

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560565

研究課題名(和文)物質移動解析を併用した既設コンクリート構造物の性能評価システムの開発

研究課題名(英文)Development of performance evaluation system of existed reinforced concrete structures based on material transportation analyses.

研究代表者

斉藤 成彦(SAITO, Shigehiko)

山梨大学・医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：00324179

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、物質移動解析に基づく鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の腐食発生および腐食速度分布の予測を行った。物質移動解析では、塩化物イオンと二酸化炭素、および水分の移動をモデル化し、コンクリート中では二酸化炭素による炭酸化反応を考慮し、鉄筋位置における塩化物イオン濃度およびPHの経時変化を算出することが可能である。鋼材腐食については、分割鉄筋モデルをベースに、分極曲線を用いたマクロセルおよびマイクロセル腐食をモデル化することで、鉄筋の腐食分布の経時変化を算出することが可能である。構築したモデルにより、塩害および炭酸化による鉄筋の腐食発生と腐食発生後の腐食分布を予測可能であることが確認できた。

研究成果の概要(英文)：This research tried to predict of steel corrosion in reinforced concrete structures based on transportation and corrosion rate analyses. The transportation of water, chloride ions, and carbon dioxides were modeled with a carbonation model by a truss network analysis in rigid-body-spring model, and provides chloride ion density and pH around steel bars. Corrosion process of reinforcement was simulated by micro-cell- and macro-cell-corrosion models with polarization curves. The proposed model well predict the corrosion process of steel bars and distribution of corrosion along the bar in the reinforced concrete specimens.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：RBSM コンクリート構造物 物質移動解析 材料劣化 鉄筋腐食

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物の多くは、想定された寿命を待たずに劣化が進行しており、各事業体および自治体では合理的な維持管理計画の策定が急務となっている。現状では、コンクリート片のはく離などによる第三者被害や、車両通行の快適性などが問題となっており、構造物表面の補修で済む程度の性能低下であるが、最近では、プレストレスの破断などの構造物の安全性が直ちに問題となるような事例も報告されつつあり、既設構造物の健全性評価のニーズの高まりとともに、構造性能を精度良く詳細に把握できる手法の開発が急務となっている。

近年、材料の劣化した構造物に関する研究は活発に行われているが、国内外を問わずその多くは点検・診断技術に関する研究と材料の劣化機構の解明に関する研究であり、肝心の構造物の現有性能の評価に関する研究は進んでいない。これは、材料の劣化に伴う耐荷性能の変化は実験的研究により確認できるものの、実構造物における材料の劣化程度と構造物の力学性能の変化との関係を実験により定量化することが難しいためである。また、材料劣化の生じた既設構造物の性能を評価するためには、点検により構造物の現況を調査し、得られた情報に基づき評価を行うことになるが、供用中の構造物に対する詳細な点検は、物理的にも経済的にも困難であり、ある限られた範囲および精度の情報しか入手することができない。したがって、その情報に基づいて構造物の劣化状態を詳細にモデル化することは難しく、外観の変状からグレーディングを行う半定量的な評価手法を用いて構造性能を推定しているのが現状であり、構造物の安全性の評価を行う場合には、その精度が問題とされている。

2. 研究の目的

現在、材料劣化の生じた既設コンクリート構造物が現有する構造性能の評価では、点検より得た外観変状に基づき性能をグレード分けする半定量的手法を用いているのが現状であるが、構造物の長寿命化が要求される中で、残存する構造性能を定量的に把握する手法の開発が必須となっている。非線形構造解析手法は、有用な性能評価手法として期待されているが、供用中の既設構造物における点検より得られる情報は限定的であり、劣化状況のモデル化が困難な状況である。

本研究は、塩分や二酸化炭素といった劣化因子のコンクリート中の物質移動解析によって点検結果を補間し、構造性能を定量的に把握するための構造解析手法を開発することを目的とする。

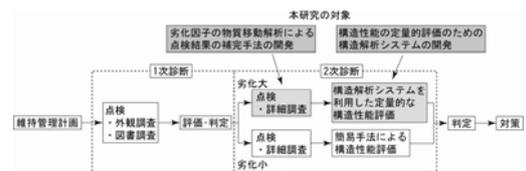


図-1 既設コンクリート構造物の定量的な性能評価の流れ

3. 研究の方法

本研究では、既設構造物の現有構造性能を定量的に把握するための構想解析手法の開発を目的とし、(1)物質移動解析を用いて点検結果を補間することにより既設構造物の劣化変状を推定する手法の開発と、(2)それを入力値として材料劣化の空間的なばらつきを考慮することにより既設構造物の現有性能を精度良く評価する構造解析手法の開発を行う。本研究期間の範囲では、劣化要因を塩害と中性化による鉄筋腐食に限定し、塩分、二酸化炭素、および水の物質移動解析により、コンクリート内部の劣化因子の分布と鉄筋の腐食状況を再現し、評価対象構造物の点検結果と合わせることで、その後の構造解析の入力値となる劣化状況の推定手法を構築する。更に、これを入力値とした劣化の空間分布を考慮した構造解析手法の開発によって、劣化の程度や分布が構造物の性能に及ぼす影響について感度解析を実施することが可能となり、そのフィードバックによって効果的な点検手法や範囲を選定するための基礎的な情報を提供する。

まず、材料劣化の生じたコンクリート構造物の劣化変状を推定するための物質移動解析手法の開発を行う。これまでの研究により、コンクリート中の水分と塩分の移動を拡散現象として扱った物質移動解析プログラムを開発してきており、新たに二酸化炭素の移動に伴う炭酸化反応モデルを導入することにより、塩害と中性化による鉄筋の腐食発生を予測することを試みる。本研究では、研究代表者らが開発してきた離散型の解析手法を用いることにより、ひび割れによる初期欠陥等が腐食の発生状況に及ぼす影響についても検討を行うことが可能であり、物質移動解析を通して材料の劣化過程とばらつきの関係について基礎的な情報を入手する。

既設構造物の性能評価において問題となることの一つは、材料の特性値や鉄筋の腐食程度など、解析に必要なパラメータの全てを点検結果より把握することには、物理的・経済的に制約があることである。そこで、点検結果を物質移動解析により補間することによって、構造解析のために必要な劣化状況の推定について検討を行う。研究代表者は、供用を終えた材料劣化の生じた実構造物の点検結果、およびその載荷試験結果を入手することができるため、実構造物を用いて劣化分布の推定手法の検証を行う予定である。

次に、材料の劣化したコンクリート構造物の性能評価のための構造解析プログラムの開発を行い、これを用いた構造的な定量的な評価方法について検討を行う。これまでの研究により、鉄筋腐食の生じた RC はり部材の曲げ耐荷性状については、概ね評価が可能であることが示されているので、ここでは、鉄筋腐食の非一様性や劣化の空間分布の取り扱い方法について検討を行う。これら劣化程度のばらつきは、構造的な性能に大きく影響を及ぼすと同時に、定量的な評価を難しくしている要因でもある。本研究では、鉄筋の腐食状況を系統的にモデル化した解析を実施することによって、耐荷性能の精度良い予測を可能にする。また、研究代表者は RC 部材の腐食促進試験を実施できる環境にあるため、腐食程度や空間分布をパラメータとした基礎実験を併せて行うことにより、点検より得られる情報のレベルから構造的な性能をどれだけ定量的に評価可能であるかについても検討を行う。これにより、実際の点検において、どの程度の範囲でどれだけの質の情報を得れば、構造解析により評価が可能であるか把握することができ、点検と構造解析を利用した評価方法の連携を強化するとともに、最終的には、既設構造物の定量的な性能評価のためのガイドライン策定に向けた資料を提供する。

4. 研究成果

(1) 炭酸化と塩害を考慮した物質移動解析

炭酸化反応および塩分浸透の解析の流れを図-2に示す。炭酸化反応前の初期平衡状態の計算を行った後、水分移動解析の結果に基づき、二酸化炭素、塩分の拡散係数算出を行う。二酸化炭素、塩分の拡散計算を行った後、炭酸化では化学平衡を解いて pH を算出し、塩分浸透では固定塩分量を計算し pH による固定塩分の解放量を求める。二酸化炭素、塩分の濃度出力が終わったら、拡散計算まで戻る手順を時間ループとして、各自濃く t での計算を繰り返し行い、時刻 t での pH や塩分濃度を求めた。

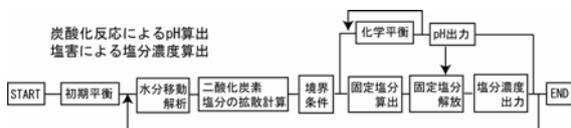


図-2 解析フロー

各拡散係数による炭酸化日数と炭酸化深さの関係を図-3に示す。炭酸化深さは、空隙水の pH がフェノールフタレインの変色域 10.5 以下のコンクリート深さとした。W/C を大きくした場合と相対湿度を小さくした場合に下村式、Papadakis 式のどちらも炭酸化深さがより進行していることが確認できる。これより、どちらの式も W/C の影響が同程度であると考えられる。しかし、相対湿度を変化させた場合、下村式の変化量が小さいのに対し、

Papadakis 式では変化量が多いことがわかる。ここで、図-4に相対湿度と拡散係数の関係を示す。これより、相対湿度を変化させた場合、下村式では相対湿度が高い領域を除いて変化が小さいのに対し、Papadakis 式では大きく変化している。なお、下村式は相対湿度の影響は小さいが、拡散係数自体は大きいいため炭酸化の進行は Papadakis 式を用いた場合より速くなる。

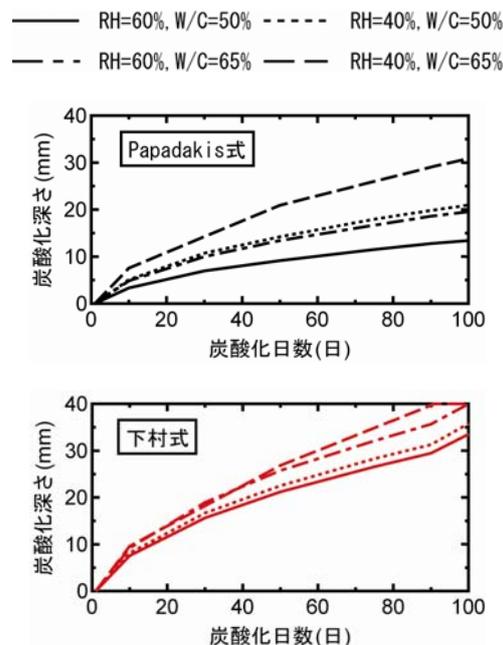


図-3 炭酸化日数-炭酸化深さ

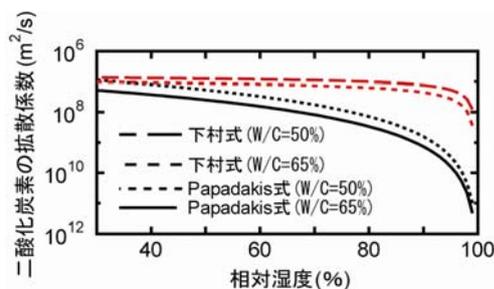


図-4 相対湿度-拡散係数

(2) 分極曲線を用いたコンクリート中の鉄筋腐食分布の予測

本研究でのコンクリート中の鉄筋腐食速度に影響を及ぼす因子の関係を図-5に示す。構築する腐食速度算出モデルは、コンクリート中の鉄筋の腐食に影響与える環境条件とコンクリート情報を入力データとする。腐食速度は、狭い範囲でのカソードとアノードが連結した腐食回路によるマイクロセル腐食速度と、広い範囲でのカソードとアノードが連結した腐食回路によるマクロセル腐食速度を合計することにより算出する。更に、各鉄筋要素での腐食速度から腐食量を算出し、腐食分布の予測を行う。ここでコンクリート中鉄筋の分極曲線は、電位と電流を座標として電極の分極状態を示すものであり、反応物質

の濃度や温度によって変化する。本研究では塩分濃度によって変化する分極曲線の実験データに基づいたモデル化を行い、解析に利用した。また、鉄筋の分極抵抗やコンクリート抵抗などの電気抵抗による電位ロスについても考慮する必要がある。本研究では、水セメント比、コンクリートの水分分布によって変化するコンクリート抵抗を親本ら²⁾の実験データを基に、コンクリート抵抗と分極抵抗の関係を実験データを基に設定した。以上のことから、環境条件、コンクリート情報を入力データとし、物質移動解析により得られる塩分濃度に基づいて、カソード・アノード分極曲線の設定、コンクリート抵抗、分極抵抗の設定を行い、腐食速度を算出するモデルを構築する

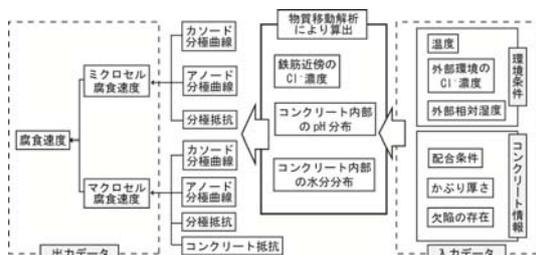


図-5 コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす因子の関係

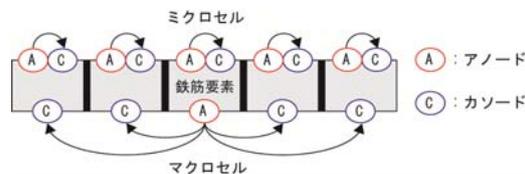


図-6 鉄筋の要素分割と腐食形態

図-7 はひび割れ高さにおける鉄筋位置での塩化物イオン濃度の経時変化を示す。ひび割れのある場合は、塩化物イオンの浸透が早いことが確認できる。図-8, 9 はひび割れ高さにおける鉄筋のマクロセル腐食速度と、マイクロセル腐食速度の経時変化を示す。腐食速度の急激な増加は、塩化物イオン濃度が腐食限界濃度に達した日数で生じており、腐食の開始を示している。腐食速度の最大値は塩化物イオン濃度が高いひび割れありの方が大きい値になることが確認できる。また、各試験体におけるマクロセル腐食の減少の傾向は、乾燥による分極抵抗の増加に起因すると考えられる。ここで、マイクロセル腐食速度は単一の鉄筋要素内で形成される腐食回路による腐食速度である。マクロセル腐食速度は他要素と跨って形成される腐食回路による腐食速度であり、他要素との分極曲線と比べる際に、電位差が生じた場合のみに腐食が進行する。したがって、ひび割れの無い部分はマクロセル腐食速度の減少後はマイクロセル腐食速度が支配的であり、ひび割れのある場合には腐

食発生時からマクロセル腐食速度が支配的であることが確認できる。

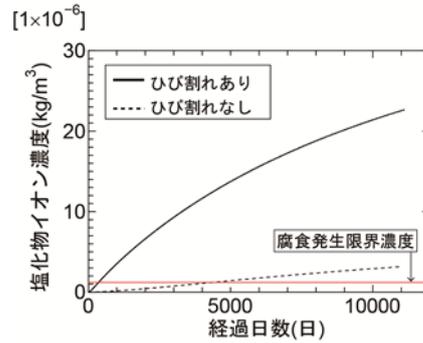


図-7 経過日数-塩化物イオン濃度

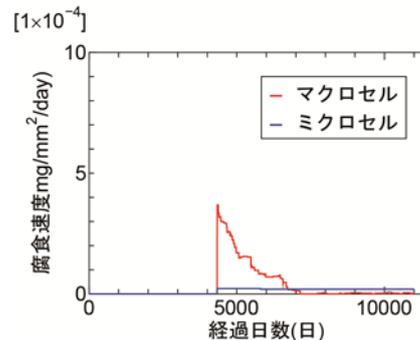


図-8 経過日数-腐食速度 (ひび割れなし)

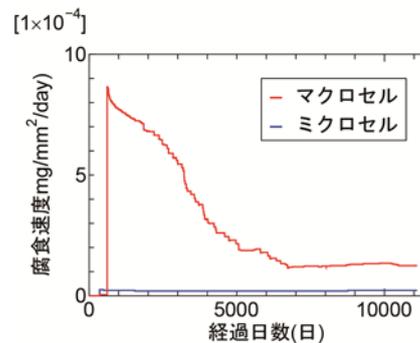


図-9 経過日数-腐食速度 (ひび割れあり)

(3)PC鋼材の腐食分布がPC梁の曲げ耐荷性状に及ぼす影響

電食により鋼材を腐食させた PC はりの載荷実験を行い、PC 鋼材の腐食による断面減少やシースの腐食によるシーソとコンクリート間の付着劣化、組立筋の腐食の影響によって、はりの耐力および剛性に影響を及ぼすことから、本研究では、素線ごとの腐食分布に着目し、鋼材の腐食性状が PC はりの曲げ耐荷性状に及ぼす影響について検討を行った。

本研究に用いた試験体の概要を図-10 に示す。試験体は、上部から 140mm の位置に鋼製シーソを配置し、その中に PC 鋼より線 (SWPR7BL, φ15. 2mm) を 1 本配置したポストテンション方式 PC はりである。また、スターラップを配置するために試験体軸方向の

上部(圧縮側)に鉄筋(D6), 下部(引張側)に木材($\phi 10$)を計4本配置し, 鉄筋(D6)においては試験体端部の定着具とともにエポキシ樹脂により絶縁した. スターラップ(D6)は, 150mm 間隔で配置し, 同様にエポキシ樹脂塗料を施した.

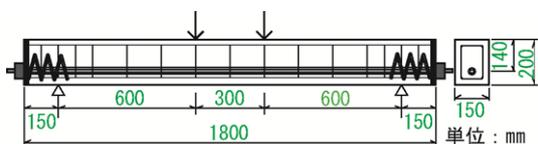


図-10 試験体概要

PC 鋼材の重量減少率分布を図-11 および図-12 に示す. ここで, 鋼材の腐食量は, 100mm に切断した鋼材の重量減少から求めた. 鋼材全体を腐食させた試験体 B2 では鋼材が平均的に腐食しており, 局所的に腐食させた試験体(C シリーズ, D シリーズ)では鋼材の腐食が偏っていることが確認できる. 鋼材全体を腐食させた試験体 B2 では, シースはほぼ消失しており, PC 鋼材もある程度の腐食が確認できた. 一方, 鋼材を局所的に腐食させた試験体では, 腐食区間付近のみでシースが消失するほどの激しい腐食が生じ, PC 鋼材の腐食も確認された.

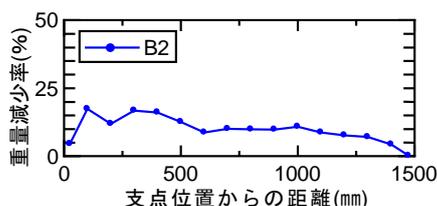


図-11 PC 鋼材重量減少率分布(全体腐食)

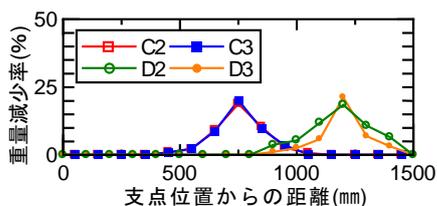


図-12 PC 鋼材重量減少率分布(局所腐食)

静的荷重試験より得られた荷重-変位関係を図-11 および図-12 に示す. 健全な試験体 S1 ではコンクリート上部の圧壊による曲げ破壊を示したのに対し, 鋼材全体を腐食させた試験体 B2 では, 鋼材の破断音とともに荷重の低下が生じ, 鋼材破断は PC 鋼材の重量減少率が最大となる付近に集中していた. スパン中央を腐食させた試験体 C2 および試験体 C3 では, それぞれ破壊形式が異なり, 試験体 C2 ではコンクリート上部の圧壊と同時に鋼材の破断が生じて, 荷重低下が生じたが, 試験体 C3 では, コンクリートの圧壊前に鋼材の破断とともに荷重低下に至った. また, せん断スパン中央を腐食させた試験体 D2 および試験体 D3 でも, それぞれ破壊形式が異

なり, 試験体 D2 では, コンクリート上部の圧壊と同時に鋼材の破断が生じて荷重低下に至ったが, 試験体 D3 では, コンクリートの圧壊前に鋼材の破断とともに荷重が低下した.

図-13 より鋼材全体を腐食させた試験体 B2 では, 鋼材の腐食により耐力および剛性の低下が確認でき, 曲げひび割れ発生荷重も小さいことが分かる. 試験体 B2 では, PC 鋼材の平均重量減少率が 10% 程度で, 最大でも 17% 程度であるのにもかかわらず, 約 5 割もの耐力低下が確認できた. 図-14 よりスパン中央を腐食させた試験体 C2 および試験体 C3 では, 鋼材の腐食により耐力および剛性, 曲げひび割れ発生荷重の低下が確認でき, 鋼材の重量減少率が同程度であるにもかかわらず, 試験体 C2 では, 剛性および曲げひび割れ発生荷重の低下が比較的小さく, 耐力の低下も約 2 割に止まったのに対し, 試験体 C3 では, 試験体 C2 に比べ剛性および曲げひび割れ発生荷重の低下が著しく, 約 5 割もの耐力低下を示した. また, せん断スパン中央を腐食させた試験体 D2 では, 健全と大きな差がなかったのに対し, 試験体 D3 では, 鋼材の腐食により耐力および剛性, 曲げひび割れ発生荷重の低下が確認でき, 二体の試験体は鋼材の重量減少率が同程度であるにもかかわらず, 試験体 D3 では約 5 割もの耐力低下を示した.

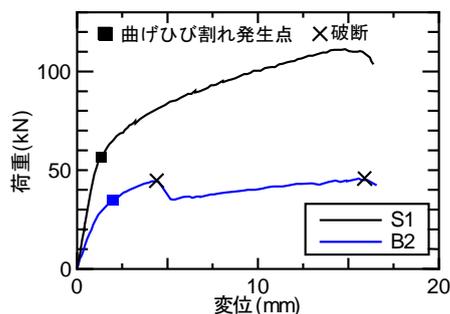


図-13 荷重-変位関係(全体腐食)

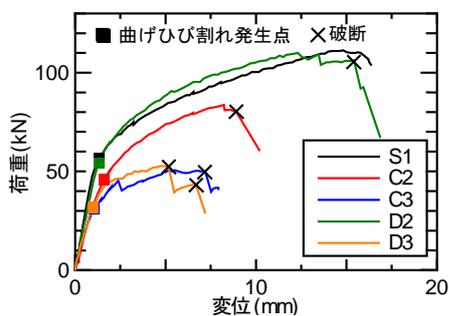


図-14 荷重-変位関係(全体腐食)

(4)まとめ

本研究では, 物質移動解析に基づく鉄筋コンクリート構造物中の鉄筋の腐食発生および腐食速度分布の予測を行った. 構築したモデルにより塩害および炭酸化による鉄筋の腐食発生と腐食発生後の腐食分布を予測可

能であることが確認できた。今後、実験データ等の蓄積により、提案モデルの精度向上が必要である。

一方、PC 鋼材の腐食が PC 梁の曲げ耐荷性状に及ぼす影響に関する研究では、PC 鋼材の局所的な腐食分布が、部材の耐荷性状に大きく影響を及ぼすことが確認された。物質移動解析に基づく鋼材の腐食分布の予測を可能にすることで、鋼材の局所的な腐食量を予測し、部材の耐荷性状の経時変化の予測が可能になるものと期待される。

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 3 件)

1. 深澤優一, 斉藤成彦, 高橋良輔: 斜めひび割れを生じた RC 梁の修復効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, pp. 1369-1374, 2013 (査読有)
2. 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広: PC 鋼より線の局所的な腐食が PC はりの耐荷性状に及ぼす影響, 第 21 回プレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 297-302, 2012 (査読有)
3. 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広: 鋼材腐食の生じた PC はりの曲げ耐荷性状に関する研究, 第 20 回プレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp. 271-276, 2011 (査読有)

[学会発表] (計 1 件)

1. 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広, 緒方紀夫: 鋼材腐食の生じた PC はりの曲げ耐荷性状に関する実験的研究, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 愛媛大学, 2011

[その他]

ホームページ等

最近の研究内容:

<http://sangaku.yamanashi.ac.jp/SearchResearcher/contents/CF0493C40C039CFF.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

斉藤 成彦 (SAITO, Shigehiko)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号: 00324179