

## 委員会報告 「材料設計支援システム研究委員会報告」

坂井悦郎\*1, 名和豊春\*2, 横田 弘\*3, 丸屋 剛\*4

### 【委員構成】

委員長	坂井 悦郎 (東京工業大学)	
幹事	名和 豊春 (北海道大学)	横田 弘 (運輸省港湾技術研究所)
	丸屋 剛 (大成建設(株))	
委員	石田 哲也 (東京大学)	小林 将志 (東日本旅客鉄道(株))
	一瀬 賢一 ((株)大林組)	佐伯 竜彦 (新潟大学)
	今本 啓一 (東急建設(株))	島内 理 (五洋建設(株))
	浦野 真次 (清水建設(株))	杉山 央 (建設省建築研究所)
	大賀 宏行 (東京都立大学)	多田 真作 ((株)テキスト)
	加形 護 (鹿島道路(株))	二階堂知己 (電気化学工業(株))
	金森 誠治 ((株)熊谷組)	三橋 博三 (東北大学)
	金子 雄一 (東電設計(株))	横関 康祐 (鹿島建設(株))
	河村 直彦 ((株)ピー・エス)	吉岡 一弘 ((株)トクヤマ)
	(當真 正夫 (株) )	
通信委員	岸 利治 (AIT)	高田 和法 (Delft 工科大学)

【五十音順, ( ) は前委員】

### 1. はじめに

コンクリート構造物の設計を仕様規定型から性能照査型に移行しようとする検討が進められている。性能照査型の設計においては、各種構造物におけるコンクリートの要求性能を明確にすることが不可欠となり、コンクリートの観点から見れば、今までとは異なる多様な性能が要求される可能性がある。このような設計体系に対応するには、コンクリートの要求性能を照査するための新たな材料設計手法の確立が必要になる。

本研究委員会は、このような背景のもとで1997年に設置され、コンクリート構造物の要求性能と材料の要求性能の関連、要求性能を照

査するための材料設計モデルの現状や将来の可能性などに着目した調査研究活動を行ってきた。主要な検討課題は以下のとおりである。

- ① 各種コンクリート構造物における要求性能と材料設計との関係の整理
- ② 性能照査型の設計体系における材料設計のあり方、およびそれらを実際に適用した場合のコンクリート構造物設計の検討
- ③ コンクリートの材料設計を簡便に行うための照査技術の現状等に対する検討
- ④ 数値解析手法やコンピュータシミュレーションなどを有効に利用した材料設計手法を確立するための課題と今後の研究の方向性の検討

\*1 東京工業大学助教授 工学部無機材料工学科 工博 (正会員)

\*2 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

\*3 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室室長 工博 (正会員)

\*4 大成建設(株)技術研究所 土木材工研究室副主任研究員 工博 (正会員)

これらの課題に対して効率的に活動を行うために、以下の3つのワーキンググループ(WG)を設置した。

- ① モデル調査WG (主査：名和豊春)
- ② 現象要求性能WG (主査：丸屋剛)
- ③ 構造物要求性能WG (主査：横田弘)

本研究委員会の調査・研究成果は、委員会報告書を作成し、1999年5月11日に開催した「材料設計とコンクリート構造物の性能に関するシンポジウム」において報告している。本稿では、委員会報告の要点を紹介する。

## 2. 材料設計支援システムの基本的考え方

### (1) 材料設計支援システムにおける材料設計

コンクリート構造物の計画や設計では、耐荷性能や耐震性能のような構造に関連する性能と、その他構造物の機能からとくに要求される性能などを照査することが求められる。後者の性能では、フレッシュコンクリートの性能(施工性能)、打込まれてから強度が発現するまでの性能(初期性能)、長期的な品質の変化に関する性能(耐久性能)の3種類を照査する必要がある。

施工性能としてはフレッシュコンクリートの流動現象などが、初期性能としてはコンクリートの水和発熱、強度発現および乾燥収縮現象などが、耐久性能としてはコンクリート中の物質移動、中性化、コンクリート中の鋼材腐食および凍結融解現象などがモデル化により性能を照査する項目として挙げられる。ここに述べた現象は現状である程度のモデル化が可能なものであり、この他にフレッシュコンクリート中でのセメントの凝集・分散、セメントペーストの流動性、コンクリート中のセメント水和成分の溶出、クリープなどの現象やびび割れが耐久性能に及ぼす影響に関しても、これらのモデル化の研究が鋭意進められている。

本委員会では材料設計という観点から、施工性能や初期性能、あるいは耐久性能を照査するためのモデルについて、材料のもつ物性値を入

力してそれぞれの現象を定量的に出力するものを対象にしており、種々の性能を取り扱う総合的なものから、個別の性能についての詳細なものまで様々なものが提案されている。これらの材料設計における位置付けを示したものが図-1である。

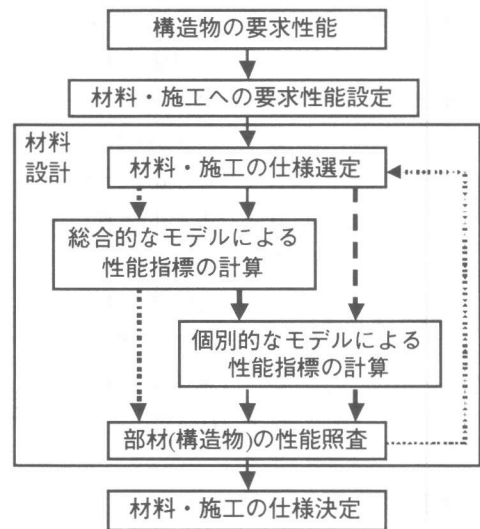


図-1 材料設計の概要

### (2) 材料設計手法の構成

材料設計手法の構成を図-2に示す。図に示すように、施工性能、初期性能および耐久性能について、材料の物性値をそれぞれの性能を定量的に評価できるモデルに入力し、その出力と部材や構造物についてそれぞれの性能の限界状態を表す数値と比較することによって照査する。ここで、照査に不合格ならば材料に戻る。

また、このフロー図では初期性能のモデルの出力を耐久性能のモデルの入力に用いるような形をとっているが、これは初期の品質が異なれば耐久性能に影響を及ぼすであろうということから考えた流れである。一方、施工性能のモデルの出力が初期性能および耐久性能のモデルの入力になっていないのは、施工性能が施工が可能か否かに関わる性能であり、初期性能や耐久性能のように程度として評価されるものではないこと、したがって施工性能の照査が合格であ

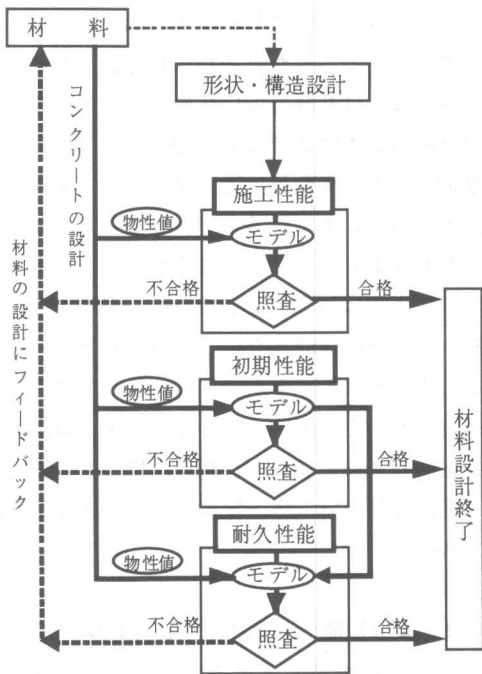


図-2 材料設計手法の構成

れば初期性能や耐久性に及ぼす影響は小さいことが理由である。

(3) 今後材料設計に利用可能なモデル

現状では照査をすぐ行えるものではないが、今後利用可能なモデルを、凝集・分散、セメントペーストの流動性、リーチング、クリープ、耐久性に及ぼすひび割れの影響としてまとめている。

セメント粒子の凝集・分散は、セメントペーストの細孔構造がコンクリートの物性に大きな影響を与えることや、高強度コンクリートあるいは高流動コンクリートなどで使用される高性能(AE)減水剤がセメント粒子の凝集・分散に影響を及ぼすことから、今後のモデル化が待たれる現象である。また、セメントペーストの流動性に関しても、高性能減水剤の影響を明らかにする上でモデル化が必要な現象である。

リーチング現象は、放射性廃棄物処分施設における超長期的な耐久性評価などでモデル化が必要となっている。クリープ現象は国内外の学会などで定式化がなされているが、現在は若

材齢時の適合性がよいものや微視的構造から検討されたものがある。

耐久性能に及ぼすひび割れの影響では、コンクリート中の鋼材の腐食に及ぼす塩化物イオンや酸素などのひび割れ部分における移動のモデル化が今後必要となる。

3. 構造物の要求性能

コンクリート構造物は多種多様であり、使用目的、周辺環境、重要度、第三者影響度等に応じて求められる性能が異なる。本来はこうした個々の要求性能項目に応じて、用いようとするコンクリートがそれを満たすものかどうかを判断する必要がある。しかしながら、従来の設計や施工においては、主に設計基準強度で設計上必要な要求性能を、スランプ(スランプフロー)で施工上必要な要求性能を、空気量、かぶり厚さや最大水セメント比等で耐久性上必要な性能を間接的に満足させている手法を採用している。このような方法は、簡便で、容易であるものの、実際の詳細なコンクリートおよび構造物の性能を明示するものではない。

これに対して、既に述べたように、より明確に要求性能を照査しようとする設計法である性能照査型設計法の導入が進められている。性能照査型設計では、構造物が個々に必要とする性能を、コンピュータシミュレーション等の照査ツールを用いて直接評価する。言い換えれば、性能照査型設計を可能とするためには、この照査ツールを確立することが不可欠となる。

このような状況下において、コンクリート構造物として、建築構造物、道路橋(上部工、下部工)、鉄道構造物、ダム(マス)コンクリート構造物、海洋・港湾構造物、地中構造物、容器構造物、および舗装を取り上げ、以下の4項目を中心にした整理を試みた。

- ① 現行設計法における要求項目のレビュー  
各構造物の特徴や特異の条件等を記述するとともに、現行の設計基準・指針類から(要求項目に関する間接的)規定を抽出し、その数値的

根拠を整理することをまず行った。残念ながら、その根拠が不明確なものが大半であったが、このような整理を行うことで、各構造物に求められる性能が明らかになってきた。

#### ② 性能照査型設計法における要求性能

性能照査型設計法が将来導入された場合の要求性能について構造物毎に整理した。構造物には主たる要求性能と従たる要求性能がある。現時点では、これらの要求性能や個別の照査項目については明確ではないが、それぞれの構造物を担当した委員の個人的な見解も含めて整理を行った。

#### ③ 性能照査に必要な材料設計モデル

②の要求性能を照査するために必要な照査ツール（「材料設計モデル」と言い替えることができる）を各構造物毎に取りまとめた。ここで必要とする照査ツールは、すべてのものが現時点の研究レベルでは可能とは考えられないが、こういう照査ツールがあれば、このような設計や照査・検討が可能になるといった観点からの整理も含んでいる。

#### ④ 材料設計モデルを用いて行う性能照査設計の流れ

性能照査のフローとして、構造物の計画から設計、施工、供用を経て廃棄に至るまでの流れを整理し、これらがどのように関連しているか、また各段階で必要とする材料設計モデルとの関係を示した。

前述の各構造物についての上記の検討結果を紹介するのは、紙面の関係で難しいので、ここでは性能照査のフローの事例を述べ、材料設計モデルとの関連を示すに留める。図-3 に材料設計モデルを用いた照査フローの事例を示す。各構造物に共通して言えることは、

- ① 設計図面どおりに初期欠陥のない構造物を構築できること
- ② 想定する荷重等の外的要因に対して損傷をコントロールできること
- ③ 材料劣化による保有機能の低下をコントロールできること

施工時は、所定の構造物が設計どおりに正しく構築できることが分かれば良く、それが可能であるならば仕様規定は必要ないと言える。長期材齢の要求性能で最も大切なのは強度と変形性能である。劣化抵抗性に関しては、所定の時点まで劣化による不具合が生じないことが確認できればよい。しかし、劣化がまったく生じないというのは無理な要求であり、劣化がコントロールできれば問題ない。どの時点でもどのレベルの劣化を許容するかは、構造物のライフサイクルにおけるコストパフォーマンスの評価から定まることになる。これら以外にも、安全性と経済性については、常に共通して必要な性能である。

#### 4. 要求性能から要請されるモデル

3.で述べたことを基本として、これらの事項が精度良くシミュレートできる材料モデルが構築され、その結果が構造物の構造細目や材料の配合設計等へ、従来の仕様規定に代わり適用できれば、非常に画期的なことである。構造物の要求性能から要請される具体的なモデルは以下のとおりである。

##### ① 打込み

- ・施工性の確保と評価（流動性、分離抵抗性、間隙通過性）
- ・締固め性能（きちんと詰まるか）
- ・硬練りコンクリートの施工性評価

##### ② 初期材齢

- ・初期ひび割れの発生を抑制する等の初期欠陥抵抗性
- ・養生方法、養生日数の把握
- ・長期的なたわみのコントロール
- ・初期欠陥の耐久性に与える影響評価
- ・初期クリープの影響
- ・材齢初期におけるひび割れ発生時期予測

##### ③ 強度発現

- ・供用開始時期をコントロールするための強度発現
- ・供用期間中の強度変化

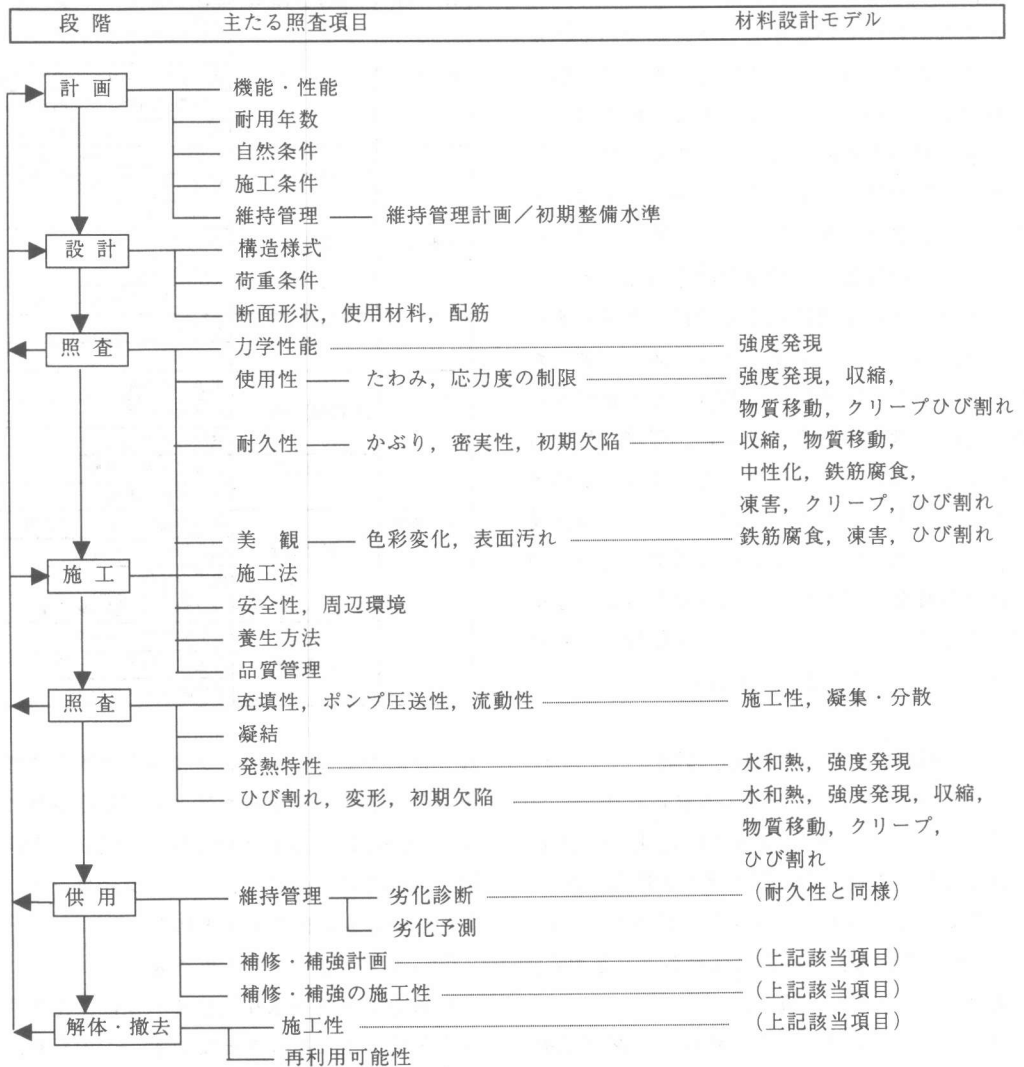


図-3 材料設計モデルを用いた照査フローの事例

- ・ 早期強度と長期強度の関連
  - ④ 長期品質
    - ・ 必要な耐久性の確保
    - ・ 予防的なメンテナンスのための劣化予測および劣化推定
    - 要求性能を下回る時期の予測, 次回の最適メンテナンス時期の予測
    - 耐用年数の推定
  - ・ ひび割れの長期劣化への影響
  - ・ 各種要因による劣化への相乗効果
  - ・ 初期整備水準の決定 (イニシャルコスト型かライフサイクルコスト型か)
  - ・ 化合物や廃棄物の溶出
- これらの要請される材料設計モデルは, きわめて理想的なものであり, 現実にはまだまだ未解明の現象も多い。例えば, 「耐久性の照査」

に関しては、各構造物で重要な命題であるが、耐久性をコントロールする要因やパラメータが十分に解明されていないことや、個々の要因が単独ではなく、複合して作用し、かつ相乗的に影響する(複合劣化)ような現象については、今後の研究が待たれる。ひび割れの耐久性や長期劣化への影響についても同様である。また、構造物の初期整備水準の検討、言い換えればメンテナンスを前提とした構造設計を可能にするには、将来の劣化予測に加えて補修・補強の水準や工法、およびライフサイクルコストの観点からの照査なども含まれ、これもかなり難解な技術であると考えられる。さらに、環境に対する配慮がより重要となる将来を考えれば、不要となったコンクリート構造物のリサイクルの容易さ、あるいはリサイクルされた再生骨材などの材料の品質などについても照査できるようなモデルも必要になってくるが、これに対しても今後の研究テーマであると思われる。

## 5. 材料設計モデルの現状と課題

### (1) 個別的なモデルによる材料設計

表-1 はコンクリート構造物の性能、性能を評価するための現象およびモデルの関連を示したものである。以下、各現象におけるモデルについて現状と問題点を中心に述べることとする。

#### ① コンクリートの施工性

フレッシュコンクリートの性状、ポンプ圧送性、高流動コンクリートの充てん性および超硬練りコンクリートの締固め性のモデル化は、施工性予測を十分に実現するレベルには達しておらず、ある限定された範囲において適用されるに留まっている。施工性は非常に多岐にわたる項目を照査しなければならないため、施工ごとにどのような照査項目が必要か、その照査項目にはどのようなモデルが適しているかの整理が必要であろう。さらに、施工性に関する材料設計手法に関しては、各種コンクリートの配(調)合設計手法がこれまでに十分に検討されてきたにもかかわらず、材料選定および配(調)合設計

表-1 性能、現象およびモデルの関連

性能	現象	新たなモデル化対象
		フレッシュコンクリートのコンシステンシー
		ポンプ圧送性
施工性能	流動	高流動コンクリートの充填性 (間隙通過性、型枠内充填性)
		超硬練りコンクリートの締固め性
	水和発熱	セメント構成鉱物の水和反応
		配合(調合)と強度
		材齢と強度
初期性能	強度発現	養生温度と強度
		空隙量と強度
		セメント水和反応量と強度
	収縮	乾燥収縮
		自己収縮
		水蒸気の移動
	物質移動(水分)	液状水の移動
		熱伝導との連成
	中性化	二酸化炭素の移動
		水分移動との連成
耐久性能		鋼材の腐食(塩害、中性化)
	鋼材腐食	塩化物イオンの移動
		酸素の移動
		ひび割れ発生限界腐食量
		統計学的アプローチ
	凍結融解	物理化学的アプローチ
		確率論的アプローチ

などからフレッシュコンクリートの流動特性等を直接評価するモデルがほとんど提案されていないのが現状である。今後利用可能なモデルを取り入れることにより、フレッシュコンクリートの照査技術の確立が望まれる。

#### ② コンクリートの水和発熱

従来提案された水和発熱モデルは、比較的単純な仮定の上に成り立っている。このため、実用上いくつかの問題点を含んでいることに注意しなければならない。通常の温度範囲において、律速条件は「反応律速」と考えるモデルでは、高い温度に適用する場合、実際より発熱速度を高く見積もる場合がある。これは、温度により律速が反応である場合から拡散である場合に移行するためと解釈されている。このため、適用する温度範囲毎に定数を設定する必要がある。また、新規セメント組成への適用の場合、現時点ではパラメータの修正は新組成での温度上昇試験による必要がある。これは、初めに述べたようにセメント組成と反応の厳密な関連づけが

現時点で困難であるため、各パラメータの化学的根拠が厳密性にかけるるところに由来する。

現時点では、代表的なセメントに関する発熱特性を比較的単純なモデルの組み合わせで表現できる段階に来ている。今後は、組成の多様化に対して対応できるように、反応の相互関連の解明や、反応経路の一般モデル化が望まれる。

### ③ コンクリートの強度発現

強度はコンクリートの要求性能の中でも重要な性質と考えられ、これまでに多くの強度発現モデルが提案されてきている。これまでは水セメント比説のような経験則が多いが、空隙構造と強度の関係やセメントの水和反応モデルを基にして構築された強度発現モデルも見られる。

### ④ コンクリートの収縮

コンクリートの収縮現象は、古くから知られており、多くの研究者により諸説、また予測モデルが提案されている。コンクリートの収縮を定量化する際、乾燥収縮とともに水和の進行に伴う自己収縮との複合、また持続荷重作用下におけるクリープとの密接な連関を考慮しなくてはならない。今後、任意の環境条件、荷重条件に対して、収縮・クリープの複合作用を考慮可能な予測手法の開発が望まれる。

コンクリートの自己収縮は、セメントの水和に伴う自己乾燥(self-desiccation)によって生じる。自己収縮ひずみは、普通強度コンクリートでは  $100 \times 10^{-6}$  程度であるが、近年実用化されつつある高強度コンクリート等富調合コンクリートでは無視し得ない程度に大きくなることが指摘されており、そのメカニズム、ひび割れとの関係等について研究が行われている。

### ⑤ コンクリート中の水分移動

多孔質体であるコンクリートは、内部に水分を安定して保持する能力を持つ。コンクリートの劣化要因ともなる材齢初期における水和発熱、自己及び乾燥収縮によるひび割れ、また長期にわたって進行する中性化、鋼材腐食等は、コンクリート内部の水分状態に密接に依存するものである。従って、コンクリート内部の水分状態

と移動現象を取り扱う事は重要な命題であり、古くから多くの研究者によって定式化が試みられてきた。

一般に、運動量、エネルギーあるいは物質の流れを取り扱う場合には、それらの量に関する収支計算が全ての出发点となる。換言すれば、運動量、エネルギー、また物質に関して保存の法則が成立し、系内に入りこむ量と外に出る量、及び系内で生成される量、蓄積される量の総和の収支が合ってなければならない。コンクリート中の水分を取り扱う場合、以下の式を満足することが求められる

$$\alpha \frac{\partial X}{\partial t} + \text{div} \mathbf{J}_X - Q_X = 0$$

### ⑥ コンクリートの中性化

中性化とは、本来高アルカリ性であるコンクリート内部のアルカリ度が二酸化炭素などの酸性物質の作用により低下する現象である。したがって、どのような酸性物質でも中性化は起こりうるが、ここでは一般的に問題となっている二酸化炭素によるものに限定する。

中性化の進行メカニズムは、以下のようまとめられる。

- ・細孔中の水分が逸散した空隙に、二酸化炭素が侵入する。
- ・水分や二酸化炭素の移動は拡散方程式で表すことができ、拡散速度は水湿度や結合材種類により決まる空隙構造や含水率に依存する。
- ・細孔内に進入した二酸化炭素が細孔溶液中に溶解し、炭酸イオン(重炭酸イオン)となる。
- ・炭酸イオンと水酸化カルシウムから供給されるカルシウムイオンが反応し、炭酸カルシウムが生成する。また、他の水和物や未水和セメントも炭酸化する。
- ・炭酸化により、pHの低下および細孔構造の変化が起きる。

中性化の進行に影響を及ぼす要因は、非常に多岐にわたっている。しかし、中性化のメカニズムを考えると最終的に中性化速度に影響する要因は、物質移動と反応の二つに集約される。

表-2 腐食反応のモデル化に必要な要因（塩害環境）

移動物質	材料・配合要因	環境要因	その他の要因
酸素	・コンクリート中の化学成分 ・細孔径分布（環境や施工にも左右される）	・温度／湿度／圧力 ・作用気体 ・作用水質	・施工状態／養生 ・鋼材の成分 ・部材寸法（かぶり、鉄筋径、鉄筋間隔） ・ひび割れ、初期欠陥
水分			
塩化物イオン			
腐食電流			

表-3 腐食反応のモデル化に必要な要因（中性化環境）

移動物質	材料・配合要因	環境要因	その他の要因
酸素	・コンクリート中の化学成分 ・細孔径分布（環境や施工にも左右される）	・温度／湿度／圧力 ・作用気体 ・作用水質	・施工状態／養生 ・鋼材の成分 ・部材寸法（かぶり、鉄筋径、鉄筋間隔） ・ひび割れ、初期欠陥
水分			
炭酸ガス			
腐食電流			

以上のことから中性化の進行は、基本的には以下のような方程式でモデル化されることになる。

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \text{div}(D_i \text{grad } C_i) + R_i$$

基礎となる方程式は、どの研究においても同じであり、それぞれのモデルの違いは、上式を用いた計算でどのような仮定と簡略化が行われているか、モデルのパラメータをどのように与えているかという点である。

#### ⑦ コンクリート中の鋼材腐食

腐食進行の流れから判断すれば、腐食反応に起因する物質および物質移動に影響を及ぼす要因は表-2 および表-3 に示す通りである。これらの項目は、すべてコンクリートの品質に依存するとともに、外部環境、施工その他により複雑に左右される。

これらの移動物質や影響要因は複雑に絡み合っているものの、塩害劣化の場合については、現象を予測するために必要な情報と現状の検討レベルが整理されている。これらの複雑な情報を論理的にかつ合理的にモデル化することによって、耐久性を高めるために必要な材料性能が明らかになると考えられる。

近年、これら物質の移動を数値的にモデル化しようとする試みが急速に発展してきており、多くの成果を挙げてきている。これらの成果や今後の研究の進展により、劣化予測に基づく性

能設計、ライフサイクルアセスメント（LCA）や材料設計などが合理的に可能になっていくものと期待されている。

#### ⑧ コンクリートの凍害

コンクリートの凍害を引起すメカニズムは複雑で、数多くの研究者により種々検討されてきたが、コンクリート構造物の凍害の程度を計算可能なモデルを提示したものは多くない。その様なモデルは、巨視的な統計モデル、微細な現象に着目した物理化学モデル、微視的なメカニズムと巨視的な損傷劣化現象を結びつける確率モデルに大別される。

### 6. モデルによる性能算定事例

#### (1) 性能算定のための条件設定と計算項目

モデルを用いて計算するための条件設定は図-4 に示すように、材料・配合、初期養生条件、構造物の形状、施工条件および供用環境条件などを Input とすることにより行った。照査はモデルより得られる Output を限界状態を示す限界値と比較して行いが、委員会活動では性能照査まではいたらず性能の算定までを行った。

コンクリートの配合は石灰石微粉末を用いた高流動コンクリートとした。スランプフロー 65cm、V ロート流下時間 10 秒を目標としたものであり、水粉体比（W/P）を 30%にしている配合である。したがって、石灰石微粉末の置換率（L/(C+L)）が多くなるほど水セメント比



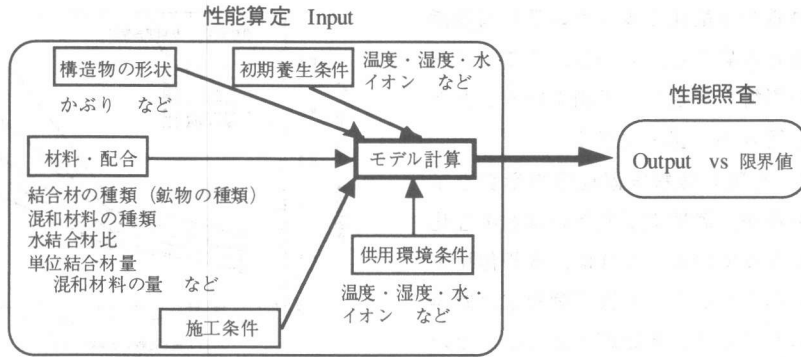


図-4 計算のための条件設定

(W/C) は大きくなり、 $L/(C+L)=20,35,50\%$ の順に、 $W/C=37.4,46.1,60\%$ となる。

(2) モデルによる算定

モデルによる計算項目を表-4 に示す。委員会報告書ではこれらすべてについて述べられているが、本稿では中性化深さについての計算結果を示す。図-5 は中性化の進行予測モデルの構成を示したものである。ここで用いる中性化進行予測モデルは、中性化の進行に關与している物質、即ち、

水、二酸化炭素、水酸化カルシウムのコンクリート中での移動と反応を記述する方程式から構成されている。さらに、これらの移動と反応に影響を及ぼすセメントの水和および炭酸カルシウムの生成も考慮されている。

石灰石微粉末の添加はセメントの水和反応に影響を及ぼすため、セメント硬

表-4 モデルを用いた計算項目

現象	計算項目
施工性	型枠内への充填性
水和発熱	断熱温度上昇量、部材における温度上昇量
強度発現	圧縮強度発現性
水分移動	逸散水量、相対湿度の分布とその経時変化
収縮	収縮の経時変化
中性化	中性化速度
鋼材腐食	鋼材腐食開始までの期間、腐食ひび割れ発生までの期間、鋼材位置における塩化物イオン量、腐食量の経時変化

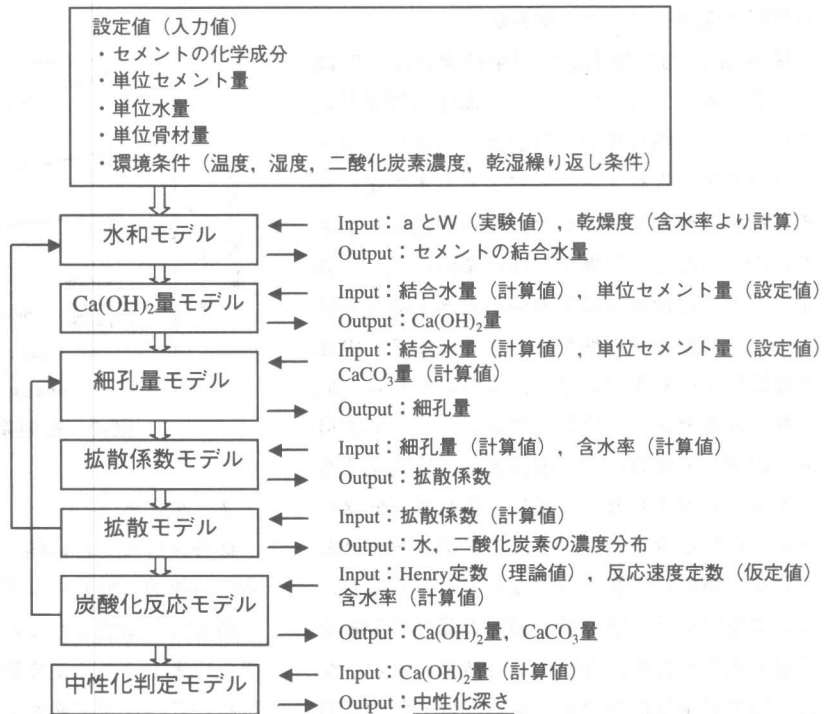


図-5 中性化進行予測モデルの構成

化体の微細構造や水酸化カルシウム量は当然添加しないものとは異なる。しかし、ここでは石灰石微粉末の影響を無視して予測を行うこととした。結果を図-6から図-8に示す。

図-6は、石灰石微粉末置換率の影響を示したものであるが、置換率が大きいほど中性化速度が大きくなっている。これは、水粉体比を一定としていることから、石灰石微粉末の置換率が大きいほど水セメント比が大きくなるためである。特に、置換率が35%から50%（水セメント比は46%から60%）になった場合の中性化速度の増加は顕著である。

図-7は、湿度が中性化速度に及ぼす影響を示したものである。図より、湿度が低いほど中性化速度が大きくなる傾向にある。これは、低湿度ではコンクリートが乾燥し、二酸化炭素の拡散に有効である水分で閉塞されていない空隙が多くなるためである。また、石灰石微粉末の置換率が大きいほど、即ち、水セメント比が大きいほど、湿度の影響が大きい。このことから、コンクリートが低品質なものほど環境条件の影響を受けやすいことがわかる。

図-8は、初期養生期間が中性化速度に及ぼす影響を示したものである。初期養生期間が長くなれば、中性化環境下におかれるまでにセメントの水和が進行することによって中性化に対する抵抗性が増加するため、中性化速度が小さくなる。ただし、影響の程度は条件によって異なり、石灰石微粉末の置換率が大きく湿度が低いほど、初期養生期間を長くすることでの中性化速度低減の効果が大きい。このことから、低品質（高水セメント比）なコンクリートで環境条件が厳しい場合には、初期養生に留意する必要があると考えられる。逆に、高品質（低水セメント比）なコンクリートであれば、それほど初期養生条件の影響を受けないとも言えるが、ここで用いた予測手法は、初期欠陥等の影響を考慮できないため、今回の予測結果のみから配合や初期養生期間を設定することは、危険側の結果をもたらす可能性も否定できない。

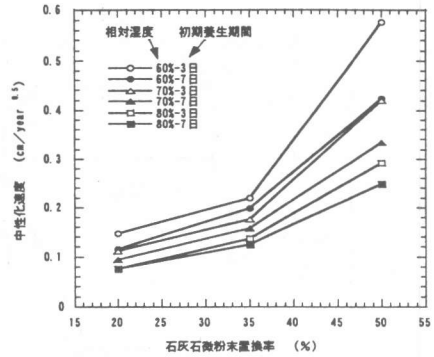


図-6 石灰石微粉末置換率の影響

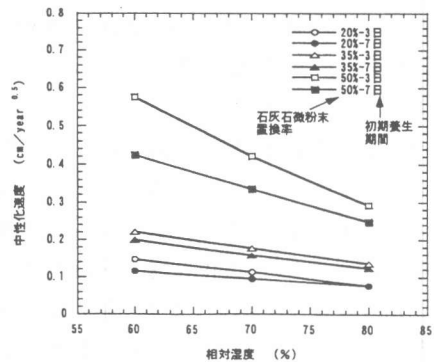


図-7 湿度の影響

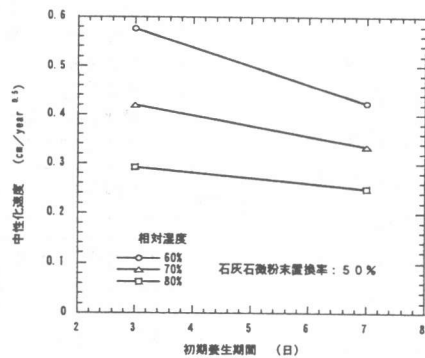


図-8 初期養生期間の影響

## 7. まとめ

材料設計モデルに関しては、現在多くの研究者が積極的に取り組んでおられ、今後さらに多くの進展が期待される。本研究委員会の調査研究の成果も、あくまで現在の時点でどのような材料設計手法が可能かを整理したもので、今後のさらなる発展が期待される。