

委員会報告 セメント系材料・骨材研究委員会の活動と成果の概要

坂井 悦郎^{*1}・久田 真^{*2}・山田 一夫^{*3}・永山 勝^{*4}

要旨：セメント系材料や骨材の現状と今後の動向について作用機構，実態調査，規格関連の 3 作業部会を設置し検討を行った。セメント系材料については，現状と技術の変遷を整理するとともに廃棄物処理量の増大や CO₂ 削減対策などを踏まえて，汎用セメントの今後の方向性を検討した。また，良質の骨材の入手が困難状況となっている骨材については，新しい劣化現象も含めて現状を整理するとともに，鉱物学的・地球化学的観点から再整理した。また，セメント系材料と骨材の評価方法についても，諸外国の規格も含めて再整理し，今後の必要と考えられる試験方法についてもまとめた。

キーワード：セメント系材料，廃棄物処理，骨材，鉱物学的観点，評価方法，劣化現象

1. はじめに

産業廃棄物の処理量の増加に伴う間隙質を増加させたセメント，あるいは CO₂ 削減対策や ISO 対応としての混合セメントなど，将来においては汎用セメントが変化して行く可能性がある。骨材については，輸入骨材が増加する可能性があることや，従来の骨材反応性評価では十分とは言いがたい非常に長期の耐久性が要求される構造物の構築が検討されるなど，鉱物学的な観点からの骨材の再整理も必要となっている。また，諸外国では，アルカリ骨材反応に加えて，硫酸塩環境における，石灰石骨材による新たなソーマサイト生成によるコンクリート構造物の劣化なども報告されている。以上のような状況より，将来の汎用セメントとして可能性のある各種セメント系材料を調査するとともに，汎用セメントのあるべき姿を議論すること，および新たな骨材の関与する劣化現象を調査するとともに，骨材を鉱物学的な観点から再整理することおよびその評価方法を再整理することを目的として，本研究委員会を設置し平成 15 年度～平

成 16 年度において調査・研究活動を行った。ここでは，委員会活動の報告を行うとともに，委員会報告書の概要を紹介する。

なお，委員会成果を広く普及するため，平成 16 年 9 月 28 日に講習会を開催する予定である。

2. 委員会活動

本委員会の委員構成を表—1 に，また，委員会報告書の目次を表—2 に示す。

作用機構，実態調査および規格関連の 3 作業部会を設置し，調査・研究活動を実施した。作用機構 WG（主査：山田幹事）では，セメント系材料，骨材に関する作用・劣化機構の整理と，科学的な作用機構に基づく現行の試験方法や材料自体の問題点等を抽出した。また，実態調査 WG（主査：久田幹事）では，各種材料の品質の実態，建設資材のマテリアルフロー，構造物と劣化の関係について，規格値の歴史的な変遷なども関連させて実態と将来予測をまとめた。さらに，規格関連 WG では（主査：永山幹事），セメント系材料，骨材に関する国内の規格のほか，

*1 東京工業大学大学院理工学研究科 材料工学専攻 助教授 工博 (正会員)

*2 東北大学大学院工学研究科 土木工学専攻 助教授 博士 (工学) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 セメント化学チーム リーダー 博士 (工学) (正会員)

*4 (財)日本建築総合試験所 試験研究センター 材料部長 博士 (工学) (正会員)

表—1 委員構成

委員長：坂井悦郎（東京工業大学）
 幹事：久田真（東北大学），山田一夫（太平洋セメント），永山勝（日本建築総合試験所）
 委員：井ノ川尚（住友大阪セメント），今本啓一（足利工業大学），伊興田紀夫（太平洋セメント），上野敦（首都大学東京），大脇英司（大成建設），岸利治（東京大学），菅俣匠（エヌエムビー），須藤定久（産業技術総合研究所），近田孝夫（新日鉄高炉セメント），近松竜一（大林組），鳥居和之（金沢大学），長岡誠一（住友大阪セメント），名和豊春（北海道大学），野口貴文（東京大学），濱崎仁（建築研究所），林大介（鹿島建設），三井健郎（竹中工務店），山本武志（電力中央研究所），山路徹（港湾空港技術研究所），吉田和隆*，辻本一志**（全国生コンクリート工業組合連合；*平成15年度，**平成16年度），吉岡一弘（トクヤマ）
 事務局：井上和久

委員会報告書目次（続き）

2. 7 施工技術
 2. 7. 1 運搬技術
 2. 7. 2 圧送技術
 2. 7. 3 締固め・養生技術
 2. 7. 4 その他の技術
 2. 8 耐久性
 2. 8. 1 塩害
 2. 8. 2 中性化
 2. 8. 3 アルカリ骨材反応
 2. 8. 4 化学的侵食
 2. 8. 5 凍害
 2. 8. 6 溶脱
 2. 9 土壌環境
 2. 10 まとめ
 3. 作用機構と反応機構
 3. 1 概要
 3. 2 セメント
 3. 2. 1 概要
 3. 2. 2 従来セメント
 3. 2. 3 近未来セメント(高A1など)
 3. 2. 4 今後のセメント性能のあり方
 3. 3 骨材
 3. 3. 1 骨材品質の再整理(岩石学)
 3. 3. 2 ASR
 3. 2. 3 ASR以外の反応メカニズム
 3. 2. 4 石灰石の再定義と微粉
 3. 4 粉体
 3. 4. 1 粉体の分類と役割
 3. 4. 2 フレッシュ性状
 3. 4. 3 硬化体，耐久性
 3. 5 その他
 3. 5. 1 硫酸塩劣化
 3. 5. 2 溶脱
 3. 5. 3 鋼材腐食
 3. 5. 4 高性能減水剤の相性
 3. 6 まとめ
 4. セメント系材料，骨材の品質評価法
 4. 1 概要
 4. 2 現行規格類とその課題
 4. 2. 1 セメント系材料
 4. 2. 2 骨材
 4. 2. 3 アルカリ骨材反応試験
 4. 3 海外規格と日本規格
 4. 3. 1 アジア諸国における規格
 4. 3. 2 欧米における規格
 4. 4 今後望まれる試験方法
 4. 4. 1 セメント系材料
 4. 4. 2 骨材
 4. 5 まとめ
 5. セメント系材料，骨材に関わる今後の課題

表—1 委員会報告目次

1. はじめに
 2. セメント系材料，骨材の実態と技術の変遷
 2. 1 概要
 2. 2 セメント
 2. 2. 1 ポルトランドセメント
 2. 2. 2 各種セメント
 2. 3 骨材
 2. 3. 1 砂利・砂（川・陸・山・海）
 2. 3. 2 砕石・砕砂
 2. 4 各種骨材
 2. 4. 1 軽量骨材
 2. 4. 2 スラグ骨材
 2. 5 混和材料
 2. 5. 1 混和材
 2. 5. 2 化学混和剤
 2. 6 コンクリート製造
 2. 6. 1 レディーミクストコンクリート
 2. 6. 2 各種製造技術

海外の規格（大市場であるアジア地域も含めて）も調査対象として規格の体系について整理した。また、アルカリ骨材反応試験方法について、鉱物学的に明らかな骨材を用いて共通試験を実施し、現状の試験方法の問題点なども抽出した。以上の調査研究の成果を基に、セメント系材料や骨材の性能や品質規格や試験方法などのあるべき姿について検討を加えた。

3. セメント系材料・骨材の実態と技術の変遷

セメント系材料や骨材に関して、使用量統計の推移、技術の変遷、全国と地域との使用量格差などの実態を明らかにすることを試みた。また、耐久性関連で新たな劣化事例がある場合には、これを実態としてまとめることとした。

セメントの使用量統計ならびに品質の推移については、1998～2000年度にまとめられた JCI 長期耐久性委員会報告書がある¹⁾。ここでは、その内容を発展させ、使用量の推移との関連性から、これまで使用されてきたセメントの変遷を明らかにした。なお、セメントに関する過去の資料から、明治期からの品質、生産量等についても取りまとめた。さらに、最近の動向として、新たに規格化されたエコセメント、塩化物イオン規制値の緩和、規格化が検討された石灰石フライセメントなどについても触れた。

海外のセメントの実情として、一昨年に 5%未満の石灰石微粉末添加が認められた北米のセメント事情、強さクラス 32.5 が過半数を占める欧州の事情、性能的にも組成についても多種多様なアジア圏でのセメントについてもまとめた。膨大なセメントを消費しているアジア圏でも強さクラス 32.5～42.5 が主流であり、最新工場では日本と同様な 52.5 クラスのセメントに多種の混合材を添加して、32.5～42.5 クラスのセメントを製造している。一方では、中国の場合には、小規模の豎釜などで製造された本質的に強度が低いセメントが流通するなど、32.5～42.5 クラスと言っても、一つの言葉で表すのは不可能な状況となっている。

日本の国土全体（約 3778 万 ha）の約 72%が骨材の採掘が可能なエリアであるが、このうち国有林（全体の約 20%）、国立・国定公園（同約 8.9%）および保安林（同約 25.6%）は採掘不可の地域であり、実際の骨材採掘可能地域は非常に限定されている。当然のことながら、わが国の岩種分布は経済活動（≒建設活動）の分布とは異なり、コンクリート用材料としての骨材品質の良否と分布・埋蔵量とに直接的な関連性を見出すことは困難である。しかしながら、今後の更なる資源の枯渇化を考慮すると、骨材の実態については、岩種分布も適切に把握しておくことは重要である。

骨材の統計情報では、実際には採掘場所の岩脈が変化しても、当初届けられる岩種のままである。また、海外からの骨材輸入も行われており、細骨材の粒度調整等にも用いられているものの、その品質については、十分に把握されているとはいえない。これらの状況を鑑みて、骨材に関する調査で供給量、使用量のほか、統計情報に関連すると思われる各規格の変遷についても取りまとめた。なお、対象とする骨材は、砂利、碎石のほか、スラグ骨材などとし、再生骨材は調査の対象外とした。

その他に、コンクリートの運搬技術、圧送技術、締固め・養生技術、その他の技術（型枠工・自動化等）などの施工技術や、耐久性にかかわる長期にわたる実験、土壤環境などに関して、これまでの成果の概略を中心に取りまとめた。

4. 反応機構から考えたセメント系材料・骨材のあるべき姿と劣化現象

セメント系材料と骨材に関する現状の各種規格や規制値について、作用機構や反応機構の観点から再考した。規格値の根拠は必ずしも科学的に明確ではないものもあり、制定時における経験、技術レベル、および経済性に基いた工学的判断による場合も多い。一方、材料を取り巻く環境の変化や、研究の進展により、規格制定時から著しく事情が変化している場合もある。

そこで、セメント系材料や骨材に関連した種々の規格や規制値について、現在の研究レベルや作用機構や反応機構から再考した。

セメントに関しては欧州規格 EN197 が制定され、ISO 原案として検討されている。日本の規格とは大きく異なる点もあり、その内容について科学的観点から整理することは意義がある。特に、セメント強さのクラス分類、汎用セメントに含まれる多様な混合材、高い塩化物イオン規制値や高い SO_3 規制値などである。

日本の普通ポルトランドセメントは、ISO の 52.5 クラスの最も強さの高いクラスになる。しかし、汎用コンクリートのワーカビリティを考慮すると粉体量確保が必要で、発熱や収縮を考えると低い強さクラスのセメントの方が、その製造に適している。また、現在の高炉セメントは、市場要求に基づき 28 日などの初期強さを普通ポルトランドセメントと同等にするため、高粉末度化やスラグ混入量の低下などにより、本来高炉セメントが有していた低発熱という特性を損なっている。これらの状況を鑑みると強さ制御型のセメントは短所もあるが、汎用セメントとして利用できる可能性を有している。また、5%未満の少量成分や強さクラス制御用の粉体としては特定の供給源を考えるのではなく、地域に応じたものを利用し、セメントの性能で規定することも考えられる。また、塩化物イオン規制値については、コンクリートの規制値との関連を述べ、コンクリートの塩化物イオン規制値を欧米流のセメント質量に対する割合という表記を用いることで、詳細な検討は必要であるが、塩化物イオンの規制値が、さらに緩和できる可能性を示した。セメント中の SO_3 最適量はセメント中の空隙質量に対応するものとするのが反応機構的には合理的であることを示した。これらは、今後、予想される産業廃棄物処理量を増大させ、空隙質量が増大したセメントが汎用セメントとなった場合には、重要な技術課題となる。セメント産業は、建設資材としてのセメントの供給という役割に加えて、各種廃棄物の有

効利用としての役割も果たすようになってきた。セメント産業なくしては資源循環型社会の構築は困難であるとも言える。セメント原料として各種廃棄物をセメント 1 トンあたり 400kg 使用する目標が提示されている。このような廃棄物利用がもたらすセメントやコンクリートの性能への影響を考察し、環境貢献への要請とコンクリート工学的制約とのバランスの観点からも考察した。廃棄物利用を進めると、廃棄物の化学組成を反映しセメントは高 Al_2O_3 (アルミナ) のセメント組成となる。近未来のセメントとして、このような廃棄物をより多く使用したセメントの性能をコンクリートとしての要求性能を満たすように調整する方法も提案されている。また、セメントの鉱物組成を粉末 X 線回折法のリートベルト解析により明らかにする方法も紹介した。超高強度、高流動というような高品質コンクリートと汎用的なコンクリートに適するセメントは区別して考える必要がある。低アルミネート型の低熱ポルトランドセメントは廃棄物利用の観点からは非常に不利になる。

次に、コンクリートにおける骨材の基本的性能として、何が重要であるかを再考した。まず、骨材の品質確保と安定性の確認の基本として、岩石学的評価の必要性を提案した。骨材は従来ローカルに安定供給されていた時代から、国際的な大規模な流通も起きている時代へと変化している。従来は均一とみなしていた骨材は、アルカリ骨材反応の観点からは評価法の見直しが必要であり、骨材の本質的評価方法として、岩石学的評価は重要である。骨材の性質には粒度分布という側面もある。生コン工場での骨材の保管状況次第では、分離により流動性やワーカビリティに違いが生じる。さらに、骨材中に含まれる粉体の制御も重要である。砕石と砕砂が使用される場合が増加しており、一般には骨材形状が悪いため、ワーカビリティが悪く、従来以上の粉体量が必要となっている。この粉体量確保のために、粉体には低反応性でありかつ有害な有機物や粘土鉱物が含まれないことが重

要である。

アルカリ骨材反応(ASR)の反応機構の観点からも骨材を再考した。現在、日本では岩石学的評価は義務付けられておらず、化学法とモルタルバー法、もしくはオートクレーブを用いた迅速法が広く用いられている。これらは世界的流れとは一致しない。化学法で無害でも膨張する事例もあるし、その本質的ばらつきを考えると骨材評価法を再考する必要がある。膨張試験としては、融氷剤や海塩など外来のアルカリの影響を考慮することが必要で、飽和食塩水を用いたデンマーク法などが必要と考えられる。また、ペシマム現象を評価することも必要である。ASR 判定の不確実さと外来アルカリを考えると、反応性骨材の排除やアルカリ総量規制ではなくポゾラン物質による対策が重要と考えられる。ここでは、ポゾラン物質の ASR 抑制効果などについての最近の研究も紹介した。

骨材の関与する劣化には ASR 以外に、沸石塊の吸水膨張や硫化鉄の酸化によるポップアウトなどもあり、これらについてもまとめた。骨材資源の枯渇から各種の代替骨材が検討されている。これらの骨材にはコンクリートとしては一定の性能を保持できるものの JIS にある密度の規制が遵守できないものもあり、密度の意義を再考した。

アルカリ骨材反応性がなく、低膨張率で温度ひび割れにも有効な石灰石骨材は、通常の骨材とは異なる側面を持つ。石灰石骨材として求められる品質について考察し、微粉末量の制限の緩和、有機物含有量と純度に関する規制を提案した。

コンクリート中における粉体の意義を再考した。考察は、フレッシュコンクリートでの役割と硬化コンクリートでの役割に分けて行った。フレッシュコンクリートでは、望ましいワーカビリティを得るためにコンクリート中に必要な粉体という観点から、粉体の種類、目的、要求性能についてまとめた。硬化コンクリートでは、主にはポゾラン活性を有する粉体の効果をまと

めた。特にフライアッシュに関して、ASR 抑制効果を評価する方法について紹介した。さらにフライアッシュの ASR 抑制効果を作用機構からまとめた。

その他として、硫酸塩劣化、溶脱、鋼材腐食、減水剤とセメントとの相性についてまとめた。

硫酸塩劣化については、その分類を明確に示した。さらに、従来の遅延エトリンサイト生成(外来硫酸イオンによる場合と高温養生による場合がある)による膨張に加え、炭酸塩が存在する場合に起きるソーマサイト生成による C-S-H の分解による劣化についても解説した。また、ソーマサイト硫酸塩劣化の判定方法と日本における危険性についても考察した。

溶脱については、水理構造物などでの状況と核廃棄物保管施設など超長期の予測が必要な場合について現状の技術をまとめた。

鋼材腐食については、発錆の物理化学的側面から考察を加えた。鋼材発錆は原理的には鋼材が接するコンクリート中の空隙水の $[Cl^-]/[OH^-]$ に依存すると考えられる。セメントには塩化物イオンを固定化する性質があり、コンクリート中の塩化物イオン規制がセメントに対する質量割合で行われることの妥当性を示した。欧米の規格との比較も示し、国内ではコンクリート総量で示される根拠について整理した。

セメントと高性能 AE 減水剤の相性現象についても触れた。これは水セメント比が高い汎用コンクリートでは限定的であり、低水セメント比となる場合に顕著となる。セメントにより初期水和活性、粒度分布、フレッシュコンクリートとしての液相組成が異なり、これらに対する各種減水剤の感度が異なり、相性現象が起きる。対策としては、低水セメント比のコンクリートでは低熱セメントなど品質がより安定しているセメントや相性現象を起こしにくい減水剤を使用したりすることが好ましい。

5. セメント系材料・骨材の品質評価法

新材料の出現や原材料の品質の変化など流動

的な現実を的確に評価するためには、現行の品質評価方法および試験規格を改善することや新規の規格を検討することが必要となってくる。

また、既往の評価方法や規格によって、材料の品質が正しく評価されないような懸念も一部ではみられ、近い将来の骨材供給体制や流通ならびに期待される品質表示など踏まえて、現行規格類を整理することとした。

セメントについては、EN 規格が制定され ISO 原案として検討されている現状を踏まえて、強さのクラス分類、混合材の組成、塩化物量および SO_3 規制値など、日本規格との特徴的な差異を比較検討した。

骨材については、委員会活動の一環として各種のアルカリ骨材反応試験を実施した。試験を行なった岩種は、安山岩・チャート・凝灰岩であり試料合計は7種である。試験方法は JIS 化学法、JIS モルタルバー法、JIS 迅速法の他、諸外国で主流となっている ASTM C 1260 およびデンマーク法（修正デンマーク法）などの促進膨張試験を行なった。この結果、日本の現行試験規格では適切な判定が下せないケースも認められた。これら評価手法上の改善のためには、まず岩石的評価や分類を踏まえて、現行の3試験方法に加えて、デンマーク法（修正デンマーク法）や ASTM C 1260 の方法を利用することで、より適切な評価が可能である知見を得た。

また、骨材の品質基準や試験方法については、密度・粒度・吸水率などの物理的特性値を実態に整合させることや基準値の緩和を含めてより適切に評価する必要性がみられ、さらに改善が望まれる規格類について整理した。

日本の規格類は、これまでに ISO などの国際規格との整合が図られてきたが、セメント系材料や骨材関係では日本独自の規格が未だ多く存在している。近年、国内資源の枯渇化や環境保護の背景を反映し、近隣のアジア諸国から細骨材を大量に輸入している状況にある。近い将来も資源を国外から調達する動向にあるため、日本規格とアジア諸国との規格上の差異を理解す

る必要が急務である。また、試験結果として数値化された値の相互関係を承知したうえで、各種材料の品質を検討することも必要である。

アジア諸国の規格として、中華人民共和国、韓国、台湾、フィリピン、ベトナム、マレーシア、シンガポール、バングラデシュ、スリランカ、オーストラリア、ニュージーランド、ロシア、タイ、インドネシア、香港を、欧米の規格として、ASTM と EN 規格を取り上げ、アジア諸国の規格の欧米規格との類似性、および日本の規格との差異をまとめた。また、アルカリ骨材反応に関する国際的動向として RILEM TC191-ARP の国際仕様書についても紹介した。

なお、整理・検討した規格関連の課題については、直面している課題や近い将来に具体的な検討を行なう必要性が高いものを取り上げるに止まったが、土木学会や建築学会で近年検討されたものを参考にして整理・提案した。この結果、今後具体的に望まれる試験方法の一つとして、アルカリ骨材反応試験方法で岩種を踏まえた試験方法選択と評価方法を提案した。また、これまで知見が少なかったソーマサイト劣化についても調査分析方法の整理をまとめ、試験方法立案の基礎資料をまとめた。

6. おわりに

セメント系材料や骨材がどのように変化しているのか、また、今後どのような方向に変わろうとしているのか、その際の品質基準や試験方法などはどうあるべきかなど、そのあるべき姿も含めて検討を行った。一面的な見方になっている部分もあるかもしれないが、今後のコンクリート系材料を考える上での一助になれば幸いである。また、このような調査・研究活動は一過性のものではなく継続的に行う必要もあるように思う。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告,2000..