

委員会報告 混和材積極利用によるコンクリート性能への影響評価と施工に関する研究委員会

十河茂幸*1・河野広隆*2・野口貴文*3・近松竜一*4・宮澤伸吾*5・鳴瀬浩康*6・三井健郎*7

要旨：地球環境に対する配慮や資源の有効利用の観点から、建設分野においても環境負荷の低減に向けた副産物の活用が社会的な要請となっており、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを利用した混合セメントの利用拡大や「混和材」としての積極的な利用が望まれている。これら材料の品質や利用方法は JIS や各種学会等の施工指針で制定されており、利用できる条件は整っているが、現状では広く実用されているとはいえない。本委員会では、これらの副産物をコンクリート用材料として積極的に利用するための課題を整理し、それぞれの課題を解決するための方策を提示するとともに適用拡大に向けた取組みについて提案することを目的に活動を実施した。

キーワード：混和材, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 性能評価, 施工, 耐久性

1. 委員会の目的

地球環境に対する配慮や資源の有効利用の観点からは、建設分野においても環境負荷の低減に向けた副産物の活用が社会的な要請となっている。

高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産物は、セメントの一部と置換して用いることでコンクリートの品質を改善する効果があり、混合セメントの「混和材」として古くから用いられている。一方、これらの効果をより合理的に付与するために、使用目的に応じて材料の品質や置換率を使い分ける「混和材」としての積極的な利用が望まれている。

高炉スラグ微粉末やフライアッシュは、コンクリート用材料としての品質が JIS にそれぞれ規定されている¹⁾²⁾。また、土木学会や建築学会ではこれらを用いたコンクリートの施工指針等が制定されている^{3)~7)}。このように混和材として利用できる条件は整っているが、現状では広く使用されているとはいえない。

そこで、本委員会では、これらの副産物をコンクリート用混和材として積極的に利用するための課題を整理し、それぞれの課題を解決するための方策を提示するとともに、適用拡大に向けた取組みについて提案することを目的に活動を実施した。

2. 委員会の活動概要

2.1 活動方針およびWG構成

本委員会の構成は表-1の通りであり、材料WGと施工WGの2つを立ち上げ、以下のような方針のもと活動を行った。

- ・対象とする混和材は高炉スラグ微粉末およびフライアッシュとする。
- ・使用の形態は、混和材を前提とするが、実情を考慮して混合材も含める。
- ・科学的な視点から混和材の品質、コンクリートの品質への影響を評価する。
- ・混和材を用いたコンクリートの製造や施工上の留意点と対応策を検討する。
- ・実情を踏まえつつ、将来のあるべき姿を見据えて積極利用のための方向性を志向する。

2.2 材料WGの活動概要

材料WGでは、2年間で計7回WGを開催し、主に高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの利用を拡大する上で以下のような課題を抽出し、課題解決に向けた方策を検討した。

(1) コンクリートの性能に及ぼす混和材の影響評価

混和材を用いたコンクリートは、強度発現性、ひび割れ抵抗性、中性化速度、耐久性等が一般のコンクリートと異なる。特に、コンクリートの性質に及ぼす混和材の影響は環境温度の影響を強く受ける。従って、混和材を使用する場合は、これらの事項は適切に把握しておくことが不可欠であり、そのためには科学的知見に

*1 広島工業大学 工学部都市デザイン工学科教授 工博 (正会員)

*2 京都大学 工学研究科都市環境工学専攻教授 博(工学) (正会員)

*3 東京大学 工学系研究科建築学専攻准教授 博(工学) (正会員)

*4 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 博(工学) (正会員)

*5 足利工業大学 工学部創生工学科教授 博(工学) (正会員)

*6 三菱マテリアル(株) セメント研究所 (正会員)

*7 (株)竹中工務店 技術研究所建設技術開発部 博(工学) (正会員)

表 - 1 委員会構成

<p>委員長：十河茂幸（広島工業大学） 幹事：河野広隆（京都大学），野口貴文（東京大学）</p> <p>【材料 WG】 主査：宮澤伸吾（足利工業大学），副査：鳴瀬浩康（三菱マテリアル），幹事：野口貴文（東京大学） 委員：新 大軌（東京工業大学），石川嘉崇（電源開発），石田哲也（東京大学），伊代田岳史（芝浦工業大学），川島恭志（住友大阪セメント），伊達重之（日本シーカ），名和豊春（北海道大学），二戸信和（ダイ・シイ），吉澤千秋（JFE ミネラル）</p> <p>【施工 WG】 主査：近松竜一（大林組），副査：三井健郎（竹中工務店），幹事：河野広隆（京都大学） 委員：浦野真次（清水建設），大郷貴之（東日本旅客鉄道），鹿毛忠継（建築研究所），梶田秀幸（前田建設工業），黒岩秀介（大成建設），佐藤幸恵（東京都市大学），谷口秀明（三井住友建設），檀 康弘（日鉄住金高炉セメント），野島昭二（高速道路総合技術研究所），桧垣 誠（フローリック），三宅淳一（JP ハイテック），渡辺博志（土木研究所）</p>

基づいた評価を行うことが必要である。

(2) 混和材を用いたコンクリートの品質評価試験

混和材を用いたコンクリートの品質は、一般のコンクリートと同様の試験方法により評価が行われることが多い。しかし、試験条件によっては評価結果が大きく異なる場合があり、さらに試験結果と実構造物における性能が乖離する場合も少なくない。そこで、混和材を用いたコンクリートの試験方法、特に養生方法を考慮した強度発現やひび割れ抵抗性、中性化速度等の試験方法について課題を明確にしておく必要がある。

(3) 混和材の利用の現状

混和材のコンクリートへの利用拡大を図るためには、使用の現状を把握することが重要である。特に、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの利用形態（混合セメントか混和材か）、主な適用部材や構造物の種類、地域差、供給体制についての現状を把握するとともに、課題を明確にし、利用拡大に向けた方策を検討する必要がある。

(4) 法令や規準類における規定

混和材を用いたコンクリートを使用する場合にクリアすべき法令や基準類について整理しておくことは、混和材の利用拡大に向けて重要な課題である。特に、地球環境負荷低減に関連する法令、制度、基準類については、混和材の利用に関わる事項が少なくない。混和材を取り巻く CO2 削減、資源有効利用、廃棄物処理などの幅広い観点から、法令や規準類に関わる課題の整理を行う必要がある。

2.3 施工 WG の活動概要

施工 WG は、2 年間で計 8 回 WG を開催し、各種の混和材を積極利用したコンクリートの製造や施工における課題と対応策を検討した。これらを項目別に整理し、以下に示す。

(1) コンクリートの品質を確保するための対策

混和材を使用するメリットがあっても、デメリットがあれば敬遠される傾向にある。特に混和材の使用により強度発現やひび割れ抵抗性にマイナスの影響が生じる場合にこれらをどのように補うかが課題となる。また、副産物の場合は材料自体の品質が変動することは避けられない場合も多く、変動を前提とした上での利用が求められる。

(2) 供給体制および製造設備

高炉スラグ微粉末やフライアッシュは製造拠点が国内でも偏在している。地産地消型の材料で、セメントのように全国的に流通できる体制が整備されていない。また、レディーミクストコンクリート工場でこれらを混和材として使用する場合には、材料の貯蔵設備を確保する必要がある。一般的なレディーミクストコンクリート工場では、種類が異なるセメントを使用できるよう複数の貯蔵ビンが設置されているものの、空きがないことも多く、混和材の使用に際して調整が必要となる場合がある。

(3) 使用形態

高炉スラグ微粉末は、高炉セメント B 種の混合材としての利用が主で、混和材としての使用実績は少ない。フライアッシュはダム工事で多くの使用実績があり、コンクリートを製造する際にセメントの一部と置換して用いられているが、最近はセメントとプレミックスした混合セメントとして供給される事例も多い。

一方、フライアッシュを骨材の代替として使用する事例がある。また、最近ではフライアッシュを細骨材の微粒分の補充材としての混合使用も検討されている。混和材を結合材ではなく粉体としての機能を活用して積極的に利用する場合はその取扱いについて検討する必要がある。

(4) 製造、施工時の取扱い

土木工事では、混合セメントで規定されている混合材の置換率より大きい範囲での使用事例もある。一般のコンクリートとはかなり品質が異なるため、製造や施工時の取扱いに留意すべき課題も多い。特に、耐久性やひび割れに対する施工上の配慮として養生が課題である。

建築工事では、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを混和材として使用する事例は必ずしも多くない。積極利用に対して強度発現や中性化がマイナスの要因とされ、施工時の養生が課題となる。

3. 委員会成果の概要

この委員会の活動成果を報告書にまとめた。また、平成 25 年度に講習会を開催し、活動成果を公表する予定である。

委員会報告書は 3 つの章から構成される。混和材の利用拡大に向けた提案について、両 WG での審議内容を踏まえ幹事団で整理し、1 章で記述することとした。2 章は混和材を積極利用するためのシステムのあり方について、材料 WG が主体となってとりまとめた。3 章は混和材を積極利用に対応した施工のあり方について、施工 WG が主体となってまとめた。

3.1 報告書の目次構成

報告書の目次構成を以下に示す。

【本編】

- 1 章 混和材の利用拡大に向けた提案
 - 1.1 利用の目的
 - 1.2 実用上の制約
 - 1.3 積極利用に向けた提案
- 2 章 混和材の積極利用に向けたシステムのあり方
 - 2.1 設計における課題と提案
 - 2.2 材料の規格における課題と提案
 - 2.3 コンクリートの規格における課題と提案
- 3 章 混和材の積極利用に対応した施工のあり方
 - 3.1 混和材の供給上の課題と提案
 - 3.2 混和材を用いたコンクリートの製造上の課題と提案
 - 3.3 混和材を用いたコンクリートの施工上の課題と提案

【資料編】

- 資料 1 混和材の利用の実状
- 資料 2 混和材を積極利用したコンクリートの最近の研究成果
- 資料 3 混和材の使用事例
- 資料 4 各種構造物における混和材の適用事例
- 資料 5 海外における混和材利用の現状

3.2 混和材の利用拡大に向けた提案

3.2.1 制度・設計のあり方

(1) 制度上の課題

混和材をコンクリートに積極的に利用していくためには、法令や規準類の役割は極めて大きいと言える。例えば、「都市の低炭素化の促進に関する法律(低炭素促進法)」においては、混和材の利用による CO₂ 削減を評価し、その利用拡大を図る配慮がなされている。また、土木分野では、グリーン調達法の制定により、公共工事への高炉セメントの利用拡大に繋がった経緯もある。その他、エコマーク認定制度、CASBEE、各自治体のエコ製品認定制度の制度もある。

これらの制度は、高炉セメントやフライアッシュセメントの使用が、資源有効利用や CO₂ 削減に繋がることが評価されている。しかし、このような制度が存在するものの、混和材の利用拡大に十分に結びついていない面もあり、今後、さらなる検討が望まれる。一方、標準化により地産地消でなくなり、運搬によるエネルギーが増えるという側面もあるので、全国一律の基準ではなく、必要に応じてローカルルールとすることも有効である。

海外の混和材に関する規格として、特に ISO の規格化の動向について紹介した。ISO/TC71(「コンクリート、鉄筋コンクリート、プレストレストコンクリート」に関する専門委員会)においてはフライアッシュおよびシリカフェームについて規格化の作業が進められている。また、コンクリートの発注および製造に関する ISO 規格として ISO 21965 (Concrete) が 2007 年に制定されているが、反応性、強度発現性、塩分浸透抵抗性、中性化抵抗性などへ混和材の貢献度を k-value として表わすこととしている。本報告書では、フライアッシュや高炉スラグ微粉末に対する k-value の ISO 推奨値および適用条件について整理した。

(2) 土木構造物における設計上の課題と提案

土木学会コンクリート標準示方書では、2013 年の改定において、混合材を用いたコンクリートの耐久性を適切に評価するために、塩化物イオン拡散係数の設計用値の見直しを行っている。混和材を用いたコンクリートの塩化物イオン浸透に関する研究成果を紹介するとともに、コンクリート標準示方書の改定内容との関連を整理した。

一方、コンクリート標準示方書では、混和材を用いたコンクリートの中性化速度係数の設計用値は、普通ポルトランドセメントのみを用いた場合と比べて大きい値に設定されている。これに対して、実構造物では OPC と大差ない調査結果が少なくないが、まだデータの蓄積が十分でないことから、今回の改訂に反映され

ていない。今後、実構造物における中性化に関するデータを蓄積するとともに、混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性を適切に評価するための促進中性化試験方法に関する研究も必要である。

道路橋示方書においては、使用材料として、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメント、混和材にはフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の使用を考えている。通常は、下部構造では高炉セメントを用いるとしているが、高炉セメントを用いる場合には、養生条件によっては強度や耐久性が損なわれる場合があることが記述されている。また、高炉セメントコンクリートの収縮やクリープ特性について必ずしも明確になっていないので、使用を考えると試験が必要となる。しかし、道路橋示方書には高炉セメントコンクリートの収縮やクリープの設計用値が提示されていないため、試験結果が普通あるいは早強ポルトランドと相違する場合では適用の判断が難しくなる。今後、混和材を用いたコンクリートの使用実績を蓄積することが重要であり、そのために混和材の積極利用を促す制度面での工夫が望まれる。

(3) 建築物における設計上の課題と提案

建築物においては、建築基準法において建築材料としての品質について定められている。すなわち、建築物の基礎や主要構造部材では、コンクリートは JIS 規格に適合するもの、もしくは大臣認定を受けたものであれば使用できるものとしている。

「住宅の品質確保の促進等に関する法律」においては、中性化による鉄筋の発錆および凍結融解作用による劣化を評価の対象とし、劣化対策等級や部材に応じて水セメント比の上限を規定しており、水セメント比の算定の際に、セメントの質量として、フライアッシュの質量を除き、高炉スラグの質量の 0.3 を除くこと

としている。これに対して、特別評価方法認定により、部位やかぶりによっては、水セメント比の算定にあって高炉スラグの質量は除かない、こととして認定されている事例もある。

3.2.2 セメント混合材としての積極利用

(1) 低炭素社会に対応したセメントの利用促進

セメントの国内需要が低迷・停滞している状況で、セメント業界は産業廃棄物や副産物の処理技術で社会貢献も含めて環境に極めて大きく貢献している。現在、図-1 に示すように、セメント 1 トン当たりの原料として 450 kg 以上の産業廃棄物・一般廃棄物を使用しているポルトランドセメントの製造プロセスに、これ以上の廃棄物を使用するには、品質の確保の面等を含めて、新たな処理技術の開発が必要である。しかし、CO₂ 低減のために消費量が膨大な建設材料、特にセメントに対して更なる CO₂ 低減対策を求める社会的要請が強まっている。国策として混合材利用を拡大することも環境対策として進められている。先ごろ成立した「都市の低炭素化の促進に関する法律」（低炭素促進法）を受けて、国土交通省、経済産業省、環境省の 3 省による「低炭素建築物認定基準を策定する会議」により認定基準素案において、選択できる認定項目の中に「高炉セメントまたはフライアッシュセメントを構造耐力上主要な部分に使用していること」が示されている。

図-2 は、普通ポルトランドセメントの一部を高炉スラグやフライアッシュで置換した場合の CO₂ 排出量を、セメント強さ一定という条件のもとに試算した例である。セメントは製造に伴い CO₂ を大量に発生させることは間違いなく、エネルギー効率の面で最高水準の CO₂ 削減を既に成し遂げているポルトランドセメント製造では、混合材の拡大や混合セメントの利用推進は、有効な CO₂ 削減方策であると考えられる。

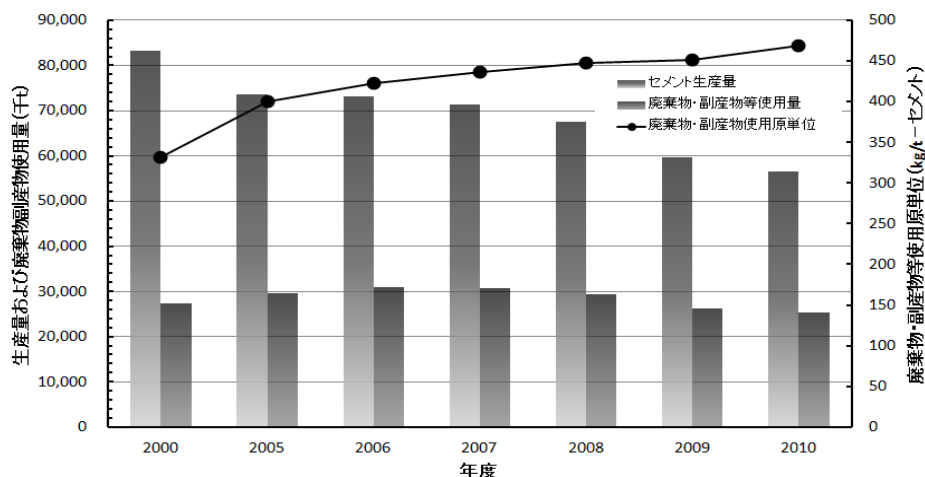


図-1 セメント生産量と廃棄物等活用量の推移

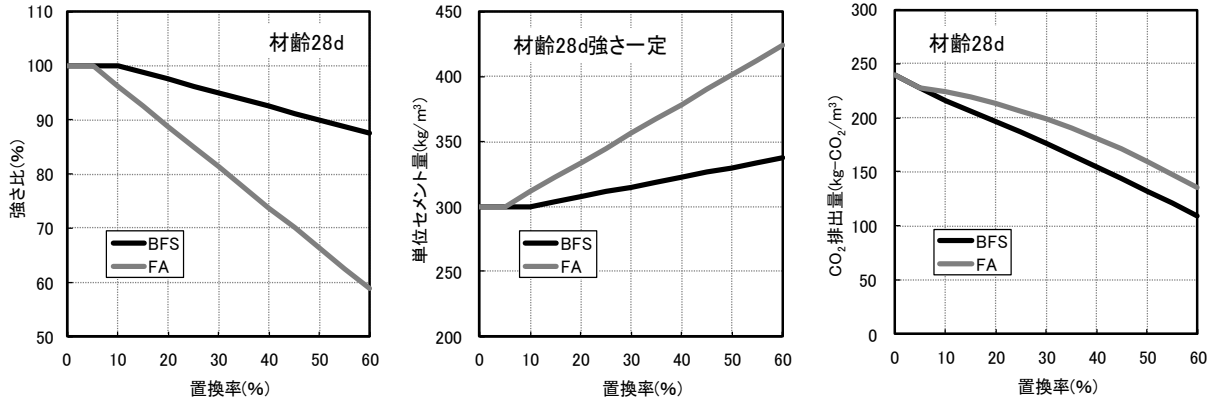


図 - 2 高炉スラグ及びフライアッシュの置換率に対応したモルタル強さ比、単位セメント量、CO₂ 排出量の関係に関する試算例

現在の国内のセメントの規格では ISO 等と異なり、強度の上限値規定はなく区分もされていないため、施工時の強度発現だけを重視する傾向にあり、コンクリートの耐久性が重んじられていないという現実がある。最近のコンクリートの早期劣化問題として具現化しているセメント自体の強度増加にともなう発熱増での温度ひび割れ発生や、単位水量が多くなることによる乾燥収縮ひび割れの増加などはこの影響も一因であると考えられ、混合材枠を拡大して、適所に適切な使い方をすることで耐久性面からの効能が引き出される可能性もある。昨今の低炭素を目指した混合材系セメントの研究においても、現行の普通ポルトランドセメントと同等の“強度発現性”を前提に議論されているものもあるが、普通ポルトランドセメントよりも強度の発現性が遅いものでも、それ以外の耐久性などの部分で性能が向上するようなセメントが許容されるならば、混合材、混和材としての利用を増やすことができるものとする。

さらには、我が国のセメントの需要の増加がさほど大きく見込めない状況の中では、廃棄物処理や副産物処理量を確保あるいは増加でき、かつ混合材の使用量を増やすことができるクリンカーの開発等も必要である。

(2) 混和材としての供給面での利用促進

高炉スラグやフライアッシュ等の混和材の供給に関して、セメントにプレミクスする以外に単味で供給する場合には、混和材の供給元での出荷の対応が必要となり、全国的に普及させるためには配送システムの設置が必要不可欠である。セメントの国内需要がピーク時の半分以下となっている状況の中では、セメント供給用の配送基地（SS）で閉鎖や用途変更をしている箇所もあり、それらを有効に利用することで、混和材

単味での普及が可能となる。また、現状では任意の混合材量とすることでの供給が非常に難しい対応となっているが、SSでの混合供給体制とすることで、用途に応じて任意の混合率での供給対応が可能となる。ただし、この場合には、品質に対する責任の所在、トレーサビリティの確保等、様々な課題はある。

フライアッシュに関しては、発電所やそこで使用する石炭の種類等の違いにより品質の変動が大きい。特に含まれる未燃カーボン量に抛りコンクリートの空気連行性に大きく影響することが課題である。フライアッシュは従来特定の発電所から供給がなされていたが、最近、アッシュセンターで複数の発電所の石炭灰を集めて品質を均質化して出荷する試みがなされている。使用者側は一定の品質のものを常に入手できるようになり、また、アッシュセンターに一定量のフライアッシュが確保されるので、ニーズに応じて供給することを計画的に進めることが可能となる。このようなアッシュセンターを国内に広く配置していくことで、品質と供給の安定が可能となる。

3.2.3 混和材を積極利用した場合の施工のあり方

結合材としてセメント代替で混和材を多量に用いれば、コンクリートの発熱量が小さくなり、マスコンクリート構造物に適したコンクリートとなる。また、アルカリシリカ反応の抑制や塩化物イオンの浸透抑制、凍結融解抵抗性の向上など、各種混和材の使用効果を活かし、環境負荷の低減にも配慮したコンクリートとすることができる。

一方で、混和材を多量に使用したコンクリートは、一般のコンクリートとはフレッシュ時、硬化後の品質に及ぼす環境や施工上の影響を受けやすい。特に、混和材はセメントに比べて活性度が低く、副産物であるが故に材料としての品質の変動が生じることもやむを

得ない面があり、運搬、打込みおよび締固め、仕上げ、養生に至る施工のプロセス毎に留意すべき点も多い。以下に、混和材の積極利用に向けた施工のあり方について提案した。

(1) 施工条件に配慮したワーカビリティの設定

一般に、混和材を多用したコンクリートはこれを用いないコンクリートより同一の流動性を得るために必要な単位水量が小さくなる。しかし、時間の経過に伴って流動性が低下し、粘性が増大する傾向にある。このため、荷卸し中あるいは圧送時の加圧による流動性の低下に対する配慮が求められる。また、粘性の違いによって振動締固め特性にも差異が生じることを踏まえ施工条件に応じたワーカビリティを設定することが重要である。なお、最近では流動性の経時変化を低減できる混和剤も実用化されており、必要に応じて材料上の対策として活用できる。

(2) 浮き水やこわばりを考慮した仕上げ時期の設定

混和材を多用したコンクリートはこれを用いない場合に比べ凝結が遅くなる傾向にある。一般に凝結が遅くなるとブリーディングの発生が多くなり、天端面の浮き水が増える。表面仕上げのタイミングが早いと、仕上げ後に沈下ひび割れが生じる場合がある。

一方、混和材を多用することで保水効果が高まりブリーディングがほとんど生じない場合もある。ブリーディングが過度に少ないと高強度コンクリートの場合と同様に天端面から水分が逸散して表層にこわばりが生じ、表面を均一に仕上げるのが難しくなる。

これらのように、混和材を多く用いた場合には、保水性と凝結特性の違いによって仕上がり面の状態に相違が生じるので、仕上げ時期の適切な見極めが重要といえる。なお、ブリーディングが少なく表層にこわばりが生じる場合には、乾燥防止の観点から高強度コンクリートの場合と同様に膜養生剤を散布する等の対策も有用である。

(3) 湿潤状態の保持対策と密実性の評価手法の確立

養生に関しては、一般のコンクリートにおいても温度条件に応じた湿潤養生期間が定められている。混和材を多用した場合に、硬化後の強度等が一般のコンクリートと同等にするためにはこれらの期間より必然的に湿潤状態を確保すべき期間が長くなる。

本来コンクリート構造物として必要な性能を確保するために必要な養生方法について、養生の影響範囲やその湿潤状態や期間を定める必要があり、そのためには密実性等を定量的に評価し、従来の養生に関する仕

様規定との相関を明確にすることが望まれる。

混和材を多用した場合には、一般に材齢初期における強度発現が小さく、特に乾燥状態に曝された場合には長期的な強度増進効果に悪影響が生じることが明らかにされており、封かん状態を維持する、あるいはより積極的に給水する等の湿潤状態を保持するための対策技術を講じることが必須といえる。

4. おわりに

コンクリートは初期の二酸化炭素の排出は多いものの耐久性が高く、長期的にみると比較的地球にやさしく、安全・安心を提供する建設材料である。このコンクリートを構成する結合材として、産業副産物である多くの混和材(あるいは混合材)が用いられてきたが、副産物であることによる品質の安定性や地域性、さらには施工面での制約などから、必ずしも積極的に使用されていない一面がある。しかし、地球環境への影響や資源の有効利用の観点から、さらなる混和材の活用が望まれる。

なお、本委員会では、活動初年度の2011年12月26日に「混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム」⁸⁾を開催した。本シンポジウムでは、広く情報収集および意見交換を行って委員会活動に反映させることを目的とし、一般応募による27編の論文発表とともに有意義な意見交換が行われた。

参考文献

- 1) コンクリート用高炉スラグ微粉末(JIS A 6206:2013)
- 2) コンクリート用フライアッシュ(JIS A 6201:2008)
- 3) 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案,コンクリートライブラリー第86号,1996.6
- 4) 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第94号,1999.4
- 5) 日本建築学会:高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説,2001.7
- 6) 日本建築学会:高炉セメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説,2001.7
- 7) 日本建築学会:フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説,2007.10
- 8) 日本コンクリート工学会:混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム,2011.12