

# 物質・エネルギーの生成・移動と 変形・応力場に関する連成解析システム

石田哲也<sup>1</sup>・前川宏一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) 東京大学助手 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目 3-1)

本研究は、若材齢コンクリートの組織形成過程と材料品質の変遷を逐次追跡する3次元有限要素法解析法と、鉄筋コンクリート3次元有限要素構造解析法の双方向並行演算処理システムの開発を行ったものである。時間と共に逐次変化する細孔組織、強度、水和、温度、含水量等の若材齢のコンクリート材料特性は、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プログラムに与えられる事により温度、収縮体積変化等による部材各部の応力及び損傷状況が求められる。ここでひび割れに起因する材料の機械的な損傷の情報は、熱物理を司るシステムに逐次還流されて、物質移動解析に情報として提供される。以上の双方向連成解析システムによって、RC構造の変形、構造中の材料の機械的損傷及び材料の微細組織と品質を統合して評価できる事を事例を用いて示した。

**Key Words:** durability, structural performance, parallel computation, crack, mass transport

## 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、自己収縮及び水分の逸散を伴う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の各部位に応力を発生させ、構成材料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<sup>17),18),19),21)</sup>、鉄筋腐食の促進など、鉄筋コンクリート構造物の長期にわたる使用性や安全性にとって悪影響を及ぼす要因となる<sup>20),22)</sup>。従って、鉄筋コンクリート構造物の時系列上で変化する保有性能を把握する際には、材齢初期におけるコンクリート材料の体積変化、構造部材の内部応力及び損傷の予測、さらにひび割れコンクリート中の物質移動特性等の定量化が求められる。同時に、コンクリート構造物の力学的挙動と、材料の品質は強く関連する事象である。個々の現象を評価する技術の確立と同時に、それらを有機的に結び付けた総合評価手法<sup>2)</sup>の開発が必要となってくるのである。

従来、鉄筋コンクリート構造物の諸性能のうち、安全性と材料の品質変化は、その定量化にあたって別々

に扱われる事が多かった。しかしながら、両者は互いに連関をもつ事象である。本研究はこの両者を統合し、直接、構造物の保有性能(主として使用性と安全性)を時間経過と共に追跡出来る枠組みを目指す一連の研究の中で、数値解析システムの構築に主眼を置いたものである。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>3)</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、材料の剛性、強度、破壊じん性値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、細孔組織構造等の物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>4),10)</sup>に引き渡す。**DuCOM**からの材料に関する情報と、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や塑性損傷に関する機械的な材料情報を、熱力学モデルへ還流させて、物質移動の解析に使用する双方向の連成解析を組み上げ

る事を本研究の目的とした。本論文は、個々の要素技術やモデル化には多くの改良点が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時間軸上で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ものである。

## 2. 有限要素法プログラムの概要

### (1) 固体の形成及び劣化過程 (DuCOM)

若材齢時において相互に関連する水和発熱、水分移動保持及び細孔組織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、過去の論文及び付録を参照されたい<sup>5)~11)</sup>。図-1に熱力学連成システムの解析フローを示す。構成する各材料熱力学モデルは、現象の機構に立脚し、各々の相互依存性を自然に考慮する事が可能なモデルである。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、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>5),6)</sup>に従って、部材各部の温度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>3),7)</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>7),8),9)</sup>に取り込まれ、空隙内の相対湿度及び水分分布が求められる。ここで、水和による水分の消費は支配方程式となる質量保存則に当然取り込まれ、水分移動現象と、水和の進行の動的依存性が自然に考慮される事になる。

以上から求まるコンクリート内部の含水状態、空隙構造等のパラメータを用いて、系内に存在する塩化物イオン量を以下の手法で算定する<sup>11)</sup>。

多孔質体中を移動する塩化物イオンの流束は拡散と移流の両者から、一般に次式で表現される。

$$J_{Cl} = -\frac{\phi S}{\Omega} D_{Cl} \nabla C_{Cl} + \phi S u C_{Cl} \quad (1)$$

ここで、 $J_{Cl}^T = [j_x, j_y, j_z]$ : 塩化物イオンの流束ベクトル [mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>]、 $\phi$ : 多孔質体の空隙率、 $S$ : 空隙の飽和度、 $\Omega$ : 空隙の屈曲度を表すパラメータ ( $=(\pi/2)$ )、 $\nabla^T = [\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z]$ : ナブラ演算子、 $u^T = [u^x, u^y, u^z]$ : 溶液の流れと共に移動する塩化物イオンの速度ベクトル [m.s<sup>-1</sup>]、 $C_{Cl}$ : 溶液中のイオン濃度 [mol.l<sup>-1</sup>] である。 $D_{Cl}$  は溶液中の溶存イオンの拡散係数である。溶液中のイオン拡散係数は、厳密にはイオン濃度の関数になると予想される。濃度が高まるにつれ、イオン相互の電気的作用が徐々に卓越し、濃度勾配を駆動力とする拡散移動が見かけ上減少

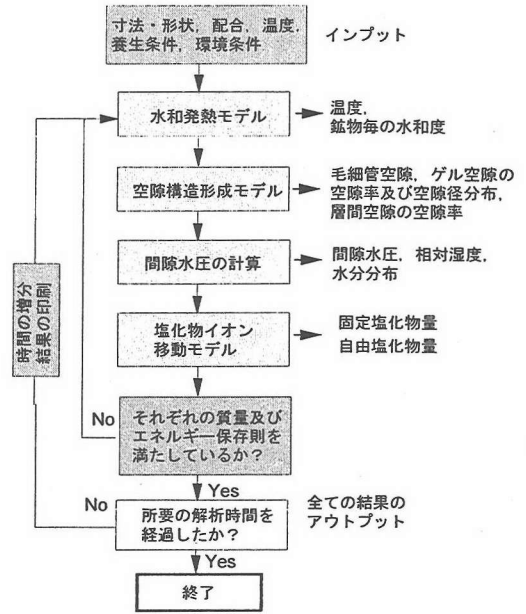


図-1 3次元有限要素法によるコンクリート材料の形成及び劣化過程を追跡する連成解析手法

するためである<sup>20)</sup>。この現象の詳細な機構に関しては現時点において不明なため、拡散係数は種々の感度解析から一定値( $3.0 \times 10^{-11}$  [m<sup>2</sup>/s])を仮定した。

式(1)中の右辺第一項は濃度勾配を駆動力とする拡散、第二項は空隙内の凝縮液状水事態の流れに輸送される移流成分である。移流による溶存イオンの移動速度は拡散移動同様、電気的相互作用のために、液状水自体のものとは異なる可能性が予想される。しかしながら、詳細な機構が明らかでないため、液状水移動モデルから求まる液状水の移動ベクトルと溶存イオンの速度ベクトルは等しいと仮定した。

$$u = u_w \quad (2)$$

ここで、 $u$ : 塩化物イオンの速度ベクトル、 $u_w$ : 水分移動モデルから求まる液状水の移動速度ベクトルで、空隙内部の相対湿度及び含水状態と、その履歴に依存する値である。

コンクリート中の塩化物イオンの移動が対象となる場合、式(1)の飽和度  $S$  は空隙中を満たす液状水の占める割合となる。ここで、空隙壁面への吸着水、あるいは層間空隙中に拘束されている水分は、イオンの移動経路として関与しないと仮定した。また、セメント硬化体内に存在する塩化物イオンは、組織内に化学的、物理的に固定化された塩化物、また液状水中を自由に動く自由塩化物に分類される。式(1)中のイオン濃度  $C_{Cl}$  は、この分類によれば自由塩化物に相当するものである。自由

塩化物と固定塩化物の間の相平衡は、丸屋の研究から、次式により報告されている<sup>12)</sup>。

$$\alpha_{fixed} = 1 - 0.35(C_{tot} - 0.1)^{0.25} \quad \begin{matrix} C_{tot} \leq 0.1 \\ 0.1 \leq C_{tot} \leq 3.0 \\ 3.0 \leq C_{tot} \end{matrix} \quad (3)$$

ここで、 $C_{tot}$ :全塩化物量[wt% of cement] ( $=C_{free}+C_{bound}$ , それぞれ自由塩化物量, 固定塩化物量)である。また、 $\alpha_{fixed}=C_{bound}/C_{tot}$ :固定化係数である。本解析においても、固定塩化物、及び自由塩化物の相平衡に関して、上記の関係をもそのまま用いる事にした。

以上の定式化により、セメント硬化体中に存在する固定塩化物量、及び自由塩化物量それぞれの値が、塩化物イオンに関する質量保存則に従い、導出されることになる。

## (2) コンクリート構造体の応力解析 (COM3)

### a) 温度、収縮応力の基礎構成方程式

常時に作用する応力レベルが小さい事を考慮して、温度及び収縮ひずみ、またクリープひずみを含む平均応力 $\sigma_v$ 、偏差応力 $S_{ij}$ 、体積ひずみ $\varepsilon_v$ 、偏差ひずみ $e_{ij}$ の線形クリープ構成方程式を次式のように仮定した。

$$\varepsilon_v = \frac{1}{3K} \int (1 + \varphi) d\sigma_v + \varepsilon_T + \varepsilon_{sh} \quad (4)$$

$$e_{ij} = \frac{1}{2G} \int (1 + \varphi) dS_{ij} \quad (5)$$

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>10)</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。この時、各ひずみは以下の様に表現される。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{Bmatrix} = [D'] \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix} + [D'] \begin{Bmatrix} \int \varphi d\sigma_{xx} \\ \int \varphi d\sigma_{yy} \\ \int \varphi d\sigma_{zz} \\ \int \varphi d\sigma_{xy} \\ \int \varphi d\sigma_{yz} \\ \int \varphi d\sigma_{zx} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_T + \varepsilon_{sh} \\ \varepsilon_T + \varepsilon_{sh} \\ \varepsilon_T + \varepsilon_{sh} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

ここに、 $[D'] =$

$\sigma_i/f_i$  正規化引張応力

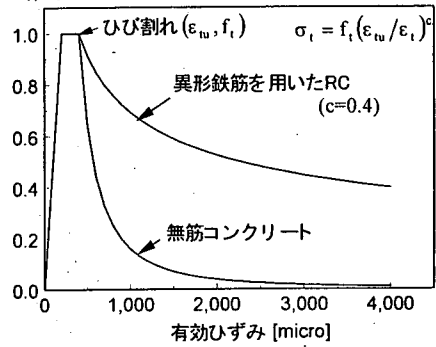


図-2 ひび割れ発生前後の応力-ひずみ関係

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3} \left( \frac{1}{3K} + \frac{1}{G} \right) & \frac{1}{3} \left( \frac{1}{3K} - \frac{1}{2G} \right) & \frac{1}{3} \left( \frac{1}{3K} - \frac{1}{2G} \right) & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{3} \left( \frac{1}{3K} + \frac{1}{G} \right) & \frac{1}{3} \left( \frac{1}{3K} - \frac{1}{2G} \right) & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{3} \left( \frac{1}{3K} + \frac{1}{G} \right) & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{2G} & 0 & 0 \\ & & & & \frac{1}{2G} & 0 \\ & & & & & \frac{1}{2G} \end{bmatrix}$$

Symm.

である。さらに応力 $\{\sigma\}$ について解き、マトリックス表示すると、以下の式(7)で基礎方程式は表現される。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - \left\{ \int \varphi d\sigma \right\} - [D]\{\varepsilon_T + \varepsilon_{sh}\} \quad (7)$$

ここで、 $[D]=[D']^{-1}$ であり、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瞬間弾性係数は、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、応力場で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、各点の水和度に応じた引張強度を越えた時点で、ひび割れが発生することとした。ひび割れが発生した後の応力緩和現象に関しては、岡村ら<sup>15)</sup>により引張剛性に対して提案された次式(8)で表現した。

$$\sigma_i \equiv \sigma_i(\varepsilon_i; c) = f_i \left( \frac{\varepsilon_{in}}{\varepsilon_i} \right)^c \quad (8)$$

ここに、 $\sigma_i$ :ひび割れに直交する平均引張応力、 $f_i$ :コンクリートの引張強度、 $\varepsilon_i$ :ひび割れに直交する引張ひずみ、 $\varepsilon_{in}$ :コンクリートのひび割れひずみ、 $c$ :剛性軟化係数である。ひび割れ後の部材の平均剛性は、引張軟化曲線上の点と原点を結ぶ傾きに相当する。

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<sup>15)</sup>。異形鉄筋を用いた RC 部には付着による応力伝達を代表するために、標準値である 0.4 の値を与えた。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

法によって決定される<sup>15)</sup> (図-2)。ここで、乾燥収縮に起因するひび割れ発生に至る過程は、微細な表面付近の分散ひび割れの発生及び成長、また微細ひび割れの発生による応力緩和を伴うと考えられる。また、厳密には収縮応力によるペーストと骨材の局所的なひび割れも考慮しなくてはならない<sup>20)</sup>。表面付近の微細ひび割れを局所的な破壊エネルギーを用いて追跡を試みる研究<sup>27)</sup>も過去に見られるが、未だ定説を見ない。従って、本研究では収縮等に起因する内部応力と、その後発生する応力緩和現象に関しては、当面 RC 部材の分散ひび割れモデルに用いられている引張軟化モデル<sup>15)</sup>を採用し表現することにした。

式(4)、(5)の線形クリープ関数については、Bazant-Panula のクリープモデルを適用した<sup>24)</sup>。ここで、クリープ関数 $\phi$ は、以下の様に表現される。

$$\phi(t, t_0) = \phi^T \left( t_e^{-m} + \alpha \right) (t - t_0)^{\eta^T} \quad (9)$$

ここで、 $t$ :材齢(日)、 $t_0$ : 荷重材齢(日)、 $\phi^T$ :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。

用いたクリープ係数は、水分の出入りのない状態で実験的に求められた基本クリープである。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。前述の通り、本論文は数値解析の観点から提案手法の妥当性を論ずるものであるため、ひとまず式(9)のクリープ関数を用いた解析での議論に留める。任意の水分環境と細孔組織に対して、外部・内部拘束を受けるコンクリートの変形、クリープによる応力緩和現象及び破壊現象を包含して記述する構成則と連成解析を用いた評価手法に関しては、著者らは別途検討を進めつつある。その議論の概要は、速報として一部公表しているの、既報の論文を参照されたい<sup>22)</sup>。

### 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。同時に材料内部における化学反応過程、物質・エネルギー移動現象、材料の形成の程度にも影響を強く与える。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<sup>17),18),19),21)</sup>。本研究では、この両者の事象の連関を、現実を促した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)。従来のひび割れ危険度を照査する熱応力解析等<sup>23)</sup>と比較して大きく異なる点は、従

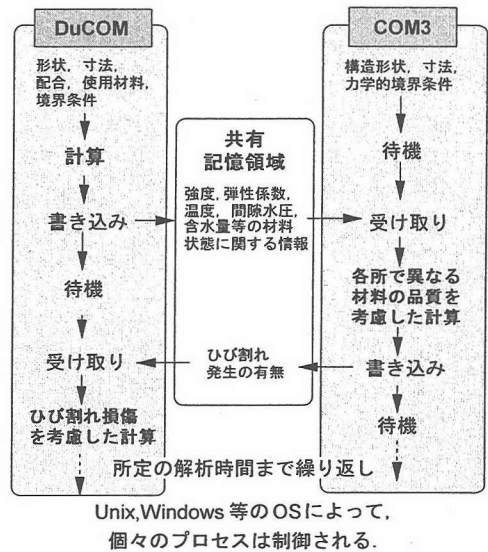


図-3 複数の異なるアーキテクチャを有するプログラムの並行演算処理システム

来の手法が、温度上昇量等のコンクリート部材の物性値を構造解析手法に与えて応力解析を行う単方向型であるのに対し、本手法は物質移動抵抗性に代表されるコンクリート組織レベルの物性と、機械的な損傷の情報を相互にやりとりする双方向型のシステムであることである。

この並行演算処理システムは、UNIX 及び Windows 等に代表される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性が計算される。1ステップ終了後、得られた温度上昇量、含水量、間隙水圧、細孔組織構造、弾性係数、強度等の材料に関する情報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、DuCOM は COM3 に計算開始の信号を発生し、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、材料熱力学モデルと構造挙動をそれぞれ司る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

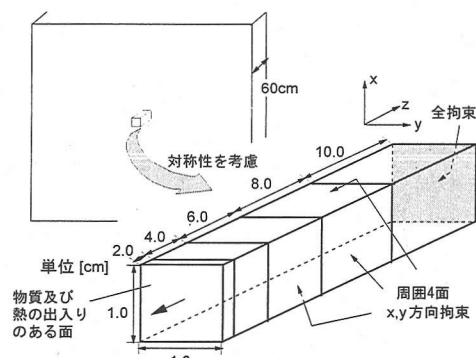


図-4 解析に用いた要素形状

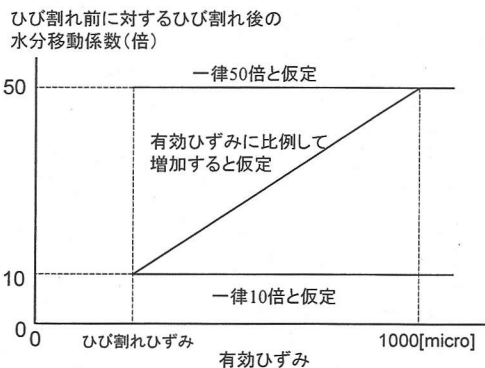


図-5 ひび割れ後の水分移動係数の取り扱い

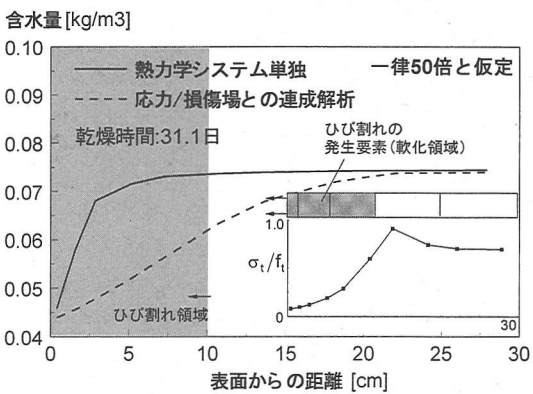
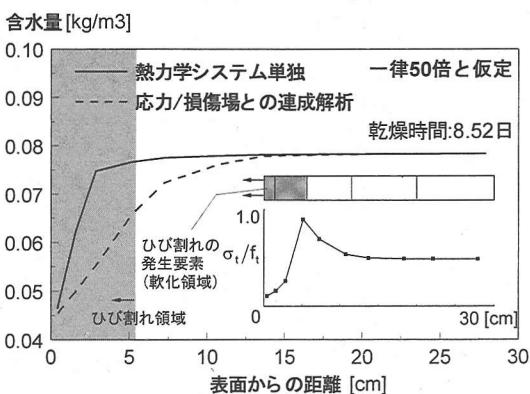
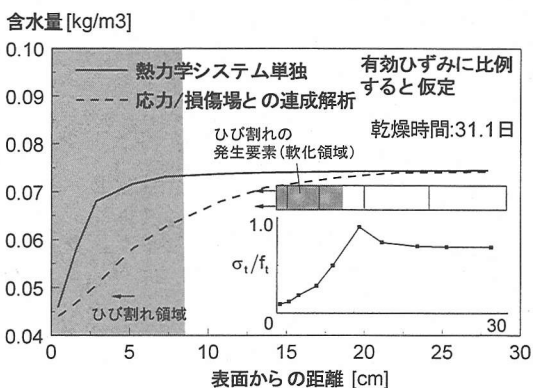
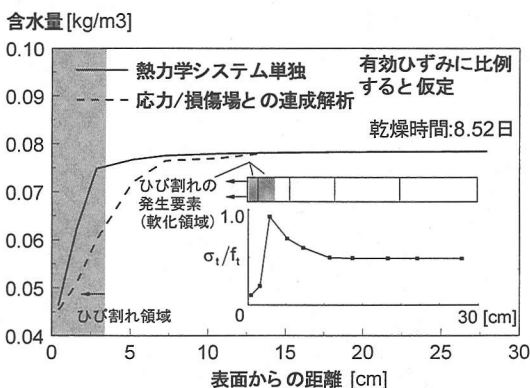
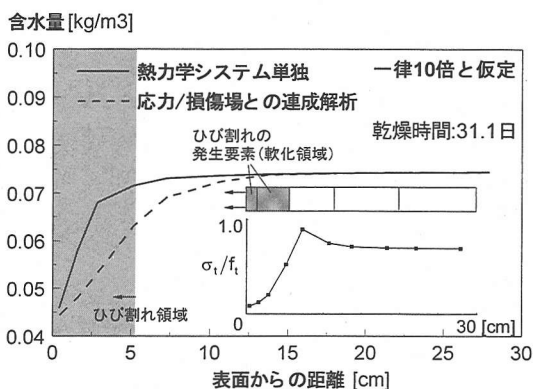
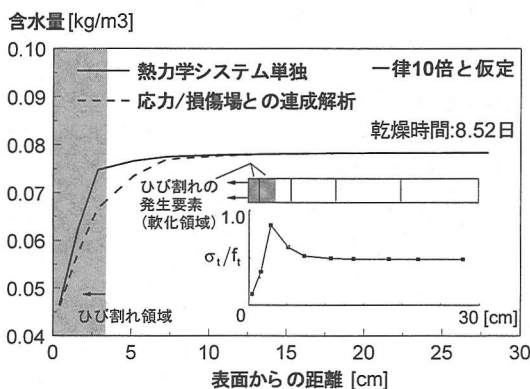


図-6 損傷発生下でのコンクリートの水分及び内部応力分布

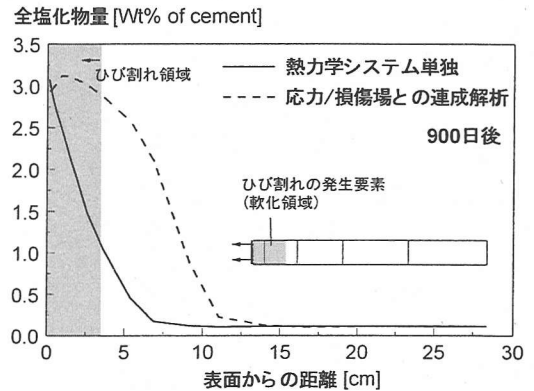
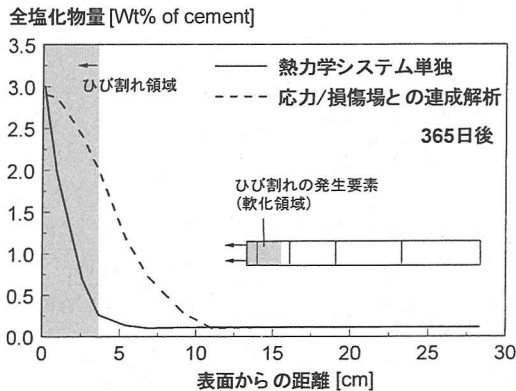


図-7 損傷発生下における塩化物イオンの侵入

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、計算機の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、既存の解析ソフトウェア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

##### (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、提案する並行処理演算手法が、連成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。ここで、ひび割れ発生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、ひびわれ変形に吸収されるものとして、連続体領域のコンクリートのクリープは考慮しないものとした。ただし、収縮ひずみの増大に伴う、ひび割れ開口を含む平均ひずみの時間依存性は考慮される。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。物質移動抵抗とひび割れ領域での損傷度は、密接に関連している事が報告されている<sup>17),18),19),21)</sup>。すなわち、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、物質の侵入抵抗は低下する。本解析システムでは、損傷の度合と物質移動抵抗性に関して両者を関連付ける事で、この事象を数量化する事が出来る。しかしながら、この点に関する詳細な検討は今後の課題として、本解析例においては、簡単な仮

定を設け解析を行った。すなわち、ひび割れ発生後の物質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一律 10 倍、一律 50 倍、さらに、ひび割れ後の有効ひずみに比例して増加する、という 3 パターンの仮定を設け、感度解析を行った(図-5)。

解析対象は、W/C=30%、骨材体積 70%、中庸熱セメントを用いた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-6 にひび割れ要素内の水分移動係数を一律 10 倍にしたもの、一律 50 倍にしたもの、及び有効ひずみに比例して増大するとしたもの、それぞ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コンクリート単位体積あたりの含水量[kg/m<sup>3</sup>]、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。水分分布の比較のため、応力解析を行わないで、常にコンクリートに力学的損傷が入っていないとしたケースについても解析を行っている。部材に残存する含水量は、水和の進行と共に全体的に減少すると同時に、表面から外部への水分移動に伴い、場所毎に不均一な含水量を示す。また、結果に示される通り、表面近辺の要素からひび割れが発生するが、乾燥の進行と共に収縮量が増大し、内部にひび割れが進展している傾向が見られる。この傾向は、ひび割れ後の水分移動係数の仮定値によって異なる。ひび割れ要素内の水分移動係数を大きく設定したもののほど、ひび割れ後の水分逸散量が大きく、収縮に起因する内部応力分布が異なり、ひび割れの進展が速やかに内部に進行する様子が解析された。

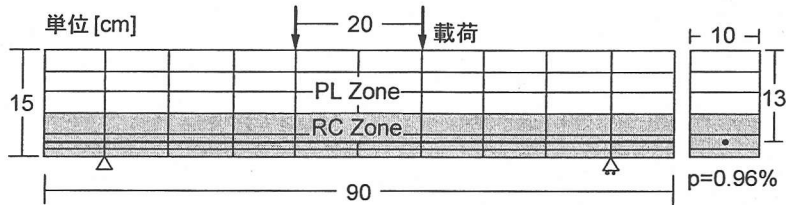


図-8 RC梁の解析要素モデル及び荷荷条件

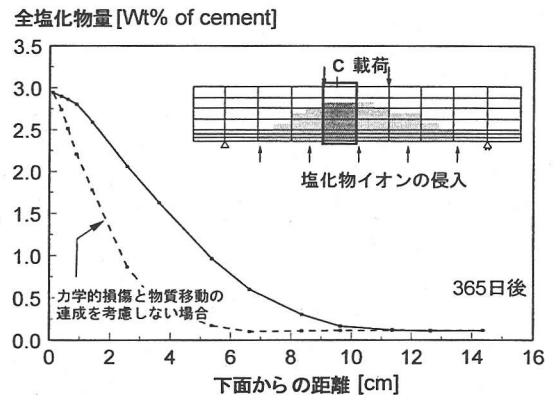
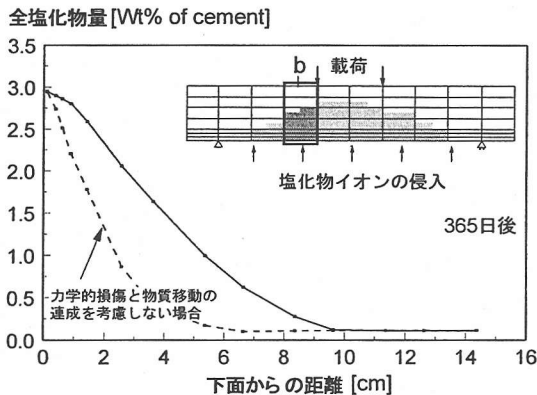
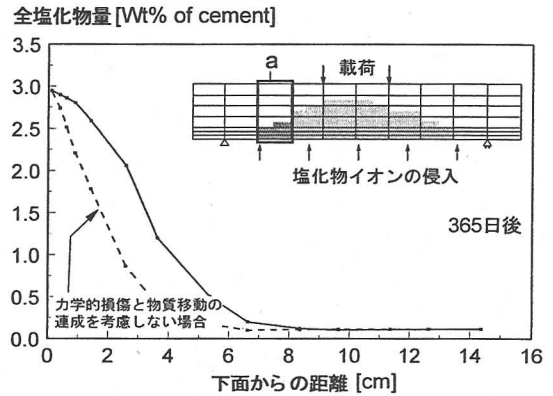
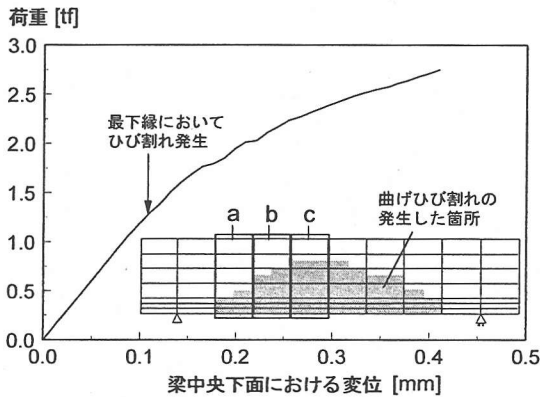


図-9 RC梁の荷重-変位関係、損傷状況及び内部への塩化物イオンの侵入

(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感度解析を実施した。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、前小節(1)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0.51(mol/l)と与え、乾燥(50% RH)に7日間、また湿潤(99% RH)に7日間曝されるものとした。365日及び900日後におけるコンクリート内部の塩化物イオン分布の計算結果を図-7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、より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。仮定した倍率自体は物理的な根拠を持つものではなく、極めて単純化して、システムの様態に論点をあてるものとしている。

湿潤下におかれたコンクリートでは、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輸送(移流)される。従って、コンクリートの機械的損傷とし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では、より多くの塩化物イオンの侵入が解析の上からも認められる結果となっている。

### (3) 外荷重による損傷を受けた RC 梁への塩化物イオンの侵入

外荷重を受ける事によって損傷を受けた、RC 梁への塩化物イオンの侵入シミュレーションを行った。解析の対象となる RC 梁の供試体寸法、形状、要素モデル、荷重条件を図-8 に示す。寸法は 10×15×90[cm]であり、鉄筋比は 0.96%とした。また、Anら<sup>15)</sup>により、RC 平板とは異なり、鉄筋が集中配置されている RC 構造物の FE 解析に対して、要素を鉄筋コンクリートゾーン(RC ゾーン)と無筋コンクリートゾーン(PL ゾーン)に区別し、各々異なる軟化/硬化特性を適用する手法が提案されている。すなわち、鉄筋の付着効果が影響を及ぼす範囲を RC ゾーン、付着の影響が及ばないと仮定される範囲を PL ゾーンと定義している。本解析においても、An と同様の手法により図-8 の通りゾーニングを行った。引張応力下の剛性モデルは図-2 に示されたものを用いた。RC ゾーンの剛性軟化係数  $c$  は 0.4 とし、PL ゾーンについては 2.0 とし解析を行った<sup>15)</sup>。配合に関しては、普通セメントを用い、水セメント比 45%、骨材量 65%とした。7 日間の封緘養生の後、変位制御で荷重を行うとの条件を与えた。0.42mm の変位を与えた時点で荷重を止めた。図-9 に、スパン中央下縁における荷重-変位曲線及び損傷状況を示す。

荷重後、梁下面を境界要素とした物質の侵入シミュレーションを行った。ここで、境界条件として、塩化物イオン濃度を 0.51(mol/l)と与え、乾燥(50% RH)に 7 日間、また湿潤(99% RH)に 7 日間曝されるものとした。ひび割れ分散形態が異なる PL ゾーンと RC ゾーンでは、ひび割れ後の要素内における物質移動抵抗性は異なる事が予想される。この点に関する議論は今後の課題として、システムの妥当性の検証を主眼に置く本論文では、前小節の解析同様、ひび割れ後の液状水移動係数は 10 倍に増加すると、極めて単純に仮定し解析を行った。塩化物イオンの分布を図-9 に示す。梁供試体外側から 30(a 点)、40(b 点)、50(c 点)cm の箇所の分布をそれぞれ示す。いずれの解析結果もひび割れの発生によって、健全部の場合と比較し、より多くの塩化物イオンが存在する事が解析によって認められる。また、上部までひび割れの進展した梁中央部において、塩化物イオンの侵入量がより増加する傾向も併せて解析される。すなわち、ひび割れ損傷を受けた部位では液状水としての水分移動が容易となり、その中に溶存しているイオンが拡散と共に輸送されて、内部深くに侵入していく過程が解析された。

## 5. まとめ

若材齢におけるコンクリート微細組織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。なお、連成解析システムにおける支配方程式群、材料定数値及び解析において時空で変動する出力値を、明確にする意味で付録につけた。

### 付録 支配方程式、入力情報、材料定数、出力変数一覧

付録図-a から図-c に連成解析システムにおいて取り扱う支配方程式群を示す。第一群として、材料熱力学を支配する質量・エネルギー保存式及び構造挙動を支配する釣り合い方程式を図-a に示す。これらの熱力学保存則及び釣り合い式は、コンクリート材料のみならず、全ての材料システムの中で必ず満足しなければならない法則である。

同図-a 中に、コンクリート材料に関する物質・エネルギー・運動量の移動則、及び生成・逸散則を列挙する。これらの支配方程式はコンクリート材料に固有のものであり、材料モデルによって記述される。本システムにおいては、物質・エネルギー(水分、塩化物イオン及び熱エネルギー)の移動及び生成・逸散に対して伴う、運動量の移動・生成項は極めて微量であるとし無視している。

物質・エネルギー・固体の状態・適合構成則として図-b にひずみ変形の適合則、温度・間隙水圧変形適合則、コンクリート固体構成則を示す。また図-c に細孔組織形成則、熱力学理論に従う水分平衡状態方程式、及び塩化物イオン平衡式を記す。これらの構成式に関しても、コンクリート材料特有の性質を考慮しモデル化される。

表-a に本システムの演算に必要な入力情報の一覧を示す。表中には省いてあるが、この他に解析対象の形状・寸法を規定する有限要素の  $x, y, z$  節点座標、要素形状・種類の入力が必要である。表-a 中の入力情報は時刻  $t=0$  における変数初期値を与えると共に、材料定数の一部を決定する事になる(表-b)。その他の材料定数は、コンクリート一般の特性を示し、実験結果等を通じて決定される。以上の材料定数と全ての支配方程式を解析システム中で解く事によって、表-c に示される変数が時間と空間に対して物理量として出力される。



保存則(物質・エネルギー・運動量保存式)  
質量・エネルギー保存式

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

釣り合い式

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + X_i = 0$$

水分<sup>3)</sup>:  $\left[ \phi_{tot} S_{tot} \frac{\partial \rho_l}{\partial P_l} + \rho_l \frac{\partial (\phi_{tot} S_{tot})}{\partial P_l} \right] \frac{\partial P_l}{\partial t}$   
 塩化物イオン<sup>11)</sup>:  $\frac{\partial}{\partial t} [(\phi_{gl} + \phi_{cp}) S_{cg} C_{Cl}]$  熱エネルギー<sup>14)</sup>:  $\rho c \frac{\partial T}{\partial t}$

物質・エネルギー・運動量の移動則  
水分<sup>7),8)</sup>

$$J_w = -D_w \nabla P_l \quad D_w = K_l + K_v$$

$$K_l = \frac{\rho_l \phi_{tot}^2}{50 \eta} \left( \int_0^r r dV \right)^2 \quad K_v = \frac{\rho_v \phi_{tot} D_0}{\Omega} \int_0^r \frac{dV}{1 + N_k} \quad N_k = \frac{l_m}{2(r - t_n)}$$

$$\eta = \eta_e \exp(G_e / RT) \quad G_e = G_{max} H_d \quad \dot{H}_d + \left( \frac{1 + \ddot{\eta}_e}{\eta_e} \right) H_d = \frac{RH}{\eta_e}$$

$$\eta_e = a(1 + bH_d^c) \quad a = \left[ 1.59 \left( \frac{\phi_{lr}}{\phi_{cp} + \phi_{gl}} \right) + 0.7 \right]^5 \quad b = 2.5a \quad c = 2.0$$

ひび割れ発生以後

$$D_w = 10 \cdot (K_l + K_v), \text{ or } 50 \cdot (K_l + K_v)$$

塩化物イオン<sup>11)</sup> 熱エネルギー<sup>14)</sup>

$$J_{Cl} = (\phi_{gl} + \phi_{cp}) S_{cg} \left( -\frac{D_{Cl}}{\Omega} \nabla C_{Cl} + u_w C_{Cl} \right) \quad J_H = -K_H \nabla T$$

$$u_w = J_l / \rho_l = -(K_l \nabla P_l) / \rho_l$$

質量の移動に伴う運動量の移動は無視

物質・エネルギー・運動量の生成・逸散則  
水分<sup>3)</sup>

$$Q_p = Q_{pnl} + Q_{hyd} = \rho_l \frac{\partial (\phi_{tot} S_{tot})}{\partial t} - W_{pow} \frac{\partial \beta}{\partial t}$$

$$\beta = \sum P_i \cdot \frac{Q_i}{Q_{i,\infty}} \cdot w_i$$

塩化物イオン<sup>11)</sup>

$$Q_{Cl} = \frac{\partial C_{bound}}{\partial t}$$

熱エネルギー<sup>5),6)</sup>

$$Q_H = W_{pow} \sum p_i \bar{H}_i$$

$$\bar{H}_i = \gamma_i \cdot \beta_i \cdot \mu_i \cdot H_{i,T_e} \exp \left[ -\frac{E_i(\bar{Q}_i)}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_e} \right) \right]$$

$$\bar{Q}_i = \int \bar{H}_i dt$$

$$\beta_i = f(\omega_{frec}, \eta_i) \quad \eta_i = 1 - \left( 1 - \frac{\bar{Q}_i}{Q_{i,\infty}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

物質・固体の消費・生成に伴う運動量の生成は無視

付録図一a 釣り合い式及び物質・エネルギー・運動量の保存, 移動, 生成・逸散則

物質・エネルギー・固体の状態・適合・構成則

コンクリート材料の強度, 静弾性係数, 収縮変形抵抗性<sup>10),13)</sup> 温度変化に対する自由ひずみ<sup>14)</sup> 間隙水圧に起因する自由収縮ひずみ<sup>10)</sup>

$$f'_c = a \exp(-b \cdot V_{pore}) \quad a, b: \text{constant}$$

$$V_{pore} = \phi_{cp} \cdot \exp(-B_{cp} \cdot r_{50}) \quad r_{50} = 50 \times 10^{-9} [m] \quad \epsilon_T = \alpha_c \Delta T$$

$$E = 8.5 \cdot 10^3 f'_c{}^{1/3} \quad f_t = 0.27 f'_c{}^{2/3}$$

$$\epsilon_{sh} = \phi_{tot} S_{tot} f_{pow} \frac{P_l}{E_{sh}}$$

$$E_{sh} = E/3$$

固体の変形適合式 コンクリート固体構成則<sup>14),24)</sup>

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad \epsilon_v(t) = \int_0^t \frac{1 + \varphi(t, t')}{3K(t')} \frac{d\sigma_v}{dt'} dt' + \epsilon_T + \epsilon_{sh}$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad \epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \quad \epsilon_v \equiv \frac{1}{3} (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \quad \sigma_v \equiv \frac{1}{3} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad \epsilon_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \quad e_{ij}(t) = \int_0^t \frac{1 + \varphi(t, t')}{2G(t')} \frac{dS_{ij}}{dt'} dt'$$

$$e_{ij} \equiv \epsilon_{ij} - \delta_{ij} \cdot \epsilon_v \quad S_{ij} \equiv \sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_v$$

$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

$\varphi(t, t') = \varphi^T (t_c^{-m} + \chi)(t - t')^{nT}$

$\varphi^T = \varphi^T(\text{mix proportion}, T)$   
 $t_c = t_c(\text{Temp. history})$   
 $m = m(\text{Comp. strength})$   
 $\chi = \chi(W/P)$   
 $\eta^T = \eta^T(\text{Temp. history})$

付録図一b 物質・エネルギー・固体の状態・適合構成則 (No.1)

物質・エネルギー・固体の状態・適合・構成則

細孔組織形成則<sup>3)</sup>

$$V_s = \frac{\alpha W_{pow}}{1 - \phi_{ch}} \left( \frac{1}{\rho_p} + \frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{\beta}{W_{pow}} \right) \quad \phi_{lr} = (t_w s_l \rho_s) / 2$$

$$\alpha = \sum p_i \cdot (\bar{Q}_i / \bar{Q}_{i,\infty}) \quad \phi_{gl} = V_s \phi_{ch} - \phi_{lr}$$

$$\phi_{cp} = 1 - V_s - (1 - \alpha) \frac{W_{pow}}{\rho_p} \quad \phi_{tot} = \phi_{lr} + \phi_{gl} + \phi_{cp}$$

$$\rho_g = \rho_p \rho_w (1 + \beta / W_{pow}) (1 - \phi_{ch}) / (\rho_w + \beta \rho_p)$$

$$A \delta_m^3 + B \delta_m^2 + C \delta_m + D = 0$$

$$A = \{n(1 - \phi_{in}) + 3(1 - \phi_{out})\} / \{3(n + 3)\}$$

$$B = \{n(1 - \phi_{in}) + 2(1 - \phi_{out})\} r_0^2 / (n + 2)$$

$$C = \{n(1 - \phi_{in}) + (1 - \phi_{out})\} r_0^2 / (n + 1)^2$$

$$D = -(\alpha r_0^3 / 3) [\phi_{in} + \beta \rho_p / \rho_w]$$

粒子接触前

$$\phi_{out} = 1.0$$

粒子接触後

$$\phi_{out} = 1 - (X + Y) / Z \quad \delta_{max} = k r_0$$

$$X = -n(1 - \phi_{in}) \left[ \frac{k^3}{3(n+3)} + \frac{k^2}{n+2} + \frac{k}{n+1} \right]$$

$$Y = \frac{\alpha}{3} \left[ \phi_{in} + \beta \frac{\rho_p}{\rho_w} \right] \quad Z = \frac{k^3}{n+3} + \frac{2k^2}{n+2} + \frac{k}{n+1}$$

$$s_l = 510 f_{pc} + 1500 f_{sg} + 3100 f_{fo}$$

$$\zeta = 19.0 f_{pc} + 1.5 f_{sg} + 1.0 f_{fo}$$

$$SA_c = \frac{3\delta_m}{\zeta r_{eq}^3 (1 - \phi_{in})} (A \delta_m^3 + B \delta_m^2 + C)$$

$$SA_i = 2\phi_i \int_{r_i}^{\infty} B_i \exp(-B_i r) d \ln r \quad SA_g = W_i \cdot sa_g$$

$$\phi(r) = \phi_{lr} + \phi_{gl} \cdot V_{gl} + \phi_{cp} \cdot V_{cp} \quad V_i = 1 - \exp(-B_i r)$$

熱力学的物質平衡状態モデル

水分<sup>7),8),9)</sup>

$$P_i = \frac{\rho_i RT}{M_i} \ln RH = -\frac{2\gamma}{r_c}$$

$$t_a = \frac{0.525 \times 10^{-8} \cdot RH}{(1 - RH / RH_m)(1 - RH / RH_m + 15 RH)}$$

$$RH_m = \exp \left[ \frac{-\gamma M_i}{\rho_i RT (r - t_a)} \right]$$

$$S_{out} = \int_{r_c}^{\infty} \left[ 1 - \left( \frac{r - t_a}{r} \right)^2 \right] dV$$

$$S_{cnd} = \int_0^c dV = 1 - \exp(-Br_c) = S_c$$

$$S_{lr} = RH$$

(Wetting stage)

$$S_{cnd} = S_c + \int_c^{\infty} \left( \frac{S_c}{V} \right) dV = S_c [1 - \ln S_c]$$

$$S_{lr} = RH^{0.05}$$

(Drying stage)

$$S_{cnd} = S_c + \int_c^{\infty} \left( \frac{S_{rmin}}{V} \right) dV = S_c - S_{rmin} \ln S_c$$

$$S_{lr} = S_{max} RH^{0.05}$$

(Drying to wetting stage)

$$S_{cnd} = S_c + \int_c^{\infty} \frac{S_c}{V} dV = S_c [1 + \ln S_{rmax} - \ln S_c]$$

$$S_{lr} = 1 + (RH - 1) \left( \frac{S_{min} - 1}{RH_{min} - 1} \right)$$

(Wetting to drying stage)

$$S_{cg} = S_{adv} + S_{cnd}$$

$$S_{tot} = \frac{\phi_{lr} S_{lr} + (\phi_{gl} + \phi_{cp}) S_{cg}}{\phi_{tot}}$$

$$\omega_{free} = \frac{\phi_{cp} S_{cp} (1 - V_g)}{W_{pow}}$$

$$\text{塩化物イオン}^{12)} \quad \alpha_{fixed} = 1 - 0.35(C_{tot} - 0.1)^{0.25} \quad \begin{matrix} 1 & C_{tot} \leq 0.1 \\ 0.543 & 0.1 \leq C_{tot} \leq 3.0 \\ & 3.0 \leq C_{tot} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} C_{tot} = C_{cl} + C_{bound} \\ \alpha_{fixed} = C_{bound} / C_{tot} \end{matrix}$$

付録図-c 物質・エネルギー・固体の状態・適合構成則 (No.2)

付録表-1 入力情報一覧

$P_i$	各場所における間隙水圧の初期値 [Pa]	$W_{pow}$	単位粉体量[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_{cl}$	各場所における塩化物イオン濃度の初期値 [mol/l]	$V_g$	骨材単位体積[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$T$	各場所における温度の初期値 [K]	$f_{pc}$	粉体中のセメントが占める重量比
$p_i$	セメント鉱物 $i$ の組成比率(C <sub>2</sub> S, C <sub>3</sub> S, C <sub>4</sub> AF, C <sub>3</sub> A, gypsum)	$f_{sg}$	粉体中のスラグが占める重量比
$\rho_p$	粉体比重[kg/m <sup>3</sup> ]	$f_{fo}$	粉体中のフライアッシュが占める重量比
W/C	水粉体比	$p_{sp}$	有機混和剤量 ( $\gamma_i(p_{sp})$ )

付録表-2 材料定数の定義

$\rho_l$	液状水密度[kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_p$	粉体比重[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_v$	飽和水蒸気密度[kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_w$	水和結合水比重[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_c$	熱容量[kcal/K.m <sup>3</sup> ]	$\phi_{ch}$	C-S-H ゲル粒子の保有空隙率(=0.28)
$D_0$	大気中における水蒸気拡散係数[m <sup>2</sup> /s]	$\phi_m$	内部生成物の保有空隙率(=0.28)
$D_{cl}$	溶液中の塩化物イオン拡散係数[m <sup>2</sup> /s]	$t_w$	層間空隙の厚さ(=2.8×10 <sup>-10</sup> [m])
$\Omega$	細孔の屈曲度を表すパラメータ(=π/2) <sup>2</sup> )	$s_l$	層間空隙の比表面積[m <sup>2</sup> /kg]
$\eta_i$	理想条件下における液状水の粘性[Pa.s]	$n$	外部生成物の空隙率分布を決定するパラメータ
$l_m$	気体分子の平均自由行程[m]	$r_0$	粉体粒子半径[m]
$G_{max}$	非理想条件下において液状水流れに要する最大 Gibbs エネルギー(=3500kcal/mol)	$\zeta$	水和生成物の体積-表面積比[nm]
$K_H$	熱伝導係数[kcal/K.m.sec]	$f_{pc}$	粉体中のセメントが占める重量比
$\rho_i$	鉱物 $i$ の組成比率	$f_{sg}$	粉体中のスラグが占める重量比
$w_i$	鉱物 $i$ の水和による水分消費量[mol/mol]	$f_{fo}$	粉体中のフライアッシュが占める重量比
$\bar{Q}_{i,\infty}$	鉱物 $i$ の最終発熱量[kcal]	$r_{eq}$	等価球体半径[m]
$W_{pow}$	単位粉体量[kg/m <sup>3</sup> ]	$s a_g$	水和生成物の比表面積[m <sup>2</sup> /kg]
$\gamma_i$	初期水和発熱過程における有機混和剤, フライアッシュによる遅延効果を表す低減係数	$r_m$	最小細孔半径[m]
$\mu_i$	鉱物組成の相違による C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S の発熱速度の変化を表す係数	$M_l$	水の分子量[kg/mol]
$T_0$	基準温度[K]	$\gamma$	液状水の表面張力[N/m]
$R$	気体定数[J/mol.K]	$V_g$	骨材単位体積[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
		$\alpha_c$	コンクリートの線膨張係数[1/K]
		$f_{pow}$	全体体積に占める粉体割合
		$\delta_{ij}$	クロネッカーデルタ
		$\nu$	Poisson 比

付録表-3 出力変数の定義

$t$	時間[s]	$H_d$	仮想空隙内相対湿度
$P_i$	空隙内液状水圧[Pa]	$r$	細孔半径[m]
$C_{cl}$	塩化物イオン濃度[mol/l]	$r_c$	吸着水を考慮した液状水が存在する最大細孔半径[m]
$T$	温度[K]	$V$	正規化細孔容積[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
$J_w$	水の流束[kg/m <sup>2</sup> .s]	$N_k$	Knudsen 数
$J_{cl}$	塩化物イオンの流束[mol/m <sup>2</sup> .s]	$u_w$	液状水流れの数ベクトル[m/s]
$J_H$	熱流束[kcal/m <sup>2</sup> .s]	$J_l$	液状水の流束[kg/m <sup>2</sup> .s]
$D_w$	水分移動係数[kg/Pa.m.s]	$Q_p$	水分生成・逸散項
$K_l$	液状水移動係数[kg/Pa.m.s]	$Q_{pd}$	細孔構造の変化による水分保持能力変化項
$K_v$	水蒸気移動係数[kg/Pa.m.s]	$Q_{hyd}$	水和による水分消費項
$\eta$	非理想条件下における液状水の粘性[N.s/m <sup>2</sup> ]	$\beta$	単位粉体重量あたりの結合水重量[kg/kg]
$\eta_c$	非理想条件下における液状水の有効粘性[N.s/m <sup>2</sup> ]	$\bar{Q}_i$	鉱物 $i$ の積算発熱量[kcal]
$G_e$	非理想条件下において液状水流れに要する付加的 Gibbs エネルギー	$Q_{cl}$	固定塩化物への相変化による自由塩化物逸散項
		$C_{bound}$	固定化塩化物量[mol/l]

$Q_H$	熱エネルギー生成項	$RH_{min}$	乾燥過程で経験した最小相対湿度
$\bar{H}_i$	鉱物 $i$ の単位重量あたりの水和発熱速度[kcal/kg.s]	$S_{cg}$	毛細管空隙, 及びゲル空隙の飽和度
$H_{i,T_0}$	基準温度 $T_0$ における鉱物 $i$ の基準発熱速度[kcal/kg.s]	$S_{lr}$	層間空隙の飽和度
$E_i(\bar{Q}_i)$	鉱物 $i$ の活性化エネルギー[kcal.K/kg.s]	$S_{tot}$	全飽和度
$\beta_i$	自由水(析出空間)の減少による発熱速度の低減を表す係数	$\alpha_{fixed}$	固定化係数
$\omega_{free}$	自由水率	$C_{tot}$	固定塩分量[mol/l]
$\eta_i$	正規化された鉱物 $i$ の内部生成層厚	$\epsilon_T$	温度変化に対する自由ひずみ
$V_s$	水和生成物体積[m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\epsilon_{sh}$	間隙水圧に起因する自由収縮ひずみ
$W_s$	水和生成物重量[kg/m <sup>3</sup> ]	$E_{sh}$	収縮に対する変形抵抗性[Pa]
$\alpha$	鉱物の平均水合度	$f_c'$	圧縮強度[Pa]
$\rho_g$	ゲル粒子の乾燥密度[kg/m <sup>3</sup> ]	$V_{pore}$	50nm以上の径を持つ毛細管空隙の正規化体積
$\phi_{cp}$	毛細管空隙の空隙率	$E$	瞬間剛性係数[Pa]
$\phi_{gl}$	ゲル空隙の空隙率	$f_i$	引張強度[Pa]
$\phi_{lr}$	層間空隙の空隙率	$X_i$	$i$ 方向外力[Pa]
$\phi_{tot}$	全空隙率	$u$	$x$ 方向変位[m]
$\phi_{out}$	最外殻部における水和生成物の空隙率	$v$	$y$ 方向変位[m]
$\delta_m$	外部生成物層の厚さ	$w$	$z$ 方向変位[m]
$SA_c$	毛細管空隙の比表面積[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$t'$	載荷時間[s]
$SA_g$	ゲル空隙の比表面積[m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\epsilon_{ij}$	ひずみテンソル
$B_i$	空隙径分布密度関数の形状を決定するパラメータ	$\sigma_{ij}$	応力テンソル
$RH$	相対湿度	$\epsilon_V$	平均体積ひずみ
$t_a$	空隙中の吸着層厚さ[m]	$\sigma_V$	平均体積応力
$RH_m$	半径 $r$ [m]の空隙を完全に飽和させる相対湿度	$e_{ij}$	偏差ひずみ
$S_{ads}$	吸着層の占める飽和度	$S_{ij}$	偏差応力
$S_{cond}$	凝縮水の占める飽和度	$K$	瞬間体積剛性係数[Pa]
$S_c$	処女湿潤過程における凝縮水の占める飽和度	$G$	瞬間せん断剛性係数[Pa]
$r_{max}$	湿潤過程において過去に飽和を経験した最大細孔半径[m]	$\phi$	クリープ関数
$S_{rmax}$	湿潤過程において過去に経験した最大飽和度	$\phi^T$	コンクリートの配合, 温度の影響を表す係数
$r_{min}$	乾燥過程において過去に水分逸散を経験した最小細孔半径[m]	$t_e$	温度履歴の影響を表す係数
$S_{rmin}$	乾燥過程において過去に経験した最小飽和度	$m$	圧縮強度の関数となる係数
$S_{max}$	湿潤過程で経験した層間空隙の最大飽和度	$\chi$	水粉体比の影響を表す係数
$S_{min}$	乾燥過程で経験した層間空隙の最小飽和度	$\eta^T$	温度履歴の影響を表す係数

## 参考文献

- 1) 前川宏一, 岸利治, 岡村甫: セメント・コンクリートの要求性能と設計法の変遷, セメント・コンクリート, No.594, 1996.8.
- 2) K. Sakai (Editor) : Integrated design and environmental issues in concrete technology, *Proceedings of international workshop in Hakodate*, E&FN SPON, 1995.
- 3) 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.
- 4) 岡村甫, 前川宏一: 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) 岸利治, 前川宏一: ボ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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 石田哲也, R. P. Chaube, 岸利治, 前川宏一: 任意の乾濕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.

- 10) 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.
- 11) Chaube, R.P., Kishi, T. and Maekawa, K. : An integrated computational framework for predicting the long-term durability of cementitious materials, *Proceedings of the second international conference on concrete under severe conditions*, CONSEC 98, pp.104-113, 1998.
- 12) 丸屋剛: コンクリート中の塩化物イオンの移動に関する解析手法の構築, 東京大学学位論文, 1995.
- 13) 岡村甫, 前田詔一: 鉄筋コンクリート工学, 技報堂出版, 1987.
- 14) 岡村甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 長瀧重義, 氏家勲, 西岡耕一郎: 微細ひび割れを有するコンクリートの透気性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, pp.187-192, 1987.
- 18) 佐藤博之, 下村 匠, 青山敏幸: ひび割れを有するコンクリートの気体透過抵抗性, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.744-745, 1997.9
- 19) 大下英吉, 田辺忠顕: 不均質材料の透水性に関するモデル化とその適用性評価, 土木学会論文集, No.526, V-29, pp.63-77, 1995.
- 20) 橘吉宏, 梶川康男, 川村満紀: 鉄筋腐食によって損傷を受けた RC ばりの挙動に関する考察, 土木学会論文集, No.402, V-10, 1989.
- 21) Bazant, Z. P., Ş. Sener and J. Kim : Effect of cracking on drying permeability and diffusivity of concrete, *ACI materials journal*, No.84-M35, pp.351-357, 1987.
- 22) 濱田 宏, 丸山久一, 下村 匠, 青山敏幸: 腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の劣化予測モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.811-816, 1997.
- 23) Mabrouk, R., Ishida, T. and Maekawa, K. : Solidification model of hardening concrete composite for predicting autogenous and drying shrinkage, *Autogenous shrinkage of concrete edited by Ei-ichi Tazawa*, pp.309-318, E&FN SPON, 1998.
- 24) 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.
- 25) コンクリート構造物の体積変化によるひび割れ幅制御に関するコロキウム論文集, JCI, 1990.
- 26) Gjorv, O.E. and Sakai, K. : Testing of chloride diffusivity for concrete, *Proceedings of the international conference on concrete under severe conditions*, CONSEC 95, pp.645-654, 1995.
- 27) Alvarado, A.M. and Wittmann, F.H. : Shrinkage as influenced by strain softening and crack formation, *Creep and Shrinkage of Concrete, Proceedings of the fifth international RILEM symposium*, pp.103-113, E&FN SPON, 1993.
- 28) Mier, J.G.M.van. : Fracture processes of concrete, CRC press, 1997.

(1998.3.16 受付)

## AN INTEGRATED COMPUTATIONAL SYSTEM OF MASS/ENERGY GENERATION, TRANSPORT AND MECHANICS OF MATERIALS AND STRUCTURES

Tetsuya ISHIDA and Koichi MAEKAWA

The authors presented an integrated computational system of 3D FE structural analysis program, and 3D FE thermo-hygro physical analysis which can deal with the development and deterioration process of concrete materials performance. The thermo-dynamic oriented system can give the solutions of temperature, pore pressure, pore distributions and other material properties in both 3-D space and time. By provided these information to the structural mechanics oriented system, the stress and the damage of RC member caused by temperature change and shrinkage can be obtained. The generation of crack will change the material properties in mass transport feature controlled by the thermo-physics. This proposed integrated system can be used for simultaneous evaluation of the total structural and material performances without distinguishing between structural and durability, respectively.