

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 課題番号 第9号

2. 研究課題名：

非線形疲労応答解析に基づくコンクリート系橋梁床版の余寿命推定システム

3. 研究期間 平成22年度～平成23年度

4. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	前川宏一	東京大学大学院工学系研究科・教授
研究代表者	前川宏一	東京大学大学院工学系研究科・教授
共同研究者	大田孝二	土木研究センター企画・審査部・部長
	小林薫	東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所・課長
	櫻井伸彰	新日鉄エンジニアリング株式会社技術開発研究所構造商品開発室・室長
	下村匠	長岡技術科学大学工学部環境・建設系・准教授
	鈴木雄大	東日本旅客鉄道株式会社 JR 東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所・主任
	千々和伸浩	東京大学大学院工学系研究科・特任助教

5. 補助金交付総額 27,420,000 円

6. 研究・技術開発の目的

道路・鉄道のコンクリート系橋梁床版（RC、PC、鋼コンクリート合成）の余寿命推定システムを構築することが、本研究の目的である。東京大学が開発を進めてきたコンクリート構造の高サイクル疲労を再現する非線形有限要素解析の技術を応用し、損傷を有する既設構造の簡易な検査法と、数値解析による疲労寿命機構解析とを組み合わせ、既存床版の余寿命を推定する統合システムを構築する。数値解析の技術を用いることで、従来の目視調査等では発見できない損傷リスクも含めて構造物の性能を評価できる点が、既存の技術と異なる本研究の革新的な点である。

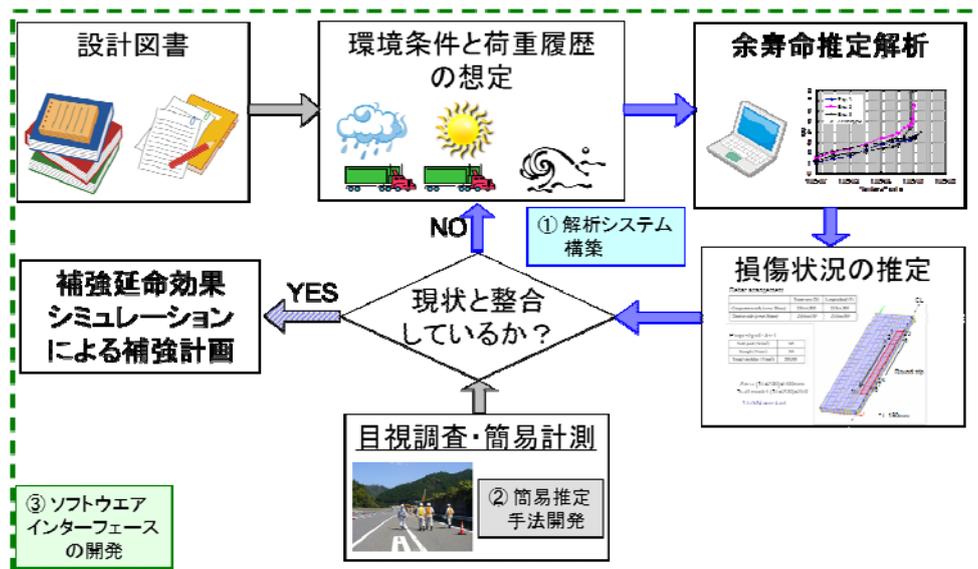
7. 研究・技術開発の内容と成果

< 1 > 研究概要

本研究は、東京大学が開発を進めてきた、コンクリート構造の高サイクル疲労を再現する非線形有限要素解析の技術を応用し、道路・鉄道のコンクリート系橋梁床版（RC、PC、鋼コンクリート合成）の余寿命推定システムを構築するものである。損傷を有する既設構造の簡易な検査法と、数値解析による疲労寿命機構解析を組み合わせ、既存床版の余寿命を統合システムで推定する。

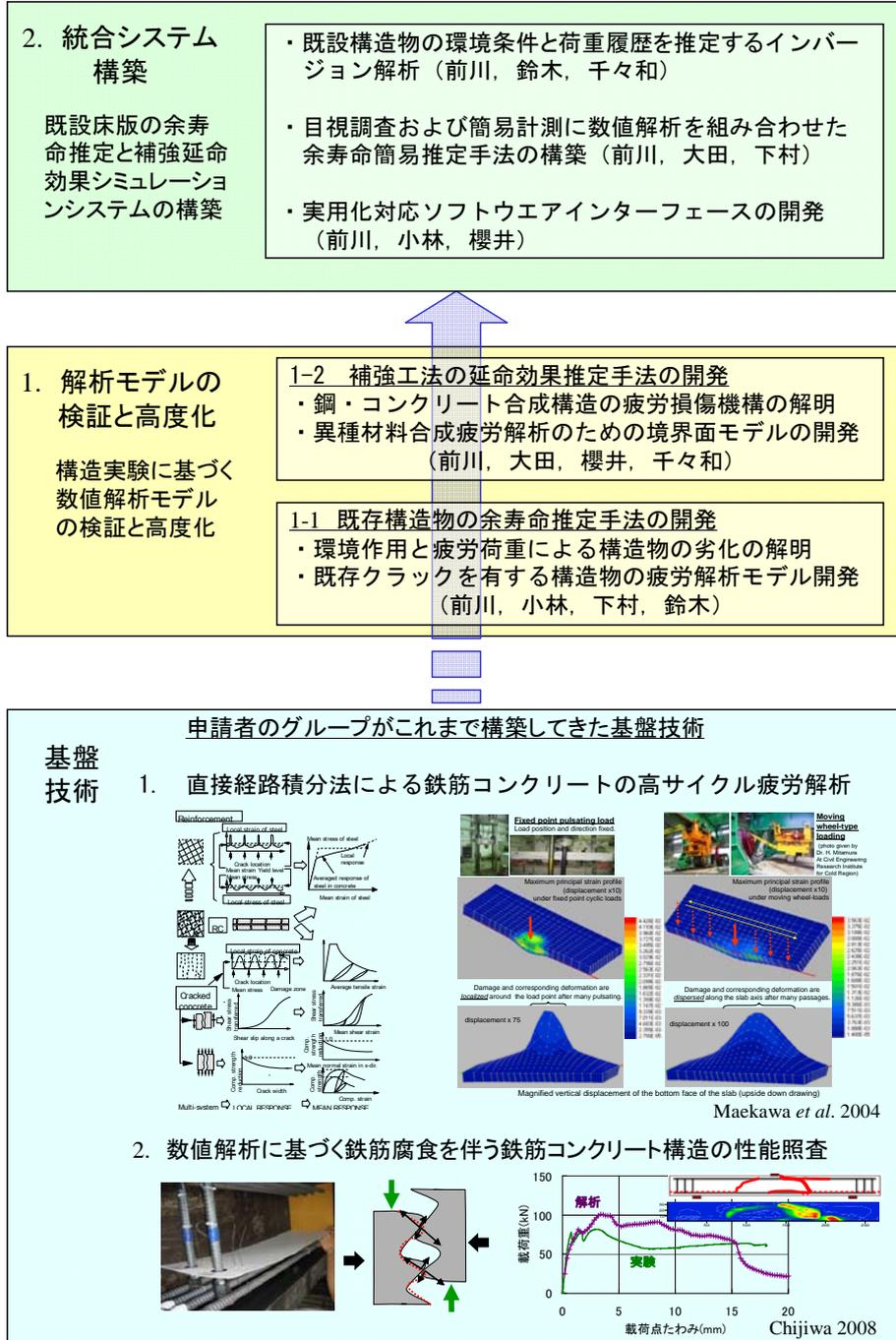
橋梁床版の損傷は、交通機関の走行安全性確保とかぶりコンクリート剥落などによる第3者被害防止の観点から、橋梁の維持管理上、最も重要な課題のひとつである。しかし、床版の補修・補強工事は交通規制を伴うことが多く、その間の社会的損失は少なくない。供用計画と現状の余寿命に対し、必要にして十分な対策を講じることが社会の要請であろう。

これに対し、数値解析の技術を用いることで、従来の目視調査等では発見できない損傷リスクも含めて構造物の性能を評価できる点が、本研究の既存の技術と異なる点である。これを可能とする高度な解析技術、コンクリートの高サイクル疲労を再現する経路積分型数値解析法は、現在東京大学の申請者の研究グループのみが実現している。これに加え、道路分野で蓄積されてきた橋梁床版寿命の研究と、鉄道分野で蓄積されてきた疲労設計法の知見とを融合し、これらを同一プラットフォーム上で展開することで高い応用性の発揮が期待される。



研究成果のイメージ図

以下に、研究概要図を示す。研究は、構造実験に基づく数値寿命解析モデルの検証と高度化および既設床版の余寿命推定と補強延命効果シミュレーションシステムの構築という 2 つのフェーズから成り立つ。



研究概要図

<2> 個別研究開発項目

1-1 既存構造物の余寿命推定手法の開発

乾燥収縮および腐食鉄筋の膨張によるひび割れを導入した鉄筋コンクリート構造部材について、残存耐荷力と疲労余寿命を数値寿命解析によって推定し、これらを実験結果と比較、検証することを目的とする。実験中に目視観察、簡易計測を実施するとともに、実験後には部材内部に展開するひび割れを部材切断法で確認し、数値解析で予測される損傷位置と併せて多角的に照合する。これらの結果を受けて、寿命推定解析モデルの改良を行う。本研究の結果、乾燥収縮ひび割れを伴う鉄筋コンクリート部材の疲労損傷を、3次元非線形有限要素解析によって概ね再現実現することができた。

1) 乾燥収縮によるひび割れの導入

一昨年度より自主的に実施していた予備実験から、コンクリート配合（単位水量 250kg）と養生条件（乾燥空気送風）を決定し、1700x3200x190mm の実大鉄筋コンクリート床版に、乾燥収縮ひずみを導入した。

2) 高速移動荷重による疲労載荷

3つのアクチュエーターの載荷波形に位相差を与えることで、時速 0.6km から 30km に相当する移動荷重を模擬した疲労実験を実施した（図-1）。

3) 数値解析による再現手法の検討

解析での初期条件に体積ひずみを導入することによって、乾燥収縮を生じた部材の疲労特性を数値解析で再現する手法を構築した（図-2）。



図-1 試験装置

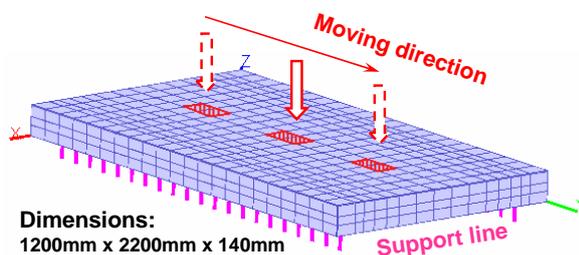


図-2 数値解析による再現

関連研究発表：

Proceedings of The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), "Fatigue life simulation of RC bridge slab with initial defects under water", 2011.1, East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, C. Fujiyama, K. Kobayashi, J.J.Zhan and K. Maekawa

コンクリート工学年次論文集 Vol.334, No.2, pp.667-672, 「実験及び数値解析による床版疲労寿命に影響を及ぼす諸要因の検討」藤山知加子, 小林薫, 鈴木雄大, 前川宏一, 日本コンクリート工学会, 2012.7

1-2 補強工法の延命効果推定手法の開発

異種材料複合構造の一例として、鋼コンクリート合成床版の疲労実験と数値解析を行い、解析モデルを検証する。さらに、複合構造境界面の解析モデルを拡張し、補強床版の疲労シミュレーションを実施して、延命効果推定手法の開発を行った。本研究の結果、実橋床版ではまだ報告されていない、合成床版の疲労損傷リスク部位と予測される破壊形態が示された。また、増厚補強をした鉄筋コンクリート床版については、新旧コンクリートの境界面付着強度が疲労補強効果におよぼす影響を定量的に示すことができた。

1) 鋼・コンクリート合成床版を用いた疲労実験

いずれも諸元をパラメータとした 9 体の合成床版を用いて静的載荷実験および定点疲労実験を実施し、数値解析の再現性を様々なケースで検証するためのデータを取得した。床版下面からのひびわれ観察が不可能な合成床版に対応するため、実験後は部材切断して内部コンクリートのひび割れ確認を行い、解析で予測された損傷状態との比較を行った。(図-3)

2) 数値解析における鋼・コンクリートの境界面モデル化と数値解析の検証

鋼・コンクリート境界面の初期付着—摩擦則移行モデル(改良摩擦モデル)を構築し、ずれ止め諸元や境界面特性の異なる複数の鋼・コンクリート合成床版について、疲労載荷による損傷形態や荷重—たわみ関係を精度良く再現した(図-3)。

3) 複合構造境界面の解析モデル拡張

疲労損傷を導入した鉄筋コンクリート床版に上面増厚補強を行い、再び疲労載荷した場合の補強延命効果について、2)で構築した異種材料境界面の改良摩擦モデルを用いたシミュレーションと実験の比較を行った。本手法が補強工法の評価にも適用できる可能性を示した。

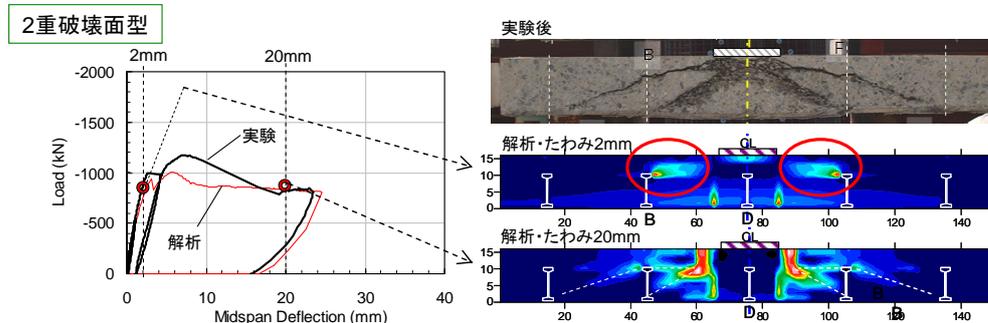


図-3 合成床版実験と数値解析の検証例

関連研究発表：

土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 67, No. 1, pp.193-206 「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」 2011.3, 土木学会, 藤山知加子, 櫻井信彰, 前川宏一

コンクリート工学年次論文集, 第 33 巻, 第 2 号, pp1321-1326, 2011 「床版増厚補強工法の効果の検討と境界面付着強度が及ぼす影響」 平成 23 年 7 月, 日本コンクリート工学協会, 藤山知加子, 池野誠司, 小林薫, 前川宏一

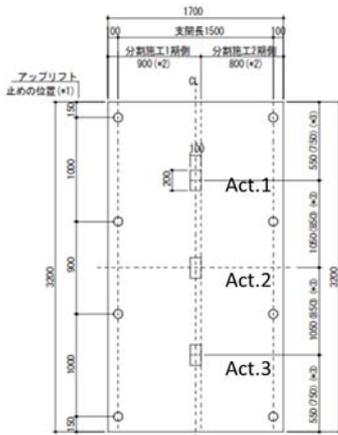
土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 1, 1-15, 2012. 「ずれ止め諸元が鋼コンクリート剛性床版の損傷モードに及ぼす影響」 平成 24 年 1 月, 土木学会, 藤山知加子, 櫻井信彰, 前川宏一

2 統合シミュレーションシステムの構築

平成 23 年度は、損傷を有する既設構造の調査結果を数値解析で再現するために、損傷を与えた床版での追加疲労実験を実施するとともに、研究成果実用化のために、一般エンジニアをユーザーと想定したソフトウェアの開発を行った。

(1) 目視調査および簡易計測と数値解析の組み合わせに関する追加実験

実験に用いたスラブ供試体は、荷重進行方向（長手方向）3.2m 支間方向 1.7m（支間長 1.5m）、版厚 190mm の 2 辺単純支持版とした。試験体コンクリートは、基準試験体 No.1 および No.2 は、水セメント比 60%、単位水量 250kg の普通コンクリートを配合した。100×100×400mm の試験体を用いた予備実験では、打設後気中養生 1 か月弱で約 300 μ m の収縮ひずみが計測されている。分割施工試験体 No.3 では乾燥収縮ひび割れを促進するため単位水量 300kg で石灰石微粉末を配合し、他の損傷導入試験体 No.4、No.6 についてもこれに準じた。



試験体寸法図および実験装置等

基準試験体 No.1 と No.2 とでは荷重速度が異なるが、荷重速度が遅い No.2 のほうが約 2000 回ほど疲労寿命が長かった。No.1 では荷重位置での押抜きせん断以外に端部で鉄筋付着切れに起因すると思われる水平ひび割れが下面鉄筋位置で見られた。No.1 は荷重速度が速く、端部での衝撃も大きいと考えられるため、鉄筋付着切れを促進し疲労寿命が短くなった可能性がある。荷重前に上下面から幅 0.2mm 以上のひび割れが多数観察された分割施工試験体 No.3 では、疲労寿命の大幅な低下を予想していたが、実際は基準試験体よりも 6 倍程度長い寿命を記録した。試験後切断面を観察したところ、押抜き破壊面角度が他の試験体はすべてほぼ 45 度であるのに対し、試験体 No.3 では 60 度程度であった点は特徴的であるが、現時点では原因の特定は困難である。鉄筋腐食を導入した試験体 No.4 では、端部の荷重点位置で下面鉄筋の連続的な付着切れを伴う押抜きせん断破壊が生じ、基準試験体と比較して疲労寿命は基準試験体の 1/2～1/4 程度に減少した。また、基準試験体の上面に水をはったケース No.6 は、上面のひび割れからの水の吹き出しや下面から水の浸透は破壊直前まで観察されず、押抜きせん断破壊した。鉄筋腐食供試体に次いで疲労寿命は短い。これらの結果は既往の知見に矛盾しない。

関連研究発表：

Proceedings of international conference on recent advances in nonlinear models (CoRan2011), pp.511, "Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high-cycle loads",平成 23 年 11 月,International conference on recent advances in nonlinear models (CoRan2011),K. Maekawa and C. Fujiyama

コンクリート工学年次論文集 Vol.334, No.2, pp.667-672, 「実験及び数値解析による床版疲労寿

命に影響を及ぼす諸要因の検討」藤山知加子，小林薫，鈴木雄大，前川宏一，日本コンクリート工学会，2012.7

(2) 実用化対応ソフトウェアインターフェースの開発

本研究成果の普及のため、最終年度の本年は、実務に携わる技術者にむけたソフトウェアのインターフェース整備を進めた（清華大学と共同）。

<主な開発コンセプト>

1) 入力簡易化

支間長、支持条件等を入力すれば自動でメッシュ作成するシステム（パネル単位）

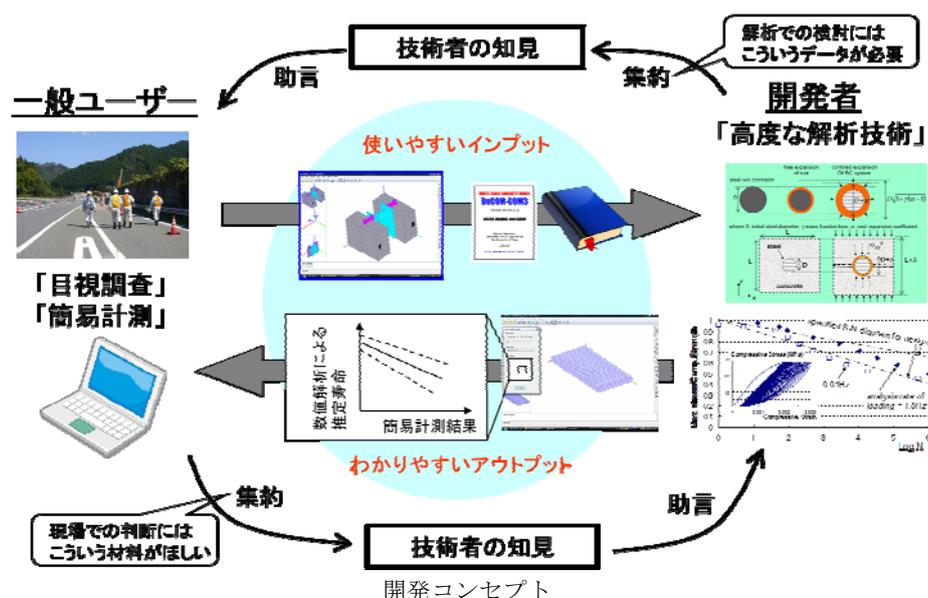
本来解析モデルの構成則自体に精通していなければ設定が難しい入力値について、実務で頻繁に使用される諸数値を網羅して選択式の入力にし、内部で自動計算。さらに例題や推奨値のオプションを示してユーザーを手助けする。

2) 既存損傷を考慮可能にする簡易入力システム

① ひび割れ詳細調査データ（ひび割れ位置、幅、等を直接入力）

② 損傷グレード選択

の2手法により既存損傷を数値解析に考慮する。



その結果、点検—解析一体型のプロトタイプソフトウェアを開発、既存 RC 床版の余寿命推定プロセスが可能となった。実橋への適用性拡大とソフトウェア操作性向上のため、今後も研究開発を継続する。

関連研究発表：

“Fatigue life assessment of existing bridge decks based on visual inspection data and numerical simulation”, C. Fujiyama, X. J. Tang, F. Shang, X. H. An and K. Maekawa, proceedings of 8th international symposium on social management system, 2012.5.

“Residual fatigue life assessment of damaged RC bridge slabs based on observed cracking damage: a quantitative discussion”, X. J. Tang, C. Fujiyama, F. Shang, K. Maekawa and X. H. An, proceedings of first international conference on performance-based and life-cycle structural engineering, 2012.12. (accepted)

8. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名(雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名)	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
コンクリート工学年次論文集, 第32巻, 第2号, pp1-6, 「鋼コンクリート境界面特性が合成床版疲労破壊機構に及ぼす影響」2010	平成22年7月	日本コンクリート工学協会	藤山知加子, 櫻井信彰, 中山逸人, 前川宏一
Journal of Advanced Concrete Technology, 8(2), 239-258, “Modeling and analysis of shear-critical ECC members with anisotropic stress and strain fields”, 2010	平成22年6月	日本コンクリート工学協会	Suryanto, B., Nagai, K. and Maekawa, K.
Journal of Advanced Concrete Technology, 8(3), 315-326, “Smearred-crack modeling of R/ECC membranes incorporating an explicit shear transfer model”, 2010	平成22年10月	日本コンクリート工学協会	Suryanto, B., Nagai, K. and Maekawa, K
Proceedings of The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), “Fatigue life simulation of RC bridge slab with initial defects under water”,	平成23年1月	East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction	C. Fujiyama, K. Kobayashi, J.J.Zhan and K. Maekawa
土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 67, No. 1, pp.193-206 「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」2011	平成23年3月	土木学会	藤山知加子, 櫻井信彰, 前川宏一
コンクリート工学年次論文集, 第32巻, 第2号, pp1-6, 2010. 「鋼コンクリート境界面特性が合成床版疲労破壊機構に及ぼす影響」	平成22年7月	日本コンクリート工学協会	藤山知加子, 櫻井信彰, 中山逸人, 前川宏一
Journal of Advanced Concrete Technology, 8(2), 239-258, 2010. “Modeling and analysis of shear-critical ECC members with anisotropic stress and strain fields”	平成22年6月	日本コンクリート工学協会	Suryanto, B., Nagai, K. and Maekawa, K.
Journal of Advanced Concrete Technology, 8(3), 315-326, 2010. “Smearred-crack modeling of R/ECC membranes incorporating an explicit shear transfer model”	平成22年10月	日本コンクリート工学協会	Suryanto, B., Nagai, K. and Maekawa, K
Proceedings of The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-12), “Fatigue life simulation of RC bridge slab with initial defects under water”	平成23年1月	East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction	C. Fujiyama, K. Kobayashi, J.J.Zhan and K. Maekawa

土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 67, No. 1, pp.193-206 2011 「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」	平成 23 年 3 月	土木学会	藤山知加子, 櫻井信彰, 前川宏一
コンクリート工学年次論文集, 第 33 巻, 第 2 号, pp1321-1326, 2011 「床版増厚補強工法の効果の検討と境界面付着強度が及ぼす影響」	平成 23 年 7 月	日本コンクリート工学協会	藤山知加子, 池野誠司, 小林薫, 前川宏一
Proceedings of international conference on recent advances in nonlinear models (CoRan2011), pp.511, “Rate-dependent model of structural concrete incorporating kinematics of ambient water subjected to high-cycle loads”	平成 23 年 11 月	international conference on recent advances in nonlinear models (CoRan2011)	K. Maekawa and C. Fujiyama
Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 9 (2011), No. 2 pp.193-204, “A Computational Simulation for the Damage Mechanism of Steel-Concrete Composite Slabs under High Cycle Fatigue Loads”	平成 23 年 6 月	日本コンクリート工学協会	Fujiyama, C and Maekawa, K.
土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol68, No.1, 1-15, 2012. 「ずれ止め諸元が鋼コンクリート剛性床版の損傷モードに及ぼす影響」	平成 24 年 1 月	土木学会	藤山知加子, 櫻井信彰, 前川宏一
Proceedings of second international conference on microstructural-related durability of cementitious composite, “Microstructure based life-cycle assessment and durability design of concrete bridges”	平成 24 年 4 月	Second international conference on microstructural-related durability of cementitious composite	Koichi Maekawa, Benny Suryanto, Chikako Fujiyama and Nobuhiro Chijiwa

9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名

10. 成果の実用化の見通し

研究成果を社会還元する目的で、本研究で検証を経た非線形疲労損傷蓄積有限要素解析に基づいて、履歴既存橋梁床版の疲労余寿命推定システム **Version 1.00** を完成させた。ソフト名は **FABriS** であり、平成 24 年 6 月 21, 22 日に第 7 回道路橋床板シンポジウム（主催：土木学会鋼構造委員会道路橋床板の維持管理評価に関する検討小委員会）の場を借りて一般公開とデモンストレーションを行い、実用化にむけた機能検証のため一般モニタの募集を行った。



写真：シンポジウム資料とともに受付で配布された FABriS リーフレット

現在複数の道路管理者から詳細な問合せを受けている状態である。実務者と協力して実橋への適用性検討を進める段階であり、実用化は近いと考えている。

11. その他

第 7 回道路橋床板シンポジウム（主催：土木学会鋼構造委員会道路橋床板の維持管理評価に関する検討小委員会）の場を借りてソフトウェアの一般公開とデモンストレーションを行った際に配布したリーフレットを次ページ以降に添付する。