

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19560460
 研究課題名（和文） コンクリート構造物のアセットマネジメントのための合理的メンテナ
 ナンス手法の構築
 研究課題名（英文） Development of Rational Maintenance Methodology for Asset
 Management of Concrete Structures
 研究代表者
 森川 英典 (MORIKAWA HIDENORI)
 神戸大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：70220043

研究成果の概要：本研究では、コンクリート構造物群のアセットマネジメントを、個別構造物のメンテナンスに対応するような形で実現するために必要な合理的メンテナンス手法とそのための基本概念の構築に関して検討したものであり、メンテナンスとマネジメントの概念の提案、塩害劣化進行モデルの検討、点検レベルに対応した塩害劣化橋の信頼性評価手法、健全度評点法、簡易診断手法の検討、連続繊維シート補強工法の補強効果の評価と解析手法の検討を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：コンクリート工学，維持管理工学

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：コンクリート構造物，アセットマネジメント，メンテナンス，塩害，橋梁

1. 研究開始当初の背景

近年、コンクリート構造物の劣化が顕著になり、また今後厳しい財政状況の下で構造物の高齢化が急速に進行していくという状況において、限られた予算の下でコンクリート構造物を安全にかつ合理的に維持管理していくための方策としてのアセットマネジメントの構築が社会的に強く要求されている。これは管理すべき全ての構造物の性能、劣化予測に基づく資産（アセット）価値評価に基づいた最適な予算措置により維持管理計画を策定することを目的としている。つまり、アセットマネジメントにおいては、構造物群としての現状評価と将来予測が非常に重要なポイントとなり、予算計画の予測結果に及ぼす影響は極めて大きい。しかしながら、現状

では限られた情報をもとに劣化予測モデルを仮定せざるを得ない状況であり、現実の個々の構造物の維持管理との対応がとれていない。一方、コンクリート構造物を適切に維持管理していくためには、構造物の性能を適切な安全余裕（信頼性）を付与して評価し、対策の必要性を判定して対策を講じることにより、所定の期間、性能を要求レベルに維持することが極めて重要となる。IS013822では、既設構造物に対して、信頼性を最終的な対策の要否判定のための指標として取り込むことが規定されており、今後の維持管理の基本的な考え方として整理していくことが求められている。研究代表者はこれまでに、コンクリート構造物の劣化予測、性能評価、最適補強計画について、それらの信頼性を考

慮しながら行う手法について検討してきた。これらの成果をさらに発展させながら、できる限り簡易的な実用手法の構築とともに、アセットマネジメントのための評価・予測手法として構築していくことを本研究の着想の原点としている。

2. 研究の目的

近年、コンクリート構造物の劣化が顕著になり、また今後厳しい財政状況の下で構造物の高齢化が急速に進行していくという状況において、限られた予算の下でコンクリート構造物を安全にかつ合理的に維持管理していくための方策としてのアセットマネジメントの構築が社会的に強く要求されている。これは管理すべき全ての構造物の性能、劣化予測に基づく資産（アセット）価値評価に基づいた最適な予算措置により維持管理計画を策定することを目的としている。つまり、アセットマネジメントにおいては、構造物群としての現状評価と将来予測が非常に重要なポイントとなり、予算計画の予測結果に及ぼす影響は極めて大きい。しかしながら、現状では限られた情報をもとに劣化予測モデルを仮定せざるを得ない状況であり、現実の個々の構造物の維持管理との対応がとれていない。一方、コンクリート構造物を適切に維持管理していくためには、構造物の性能を適切な安全余裕（信頼性）を付与して評価し、対策の必要性を判定して対策を講じることにより、所定の期間、性能を要求レベルに維持することが極めて重要となる。ISO13822では、既設構造物に対して、信頼性を最終的な対策の要否判定のための指標として取り込むことが規定されており、今後の維持管理の基本的な考え方として整理していくことが求められている。研究代表者はこれまでに、コンクリート構造物の劣化予測、性能評価、最適補強計画について、それらの信頼性を考慮しながら行う手法について検討してきた。これらの成果をさらに発展させながら、できる限り簡易的な実用手法の構築とともに、アセットマネジメントのための評価・予測手法として構築していくことを本研究の目的としている。

本研究における検討項目は以下のとおりである。

- (1) アセットマネジメントとメンテナンスの概念の検討
- (2) 点検モニタリングと劣化予測モデルの検討
- (3) 劣化構造部材の性能評価の検討
- (4) 点検レベルに対応した塩害劣化 RC 橋の信頼性評価手法、健全度評点法の検討
- (5) 劣化構造部材、橋梁の補強に関する検討
- (6) 塩害劣化 RC 橋梁群の劣化予測モデルと LCC シミュレーション

3. 研究の方法

(1) アセットマネジメントとメンテナンスの概念の検討

メンテナンスとマネジメントの概念を検討し、両者を有機的に対応づけるための全体

構想について検討した。

(2) 点検モニタリングと劣化予測モデルの検討

ひび割れ、浮き調査と電気化学的腐食モニタリング手法を組合せて鉄筋腐食劣化の評価法を構築し、マクロセルの進展を考慮した劣化進行モデルの拡張を行った。実橋梁においてモニタリングを行い、マクロセルなど実橋梁における複雑な劣化状況の実態把握とそのメカニズムの解明、そのモデル化を検討した。

(3) 劣化構造部材の性能評価の検討

モンテカルロシミュレーションによる手法について検討し、劣化状態による塩害劣化 RC 橋における断面力再配分特性など、劣化の影響について検討した。

(4) 点検レベルに対応した塩害劣化 RC 橋の信頼性評価手法、健全度評点法の検討

点検レベル（詳細度や難易度）に対応して塩害劣化コンクリート橋の信頼性を評価する手法について検討した。

橋梁管理者に対するアンケート調査により塩害劣化 RC 橋の健全度を評価する手法について検討し、その有効性を明らかにした。構築した健全度評点法の検証を行い、点検レベル・評価レベルを考慮した各手法の位置づけの検討を行い、実用化の検討を実施した。

橋梁管理者に対するアンケート調査に基づく簡易診断手法の検証を行い、他の簡易手法や詳細評価法との対応関係について検証し、実用化の検討を実施した。

(5) 劣化構造部材、橋梁の補強に関する検討

塩害劣化した RC 部材および橋梁における補強効果について評価し、合理的な補強対策の手法について検討した。

(6) 塩害劣化 RC 橋梁群の劣化予測モデルと LCC シミュレーション

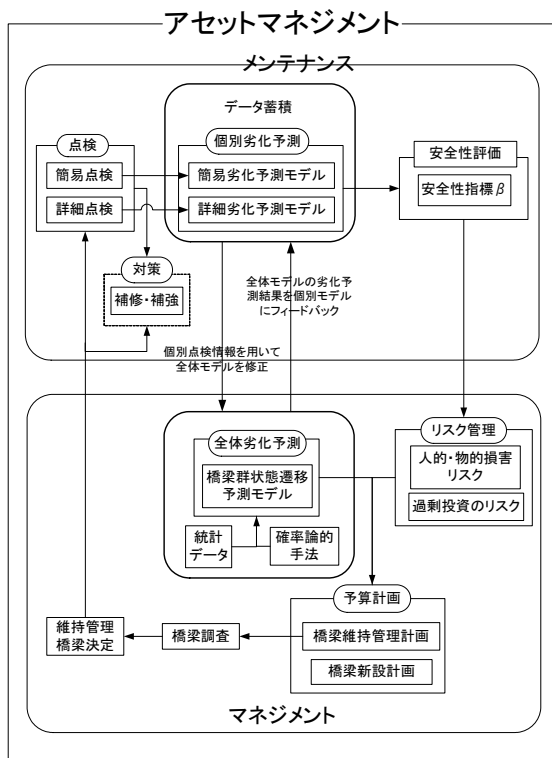
評価された健全度の結果にマルコフ連鎖モデルを適用することにより、不確定性を考慮した塩害劣化 RC 橋の確率論的評価・予測手法を構築し、LCC 評価とアセットマネジメントへの適用性について検討した。

4. 研究成果

(1) アセットマネジメントとメンテナンスの概念の検討

橋梁に対して合理的に維持管理を行っていくには、橋梁全体の安全性・信頼性を解析、評価する方法を確立する必要がある。また一方で、我が国における今後の財政事情を考慮した場合、効率的な予算計画および、橋梁の機能を維持するための合理的なマネジメント手法の確立が必要である。そのため、図 1 に示すようにメンテナンスとマネジメントは互いにリンクし合う必要がある。また合理的なマネジメントの実現には劣化予測の精度が非常に重要であり、精度は点検によって

高めることができるので、その最も基本的な行為がシステム運用の成功の鍵を握っているといっても過言ではない。劣化予測は点検データに基づくものと、確率論および統計データによる数理モデルを用いたものとに大別される。点検データに基づく劣化予測は主に個別橋梁において適用されるものであるが、数理モデルから成る全体劣化予測においても、個別モデルの集合体であると考えられ、図1に示すように全体モデルの精度は個別モデルに依存する必要がある。すべてのシステムは点検を基本として成立する必要がある。さらに、両劣化予測の利点を活かした使い分け、または両者を併用することによる妥当性の検討によって最適な維持管理計画を実現することができると思われる。



実環境に近い屋外暴露環境では、設置条件により腐食の進行が鉄筋ごとにばらつき、特に腐食量が小さい場合は、腐食の進行が局所的であり付着低下が一樣でないため、アーチ機構へ移行することによるせん断耐力の増加は生じにくい可能性を示した、

b) 鉄筋とコンクリートとの付着低下を考慮したRC部材のせん断耐荷性能評価

本研究では、引張鉄筋およびスターラップとコンクリートの付着低下がせん断耐荷機構に及ぼす影響、丸鋼を配筋した RC はり部材のせん断耐荷性能を把握することを目的とし、RC 部材に異形棒鋼、丸鋼、そして著しく鉄筋腐食が進行した場合を想定し極端に付着を低下させたアンボンド筋を配筋した供試体の静的載荷試験を行い、実験的見地に基づき評価を行った。

本研究で用いた供試体はせん断スパン比 2.5 で、せん断破壊形式が遷移的な領域であり、引張鉄筋およびスターラップの付着低下により、その破壊形式が著しく異なることが分かった。

引張鉄筋に丸鋼を配筋し付着を低下させた場合、せん断耐荷機構が一部アーチ機構に移行し、せん断耐荷性能が向上する可能性があることが分かった。ただし、引張鉄筋全長において著しく付着を低下させた場合には、荷重が鉄筋の定着部に集中し、脆性的な定着破壊に至る可能性があるため、安全側に評価するに当たり付着不良を有する引張鉄筋の配置に伴うせん断耐力の増加は見込むべきではないことが分かった。

スターラップに付着の小さい鋼材が配筋されている場合、破壊形式がせん断引張破壊に移行し、せん断耐力が大幅に低下する恐れがあることが分かった。

(4) 点検レベルに対応した塩害劣化RC橋の信頼性評価手法、健全度評点法の検討

a) 現場試験に基づく塩害劣化RC橋の構造性能と安全性の評価

本研究では、既往の研究において行った各点検を点検の難度や詳細度によって「点検レベル」として分類し、各レベルをそれぞれ劣化予測にフィードバックした結果、安全性評価がどう更新されるかを比較した、また 20tf トラックによる静的載荷試験を行い、簡易的な点検では推定困難な構造物の構造パラメータを同定し、実際の腐食状況に即した構造性能を評価した上で、安全性評価を行い、従来の研究結果との比較も行った、また、従来の研究では考慮していなかった局部腐食が安全性評価に及ぼす影響を、様々な仮定を用いて劣化予測に反映し橋梁の性能を出来るだけ詳細に評価した、

b) 現場試験に基づいた塩害劣化RC橋のせん断安全性の評価と特性分析

維持管理において、RC 橋の安全性評価は主として曲げモーメントに着目して行われており、研究代表者らもこれまでに材料強度、

環境条件の不確実性を考慮した曲げ破壊に対する塩害劣化 RC 橋の安全性評価手法について検討を行っている。しかし、施工や材料強度、環境条件による鉄筋腐食の不確実性を考慮すると、せん断破壊が支配的になる可能性も危惧される。このため、研究代表者は従来、塩害劣化が生じた 2 橋の RC 橋上部工について、現場試験結果から推定した経時的な鉄筋腐食等に基づいた劣化予測を行い、せん断耐荷性能および安全余裕を指標とした安全性評価を行っている。本研究では、対象橋梁 3 橋 A, B, C 橋について、新たに劣化評価に関わるパラメータの不確実性を考慮した劣化予測を行うとともに、別途実施された曲げ安全性評価結果との比較検討を行った。その結果、コンクリート強度が低いレベル、あるいはその不確実性が大きい、かつ主鉄筋よりも側面のスターラップの腐食が先行することが想定される場合にはせん断破壊が支配的となる可能性があり、せん断安全性評価が有効であると考えられる。

c) 塩害劣化RC橋梁群を対象とした健全性に関する簡易評価手法の検討

本研究では、簡易点検に基づき簡易かつ客観的に橋梁の劣化状態および健全性を評価できる手法を構築するために、複数の橋梁に対して管理者を対象とした健全性に関するアンケート調査を行い、その結果を多変量解析によって分析し、管理者の判断基準を抽出することを検討した。また、今回の調査結果によって得られた回答分布を分析することで、実運用時を想定した時に含まれる様々な不確実性も考慮し、汎用性のある評価手法を検討した。

図 2 に、簡易点検に基づく劣化状態および健全性の評価値の平均値と各桁の供用開始時からの信頼性指標値 β (詳細点検に基づく信頼性解析結果) の低下率について示す。各平均値と β の低下率との相関であるが、この 2 橋に関しては詳細点検と簡易点検の結果に相関関係があり、簡易法の妥当性が確認できた。

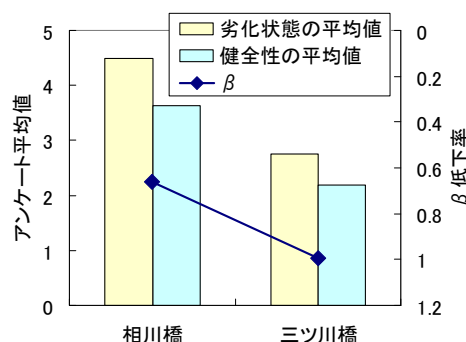


図 2 簡易評価の平均値および β の関係

(5) 劣化構造部材、橋梁の補強に関する検討

a) 断面修復を施したRCはりの耐荷性能および炭素繊維シート補強工法の適用

一般に、塩害劣化が加速期および劣化期に至ったRC橋にシート補強工法を適用する際、引張鉄筋上部まで脆弱化したコンクリートをはつき取り、断面修復した上で、連続繊維シートを接着する。しかし、断面修復を施した上で炭素繊維シート（以下、CFRP）補強を行い、その効果を評価した研究はほとんどないのが現状である。また、実施工では、打ち継ぎ界面にプライマーを塗布し、鉄筋にプライマーや防錆剤などを塗布する手法が用いられており、これらによる影響についても検討を行う必要がある。こうした背景により、本研究では以下の3点に着目し検討を行った。

- 断面修復による部材の耐荷性能
- 断面修復を考慮したCFRP補強の効果
- 打ち継ぎ界面処理の適用の効果

本研究では、断面修復用材料の違いを考慮し、検討を行うため、ポリマーセメントモルタル（以下、PCM）4種類とポリマーセメントコンクリート（以下、PCC）3パターンを使用した。さらに打ち継ぎ界面（引張側鉄筋を含め）におけるプライマー塗布の有無およびシート施工の際不陸修正材（以下、パテ）施工の有無を考慮したRCはりの曲げ載荷実験を行い、それぞれの影響とCFRP補強による効果を考察した。

低弾性係数のPCMで断面修復を行うと、はり部材の耐荷性能において、やや低下が生じる。さらにその供試体にCFRP補強を施すと、局所的な応力が生じやすく、通常のRCはりの場合に比べて補強効果が大幅に低下する。一方、本研究では、 18kN/mm^2 程度以上の弾性係数のPCMで断面修復を施すことにより、はり部材の耐荷性能が改善され、CFRP補強効果に及ばず影響はほとんどない。

断面修復材は本研究で示した高弾性係数のものであれば、粗骨材の有無また粗骨材量の影響はほとんど見られない。

部材とシートとの接着界面の状態がシートの付着性能に影響を与える可能性があるが、パテの施工による部材とシートとの一体化が最大限に効用を果たす。

プライマーを塗布すると、鉄筋とPCMとのすべりが生じるまでの初期強度は高くなるが、すべりが生じた後の付着強度が低下するため、実施工の場合、事前に付着試験による接着性能の評価およびプライマーの選択が重要である。

b) 外ケーブル工法による塩害劣化RC橋の補強効果の評価

本研究では、塩害劣化により安全性が低下したRC橋に対し、外ケーブル工法を用いて補強した場合の安全性向上について経年ごとの検討を行った。また、合理的な補強を行うための最適補強の評価として、多属性効用理論を用いて各桁の安全性指標、 β バランス、剛性バランス、補強桁数の属性を考慮した場合の補強効果、属性値の設定の際に用いる指数係数と重み係数の違いによる補強効果に

ついても検討を行った。

(6) 塩害劣化RC橋梁群の劣化予測モデルとLCCシミュレーション

本研究では、塩害劣化した個別橋梁の点検データを用いて個別橋梁の劣化予測を行い、そこから得られた知見を用いて橋梁群全体の劣化予測モデルを構築し、その際に詳細点検結果を用いた全体モデル、簡易点検結果を用いた全体モデルの2つのアプローチから全体モデルの構築を行った。詳細点検、簡易点検データを用いて、全体モデルとして橋梁群の劣化状態の遷移を予測する手法を構築し、その全体モデルおよびLCCシミュレーションを用いて、橋梁の維持管理におけるアセットマネジメントの有用性について検討した。マルコフ連鎖および詳細点検データを用いた全体モデルの構築に関しては、劣化予測結果によって仮想の2時点の点検データを得ることで、経年で一定の遷移確率でもマルコフ連鎖によって劣化予測シミュレーションを追跡できることがわかった。より現実的である簡易レベルの全体モデルを用いて様々な条件設定のもとでLCCシミュレーションを行ったが、様々な劣化度の橋梁が混在している場合、RCT橋梁群においては事後保全のみで対策を行うと、予防保全・事後保全を併用した場合と同等のコストパフォーマンスが得られることがわかった。しかし、予防保全のみと事後保全のみを比較した場合、予防保全の方が有利であることがわかり、予防・事後保全を併用することが望ましいと考えられる。また低コスト補修では短期的視点ではコストパフォーマンスは良いが、中長期視点では適切な維持管理対策ではないことがわかり、このことから対症療法的維持管理よりも、アセットマネジメントによる計画的かつ合理的な維持管理手法が非常に有効であることがわかった。また劣化予測モデルの精度によって行う維持管理対策のコストパフォーマンスが異なることがわかり、構築・適用する劣化予測によって講じる対策はそれぞれ異なることがわかった。適切で合理的な維持管理の実現には劣化予測の精度が最も重要であり、また劣化予測の精度は点検によってのみ高めることができることから、点検の重要性を全ての管理者が再認識する必要がある。以上のことから、アセットマネジメントの枠組みの中で点検、劣化予測、維持管理計画の位置づけをはっきりと把握することが、最適な維持管理手法の構築において最も重要であるということが本研究の結論である。本研究でその一つの仕組みを提案したが、今後も継続的に点検データを蓄積し、劣化予測結果を更新し精度を上げ、より汎用的な維持管理手法・システムを検討していく必要がある。

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11件）

① 彭丰, 森川英典, 野中秀一: 断面修復を

- 施したRCはりの耐荷性能および炭素繊維シ 4 補強工法の適用に関する実験的考察, 材料, Vol. 58 No. 4, pp. 331-337, 2009, 査読有.
- ② 森川英典, 権明直, 内海卓也: 塩害劣化RC橋梁群の劣化予測モデルと補修・補強を考慮したLCCシミュレーション, 建設工学研究所論文報告集, 第 50 号, 2008, 査読有.
- ③ 森川英典, 山室俊介, 武田透: 経時的な点検に基づく塩害劣化RC部材の腐食進展メカニズムに関する検討, 建設工学研究所論文報告集, 第 50 号, 2008, 査読有.
- ④ Hidenori Morikawa: Safety evaluation and optimal strengthening of deteriorated RC bridges due to chloride attack, Proc. of 3rd International Workshop on Lifetime Engineering of Civil Infrastructures, 2008, 査読無.
- ⑤ 狩野裕之, 森川英典, 湯浅康史: 現場試験に基づいた塩害劣化RC橋のせん断安全性の評価と特性分析, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告, 第 8 巻, pp. 145-152, 2008, 査読有.
- ⑥ 笠松大輔, 森川英典, 小林秀恵, 湯浅康史: 促進腐食により塩害劣化したRC部材の鉄筋腐食状態とせん断耐荷性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 801-806, 2008, 査読有.
- ⑦ 山室俊介, 森川英典: 塩害劣化したRC部材における鉄筋腐食モニタリングと劣化予測手法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 747-752, 2008, 査読有.
- ⑧ 森川英典, 笠松大輔, 小林秀恵: 鉄筋とコンクリートとの付着低下を考慮したRC部材のせん断耐荷性能評価, 建設工学研究所論文報告集, Vol. 49, pp. 1-8, 2007, 査読有.
- ⑨ 池本佳代, 森川英典: 外ケーブル工法による塩害劣化RC橋の補強効果の評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 7 巻, pp. 55-62, 2007, 査読有.
- ⑩ 彭丰, 森川英典, 小林秀恵: 断面修復を考慮したRCはりの連続繊維シート補強効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp. 1489-1494, 2007, 査読有.
- ⑪ 権明直, 森川英典: 現場試験に基づく塩害劣化RC橋の構造性能と安全性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 1, pp. 1077-1082, 2007, 査読有.
- [学会発表] (計 14 件)
- ① 山室俊介, 森川英典: 塩害劣化したRC部材における鉄筋腐食モニタリングと劣化予測手法の検討, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008. 9. 2-4
- ② 内海卓也, 森川英典: 経時的な点検に基づいた塩害劣化RC橋の劣化予測および安全性評価, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008. 9. 2-4
- ③ 野中秀一, 森川英典, 彭丰, 小林秀恵: 断面修復材の違いを考慮したRC部材におけるCFRPシート補強効果の評価, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008. 9. 2
- ④ 山室俊介, 森川英典, 武田透: 塩害劣化したRC部材における鉄筋腐食モニタリングと劣化予測手法の検討, 平成 20 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2008. 5. 24
- ⑤ 内海卓也, 森川英典: 経時的な点検に基づいた塩害劣化RC橋の劣化予測および安全性評価, 平成 20 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2008. 5. 24
- ⑥ 野中秀一, 森川英典, 彭丰, 小林秀恵: 断面修復材の違いを考慮したRC部材におけるCFRPシート補強効果の評価, 平成 20 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2008. 5. 24
- ⑦ 山室俊介, 森川英典, 小林秀恵, 木村正敏, 山本尚樹: 鉄筋腐食モニタリングを用いたRC部材の劣化予測手法の検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007. 9. 14
- ⑧ 笠松大輔, 森川英典, 湯浅康史, 小林秀恵: 促進腐食により塩害劣化したRC部材の鉄筋腐食状態とせん断耐荷性能, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007. 9. 12
- ⑨ 野中秀一, 森川英典, 彭丰, 小林秀恵: 断面修復材の違いを考慮したRC部材におけるCFRPシート補強効果の評価, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007. 9. 12
- ⑩ 池本佳代, 森川英典: 外ケーブル工法による塩害劣化RC橋の補強効果の検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 2007. 9. 12
- ⑪ 山室俊介, 森川英典, 山本尚樹, 小林秀恵: 鉄筋腐食モニタリングを用いたRC部材の劣化予測手法の検討, 平成 19 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2007. 5. 26
- ⑫ 笠松大輔, 森川英典, 湯浅康史, 小林秀恵: 促進腐食により塩害劣化したRC部材の鉄筋腐食状態とせん断耐荷性能, 平成 19 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2007. 5. 26
- ⑬ 野中秀一, 森川英典, 彭丰, 小林秀恵: 断面修復材の違いを考慮したRC部材におけるCFRPシート補強効果の評価, 平成 19 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2007. 5. 26
- ⑭ 池本佳代, 森川英典: 外ケーブル工法による塩害劣化RC橋の補強効果の検討, 平成 19 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2007. 5. 26
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
森川 英典 (MORIKAWA HIDENORI)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 70220043
- (2) 研究分担者 なし
- (3) 連携研究者 なし