

## マルチスケール解析に基づく構造-地盤連成系の 長期性能予測プラットフォームの開発

Long-term performance assessment platform of interacted  
soil-structure system based on multi-scale analysis

前川 宏一 (Koichi Maekawa)

東京大学・大学院工学系研究科・教授



### 研究の概要

セメント系複合材料-構造と地下水を含む地盤構造との連成系を対象とし、ナノスケールの結晶層間空隙や Gel 空隙からミクロスケールの土粒子空隙までの多層階に連結される微細孔構造内に展開する物質の平衡と移動現象を統合したマルチスケール型時空間領域解析システムを構築した。これをプラットフォームとして社会基盤施設の長期安全性能と機能、寿命予測法を提供した。

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：マルチスケール解析, 細孔構造, 耐久性, 熱力学平衡, 物質移動, 疲労, 寿命推定

### 1. 研究開始当初の背景・動機

都市再生の要である自然災害や環境外力に対する安全・耐久設計と長寿命化には、基盤施設の主要構成材である土とコンクリートの統合した知で臨むことが不可欠である。セメント改良土等の中間材料の登場も相まって、連続的で境界のない無機複合摩擦固体としての知と技術の再統合が社会基盤の設計管理に大きな貢献を果たすことが期待される。

### 2. 研究の目的

マイクロ～ミクロスケールの地盤微細空隙構造の状態方程式及び土粒子骨格構成則と、ナノ～マイクロスケールのセメント系複合材料の微細空隙構造と骨材骨格の状態・非線形構成則を同一の解析システム上で統合することで、ミ～メートルの人間生活空間に現れる長期の材料構造耐久性、地盤環境変化、地震時性能と修復限界の予測を可能とするプラットフォームを形成することを目的とする。

### 3. 研究の方法

数値計算環境を基礎として、マルチスケールプラットフォームの理論展開とコード化の成果を実験によって多角的に検証し、システムの改良と検証を繰り返す方法論を採用した。特にセメント改良土を含む CSH 硬化体からのイオン溶出の高精度な計測（高周波プラズマ発光分析装置と微量水分測定装置）が多種物質の平衡と移動モデルの同定に大きな役割を果たし、非直交ひび割れの相互作用には移動型荷重方法で検証した。水分-温度-時間に連動する固体変形の計測を既往の研究で明らかにされていない領域に特化して実行した。

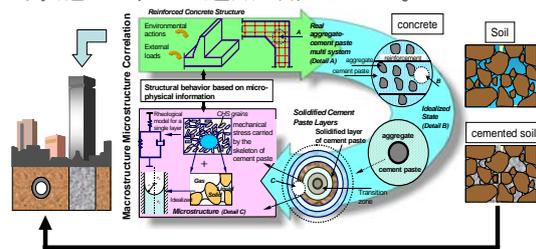
### 4. 研究の主な成果

#### (1)セメント系複合材料-地盤の両者を包含する多階層型細孔構造と相互連結固体モデル:

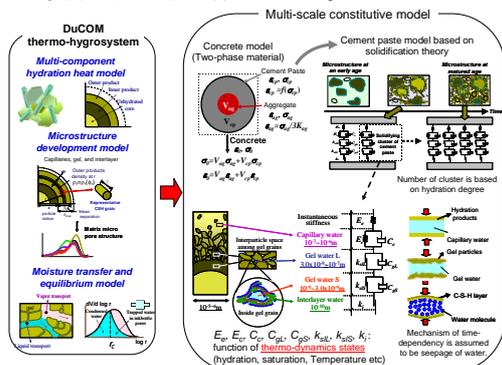
土粒子間の連結空隙構造をセメント系複合材料の微細空隙構造（層間, ゲル, キャピラリー）モデルに導入し、物質平衡-移動-反応-変形に関する数値プラットフォームの適用範囲を、自然および改良地盤まで拡張することに成功した。拡張熱力学連成解析を土粒子間隙水の圧力と変形にまで連結させて、地震時の構造-地盤液状化解析と、構造中のコンクリートの過渡的な変性を追跡する多階層連結解析コードを完成させた。

#### (2)水分-溶存イオン平衡状態及び移動モデルの高度化:

コンクリート構造および地盤が長期使用状態で経験する高温で、コンクリートおよび地盤材料の水分保持能力の履歴依存性を実証し、過渡応答時の水分平衡モデルの精度を向上させた。大径空隙によってブロックされる水分が高温時に急速に開放される状況が解明され、従来の定説を大きく変える契機を得た。セメント硬化体からのカルシウム溶出と自然地盤における吸着平衡モデルを、水和反応の過渡的状态に対して適用可能とした。



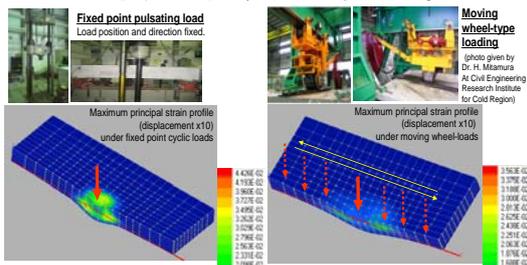
**(3)固体細孔内水分の熱力学的状態量に直結した時間依存型構成則:** 水和生成ゲルおよびキャピラリー細孔内の水分状態からセメント硬化体の巨視的な時間依存変形を、solidificationの概念を用いて予測するモデルを完成させ、分子動力学を適用し温度依存性に関するモデル化の高度化を図った。既往のグループ解析の概念で定量化が困難であった Pikett 効果などを、微細構造に連成した解析モデルで再現することに成功した。



**(4)鋼材腐食欠陥を伴う地中鉄筋コンクリートの挙動シミュレーションと安全性評価:** 鋼材腐食生成ゲルと周辺コンクリートのひび割れ進展,さらにゲルのひび割れへの浸入を考慮することにより,様々な条件下でのかぶり部コンクリートの寿命推定が可能となった。

**(5)液状化地盤-RC 群杭-基礎構造との動的非線形相互作用:** 飽和及び不飽和地盤中に RC 群杭を設置した動的実験を実施し,初期振動状態から一気に液状化する厳しい非線形領域での杭と地盤の応答を詳細に分析した。土粒子構成則と多方向固定ひび割れモデルの結合で,地中埋設構造応答をほぼ正確に解析できることを示した。

**(7)低-高サイクル時間-繰返し応力に対応するメソスケール構造材料モデルと構造疲労損傷予測:** 高応力状態での非線形時間依存変形の進行モデルを,弾塑性破壊型構成則の一般化で達成し,時間成分を取り除いた繰返し作用の影響度を,数値解析連動型実験から抽出することに成功した。さらにコンクリートひび割れ面における応力伝達機構の疲労特性を気中・水中で実施し,接触面密度関数モデルの高度化により,高サイクル疲労に対応可能な一般化モデルを構築し,世界で初めての直接積分型高サイクル疲労破壊解析を実現した。



5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

国際会議での多くの基調講演及び土木学会・コンクリート工学協会・地盤工学会など複数の分野から論文賞が授与され,分野横断・総合的視点に対する内外の認知を得た。マルチスケール解析を中心とした実務展開とベンチャー起業による技術の社会還元を実現したものはこれまでに例がない。

6. 主な発表論文

(研究代表者は太字,研究分担者には下線)

**Maekawa, K., Fukuura, N. and Soltani, M.:** Path-Dependent High Cycle Fatigue Modeling of Joint Interfaces in Structural Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, 6(1), 227-242, February 2008.

**Maekawa, K., Nakarai, K. and Ishida, T.**, Chemo-physical and mechanical approach to performance assessment of structural concrete and soil foundation, Transport Properties and Concrete Quality, John Wiley & Sons, 2007.

石田哲也, 李春鶴: 微細空隙構造と物質平衡・移動の熱力学強連成に立脚したコンクリートの炭酸化反応モデル, 土木学会論文集E, Vol. 63, No. 2, pp.274-286, 2007.5

浅本晋吾, 石田哲也, 前川宏一: 骨材特性との連関を考慮した複合構成モデルによるコンクリートの収縮解析, 土木学会論文集E, Vol. 63, No. 2, pp.327-340, 2007.6

Asamoto, S., Ishida, T. and **Maekawa, K.:** Time-Dependent Constitutive Model of Solidifying Concrete Based on Thermodynamic State of Moisture in Fine Pores, Journal of Advanced Concrete Technology, 4 (2) pp.301-323, 2006

**Maekawa, K.,** Toongoenthong, K., Gebreyouhannes, E. and Kishi, K., Direct Path-Integral Scheme for Fatigue Simulation of Reinforced Concrete in Shear, Journal of Advanced Concrete Technology, 4(1)159-177, 2006

Nakarai, K., Ishida, T. and **Maekawa, K.,** Multi-scale Physicochemical Modeling of Soil-Cementitious Material Interaction, Soils and Foundations, Vol.46 No.5, 2006.

半井健一郎, 石田哲也, 前川宏一: セメント系複合材料-自然地盤連成系を対象とする多相物理化学モデル,土木学会論文集, No.802/V-69, pp.137-154, 2005.11

Toongoenthong, K. and **Maekawa, K.,** Multi-mechanical approach to structural performance assessment of corroded RC members in shear, Journal of Advanced Concrete Technology, 3(1) 107-122, 2005.