

論文 電気抵抗に影響を及ぼす配合条件の検討および断面修復材の練混ぜ時の単位水量の管理方法の提案

三坂 岳広*1・伊代田 岳史*2

要旨：鉄筋コンクリート構造物の補修・補強には、断面修復材が広く使用されている。この断面修復材はプレミックス製品の材料と水を現場で練混ぜて作製する方法が一般的であり、単位水量は断面修復材の品質に大きく影響する。しかし、練混ぜられた断面修復材の単位水量を管理する方法が確立されていない。本研究では、四電極法による電気抵抗に着目し、モルタルの配合条件が電気抵抗に及ぼす影響について検討し、その結果を用いて、断面修復材に加えられた単位水量を管理する方法を提案する。結果として電気抵抗はモルタルの単位水量と高い相関があり、断面修復材に加えられた単位水量を推定できることが明らかとなった。

キーワード：四電極法、電気抵抗、配合推定、単位水量、ポリマーセメントモルタル

1. はじめに

高度経済成長期に建設された多くの鉄筋コンクリート構造物が老朽化し建設後 50 年以上を経過する構造物の割合が増加している。これらコンクリート構造物の劣化の補修および補強には、断面修復材が多く用いられている¹⁾。この断面修復材の多くは、現場で規定量の水を加えて練混ぜるだけで製造されるプレミックス製品のポリマーセメントモルタルである。

断面修復材による補修および補強後に断面修復部が要求性能を満たすためには、製造時に適切な単位水量で練混ぜを行うことが重要である。実際の現場では断面修復材の流動性や粘性等の作業性が重視され、作業員、施工環境、施工条件によって断面修復材に加えられた単位水量が異なる。この単位水量の変化が各断面修復材で定められている範囲内に収める必要がある。また、施工管理者は既に練混ぜられた断面修復材の単位水量を確認することは難しい。そのため、管理においては断面修復材の風袋の数量で断面修復材の使用量しか管理できていない。これらの現状を考慮すると断面修復材に加えられた単位水量を簡易に確認できる手法の確立が必要である。

電気化学的測定は、コンクリートの含水率や鋼材の腐食性の評価に広く用いられている²⁾。筆者らは図-1に示す四電極法による電気抵抗に着目し研究を行ってきた。既往の研究^{3,4,5)}より、若材齢のコンクリートの電気抵抗はセメントの溶解反応や水和反応による水の消費に影響を受け、 Ca^{2+} の濃度や結合水率等と相関があることが明らかとなっている。また、硬化後のコンクリートの電気抵抗は、含水率と相関があることが明らかとなっている。これらを考慮すると電気抵抗はコンクリート中の単位水量やイオンを評価していると予測される。しかし、コン

クリートの配合条件が電気抵抗に及ぼす影響は明らかにされていない。

本研究の目的は、電気抵抗に影響を及ぼすモルタルの配合条件を明らかにし、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に加えられた単位水量を推定する方法を提案することである。本研究ではモルタルの配合条件が電気抵抗に及ぼす影響について確認する「配合条件の検討実験」と、その結果から加える水を変化させたポリマーセメントモルタル系断面修復材を作製し、ポリマーセメントモルタルの単位水量を推定する「単位水量の推定実験」の2つの実験を行った。

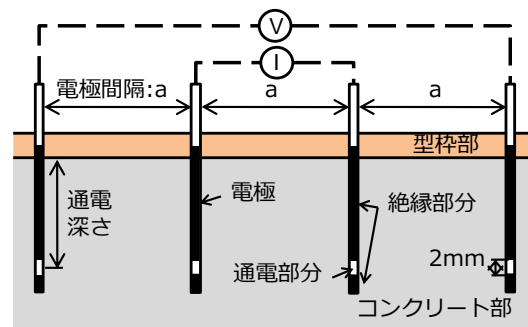


図-1 直流四電極法の概略

表-1 電気抵抗の計測条件（配合条件の検討）

要因	水準
計測方法	直流四電極法
印加電圧	1V (パルス波)
電極間隔	20mm
電極直径	φ 2.6mm
通電深さ	20mm
電極の種類	ステンレスの針金

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科地域環境システム専攻 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

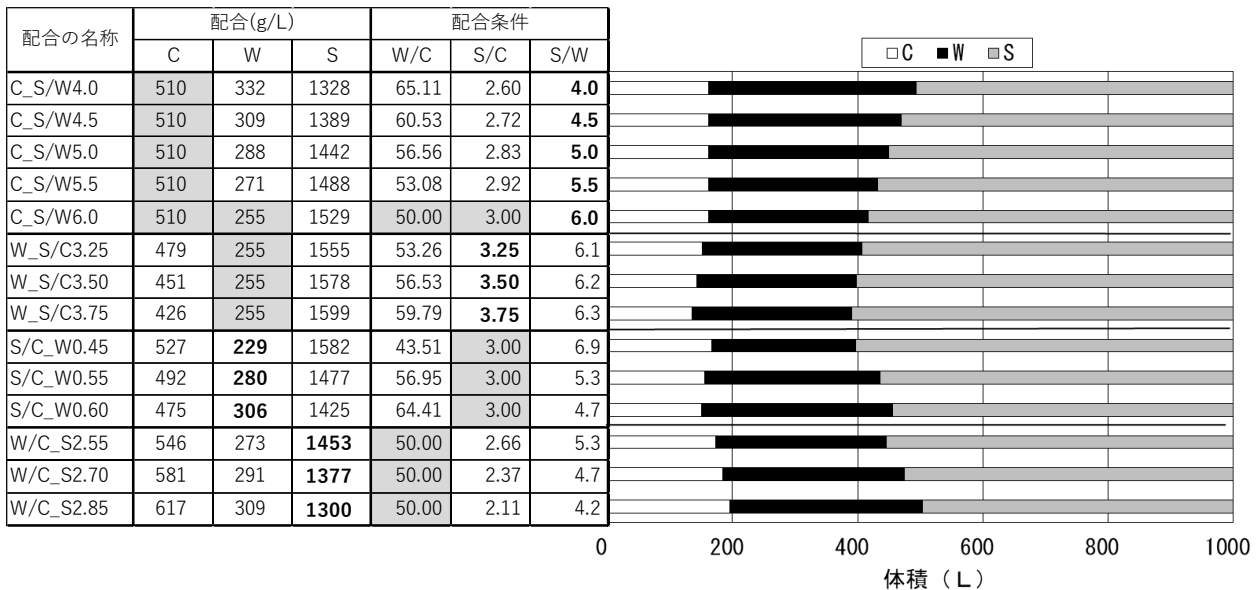


図-2 モルタルの配合と体積割合（配合条件の検討）

表-2 使用材料

材料	詳細
C：セメント	普通ポルトランドセメント， 密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 3330 cm ² /g
S：細骨材	混合砂，表乾密度 2.62g/cm ³
W：水	水道水

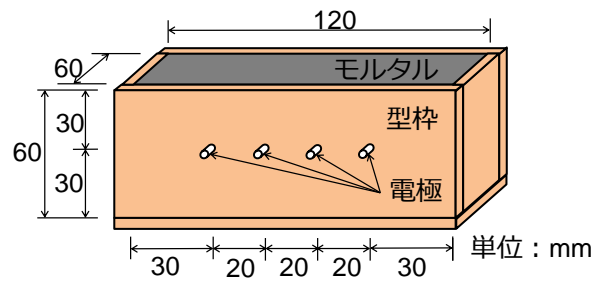


図-3 電気抵抗測定試験体の概略

2. 配合条件の検討

2.1 実験概要

配合条件の検討はセメント，水，細骨材の量を変化させたモルタルを用いて電気抵抗の測定を行った。表-2 にモルタルの使用材料を示す。また，図-2 にモルタルの配合と体積割合を示す。図中の C_S/W6.0 は一般的な 1:3 モルタルの配合であり，セメント：水：細骨材が 1：0.5：3 の質量比となっている。この配合を基準に他の配合を決定した。例として C_S/W4.0 は，単位セメント量を基準と同一とし，S/W を 4.0 とした配合を示している。また，S/C_W0.45 の配合は S/C を基準と同一とし，単位水量の質量比を一般的なモルタルの水の質量比 0.5 から 0.45 に変化させた配合を示している。S/C_W の系で標準配合の単位水量を 100%とした場合の水の変化割合は，90～120%となる。

モルタルは使用材料の温度を 20℃とし，恒温恒湿室内（温度 20±1℃，湿度 60±5%）で練混ぜや電気抵抗の測定を行った。

電気抵抗を計測した試験体の概略を図-3 に示す。供試体の寸法は 60×60×120mm とし，側面の型枠に電極を設置した後にモルタルを打込むことで，モルタル内部の電気抵抗を測定した。計測時間は，接水から 2 時間までとし，計測間隔を 5 分間隔とした。各計測結果は 1 回のものである。表-1 に電気抵抗の計測条件を示す。印加電

圧は 1V とした。また，試料の電気分解や帯電現象を防止するためにパルス波を使用している。また，電極には絶縁体で表面を覆ったステンレスの針金を使用している。

2.2 実験結果

図-4 に一例として単位セメント量が一定で S/W を変化したモルタルの電気抵抗の測定結果を示す。経過時間は接水からの時間となっている。各配合の電気抵抗は時間の進行にともなって減少している。また，経過時間 100 分以降で電気抵抗が増加傾向を示しているものもある。この傾向は既往の研究²⁾と同様の傾向であり，接水

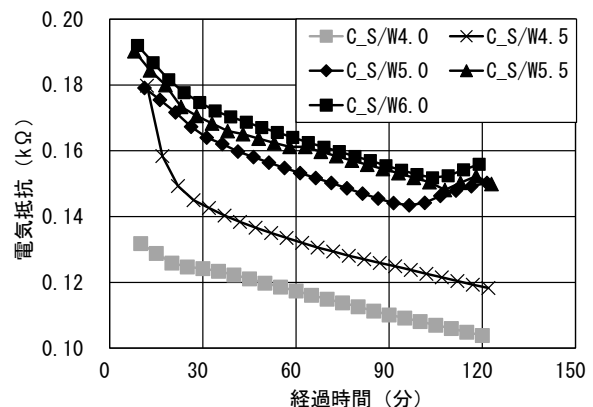


図-4 電気抵抗の測定結果（C：一定，S/W：変化）

後の電気抵抗の減少は、セメントから Ca^{2+} 等が溶出することにより電気が流れやすくなることに起因していると考えられ、100分以降の電気抵抗の増加は、水和反応による水の消費に影響を受けるとされている。接水から30分までの電気抵抗の減少は、 $C_S/W4.5$ で大きくなっているが、30~100分までの電気抵抗は、 S/W の増加に伴って大きくなる傾向が得られた。

図-5 に電気抵抗と S/W の関係を示す。使用した電気抵抗の値は100分とした。100分を選択した理由としては、既往の研究²⁾より電気抵抗が最小値を示す時間がコンダクションカロリメータによって計測される発熱速度の小さい第2段階(誘導期)にあたり、セメントの溶解反応がほぼ終了し、発熱速度の大きくなる第3段階(加速期)の前と考えられ、比較的安定した電気抵抗の結果が得られると考えたためである。図から電気抵抗と S/W の間に相関関係が認められた。従って、計測される電気抵抗は S/W に影響を受け、つまり配合条件の単位細骨材量と単位水量に影響を受けると考えられる。

図-6 に単位水量を一定とし、 S/C を変化させたモルタルの電気抵抗と S/C の関係を示す。図から S/C が変化しても電気抵抗に大きな変化は認められなかった。一方で、単位水量が一定ならば S/C が変化しても計測される電気抵抗に大きな影響が無いと考えられる。これは、細骨材とセメントが基本的に電気を通しにくい材料であることに起因していると考えられる。

図-7 に S/C を一定とし、 W を変化させたモルタルの電気抵抗と W の関係を示す。図から負の相関が確認された。したがって、電気抵抗は導体である水の単位水量に強く影響を受けると考えられる。

図-8 に W/C を一定とし、単位細骨材量を変化させたモルタルの電気抵抗と単位細骨材量の関係を示す。図から細骨材量が増加することで抵抗が増加していることから、電気を通しにくい細骨材の量は電気抵抗に影響すると考えられる。しかし、図-6 の単位水量を一定とし、 S/C を変化させたモルタルの電気抵抗と S/C の関係では、細骨材の量の変化しても電気抵抗は大きく変化しなかった。これは、電気抵抗が W/C の単位セメント量ではなく、単位水量の変化を評価しているためと考えられる。

表-3 に配合条件と電気抵抗の関係を示す。表からも単位水量と単位細骨材量が電気抵抗に相関があり、特に単

表-3 配合条件と電気抵抗の関係

配合条件		仮定条件	単位量			電気抵抗
一定	変化		C	W	S	
C	S/W	S/W減少	一定	増加	減少	減少
W	S/C	S/C減少	増加	一定	減少	一定
S/C	W	W減少	増加	減少	増加	増加
W/C	S	S減少	増加	増加	減少	減少

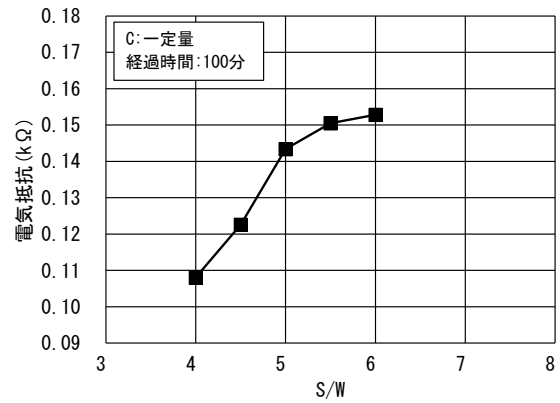


図-5 電気抵抗と S/W の関係 (C:一定, S/W :変化)

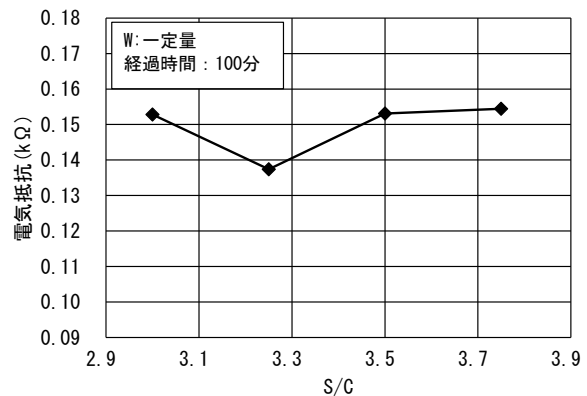


図-6 電気抵抗と S/C の関係 (W:一定, S/C :変化)

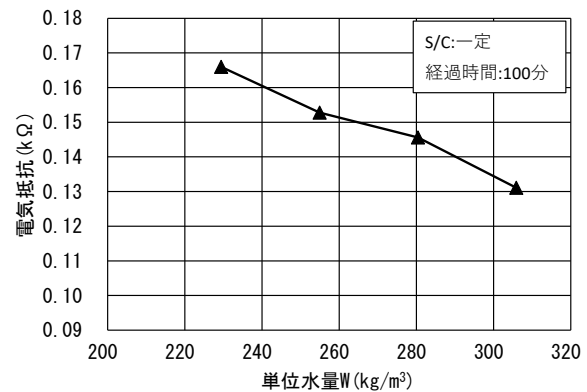


図-7 電気抵抗と W の関係 (S/C :一定, W :変化)

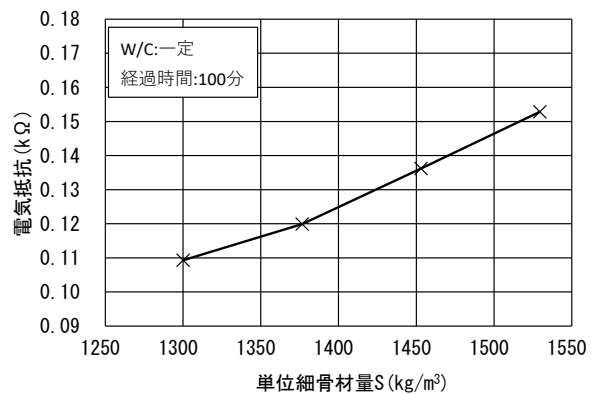


図-8 電気抵抗と S の関係 (W/C :一定, S :変化)

位水量と電気抵抗に関係があることがわかる。

図-9にW/Cと電気抵抗の関係を示す。図からW/Cと電気抵抗の相関が無いと考えられる。S/Wを変化させた場合には、電気抵抗とS/Wに相関が認められたが、W/Cを変化させた場合には、電気抵抗にあたる影響が小さい。したがって、単位セメント量が電気抵抗に及ぼす影響は小さいと考えられる。

先ほどの図-5および図-7に全て

の配合の結果をプロットしたものを図-10および図-11に示す。全ての配合の電気抵抗は単位水量とS/Wで整理をすると良い相関を得ることができた。

経過時間100分の電気抵抗を目的変数とし、単位セメント量、単位水量、単位砂量を説明変数として有意水準5%で重回帰分析を行った。その結果、補正R²は0.82となり、重回帰式が実測値を82%説明することとなり、良い精度が確認された。表-4に重回帰分析結果の係数を示す。電気抵抗に与える影響を示す係数は、単位水量、単位細骨材量、単位セメント量の順に小さくなり、特に単位水量の影響が大きいことが統計的にも明らかとなった。

図-12にモルタル中の電気の流れ方のイメージを示す。これまでの結果から電気抵抗はモルタル内の電気を通しやすい水と電気を通しにくい細骨材量に影響を受けると考えられる。したがって、S/Wの大きい配合では細骨材量が多いため、電気が通りやすくなることによって電気抵抗が大きくなった。

既往の研究^{3,4)}で電気抵抗は水和反応による自由水の減少や養生による含水率の変化を評価しているとされている。本研究の結果からフレッシュコンクリートの単位水量についても評価できると考えられる。

以上の結果から電気抵抗は単位細骨材量、単位水量、S/Wに影響を受け、特に単位水量とS/Wで良い相関が認められる。したがって、モルタルの配合における単位水量を評価できる可能性がある。電気抵抗を用いてポリマーセメントモルタルの断面修復材に加えられた単位水量を推定できる可能性がある。

3. 単位水量の推定実験

3.1 実験概要

表-5に断面修復材の配合を示す。断面修復材には一般的なポリマーセメント系断面修復材のA、B、Cの3種類とし、それぞれ防腐系、普通耐火系、早強耐火系のものを用いた。練混ぜ方法は、JIS A 1171ポリマーセメントモルタルの試験方法に準拠した。単位水量は標準配合の100%を基準とし、90~150%まで変化させた。90%以下の単位水量では同様の練混ぜ方法により均一なポリマーセメントモルタルを作製することが難しかった。

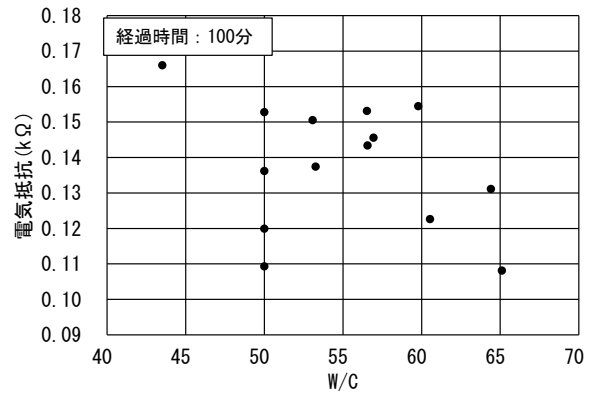


図-9 電気抵抗とW/Cの関係

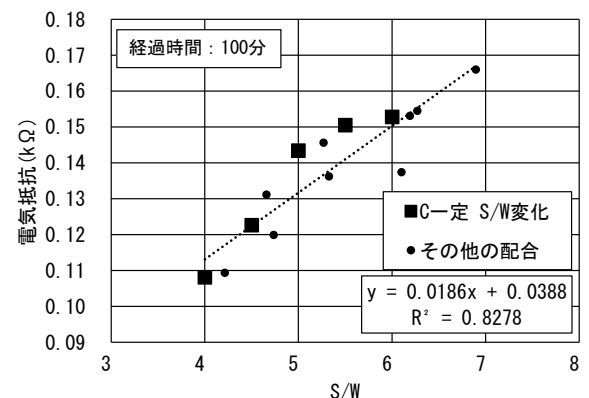


図-10 電気抵抗とS/Wの関係

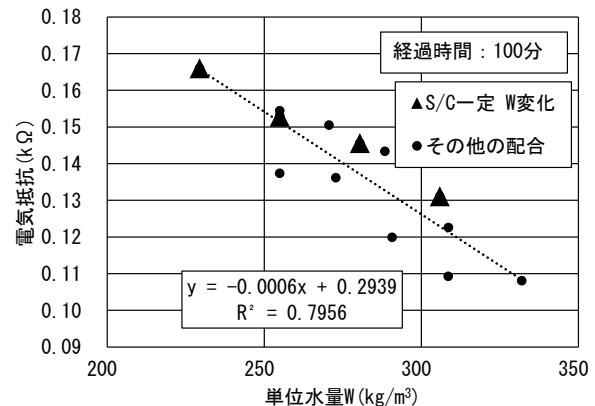


図-11 電気抵抗と単位水量の関係

表-4 重回帰分析の係数

	C	W	S
係数	0.519	1.641	0.627

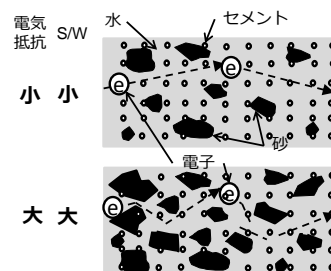


図-12 S/Wと電気の流れ方のイメージ

表-5 断面修復材の配合

種類	水材料比 (%)	単位量(g/L)		種類	水材料比 (%)	単位量(g/L)		種類	水材料比 (%)	単位量(g/L)	
		材料	水			材料	水			材料	水
A	90	1820	308	B	90	1750	224	C	90	1750	237
	100		342		100		271		100		263
	110		376		110		298		110		289
	120		410		120		325		120		316
	130		445		130		352		130		342
	140		479		140		379		140		368
	150		513		150		407		150		395

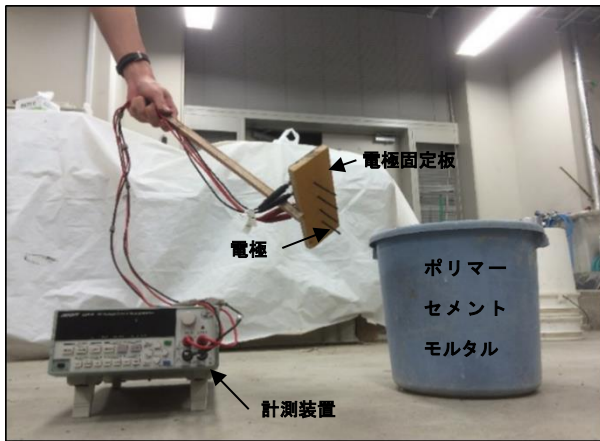


図-13 単位水量推定の測定方法の概略

ポリマーセメントモルタルの断面修復材は、プレミックス製品に現場で水を加えて作製する。したがって、現場では単位水量や W/C の異なる断面修復材が製造される。「配合条件の検討」の配合条件で考えると S/C が一定で単位水量が変化する系と同様の変化となる。

図-13 に単位水量推定の測定方法の概略を示す。練混ぜ直後のポリマーセメント系断面修復材に図のように電極固定板を設置することで電極を内部に埋め込んだ。電極の間隔および通電深さは 30mm とし、その他の電気抵抗の計測条件は配合条件の検討と同様の計測条件とした。試験項目は電気抵抗の測定と圧縮強度試験とし、圧縮強度試験の試験方法は JIS A 1171：ポリマーセメントモルタルの試験方法に準拠した。また、圧縮強度試験の試験材齢は 7 日とした。

3.2 実験結果（単位水量の推定実験）

図-14 に単位水量が圧縮強度に及ぼす影響を示す。図から各断面修復材の圧縮強度は、単位水量が増加するほど低下する傾向を示した。いずれの断面修復材においても単位水量を 120% にすると圧縮強度は 75~77% に低下し、単位水量を 140% にすると 47~66% まで低下する。このことから断面修復材に加えられる単位水量が実構造物の強度や耐久性に及ぼす影響は大きいと考えられ、加えられる単位水量の管理が重要ということがわかる。

図-15 に各ポリマーセメント系断面修復材の電気抵抗と単位水量の関係を示す。また、電気抵抗の計測は、実際の現場で単位水量を推定することを目的としているの

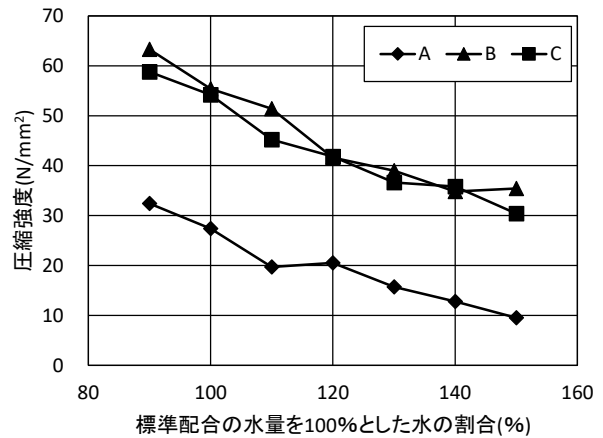


図-14 単位水量が圧縮強度に及ぼす影響

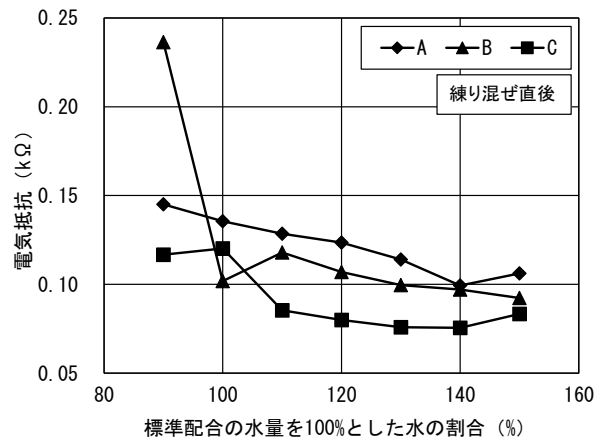


図-15 電気抵抗と単位水量の関係

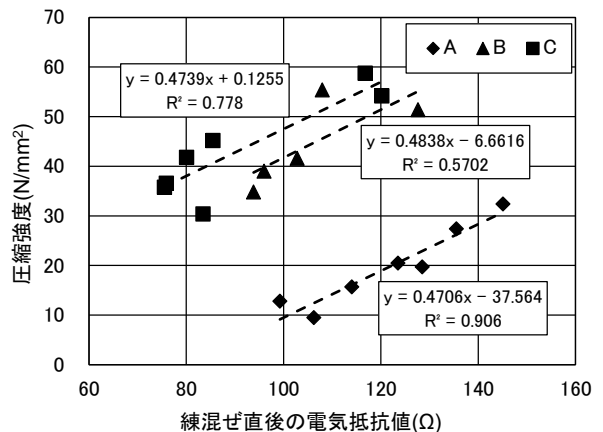


図-16 圧縮強度と単位水量の関係

で、練混ぜ直後とした。図から単位水量が 100~140%の間では、単位水量の増加に伴って電気抵抗が減少する傾向が得られた。B で単位水量を 90%とした場合に電気抵抗が大きな値を示した原因として、ポリマーセメントモルタルのフレッシュ性状が挙げられる。これは、硬練りのために練り上がったポリマーセメントモルタル内部に気泡が多く巻き込まれ、この気泡が電気を通しにくいために電気抵抗が大きくなった可能性がある。電気抵抗の計測前にポリマーセメントモルタルを締め、余分な気泡を抜く等の対策で計測値が安定する可能性が考えられる。また、A および C において水の割合が 150%の場合に電気抵抗が大きくなっている。この原因として単位水量が大きくなり、W/C が小さくなることによる材料分離の影響が挙げられる。材料分離によって密度の大きい構成材料であるセメント、細骨材、ポリマーが沈降した部分で電気抵抗を測定した場合、電気抵抗が大きくなったことが考えられる。

以上から単位水量が 100~140%の間ならば電気抵抗の測定によりポリマーセメント系断面修復材に添加された単位水量を推定できる可能性が示された。

図-16に材齢7日の圧縮強度と電気抵抗の関係を示す。既往の研究⁶⁾より脱型時の電気抵抗と圧縮強度、脱型時の電気抵抗と材齢28日および材齢91日の圧縮強度に相関関係が認められたが、練混ぜ直後の電気抵抗と材齢7日の圧縮強度にも相関関係が認められた。また、各断面修復材で電気抵抗と圧縮強度の関係が異なることから、断面修復材の材料ごとに電気抵抗と単位水量の関係を明らかにしておく必要があると考えられる。断面修復材ごとに電気抵抗と単位水量の関係が異なる原因としては、断面修復材に入っている細骨材の量が異なること、ポリマーの添加量が異なることなどが考えられる。

4. おわりに

直流四電極法により計測される電気抵抗は、モルタルの配合条件に影響を受け、特に単位水量に強く影響を受ける。また、練混ぜ直後のポリマーセメントモルタルの電気抵抗を計測することで、ポリマーセメントモルタルの単位水量を推定できる可能性が示された。得られた結果を以下に記載する。

- (1) 計測される電気抵抗はモルタルの配合条件である W/C, S/W および単位水量に影響を受け、特に単位水量に強く影響を受ける。
- (2) モルタルの単位水量が一定ならば S/C が変化しても計測される電気抵抗に大きな影響を与えない。
- (3) 断面修復材の単位水量が規定量に対して 100~140%の範囲ならば、電気抵抗の測定により単位水量を推定できる可能性がある。
- (4) ポリマーセメント系断面修復材の練混ぜ直後の電気抵抗と材齢7日の圧縮強度に相関関係が認められた。また、この関係は各断面修復材で電気抵抗と圧縮強度の関係が異なる。

謝辞

本研究は(株)コンステックの佐藤大輔氏、元芝浦工業大学の寺尾涼氏に助力を得た。ここに厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 槇島修, 魚本健人: 断面修復材の材料特性の違いが耐久性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1713-1718, 2004.7
- 2) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'16 [基礎編], pp.198-200, 2016.2
- 3) 三坂岳広, 太田真帆, 伊代田岳史: まだ固まらないコンクリートの水和反応が直流四電極法で計測される電気抵抗に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.505-510, 2017.7
- 4) 三坂岳広, 伊代田岳史: 電気抵抗を用いた各種養生方法による養生効果評価手法の提案, アップグレード論文報告集, 第17巻, pp.453-458, 2017
- 5) 三坂岳広, 太田真帆, 伊代田岳史: 直流四電極法により計測される電気抵抗に影響を及ぼす測定方法および計測条件の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1297-1302, 2015.7.7
- 6) 三坂岳広, 原沢蓉子, 伊代田岳史: 直流四電極法による養生終了時期判定方法の確立および現場適用性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, 2014.7