志村重頭，嵩 英雄：低発熱形セメントを用いたコンクリートの強度発現に及ぼす養生の影響に関する研究 その1 圧縮強度及び静弾性係数に及ぼすセメントの種類と養生の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.809-810，2002.8
- 4) 上田尚人，新 大軌，濱 幸雄：モルタルの硬化後の環境変化が細孔構造と耐凍害性に及ぼす影響—フライアッシュを用いた場合—，日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.979-980，2008.9
- 5) 上田尚人，塚田智昌，新 大軌，濱 幸雄：モルタルの耐凍害性に及ぼす環境変化養生の影響—普通ポルトランドセメントとフライアッシュセメントの場合—，日本建築学会北海道支部研究報告集 No.81，pp.1-2，2008.6
- 6) 石川嘉崇，榊田佳寛，大野義照，名和豊春，小山智幸，船本憲治：フライアッシュコンクリートを使用した構造体コンクリートの諸性質に関する実験的研究 その4 壁状構造体から採取したコア供試体の中性化，日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.473-474，2005.9
- 7) セメント協会：ひびわれ専門委員会報告，1992
- 8) 石川嘉崇，榊田佳寛，嵩英雄：フライアッシュコンクリートを使用した長期暴露試験体の中性化，第49回日本学術会議材料連合講演会講演論文集 pp.145-146，2005.9