

論文

[1168] 管内を流れるフレッシュコンクリートの電気抵抗に関するシミュレーションモデルの研究

正会員 ○ 中山新一 (西松建設株式会社)  
 正会員 橋本親典 (長岡技術科学大学工学部)  
 正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学工学部)  
 清水敬二 (長岡技術科学大学工学部)

1. はじめに

管内を流れるフレッシュコンクリートの圧送性能をポンプ圧送現場で定量的に計測できる新しいセンサーの開発として、コンクリートの電気抵抗測定システムを提案し、種々の室内および現場圧送実験を行ってきた<sup>1,2)</sup>。

これまでの実験的研究から、フレッシュコンクリートの変形性に大きく影響を及ぼす配合要因である粗骨材とモルタルの容積比(以後 $V_g/V_m$ と称する)は、電気抵抗の時系列データの統計量(時間的平均値、変動係数)と強い相関性を示すことが認められている<sup>2)</sup>。しかし、コンクリートの管内流動状況は直接目視できるわけではなく、また、計測されている電気抵抗のメカニズムも明かでないため、流動中のフレッシュコンクリートの変形性と電気抵抗の時系列データとの相互関係は理論的に説明できる段階に至っていない。従って、本計測システムの実用化を行うためには、コンクリートの変形性と電気抵抗の関係を理論的に説明し、計測システムの信頼性及び妥当性を明確にする必要がある。

本研究では、フレッシュコンクリートの管内流動に関する可視化実験で得られた粗骨材粒子群とモルタル相の力学的挙動に関する知見<sup>3)</sup>を基に、管内を流れるコンクリートを電気電導度の異なる粗骨材粒子群、モルタル相および管壁面に形成されるコンクリートからの浸出水による潤滑層の3相系材料とみなし、FEMによる電気電導シミュレーションを行うことにより、流動中のコンクリートの状態と電気抵抗との関連を明らかにすることを目的とした。更に、センサー部の極板の位置、長さ、幅等をパラメータとした感度解析を行い、センサーの精度と適用範囲を検討した。

2. 既往の研究

圧送中における $V_g/V_m$ とコンクリートの電気抵抗との関係については、図-1に示す装置を用いて、図-2, 3に示すような結果が得られている<sup>4)</sup>。実験では、管径を15.5cm(6B)から10cm(4B)に縮小させたテーパ管部を有するケースについて、圧送速度を3.0cm/secと6.0cm/secとして屋内圧送実験を行っている。図-2は直管部分における $V_g/V_m$ とモルタル

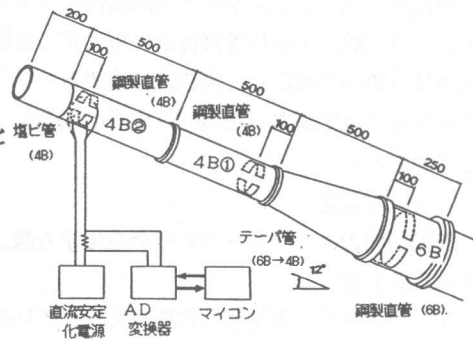


図-1 屋内圧送実験装置

( $V_g=0$ )の電気抵抗を1とした場合の抵抗比の関係を示したものである。圧送速度に関係なく $V_g/V_m$ と電気抵抗比には強い相関性が認められる。

図-3は、 $V_g/V_m$ と流動中のコンクリートの電気抵抗の変動を表す変動係数の関係を示している。直管部の抵抗値の変動係数は、容積比に関係なくほぼ一定であるのに対し、テーパ管では、その出口に行くほど大きくなっている。これは断面縮小に伴い、粗骨材粒子相互の衝突や回転が生じ

測定断面内の $V_g/V_m$ が変化するためと考えられる。また $V_g/V_m$ が90%以上になると変動係数が逆に小さくなる。これは、 $V_g/V_m$ が過大になると、粗骨材粒子間の変動が起こりにくくなり、最密充填状態に近くなるためと考えられる。

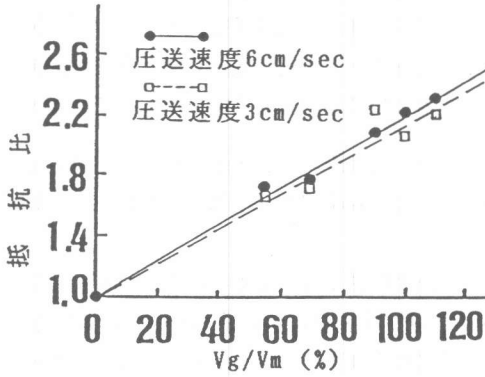


図-2  $V_g/V_m$ と抵抗比の関係

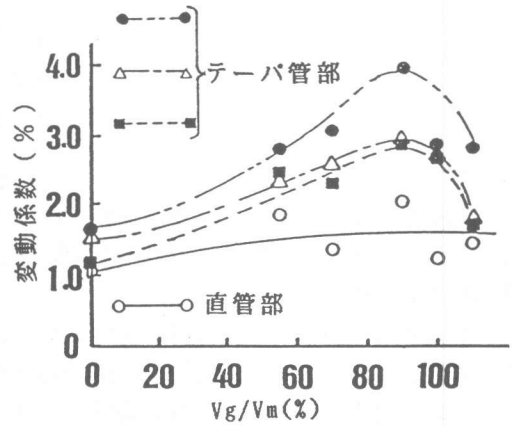


図-3  $V_g/V_m$ と変動係数の関係

### 3. 解析方法

定常状態の場の問題である電流の流れは、熱伝導あるいは浸透流と同じポテンシャル流れであり、基本式は二次元のラプラス方程式(1)で表される。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

ここに、 $u$ : 電圧

この偏微分方程式を各種境界条件を入れて解くことにより電流の分布を求めることができ、極板間の電気抵抗が求められる<sup>5)</sup>。

本研究では、コンクリートの流動性状に関するモデル化として、一様乱数により粗骨材粒子に相当する要素とモルタル相に相当する要素を決定し、実際に流動するコンクリートにおける粗骨材粒子とモルタル相の相対位置の変動をシミュレートすることとした。

#### 3. 1 基本仮定

管断面内のコンクリートをモデル化する際、以下の事項を基本仮定とした。

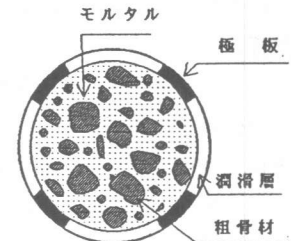
(1) コンクリートは常に管内に充満しているものとし、空隙はないものとする。

(2) コンクリート断面は2軸対称であるとする。

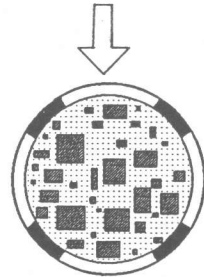
(3) コンクリートは粗骨材、モルタルおよび管壁面に形成される水膜による潤滑層からなる3相系材料とする。

#### 3. 2 要素分割

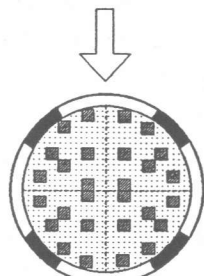
コンクリートをモデル化する手法を図-4に示す。まず、



(a) 実コンクリート



(b) 骨材のパターン化



(c) 解析用断面

図-4 コンクリートのモデル化

実際のコンクリートを図-4(a)に示す粗骨材、モルタル、潤滑層の3相系材料として考える。次に、粗骨材の断面を矩形とし、図-4(b)に示すモデル化を考える。実粗骨材は粒度分布を有しているのだが、本研究では骨材を同一粒径として考え、断面内では2軸対称に分布しているとして考えることとした(図-4(c))。このモデル化により、解析は断面の4分の1の部分で行うことができる。

本研究では、実際の現場でもよく用いられている6B管( $\phi=15.5\text{cm}$ )を対象とした。図-5は、要素数51、節点数182の要素分割例である。ここでは、8節点アイソパラメトリック要素を用いている。外側の幅5mmの8要素は潤滑層とした。残りの43要素では粗骨材粒子に相当する要素とモルタル相に相当する要素を決定する為に、計算プログラムにおいて一様乱数を発生させ、実際に流動するコンクリートにおける粗骨材粒子とモルタル相の相対位置の変動をシミュレートすることとした。

境界条件として極板で10V、左右対称であることから極板間の中央で(図-5下図の左端縦軸)で5Vを与えた。

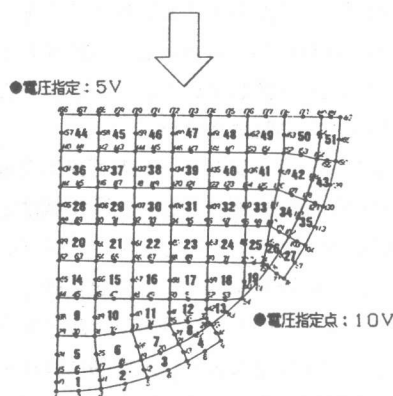
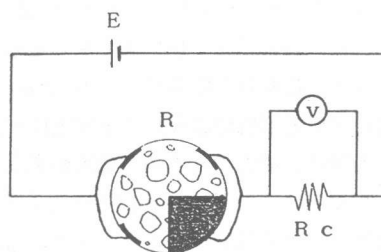


図-5 要素分割図

#### 4. 解析結果

本解析では、電気抵抗の絶対値を問題としているのではなく、モルタルに比べて骨材が混入したときの影響をシミュレートするものである。そこで、材料特性として、骨材、モルタル、潤滑層の電気伝導率を0.01, 1, 100の比率で用いることとした。

図-6に解析結果の例を示す。図中の矢印は各要素を流れる電気力線の方向と大きさを示している。骨材数が同じ10個(図-6(a)、(b))であっても、骨材の位置が違えば抵抗は135 $\Omega$ 、153 $\Omega$ と異なる。また、骨材数が5個に減れば(図-6(c))、電気は流れやすくなり抵抗は111 $\Omega$ と小さくなる。

管断面のコンクリートの電気抵抗は、この図に示されるように、粗骨材の数だけでなく、粗骨材が断面内に占める位置によっても変化するようになる。

そこで、粗骨材の要素数が同じ場合について、乱数を発生させ、位置の違いについて300通りを定め、電気抵抗を算出した。従って、

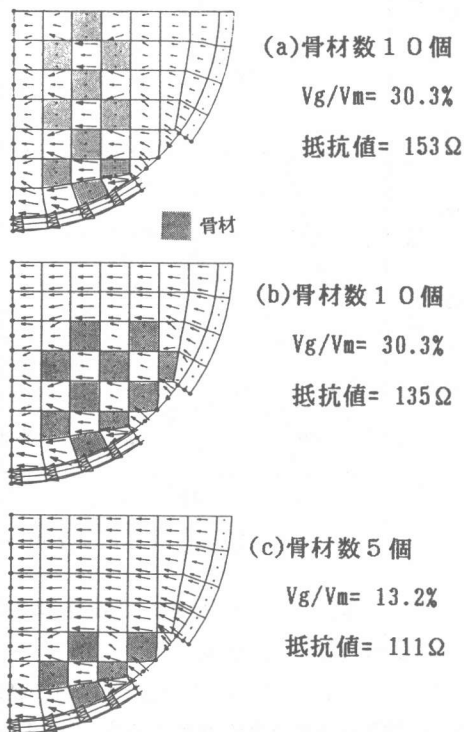


図-6 解析例

粗骨材の要素数の違いは $V_g/V_m$ に対応することになり、位置の違いは、抵抗値の変動として表れることになる。これらの結果を $V_g/V_m$ とモルタルの電気抵抗に対する抵抗比の関係で示すと図-7の様になる。

実験値、解析値とも強い線形性を示している。傾きの違いはコンクリートの物性値（スランプ、空気量等）による影響があると考えられる。

図-8は、 $V_g/V_m$ と変動係数の関係を示したものである。 $V_g/V_m=90\%$ 付近にピークが現れている傾向は、実験結果と一致している。しかし、その絶対値は解析値の方が非常に大きい。

フレッシュコンクリートの可視化実験<sup>3)</sup>によって骨材の挙動を観察すると、振動領域はせいぜい骨材直径程度である。そこで、図-9(b),(c)のように骨材の変動範囲を制限し、骨材が変動する領域と、骨材とモルタルが一定で変動しないモデルを考えた。図-9(c)の骨材分布モデルの場合、解析値はほぼ実験値とよい整合性を示している。よって、この解析結果より、局部的に骨材の分布を一樣乱数によって変動させる本解析モデルを用いて、粗骨材とモルタルの容積比( $V_g/V_m$ )と電気抵抗の時間的平均値および変動係数の関係をシミュレートできると考えられる。

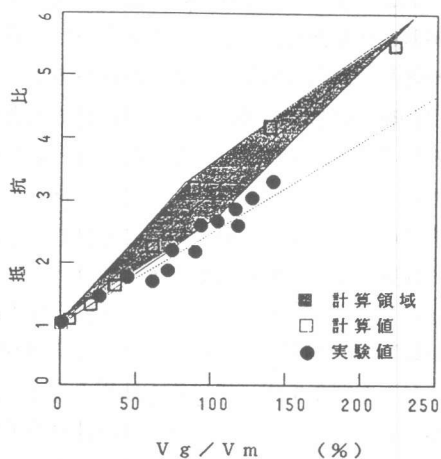


図-7  $V_g/V_m$ と抵抗比の関係

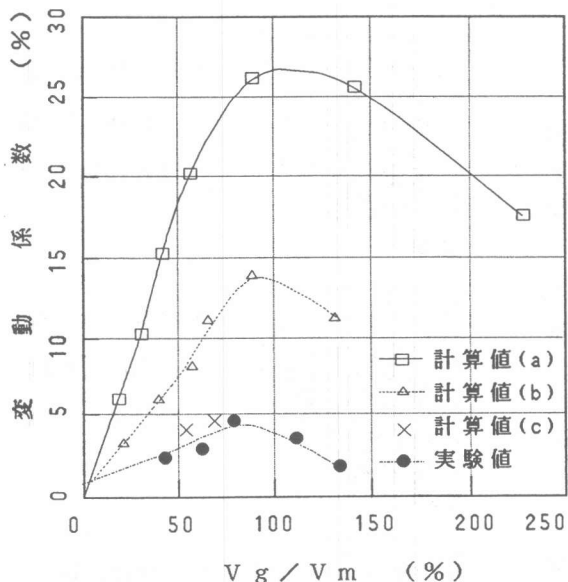


図-8  $V_g/V_m$ と変動係数の関係

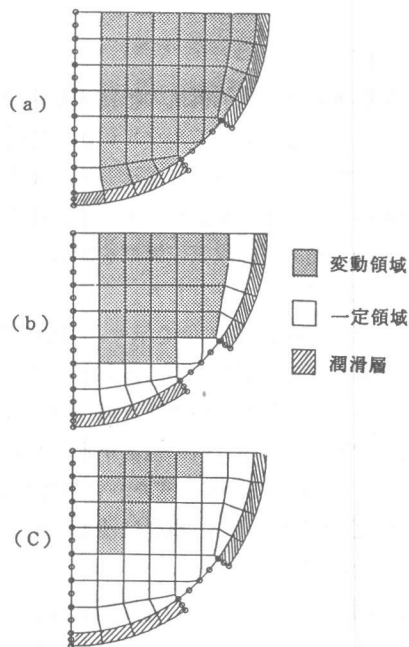


図-9 変動パターン

### 5. 現測定システムの検討

本解析モデルを用いて図1に示す現行の測定システム<sup>4)</sup>の検討を行った。まず、電流の管軸方向の影響範囲を解析的に求めてみた。図-10に電極板間に発生する電気力線の方向と相対的な大きさを示す。これより、極板±4cmの所までの電気力線の存在は認められるが、それ以外の範囲で

は電気力線の大きさは非常に小さい。よって、本測定システムは極板±4cmまでの変動を捉えていると考えられる。この影響範囲は、既往の研究<sup>6)</sup>でも明らかにされている。

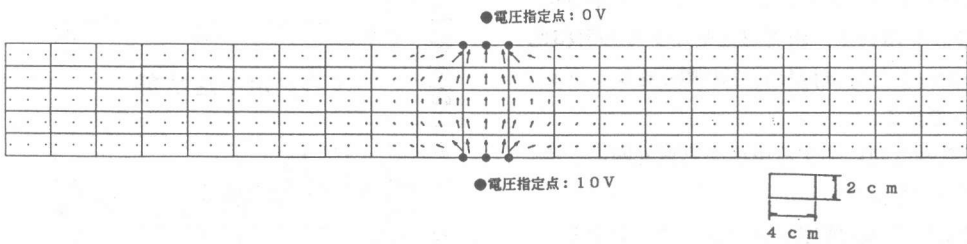


図-10 管軸方向の影響範囲の検討

次に、電極板の位置および寸法による電気力線への影響を検討した。図-11は、位置および大きさ(寸法)が極端に変わる場合の解析結果を示したものである。抵抗値は極板間の距離に比例し、長さに反比例するはずであるが、本解析では、位置を極端に変化させたにも関わらず、電流の流れはほとんど変化していない。それぞれの抵抗比、変動係数を求めた結果を、表-1に示す。よって、本測定システムでは、センサー部の形状変化が電気抵抗の変動に与える影響は小さいと考えられる。

最後に、安定圧送状態と、不安定圧送状態の関係をシミュレートすることを試みた。実験では<sup>1)</sup>、図-12に示すように、不安定圧送状態になると、抵抗比および変動係数とも増加していた。そこで、本解析モデルでは、一手法として潤滑層への骨材の侵入を考えた。その結果、解析値は抵抗値および変動係数とも増加し実験結果と同じ傾向を示した(表-2)。

表-1 電極板の位置および寸法の違いによる抵抗比及び変動係数

	現行 2cm	位 置				寸 法					
		(1)PA	(2)PB	(3)PC	(4)PD	1 cm	3 cm	4 cm	5 cm	6 cm	
モルタルの抵抗値(Ω)	86.82	108.89	119.52	132.44	147.89	87.18	86.63	86.52	86.48	86.47	
Vg/Vm ↓	平均抵抗値Ω	185.83	251.76	282.50	317.20	356.78	187.06	186.87	186.84	186.83	186.83
	抵抗比	2.14	2.31	2.36	2.40	2.41	2.15	2.16	2.16	2.16	2.16
65%	変動係数(%)	6.5	8.4	8.8	9.0	9.1	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0

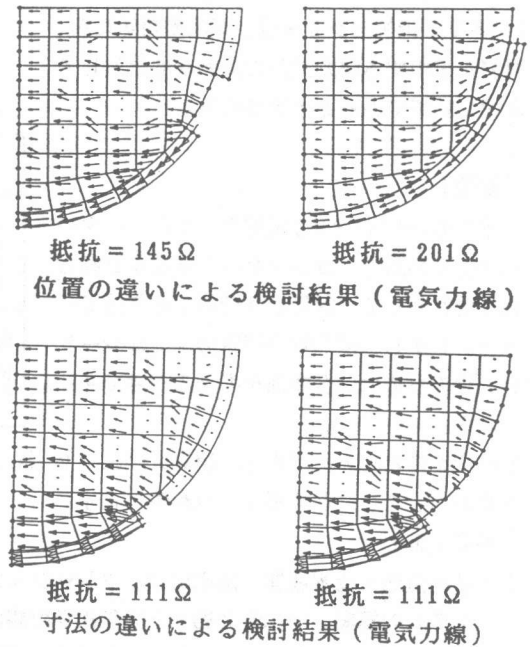


図-11 電極板の位置、寸法の検討

## 6. 結論

- (1)骨材変動を乱数により発生させる本解析モデルを用いて、粗骨材とモルタルの容積比 ( $V_g/V_m$ ) と電気抵抗特性の関係をシミュレートできる。
- (2)管軸方向に関する電流の影響範囲は、極板±4cm程度である。
- (3)現電気抵抗測定システムでは、センサー部の形状変化が電気抵抗の変動に与える影響は小さい。
- (4)本電気抵抗センサーは、潤滑層付近に粗骨材が集中する閉塞近傍の流動状態に対して非常に敏感であると予想される。

### 〔課題〕

本研究は計算時間の短縮やコンピューターのメモリ制限上、コンクリート断面を2軸対称な流れとして、解析は4分の1の部分で行った。しかし、変形管や閉塞のシミュレーション化のためには全断面を考えるべきである。

### 〔謝辞〕

本研究をまとめるに当たり、徳島大学工学部 島 弘助教授には、有益なご助言・ご指導をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

### 〔参考文献〕

- 1) 辻村直哉・橋本親典・清水敬二、フレッシュコンクリートの管内流動に関する新しい計測システムの提案、土木学会第42回年次学術講演概要集第V部、1987, pp.564~565
- 2) 清水正樹・橋本親典・丸山久一・倉林清・高野菊光、コンクリートの電気抵抗特性によるポンプ圧送時の管内流動性状の推定に関する実験的研究、フレッシュコンクリートの挙動とその施工への応用に関するシンポジウム、1989, pp157~162
- 3) 本間宏記・橋本親典・丸山久一・清水敬二、管内を流れるフレッシュコンクリートの可視化モデルの変形性状に関する一考察、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第V部、1989, pp.190~191
- 4) 辻村直哉・橋本親典・丸山久一・清水敬二、管内を流れるコンクリートの閉塞関知システムの開発に関する研究、第10回コンクリート工学年次論文報告集、1988, pp.73~78
- 5) 島 弘・水口裕之・コンクリートの電気抵抗特性、導電シミュレーションによるフレッシュコンクリートの電極間抵抗 - 抵抗率の計算、土木学会第44回年次学術講演概要集第V部、1989, pp.242~243
- 6) 水口裕之・島 弘・木虎久人、フレッシュコンクリートの導電性に関する二、三の検討、土木学会中国四国支部第40回研究発表会講演概要集、1988, pp.380~381

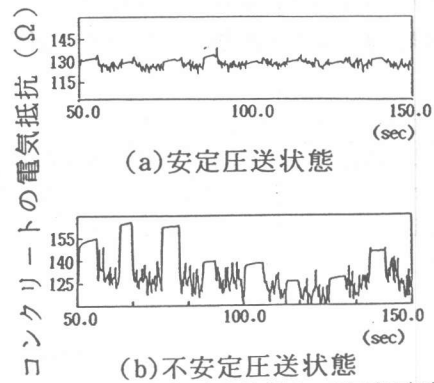


図-12 安定圧送状態と不安定圧送状態

表-2 安定圧送状態・不安定圧送状態

		安定圧送	不安定圧送
抵抗比	実験値	1.5~1.8	2.5~3.0
	解析値	2.0~2.5	3.5~4.0
変動係数(%)	実験値	2~5	13~18
	解析値	3~10	18~22