

# 論文 物質・エネルギーの生成・移動と材料力学的挙動の統合解析システム

石田哲也<sup>\*1</sup> · R.P.CHAUBE<sup>\*2</sup> · 岸利治<sup>\*3</sup> · 前川宏一<sup>\*4</sup>

**要旨:** 本研究では、若材齢コンクリートの形成過程と品質の変遷を追跡する3次元有限要素解析法と、RC3次元有限要素構造解析法の双方並行演算処理システムの開発を行った。コンクリートの材料特性は、物質・エネルギーの生成移動に関する熱力学モデルから算定される。これらの情報は即座に構造挙動解析手法に与えられ、温度、収縮等による部材各部の応力及び損傷状況が求められる。材料の機械的損傷の情報は、熱物理を司るシステムに逐次還流されて、物質移動解析に提供される。以上の連成解析システムによって、RC構造物の構造・耐久性能を特段区別する事無く、保有する性能を時系列的に評価出来る事を事例を用いて示した。

**キーワード:** 構造性能、耐久性能、並行演算、ひび割れ、物質移動

## 1. はじめに

コンクリート材料は材齢初期において、水和の進行による発熱、自己・乾燥収縮等により体積が変化する。この材料自身の体積変化は、各種拘束を受ける鉄筋コンクリート構造体各部材内部に応力を発生させ、部材の損傷につながる場合もある。発生したひび割れは、有害物質に対する物質移動抵抗性を低下させ、鉄筋腐食の促進など、鉄筋コンクリート構造物の長期耐久性能にとって悪影響を及ぼす要因となる。以上の様に、コンクリート構造物の力学的挙動と、材料の品質は強く連関する事象である。従って、鉄筋コンクリート構造体の保有性能を時間軸で追跡するにあたって、コンクリート材料の品質と、構造力学挙動の両者を有機的に結び付けた総合評価手法の開発が必要となってくるのである。

本研究では安全性能、耐久性能を総合して評価し、直接構造物の保有性能を時間経過と共に追跡出来る枠組みを目指す。若材齢のコンクリート材料に引き起こされる体積変化は、配合、使用材料、養生及び環境条件に大きく依存するが、本解析においては、任意の諸条件に対し時空間軸上で材料の諸物性が得られる3次元熱力学連成解析システ

ム DuCOM<sup>①</sup>を用い求める事とした。また、これらの体積変化から発生する部材の応力と損傷の程度は、構造体の形状、寸法、力学的境界条件、材料の弾性、強度等に強く影響を受ける。そこで、熱力学モデルから求まる強度、弾性係数、温度上昇量、水分量、空隙構造等の材料特性値を各計算ステップ毎、3次元構造解析プログラム COM3<sup>②</sup>に引き渡す。DuCOMからの材料に関する情報と、力学的境界条件をもとに応力と変形場の解析を実行する。この後、構成システム内でひび割れ発生の有無を判断し、ひび割れが発生した場合は、熱力学システムに対し損傷に関する情報を与え、物質移動抵抗性の低下等、材料特性の変化として反映されることになる。

個々の要素技術は未だ改良の余地が多く残されているものの、任意の諸条件に対し、構造物の保有性能を直接照査し得るシステムの構築が十分可能である事を、主として数値解析の観点から論ずる。

## 2. 有限要素法プログラムの概要

### 2.1 固体の形成及び劣化過程 (DuCOM)

若材齢時において相互に連関する水和発熱、水

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院博士課程 工学系研究科社会基盤工学専攻、工修（正会員）

<sup>\*2</sup> 東京大学専任講師 工学系研究科社会基盤工学専攻、工博（正会員）

<sup>\*3</sup> アジア工科大学講師 構造工学科、工博（正会員）

<sup>\*4</sup> 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻、工博（正会員）

分移動保持及び空隙構造形成過程の各物理現象を連成解析し、時系列で動的に変動する材料の形成過程を追跡する3次元有限要素法解析プログラム DuCOM の解析フレーム、及び個々の材料物理モデルの詳細は、過去の論文を参照されたい<sup>1)</sup>。

図-1に解析フローを示す。解析にあたって、対象となるコンクリートの使用材料及び配合、部材の寸法、形状、養生条件また供用期間中に曝される環境条件を入力する。始めに複合水和発熱モデル<sup>3),4)</sup>に従って、部材各部の発熱量及び鉱物毎の水和度が決定される。複合水和発熱モデルから与えられる情報である鉱物毎の水和度の平均値、及び化学的結合水量から空隙構造形成モデル<sup>5)</sup>をもとに、セメント硬化体の空隙幾何構造が求められる。得られた空隙構造は水分保持及び移動モデル<sup>5),6),7)</sup>に取り込まれ、空隙内の含水状態が決定される。さらに水分流束、空隙構造及び固定・自由塩化物の相平衡モデル<sup>10)</sup>より塩化物イオン量が求められる。最終的に式(1)に示される質量・エネルギー保存式を満足する解として、系内の温度、水分、塩化物イオンの各物理変数が、時空間軸で決定される(表-1)。

$$\alpha_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} + \operatorname{div} J_i - Q_i = 0 \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_i$ ；比容量(Specific capacity)、 $\theta_i$ ；自由度*i*の物理量(*T*:温度[K]、*P*:間隙水圧[Pa]、*C*:塩化物イオン濃度[mol/l])、*J<sub>i</sub>*；流束、*Q<sub>i</sub>*；生成・逸散項(Sink Term)である。また、表-1中の各記号に関しては、 $\rho c$ ；熱容量、 $\rho$ ；液状水密度、 $\phi$ ；

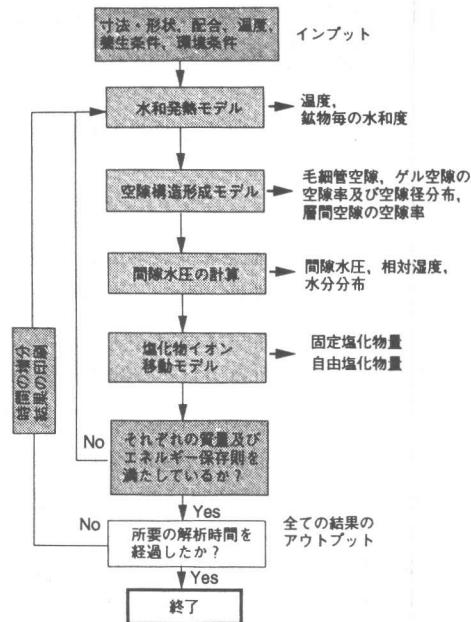


図-1 3次元有限要素法によるコンクリート材料の形成、劣化過程を追跡する連成解析手法

空隙率、*S*；空隙の飽和度、*K<sub>H</sub>*；熱伝導係数、*K<sub>t</sub>*；液状水移動係数、*K<sub>v</sub>*；水蒸気移動係数、*D*；溶液中の塩化物イオン拡散係数、*u*；液状水流れの速度ベクトル、*Q<sub>H</sub>*；複合水和発熱モデルより求まる熱エネルギー生成項、*Q<sub>hyd</sub>*；複合水和発熱モデルより求まる水和による水分消費量、*Q<sub>d</sub>*；固定塩化物への相変化による自由塩化物減少項である。

## 2.2 コンクリート構造体の応力解析 (COM3)

温度及び収縮ひずみ、またクリープひずみを含

表-1 質量・エネルギー保存式における各項

変数	比容量 $\alpha_i$	流束 $J_i$	生成・逸散項 $Q_i$
<i>T</i>	$\rho c$ [kcal/K.m <sup>3</sup> ]	$-K_H \nabla T$ [kcal/m <sup>2</sup> .sec]	$Q_H$ [kcal/m <sup>3</sup> .sec]
<i>P</i>	$\phi \rho \partial S / \partial P$ [kg/Pa.m <sup>3</sup> ]	$-(K_t + K_v) \nabla P$ [kg/m <sup>2</sup> .sec]	$-Q_{hyd} \rho \partial (S\phi) / \partial t$ [kg/m <sup>3</sup> .sec]
<i>C</i>	$\phi S^{-1}$ [mol.l/mol.m <sup>3</sup> ]	$\phi S^{-1} (-D \nabla C + uC)$ [mol/m <sup>2</sup> .sec]	$-Q_d$ [mol/m <sup>3</sup> .sec]

\*1 塩化物イオン移動に寄与する空隙率及び空隙の飽和度(毛細管空隙<sup>1)</sup>及びゲル空隙<sup>1)</sup>両者を考慮し、層間空隙<sup>1)</sup>は除く)

む平均応力 $\sigma_v$ 、偏差応力 $\sigma_{ij}$ 、及び体積ひずみ $\varepsilon_v$ 、偏差ひずみ $\varepsilon_{ij}$ の構成方程式を次の様に仮定した。

$$\varepsilon_v = \frac{1}{3K} \int (1+\varphi) d\sigma_v + \varepsilon_T + \varepsilon_{sh} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \int (1+\varphi) dS_{ij} \quad (3)$$

ここに、 $K$ ；体積弾性係数、 $G$ ；せん断弾性係数、 $\varphi$ ；クリープ係数、 $\varepsilon_T$ ；温度ひずみ、 $\varepsilon_{sh}$ ；収縮ひずみである。

部材各部位、及び各時間における温度ひずみ、また収縮ひずみ<sup>11)</sup>は DuCOM から得られる温度上昇量、含水量、間隙水圧、空隙構造等の材料特性値によって入力値として COM3 内で与えられる。従って、発熱による温度応力、水和の進行による自己収縮応力、また水分逸散による乾燥収縮等のそれぞれの応力と、その複合効果が自然と考慮されることになる。

応力 $\{\sigma\}$ について解き、マトリックス表示すると、以下の式(4)で基礎方程式は表現される。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - \left\{ \int \varphi d\sigma \right\} - [D]\{\varepsilon_T + \varepsilon_{sh}\} \quad (4)$$

ここで、 $[D]$ ；応力－ひずみマトリックスである。 $D$  マトリックス作成時に用いるコンクリートの弾性係数は、ひび割れ以前においては水和度に応じて計算される各要素、各ガウス点の弾性係数を用いる。また、応力場のひび割れ判定に関しては、各ガウス点に発生した引張主応力が、各点の引張強度を越えた時点で、ひび割れが発生することにした。ひび割れ後の引張軟化現象に関しては、岡村ら<sup>11)</sup>により提案された次式(5)で表現した。

$$\sigma_t \equiv \sigma_t(\varepsilon_t; c) = f_t \left( \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_t} \right)^c \quad (5)$$

ここに、 $\sigma_t$ ；ひび割れに直交する平均引張応力、 $f_t$ ；コンクリートの引張強度、 $\varepsilon_t$ ；ひび割れに直交する引張ひずみ、 $\varepsilon_u$ ；コンクリートのひび割れひずみ、 $c$ ；剛性軟化係数である。軟化現象は、パラメータ $c$ を変化させる事でモデル化している。異形鉄筋を用いた RC 部には 0.4 の値を、また無筋コンクリート部に適用されるパラメータ $c$ は、コンクリートの破壊エネルギーと解析要素寸法に

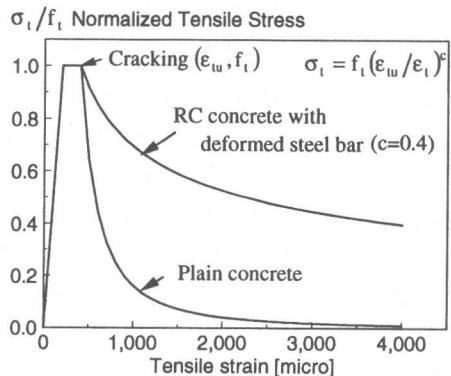


図-2 ひび割れ発生前後の応力－ひずみ関係

よって決定される<sup>11)</sup>（図-2）。

また、式(2)、(3)の線形クリープ関数については、Bazant-Panula のクリープモデル<sup>12)</sup>を適用した。ここでのクリープ関数 $\varphi$ は、以下の様に表現される。

$$\varphi(t, t_0) = \varphi^T \left( t_e^{-m} + \alpha \right) (t - t_0)^{\eta r} \quad (6)$$

ここで、 $t$ ：材齢（日）、 $t_0$ ：載荷材齢（日）、 $\varphi^T$ ：コンクリートの配合、時間 $t$ における温度の関数となる係数、 $t_e$ 、 $\eta^T$ ：コンクリートの受けた温度履歴の影響を表す関数、 $m$ ：28 日圧縮強度に依存する係数、 $\alpha$ ：水セメント比の関数となる係数である。用いたクリープ関数は、基本クリープを表現する関数である。本解析においては、乾燥に曝された収縮による応力解析も行うため、厳密には上記のクリープモデルを用いる事は適当でない。従って、将来的には、任意の環境下でクリープによる応力緩和現象を追跡出来る数値モデルの導入が必要である。

### 3 並行演算処理システム

鉄筋コンクリート構造体におけるひび割れの発生の有無は、力学的境界条件によって大きく左右されるが、同時に材料内部における物理化学反応プロセス、物質・エネルギー移動現象、また強度、弾性係数等の材料の形成の程度にも影響を強く受ける。また発生したひび割れは、鉄筋腐食にとって不利な因子になる様に、腐食物質の物質移動抵抗性を低下させる。本研究では、この両者の事象

の連関を、より現実に近い形で数値解析によって追跡すべく、並行演算処理システムの構築を行った(図-3)。この並行演算処理システムは、多重処理型のオペレーティングシステムの保有する利点を生かしたものであり、異なるコード、解析方法、また支配方程式を保有する複数のプログラムを、一つのプログラムにする事無く、互いの演算を監視し、情報を高速バス等で共有しながら、並行して個々の演算を可能とするシステムである(図-3)。

始めに DuCOM によって、材料の状態に関する諸物理量が計算される。1ステップ終了後、得られた温度上昇量、含水量、間隙水圧、空隙構造、弾性係数、強度等の物理量は解析システムの共有記憶領域に書き込まれる。書き込みが終了した後、COM3 に計算開始の信号を発し、次の開始の信号を受け取るまで自らのプロセスを停止させる。開始の命令を受けた COM3 は、共有記憶領域から必要な情報を受け取り、応力解析を行う。ここで、構造部材のひび割れ等の発生の有無を判断し、ステップ終了後、同様に計算結果を共有記憶領域に書き込む。その後、自らのプロセスを停止させ、DuCOM に計算再開の信号を送る。以上の様に、個々のプログラムの進行を互いに制御しながら、前述の手続きを所定の解析期間続ける事になる。従って、各有限要素解析法は、それぞれの計算結果を、リアルタイムで各要素内の各ガウス点毎に種々の情報を共有する事が可能になる。この手法を用いれば、オペレーティングシステムにそれぞれの演算を制御させる事によって、異なるアーキテクチャ、解析スキーム、使用言語を問わず、既存の解析ソフト資産をわずかな修正を施す事のみで、そのまま運用できるという長所を持つ。

#### 4 解析例

##### 4.1 損傷発生下における水分分布

はじめに、本解析システムを用いた感度解析として、水分の逸散挙動を計算する事にする。解析においては、前述の通り始めに熱力学モデルで得られた情報が構造解析の計算フレームに与えられ、ひび割れ発生の有無を判断する。本研究では、提

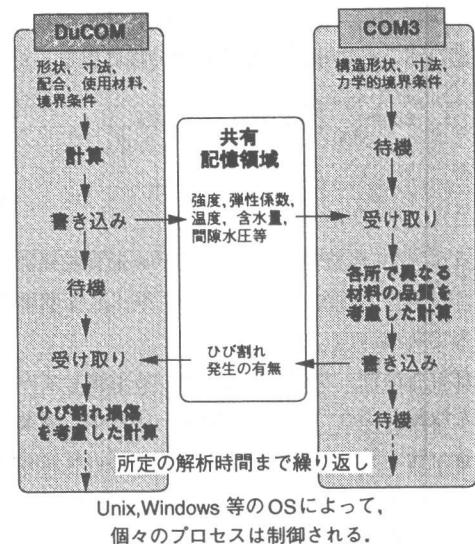


図-3 複数の異なるアーキテクチャを有するプログラマの並行演算処理システム

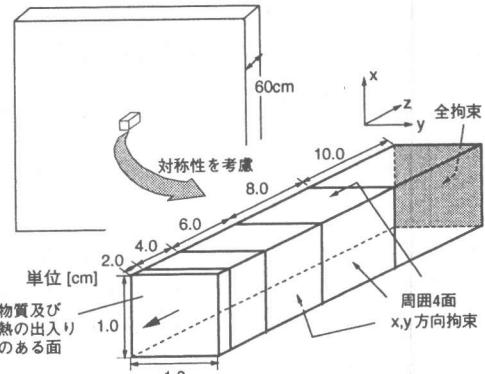


図-4 解析に用いた要素形状

案する並行処理演算手法が、統合解析システムとして妥当性を持つものかを検証する事を第一義とし、ひび割れ判定、またその後の応力緩和現象に関しては、前述の通り簡略化したモデルで計算を行った。また、ひび割れ以後の部材要素の平均ひずみの時間依存成分については、ひび割れ変形に吸収されるものとして、クリープは考慮しないものとした。変形・応力場の解析で判定されたひび割れの情報は、熱力学モデル解析に対して、材料特性の変化として再度戻される。ここで、ひび割れの連結度が高い、あるいは広いひび割れ幅を持つ等の損傷の大きな部位ほど、物質の侵入抵抗は

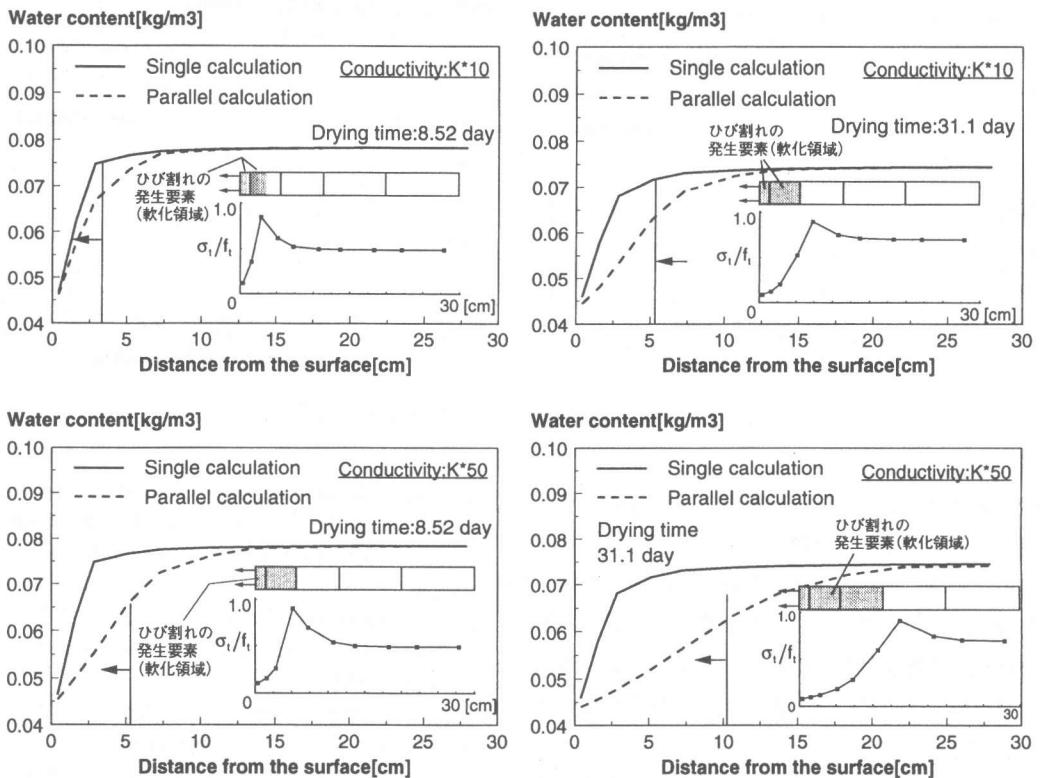


図-5 損傷発生下でのコンクリート中の水分及び内部応力分布

低下する事が予想される。本解析システムでは、損傷の度合と物質移動抵抗性の両者を関連付け、数量化する事が出来るが、本解析においては、ひび割れ発生後の水分に関する移動抵抗性に関して、水蒸気移動係数と液状水移動係数の両方の値を、まず単純にひび割れ前の 10 倍、及び 50 倍になると仮定し、感度解析を行った。解析対象は、W/C=30%，骨材体積 70%，中庸熱セメントを用いた無筋コンクリートスラブ供試体を想定した。3 日の封緘養生を施した後、相対湿度 50% の外気に曝した。解析に用いた要素形状、及び拘束条件を図-4 に示す。スラブ供試体の X, Y 方向は無限の長さを持つとし、図に示す対称性を考慮した要素分割とした。図-5 に水分移動抵抗性を 10 倍にしたもの、また 50 倍にしたもの、それに対する解析結果を示す。解析結果は、表面の境界からの距離とそれぞれの位置における水分の分布、引張強度で正規化した部材内部の引張応力分布、及び損傷状況を示している。比較のため、応

力解析を行わないケースもプロットした。結果に示されている通り、表面近辺の要素からひび割れが発生し、乾燥の進行と共に内部にひび割れが進展している傾向が見られる。また、明らかにひび割れの発生に伴い、水分の逸散量は大きくなる。

#### 4.2 損傷発生下における塩化物イオンの侵入

次に塩化物イオンの侵入に関するシミュレーションを行う。解析に際しての仮定、また対象とする供試体の形状、寸法、拘束条件、また配合及び使用材料は、前解析と同様である。環境条件に関しては、境界条件として、塩化物イオン濃度を 1.4(mol/l) と与え、乾燥 (50% RH) に 3 日間、また湿潤 (95% RH) に 4 日間曝されるものとした。解析結果を図-6 に示す。

解析結果より、ひび割れを考慮したケースに関して、時間の進行と共に、多くの塩化物イオンの侵入が認められた。本解析においては、ひび割れ後の液状水移動係数を 10 倍と仮定した。湿潤下

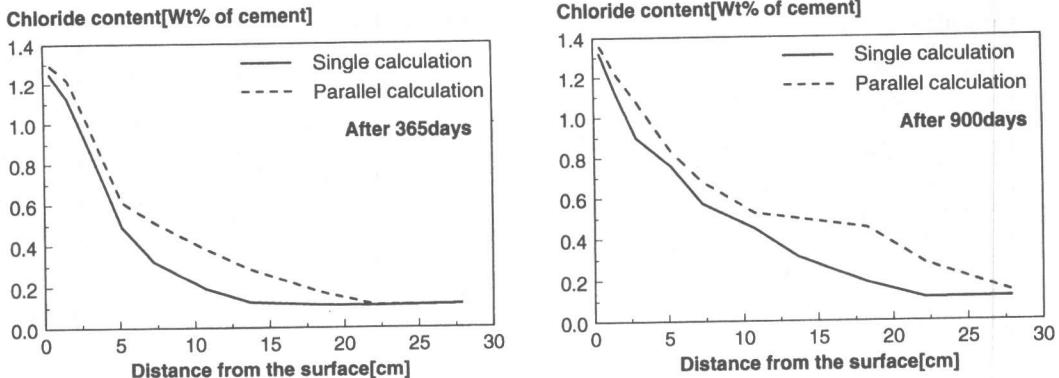


図-6 損傷発生下における塩化物イオンの侵入

におかれたコンクリートにおいては、液状水が外部から内部に向かう速度ベクトルを持って侵入する。この時、塩化物イオンも液状水に伴い内部に移動する。従って、ひび割れを考慮し、液状水移動抵抗性を低減させた解析においては、より多くの塩化物イオンの侵入が認められる結果となった。

## 5まとめ

若材齢におけるコンクリート材料の形成を含む品質の変遷と、それによって構成される材料挙動を追跡する双方向の数量化システムの構築を行った。本手法の特長は、独立した既存の異なる解析法を、互いの演算を監視・及び情報を共有させる事によって、連成解析を可能ならしめ、既存の資産をそのまま運用できる点にある。本研究では、提案手法が、数値解析システムとしての妥当性を持つものかどうかの検証に主眼を置き、材料モデルは簡略化した取り扱いで、個々の現象を表現する事にした。提案した解析システムを用いる事によって、従来別途扱われてきた鉄筋コンクリート構造物の構造挙動と材料の品質変化の相互依存性をそのまま表現し、構造物の保有性能を時系列上で、総合的に評価できる事を示した。

## 参考文献

- 1)前川宏一, 岸利治, R. P. Chaube, 石田哲也: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論文集, pp. 45-52, 1996.5.
- 2)Maekawa, K., Irawan, P. and Okamura, H.: Path-

dependent three-dimensional constitutive laws of reinforced concrete - formation and experimental verifications, Structural Engineering and Mechanics, Vol.5, No.6, pp.743-754, 1997.

- 3)岸利治, 前川宏一: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.
- 4)岸利治, 前川宏一:高炉スラグおよびフライアッシュを用いた混合セメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集, No.550, V-33, pp.131-143, 1996.
- 5)Chaube, R. P. and Maekawa, K.: A study of the moisture transport process in concrete as a composite material, Proceedings of the JCI, Vol. 16, No. 1, pp. 895-900, 1994.
- 6)Chaube, R. P. and Maekawa, K.: A permeability model of concrete considering its microstructural characteristics, Proceedings of the JCI, Vol.18, No.1, pp. 927-932, 1996.
- 7)石田哲也, R. P. Chaube, 岸利治, 前川宏一:任意の乾湿繰り返しを受けるコンクリートの含水状態予測モデル, 土木学会論文集, No.564, V-35, pp.199-209, 1997.
- 8)石田哲也, R. P. Chaube, 岸利治, 前川宏一:微視的機構に基づくコンクリートの自己収縮, 乾燥収縮及びその複合に関する解析的検討, 土木学会論文集, No.578, V-37, pp.111-121, 1997.
- 9)Chaube, R.P., Kishi, T. and Maekawa, K.: An integrated computational framework for predicting the long-term durability of cementitious materials, CONSEC 98, Under publication.
- 10)丸屋剛, SOMNUK T., 松岡康訓:コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.442, V-16, pp.81-90, 1992.
- 11)An, X., Maekawa, K. and Okamura, H.: Numerical simulation of size effect in shear strength of RC beams, Proceedings of JSCE, No.564, V-35, pp.297-316, 1997.
- 12)Bazant, Z. P. and L. Panula: A note on amelioration of the creep function for "Improved dischinger method", Cement and Concrete research, Vol.8, pp.381-386, 1978.