

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17206055
 研究課題名（和文） 既存鉄筋コンクリート造建築外装部材の戦略的メンテナンス最的化支援システムの開発
 研究課題名（英文） Development of the support system for optimized strategic maintenance of exterior components of existing reinforced concrete structure
 研究代表者
 野口 貴文（NOGUCHI TAKAFUMI）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：80208321

研究成果の概要：

鉄筋コンクリート造建築外装部材の耐久性を確認するため、促進劣化試験によるコンクリートおよび仕上材の構造躯体保護性能の経時変化、拡散セル試験機を用いた仕上材の物質移動抵抗性を把握した。また、ライフサイクルコストを最小とする維持保全計画を立案するためのシステム構築として、中性化・塩害に伴う RC 造建築物の劣化リスク評価手法を提案し、免疫系遺伝的アルゴリズムの導入による最適化システムを完成させた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	14,700,000	4,410,000	19,110,000
2006 年度	17,200,000	5,160,000	22,360,000
2007 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2008 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	37,400,000	11,220,000	48,620,000

研究分野：建築材料

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：建築構造・材料、長寿命化、メンテナンス、最適化、アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

既存鉄筋コンクリート造建築物を長期的に使用し続けていくためには、建築物の現在の劣化状態と作用劣化外力を正確に把握して余命予測を行うとともに、劣化状態に応じて適切な補修材料・工法を選定することが重要となる。正確な余命予測および適切な補修設計を実現する上で必要不可欠な情報は、最小構成単位の経時変化（劣化：化学的な変化、物理的な変化、幾何学的な変化）がコンクリート・コンクリート部材・鉄筋コンクリート造建築物の機能・性能にどのような影響を及ぼすかであるが、補修材料・工法の長期的な

効果に関する有益な情報はほとんど提示されておらず、補修材料・工法の種類が多岐に渡るため、補修設計自体も体系化されていない。その結果、補修後、年月があまり経過しないうちに再補修を実施しなければならなくなるケースも頻りにあり社会的な問題に発展しつつある。

今後増加し続ける鉄筋コンクリート造建築物のストックを適切にメンテナンスし、後生の要求に応えられるような形で継承していくためには、いつどのような修繕・補修を施せばよいのかというメンテナンス計画を提示する必要があり、その場合、ライフサイ

クル全体に渡っての修繕・補修に要するコストを考慮したメンテナンス計画を策定することは、経済的寿命の重要性を念頭においた場合、必要不可欠である。

2. 研究の目的

以上のような社会的背景と社会からの要求に鑑み、本研究では、「既存鉄筋コンクリート造建築外装部材の戦略的メンテナンス最適化支援システム」を開発することを最終目的とし、下記の項目について研究を実施する。なお、本研究では、検討対象を劣化外力の影響を最も強く受けるとともに要求性能も高度で多岐に渡ると考えられる外装部材（柱、梁、外壁）に限定することとする。

- (1) 遺伝的アルゴリズムを用いた建築物のメンテナンス計画最適化ツールの完成（建築物全体への拡張、信頼性理論の導入）
- (2) 材料性能、その組合せ、接合部・目地部などの影響が定量的に組み込まれた鉄筋コンクリート外装部材の性能評価システムの構築
- (3) 各種補修材料の劣化メカニズムの解明および性能劣化曲線（X 軸：劣化作用期間、Y 軸：性能低下度）の形状把握
- (4) 補修を施した鉄筋コンクリート外装部材の経時的な性能低下を評価できるシステムの構築（(3)の(2)への実装）
- (5) 既存鉄筋コンクリート造建築物の補修をいつどのような工法・材料で行えば最適（例えば、LCC 最小）なのかを明らかにできる「既存鉄筋コンクリート造建築躯体の戦略的メンテナンス最適化支援システム」の構築（(4)の(1)への実装）

3. 研究の方法

(1) メンテナンスモデルの構築

本研究の最終目的である建築物のメンテナンス計画最適化ツールの完成には、「最適化手法の開発」「メンテナンスモデルの構築」と「メンテナンス計画の評価手法」が必要となる。ここで対象とするメンテナンスモデルとは、建築物の維持保全の諸行為が建築物の性能に及ぼす影響を定量的に表現するための枠組みであり、メンテナンス計画の評価に必要な情報を提供するためのモデルの集合を指し、外装部材の性能評価モデル、各材料物性の経時変化モデル、目地や接合部などの特殊部位の評価モデル、補修・修繕の効果の評価および経年劣化モデルなどを含む。本研究項目においては、期間中に生じる劣化外力のばらつきや各構成材料の性能のばらつきや材料のばらつきなどを信頼性理論の導入により考慮し、外装部材の性能の経時変化を理論的に予測するための枠組みについて検討し、資産価値、LCC、LCA などの評価ご

とに必要な情報を提供するためのモデルの構築を行う。

(2) メンテナンス計画の評価手法に関する調査検討

メンテナンス計画の最適化を行うためには、対象となるメンテナンス計画の評価を、例えば構造安全性や使用安全性はもとより住民の利便性や周辺住民への影響など多角的に行う必要がある。具体的には、評価項目の決定・選定、評価項目ごとの評価関数の決定が必要となるが、これらに関して文献調査を中心とした検討を行う。これらに関しては現段階では、構造安全性はもとより、使用安全性、資産価値、LCC、LCA などが挙げられる。また、信頼性理論の導入を検討していることから、その評価にはリスク分析の概念の導入が可能であると考え、実装に向けた理論的考察を行うものとする。

(3) 信頼性理論の導入

信頼性理論の概念の導入を念頭においたメンテナンスモデルの枠組みを構築する。すなわち、まずは建築物に要求される機能的要件や性能項目に対して信頼性の概念を適用し、建築物全体に対するメンテナンスの理論体系の構築を行う。次に、同時に複数の性能評価項目が必要で、さらに各部材がある信頼性またはリスクを伴って供されているような状況下においては、まず、このような状況を取り扱う手法について検討を行い、さらに、メンテナンス戦略が最適であるかを検討するための理論体系の構築を行う。

(4) 鉄筋コンクリート外装部材の性能評価システムの構築

建築物外装部材レベルでのメンテナンス計画最適化ツールを構築するためには、外装部材の性能評価構造の知識化・体系化、外装部材の性能を外装部材の構成材料の物性や構成から算定する手法の整理、構築、各構成材料の経時変化の予測モデルの構築が必要となる。ここで本研究の対象とする外装部材とは、建築物の外環境に接する部位・部材であるものとし、鉄筋コンクリート造の柱、梁および壁と、それらに密着して使用される外装材料および補修材料であるものとする。例えば、建築仕上用塗材、タイルや石材、窯業系材料、補修用ポリマーモルタルやシート材料、表面改質剤のような躯体に浸透させる材料やひび割れ注入材などがこれに含まれる。

(5) 各種補修材料の劣化メカニズムの解明および性能劣化曲線の形状把握に関する実験的研究

外装部材の性能の経時変化を予測するには、予測モデルで用いる材料パラメータ（性能を決定する外装材の属性で、寸法、表面形状、細孔構造、物体色など）の経時変化を知る必要がある。そこで、第一に、各種外装材

料の初期状態（劣化前）の細孔構造、表面形状、物体色、密度といった最小構成単位の品質・性状、ならびに強度・弾性係数・伸び率、気体拡散係数、透水係数・透気係数、熱伝導率、可視光反射率といった建築材料の性能を測定し、外装材の「材料パラメータ」と「性能」との関係性を定量的に明確にした上で知識体系化する。

また、一部試料に関しては次年度以降に化学組成と元素分布による分析を検討するものとする。次に、建築外装部材を構成する建築材料として、構造材料、内外装仕上げ材料、防水材料、下地材料、接着材料などに一般的に用いられている窯業系建築材料（石材、セラミックタイル、モルタル、コンクリートなど、それぞれ数種類）および高分子系建築材料（アクリル樹脂、エポキシ樹脂、シリコン樹脂、シラン樹脂、ウレタン樹脂、SBR樹脂など、それぞれ数種類）を対象として、単独劣化作用による劣化促進実験を実施する。単独劣化作用としては、下記の項目を検討する。

- 乾湿繰返し（H₂Oの影響）
- 高低温繰返し（温度の影響）
- 高濃度CO₂暴露
- 酸性雨（硫酸・硝酸・塩酸）の噴霧
- 塩水噴霧（塩化物イオンの影響）
- 紫外線の照射
- 正負応力繰返し

これらを踏まえて、劣化促進実験を一定期間（数段階）終了した後、「材料パラメータの変化」と「性能の変化」との関係について、劣化作用の程度を考慮した上で定量的に明確にする（性能劣化曲線の導出）。

(6) 遺伝的アルゴリズムを用いた建築物のメンテナンス計画最適化ツールの完成

すでに開発をおこなっている多基準最適化遺伝的アルゴリズムを用いた、RC構造物への劣化因子の進入に対する維持管理計画策定支援システムのプロトタイプ（mntGA）を用いて、本研究で目的とするシステムに対し、mntGAの拡張を行う。このとき、多基準最適化モデルの構築、メンテナンスの遺伝子表現の検討・効率化などが新たな検討項目として挙げられる。

4. 研究成果

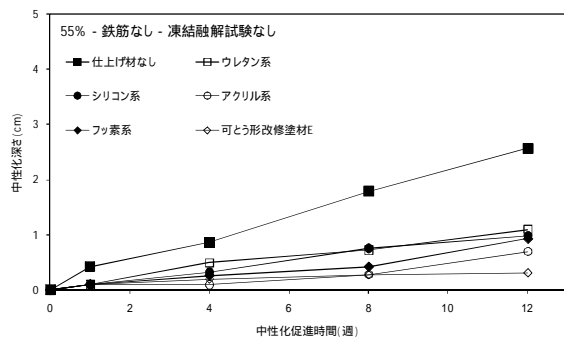
(1) 建築用外装材料の物質移動抵抗性評価に関する研究成果

凍結融解作用による外装塗料の劣化

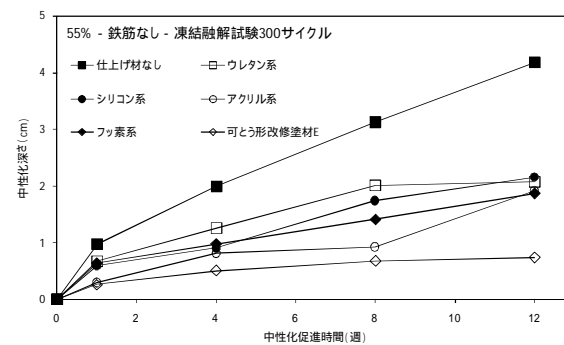
本実験では、凍結融解作用による外装塗料の劣化、また、その劣化が生じた後の外装塗料の中性化抑制効果を確認するために JIS A 1148-A により凍結融解試験を行った。相対動弾性係数を測定するため、振動がない部屋に装置を設置して各試験体につき計6箇所を測定を行い、その平均値を求めた。しかし、他の塗料では見られなかった剥離現象が、

特にシリコン系塗料を施した試験体では生じたため、相対動弾性係数の変化にばらつきがあると考えられる。これより、シリコン系塗料は凍結融解に対して抵抗性が低いと判断され、シリコン系塗料の物理的変化に関する更なる研究が必要であると考えられる。

健全な外装塗料および凍結融解試験300サイクルを行った外装塗料の中性化抑制効果を比較評価することを目的として、温度20℃、湿度60%、二酸化炭素濃度10%の条件で促進中性化試験を3ヶ月間実施した。凍結融解試験後、促進中性化試験を行った結果の一部を図1に示す。劣化した後の外装塗料の種類の違いによるコンクリート内部への中性化進行について検討した結果、アクリル系塗料および可とう型改修塗材では、凍結融解試験により中性化抑制効果の大きな低下が見られた。全ての結果から塗料の膜厚、試験体の含水率などに関する更なる研究が必要であると言える。



(a) 凍結融解試験なし



(b) 凍結融解試験 300 サイクル

図1 凍結融解試験による中性化深さの変化

紫外線照射による高分子系仕上材の中性化抑制効果の変化に関する研究結果

塗料および仕上塗材のコンクリートの中性化抑制効果の持続性について評価することを目的とし、主として紫外線劣化させた試験体を用い、仕上材の経年劣化を考慮した中性化抑制効果を定量的に評価することを試みた。

促進耐候性機を用いて、試験体を段階的に劣化させ、各時点における物性値を測定し、

仕上材の耐久性について評価した。このとき、対象とする物性としては、光沢度保持率、色差およびコンクリートの中性化抑制効果とした。ただし、光沢保持率および色差については塗料の4水準のみを対象とした。高分子系の促進劣化試験方法としては、サンシャインウェザーメーターによる方法、キセノンランプによる方法などが一般的であるが、本研究ではより促進性能が高いとされるメタルハライド式促進耐候性試験機を用いることとした。

図2に、各種仕上材の光沢保持率および色差の促進劣化の試験結果を示す。また、参考として実暴露データとの比較として、既往の文献より得た各地における屋外暴露試験の結果を示す。メタルハライドランプを用いた促進劣化においては、色差と光沢度保持率ともに劣化初期0~400hで変化が大きく、400h以降安定した傾向が見られた。これらは、屋外暴露試験の結果と同様の傾向であると考えられる。

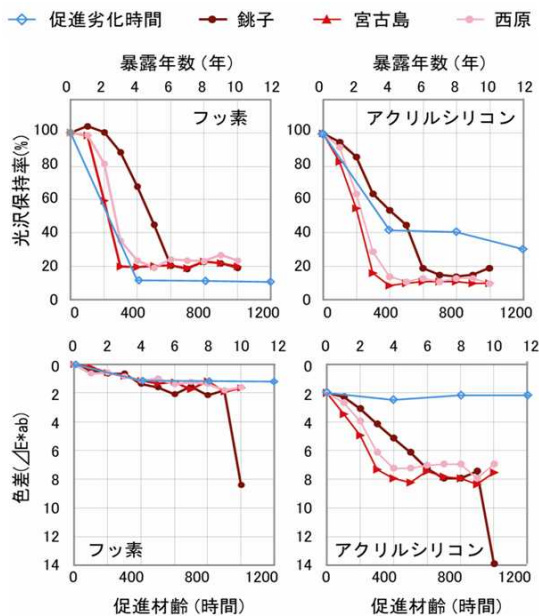


図2 光沢保持率および色差の促進劣化と既往の文献における実暴露試験結果（フッ素とアクリルシリコン）

試験体の劣化サイクル毎の中性化進行を図3に、試験により得られた中性化速度係数を表1に示す。仕上げ材を施さない試験体の中性化速度係数 A_c は9.35 であるのに対し、仕上げ材を施した場合の中性化抑制効果が確認された。続いて、下式を用い、仕上げ材の中性化抑制効果を評価した。

$$S(t) = A_i / A_c$$

ここで、 $S(t)$: 材齢 t における中性化率、 A_c : 仕上げ材のないコンクリートの中性化速度係数、 A_i : 仕上げ材を施したコンクリートの中性化速度係数である。

各種仕上材料の中性化率の促進劣化材齢に伴う変化を図4に示す。劣化を与えない場合に比べて劣化を与えた試験体は中性化の進行が大きく、中性化の抑制効果が低下する傾向が確認され、仕上げ材の経年劣化に伴いコンクリートの中性化速度の増大を把握することができた。ただし、光沢保持率の変化に比して中性化抑制効果は長期にわたり持続する傾向が見られた。全体としては、トップコートを施さない可とう形改修用仕上塗材およびアクリルシリコンの低下傾向が著しい結果となったが、最終的にはある値に漸近するような傾向が見られた。

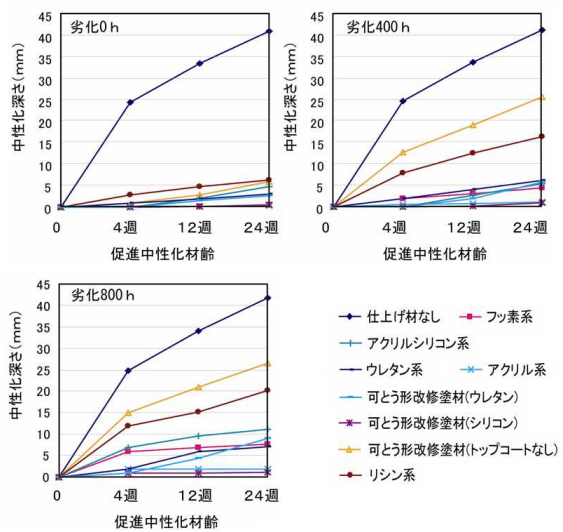


図3 各種仕上の劣化サイクル毎の中性化促進試験結果

表1 中性化抑制効果

$A_c=9.3496$		劣化サイクル		
		0h	400h	800h
A _i	フッ素	0.0904	0.9229	1.8494
	アクリル	0.0728	0.248	0.5206
	シリコン	0.7867	0.8999	2.5505
	ウレタン	0.5914	1.2218	1.5055
	可とう形改修塗材	1.0538	5.4955	5.8193
	アクリルシリコン	1.3786	3.5445	4.3956
	シリコン上塗り	0.0781	0.1416	0.2762
	ウレタンを上塗り	0.4748	0.9026	1.5593

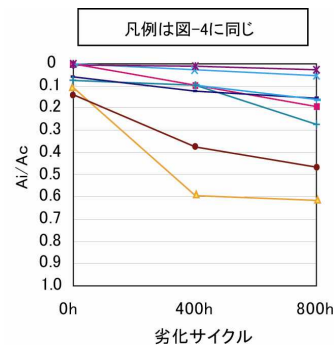


図4 中性化比率と促進期間の関係

免疫的アルゴリズムによるRC建築物の維持保全最適化に関する研究成果

建築物の維持保全計画の決定に際しては、大域的最適解だけが要求される訳ではなく、所有者の意思を考慮した実現可能な優位解も重要になる場合がある。このような問題の解法手段として、独自の調節機構を有し、一つの解に収束することなく多様な複数の準最適解を一度に探索することのできる免疫的アルゴリズム（以下 IA：Immune Algorithm）が注目されている。本研究の目的は、劣化の進行を考慮した耐震安全性の評価手法を提案し、IAを用いて劣化に伴う地震被害リスクを含むライフサイクルコスト（以下 LCC：初期建設費用＋補修・補強費用＋地震被害損失）を最小化する補修・補強計画を導出できるシステムを構築することである。また、ケーススタディーを行って遺伝的アルゴリズム（以下 GA：Genetic Algorithm）と IA による解を比較し、維持保全計画最適化に対する IA の特性と有効性を検証した。

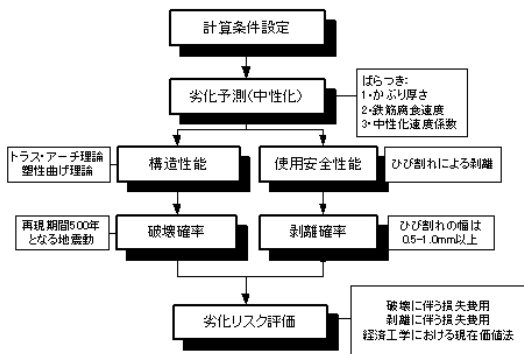


図5 劣化リスクの評価フロー

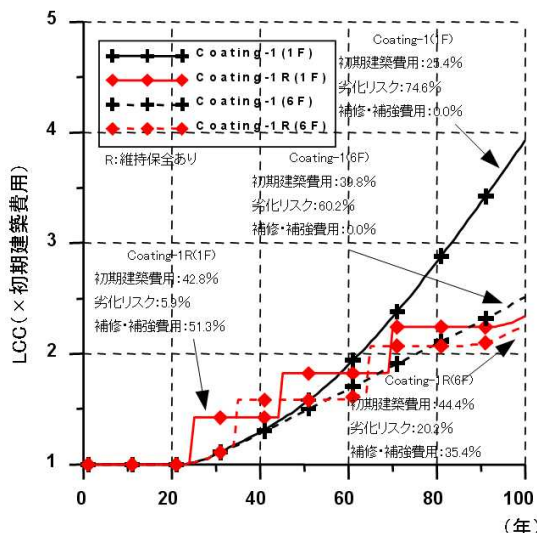


図6 補修・補強費用と劣化リスクを考慮したLCC

図5に示す劣化リスクの評価フローを適用した本システムを利用することにより、予定供給期間を100年としてRC梁の準最適維持保全計画を求めた結果（上位3つ）を図6に

示す。本システムを利用することにより、再現期間500年の地震動を想定した条件下でRC梁部材のLCCを最小化する維持保全計画を導出でき、IAを用いることにより、多様性の高い複数の維持保全計画を示すことができることを確認した。

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7件)

Chien Kuo Chiu、Takafumi Noguchi、Manabu Kanematsu、Optimal Maintenance Plan for RC Members by Minimizing Life-Cycle Cost Including Deterioration Risk Due to Carbonation、Journal of Advanced Concrete Technology、vol.6(3)、pp.469-480、2008、査読有

金螢来、野口貴文、長井宏憲、腐食形態を考慮した腐食鉄筋の力学的性能の評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、NO.624、pp.173-180、2008、査読有
邱建國、兼松学、野口貴文、長井宏憲、免疫的アルゴリズムによるRC建築物の中性化に対する維持保全計画最適化に関する研究、日本建築学会構造系論文集、NO.624、pp.181-188、2008、査読有

柳東佑、高正遠、兼松学、野口貴文、環境条件の変動に伴うコンクリート中の水分分布に関する研究 - ひび割れの有・無がコンクリート中の水分分布に及ぼす影響 -、日本建築学会構造系論文集、NO.612、p.1-7、2007、査読有

朴同天、兼松学、野口貴文、劣化した鉄筋コンクリート造建築物用断面修復材の付着性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、NO.615、p.61-67、2007、査読有

北垣亮馬、兼松学、野口貴文、2次元フーリエ変換による打放しコンクリート視覚情報の定量的評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、NO.597、p.33-38、2005、査読有

朴同天、兼松学、野口貴文、温湿度の繰返し変化によるコンクリート用断面修復材の物質移動抵抗性の変化に関する研究、日本建築学会構造系論文集、NO.592、p.27-34、2005、査読有

〔学会発表〕(計18件)

李佑真、長井宏憲、辻埜真人、兼松学、野口貴文、浸透 - 拡散理論によるRC造建築物用表面仕上材の物質移動抵抗性評価に関する研究、第8回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム、2008年10月31日、京都

李佑眞、兼松学、野口貴文、長井宏憲、
浸透 - 拡散理論による RC 造建築外装塗
材の初期の劣化挙動評価に関する研究、
日本建築仕上学会、2008 年 10 月 16 日、
東京

邱建國、野口貴文、兼松学、長井宏憲、
RC 部材における構造安全性能及び使用
安全性能の限界状態に基づく耐用年数評
価に関する研究、日本建築学会大会、2008
年 9 月 20 日、広島

李佑眞、野口貴文、兼松学、長井宏憲、
RC 造建築物の表面仕上材の視覚性能・
気体移動抵抗性能の劣化評価に関する研
究、日本建築学会大会、2008 年 9 月 18
日、広島

米田信年、野口貴文、朴同天、濱崎仁、
補修モルタルと躯体コンクリート間の付
着特性に関する研究、日本建築学会大会、
2008 年 9 月 18 日、広島

濱崎仁、野口貴文、王徳東、金亨俊、吉
田正志、成瀬友宏、ポリマーセメントモ
ルタルの燃焼特性および熱伝導率に関す
る研究 その 1 発熱性試験の結果、日本
建築学会大会、2008 年 9 月 18 日、広
島

金亨俊、野口貴文、濱崎仁、王徳東、吉
田正志、成瀬友宏、ポリマーセメントモ
ルタルの燃焼特性および熱伝導率に関す
る研究 その 2 不燃性試験の結果、日本
建築学会大会、2008 年 9 月 18 日、広
島

王徳東、野口貴文、濱崎仁、成瀬友宏、
長井宏憲、金亨俊、ポリマーセメントモ
ルタルの燃焼特性および熱伝導率に関す
る研究 その 3 熱伝導率の温度依存性、
日本建築学会大会、2008 年 9 月 18 日、
広島

金亨俊、野口貴文、米田信年、濱崎仁、
有限要素逆解析による補修モルタルと軀
体コンクリートの付着構成則構築、コン
クリート工学年次大会、2008 年 7 月 11
日、福岡

金螢来、野口貴文、長井宏憲、腐食鉄筋
の腐食形状の定量化及び力学的性能の評
価、日本建築学会大会、2007 年 8 月 30
日、福岡

邱建國、野口貴文、兼松学、長井宏憲、
免疫的アルゴリズムによる RC 建築物の
維持保全最適化に関する研究、日本建築
学会大会、2007 年 8 月 30 日、福岡

尹聖眞、朴同天、兼松学、野口貴文、断面修
復材として用いられるポリマーセメントモ
ルタルの線膨張係数測定に関する研究、日本建
築学会大会、2006 年 9 月 9 日、東京

橋向秀治、本橋健司、有機系接着剤を利用し
た外装タイルシステムの開発 はく離剤を利用
した既存仕上塗材除去後の接着性、日本建

築学会大会、2006 年 9 月 9 日、東京
邱建國、野口貴文、兼松学、長井宏憲、塩害
に伴う鉄筋コンクリート造建築物の劣化リス
クの評価システムの構築、日本建築学会大
会、2006 年 9 月 8 日、東京

M. Kanematsu and T. Noguchi、
Development of Multi-criteria Decision
Support System for Maintenance of
Deteriorated Concrete Structures、Proc. of
CANMET/ACI International Symposium on
Sustainable Development of Cement and
Concrete Toronto、pp.437-450、2005 年 10
月 6 日、Canada

柳東佑、高正遠、兼松学、野口貴文、外
部温・湿度がコンクリート内の含水状態
に及ぼす影響に関する実験的研究、日本
建築学会大会、2005 年 9 月 1 日、大阪
長井宏憲、兼松学、野口貴文、建築外壁
材料の性能指向型選定手法に関する研究、
日本建築学会大会、2005 年 9 月 1 日、大
阪

北垣亮馬、兼松学、野口貴文、2 次元フ
ーリエ変換による打放しコンクリートの
視覚情報変化の分析方法に関する研究、
日本建築学会大会、2005 年 9 月 1 日、大
阪

〔図書〕(計 1 件)

野口貴文、兼松学他、コンクリート建物改修
事典、産業調査会、p.893、2005

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野口 貴文 (NOGUCHI TAKAFUMI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号：80208321

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

兼松 学 (KANEMATSU MANABU)
東京理科大学・理工学部・准教授
研究者番号：00362976

本橋 健司
芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号：90344001

鹿毛 忠継
独立行政法人建築研究所・建築生産研究
グループ・上席研究員
研究者番号：30370745

長井 宏憲 (NAGAI HIRONORI)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：60431904