

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 4 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560459

研究課題名（和文） 実構造物の電気化学的物性値と三次元数値解析の連携による
電気防食の設計体系の構築

研究課題名（英文） Development of the design system of cathodic protection by
combination between 3D numerical analysis and electrochemical
properties obtained from existing concrete structures

研究代表者

皆川 浩 (MINAGAWA HIROSHI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10431537

研究成果の概要（和文）：コンクリート構造物の電気防食工法において、設計段階で防食効果を FEM などの数値解析にて予測・評価する場合、コンクリートの電気抵抗率や鉄筋の分極特性を適切に把握し、それを入力値とする必要がある。本研究では、これらの電気化学的物性値を実構造物において非破壊あるいは微破壊で取得する方法について検討し、それらを用いて取得した入力パラメータに基づく 3 次元 FEM によるシミュレート結果と実構造物を模擬した実寸大供試体による検証実験の結果とを比較し、手法の妥当性を検証した。

研究成果の概要（英文）：It is necessary to evaluate the polarization characteristic of steel bars and the electric resistivity of concrete exactly, in case of estimating an effect of cathodic protection in a design phase by using numerical analysis, such as FEM. Since the accuracy of numerical analysis must depend on the input values. This study developed the measuring methods for these electrochemical properties by non-destructive or small scale destructive procedures. In addition to this, the effects of cathodic protection were estimated by 3D-FEM based on the input values obtained from the measuring methods. As a result of comparing the estimation by 3D-FEM with experimental data of the full-scale specimens which imitated an existing concrete structure, the validity of the measuring method was verified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
2012 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：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：維持管理工学，国土保全，コンクリート，電気防食，電気抵抗率，分極抵抗，
補修，防食設計

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では、供用期間 50 年以上のコンクリート構造物が急激に増加するに至り、社会基盤の適切な維持管理が重要課題になっている。このような中で、電気化学的防食工法のひとつである電気防食工法は、コンクリート構造物の劣化機構のうち最もよく

見受けられる塩害に対して有効なコンクリート中鋼材の防食技術である。同工法では、外部電極から防食電流をコンクリート内部の鋼材に供給することで鋼材の電位を制御し、鋼材の腐食進行を抑制する技術である。同工法は欧米を中心として技術開発、普及がなされ、日本国内においても施工実績が増加

しているが、その設計方法は過去の経験や研究の積み重ねにより得られた定性的な知見をもとに行われているのが現状である。

防食効果を設計段階で定量化する方法としては、有限要素法による数値シミュレーション（以下、FEM 解析）があるが、計算に際し入力データとなるコンクリートの電気抵抗率や鋼材のカソード分極抵抗は解析結果に大きな影響を及ぼす。したがって、コンクリートの電気抵抗率や鋼材の分極抵抗について、多様な環境下においても適切に評価できる方法の確立や、これらの信頼性の高いデータベースの構築が求められているが、現状に置いて下記の課題が残されている。

(1) コンクリートの電気抵抗率

種々の非破壊試験に関する提案がなされているが、以下の点が不明確であり、十分な信頼性を得るには至っていない。

- ・材料の不均一性（コンクリート中の骨材、断面修復材および鋼材の有無）の影響
- ・測定対象部材の断面形状の影響
- ・測定方法（電極間隔、電極形状）の影響
- ・測定対象面の前処理方法の影響

(2) コンクリート中鋼材のカソード分極抵抗に関する課題

鋼材のカソード分極抵抗については測定例があまり多くはなく、データベース化するにはデータ量が不足している。また、測定原理としては、コンクリート表面に設置した外部電極から鋼材に直流電流を供給し、鋼材電位の変化をモニタリングする方法が考えられるが、以下の点が不明確であり、十分な信頼性を得るには至っていない。

- ・材料の不均一性（コンクリート中の骨材、断面修復材の有無）の影響
- ・測定対象鋼材の断面形状の影響
- ・測定方法（電極形状）の影響
- ・測定対象面の前処理方法の影響
- ・鋼材腐食の有無もしくは程度の影響
- ・鋼材の配置の影響

2. 研究の目的

電気防食工法の防食効果の定量化には、実構造物のコンクリートの電気抵抗率および鋼材のカソード分極抵抗を適切に測定できる試験方法の確立、および FEM 解析手法と測定データとの連携が必須である。そこで本研究では、以下の項目を研究目的とした。

- (1) 実構造物におけるコンクリートの電気抵抗率を測定する非破壊試験方法として4プローブ法に着目し、電極形状を矩形型にすることで、前掲の諸課題を解決する信頼性のある方法を確立する。
- (2) 実構造物におけるコンクリート中鋼材のカソード分極抵抗を測定する微破壊試験方法を構築する。構築に際しては、3次元 FEM によるパラメータ解析手法

を組み合わせる方法を用いる。

- (3) (1)および(2)で検討したコンクリートや鋼材の電気化学的物性値を直接定量化する非破壊試験・微破壊試験方法に、コンクリート中の防食電流を計算できる有限要素法による数値解析手法を組み合わせることで、防食効果の定量化手法を構築し、その妥当性を評価する。

3. 研究の方法

本研究では、前述の目的を達成するために、非破壊試験によるコンクリートの電気抵抗率の測定方法の開発、鉄筋のカソード分極抵抗の微破壊試験による測定方法の開発、さらに、これらの測定値を実装した三次元数値解析による防食効果評価手法を構築する。以下に、開発のコンセプトおよび研究の方法について述べる。

(1) 電気抵抗率の測定方法の開発

4プローブ法は非破壊で迅速に実構造物のコンクリートの電気抵抗率を測定する方法として有用である。しかし、材料の不均一性、測定の方法や手順、測定対象部材の寸法などが測定結果に影響を及ぼすことが指摘されている。本研究は、電流電極の先端の形状が測定結果に及ぼす影響について、実験および数値解析にて評価した。

①実験概要

a) 供試体の概要

供試体は W/C=50 % , S/C=2.1 のモルタルにて作製した。結合材は普通ポルトランドセメント、供試体寸法は 400×400×250 mm の角柱 2 体である。供試体の含水状態を深さ方向に変化させるため角柱の 1 面のみを開放し、20 ± 3 °C の水中で養生（以下条件 A）、28 日間の封緘養生後に室内にて気中曝露を 250 日間（以下条件 B）とした。

b) 検討の要因と水準

検討の要因と水準は以下の通りである。

- ・電流電極の先端形状：円形、矩形
- ・円形の電流電極の直径：φ 4 mm
- ・矩形の電流電極の寸法：
X=30, 60, 90 mm, Y=10 mm
- ・電極間隔：20, 30, 40, 50, 60 mm

c) 4プローブ法による電気抵抗率の測定

図-1 に、4プローブ法の測定方法を示す。

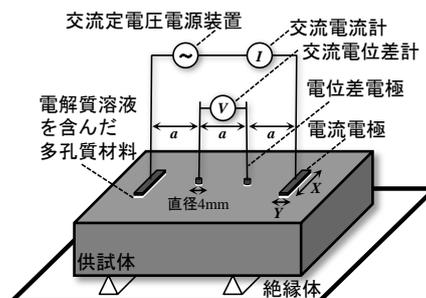


図-1 4プローブ法の測定概念図

電圧 30 V、周波数 73.3 Hz の交流電流を印可し、供試体に流れる電流： I_p [A]と電位差電極間の電位差： V_p [V]を測定し、換算係数： k を用いて式(1)のように電気抵抗率： ρ_a [Ω m]を評価した。

$$\rho_a = k \cdot \frac{V_p}{I_p} \quad (1)$$

ここで、電極間隔が等間隔に配置され、電極先端の寸法が無限に小さいと仮定でき、かつ計測の場合が一様な半無限体の場合の換算係数： k_0 は、電極間隔 a を用いて式(2)のように表せる。本研究では、円形の電流電極にて電気抵抗率を計測した時の換算係数は式(2)を用いた。

$$k_0 = 2\pi \cdot a \quad (2)$$

一方、矩形の電流電極の場合の換算係数： k_f は、②に示す方法で算出した。

電流印可時間は 70 秒間とし、1 秒ごとに電流と電圧を計測した。電流印可開始から 60 秒経過した後の 10 秒間で計測した電流・電圧から 1 秒ごとの電気抵抗率を算出し、それらの平均値を 1 回の測定で電気抵抗率の測定値とした。そして、この測定を電極設置位置をずらして 10 回実施し、得られた測定値の平均値を電気抵抗率： ρ_{a-60} とした。また、電流印可開始直後の測定値の変動を評価するために、電流印可直後から 10 秒間の測定で得られた電気抵抗率： ρ_{a-0} も算出した。電極の先端には NaCl とカルボキシメチルセルロースの混合水溶液を含浸させた導電性スポンジを設置した。

②数値解析による換算係数の算出

数値解析は Laplace 方程式を構成則とする 3 次元 FEM である。モデル供試体は、電極間隔や電極寸法の影響を受けないように 800×800×800 mm の寸法とした。モデル供試体に導電率： $1/\rho_f$ を与え、流入する電流： I_f および電極間電位差： V_f を評価し、矩形の電流電極の換算係数： k_f を式(3)にて算出した。

$$k_f = \rho_f \frac{I_f}{V_f} \quad (3)$$

(2) 鉄筋のカソード分極抵抗測定方法の開発とデータベースの構築

鉄筋のカソード分極抵抗の測定方法に関するコンセプトを図-2 に示す。図-2 に示すように電極、測定対象鉄筋、直流電源装置、電流計を接続することで分極試験を行い、①～③の測定点における任意の分極量 $\Delta E_1 \sim \Delta E_3$ [mV]を測定し、それらの分極量が得られた時の電流量 I [A]、電圧 V [mV]を測定する。また、対極のアノード分極抵抗 R_a [Ω m²]、コンクリートの比抵抗 [Ω m]は分極試験や前述の 4 プローブ法を用いた事前測定により既知の値とする。

次に、実験値である電流量 I 、電圧 V を参考にして、仮の鉄筋のカソード分極抵抗 R_{cn} [Ω m²]を数値解析の境界条件へ代入し、パラメータ解析を行う。解析モデル上における①～③の測定点に流れる電流量を解析、その際の鉄筋分極量を算出し、実験結果の分極量 $\Delta E_1 \sim \Delta E_3$ と比較することで、最も確からしい鉄筋の真のカソード分極抵抗 R_c を推定する。

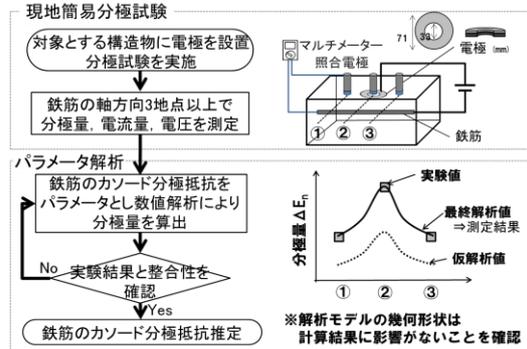


図-2 鉄筋のカソード分極抵抗の測定方法に関する概念図

(3) 新規開発手法による測定値を実装した三次元数値解析による防食性能評価結果の妥当性の検証

①検証の手順

(1)および(2)で示したコンクリートの電気抵抗率および鉄筋のカソード分極抵抗を入力パラメータとして数値解析に実装し、供試体中に流れる電流分布の実験結果と解析結果を比較する。図-3 に使用した供試体を、図-4 に数値解析のモデルを示す。供試体は港湾の RC 栈橋と同寸法・同形状のものを作製した。また、本研究の数値解析手法の概要は次の通りである。

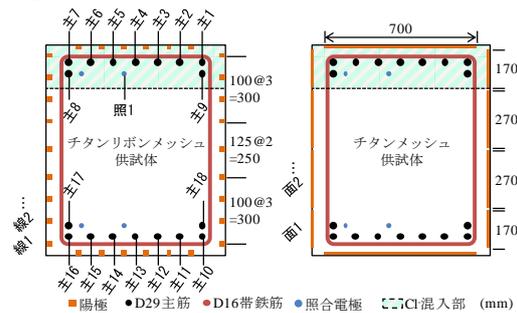


図-3 検証用供試体の断面図

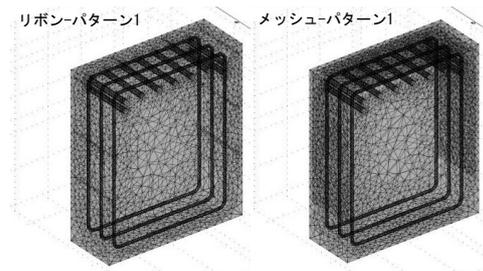


図-4 検証に用いた数値解析のモデル

②数値解析の概要

使用した有限要素プログラムの支配方程式はラプラス方程式であり、コンクリート内部の電位分布は以下の式に従う。

$$\nabla(\sigma\nabla\phi)=0 \quad (4)$$

ここで、 σ : コンクリートの電気伝導率 [$\Omega^{-1}m^{-1}$], ϕ : 電位 [V]。

また、境界条件を式(5)~式(7)に示す。コンクリート表面では電流は流れず、絶縁壁として作用する。また、コンクリート中の鉄筋表面および陽極表面では、分極現象のため、電流の大きさに依存して電位が変化する。

$$n \cdot (\sigma\nabla\phi) = 0 \quad (5)$$

$$E_c = E_{0c} - E_{cb} - i \cdot R_{cn} \quad (6)$$

$$E_a = E_{0a} - E_{ab} - i \cdot R_{an} \quad (7)$$

ここで、 n : 法線ベクトル, E_c : 鉄筋の電極電位 [V], E_{0c} : 鉄筋の自然電位 [V], E_{cb} : 鉄筋のバイアス電位 [V], R_{cn} : 鉄筋の分極抵抗 [Ωm^2], E_a : 鉄筋の電極電位 [V], E_{0a} : 鉄筋の自然電位 [V], E_{ab} : 鉄筋のバイアス電位 [V], R_{an} : 鉄筋の分極抵抗 [Ωm^2]。

4. 研究成果

(1) 電気抵抗率の測定方法

図-5 に、数値解析により求めた各先端形状および電極間隔における換算係数比 (k_r/k_0) を示す。図-5 より、矩形の電流電極の寸法が大きくなるほど、換算係数の値が大きくなる。これは、電極寸法が大きくなると供試体表面に生じる電位分布が変化するためと考えられる。従って、寸法が比較的大きい矩形電極を用いて電気抵抗率の測定を行う場合、電極形状および寸法に応じた換算係数を用いる必要があると言える。

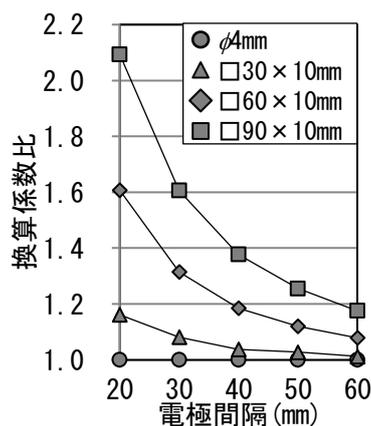


図-5 電極間隔と換算係数比

図-6 に、同じ電極間隔にて円形あるいは矩形の電流電極で測定した電気抵抗率の比較結果を示す。矩形の電流電極の換算係数は図-5 に示すものを使用した。図-6 より、含水率の変化に関わらず、円形および矩形の電流

電極により測定した電気抵抗率はほぼ 1 : 1 の関係となっている。このことから、本研究の範囲では、電極形状に応じた換算係数を用いることで、電極形状の影響を受けずに電気抵抗率の測定が可能になると考えられる。

なお、別途実施した試験によれば、本研究で開発した電極を用いると、測定結果のばらつきが低下した。このことから、手法の信頼性・精度向上を確認することができた。

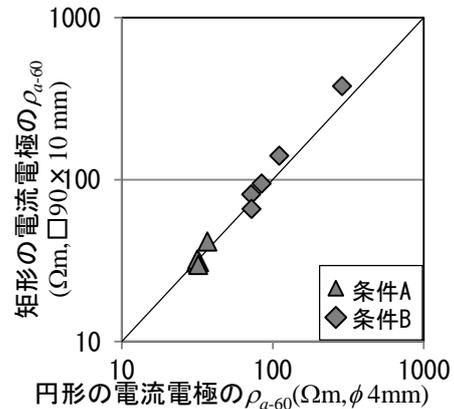


図-6 円状電極と矩形電極の ρ_{a-60}

(2) 鉄筋のカソード分極抵抗測定方法

図-7 に分極抵抗測定機器を用いたカソード分極抵抗の測定値とメッシュ陽極により得られた真値との比較を示す。図中の白抜きのプロットは本測定手法による値を示し、塗潰しのプロットが鉄筋腐食を評価する際に用いられる交流インピーダンス法による測定値を示している。鉄筋径 D13, D25 では精度良く分極抵抗を測定できた。また、かぶり厚さによらず比較的精度良く分極抵抗を測定可能であることが明らかとなった。以上より、本研究で検討した供試体スケールにおいて、分極抵抗測定機器の開発、分極抵抗測定手法の整合性が確認された。

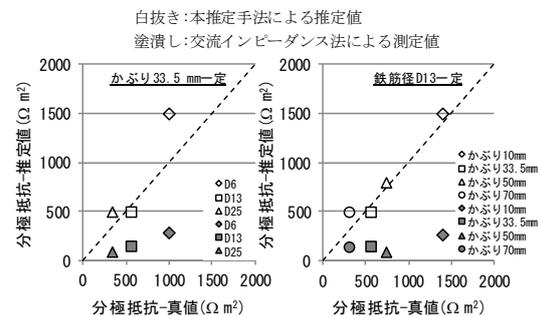


図-7 分極抵抗の測定値と真値の比較

(3) 新規開発手法による測定値を実装した三次元数値解析による防食性能評価結果の妥当性の検証

数値解析の境界条件である鉄筋のカソード分極抵抗を、分極抵抗測定手法により与え

た場合と、データベースにより与えた場合とを鉄筋中に流入する電流密度の比により比較した。ここで、電流密度の比とは、式(8)により電流密度を無次元化した値で、電流の総量に関わらず、鉄筋に流入する電流の分布を定量的に評価することが可能になる。

$$i_c = \frac{i_n/I}{A_n/A_s} \quad (8)$$

ここに、 i_c : 電流密度比、 i_n : 各鉄筋 (各陽極) に流入 (流出) する電流量 [A]、 I : 供試体に流す総電流量 [A]、 A_n : 各鉄筋 (各陽極) の表面積 [m²]、 A_s : 各鉄筋 (各陽極) の表面積の総和 [m²]。

図-8 より本手法から測定した分極抵抗を用いた方が、実験値に近い予測ができることが示された。以上より、腐食状況が一樣でない干満帯などの環境下では、構造物独自の分極抵抗を測定できる本手法が有用であると考えられる。

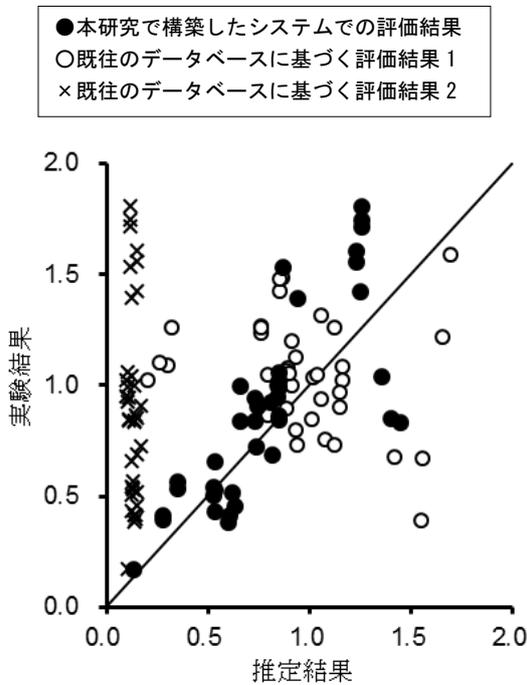


図-8 電流密度比の比較結果

(4) 電気防食工法設計フロー図の提案

本研究の成果はコンクリート構造物の電気防食工法の設計を支援するためのツールである。このツールを活用した設計フローを図-9に示す。本研究で開発した支援ツールと図-9のフローを用いることで、定量的な電気防食工法の効果の予測ならびにそれに基づく防食設計が可能になると考えられる。

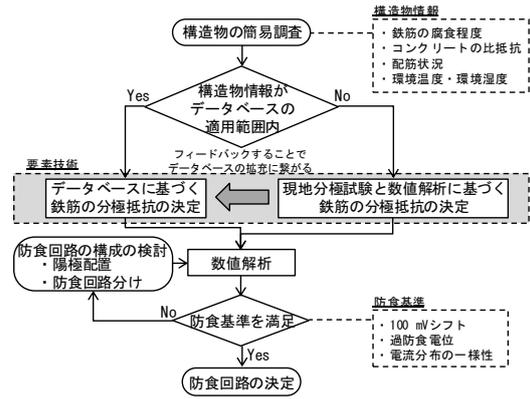


図-9 電気防食工法設計フロー図 (提案)

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)

1. 皆川浩, 矢野貴行, 久田真, 乾燥により生じた含水率分布が4プローブ法により計測されるコンクリートの電気抵抗率に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.35, 2013年, 印刷中
2. 鹿島篤志, 佐藤唯, 山本誠, 皆川浩, 久田真, FEM解析による電気防食工法の電流と分極量分布の再現性に関する実寸大供試体を用いた検討, 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, 査読有, Vol.12, pp.273-280, 2012年
3. 佐藤唯, 鹿島篤志, 皆川浩, 久田真, 電気防食工法における電流分布性状と分極性状の評価, 査読有, Vol.34, No.1, pp.1036-1041, 2012年
4. 蓮見亮, 皆川浩, 久田真, 佐藤道生, 点検情報の利用方法が塩害劣化の予測精度及びLCC算出結果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.33, Vol.2, pp.1513-1518, 2011年
5. 齊藤佑貴, 皆川浩, 久田真, 植村翔太, 海洋干満帯に暴露したコンクリート大型試験体の電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数の関係, 査読有, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.875-880, 2011年
6. Hiroshi Minagawa and Makoto Hisada, Influence of Patch Repair Material on Electrochemical Desalination of Concrete, 査読有, Vol.8, pp.281-290, 2010.
7. 佐藤唯, 皆川浩, 久田真, 鹿島篤志, 温度が鉄筋のカソード分極特性に及ぼす影響の評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.32, No.1, pp.1067-1072, 2010年

〔学会発表〕(計3件)

1. 矢野貴行, 皆川浩, 久田真, 電流電極の先端の形状が4プローブ法による電気抵抗率の測定値に及ぼす影響, 土木学会年次学術講演会, 2013年9月4日, 千葉
2. 高島あゆみ, 皆川浩, 久田真, 鹿島篤志, 山本誠, 若杉三紀夫, 環境の季節変動が電気防食工法の電流分布性状と分極性状に及ぼす影響, 土木学会東北支部技術研究発表会, 2013年3月9日, 仙台
3. 佐藤唯, 皆川浩, 久田真, 鹿島篤志, 山本誠, 若杉三紀夫, 鉄筋コンクリートの電気防食における鉄筋のカソード分極特性の温度依存性に関する検討, 土木学会年次学術講演会, 2010年8月5日, 札幌

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 分極抵抗測定方法
発明者: 皆川浩, 久田真, 鹿島篤, 山本誠
権利者: 東北大学, 住友大阪セメント(株)
種類: 特許
番号: P24641
出願年月日: 平成24年2月29日
国内外の別: 国内

名称: コンクリートの電気抵抗率の測定方法及びその装置
発明者: 久田真, 皆川浩, 井上浩男, 長谷川剛
権利者: 東北大学, 三井造船(株)
種類: 特許
番号: 特願2012-094805
出願年月日: 平成24年4月18日
国内外の別: 国内

○取得状況(計1件)

名称: コンクリートの電気抵抗率の測定方法及びその装置
発明者: 久田真, 皆川浩, 井上浩男, 長谷川剛
権利者: 東北大学, 三井造船(株)
種類: 特許
番号: 第5156867号
取得年月日: 2012年12月14日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

皆川 浩 (MINAGAWA HIROSHI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10431537

(2)研究分担者

久田 真 (HISADA MAKOTO)
東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 80238295

(3)連携研究者

なし