

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¹・R.P.CHAUBE²・岸利治³・前川宏一⁴

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向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元されて、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 DuCOM¹⁾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 COM3²⁾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

¹⁾ 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)

²⁾ 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)

³⁾ アジア工科大学講師 構造工学科、工博 (正会員)

⁴⁾ 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¹⁾。

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^{3),4)}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¹⁾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^{5),6),7)}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¹⁰⁾より塩化物イオン量が求められる。最終的に次式(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)。

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

ここで、 α_i ; 比容量(Specific capacity), θ_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_i ; 流束, Q_i ; 生成・逸散項(Sink Term)である。また、表-1 中の各記号に関しては、 ρc ; 熱容量, ρ ; 液状水密度, ϕ ;

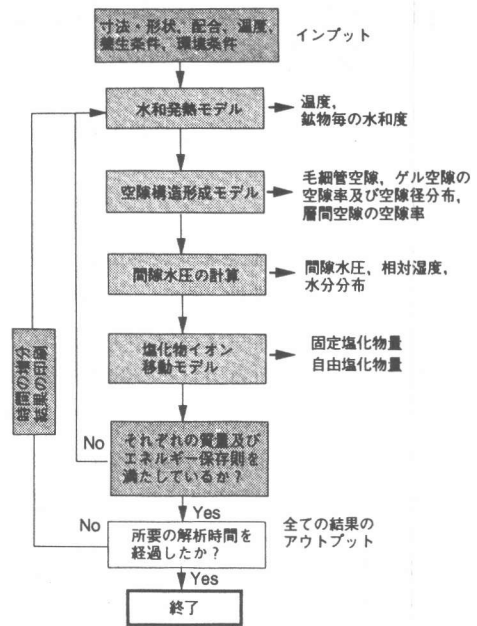


図-1 3次元有限要素法によるコンクリート材料の形成、劣化過程を追跡する連成解析手法

空隙率, S ; 空隙の飽和度, K_H ; 熱伝導係数, K_t ; 液状水移動係数, K_l ; 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_H ; 複合水和発熱モデルより求まる熱エネルギー生成項, Q_{hyd} ; 複合水和発熱モデルより求まる水和水による水分消費量, Q_d ; 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 α_i	流束 J_i	生成・逸散項 Q_i
T	ρc [kcal/K.m ³]	$-K_H \nabla T$ [kcal/m ² .sec]	Q_H [kcal/m ³ .sec]
P	$\phi \rho \partial S / \partial P$ [kg/Pa.m ³]	$-(K_t + K_l) \nabla P$ [kg/m ² .sec]	$-Q_{hyd} \rho \partial (S\phi) / \partial t$ [kg/m ³ .sec]
C	ϕS^{-1} [mol.l/mol.m ³]	$\phi S^{-1} (-D \nabla C + u C)$ [mol/m ² .sec]	$-Q_d$ [mol/m ³ .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¹⁾ 及びゲル空隙¹⁾ 両者を考慮し、層間空隙¹⁾ は除く)