

委員会報告 「コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告」

堺 孝司*1・坂井 悦郎*2・田村 博*3・古澤 靖彦*4

【委員構成】

委員長	堺 孝司 (香川大学)	
顧問	大門 正機 (東京工業大学)	
幹事	坂井 悦郎 (東京工業大学)	田村 博 ((財)日本建築総合試験所)
	古澤 靖彦 (鹿島建設(株))	
委員	浅賀喜与志 (帝京科学大学)	石田 良平 (株)熊谷組
	大脇 英司 (大成建設(株))	片山 哲哉 (川崎地質(株))
	加藤 和己 (株)オーテック	河合 研至 (広島大学)
	河野 広隆 (建設省土木研究所)	岸 利治 (東京大学)
	斉藤 裕司 (株)大林組	佐藤 道生 (電源開発(株))
	下林 清一 (日鐵セメント(株))	菅谷 秀幸 (太平洋セメント(株))
	鈴木 康範 (住友大阪セメント(株))	高橋 茂 ((社)セメント協会)
	堤 知明 (東京電力(株))	野口 貴文 (東京大学)
	橋田 浩久 (清水建設(株))	久田 真 (新潟大学)
	細田 暁 (東京大学)	松村 卓郎 ((財)電力中央研究所)
	山下 英俊 (株)間組	湯浅 昇 (日本大学)
	吉崎 芳郎 (株)八洋コンクリートコンサルタント)	
協力委員	芳賀 和子 (株)オーテック)	

【五十音順】

1. はじめに

我が国におけるコンクリート利用の歴史も百年余を経過し、現在もっとも重要な土木・建築構造物材料として必要不可欠なものとなっている。コンクリートが今後も良質な社会ストックを構成する重要な材料であり続けるためにも、過去に蓄積してきた豊富な実績をベースとして、長期の耐久性や品質に対する真摯な研究・検討を続けることが重要である。

コンクリートの長期耐久性がどのような形で

評価し得るのかを根源的に検討するためには、100年程度ではあるが、健全に使用されたコンクリート構造物からの情報が有用である。しかしながら、これらの評価においては、試験方法の統一や何を分析すれば良いかが明らかになっていないため、単なる試験のための試験に終わっている場合も見受けられる。評価方法を統一し、長期間供用された貴重なコンクリート構造物からの有効なデータを効率よく集積し、さらには促進試験や数値シミュレーションなどと関

*1 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 工博 (正会員)

*2 東京工業大学助教授 大学院理工学研究科材料工学専攻 工博 (正会員)

*3 (財)日本建築総合試験所 材料試験室室長 工博 (正会員)

*4 鹿島建設(株)技術研究所 土木技術研究部 材料・施工グループ 主任研究員 工博 (正会員)

連させることにより、コンクリート構造物の耐久性設計に関連する重要な情報を得ることができる。また、これらコンクリート構造物に使用されたセメントの化学組成などの変遷との関連を明らかにすれば、長期耐久性の観点から、どのようなセメントが望ましいのかを明らかにすることも可能と思われる。

以上のことを背景に、1998年6月に(社)日本コンクリート工学協会の中に「コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会」が設置され、2000年3月まで活動を実施した。本委員会では、次の観点から調査・研究を行うこととした。

①性能規定型設計への対応

土木・建築構造物ともに性能規定型設計への移行は明確であり、この中で構造物の耐久性も「規定される性能」として明文化され、設計・照査の対象となりつつある。長期品質を照査する手法を確立する上で、バックデータの信頼性を確保することは極めて重要である。過去の構造物を貴重なバックデータ源とするためにも、評価・試験方法を統一化することは重要である。

② 社会ストックの形態変化への対応

過去のコンクリート構造物の更新(特に建築構造物)は、設備の陳腐化などの社会的寿命が尽きたことを理由として行われてきた。高度成

長経済の終焉を迎え、また、環境への配慮が世界的な標準となった現在、コンクリート構造物の躯体部分には長期的な寿命を期待して、社会的寿命が尽きやすい部分のみを更新してゆく考え方が多く提案されるようになってきている。この流れの中でも、コンクリートの長期品質照査手法・モデル化の確立が重要となる。

③材料変遷の整理と長期耐久性実現に寄与するセメント系材料の検討

我が国のコンクリート構築の歴史が100年以上を経過して、構造物としての歴史は整理されているが、材料・工法面の歴史や技術開発の流れは整理しきれていない。これら工学的な観点からの構造物の歴史・技術開発の流れを系統的に整理し、正確な記録として後世に伝える作業は有意義である。またこれらの知見は、現代の材料技術を駆使した長期耐久性確保を主眼とした材料提案に反映することが可能である。

2. 委員会の構成と活動内容の概要

本委員会は、設置と同時に前述の目的別に以下の3WGを形成してそれぞれ調査研究を行った。

①試験分析WG(主査;田村幹事、委員9名、協力委員1名)

表-1 コンクリートの長期耐久性に関するシンポジウムプログラム

◇開催日時	2000年5月30日(火)	9:50~17:00	於大東京火災・新宿ビルB1ホール
◇開会の挨拶	9:50~10:00	堺 孝司(香川大学)	
◇委員会報告	10:00~12:30		
	コンクリートの試験分析方法マニュアル解説	司会:大脇英司(大成建設)	
	コンクリート劣化予測手法と促進試験方法の評価	田村 博(日本建築総合試験所)	
	セメントの変遷と長期耐久性確保の理想材料提案	古澤 靖彦(鹿島建設)	
◇パネルディスカッション『21世紀のインフラ整備とコンクリートの長期耐久性』	13:30~16:50	坂井 悦郎(東京工業大学)	
		司会:野口貴文(東京大学)	
	コーディネーター	堺 孝司(香川大学)	
話題提供1:	社会資本の今後と維持更新		
	経済企画庁総合計画局計画官	税所 朗	
話題提供2:	今、コンクリート構造物に起きていること		
	京都大学大学院工学研究科教授	宮川 豊章	
話題提供3:	今後、なすべきこと		
	JR東日本建設工事部部长	石橋 忠良	
	上記パネラーによるディカッション		
◇閉会の挨拶	16:50~17:00	浅賀喜与志(帝京科学大学)	

実構造物から採取するコンクリートについて、必要な調査項目および調査手法の規格化を行った。

②モデル・促進試験評価WG（主査；古澤幹事 委員12名）

材料そのものの変質を促す劣化現象のモデル化および劣化促進試験法の現状をとりまとめた。

また、劣化現象のモデル化に反映できる水和反応モデルの現状を示し、複合モデルについて紹介した。

③材料評価WG（主査；坂井幹事、委員12名、協力委員1名）

セメント系結合材の鉱物組成および形態の変遷、およびそれに対応するコンクリート性能を調査・比較した。これらの結果から、長期品質確保の観点から理想的なセメント系結合材の形を提案した。

3. 委員会活動報告とシンポジウムの開催

本研究委員会の活動成果は、「コンクリートの試験・分析マニュアル」（試験分析WG成果）および「コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書」の2種類の冊子にとりまとめた。

また、2000年5月30日（火）に「コンクリートの長期耐久性に関するシンポジウム」を開催し、各WG主査より活動成果の概要報告を行った。

なお委員会報告書は「コンクリートの劣化と評価編」（モデル・促進試験評価WG成果）および「セメント系材料の長期耐久性編」（材料評価WG成果）の2部構成となっている。

シンポジウムでは、委員会報告の他、重要な社会資本ストックであるコンクリート構造物の長期耐久性を確保するために必要な今後の戦略構築の観点から、識者による話題提供と議論で構成される『21世紀のインフラ整備とコ

表-2 「コンクリートの試験・分析マニュアル」
目次

第1章	はじめに
第2章	本マニュアルの使用方法
	2.1 本マニュアルの構成
	2.2 調査目的の検討
	2.3 調査項目の選定
	2.4 調査の実施方法
	2.5 調査結果のまとめ
第3章	事前調査
	3.1 調査内容
	3.2 各種資料の調査
	3.3 現地予備調査
第4章	現地調査
	4.1 調査方法の選択手順
	4.2 調査項目の選択
	4.2.1 調査を要する劣化現象の選択
	4.2.2 調査項目の選択
	4.3 調査方法の選択
	4.3.1 環境調査
	4.3.2 構造物の調査
第5章	供試体試験
	5.1 試験方法の選択手順
	5.2 試験項目の選択
	5.3 試験方法の選択
	5.3.1 掲載した試験方法の一覧
	5.3.2 試料調整
	5.3.3 コンクリートの基礎的な情報
	5.3.4 化学組成の分析
	5.3.5 水和相の分析
	5.3.6 硬化体中の未水和セメントの分析
	5.3.7 微構造/組織の分析
	5.3.8 透気・透水係数などの測定
	5.3.9 機械的な性質の測定
第6章	調査結果の取りまとめ
	6.1 長期材令コンクリートの配(調)合調査の事例
	6.2 100年以上経過した海岸構造物の分析事例
	6.3 約50年間地下水と接触していた鉱山のライニングコンクリートの分析事例
	6.4 約60年間経過した河川護岸構造物のコンクリートの分析事例
	6.5 セメント成分の溶解が著しい浄水施設のコンクリートの分析事例
	6.6 約20年間供用した高温水槽のコンクリートの分析事例
第7章	まとめ
付録	長期材令コンクリートの試験・分析結果取りまとめ様式 長期材令コンクリートの試験・分析結果の公表時の キーワード

ンクリートの長期耐久性』と題したパネルディスカッションを行った

表-1に、当日のシンポジウムのプログラムを示す。

4. 各WG活動成果の概要報告

4.1 試験分析WG

前述したように、本WGの活動成果は、委員会報告書とは別冊の「コンクリートの試験・分析マニュアル」にとりまとめた。

マニュアルは、特に高度な技量を有する技術者のみでなく、既存コンクリート構造物の材料特性を調査・分析する機会があると思われる技術者全般を対象としている。これより、単に調査・分析手法の解説・整理・類型化のみにとどまらず、調査の開始、すなわち調査目的・動機から必要な情報（調査項目）の選定方法などについても解説されている。

表-2にマニュアルの目次を示す。また、図-1にマニュアル中に収められた長期材令コンクリートの調査、分析の流れを示す。

本マニュアルでは調査目的を確認して、必要な情報をもれなく確実に収集できるように必要な調査、分析を選択、実施することを提案している。この調査や分析の実施に関して『事前調

査』、『供試体を用いた調査』、『現地調査』の範疇から望ましい試験方法を選択し、各種試験を実施することを推奨する。本マニュアルはこの手順に沿った構成で編集されている。

マニュアルの2章では調査項目選定のための基本的な考え方を示した。つづく第3章 第5章において『事前調査』、『供試体を用いた調査』、『現地調査』に分類される各試験項目について、得られる情報や、特徴、難易度などを比較しながら最適な手法を選定できるように試験方法の取りまとめを行なった。各試験方法はその手順を示し、詳細な方法や実施例を参考できるように参考文献を記した。第6章では調査、分析結果の取りまとめについて、実例を収録して示した。

また、本マニュアルでは数多くの試験法を取り扱っているが、種々の試験、分析方法のリファレンスブックとして使用できるように目次に掲載した全ての試験方法を表し、5.3節には試験方法の一覧表を備えた。

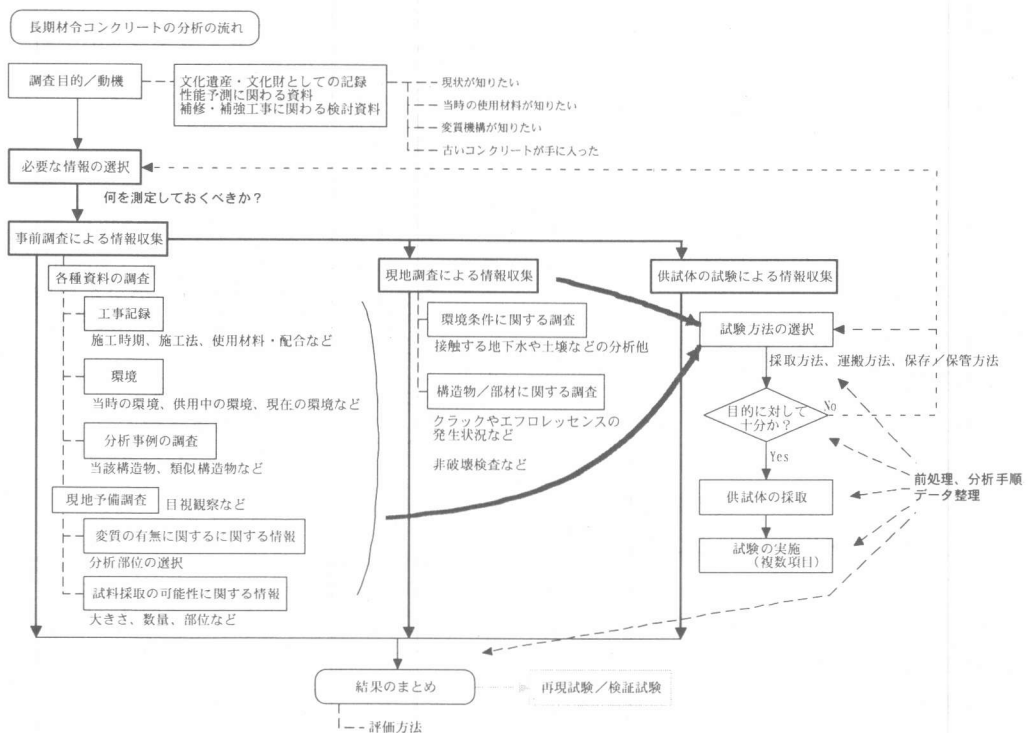


図-1 長期材令コンクリートの調査、分析の流れ

また、今後のコンクリート工学の発展を鑑み、貴重な長期材令のコンクリートを分析結果を、より多く研究者が利用できるようになることを望んで、論文などの発表時のキーワードの選択について提案し、標準的な試験結果の取りまとめの様式とともに付録に収録している。

4.2 モデル・促進試験評価WG

本WGの活動成果は、委員会報告書の「コンクリートの劣化と評価編」にとりまとめた。

セメント系材料の長期変質・劣化挙動を追跡・検討する一つの手法として、明確な理論的根拠に基づく現象のモデル化及びシミュレーション手法も、材料および環境条件が多様でその組み合わせが天文学的な数にのぼるコンクリート構造物を設計・照査するためのツールとして不可欠である。具体的な材料設計には、実験などの適切な実証的手法による確認が重要であるが、網羅的にこれを行うことは現実的ではなく、材料のパフォーマンスをあらかじめ予測する手法はこの観点からも有用である。また、各種の変質・劣化促進試験も、実証的あるいはシミュレーション結果を検証・補完する役割を担う有用な方法である。促進には系の温度上昇や物質移動の促進（移動物質の濃度勾配の増加）などを伴うため、自然条件とは異なる何らかの「条

件的歪み」を伴うことは覚悟の上で実施する。むろん、結果はその歪みの性質・程度を考慮・分析した上での有用な知見として得られるし、そもそも時間軸のみを短縮する促進試験は理論的にあり得ない。

これらよりWGでは、コンクリートを代表とするセメント系材料の長期おける変質・劣化をモデル・シミュレーションによって追跡する手法、および各種の劣化促進試験について検討した。委員会報告書「コンクリートの劣化と評価編」では、下記の理念に基づき予測手法・促進試験法の現状調査、問題点の抽出、その解決方法や最新の手提案などを行った結果を報告した。

- 具体的な変質・劣化現象として中性化、溶出、凍害を想定
- 水和反応の影響を可能な限り考慮する
- 巨視的な欠陥（ひび割れ）の情報（影響）を可能な限り考慮する

表-3に報告書「コンクリートの劣化と評価編」の目次を示す。本編第2章では、長期耐久性に及ぼす水和反応の影響を定量的に評価できる可能性のある水和反応モデル、劣化現象の進行にともなうコンクリート中の物質移動経路を予測・評価可能なモデルおよび組織の不均一性を表現して劣化予測を行う試みについて紹介している。第3章では、上記の変質・劣化現象を

表-3 委員会報告書「コンクリートの劣化と評価編」目次

第1章	はじめに
第2章	水和反応および組織の不均一性の影響
	2.1 はじめに
	2.2 水和反応モデルと長期耐久性
	2.2.1 水和反応モデルの現状と耐久性評価との関連
	2.2.2 移動経路の連続性と含水状態を考慮したモデル
	2.2.3 養生条件と位置の相違を考慮したモデル
	2.2.4 組織の不均一性を考慮したモデル
第3章	変質・劣化モデルの現状
	3.1 変質・劣化モデルと物質移動・硬化体交互作用
	3.2 中性化モデル
	3.3 凍害モデル
	3.4 溶出モデル
	3.5 地球化学コードを用いたモデル
第4章	促進試験の現状
	4.1 促進試験の定義
	4.2 中性化促進試験
	4.3 凍害促進試験
	4.4 溶出促進試験
第5章	提案モデルと新たな試み
	5.1 補修効果を評価できる中性化モデル
	5.2 乾燥による初期欠陥がRC梁の構造性能に及ぼす影響

予測するモデルの現状を調査・報告している。また、3.1節では様々な劣化現象の予測に用いられている基礎的な理論が詳細に解説されており、予測手法を構成する基本式の成り立ちや理論的な意味づけを理解する上での「逆引き辞典」的な役割を果たしている。

第4章では、同じく上記の劣化・変質を想定した各種の促進試験の現状を調査・報告している。第5章では従来の手法にとらわれない新しいモデル化の試みを紹介している。

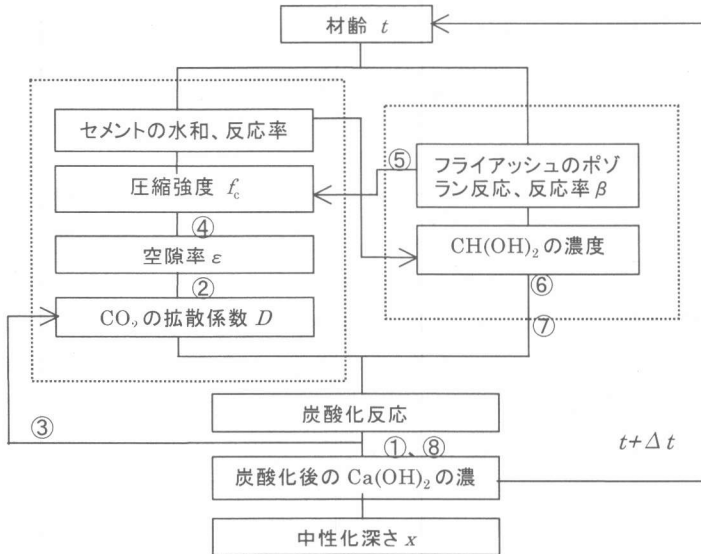


図-2 水和反応およびポゾラン反応の影響を考慮した
中性化予測のフローチャート

水和反応の影響を可能な限り考慮したモデルの例として、報告書の3.2節 中性化モデルに記載した水和反応およびポゾラン反応の進行を考慮したフライアッシュ含有コンクリートの中性化予測モデルの考え方について紹介する。フライアッシュを使用したコンクリートは、一般に初期材齢ではその組織がポーラスであるためCO₂が浸透しやすく、中性化速度はフライアッシュ無混和のコンクリートに比べ早くなる。また、長期材齢ではポゾラン反応によって組織は緻密になるが、Ca(OH)₂が消費されていくいわゆる自己中性化が起こる。したがって、フライアッシュを混和したコンクリートの中性化速度は一般のコンクリートと異なる性状を示し、それを予測するためには以下の二つの要因を考慮しなければならない。

- ①フライアッシュのポゾラン反応による組織の緻密化（空隙の減少）に伴うCO₂の拡散係数の減少
 - ②フライアッシュのポゾラン反応によるCa(OH)₂の消費に伴うアルカリ度の減少
- これらの相反する効果の影響を、図-2に示す要因と構成のように整理・定式化し、これら

の組み合わせおよび非線形性を考慮して中性化の進行を経時的に予測するものである。

かような複合現象を考慮した劣化現象の予測モデルが、より高度な耐久性能照査手法として今後の主流になるものと考えられる。

4.3 材料評価WG

本WGの活動成果は、委員会報告書の「セメント系材料の長期耐久性編」にとりまとめた。

表-4に報告書「セメント系材料の長期耐久性編」

の目次を示す。

材料の変質・劣化を追跡・検討するために、また、工学的な観点からの構造物の歴史・技術開発の流れを系統的に整理し、正確な記録として後世に伝えるためには、過去のセメントの製造や性質について整理してみることが重要である。また、この作業は、セメントの技術開発がどのような方向でなされ、それがコンクリート構造物の長期耐久性を考える上で正しかったのか否かを振り返り、今後のセメントのあり方などを考える上でも非常に重要と考えた。この観点から、報告書第1章ではセメントがどのように製造され、どのような化学あるいは鉱物組成で、どのような物理的性質を有するものが利用されてきたのかを整理して示した。

次に、古い時代の構造物からセメント系材料のサンプルを採取して変質状況を分析・観察し、当時の材料事情なども考慮して変質・劣化の過程を推定することは実証的な手法として有意義である。これら貴重なデータを効率的に共有して後の研究に反映することを目的として、第2章では多様な構造物の調査事例について系統的な整理・呈示を行っている。

第3章では長期耐久性を考慮したセメント系材料の有り様について、セメント製造における環境対応、国際規格への対応、および高ビークライト系セメントに関わる製造・利用上の問題などの観点から検討を行い、今後開発あるいは選択すべきセメントについての方向を示した。

セメントはコンクリートの構成材料の一つであり、これが優れているからと云って、コンクリートの全ての耐久性を満足するものではない。配合や骨材などの他の材料や施工の良否の影響も大きい。また、コンクリート構造物の置かれている環境条件にも大きく影響されることは言うまでもない。例えば、コンクリート構造物の超長期耐久性を考える場合には骨材の性質も重要であり、さらに多方面からの検討も必要となる。今までのアルカリ骨材反応に関する研究は、その対策や機構も含めて少なくとも耐久性は100年程度を対象としたものであり、それを超えるような場合には当てはまらない場合も生じる。

以上のような前提を踏まえて、今まで調査して来た耐久性の優れていたコンクリートに利用されたセメントの品質などを基に長期耐久性を考慮したセメントについて考えて見た。

図-3に、その際考慮すべきセメントの品質を決定する要因やセメント産業を取り巻く社会環境をまとめて示した。

いずれにしても、社会環境と要求性能の多様化を考慮して、耐久性を考慮した汎用セメントのあり方をここで再度議論し直す時代になっていることだけは確かであり、図-3はそのための考え方の一つの方向を示したものである。

表-4 委員会報告書「セメント系材料の長期耐久性編」目次

第1章	セメントの製造方法と品質の変遷
	1.1 はじめに
	1.2 セメント製造方法の変遷
	1.3 セメントの化学組成と性質
	1.4 各種セメントコンクリートの長期的な性質
	1.4.1 JISモルタル
	1.4.2 同一セメントを用いたコンクリートとJISモルタルの比較
	1.4.3 硬化体組織
	1.4.4 混合セメントの中酸化速度
	1.4.5 まとめ
第2章	1.5 まとめ
	長期間経過した既存コンクリートの調査
	2.1 はじめに
	2.2 港湾・海洋構造物におけるセメントコンクリートの長期的な性質
	2.2.1 港湾構造物（小樽港）
	2.2.2 港湾構造物（横浜港）
	2.3 水理構造物におけるセメントコンクリートの長期的な性質
	2.3.1 上水場施設
	2.3.2 ダム
	2.3.3 大型コンクリートブロックの現地暴露
	2.3.4 水路
	2.3.5 導水路トンネル
	2.4 建築構造物におけるセメントコンクリートの長期的な性質
	2.4.1 普通セメントを用いた建築物
	2.4.2 高炉セメントを用いた建築物
	2.4.3 膨張コンクリートを用いた建築物
	2.5 橋梁におけるセメントコンクリートの長期的な性質
	2.6 まとめ
第3章	長期耐久性を考慮したセメント系材料
	3.1 はじめに
	3.2 古代コンクリートから推定した長期的耐久性材料
	3.2.1 古代コンクリートとその再現
	3.2.2 高ビークライト系セメントの炭酸化反応
	3.3 セメント産業を取り巻く環境
	3.3.1 セメント製造における環境対応
	3.3.2 国際規格への対応
	3.4 長期耐久性を考慮したセメントに関連する問題点の整理
	3.4.1 製造上の問題点
	3.4.2 利用上の問題点
	3.5 長期耐久性を考慮したセメント系材料に関する提言

5. まとめ

コンクリート構造物の耐久性が再び社会問題化している。コンクリート構造物においては、材料、設計、施工が適切に行われて始めて所要の耐久性が確保されることになる。そのためには、材料設計、構造設計、耐久設計、施工などの技術が整理体系化される必要があるが、これらを統合して性能に基づいた設計・施工体系を

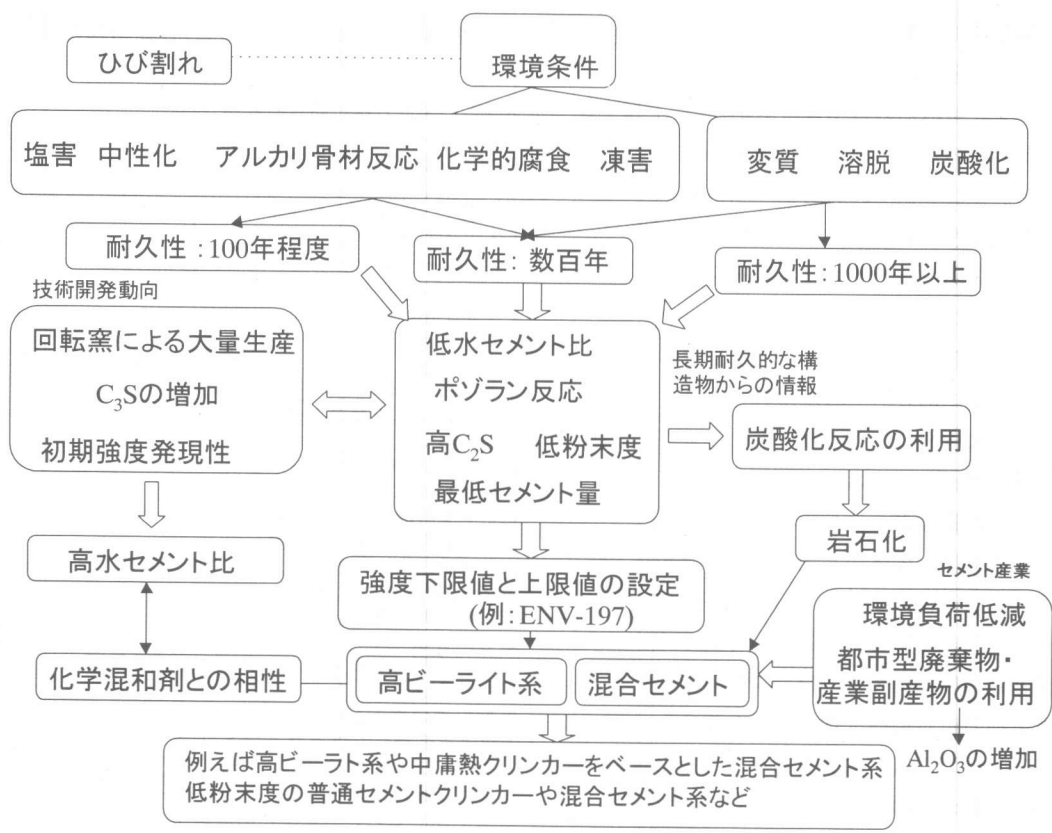


図-3 長期耐久性を考慮したセメントの組成

構築する努力が始められている。

その象徴的な動向として、仕様規定型から性能規定型に移行しつつある設計体系改訂の流れの中で、従来はその定義がやや曖昧であった「耐久性（あるいは耐久性能）」が明確化されようとしている。「耐久性・耐久性能」が、安全性や使用性などの様々な性能の経時変化を示すとして取り扱われるか、あるいは変質・劣化に対する抵抗性として独立に定義されるかの議論は収束していない。しかし、いずれにしても「耐久性・耐久性能」が設計・照査・点検の対象として、定量的に取り扱われることは間違いない。

かような流れの中、本研究委員会ではコンクリートに代表されるセメント系材料の組織そのものの変質・劣化・抵抗性を追跡・検討することを目的として、試験分析WG、モデル・促進

試験評価WG、および材料評価Wにおいて広範な調査研究を行い下記の成果を報告した。

- ・実構造物から採取するコンクリートの調査項目および調査手法の規格化
- ・材料そのものの変質を促す劣化現象のモデル化および劣化促進試験法の現状調査
- ・セメント系結合材の鉱物組成および形態の変遷、およびそれに対応するコンクリート性能の調査・比較
- ・長期品質確保の観点から理想的なセメント系結合材の提案

ここに報告された成果が、改めてコンクリートの長期耐久性を考える機会となり、前述した新たな体系の構築に資することができれば幸いです。