



# セメント・コンクリートの要求性能と 設計法の変遷

前川 宏一<sup>\*1</sup> 岸 利治<sup>\*2</sup> 岡村 甫<sup>\*3</sup>

## 1. はじめに

コンクリートの性能は、①セメント硬化前の施工性に関わる性能、②硬化途上から硬化後までの力学性能、③長期にわたる耐久性能、に大別できる。これらはいずれも、使用するセメント・混和材・化学混和剤の選択とコンクリートの配合、および製造方法によって決まるといってよい。特に最近の化学混和剤とセメントの分野における飛躍的進歩によって設計で採り得る選択の幅は格段に広がり、達成可能なコンクリートの性能も大幅に向上してきた。工業社会において広範な材料特性を求められることができ、種々の要求性能に多様に対応できる高い自由度故に、これらの要求性能を達成するための材料・構造設計法の有り様は、過去から今日に至るまで重要な課題であった。コンクリートの誕生から青年・壮年期を経て死に至る全ての段階に、建設技術者は関与できるからである。

本稿では、施工・力学・耐久性の各要求性能に対する設計法の変遷を概観し、セメント・コンクリート設計の位置づけを議論したい。

なお、ここでは、材料仕様・構造形態・施工過程・維持管理計画を決定する創造的行為を『設計』と呼び、断面耐力の算定や温度上昇の計算などを通じて、最も適切と考えられる方法によって要求性能をチェックする行為を『照査』と称している。

## 2. 構造性能の照査と設計

社会基盤施設に要求される性能のうち、耐震性能、繰り返し荷重作用に対する耐疲労性能、機能性・使用性、そして安全性について取り上げる。

昭和61年土木学会コンクリート標準示方書は、許容応力度設計法から限界状態設計法に移行し、その後の改訂を経て今日に至っている。この期を

\*1 東京大学 教授 工学系研究科 社会基盤工学専攻

\*2 同 上 助手 同 上

\*3 同 上 教授 同 上

REQUIRED PERFORMANCE AND DESIGN FOR CEMENT CONCRETE  
(by KOICHI MAEKAWA, et al.)

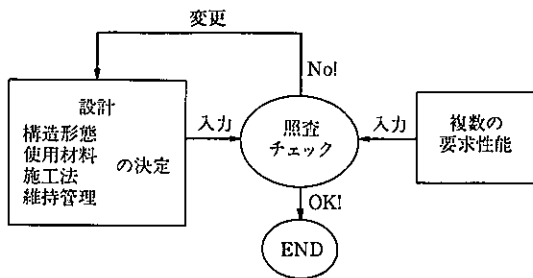


図1 要求性能の照査と設計

境にして、設計法を記した手引書の性格から、『設計された構造・材料の要求性能を照査する方法を記したもの』へと示方書の性格が移ることになる。設計された構造・材料が、複数の構造上の要求性能を満足することを、それぞれ照査することが規定されたのである(図1)。

図1の流れは、設計者の選択の幅を制限しない。しかし、要求性能を照査する技術の裏打ちが大前提である。限界状態設計法は、部材や構造物が機能を一部あるいは全部失う限界状態を規定し、設計がこの状態に達するか否かを検討することにより、要求性能をいわば間接的に照査する方法である(図2)。限界状態は、不都合が急激に増加する境目に設定されるのが一般である。

供用期間中に構造が破壊しないという要求性能に対して、構成部材の破壊を限界状態に設定した

場合を考えよう。不静定構造物では部材の破壊が即、構造破壊に直結しないので、この設定で上記の安全性能は確保される。この限界状態は、線形構造解析と今日の部材耐力算定式の二者で精度良く照査・判定できる。部材の断面破壊以後の挙動と構造破壊までの過程を精度良く予測できる非線形解析技術が使えるのであれば、途中の限界状態を介することなく要求性能を直接照査することもできる。逆に部材耐荷力算定式の信頼性が低ければ、それ以外の判定可能な限界状態をやむなく設定することもある。

照査技術の進歩に応じて限界状態と要求性能の距離は近づき、設計と性能照査の役割分担が明確になる<sup>5)</sup>。この方向は原子力施設の安全性照査マニュアル<sup>13)</sup>に引き継がれ、平成8年コンクリート標準示方書耐震設計編<sup>8)</sup>では、非線形動的応答解析を用いた耐震性能の照査が規定されるに至った。また既存建築物の耐震性能の診断法<sup>9)</sup>、すなわち耐震性能照査法が早くから実用に供されてきたことは、特筆に値する。もちろん、性能照査技術に完全はあり得ない。それを補完する上で、設計者の選択領域を制限する、あるいは構造性能に関連のある仕様を制限する構造細目が課される。換言すれば、技術の進歩に従って限界状態が要求

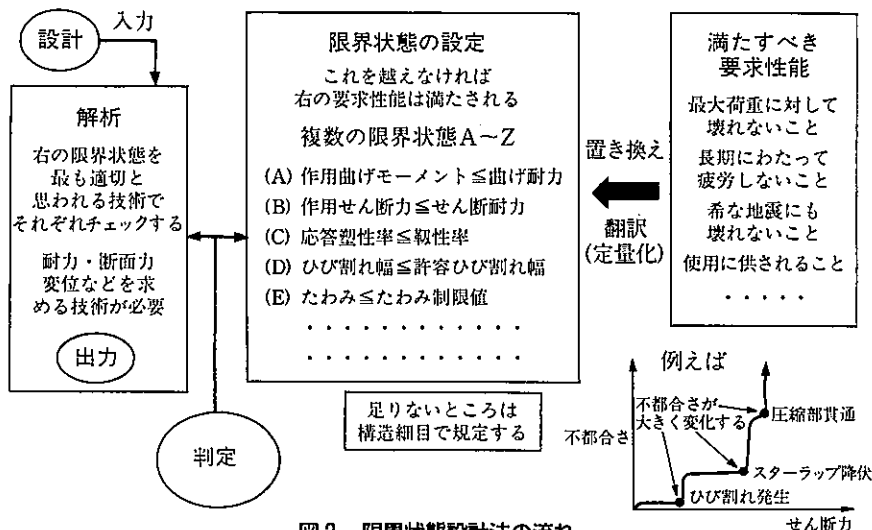


図2 限界状態設計法の流れ

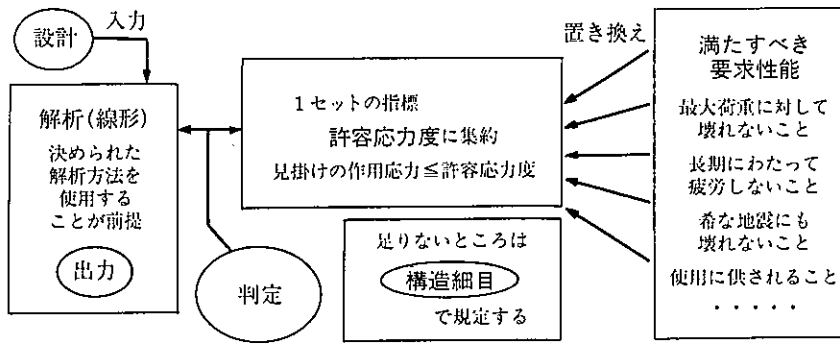


図3 許容応力度設計の位置づけ

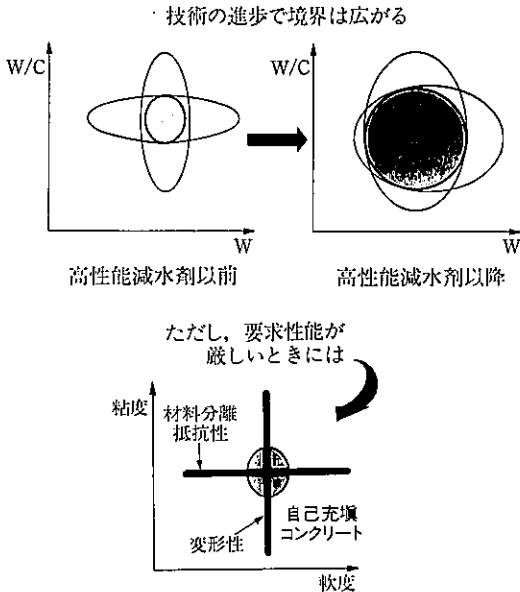


図4 要求性能の水準と選択肢

性能に近づき、構造細目は縮小されていくのが、示方書の変遷と進化の流れのようである。

この枠組みの中で、材料特性は構成式の形で照査に取り込まれる。任意の材料特性値や与えられた配合に対して、コンクリートがいかに関動するかを数学的に記述することが、性能照査を可能にするための技術課題である。構造要求性能から遡って、強度・変形性等の材料性能が決められ、それを満足するように材料設計を行うにしても、そこが終点ではなく、再度、構造・材料設計が構造性能照査を通過することが要求されるのである。

振り返れば、許容応力度設計法は1つの限界状

態で性能を代表させた、性能照査設計の原始形と捉えることもできる(図3)。許容応力度で代表される物理的状态は不明確であるが、書式の上では現行示方書に包含される。先人の努力の結果を引き継ぎつつも、新しい技術を合理的に取り組み形で進展してきたものであり、限界状態設計法とそれに連なる性能規定の照査は改良・改革であって、過去の否定・棄却ではないのである。

### 3. 施工性に関する設計と材料

設計と照査を分離する枠組みの背景には、要求性能を満たす解を広く求め得ること、合理化による利益が追求できること、がある。しかし、要求性能を満たす選択肢が相当に限定されている場合は、設計は一意的に決定され、設計者の選択の自由は制限される(図4)。高性能減水剤以前の施工性に関する材料設計は、これに近いものであった。評価指標はもっぱらスランプのみ(許容応力度に相当)に求められ、単位水量法則の発見以後は、水セメント比法則とも相まって、コンクリートの配合設計は、ほぼ確定論的に決定され得たのである。構造性能照査における構成式の開発とは異なり、材料の性質と配合から、コンクリートの施工性に関する性能を評価する技術は、少なくとも工学的には必要とされなかったといえる。上記の二大法則の発見以後、T. C. Powers等のフレッシュ

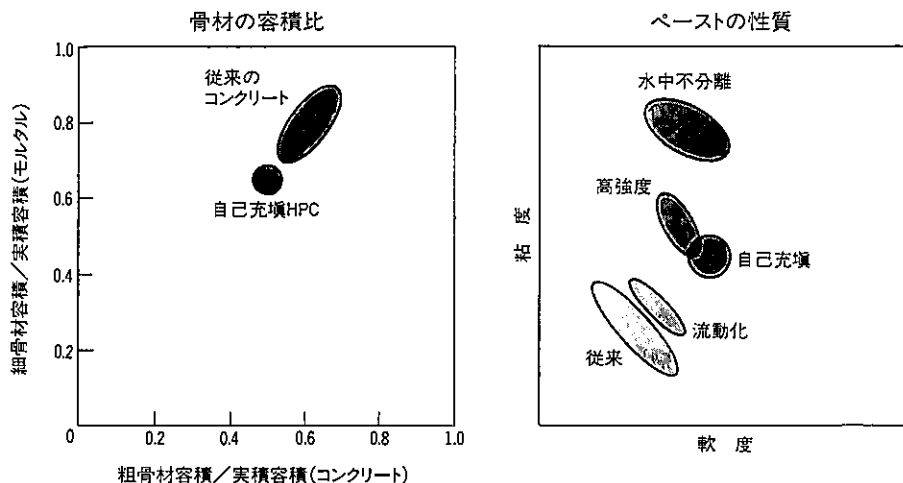


図5 自己充填性コンクリートの配合の範囲

コンクリートに対する帰納論的研究<sup>3)</sup>が展開を止めたのも、この理由によるものと推察される。

この状況は高性能減水剤の出現で一変する。以前にはコンクリートに成り得ない配合ですら、コンクリートとしての性能を有するに至り、①従来の要求性能を達成する目的に対しては材料設計の自由度が一気に拡大し、②今まで望みえなかった性能を達成できる可能性が広がった。長足の進歩をもたらす担い手が材料であることは、電子デバイス工学もコンクリート工学も同じである。

①については構造設計と同様に、施工性の照査技術が工学的意義を有するようになった。しかし、施工性能の照査に立脚したセメントコンクリートの設計の枠組み構築は、高性能減水剤開発以後の研究開発の動向とはならなかった。仕様規定に準拠した既往の設計法の範囲の中で、高性能減水剤は補助剤として用いられる方向が選択された。これは当初、たぶんに安定性や管理に大きな難点を抱えていたためと思われる。

その後、スランプロスの少ないAE高性能減水剤がわが国で実用化されるに至って、これらの障害は取り除かれるに至る。前者の施工性照査法の確立を待たずに、上記②で述べた、今まで望み得なかった性能の達成、すなわち自己充填性を有す

る高性能コンクリートが先に開発される経緯を踏むこととなった<sup>1)</sup>。ただし、自己充填性コンクリートの開発には、上記①の施工性(充填性)照査技術を構築する方向で基礎研究が進められた。任意の材料と配合の組合せを入力情報として、充填性能(流動性と材料分離抵抗性)を出力結果に据えたロジックが指向された。これらの延長に高性能コンクリートの開発・設計が位置付けられたのは、開発者がそれまで構造性能照査技術の開発に従事し、材料構成則の解明と構成式に関する研究を進めていたことと無縁ではない<sup>4)</sup>。

図1の性能照査型の方で基礎研究は行われたものの、現在の自己充填性コンクリートの実用設計は図4の決定論型に従っている<sup>1)</sup>。設計者の自由裁量を許容しないピンポイント方式である。これは、自己充填性能を満たす解が今の技術では相当に限定されており(図5)、その中で設計の自由裁量を許しても便益に乏しいこと、製造方法や管理水準が未だ不十分である現況等を考慮した当面の措置である。仕様規定の不利益は設計の自由度と発展を阻害することであるが、一方で単品種生産を可能にする利点もある。技術者の役割を考慮すると、状況に応じて仕様規定と性能規定とを使い分けることも求められる。

一般性の高い充填性能の検査法と照査法との確立に向けて、再度、基礎研究が再開されたのが数年前である。このなかで、セメント(粉体)の技術革新と化学混和剤の組合せは、設計の自由度と境界条件をさらに広げるものとして、期待されている。

#### 4. 耐久性能の確保と材料設計

コンクリートは適切な設計・施工によって高い耐久性能を発揮し、多様な設計が可能である、応用性に富む材料であるにもかかわらず、耐久性能に関する影響因子に関して、仕様のみを規定する時期が長く続いた。耐久性能照査の枠組みは、土木学会から起草された耐久設計試案<sup>6)</sup>の発表を待って実現した。これは世界に先駆けた、総合評価に基づく耐久性能照査法であり(図6)、修正・改定を経て平成8年4月に指針として報告されるに至っている<sup>14)</sup>。性能照査技術に未熟な点が多いが、単に仕様・細目の規定のみに立脚したものから、耐久性能の定量評価への方向付けを与えたことは、大きな貢献である。

性能を一指標で代表させる点<sup>6,7)</sup>では、許容応力度設計法(図3)と同義である。同時に、許容応力度設計が過去に直面したのと同じ問題を抱えることになる。耐久性指標(許容応力度に相当)は、主として鉄筋腐食を想定した総合指標として位置づけられるが、物理的にいかなる状態に対応するかは明確でない。そのため研究の進歩を照査体系に組み入れることが難しいのである。次の段階では、耐久性能に関わる複数の限界状態を個々にチェックする方向に向かうことは自然の展開である、と筆者らは受け止めている。さらにその延長上に耐久性能を直接照査する技術を描くことができよう<sup>11)</sup>。

耐久性能に関する限界状態設計法は今後の課題であるが(図7)、温度ひび割れは耐久性に関わる

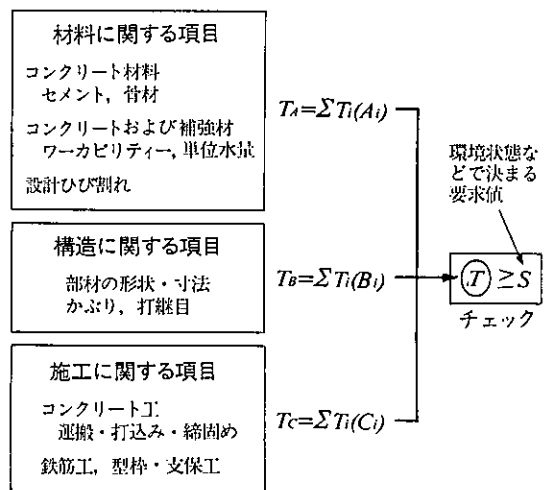


図6 耐久性ポイントの算定の判定

1つの限界状態として、これを検討する場合が増えている。ただし、設計段階で照査されることは今のところ少ない。材料・構造設計が確定した後温度ひび割れ危険度が算定され、それに応じて施工法や製造方法が後修正されるケースが多いようである。正規ルートでは(図1)、温度ひび割れ不合格のときは材料設計の変更・構造設計の変更・施工法の変更などに戻って再度、事前検討が行われるものである。当然ながら、任意の配合に対する構造体中のセメントの発熱過程を、仮定した配合ごとに実験することなく予測できる技術が、性能照査では不可欠となる。

この技術は反応速度論に基づく考察を経て、ようやく実用化の段階に上がった<sup>15)</sup>。自己充填性コンクリートでは粉体量が充填性能の要件によって支配されているため、温度ひび割れ危険度の低減には、セメントを含む粉体の種類を変えることがさらに要求される。この場合、セメントの種類や混和材料の混合比に対して、セメントの発熱特性を与える技術が必要である。これに対して、構成鉱物ごとの反応と相互作用を考慮することにより、性能照査を義務づける設計の枠組みに耐えるものが出来つつある<sup>10)</sup>。

温度ひび割れの限界状態同様に、鉄筋腐食とコ

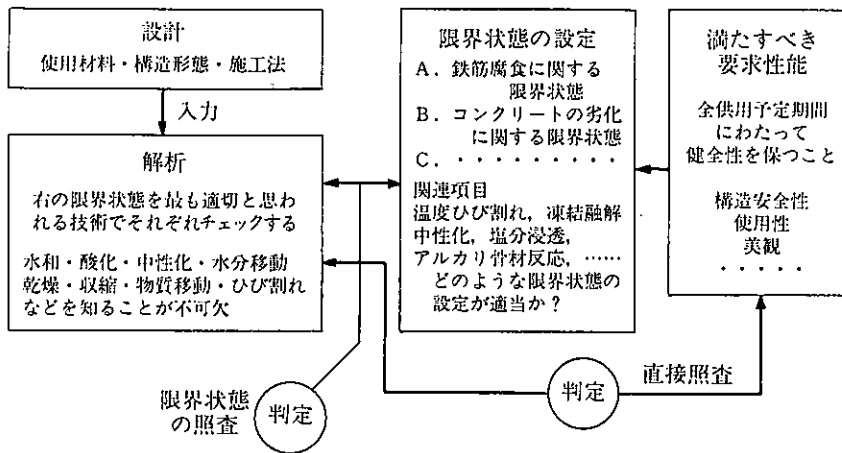


図7 耐久性能に関する照査と限界状態

ンクリートの劣化に関する限界状態を照査する技術体系を整備することが、要求性能に基づく耐久設計に必要である。コンクリートの力学的性能を構成式で表現したように、任意のコンクリート仕様と環境履歴に対して、水和・酸化・中性化・水分移動・乾燥/熱/自己収縮・物質移動・ひび割れなどを定量化して、耐久性能を直接評価する技術を目指すことが今後の課題である(図7)。初期材齢から硬化終了に至る養生期間のコンクリートの性能評価と初期欠陥の定量化は、長期耐久性能の評価に不可欠であるとともに、ほとんど定量化の試みがなされていない領域でもあり、早急な整備が望まれる所である<sup>2)</sup>。

前述のように、性能照査の技術の組み上げには、既往の研究成果の集積だけで達成できるとは限らない。一般化と総合化を要求されるからである。セメントの発熱についても、単に断熱・水分移動遮断の状態での温度上昇(反応速度)が分かるだけでは、上記の目的には使えない。かぶりコンクリート中では、温度と水分が変動する環境で水和が進行、あるいは阻害されるからである。任意の温度と水分変動に対して水和発熱を記述できる一般性が要求される<sup>2)</sup>。耐久性能照査の技術を組み上げて行く方向に、努力の傾注が望まれる。1つの

性能指標に基づく土木学会指針は、将来の限界状態設計法、あるいは性能照査技術の確立への移行期間の繋ぎとして、また耐久設計にさいして意思決定を補助する技術としての役割に、今後期待したい。

## 5. 構造性能の総合評価技術へ

構造安全性と耐久性を定量評価する技術について、設計の観点から別個に述べてきた。前者は構成則によって材料特性を定量化し、変形適合式と運動量保存則を解くことで、構造安全性能を照査しようとするものである。この方向性は耐震性能照査に関しては、ほぼ固まったものと考えてよい<sup>3)</sup>。筆者らは後者に明確なイメージを抱くに至っていないが、材料の状態と遷移の方程式と質量・エネルギー保存則を解くことで、照査に必要な情報を得ることが可能と思われる。

しかし、両者はともに連関している事象であることは言を待たない。鉄筋腐食に強く関連するひび割れは、構成式・運動量保存則に支配されるとともに、状態方程式・質量保存則にも影響される。逆に腐食因子の物質移動も、力学的境界条件によって大きく左右されるひび割れに強く依存する。

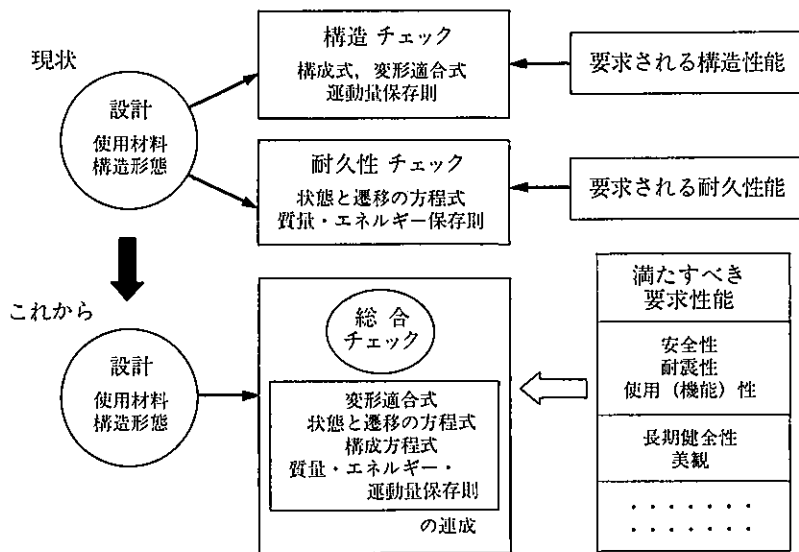


図8 総合的な性能照査のシステム

構造物の変形は水分移動や発熱にも支配され、温度応力解析等で両者の関連が考慮されつつある<sup>12)</sup>。構造性能／耐久性能に関する総合化の方向<sup>17)</sup>を検討する時期が到来しつつある(図8)。

以上は現象の解明に寄与するとともに、性能照査方法の1つの候補である。今後、大いに議論を詰めるべきところである。ただし、要求性能の実現を目指す設計(選択)の段階で、そのまま用いる必要は必ずしもない。現象を十分理解した上で、適切な割り切りが設計の段階では求められよう。その後、要求性能が満たされるか否かを、その時点で最も適当と思われる技術を駆使して照査しなければならない、と考えるものである。

性能照査に基づく設計の枠組みは、コンクリート構造物の国際標準の候補として、いま国際標準化機構の71技術委員会(ISO-TC71)にて検討が進められている<sup>16)</sup>。技術と知価の一般化と統合化は科学の進歩の1つの道であることは、セメント・コンクリート工学においても同様である。

## 6. まとめ

材料・構造・施工の設計・計画と、要求性能の照査の過程を明確に分離する方向づけは、技術の変遷を概観すれば、自然な流れのように思われる。要求性能ではなく、仕様のみが規定されている場合には、ある意味では、自由意思を制限された中で、『誰もが楽に』設計できた。しかし、性能照査をパスする設計が求められる時、本当に『何をいかにして設計・計画するか』が真に問われる。性能照査を合格する、無限に存在する設計の海から何を選ぶかが、設計者の個性と想像力であり、力量である。景観デザインと施工の合理化に今後一層、多くを望みたい。

\*

本文をまとめるにあたり、小沢一雅氏(東京大学)、堺孝司氏(北海道開発局)ほかJCI境界問題研究委員会幹事、ならびに土木学会コンクリート委員会示方書幹事の方々との議論が参考となったことを申し添えたい。

## 〔参考文献〕

- 1) 岡村, 前川, 小沢/ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993
- 2) 前川, 岸, Chaube, 石田/セメントの水和発熱・水分移動・細孔組織形成の相互連関に関するシステムダイナミクス, セメントコンクリートの反応モデル解析に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学協会(JCI), 1996
- 3) Powers, T. C./Properties of fresh concrete, John Wiley & Sons, 1968
- 4) 岡村, 前川/鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991
- 5) コンクリート標準示方書改訂小委員会材料施工部会/コンクリート標準示方書をめぐる環境・施工技術の最近の動向・設計施工照査システム, 土木学会コンクリート委員会, 1996.5
- 6) コンクリート構造物の耐久設計指針, 土木学会, 1989.8
- 7) 鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計法研究委員会/鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計に関する考え方, JCI, 1991.5
- 8) 土木学会コンクリート標準示方書耐震設計編, 平成8年7月
- 9) 日本建築防災協会/既存鉄筋コンクリート建造物の耐震診断基準・同解説, 平成2年
- 10) 岸, 前川/ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集 No. 526/V-29, pp. 97-109, 1995.
- 11) 前川/21世紀のコンクリート標準示方書, セメント新聞, 平成8年5月20日号
- 12) JCI マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, 1985.11
- 13) 土木学会原子力土木委員会/原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル, 1992.9
- 14) 土木学会コンクリート委員会/コンクリート構造物の耐久性設計指針, コンクリートライブラリー82号, 1995.11
- 15) 鈴木, 辻, 前川, 岡村/コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化, 土木学会論文集 No. 414/V-12, pp. 155-164, 1990
- 16) 田辺/ISO/TC71委員会における設計施工基準のISO規格化の動向, コンクリート工学 特集\*コンクリート技術・規準の国際整合化, Vol. 34, No. 3, 1996. 3
- 17) Sakai, K., Banthia, N., GJSv and O. E. (Editor)/Concrete Under Severe Conditions, Proceedings of International Conference on Concrete Under Severe Conditions, CONSEC, Sapporo, 1995

## 1997年度セメント協会研究奨励金の募集

社団法人 セメント協会

(社)セメント協会では、セメント化学・コンクリート化学分野の研究振興と研究者育成のため、大学・高等専門学校に所属する研究者に対し、研究費の援助を行っています。下記の要領に従って、ご応募下さい。

1. 対 象：セメント化学，コンクリート化学の分野における研究。
2. 応募の資格：日本の大学または高等専門学校に所属する研究者(大学院生を含みます)。ただし、前年度(1996年度)にセメント協会研究奨励金を受けた方は応募できません。
3. 奨励金額：1件につき原則として100万円。ただし、研究内容により50万円を限度として加算することがあります。
4. 応募の方法：当協会所定の研究奨励金申請書に必要事項を記入して、当協会に直接送付して下さい。応募の締切は11月29日(金)必着とします(申請者は当協会に請求して下さい)。なお、複数の応募はできません。
5. 問合せ・連絡先：(社)セメント協会・研究所 研究奨励金係

〒114 東京都北区豊島4-17-33 TEL 03-3914-2691 FAX 03-3914-2690