

平成 22 年 6 月 8 日現在

研究種目：若手研究（A）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19686029  
 研究課題名（和文） マルチスケール統合解析システムと検査・分析技術の融合による  
 既設構造物の性能評価  
 研究課題名（英文） Performance evaluation of existing structures based on a coupled scheme  
 of thermo-dynamic analysis and various durability indicators  
 研究代表者 石田 哲也（ISHIDA TETSUYA）  
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
 研究者番号：60312972

研究成果の概要（和文）：本研究は、硬化コンクリートの品質と供用中に受けた環境・荷重履歴の両者を同定・推定する技術を開発し、数値解析システムへの入力情報として翻訳することで、新設・既設を問わず実構造物の性能を予見しうるシステムの開発を目指すものである。任意温度条件への対応など材料構成モデルの高度化と、既存コンクリート構造物の性能予測に必要な入力情報の整備、さらに実構造物群に適用を試みることで、本研究の妥当性を検証した。

研究成果の概要（英文）：The objective of this research is to develop a numerical system capable of simulating existing concrete structures. Inputs to the numerical simulation are obtained by proposed methodologies to estimate quality of structural concrete and environmental and loading histories during the service life. As verification, the numerical system in which enhanced constitutive models for arbitrary temperature conditions were implemented was applied to actual structures, and it was shown that the proposed system can be used for life-time prediction of reinforced concrete structure.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	11,900,000	3,570,000	15,470,000
2008 年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
年度			
年度			
年度			
総計	20,000,000	6,000,000	26,000,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学 土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：土木材料、コンクリート、維持管理、シミュレーション、非破壊検査

## 1. 研究開始当初の背景

過去 20 年の研究成果により、様々な外力・環境作用のもと、無機複合材料と構造の振る

舞いを、数値解析システムを用いて逐一予測することが可能となりつつある。その際には入力情報として、コンクリートの配合・使用

材料、養生条件、供用期間中に受ける環境・荷重作用、ならびに形状・寸法、配筋といった構造諸元を与える必要がある。ここで既設構造物を対象とする場合、建設当時の設計・施工資料が散逸していることも多く、使用されたコンクリートの配合、使用材料（セメント種類、混和材使用の有無など）、および実際の施工・養生条件を同定することが一般に困難である。さらに供用中は、日・月単位で変動する温湿度、日射強さ、漏水、飛来塩分、環境酸、ならびに外荷重といった種々の複合作用を受ける。ある時点における構造物の性能・状態は、供用期間中に受けた固有の環境・荷重履歴を反映しているといえる。以上から、解析に与える入力情報を如何に同定するかが、最終的に確度の高い解を得るための鍵なのである。実験室環境といった高度に制御された境界条件のもとでモデルの高精度化を図ったとしても、初期・境界条件に関する入力に誤りがあれば、正しい工学解には到達し得ないと考えたのである。

## 2. 研究の目的

本研究は、実構造物内部に残された痕跡を手掛かりに、硬化コンクリートの品質と供用中に受けた環境・荷重履歴の両者を同定・推定する技術を開発し、数値解析システムへの入力情報として翻訳することで、新設・既設を問わず実構造物の性能を予見しうるシステムの開発を目指すものである。複数の分析や測定から得られる指標を総合化し、数値解析システムと連携させることで、構造系全体の挙動を時系列で追跡する手法を提案する。

## 3. 研究の方法

具体的な研究の方法論として、申請者の所属する研究グループが20年来にわたって研究開発を行ってきた数値解析技術と、研究の進展が近年著しい分析・測定技術ならびに非破壊検査・モニタリング技術の融合を試みる。理想化・単純化された初期・境界条件のみならず、施工の良否、養生の程度、種々の環境・外力作用など、多くの不確定要因を含む実構造物の振る舞いを精度良く追跡する技術開発が、本研究の目指すところである。研究開発の項目として、(1)コアサンプリング・非破壊検査による材料品質の同定と数値解析による評価、(2)熱力学材料モデルとRC構成則の精度向上・適用範囲拡大、(3)構造物劣

化調査と数値解析による検証、を実施する。(1)においては、設計・施工資料が散逸した場合に情報を得る手段としての硬化コンクリートの配合推定手法の開発、および非破壊試験結果（透気試験結果）を用いた材料劣化解析予測に取り組む。項目(2)においては、既存の熱力学材料モデルとRC構成則、ならびに数値解析システムのレベルアップを図る。実験室で高精度に制御された条件のみならず、様々な変動を伴う環境下での材料・構造挙動、および複数の非線形事象が同時進行する場合の材料・構造挙動に対する高精度化が本研究項目の目指すところである。(3)においては提案する手法の検証として、実際の既存構造物を対象として性能予測や寿命推定が可能か否か検討する。

## 4. 研究成果

1. 既設構造物を対象として、解析を用いた耐久性能予測を行う場合、実際に打ち込まれたコンクリートの配合条件を知ることが重要となる。本研究では、コンクリートおよび骨材の酸化カルシウム含有量を測定する化学分析と水和の進行による生じた空隙および水和収縮による生じた空隙などの物理的な空間構造分析の組み合わせにより、既存の手法における適用対象材料の制限や煩雑さなどの問題点を改善し、なおかつ、高い推定精度を実現する配合推定方法の開発を行った。提案手法の適用性を実験室レベルで作製した既知の供試体の配合分析により検証するとともに、実構造物の配合推定にも有効であることを確認した。

2. 数値解析手法を用いて耐久性予測を行う場合、コンクリートの配合や養生・環境条件を適切に入力する必要がある。ただし既設構造物を対象とした場合、これらの情報を建設当初にまで遡って特定することが一般に困難である。本研究では、硬化コンクリートの品質を示す指標として透気特性に着目し、数値解析への入力情報として利用することを試みた。その結果、制御された実験室環境ではあるものの、配合条件や養生条件を入力せずとも、透気係数から推定されるセメント硬化体の空隙構造ならびに水酸化カルシウム量を入力することで、中性化進行を良好な精度で追跡可能であることを示した。

3. 熱力学連成解析システムにおける鋼材腐食モデルの高度化を図った。実構造物の耐久

性予測を行ううえで、様々な温度条件下、あるいは塩化物イオン含有量に対して鋼材腐食速度を定量化することが重要になるが、本研究では低濃度～高濃度の塩化物イオンを含む供試体を作製し、20、40、60℃の温度環境における鋼材腐食量を高精度に測定することに成功した。この実験結果に基づき、電気化学理論に基づく既存モデルを微修正し、構成モデルの高度化に成功した。

4. 新設ならびに既設構造物の耐久性を考える場合、部材に発生したひび割れ損傷を如何に取り扱うかが重要なポイントである。本研究では、既存の空隙構造形成モデルを拡張して、マクロなひび割れ発生を表現する簡易手法の提案を行った。ナノ～マイクロメートルスケールの寸法から構成されるコンクリートの微細幾何構造情報に、ひび割れ空間に相当するミリメートルスケールの空隙構造を付加し、損傷により加速される塩分浸透現象の再現に成功した。

5. 変動環境や施工の不確実性を含む様々な条件下での耐久性予測を高精度化するために、熱力学連成解析システムにおける水分平衡・移動、中性化進行、塩化物イオン移動・平衡モデルの高度化を行った。これにより任意の温度環境や乾湿繰り返しなど、長期にわたる複雑な環境作用のもとでの、セメント・コンクリートの若材齢固体形成から長期の劣化進行予測が可能となった。

6. 上記項目において開発した数理モデルと解析システムの検証を行うために、現在供用中の地下鉄トンネルを対象として劣化進行予測を試みた。約30キロメートルの延長を有する構造物の非破壊試験データ（かぶり厚）を取得し、熱力学連成解析システムへの入力とすることで、今後30年間の中性化深さならびに塩化物イオン浸透予測を行ったものである。はつり出した鋼材腐食状況やかぶりコンクリートの浮き・剥離状況との比較から、開発を続けてきた解析モデルは現実の劣化を概ね捉えていることが明らかとなった。また得られた劣化進行予測をもとに、補修の優先順位を算定するシステムを合わせて開発し、より合理的なストックマネジメントを支援する技術開発に成功した。

##### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計10件）

- ① Prince O'Neill Iqbal and Tetsuya ISHIDA, Modeling of chloride transport coupled with enhanced moisture conductivity in concrete exposed to marine environment, Cement and Concrete Research, 査読有, 39, 2009, pp.329-339
- ② Tetsuya ISHIDA, Prince O'Neill Iqbal and Ho Thi Lan Anh, Modeling of chloride diffusivity coupled with non-linear binding capacity in sound and cracked concrete, Cement and Concrete Research, 査読有, 39, 2009, pp.913-923
- ③ Tetsuya Ishida, Shigeyoshi Miyahara and Tsuyoshi Maruya, Chloride Binding Capacity of Mortars Made with Various Portland Cements and Mineral Admixtures, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 6(2), 2008, pp.287-301
- ④ Tetsuya Ishida and Chun-He Li, Modeling of Carbonation based on Thermo-Hygro Physics with Strong Coupling of Mass Transport and Equilibrium in Micro-pore Structure of Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 6(2), 2008, pp.303-316
- ⑤ Shingo Asamoto, Tetsuya Ishida and Koichi Maekawa, Investigation into volumetric stability of aggregates and shrinkage of concrete as a composites, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 6(1), 2008, pp.77-90
- ⑥ 秋岡洋平, 石田哲也, 堀切寛, 透気特性に基づくコンクリートの空隙構造同定と熱力学連成解析による耐久性予測, コンクリート工学年次論文報告集, 査読有, Vol.30 No.1, 2008, pp.675-680
- ⑦ 李春鶴, 石田哲也, 半井健一郎, 複数の物理化学的分析を組み合わせた硬化コンクリートの配合推定手法の提案, コンクリート工学年次論文報告集, 査読有, Vol.30 No.1, 2008, pp.537-542
- ⑧ Raja Rizwan HUSSAIN, Tetsuya ISHIDA,

Effect of oxygen on corroding RC structures under variable moisture conditions, コンクリート工学年次論文報告集, 査読有, Vol. 30 No.1, 2008, pp. 1131-1136

- ⑨ Kenichiro Nakarai, Tetsuya Ishida, Toshiharu Kishi and Koichi Maekawa, Enhanced thermodynamic analysis coupled with temperature-dependent microstructures of cement hydrates Cement and Concrete Research, 査読有, 37, 2007, pp.139-150
- ⑩ Tetsuya Ishida, Toshiharu Kishi and Koichi Maekawa, Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, Cement and Concrete Research, 査読有, 37, 2007, pp. 565-578

[学会発表] (計4件)

- ① Tetsuya ISHIDA, Yukihiro ISHIKAWA, Mitsuhiro KAWABATA, Akira MARUYAMA and Satoshi TSUCHIYA, Maintenance Management System for RC Subway Tunnels based on Numerical Predictive Models Coupled with On-site Measurement Information, International Symposium on Society for Social Management Systems, 2009.3, Kochi, Japan
- ② Tetsuya ISHIDA, Koichi MAEKAWA, Shingo ASAMOTO and Amiltra BONGCHGETSAKUL, Multi-scale constitutive model of solidifying concrete coupled with micro-physical properties of cementitious composites, CONCREEP8, 2008.9, Ise-shima, Japan
- ③ Tetsuya ISHIDA, Kochi MAEKAWA and Toshiharu KISHI, Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, CONMOD08, 2008.5, Delft, Netherlands
- ④ 秋岡洋平, 石田哲也, 堀切寛, 耐久性指標を利用した熱力学連成解析によるコ

ンクリート構造物の耐久性能予測, 土木学会「構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム」に関するシンポジウム, 2008年4月, 東京(四谷), 土木学会講堂

[図書] (計1件)

- ① Koichi MAEKAWA, Tetsuya ISHIDA, Toshiharu KISHI, Taylor and Francis, Multi-scale Modeling of Structural Concrete, 2008, 頁数 655

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

○取得状況 (計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石田 哲也 (ISHIDA TETSUYA)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号: 60312972

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: