

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23226011

研究課題名(和文)水分子準平衡モデルに基づく大型RC-PC社会基盤構造の長期動態予測

研究課題名(英文)Long-Term Dynamic Simulation of Large-Scale RC-PC Infrastructures Based on Quasi-Thermo-hygral Modeling

研究代表者

前川 宏一(MAEKAWA, KOICHI)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：80157122

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 172,800,000円

研究成果の概要(和文)：ナノ流体モデルを拡張展開し、雨水の急速侵入、降雨後の蒸発散を高精度で評価可能とした。PC暴露試験体の曲率等の推移と水分計測から検証を重ねた。水分準平衡と構造モデルを連成させ、中高層RC建物と原子力施設の中長期固有振動数の変化を予測できた。浅地中ダクトの遅れせん断破壊を数値解析で予見し非破壊検査から現象を確認した。地盤との相互作用から長期せん断破壊が評価可能であることを示した。ASRゲル、腐食ゲル、常温液状水、氷晶の混合移動を考慮できる数値解析モデルを開発した。ASRに伴う構造損傷と凍結融解に伴う損傷に相互作用が強く表れること、これが部材のRC床版疲労延命化に寄与する機構が解明された。

研究成果の概要(英文)：By coupling micro-pore networks with nano-channel hydraulics, the hygral-mechanical model on thermodynamic equilibrium of moisture and momentum is upgraded. Rapid adsorption of rain and following evaporation can be accurately reproduced and the model is verified by the continuous monitoring of internal moisture and curvature of the box PC mockups exposed to natural environment. Long-term varying natural frequency of tall buildings and nuclear facilities is successfully simulated by the thermo-hygral model. Delayed shear failure of underground RC culverts was also simulated by the on-site existing facilities, and the remaining risk of failure can be estimated. A unified poro-mechanics with ASR silica & corrosion gels and condensed-ice is established with strong full coupling. Based upon the simulation platform as mention above, the complex deterioration of RC bridge decks under fatigue loads and ASR & freeze/thawing cycles is investigated and the strong coupling is fairly predicted.

研究分野：工学

キーワード：コンクリート構造 マルチスケール解析 耐久性 維持管理 乾燥収縮 せん断破壊 準平衡

### 1. 研究開始当初の背景

既存インフラ施設の合理的な維持管理と長寿命化に対する社会的要請が高まると期を同じくして、長大橋梁や地下施設の過剰たわみ、過剰ひび割れ、寒冷地の橋梁床版の早期劣化などが健在化しつつあった。設計段階での予測を大きく上回る速さの不具合の原因と劣化機構が明らかにされておらず、多くの現場では応急的対応に留まっていた。将来予測が困難な事等、公共施設の維持管理に適正を欠く恐れが共有されつつあった。

劣化が単一の事象だけでは説明が付かないことも認識されつつあった。維持管理計画策定において、構造技術と構成材料の物理化学モデルを混成したマルチスケール解析による、複合劣化の機構解明に寄せる期待感が高まりつつあった。

### 2. 研究の目的

セメント系無機多孔体中に存在する水分子の準平衡状態と、水分が有する総運動量の変化を時空間軸で厳密に追跡するマルチスケール解析に基づき、実環境下の RC-PC 構造の長期動態予測を実現することが本研究の目的である。

PC 橋梁の長期(30 年超)過剰たわみ問題と浅地中構造の中期(15 年超)過剰変形問題の主因を究明し、1950 年代に確立されたクリープ・乾燥収縮設計法と変形制御、及び静土圧に関する使用限界状態設計法の再構築を図り、インフラの長寿命化を達成する。

### 3. 研究の方法

長大 PC 橋梁の長期変形機構と水分平衡状態を促進環境下の数年で再現することを目して、中規模試験体の暴露試験を茨城県柿岡実験場で開始する。実自然環境と構造表面境界における水分交換モデルの精度を高め、中型 PC 上部構造模型と地中埋設型 RC カルバートの四季を通じた水分動態と平衡状態量の同定から、長期過剰たわみに現れる寸法効果の存在を実証し、連成解析モデルの多角的検証を行う。細孔中の水分準平衡状態と構造物の変位加速領域との相関関係を解析し、従来設計で使用限界状態と終局限界状態ごとに使い分けてきた構成則を、高サイクル疲労履歴まで含めて統合を図る。

これらの基礎研究を、以下の社会基盤施設の維持管理問題に適用し、開発技術の社会実装を図る。

(1) 箱型断面を有する長大 PC 橋梁の長期変形予測の精度検証と、時間遅れの寸法効果を実験と解析両面から検証する。あわせて長期使用限界状態に対する簡易型の実務設計法を提示する。

(2) 多層 RC 建築物の乾燥過程に伴う初期ひび割れと、それに起因する固有振動数の変化を数値予測し、実構造と実験から検証する。また、既設 RC 建築物の固有周期変動の解析を行い、実構造物の安全性評価を行う。

(3) 地中カルバートの 30 年を超える長期過剰たわみの原因を究明し、マルチスケール解析を用いて機構解明を試みる。併せて浅地中 RC 構造の長期使用限界状態設計の基準改定の方角を提示する。

### 4. 研究成果

#### (1) 液状水の移動抵抗則の高度化

自然環境下にあるコンクリート構造の水分状態に強い影響を与える降雨降雪は、構造表面で急速に進行する液状吸水と緩速の水蒸気逸散で解析上、考慮される。機械工学分野で開発された NANO CHANNEL 中の液状水移動モデル(壁面せん断スリップ)を、セメント硬化体中の微細孔構造の相互結合モデルに組み入れることで、水分子の静的-動的平衡状態を厳密に考慮した境界特性モデルを開発した。中国・清華大学の研究チームとも連携して、不飽和状態の液状水移動モデルの適用性と精度を、吸水過程の室内試験結果から検証を行った。これを以下に述べる構造挙動の解析にも適用した。

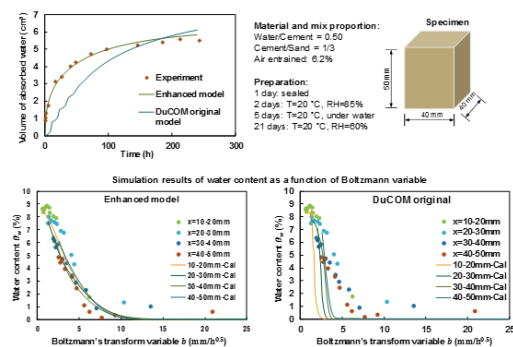


図1 Boltzmann 変換された吸水-蒸発過程 (右: 既往モデル、左: 拡張改良モデル)

#### (2) 屋外環境と構造との水分境界モデル

配合の異なる中規模中空セグメント型プレストレスト構造を東京大学工学部柿岡実験場(茨城県)に4年にわたって暴露し、フランジ及びウェブ中の含水率と微細空隙湿度と温度を計測した。併せて内空の温湿度を変化させて巨視的応答と微細孔中の熱力学状態量との関連をし、マルチスケール解析が維持管理に適用可能な精度を有していることを検証した。

降雨降雪と冬季に発生する結露による躯体中への液状水の吸水と乾季の乾燥は、一年を通じてバランスせず、全体では吸水方向に移行し、最終的に四季を繰り返す環境に平衡することが示された。上面スラブは年平均湿度を越えて相対湿度 90%以上に至り、3 年を経て平衡することが確認された。100m を越える長大橋梁では、約半世紀で到達することが予想される。項目(1)の移動抵抗則を組み入れた解析の結果、経年の水分平衡状態を数値解析で再現が可能であること、さらに実環境下の既設構造に適用する基礎性能が確保されていることを示した。

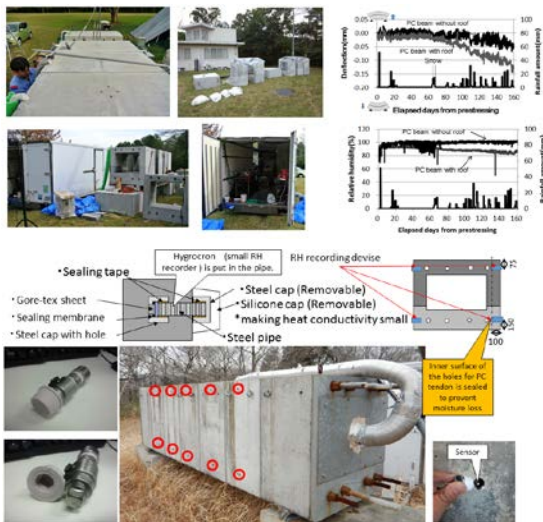


図2 中期暴露試験（柿岡実験場）による自然環境作用下の水分状態量の検証

(3) マルチスケール解析モデルの高度化に基づく PC 長大橋梁の長期たわみ予測と実務設計法

研究項目(1)(2)で適用性が確認された数値解析を用いることで、既存の長大橋梁の中長期変位の高精度予測を可能とした。本研究提案前に行った予備解析では、上面スラブがほぼ湿潤状態に維持されていることを仮定した。項目(2)からも、この仮定が妥当であることを確認することができた。

建設以後約 10 年が経過した段階で、上下フランジの水分逸散と給水速度に差が表れ、これが積分されて数十年にわたり、遅れたわみに現れることが定量的に解明できた。設計の観点では上下フランジの厚さの違いと湿潤乾燥条件の違いに直接関係する。

この機構をもとに、従来の設計ルートのもとで長期たわみが算定できるように考慮して、簡易設計モデルが土木学会コンクリート標準示方書に採用されるに至った。

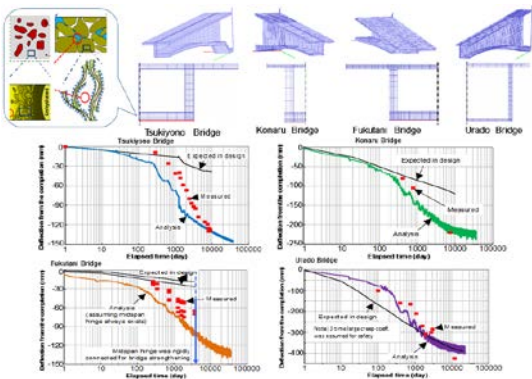


図3 PC 長大橋の中長期たわみと数値予測

(4) RC 中層建築物の長期固有振動数の変化の機構解明と耐震性能への影響評価

2000 年半ばから、中高層 RC 建築物の定常モニタリングを通じて振動モードが長周期化していることが確認された。過去の地震の

影響や構成材料の劣化、基礎の沈下等、その原因の特定には至っていなかった。項目(3)で精度検証を受けた中長期構造応答解析を、諸元と構造詳細が明確な実大試験体 (e-defense) に適用した結果、築後 1 年足らずで構造剛性は半分程度にまで低下し得ることが明らかとなり、実大実験との比較からも裏打ちが得られた。主として部材接合近傍でのひび割れに因ることが本研究から示唆された。水分平衡状態に至る速度が、構成部材ごとに異なる速度で進行することによることが、解析から求められた。

剛性低下後の地震応答解析結果は、実大振動台試験結果と大凡、良好な一致をみている。湿潤養生を継続した場合には、中大型構造物の地震時動的応答変位は半分近くまで抑制されることが予見された。従来まで、実構造物の固有周期と初期剛性は設計段階での予測と合致しないことが認識されてきたが、本研究において、不一致の原因の一つが明確となった。2011 年東北大地震時の関東地域にあるタワーマンションの振動計測からも間接的に実証された。

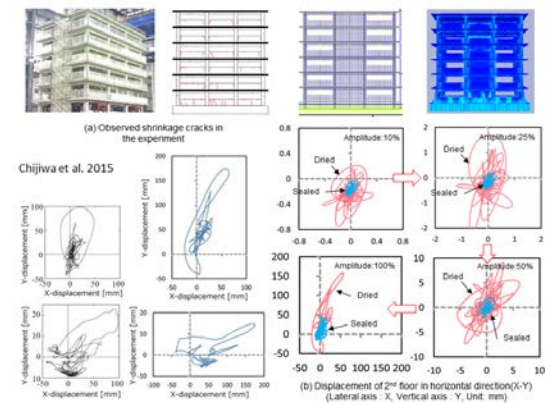


図4 乾燥及び封緘湿潤養生下の動的応答

(5) 原子力発電施設(建屋)の長期固有周期の変動機構の解明と寸法効果

項目(3)の長大橋梁の長期過剰たわみは構成部材の寸法差に伴う水分逸散速度の差に関連したものであることが検証された。同時に、絶対寸法が大きくなるにつれて、水分逸散量の差の進行も加速的に遅くなるのが、項目(2)の中規模試験体の 3 年計測からも明確に示された。

以上の推論から、絶対寸法の大きい原子力発電所建屋でも、項目(4)の建物固有周期の変化が、中長期にわたって長周期化することが予見された。本研究期間中に女川原子力発電所 RC 建屋で建設後 30 年経過した段階で、本研究の予測通り固有振動数の低下が報告された。長大橋の過剰たわみ問題に緒を發した本研究の成果が、原子力発電所のストレステストに適用可能となった事は当初、予期していなかった成果である。

骨材収縮の大きい構成材料をコンクリートの配合に用いた場合の中長期の固有振動数変化も併せて解析を行い、骨材品質の影響

も水分平衡の観点から無視できない要因であることを示した。さらに、収縮による主要壁部材の復元力特性の変化から耐震性能を再評価し、構造耐震性能に劣化は無いことを解析的に示した。

なお、建屋の設計基準で用いられる耐震壁の復元力特性は縮小試験体の応答実験から求められたものである。壁厚寸法差は 10 倍程度あり、本研究から約 100 倍の時間差で水分が準平衡に至る。したがって、実構造物がおよそ 1 世紀経過したときの耐震性を想定して、設計基準が策定されたと考えてよい。

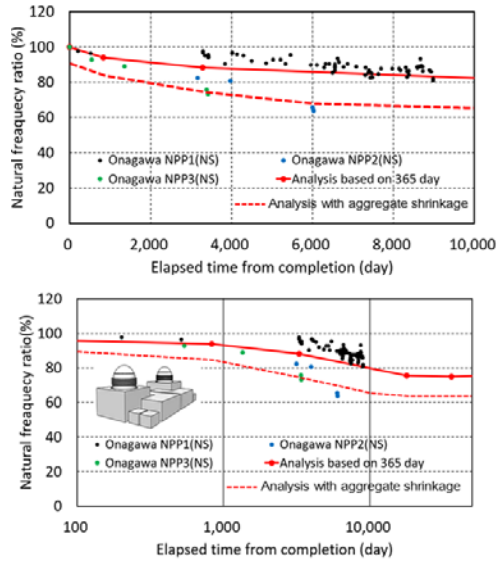


図 5 原子力建屋の長期固有振動数の低下

### (6) 地盤と地中構造との連成解析システム

土被りが数 m の地中 RC ダクトの内空に過剰なひび割れと、建設後 20~30 年で上スラブに設計値の数十倍に至る過大なたわみが報告されるようになってきた。主鉄筋の微破壊検査から鋼材の降伏は認められず、周辺地盤の中長期の圧密沈下が上載土の重量以上の土圧を発生させることで主鉄筋のひずみが説明できることを見出した。なおもって過大なたわみが発生しており、ダクト・トンネル上スラブの面外方向へのせん断破壊が疑われるにいたった。

水分準平衡モデルとマルチスケール解析からも、建設以後、30 年程度で面外せん断がダクト隅角部に発生することが予見された。内空の乾燥環境とダクト外部の地盤湿度差がせん断破壊を加速することが解析から判明した。内部ボーリング調査を掛けてダクト上面内部のひび割れ状況を観察した結果、解析で予見された通り、斜めせん断ひび割れの存在が確認された。持続常時荷重のもとで建設以後、数十年を経て面外せん断破壊に至った事象は世界で初めての発見と思われ、当初、予期しない危険事象であった。

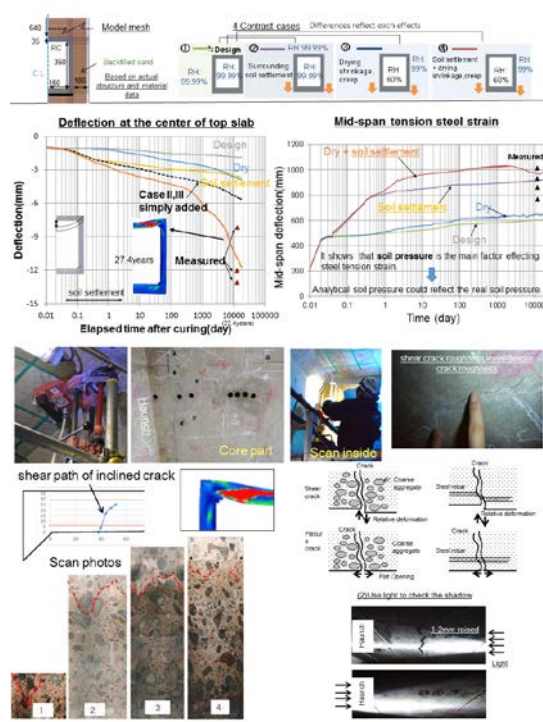


図 6 地中ダクト上面の遅れせん断破壊

### (7) 中長期持続荷重下のコンクリート部材の遅れせん断破壊の発見と数値解析予測

項目 (6) において建設以後 30 年でせん断破壊が解析で予見できたものの、解析された作用せん断力は静的せん断耐力を下回ることが、解析から判明した。持続荷重下でクリープ遅れ破壊に至ったことになる。

しかし、遅れせん断破壊は約 15 年前に欧州で系統的な実験が実施され、遅れせん断破壊の存在は設計の観点からは考慮不要とされた。但し、地下構造では土圧による分布荷重作用下にあること、地盤沈下に伴う土圧の変化から、ダクト隅角部にせん断力が集中し、曲げせん断比が欧州規準に基づく陸上構造の諸元とは異なる。地下構造に展開する荷重条件で遅れせん断破壊の再現実験を試みた結果、数値解析とほぼ同様の遅れ破壊が発生する可能性が認められた。今日、共同研究者を含め、複数の研究者、機関で追試が行われており、同様に遅れせん断破壊が報告されるに至っている。

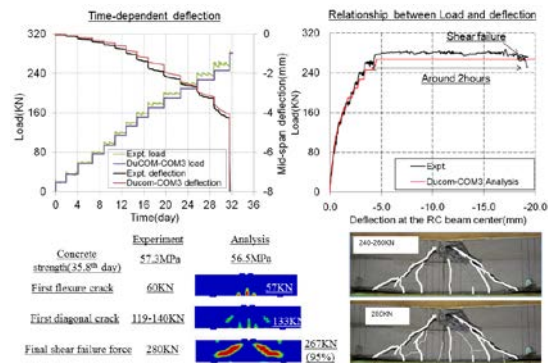


図 7 RC 部材の遅れせん断破壊の再現と解析

今後に建設される地下空間の設計基準に反映させる方法として、埋め戻し地盤の沈下に伴う土圧の上昇分を明示的に限界状態の照査に取り入れること、せん断破壊に対する荷重安全係数を 1.3 に維持することを提案することができた。

(8) ひび割れ内の液状水、腐食ゲル、アルカリシリカゲルと構造との複合効果モデル

水分の準平衡と構造モデルの連成システムを基盤にして、ひび割れ面で囲まれる空間内の液状水、鋼材腐食ゲル、アルカリシリカゲルの移動を併せて扱えるようになった。当初、予期していなかった成果として、高サイクル疲労を受ける橋梁床版の砂利化現象、アルカリシリカ反応 (ASR) による損傷の寸法効果、凍結融解と ASR の複合効果に関する機構モデルを提示することができた。今後の複合劣化問題に対する強力な武器を得ることができたと考えている。

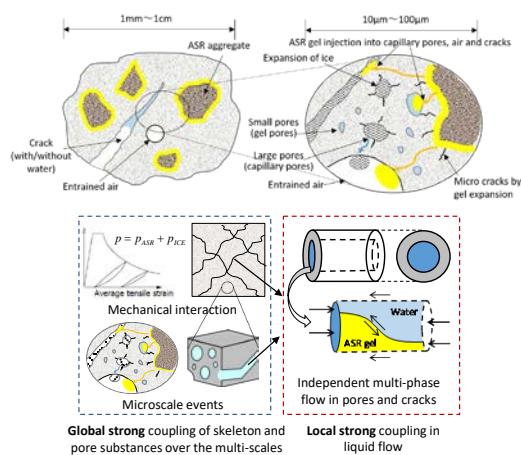


図 8 ひび割れ内の水とゲルの移動と平衡

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 52 件)

①Saifullah, H. A., Nakarai, K., Piseth, V., Chijiwa, N. and Maekawa, K.: Shear Creep Failures of RC Slender Beams without Shear Reinforcement, ACI Structural Journal, 査読有, 2017 (in print)

②Takahashi, Y., Ogawa, S., Tanaka, Y., and Maekawa, K.: Scale-Dependent ASR Expansion of Concrete and Its Prediction coupled with Silica Gel Generation and Migration, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 14(8), 2016, pp444-463, DOI:doi.org/10.3151/jact.14.444

③Gebreyouhannes, E. and Maekawa, K.: Nonlinear Gel Migration in Cracked Concrete and Broken Symmetry of Corrosion Profiles, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 14(6), 2016, pp271-286,

DOI:doi.org/10.3151/jact.14.271

④Maekawa, K., Zhu X., Chijiwa, N. and Tanabe, S.: Mechanism of Long-Term Excessive Deformation and Delayed Shear Failure of Underground RC Box Culverts, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 14(5), 2016, pp183-204, DOI:doi.org/10.3151/jact.14.183

⑤平塚慶達, 前川宏一, 乾燥収縮課程が RC 床版の疲労寿命に及ぼす影響, 土木学会論文集 E2, 査読有, 72(4), 2016, pp343-354, DOI:doi.org/10.2208/jsce/jmcs.72.343

⑥牧 剛史, 早坂雅俊, 中村 慎: 水中における RC 柱の動的応答性状に関する研究, 構造工学論文集, 査読有, 62A, 2016, pp.885-695, DOI:doi.org/10.11532/structcivil.62A.885

⑦Chijiwa, N. and Maekawa, K.: Thermo-Hygral Case-Study on Full Scale RC Building under Corrosive Environment and Seismic Actions, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 13, 2015, pp465-478, DOI:doi.org/10.3151/jact.13.465

⑧Moshirabadi S., Soltani M. and Maekawa K.: Seismic interaction of underground RC ducts and neighboring bridge piers in liquefiable soil foundation, Acta Geotechnica, 10(6) 査読有, 2015, pp.761-780 DOI: doi.org/10.1007/s11440-015-0392-x

⑨Maekawa, K., Ishida, T., Chijiwa, N. and Fujiyama, C.: Multiscale Coupled-Hygro-mechanistic Approach to the Life Cycle Performance Assessment of Structural Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 査読有, 27(2), 2015, A4014003, DOI: doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000984

⑩米田大樹, 石田哲也, 前川宏一, Esayas Gebreyouhannes, 三島徹也: コンクリートの微視的損傷および細孔内水分状態に着目した準微細ひび割れモデル, 土木学会論文集 E2, 71(3), 査読有, 2015, pp.263-282 DOI:doi.org/10.2208/jsce.jmcs.71.263

⑪Soltani M. and Maekawa K., Numerical Simulation of Progressive Shear Localization and Scale Effect in Cohesionless Soil Media, International Journal of Non-Linear Mechanics, 69(March), 査読有, 2015, pp.1-13 DOI: doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec

.2014.10.014

⑫Gebreyouhannes, E., Yoneda, T., Ishida, T. and Maekawa, K.: Multi-scale based Simulation of Shear Critical Reinforced Concrete Beams Subjected to Drying, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 12(10), 2014, pp.363-377, DOI:doi.org/10.3151/jact.12.363

⑬Maekawa, K. and Fujiyama, C.: Rate-Dependent Model of Structural Concrete Incorporating Kinematics of Ambient Water Subjected to High-Cycle Loads, Engineering Computations, 査読有, Vol.30, Issue6, 2013, pp.825-841, DOI:dx.doi.org/10.1108/EC-06-2012-0125

⑭Ohno, M., Chijiwa, N., Suryanto, B. and Maekawa, K.: An Investigation into the Long-Term Excessive Deflection of PC Viaducts by using 3D Multi-Scale Integrated Analysis, Journal of Advanced Concrete Technology, 査読有, 10, 2012, pp.47-58, DOI:doi.org/10.3151/jact.10.47

⑮Maekawa, K., Chijiwa, N. and Ishida T.: Long-Term Deformational Simulation of PC Bridges Based on the Thermo-Hygro Model of Micro-Pores in Cementitious Composites, Cement and Concrete Research, 査読有, 41(12), 2011, pp.1310-1319, DOI: doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.021

[学会発表] (計 30 件)

①前川宏一, ひび割れ間隙相の運動とせん断を受けるコンクリート構造の連成解析, 日本コンクリート工学会せん断問題シンポジウム, 2016年9月30日, 弘済会館(東京)

②前川宏一, Multi-scale Modeling for Life Cycle Management of Concrete Structures, 日本コンクリート工学会 50周年記念シンポジウム, 2016年7月13日, 都市センターホール(東京)

③前川宏一, Multi-scale Simulation of Structural Concrete subjected to Seismic and Fatigue Loads coupled with Drying and Wetting, FRAMCOS-9, 2016年5月31日, カリフォルニア(アメリカ)

④前川宏一, Multi-scale Modeling and Asset Management of Concrete Infrastructure, Tan Swan Beng Public Lecture, 2016年4月8日, ナンヤン工科大学(シンガポール)

⑤前川宏一, Multi-scale Modeling and Asset Management of Concrete Infrastructures, EASEC-14, 2016年1月6日, ホーチミン(ベトナム)

⑥前川宏一: Numerical Modeling and Data Assimilation for Life-Cycle Assessment of Concrete Bridge, RILEM conference SSCS 2015, 2015年12月15日, リオデジャネイロ(ブラジル)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

コンクリート構造のマルチスケール解析プログラム DuCOM-COM3 リリース

## 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

牧 剛史 (MAKI, Takeshi)  
埼玉大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号: 60292645

半井 健一郎 (NAKARAI, Kenichiro)  
広島大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 10359656

千々和 伸浩 (CHIJIWA, Nobuhiro)  
東京工業大学・環境社会理工学院・准教授  
研究者番号: 80546242

浅本 晋吾 (ASAMOTO, Shingo)  
H23-H25 まで分担者  
埼玉大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号: 50436333

### (3) 連携研究者

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

### (4) 研究協力者

石原 孟 (ISHIHARA, Takeshi)  
三島 徹也 (MISHIMA, Tetsuya)  
石橋 忠良 (ISHIBASHI, Tadayoshi)  
田辺 成 (TANABE, Shigeru)  
坂田 昇 (SAKATA, Noboru)