

◆ 報 文 ◆

# コンクリート構造物補修用セメント系断面修復材の電気抵抗率測定方法

守屋 進\* 川俣孝治\*\* 内藤英晴\*\*\* 皆川 浩\*\*\*\*

## 1. はじめに

コンクリート構造物の早期劣化の一つである塩害の補修方法として、電気防食工法は厳しい塩害環境でも有効な対策工法として着目されている。この電気防食工法は、コンクリート構造物に陽極を設置し、コンクリート内部の鉄筋PC鋼材などの鋼材を陰極として、直流電流（防食電流）を供給することで鋼材の腐食反応を電気化学の理論に基づいて抑制する方法である。電気防食による鋼材の腐食抑制は、鋼材が電流供給により適正量でマイナス側に電位が移行（分極）することにより達成される。この防食電流による鋼材の分極は、鋼材自身の腐食に対する抵抗性（分極抵抗）に影響し、分極抵抗が大きいほど所要の分極量を得るに必要な防食電流は小さくなる。ただし、これは陽極と鋼材との間に存在するコンクリートの電気的な抵抗が均一であると仮定した場合である。コンクリートの抵抗に局所的な大小が存在すると、これに反比例した電流が鋼材に供給されるため、分極量に過不足が生じる結果となる。土木学会「電気化学的防食工法設計施工指針（案）」<sup>1)</sup>では、電気防食の効果に影響を及ぼす可能性のあるものとして、1) 浮き・はく落、2) ひび割れ、3) 補修履歴としている。1) および2) は構造物の劣化変状に伴い電気抵抗が変化する可能性のあるものであり、3) は補修材料自身の電気抵抗に起因するものである。なお、1) および2) については、適切な補修が行われるので、補修後には3)と同様な扱いとなる。したがって、電気防食の最適設計においては、断面修復材などの補修材の電気抵抗を正確に把握することが防食電流の均一性確保の点から重要となるが、まだ定まった測定方法がない。

本研究では、簡易な電気抵抗率測定方法の提案を目的として、四電極法と二電極法を取り上げ比

較検討した<sup>2),3),4)</sup>。次に、四電極法に着目し、周波数や電流、電圧など通電条件、電極の種類や間隔などの電極条件、供試体の寸法、養生条件などが四電極法の試験結果に及ぼす影響について検討した。

## 2. 電気抵抗率測定方法に関する検討

### 2.1 実験概要

#### 2.1.1 供試体の作製

検討に用いた供試体は、40×40×160mmのモルタルバーである。JIS R 5201のセメント強さ試験に準じて、普通ポルトランドセメントおよびセメント協会標準砂を用いて、W/C = 50%、S/C = 3の配合で作製した。供試体は、養生室（温度20℃、湿度60% R.H.）にて、それぞれ、気中養生、水中養生、封かん養生を行った。

#### 2.1.2 電気抵抗率測定方法

##### a) 四電極法

四電極法の測定概念図を図-1に示す。供試体の両端の通電電極に交流の定電圧を印加して、中央の測定端子間の電位差を測定し、次式により電気抵抗率を算出した。なお、本研究では、単位体積当りの電気抵抗を電気抵抗率と定義し、以下の検討を実施した。

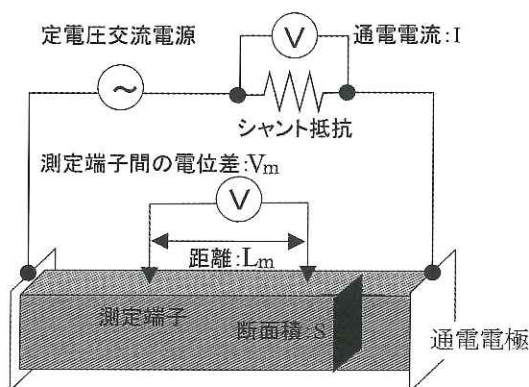


図-1 四電極法の測定概念図

$$\rho = \frac{V_m}{I} \times \frac{S}{L_m} \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ ：電気抵抗率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )  
 $V_m$ ：測定端子間の電位差 (mV)  
 $I$ ：通電電流 (mA)  
 $S$ ：電流の流れる断面積 ( $\text{cm}^2$ )  
 $L_m$ ：測定端子間の距離 (cm)

b) 二電極法

二電極法の測定概念図を図-2に示す。供試体の両端の電極に交流の定電圧を印加して、両通電電極間の電位差を測定し、(2)式により電気抵抗率を算出した。

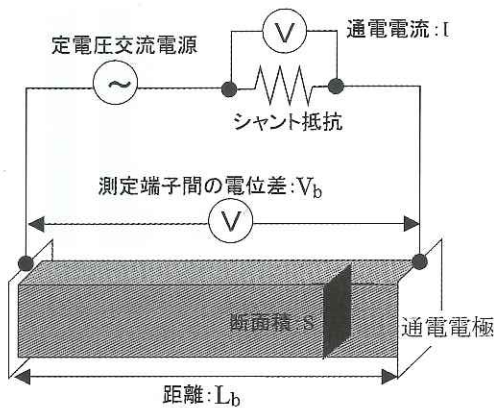


図-2 二電極法の測定概念図

$$\rho = \frac{V_b}{I} \times \frac{S}{L_b} \quad (2)$$

ここに、 $\rho$ ：電気抵抗率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )  
 $V_b$ ：測定端子間の電位差 (mV)  
 $I$ ：通電電流 (mA)  
 $S$ ：電流の流れる断面積 ( $\text{cm}^2$ )  
 $L_b$ ：測定端子間の距離 (cm)

c) 電極および通電条件

ステンレス (SUS304) を通電電極 (厚さ、 $t = 2\text{mm}$ ) および測定端子 ( $\Phi 1.5\text{mm}$ ) とし、電極の接着剤としてカルボキシメチルセルロースを塩水 (濃度3%) で練ったゲル (以下、CMC) で供試体に接触させた。印加電圧は5V、周波数は生活ノイズに影響しない73.3Hz、シャント抵抗は1k $\Omega$ とし、四電極法での測定端子間の距離は4cmとした。

2.2 実験結果および考察

図-3は、気中養生28日で測定した抵抗率の結果である。四電極法は電極を接触させた直後からほぼ安定した測定値が得られたのに対し、二電極

法では電極接触直後、四電極法に比べかなり大きな値を示し、約10分程度で四電極法と同程度の値に収束する傾向を示した。ただし、封かん養生や水中養生では二電極法の時間依存性は認められなかった。

四電極法は通電電極間の中央で測定端子を用いて電位差を測定するため、通電電極の接触抵抗が測定値に及ぼす影響は小さい。一方、二電極法では通電電極間の電位差から電気抵抗率を求める。気中養生では乾燥により、通電電極の接触抵抗が大きく影響したのと考えられる。なお、接触時間を十分確保した場合 (10分程度)、図-4に示すように、四電極法と二電極法の測定結果は一致した。

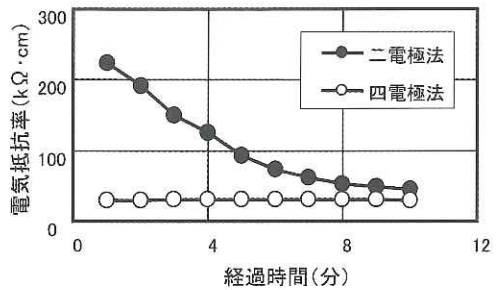


図-3 電気抵抗率経時変化の一例

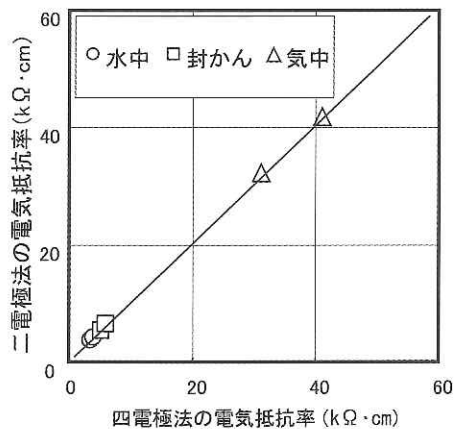


図-4 四電極法と二電極法の比較

3. 四電極法の試験方法に関する検討

3.1 実験概要

3.1.1 実験の要因と水準

表-1に四電極法の試験方法に関して実施した実験の要因と水準を示す。四電極法による電気抵抗率測定に影響する要因として、電極の種類、測

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
電極の種類	ステンレス板、銅板 (t=2mm)
測定端子の間隔	2、4、6、8cm
通電電極の接触	CMC、湿布 (接触圧 大、中、小)
周波数	10、50、73.3、100、1000、10000Hz
印加電圧	1、5、10、30V

\*接触圧は締め付けに用いた輪ゴムの周長で管理した (30.34,38cm)

定端子の間隔、通電電極の接触方法、周波数、印加電圧を取り上げ、検討した。

3.1.2 供試体の作製

検討に用いた供試体は、40×40×160mmのモルタル供試体である。JIS R 5201のセメント強さ試験に準じて、普通ポルトランドセメント及びセメント協会標準砂を用いて、W/C = 50%、S/C = 3の配合で作製した。作製した供試体は、養生室 (温度20℃、湿度60% R.H.) にて、それぞれ水中養生及び封かん養生、気中養生を行った。

3.1.3 抵抗率の測定方法

2. で記述した四電極法により、表-1に示す電極の種類や接触方法、通電条件を変化させ、電気抵抗率の測定を行った。

3.2 実験結果および考察

図-5は通電電極の種類が電気抵抗率に及ぼす影響について示したものである。ステンレス板 (SUS) 電極と銅板 (Cu) 電極いずれを用いた場合でも電気抵抗率に差は見られない。また、電極の接触方法についても、図-6に示すようにその影響は認められなかった。ただし、銅板電極は腐食物が電極表面に沈着しやすいこと、湿布は接着

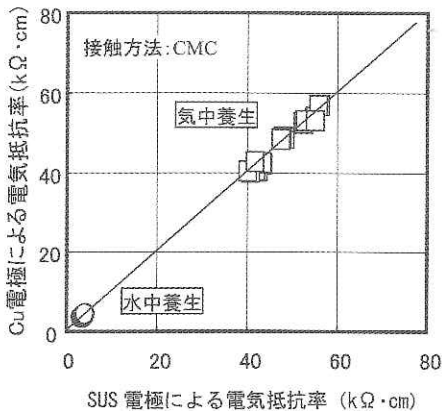


図-5 通電電極の種類の影響

面以外に水が飛散する可能性があることなどを考慮すると、ステンレス板によるCMC接着が測定時の簡便性に優れていると考えられる。

図-7は、測定端子の間隔が電気抵抗率に及ぼす影響について示したものである。電気抵抗率比とは、測定端子距離毎の平均値に対する測定値の比である。これより、測定端子間隔が2cmでは、ばらつきが大きくなる。これは、モルタル内部に存在する空隙などが測定端子の距離が短いほど大

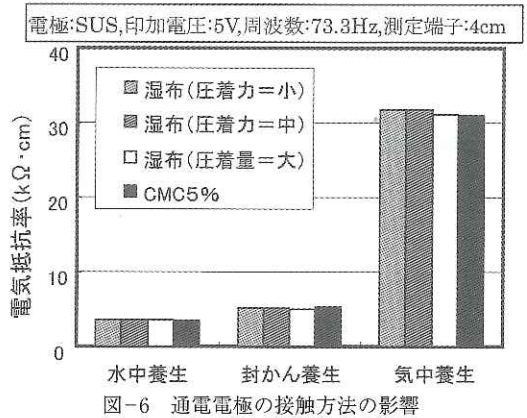


図-6 通電電極の接触方法の影響

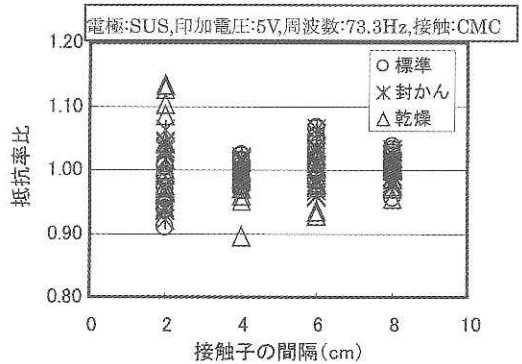


図-7 測定端子距離の影響

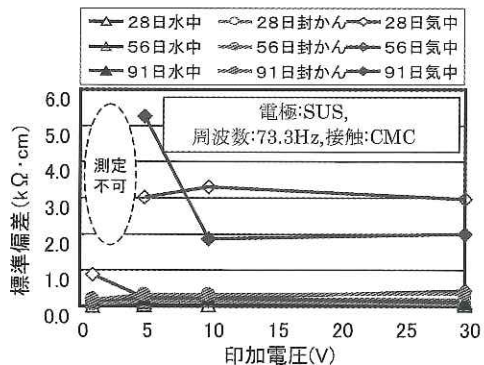


図-8 印加電圧の影響

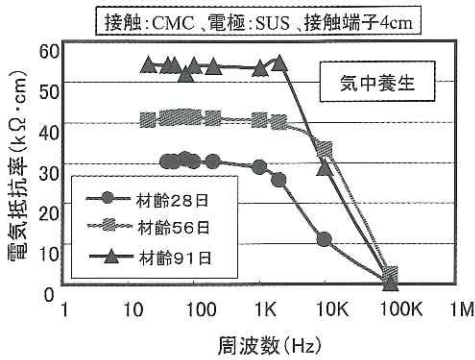


図-9 周波数の影響

大きく影響するためと考えられる。

図-8は、印加電圧の影響について示したものである。水中養生と封かん養生では、印加電圧の影響は認められなかった。一方、気中養生では、材齢経過に伴い5V以下の低い電圧では測定が不可能となり、10V程度の電圧の印加が必要であった。

図-9は周波数の影響について示したものである。1000Hz以下の領域では、周波数の異なることによる電気抵抗率の値に違いは見られない。しかし、これを超える高周波領域では電気抵抗率が急激に減少する。モルタルやコンクリートの等価回路では抵抗に並列な静電容量が存在する。これは、モルタルの静電容量が高周波領域で放電されるためと考えられる。適用する周波数は、1000Hz以下で商用電源周波数(50/60Hz)の倍数や生活雑音(50Hz以下)などを除いた範囲で影響を受けない周波数が適すと考えられる。

#### 4. 環境条件に関する検討

##### 4.1 実験概要

###### 4.1.1 実験の要因と水準

表-2に環境条件に関して実施した実験の要因と水準を示す。

###### 4.1.2 供試体の作製

検討に用いた供試体は、R 5201のセメント強さ試験に準じて、普通ポルトランドセメント及びセメント協会標準砂を用いて作製した。配合は、水量をセメント強さ試験の1バッチ225g、S/C=3とし、各水セメント比で一定とした。作製した供試体は、養生室(温度20℃、湿度60% R.H.)にて、それぞれの養生条件で養生した。

###### 4.1.3 電気抵抗率の測定方法

表-3に示す四電極法の試験条件により測定を行っ

表-2 実験の要因と水準

要因	水準
電極の種類	ステンレス板、銅板 (t=2mm)
測定端子の間隔	2、4、6、8cm
通電電極の接触	CMC、湿布 (接触圧 大、中、小)
周波数	10、50、73.3、100、1000、10000Hz
印加電圧	1、5、10、30V

\*接触圧は締め付けに用いた輪ゴムの周長で管理した(30,34,38cm)

表-3 電気抵抗率の測定条件

要因	水準
水セメント比	40、50、60%
含水量	水中、気中、封かん養生
材 齢	7、14、28、91、182日
力学的特性	圧縮強度
寸法効果	4×4×16、10×10×40cm

た。なお、10×10×40cmのコンクリート供試体では測定端子間隔を20cmとした。

##### 4.2 実験結果および考察

図-10に40×40×160mm供試体の各養生条件における電気抵抗率の材齢変化を水セメント比毎に示す。

これより、いずれの養生条件においても水セメント比が小さくなるほど、電気抵抗率は大きくなる。また、材齢の経過に伴い、電気抵抗率は増加する。この傾向は、気中養生で特に著しい。これは、いずれの養生条件でも水和反応の進行に伴う組織の緻密化により、材齢経過に伴い電気抵抗率が増加するためである。また、水中養生の場合、外部からの水分供給により空隙が水で飽和されるのに対して、気中養生の場合には乾燥によりセメント水和物中の不飽和空隙が増加したため、養生条件による相違が生じたものと考えられる。

各養生条件の電気抵抗率測定が終了した供試体を用いて、含水量の測定を行った。含水率は、24時間110℃で乾燥後の重量に対する乾燥前後での減少重量の比として表した。

この結果を図-11に示す。これより、電気抵抗率は含水率が4%を下回ると急激に増加する。

以上のことから、電気抵抗率は環境条件による水分消失の影響が支配的であることがわかる。このことは、コンクリートや補修材など各種材料について、電気抵抗率と含水量の関係を把握することで、実環境での電気抵抗率の変動の整理が可能

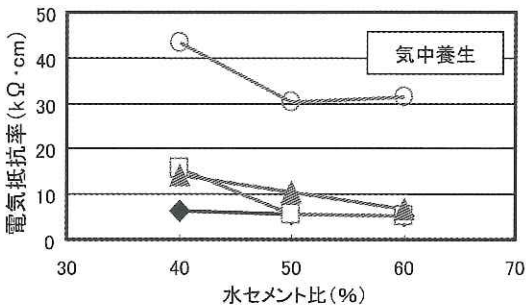
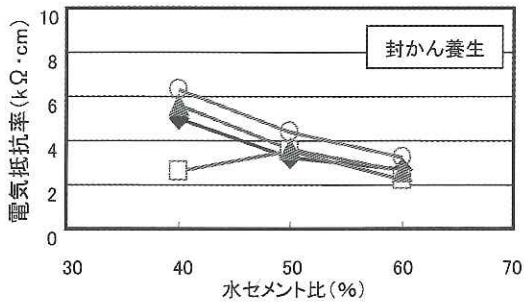
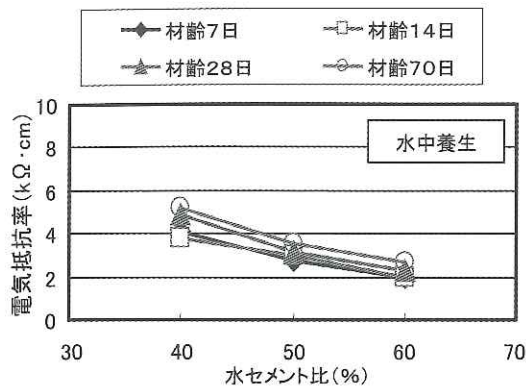


図-10 各養生条件での電気抵抗率の変化

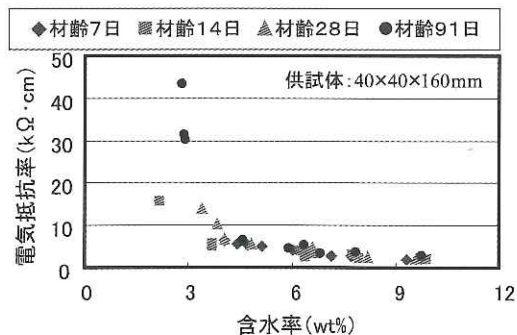


図-11 含水率と電気抵抗率の関係

であることを示している。つまり、電気抵抗率の評価において含水率の把握が極めて重要であり、これらを整理することにより電気防食の最適設計に反映できることも示唆している。

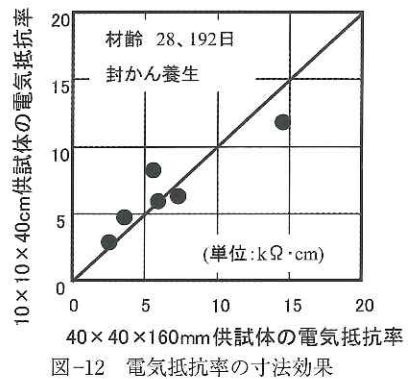


図-12 電気抵抗率の寸法効果

図-12は、供試体の形状寸法が電気抵抗率に及ぼす影響について検討したものである。これより、供試体形状による寸法効果は認められない。ただし、供試体形状により空隙等の内部欠陥の大きさも異なる可能性があるため、図-7に示したように測定端子間の距離の選定には十分な考慮が必要である。

## 5. まとめ

### 5.1 検討結果のまとめ

本研究では、セメント系材料の簡易な電気抵抗率測定方法を提案することを目的として、四電極法と二電極法を取り上げ、比較検討した。次に、四電極法に着目し、周波数や電流、電圧など通電条件、電極の種類や間隔などの電極条件、供試体の寸法、養生条件などが四電極法の試験結果に及ぼす影響について検討を行った。本研究では、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 二電極法による電気抵抗率測定方法は、通電電極の接触抵抗の影響を受ける可能性がある。しかし、十分に通電電極を接触させた場合、二電極法と四電極法による電気抵抗率は一致する。
- (2) 四電極法による電気抵抗率測定方法は、測定端子間の距離、印加電圧、周波数の影響を受ける範囲があるので影響の少ない範囲に値を選定する。
- (3) 電気抵抗率の測定値は、組織の緻密性に比べ、不飽和空隙の存在など含水状態の影響が支配的であるものと思われる。
- (4) 40×40×160mmモルタル供試体と10×10×40cmコンクリート供試体では、四電極法による抵抗率測定方法に供試体の違いによる影

響は認められないと考えられる。

## 5.2 電気抵抗率測定方法の提案

5.1 に示した検討結果をもとに、セメント系断面修復材の電気抵抗率測定方法として、通電時間の影響が少なく測定がすぐ行える四電極法に着目し、標準的試験方法として以下を提案する。

### 5.2.1 適用範囲

コンクリート構造物を補修あるいは補強する目的で、断面を修復する場合に用いるセメント系断面修復材料の電気抵抗率を四電極法によって測定する場合について適用する。

### 5.2.2 装置

電気抵抗率の測定装置は、定電圧交流電源、電流計、通電電極、測定端子および電位差計によって構成される。

### 5.2.3 供試体

モルタルの場合  $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ 、コンクリートの場合  $10 \times 10 \times 40\text{cm}$  の角柱供試体を標準とする。

### 5.2.4 測定方法

- ①2つの通電電極の間に定電圧交流電源と電流計をリード線により直列に接続する。
- ②2つの測定端子と電位差計をリード線により接続する
- ③供試体断面に通電電極を固定する。この際、供試体断面に通電電極を密着させるために、ゲル状の電解質 (CMC) などを含浸させた多孔質材料 (例えばスポンジなど) を供試体断面と通電電極との間に介在させるとよい。
- ④定電圧交流電源より交流電圧を印加する。交流電圧は  $30\text{V}$  以下とする。また、周波数は、 $60 \sim 100\text{Hz}$  とする。
- ⑤測定端子は供試体の打設面および打設底面を除く側面に設置する。測定端子の間隔は通電電極

の間隔の  $1/4 \sim 1/2$  の長さとする。測定端子は、その先端を供試体に流れる電流に対して平行になるように設置する。測定端子の先端と供試体表面を密着させるため、ゲル状の電解質 (CMC) などを含浸させた多孔質材料 (スポンジなど) を供試体表面と測定端子との間に介在させるとよい。

- ⑥通電開始後、測定値が安定したことを確認し、電位差計を用いて測定端子間の電位差を測定する。また、その時の供試体に流れる電流を電流計により測定する。測定ごとに測定端子の位置を変えて、同一供試体の電位差および電流を3回測定する。同様に、残りの供試体についても測定する。

### 5.2.5 電気抵抗率の算定

電気抵抗率の算定は以下の式によって行い、結果の表示は、四捨五入して有効数字3けたの値に丸めて示す。

$$\rho = (V \times A) / (I \times L)$$

ここに、 $\rho$  : 電気抵抗率 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )

$V$  : 測定端子間の電位差 (V)

$A$  : 供試体の断面積 ( $\text{cm}^2$ )

$I$  : 供試体に流れる電流 (A)

$L$  : 測定端子間の距離 (cm)

## 参考文献

- 1) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針 (案)、コンクリートライブラリー107, 2001
- 2) 高橋武彦：接地技術入門、オーム社, 1990
- 3) 市野瀬比路実、石川光男、玉利昭一：コンクリートの抵抗率測定、腐食防食, 88A-308, pp.97-100, 1988
- 4) 電気学会：電食・土壌腐食ハンドブック, 1977

守屋 進\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ新材料チーム総括主任研究員, 工博  
Dr. Susumu MORIYA

川俣孝治\*\*



住友大阪セメント株式会社建材事業部課長, 工博  
Dr. Koji KAWAMATA

内藤英晴\*\*\*



五洋建設株式会社技術研究所部長, 工博  
Dr. Hideharu NAITO

皆川 浩\*\*\*\*



東北大学大学院工学研究科土木工学専攻, 工博  
Dr. Hiroshi MINAGAWA