

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 ～ 2011

課題番号：22760327

研究課題名（和文） コンクリート材料-構造連成応答解析の実構造物へのフルスケール展開

研究課題名（英文） Enhancement of multi-scale integrated analysis for real concrete structure

研究代表者

千々和 伸浩 (CHIJIWA NOBUHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・助教

研究者番号：80546242

研究成果の概要（和文）：

本研究では、材料-構造連成応答解析システムを拡張し、直接的に実構造物に適用することで、環境作用・力学作用による構造性能の変化を精緻に追跡可能なシステムを実現した。このシステムにより過剰たわみの発生した実橋の再現解析を行ったところ、上下フランジ間での鋼材量の差や熱力学状態量の違いが原因で、設計当時の予想を超えたたわみが発生したことがわかった。この成果を逆手に取り、意図的に上下フランジ間に環境作用に対する応答に差をつけることで、構造物が自律的にたわみを制御する設計法の提案も行い、実験で効果を確認した。同システムを鋼材腐食の発生が予見される構造物に適用し、時間と残存構造性能の変化を追跡したところ、腐食進展とともに破壊モードが変化し、一般に使われる劣化曲線よりも早く性能が低下することが分かった。

研究成果の概要（英文）：

In order to simulate real concrete structures in full scale by the multi-scale integrated analysis, the analytical platform is enhanced. The excessive deflection of PC viaducts are reproduced successfully by this analytical platform. The analytical results show that the difference of time-dependent volumetric change caused by steel confinement and thermo-dynamical state between upper and bottom flange is the key of excessive deflection. Based on this fact, new design concept that giving different concrete property between upper and bottom flange to control the time dependent deflection is proposed, and its validity is confirmed. The change of structural performance with corrosion is also simulated by the system. The result shows that the degradation of structural performance with time is faster than expected because of the failure mode shift with deterioration.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学

キーワード：クリープ、実構造物、材料構造連成解析、構造性能、劣化

1. 研究開始当初の背景

2008年、建設から約30年を経過したいくつかの実PC橋梁において、設計時予測を超えたたわみが発生していることが報告された。これはコンクリートの時間依存変形に由来するものと考えられたが、当時はなぜそのような現象が起きるのか説明できない状況にあった。現象の発生機構を明らかにし、このたわみがいつまで増え続けるのか、発生したたわみを抑えるための事後対策や、設計段階での予防策を見出すことが喫緊の課題となった。

研究代表者らが所属する研究グループではこれまで材料-構造連成応答解析システムを開発してきた。これは環境作用下におけるコンクリート材料の変化を追跡するDuCOMシステムと、外力作用時の鉄筋コンクリートの構造応答を追跡するCOM3システムという、2つの解析システムを連成することで実現されたものである。DuCOMシステムではコンクリートの打設直後の発熱から硬化後に環境作用を受けることによる物質の移動や材料特性の変化を追跡することが可能である。COM3システムではひび割れが無い健全な状態から、甚大なひび割れが生じた状態まで任意の状況での構造性能評価できるシステムである。このシステムを用いることで、例えば局所から発生した鋼材腐食が進行し、ひび割れを発生させ、腐食がさらに加速していく過程でどのように構造性能が変化していくのかを追跡できるようになったところであった。

ただしこの連成解析システムを用いて実構造物を材料応答から構造応答までを精緻に追跡しようとする場合、要素をmm単位でメッシュ化する必要があるとされた。連成システムを構成する元のシステムのうち、材料側を担うDuCOMシステムの対象スケールが数nmから数mmであるためである。この場合、例えばスパン44メートルの実PC橋を扱おうとすると、少なくとも約10万自由度の解析を行わなければならない、このような大規模演算は従来のワークステーションでは事実上不可能であった。この制約からこれまでの検討では、実構造物を分割し代表断面を取り出して解くというアプローチがとられてきたのであった。しかし研究当初時点において並列計算の一般化が進みつつあり、この技術を用いることで、構造物全体をワークステーション内に再現して計算することが可能となると考えられる状況にあった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、材料応答・構造応答を連成した統合した解析プラットフォームを、フルスケールの実構造物に対して直接に適用

できるレベルで整備し、局所変化が構造物全体に与える影響を精緻に追跡可能なシステムを構築することである。本解析システムの実現により、応力や乾燥、熱、水和度などに起因する局所的なひずみ差の累積が全体挙動に現れる現象、例えば過剰なクリープ進行たわみの要因解明や、劣化進行の構造性能に与える影響の経時変化予測が可能になるとともに、それらへの本質的な対策案の決定も可能となる。先人が積み上げたコンクリート工学に関するあらゆる知見をプラットフォーム内で構造化し、より品質の高い構造物を後世に残す事業に寄与することを究極の目標とした。

3. 研究の方法

本研究では、申請者が所属する研究グループが開発してきた材料・構造連成応答解析システムを拡張することで実構造物の環境作用・力学作用による構造性能の変化を精緻に追跡可能な解析システムを構築する。まず実構造物の設計データをもとに、構造物全体を材料や構造変化の精緻な追跡が可能なサイズでメッシュ化する。このメッシュモデルを連成解析システムで解き、解を実測データと詳細に比較しながら、現象を理解しつつ、個々のモデルの改良を繰り返すのが本研究の基本方針である。検証・改良には申請者が所属する研究室で保有する実橋データを手始めに、種々の実構造物に展開する。これらの一連の流れを通じて、過剰たわみの原因を明らかにし、その対策案を立案する。また構築した同システムを用いた構造物の時間-残存構造性能変化の予測も行い、既往報告と比較することでその精度の検証も行う。

4. 研究成果

①大規模計算に向けた解析プラットフォームの調整

これまで構築されてきた材料・構造連成応答解析システムは、実験室スケールの構造物を対象に構築されてきたものであった。これを直接に実構造物に適用してみたところ、データの受け渡しやメモリ使用等の面で改良が必要なことがわかり、そのチューニングを行った。

また本解析プラットフォームは、表層からの水分逸散などmmスケール以下の現象を対象に構築・検証されてきた材料構成モデルと、ひび割れなどcmスケールの現象を対象に構築・検証されてきた構造応答モデルとから構成されるため、これらのモデルを同じ寸法の有限要素メッシュに適用した際に、合理的な解が得られるのかを確認しておく必要があった。そこで感度解析を実施したところ、アスペクト比を一定値以下とした条件のもと

で、構造物の部位に作用される外力や環境特性に応じた適切な寸法を設定した上で、解析ステップ間での変化量を十分に小さくすれば、合理的な解を得ることができることがわかった。

②実橋梁における過剰たわみの再現、並びに対策案の立案。

で構築したシステムを用い、過剰たわみが発生している橋梁の再現解析を行った所、確かに実際に計測されたようなたわみ推移が解析で再現されることが分かった。

既往の設計では収縮やクリープといった材料のもつ体積変化特性を均一とみなされていた。しかし実際の橋梁では環境作用の影響は、表面からの距離と時間に依存したものであり、全断面が外環境と完全に並行する数百年後までは不均一な状態が続き、時間依存変形も不均一に発生する。これを精緻に反映したことが本解析プラットフォームによってたわみ推移が再現できた要因であった。

さらに分析を進めたところ、たわみとは上フランジと下フランジとの体積変形量の違い、例えば温湿度、季節変動、絶対寸法等に起因するものであることが明らかになった。この結果は上下フランジ間で体積変形量の差を小さくする、あるいは人為的操作により体積変形量を操作することで、力学的操作を伴わずともたわみを回復させ得ることを示唆しており、解析における検討においても同

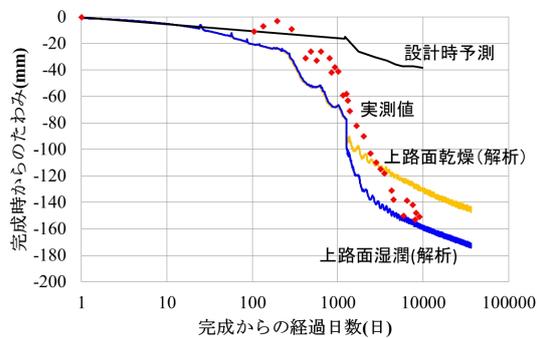


図1 過剰たわみの再現結果

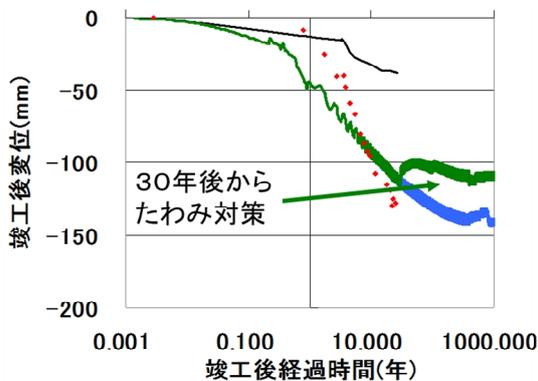


図2 強制的に環境条件を変えることによるたわみ制御の可能性

様の事象が確認された。

③たわみ収束状態の予測、並びにたわみを自律的に制御する構造物の設計法の考案

実務を考えた時、過剰なクリープ変形が、今後どこまで進行するのか、そしてそれを制御するための方策を見出すことは重要である。断面内に熱力学状態量の不均一な状態が発生する梁を作成し、不均一性が完全に解消するまでの経過を実験と解析とで比較することで、解析システムのたわみ収束状態の予測精度の検証を行うこととした。さらに実橋における過剰たわみは、上フランジと下フランジとの間での収縮量の違いに起因するものであるとの認識から、上下フランジ間に意図的に環境作用に対する収縮・クリープ応答に差をつけ、それによる制御設計の可能性も検討することとした。

検討に用いた試験体の厚さは 10cm で、これは約 1 年で外気と平衡すると予測される厚さである。また上フランジを $w/c=60\%$ 、下フランジを $w/c=28\%$ で構成することで、環境作用による応答に大きな差をつけた。

この試験体を長期間自然暴露したところ、時間の経過とともにたわみが予見されたような形で変動することが観察され、この設計法の有効性が示された。ただし、日射や降雨、降雪などの気象影響が構造物の変形に与える影響も無視できないことも明らかとなった。実験室のような恒温恒湿度外気環境との平衡状態を前提に、これまでの評価手法は構築されてきた。しかし気象作用を受けると平衡状態が著しく攪乱されるため、既往の評価手法では十分に挙動を再現できなくなる可能性が高く、その点をうまく補正する手法を構築する必要があることが判明した。

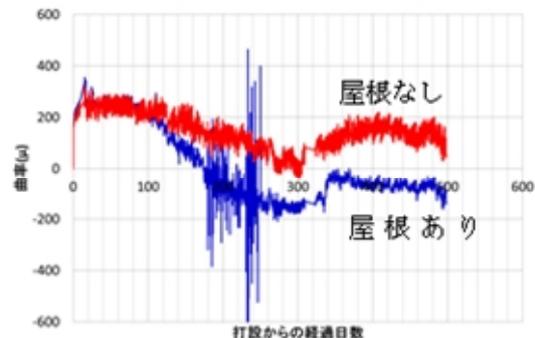


図3 上下フランジ間にコンクリートの差を設けた梁のたわみ推移

④腐食劣化進行に伴う構造物残存性能の変化予測

本研究で拡張したシステムを用い、腐食進展に伴い構造性能がどのように推移し、各時点でどの程度の性能を保有するのかについて

でも分析検討を行った。既存の報告を再現したところ、確かに実験と同様の挙動を再現できることがわかった。同対象試験体に対し、時間スケールを広げて解析を行ったところ、ある時点から破壊モードが変化し、一般に使われる劣化曲線よりも早い速度で性能が低下することが分かった。

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 6 件)

- ① 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, pp.407-412, 2010
- ② 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, 2011.1
- ③ 千々和伸浩, 川中勲, 前川宏一:主鉄筋定着部に腐食劣化を有する RC 梁の残存耐力と未損傷領域への面的補強, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.67, No.2, pp.160-165, 2011.4
- ④ 大野元寛, 千々和伸浩, 前川宏一:コンクリート中の細孔水に起因する変形駆動力が実 PC 橋の長期クリープたわみに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.467-472, 2011.7
- ⑤ Koichi Maekawa, Nobuhiro Chijiwa and Tetsuya Ishida: Long-term deformational simulation of PC bridges based on the thermo-hygro model of micro-pores in cementitious composites, Cement and Concrete Research, Vol.41(12), pp.1310-1319, 2011
- ⑥ Motohiro Ohno, Nobuhiro Chijiwa, Benny Suryanto and Koichi Maekawa, An Investigation into the Long-Term Excessive Deflection of PC Viaducts by Using 3D Multi-scale Integrated Analysis, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.10, pp.47-58, 2012.

[学会発表] (計 10 件)

- ① Kei Sugita, Nobuhiro Chijiwa, Koichi Maekawa:Simulation of long-term time-dependent mechanics of an existing PC bridge by full-3D multi-scale integrated FE analysis, SSMS, 2010
- ② N. Chijiwa and K. Maekawa, Safety

assessment of structural concrete with corrosion induced cracking around anchorage zones, FraMCoS-7, 8 pages in CD, Jeju, Korea, 2010.5

- ③ Nobuhiro Chijiwa, Kei Sugita, Tetsuya Ishida, Koichi Maekawa:Simulation of long-term time-dependent mechanics of an existing PC bridge by full-3D multi-scale integrated FE analysis, CONMOD, 2010
- ④ 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, pp.407-412, 2010.7
- ⑤ 杉田恵, 千々和伸浩, 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, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, 第 V 部, pp.353-354, 2010.9
- ⑥ Nobuhiro Chijiwa and Koichi Maekawa: Structural performance assessment and strengthening method of RC with corrosion crack at the anchorage zone, ASEM11+, 2011.6
- ⑦ 大野元寛, 千々和伸浩, 前川宏一:コンクリート中の細孔水に起因する変形駆動力が実 PC 橋の長期クリープたわみに及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, pp.467-472, 2011.7
- ⑧ K. Maekawa, N.Chijiwa and E. Gebreyouhannes: Multi-scale simulation of thermo-hygro mechanics on RC-PC structures under long-term actions, CoRAN2011
- ⑨ Koichi Maekawa, Benny Suryanto, Chikako Fujiyama, and Nobuhiro Chijiwa: Microstructure based life-cycle assessment and durability design of concrete bridges, Second International Conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites, 11-13 April 2012, Amsterdam, The Netherlands
- ⑩ M.Kunieda, N.Chijiwa, K.Ohara and K.Maekawa: Feasibility study of autonomous deformation control of PC viaducts, ACMSM22, Sydney, Australia, 2012.12

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千々和 伸浩 (CHIJIWA NOBUHIRO)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 80546242