

機関番号：12601  
研究種目：基盤研究(A)  
研究期間：2008～2010  
課題番号：20246073  
研究課題名(和文) 高サイクル荷重と環境作用を同時に受けるコンクリート構造の  
マルチスケール耐久性力学  
研究課題名(英文) Multi-scale modeling of cementitious composites for performance  
assessment of reinforced concrete infrastructures subjected to  
coupled with high-cycle load and environmental impacts  
研究代表者 前川 宏一 (MAEKAWA Koichi)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号：80157122

研究成果の概要(和文)：ひび割れを含む微視的なセメント硬化体の損傷からコンクリート構造物の巨視的な応答をシミュレーションするマルチスケール数値解析システムを構築し、社会基盤施設の長期供用を想定した数万～数百万回に及ぶ繰り返し荷重履歴のシミュレーション法を開発した。同時に、水中あるいは地下環境を想定し、コンクリートから水中へのカルシウム・ホウ素等の微量成分の溶出および再吸着をモデル化した。両成果により、微視的空間内の物理化学事象に基づく構造物の長期耐久性と環境影響評価を可能にした。

研究成果の概要(英文)：The multi-scale simulation model to quantify the micro damage of cracked / uncracked cementitious composites as well as structural performance made by massive concrete was developed. The model is capable of successfully simulating a long-term behaviors of concrete structure subjected to repeated thousand ~ million cycles of loads in its life. Furthermore, ion resolution from concrete, such as calcium, boron etc. and re-absorption model for underground concrete structure was provided. With coupling the macro and micro models, this study enables to predict long-term mechanical and thermo-dynamic performances of structural concrete and its environmental impact.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	15,700,000	4,710,000	20,410,000
2009年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
2010年度	9,700,000	2,910,000	12,610,000
年度			
年度			
総計	36,800,000	11,040,000	47,840,000

研究分野：土木工学(コンクリート工学)

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：耐久性力学、高サイクル疲労、移動荷重、マルチスケール、コンクリート構造、非直交ひび割れ、環境作用

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 材料科学と構造工学の融合

応募者は1990年以降、セメント系複合材料の微細構造のマルチスケールモデル化、熱力学平衡条件に基づく水分と容存イオンの状態方程式の研究、水分平衡状態に基づく時間依存性力学モデル、劣化損傷を内在するひ

び割れコンクリートの構成モデルに関する一連の研究を行い、材料科学と構造力学との融合を追求してきた技術的蓄積を有する。本研究において、これまでの知見を、さらに高次元で定量的に融合したマルチスケール耐久性力学モデルの完成を目指すものとした。

## (2) 高サイクル疲労問題への拡張

橋梁床版に代表される、繰返し移動荷重を受けるコンクリート構造部材の疲労破壊問題は、1980年代に行われた大阪大学・松井教授の実験研究に端を発し、以来、我が国の耐久性力学に関する代表的な研究の一つとなっている。一方で、応募者は耐震構造の研究で得た動的構造応答解析の技術を、構造物の長期疲労解析発展させた。本研究では、(1)の材料科学—構造システムの研究と(2)動的非線形解析技術とを総合化することで、上述のような疲労荷重を受ける構造物の長期耐久性予測を目指した。

## 2. 研究の目的

コンクリート構造物の巨視的な応答と構成材料の微視的な損傷（ひび割れ含）の両者を、数万～数百万回に及ぶ繰返し荷重履歴に対して推定するシミュレーションシステムを構築することが、本研究の目的である。構成則を解くにあたって、厳密な直接経路積分をすべての疲労サイクルに適用し、鋼材腐食等の材料劣化損傷・水分環境（主として雨水）・荷重移動の影響を取り入れる点に本研究の眼目がある（図1）。

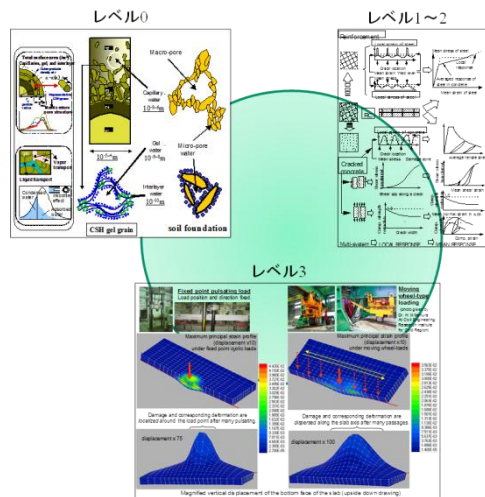


図1 マルチスケール耐久性力学モデルの概念図

## 3. 研究の方法

### (1) 多方向非直交ひび割れモデルの高度化

移動荷重下でのひび割れ面、及びひび割れを含むコンクリートの応力伝達機構を、適切にモデル化するための研究

- ① 繊維補強コンクリートを含むセメント系複合材料の薄版部材を作成し、薄版供試体に一方向のひび割れのみが生じるよう制御した面外曲げ荷重を与える。
- ② 版の支持方向を変更し、事前に発生させたひび割れとは主応力方向が異なるように、制御した面外曲げ荷重を与える。
- ③ 実験は静的、低サイクルあるいは高サイクルの繰返し荷重で実施する。

④ 本実験の結果をもとに構成則を主応力軸が回転する状況での繊維補強コンクリートを含むセメント系複合材料の応答解析にまで拡張し、疲労構成則を検証する。

⑤ さらに、新たに鋼繊維や骨材の混入量をパラメータとした系統的な実験とその解析により、せん断応力伝達機構を改善させた新材料を開発する。

### (2) 異なる水分環境下での長期耐久性検証

水分環境とコンクリート構造物の長期耐久性との関係を、マルチスケールモデルで定量化するための研究である。媒質としての水の影響、コンクリート内部の水分状態が疲労損傷およびクリープ変形に及ぼす影響に着目した。以下に具体的な研究手法を示す。

- ① 水および他の溶液中での鉄筋コンクリート部材の疲労実験を行い、溶液中でのコンクリートひび割れ発生・進展挙動の違いを明らかにする
- ② 乾燥収縮による初期損傷を与えた鉄筋コンクリート部材の疲労実験を行い、乾燥状態が疲労耐久性に及ぼす影響を検証する
- ③ 実橋における乾燥収縮およびクリープによる過大なたわみを、数値解析により分析。同時に、コンクリート構造物内部の水分移動に起因する長期たわみ予測手法を構築する。

### (3) 水分環境下での材料特性の変化と耐久性に関する検証

水中あるいは地下環境を想定し、物理化学に基づく構造物の長期耐久性と環境影響評価とを可能にするための研究である。

複数の異なるセメント系材料の浸漬実験から、コンクリートから水中へのカルシウム・ホウ素等の微量成分の溶出および再吸着をモデル化し、(1)(2)の構造応答解析とタイムスケールを合わせた統合システムを構築する。

## 4. 研究成果

### (1) 多方向非直交ひび割れモデルの高度化

研究方法①～⑤のとおり、主応力軸が回転する状況での繊維補強コンクリートを含むセメント系複合材料の載荷実験を実施した。特に、繊維補強コンクリートでは、繊維配向と多方向分散ひび割れと主応力軸の三者関係を実験から明らかにした。また、実験を非線形有限要素モデルによって再現し、移動荷重下での疲労構成則を検証することができた。また、鋼繊維や骨材の混入量をパラメータとした系統的な実験とその解析により、せん断応力伝達機構を改善させた新材料の開発を実施し、当初の目標を達成することができた。

さらに、鋼コンクリート合成床版を対象とした疲労実験と解析を行い、移動荷重の繰返

し（輪荷重走行試験）による合成床版の疲労損傷機構の再現にも成功した。本システムが複合構造物に対しても適用可能であることを示した（図2）。

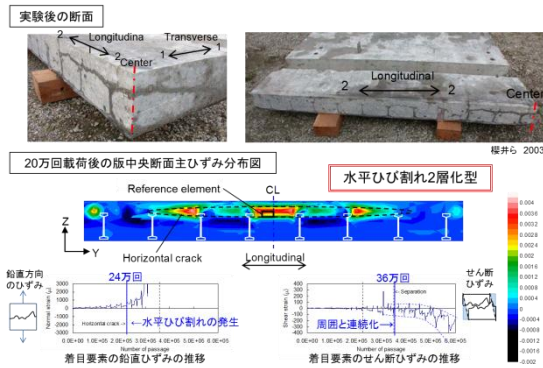


図2 高サイクル荷重をうける構造物の解析例

(2) 異なる水分環境下での長期耐久性検証

①および②の実験を実施し、水分環境の影響、特に乾燥収縮特性が構造物の長期耐久性と長期の疲労荷重作用下での寿命推定に重要な役割を果たすことを明らかにした。数値解析においては、載荷前のモデルに体積ひずみを与えることで、乾燥収縮の生じた構造物の疲労解析を簡易的に実施する手法を開発した。

③では、30年近く供用されている実橋梁上部構造の疲労及び劣化モニタリング結果から、実たわみをほぼ正確に予測できることが示された。三次元非線形応答解析法と水分平衡-物質移動解析システム DuCOM との強連成を実現した成果である（図3）。

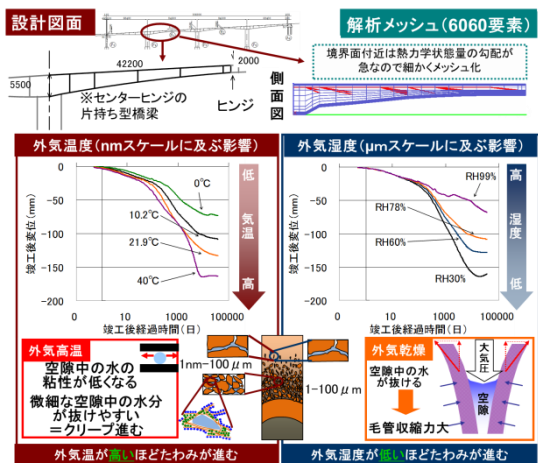


図3 環境作用と荷重が同時に作用する解析の例

(3) 水分環境下での材料特性の変化と耐久性に関する検証

セメント系材料の微小空隙構造と水分移動（乾燥収縮）、構造物長期供用下における微量成分（カルシウム）溶脱に関する材料モデルを高度化するため、高炉セメントやポー

ラスモルタルを用いた材料実験を実施し、材料モデルの検証を行った。この結果、水分と疲労荷重に伴うひび割れの開閉から、カルシウム・ホウ素等の微量成分も加速されて溶出することが分かり、新たにセメント・フライアッシュからのホウ素溶出と、溶出された成分の再吸着をモデル化して、当該システムを地盤系にまで拡張を図った。

(1)および(2)の成果により、従来、実験的研究が先行してきた移動荷重下の疲労寿命と材料品質・環境外力の複合効果を、数値解析によって定量的に検討できるシステムが構築された。さらに、(3)の成果により、水中あるいは地下環境を想定したコンクリート構造物からの微量成分の溶出を含めた、マルチスケールモデルによる構造物長期耐久性予測と環境影響評価の基礎が築かれた。

非線形ポアソン方程式と三次元非直交多方向固定ひび割れモデルを組み合わせるため、最高速度の剛性行列解法と並列化処理による演算高速化を実現した。

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17件）すべて査読付き

1. Gebreyouhannes, E., Kishi, T. and Maekawa, K. : Shear fatigue response of cracked concrete interface, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No. 2, 365-376, 2008.
2. Soltania, M., and Maekawa, K. : Path-dependent mechanical model for deformed reinforcing bars at RC interface under coupled cyclic shear and pullout tension, Engineering Structures, 30, 1079-1091, 2008.
3. 藤山知加子, 商峰, 櫻井信彰, 前川宏一, 直接経路積分法に基づく鋼コンクリート合成床版の疲労寿命推定と損傷モード, 土木学会論文集A, 66 (1), 106-116, 2010.
4. Koichi Maekawa: Multi-scale and multi-thermo-mechanical modeling of cementitious composites for performance assessment of reinforced concrete infrastructures, Computational Structural Engineering: Springer, 37-47, 2009.
5. 藤山知加子, 池野誠司, 小林薫, 前川宏一: 複数の移動荷重が同時または交互に作用するスラブの疲労損傷機構, コンクリート工学年次論文報告集, 31(2), 31-36, 2009.
6. 藤山 知加子, 櫻井 信彰, 前川 宏一:

- 鋼コンクリート境界面特性とリブ諸元が合成床版疲労損傷機構に及ぼす影響, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第 67 巻第 1 号, 193-206, 2011.
7. Kohei NAGAI, Benny SURYANTO and Koichi MAEKAWA: Space-Averaged Constitutive Model for HPFRCCs with Multi-Directional Cracking, ACI Material Journal, Vol. 108, No. 2, 139-149, 2011.
  8. Benny Suryanto, Kohei Nagai and Koichi Maekawa: Smear-crack modeling of R/ECC membranes incorporating an explicit shear transfer model, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 8, No. 3, 315-326, 2010.
  9. Benny Suryanto, Kohei Nagai and Koichi Maekawa: Bidirectional Multiple Cracking Tests on High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Plates, ACI Materials Journal, September-October, 450-460, 2010.
  10. Benny Suryanto, Kohei Nagai and Koichi Maekawa: Modeling and analysis of shear-critical ECC members with anisotropic stress and strain fields, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 8, No. 2, 239-258, 2010.
  11. 千々和伸浩, 石田哲也, 前川宏一: コンクリートの微細空隙中の水分と PC 橋の長期変位, 橋梁と基礎, Vol. 45, No. 1, 38-41, 2011.
  12. 前川宏一: コンクリート構造の寿命推定—長寿命化に向けて—, 橋梁と基礎, Vol. 44, No. 8, 8-13, 2010
  13. Benny Suryanto, Kohei Nagai and Koichi Maekawa: Investigating Shear Transfer Across Cracks in High Performance Steel Fiber-reinforced Concrete, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, 1285-1290, 2010.
  14. 森戸重光, 半井健一郎, 収縮応力および収縮ひび割れが RC はりのせん断耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 2, 673-678, 3010.
  15. 佐川孝広, 石田哲也, Yao Luan, 名和豊春, 高炉セメントの水和組成分析と空隙構造特性, 土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 3, 311-324, 2010.
  16. Hussain, R. R. and Ishida, T.: Enhanced electro-chemical corrosion model for reinforced concrete under severe coupled action of chloride and temperature, Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 3, 1305-1315, 2011.
  17. 千々和伸浩, 杉田恵, 石田哲也, 前川宏一, セメント硬化体中の微視的機構モデルに基づく実 PC 橋の長期時間依存変形シミュレーション, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, 407-412, 2010.
- [学会発表] (計 6 件)
1. Koichi Maekawa, Kenichiro Nakarai and Tetsuya Ishida, MODELING OF CALCIUM LEACHING FROM CEMENTED COMPOSITES COUPLED WITH MICRO-PORE STRUCTURAL REFORM, 8th. World Congress on Computational Mechanics (WCCMS), June 30 - July 5, 2008, Venice, Italy.
  2. Koichi Maekawa, Engineering Platform of Managing huge amount of knowledge for Simulation of Infrastructure Dynamics, Society for Social Management Systems, 2008 年 3 月 5 日～3 月 7 日, 高知
  3. Tetsuya ISHIDA, Modeling of Strength Development of Blast Furnace Slag Concrete based on Micro-physical Properties, CONMOD10, 2010.6, Lausanne, Switzerland
  4. Tetsuya ISHIDA (Invited), Multi-scale Modeling of Concrete Performance - Toward a lifespan simulation of reinforced concrete structure, Lafarge International Workshop, 2010.7, Lyon, France
  5. Kohei NAGAI, Static and Fatigue Failure Simulation of Concrete Material by Discrete Analysis, 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structure (FraMCoS-7), 2010.5, Jeju, Korea
  6. Kohei NAGAI, Numerical Simulation of Damaged HPFRCC Plates with Multi-directional Cracking, 2nd International Conference on Durability of Concrete Structures, 2010.11, Sapporo, Japan
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
前川 宏一 (MAEKAWA Koichi)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 80157122
  - (2) 研究分担者  
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  
半井 健一郎 (NAKARAI Kenichiro)  
群馬大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10359656  
長井 宏平 (NAGAI Kohei)  
東京大学・大学院工学系研究科・特任講師  
研究者番号：00451790