

論文 再乳化形粉末樹脂を用いたポリマーセメントモルタルの電気抵抗率に及ぼす調合因子と含水率の影響

荒木 裕人*1・福井 拓也*2・神田 利之*3・齋藤 俊克*4

要旨：本研究では、再乳化形粉末樹脂と細骨材の種類、ポリマーセメント比（P/C）並びに細骨材セメント比（S/C）を変化させたポリマーセメントモルタル（PCM）を乾燥条件下〔20℃, 60%（RH）〕に静置し、材齢 364d までの電気抵抗率に及ぼす調合因子と含水率の影響を検討している。その結果、PCM の電気抵抗率は材齢の経過に伴い増大するが、含水率は材齢 91d から 364d にかけてほぼ一定値を示している。材齢 364d の PCM の電気抵抗率は、ポリマーと細骨材の種類により若干異なるが、P/C および S/C の増加に伴い増大し、特に S/C の影響が顕著である。

キーワード：ポリマーセメントモルタル、ポリマー混入率、細骨材セメント比、電気抵抗率、含水率

1. はじめに

塩害により著しく劣化した鉄筋コンクリート（RC）構造物の補修においては、劣化したコンクリート部をはつり取って断面修復した後に、電気防食工法が適用されることがある。電気防食工法は、コンクリート表面に設置した陽極から、コンクリート内部の鋼材を陰極として、防食電流を流し、鋼材の腐食反応を抑制する工法である。そのため、電気防食工法を適用する場合、断面修復材は、既設コンクリートと同程度の電気抵抗率であることが望まれている。一方、RC 構造物用断面修復材として広範に使用されているポリマーセメントモルタル（PCM）はポリマー成分が電気抵抗率に影響を及ぼすことが指摘されている¹⁾。

著者らは、セメント混和用ポリマーとして再乳化形粉末樹脂を用いた PCM の材齢 28d における電気抵抗率に及ぼす再乳化形粉末樹脂および細骨材の種類、ポリマーセメント比（P/C）並びに細骨材セメント比（S/C）の影響について検討し、その電気抵抗率は、P/C および S/C に依存すること、更に、細骨材の種類による著しい差異はほとんど認められないことを明らかにしている²⁾。しかし、長期材齢における PCM の電気抵抗率に及ぼすそれらの影響については未検討であり、材齢の経過に伴う含水率の低下が PCM の電気抵抗率に影響を及ぼすことが考えられる。

そこで本研究では、乾燥条件下〔20℃, 60%（RH）〕に長期間静置した PCM の電気抵抗率に及ぼす再乳化形粉末樹脂の種類、細骨材の種類、P/C および S/C などの調合因子、並びに長期間静置時の含水率の影響について、材齢 364d までの測定結果をもとに明らかにすることを

目的としている。

2. 使用材料

2.1 セメント

セメントとしては、JIS R 5210（ポルトランドセメント）に規定する普通ポルトランドセメントを使用した。その性質を **Table 1** に示す。

2.2 細骨材

細骨材としては、ISO 標準砂、阿武隈川産川砂（以下、川砂）、石灰岩砂、花崗岩砂を使用した。その性質を **Table 2** に示す。

2.3 練混ぜ水

Table 1 Physical Properties and Chemical Compositions of Ordinary Portland Cement.

Density (g/cm ³)	Blaine Specific Surface (cm ² /g)	Setting Time (h-min)		Compressive Strength of Mortar (MPa)		
		Initial Set	Final Set	3d	7d	28d
3.16	3300	2-14	3-32	31.0	47.8	63.6
Chemical Compositions (%)						
MgO	SO ₃	ig. loss		Total Alkali		Chloride Ion
1.54	2.04	1.76		0.54		0.022

Table 2 Properties of Fine Aggregates.

Type of Fine Aggregate	Fineness Modulus	Density* (g/cm ³)	Water Absorption (%)
ISO Standard Sand	2.93	2.56	0.42
River Sand	2.44	2.64	2.55
Limestone Sand	2.34	2.68	0.09
Granite Sand	2.30	2.57	0.85

Note,*: Saturated and surface dried condition.

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻（学生会員）

*2 （株）ケミカル工事 技術開発部（正会員）

*3 （株）ケミカル工事 技術開発部 次長 博士（工学）（正会員）

*4 日本大学 工学部建築学科准教授 博士（工学）（正会員）

練混ぜ水としては、上水道水を使用した。

2.4 セメント混和用ポリマー

セメント混和用ポリマーとしては、再乳化形粉末樹脂のエチレン・酢酸ビニル共重合体 (EVA)、酢酸ビニル・ベオバ・アクリル共重合体 (VA/VeoVa/Ac)、アクリル酸エステル・メタクリル酸エステル共重合体 (PAE) を使用した。その性質を **Table 3** に示す。

3. 試験方法

3.1 供試体の作製

JISA 1171 (ポリマーセメントモルタルの試験方法) に従って、**Table 4** から **Table 6** に示す調合のポリマーセメントモルタルを練り混ぜ、寸法 40×40×160mm に成形した。その後、2d 湿置 [20℃, 90% (RH)], 5d 水中 (20℃) および 21d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] 養生を行って、供試体を作製した。なお、**Table 4** では P/C, **Table 5** では S/C, **Table 6** では細骨材の種類の影響を検討するために、実験水準を変化させている。また、**Table 5** では、S/C=2 および 1 の PCM については、単位体積中に占めるポリマー量を一定とするため、S/C=3, P/C=10% の PCM と同一のポリマー混入率 (単位体積中のポリマーの体積百分率) とした。また、**Table 5** では、S/C の変化に伴い、PCM の流動性が変化することおよび単位体積中に占めるポリマー量の変化が大きくなることから、フロー値を一定するために、S/C 毎に水セメント比 (W/C) が変化している。更に、S/C=2 および 1 の PCM については、単位体積中に

Table 3 Properties of Redispersible Polymer Powder for Cement Modifier.

Type of Polymer	Non Volatile Matter (%)	Glass Transition Temp., Tg(°C)	Apparent Density (g/cm ³)
EVA	99±1	10	0.5
VA/VeoVa/Ac	99±1	14	0.53
PAE	99±1	8	0.5

Table 4 Mix Proportions of Polymer-Modified Mortars with Various P/C.

W/C (%)	S/C	Type of Polymer	P/C (%)	Polymer Content* (%)	Type of Fine Aggregate
50	3	—	0	0	ISO Standard Sand
			5	2.31	
			10	4.56	
			15	6.68	
			5	2.31	
			10	4.56	
		VA/VeoVa/Ac	15	6.68	ISO Standard Sand
			5	2.31	
			10	4.56	
			15	6.68	
		PAE	10	4.56	
			15	6.68	

Note,*: Polymer content was calculated by using the density of polymer solid of 1.06 g/cm³ as an approximate value.

占めるポリマー量を一定とするため、S/C=3, P/C=10% の PCM と同一のポリマー混入率 (単位体積中のポリマーの体積百分率) とした。

3.2 電気抵抗率の測定

乾燥養生後の材齢 28d, その後 20℃, 60% (RH) の試験室内に供試体を静置して、材齢 56, 91, 182, 308 および 364d の時点において、次の手順で供試体の電気抵抗率を測定した。作製した供試体の 40×40mm 両端面に導電性クリームを塗布し、ステンレス板で挟んだ。その後、絶縁性を確保するため、厚さ 10mm のゴムシートでステンレス板を覆い、LCR メーター (四電極法) を用いて、供試体両端部のステンレス間の電気抵抗率を測定した。

Photo 1 には、供試体の電気抵抗率の測定の様子を示す。なお、既往の研究³⁾において、使用した装置による測定値は、土木学会が定める四電極法⁴⁾によるデータとの整

Table 5 Mix Proportions of Polymer-Modified Mortars with Various S/C.

W/C (%)	S/C	Type of Polymer	P/C (%)	Polymer Content* (%)	Type of Fine Aggregate
50	3	—	0	0	ISO Standard Sand
		EVA	10	4.56	
		VA/VeoVa/Ac			
		PAE			
40	2	—	0	0	
		EVA	7.58	4.56	
		VA/VeoVa/Ac			
		PAE			
33	1	—	0	0	
		EVA	5.27	4.56	
		VA/VeoVa/Ac			
		PAE			

Note,*: Polymer content was calculated by using the density of polymer solid of 1.06 g/cm³ as an approximate value.

Table 6 Mix Proportions of Polymer-Modified Mortars Using Various Fine Aggregates.

W/C (%)	S/C	Type of Polymer	P/C (%)	Polymer Content* (%)	Type of Fine Aggregate
50	3	—	0	0	ISO Standard Sand
			10	4.56	
			15	6.68	
		EVA	0	0	River Sand
			10	4.56	
			15	6.68	
		VA/VeoVa/Ac	0	0	Limestone Sand
			10	4.56	
			15	6.68	
		PAE	0	0	Granite Sand
			10	4.56	
			15	6.68	

Note,*: Polymer content was calculated by using the density of polymer solid of 1.06 g/cm³ as an approximate value.

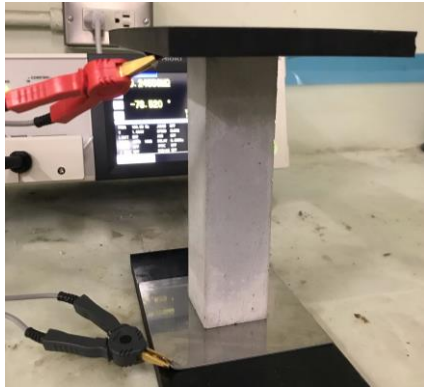


Photo 1 Measurement of Electrical Resistivity of Specimen.

合性が確認されている。

3.3 含水率の算出

材齢 364d 経過後の供試体を 105°C の乾燥機で絶乾状態になるまで乾燥させ、次式により各材齢における供試体の含水率を算出した。なお、式(1)で算出される含水率とは、電気抵抗率測定材齢において、供試体中に湿分として存在する液相としての水の質量百分率であり、“Moisture Content” と称する。

$$u = ((m_i - m_0) / m_0) \times 100 \quad (1)$$

ここに、 u : 各材齢における供試体の含水率 (%)

m_i : 各材齢における供試体の質量 (g)

m_0 : 絶乾状態まで乾燥後の供試体の質量 (g)

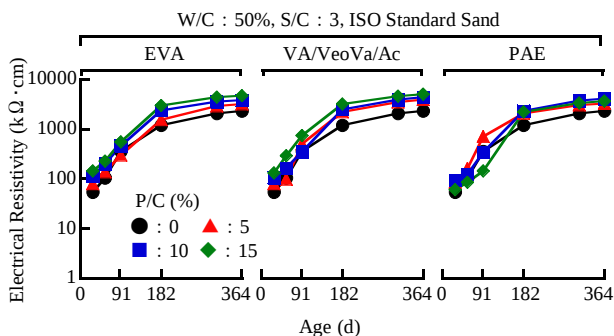


Fig.1 Relation between Age and Electrical Resistivity of PCM with Various P/C.

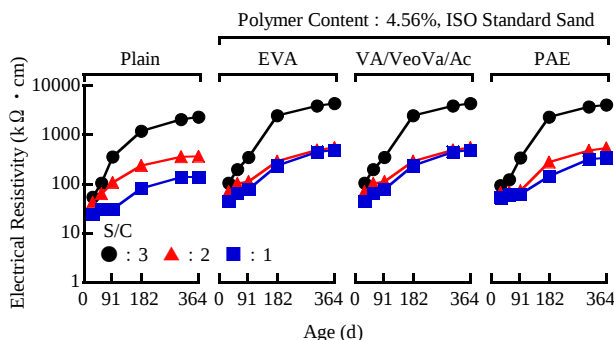


Fig.2 Relation between Age and Electrical Resistivity of PCM with Various S/C.

4. 試験結果および考察

4.1 電気抵抗率と材齢の関係

Fig.1 から Fig.3 には、P/C、S/C および細骨材の種類を変化させた PCM の電気抵抗率と材齢の関係を示す。ポリマー混入の有無およびポリマーの種類並びに、細骨材の種類にかかわらず、PCM の電気抵抗率は、材齢の経過に伴い増大し、材齢 91d から 364d にかけても増大傾向にある。なお、その増大の程度に及ぼす P/C および細骨材の種類による影響は小さく、S/C の違いによる影響が大きい。

4.2 含水率と材齢の関係

Fig.4 から Fig.6 には、P/C、S/C および細骨材の種類を変化させた PCM の含水率と材齢の関係を示す。PCM の含水率は材齢の経過に伴って減少する傾向にあり、電気抵抗率の増大には、PCM の乾燥の程度が影響を及ぼしていると考えられる。しかし、いずれの PCM の含水率とも、材齢 91d から 364d にかけてほぼ一定値を与えているのに対して、前述のように、PCM の電気抵抗率は材齢 91d から 364d にかけても増加傾向にある。なお、著者らは既往の研究³⁾において、セメント系断面修復材の電気抵抗率は、その構成成分と量に大きく依存することを明らかにしている。これらのことから、材齢の経過に伴う電気抵抗率の増加は乾燥の程度のみに依存しないことが示唆されるものとする。但し、ここでいう乾燥の程度とは、式(1)で算出した含水率を指しており、供試体内部の含水

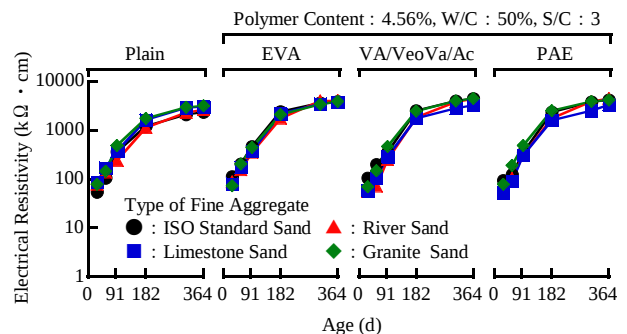


Fig.3 Relation between Age and Electrical Resistivity of PCM Using Various Fine Aggregates.

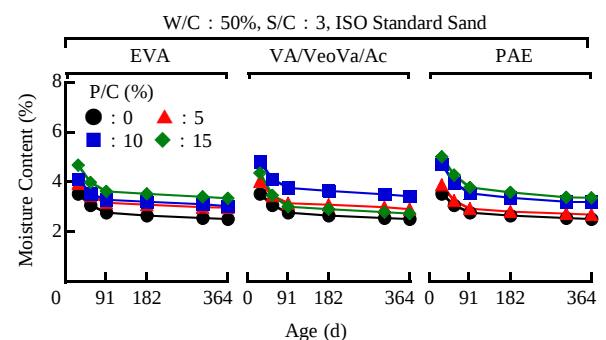


Fig.4 Relation between Age and Moisture Content of PCM with Various P/C.

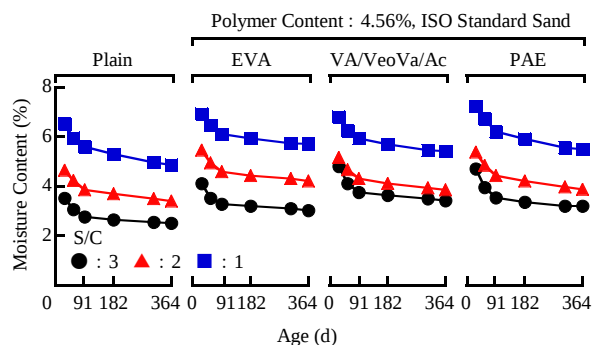


Fig.5 Relation between Age and Moisture Content of PCM with Various S/C.

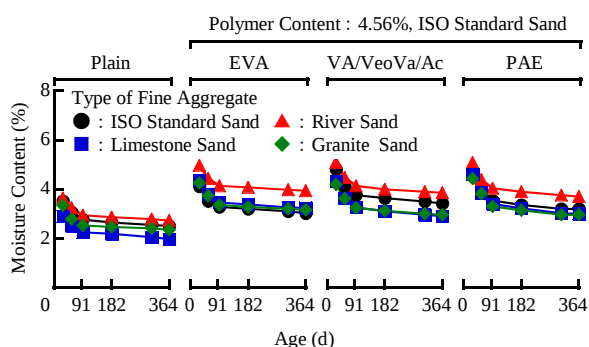


Fig.6 Relation between Age and Moisture Content of PCM Using Various Fine Aggregates.

勾配などもその要因として検討する必要があると考えられるが、今後の課題としたい。

4.3 材齢 364d の電気抵抗率および含水率と調合因子の関係

(1) P/C の影響

Fig.7 および Fig.8 には、PCM の材齢 364d における電気抵抗率および含水率と P/C の関係を示す。Plain に比べて、PCM の電気抵抗率は大きい傾向にある。一方、EVA-PCM の含水率は P/C の増加に伴って増大する傾向にあり、VA/VeoVa/Ac-PCM のそれは P/C=15%で減少しているが、それらの PCM の電気抵抗率は P/C の増加に伴って増大する傾向にある。これは、P/C の増加に伴い形成されるポリマーフィルムの量が増加して、PCM の電気絶縁性が大きくなったためと推察される。しかし、PAE-PCM の含水率は P/C の増加に伴って増大するものの、その電気抵抗率は P/C=15%で減少している。従って、ポリマーの種類も PCM の電気抵抗率の影響因子と言える。

(2) S/C の影響

Fig.9 および Fig.10 には、ポリマー混入率 0 および 4.56% とし、ISO 標準砂を用いた PCM の材齢 364d における電気抵抗率および含水率と S/C の関係を示す。PCM の電気抵抗率は、S/C が 1 から 2 に増加すると若干増大し、S/C=3 で著しく増大する傾向にある。また、S/C=1 および 2 では、PCM と Plain の電気抵抗率に著しい差は認められないが、S/C=3 では Plain に比べて PCM の電気抵抗率は 2

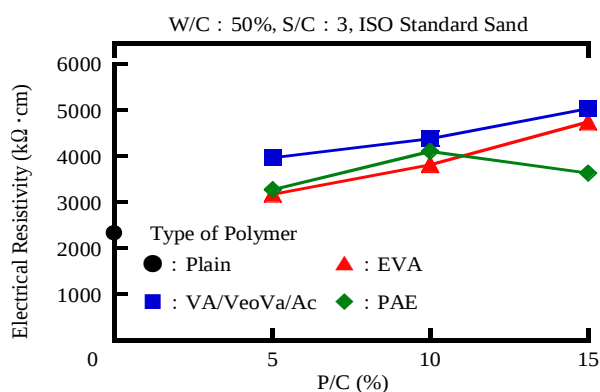


Fig.7 P/C vs. Electrical Resistivity of PCM at Age of 364d.

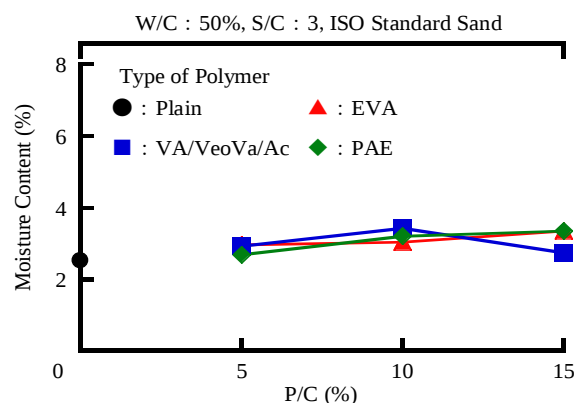


Fig.8 P/C vs. Moisture Content of PCM at Age of 364d.

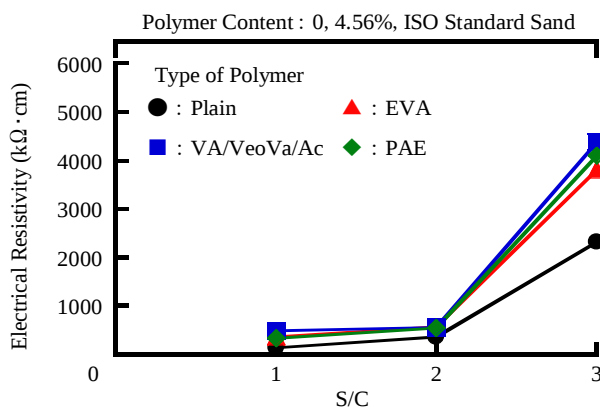


Fig.9 S/C vs. Electrical Resistivity of PCM at Age of 364d.

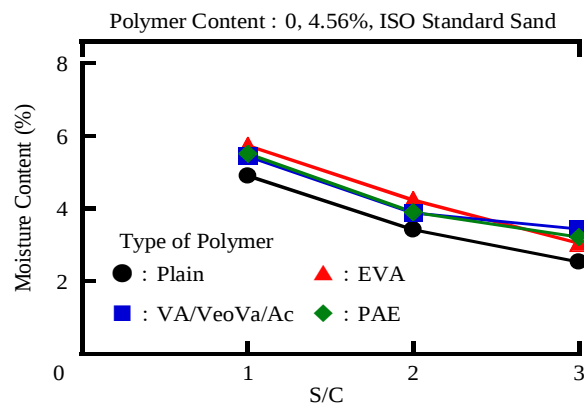


Fig.10 S/C vs. Moisture Content of PCM at Age of 364d.

倍程度の値を与える。なお、Table 5 に示した通り、各 PCM の W/C は、 $S/C=1 < S/C=2 < S/C=3$ の順に大きく、単位セメント量は、 $S/C=1 > S/C=2 > S/C=3$ の順に小さい。一般に、W/C が小さくなるほど組織がち密になり電気抵抗率が大きくなると考えられるが、本研究における W/C の変化は S/C の変化に伴うものであり、それに伴い単位セメント量も変化しており、単位セメント量を一定とした場合における W/C の変化による影響とは異なっているものとする。このことは、S/C の増加に伴う電気抵抗率の変化傾向が Plain と PCM において同様であることから示唆される。一方、セメント系材料においては、水和物中の水酸化カルシウムがイオン電導性に大きく影響することが報告されている^{5) 6)}。上述した通り、S/C=1 および 2 に比べて、S/C=3 の PCM の単位セメント量は最も小さく、その影響が現れにくいものと推察される。

更に、各 PCM のポリマー混入率は一定値であるにも関わらず、S/C=3 の PCM においては、Plain の電気抵抗率との差が著しく大きいものに対して、S/C=1 および 2 の PCM においてはその差がわずかであり、それらの電気抵抗率に対してポリマー混入の影響が顕著でないことを示唆するものとする。このことは、Fig.7 に示した P/C の増大に伴う PCM の電気抵抗率の変化に比べて、S/C の増大による変化が著しいことから推察され、S/C の増大に伴うセメント量の減少が大きな影響因子となっていると考える。なお、PCM 中のポリマー相はフィルム状または線状の連続相で存在するが、セメント水和物の連続性を遮断するものではないため⁷⁾、W/C は異なるものの S/C=1 および 2 の PCM においては単位セメント量の影響が大きいと考える。一方、S/C=3 の PCM においては、ポリマー連続相で被覆された細骨材が多量に含まれ、ポリマー混入の影響が顕著に現れるものと推察される。

一方、PCM の含水率は S/C の増加に伴って減少する傾向にあり、その減少に伴い電気抵抗率が大きくなると考えられるが、S/C と電気抵抗率との関係とは異なって、S/C=3 における含水率の著しい減少は認められない。なお、S/C の増加に伴う含水率の減少は、S/C の大きい PCM ほど W/C が大きいため、PCM 組織中のセメント水和物相が粗な組織であることによるものとする。

(3) 細骨材の種類の影響

Fig.11 および Fig.12 には、P/C=0 および 10%，W/C=50%，S/C=3 とし、各種細骨材を用いた PCM の材齢 364d における電気抵抗率および含水率を示す。細骨材およびポリマーの種類にかかわらず、PCM の電気抵抗率および含水率は Plain のそれよりも大きい傾向にある。一方、同一細骨材の PCM の電気抵抗率におけるポリマーの種類による差異は、細骨材の種類によって異なっており、PCM の含水率においても同様の傾向がある。しかし、ポ

リマーおよび細骨材の種類の違いが PCM の電気抵抗率に及ぼす影響については、前述した S/C=2 と S/C=3 におけるような著しい差異は認められない。

なお、細骨材の吸水率は、Table 2 に示した通り、(小)石灰岩砂<ISO 標準砂<花崗岩砂<川砂(大)の順に大きい。しかし、Fig.11 に示す通り、Plain の電気抵抗率は ISO 標準砂<川砂<石灰岩砂<花崗岩砂の順に大きいものの、PCM の電気抵抗率はポリマーの種類によって若干異なるが、石灰岩砂<ISO 標準砂≒花崗岩砂≒川砂の順に大きい傾向にある。これらのことから、本研究の限りでは、骨材の吸水率と PCM の電気抵抗率の間に明確な相関性を見出すことはできない。

4.4 電気抵抗率と含水率の関係

Fig.13 には、S/C を変化させた PCM の各材齢における電気抵抗率と含水率の関係を示す。初期材齢においては、PCM の電気抵抗率と含水率の関係を明確にすることはできないが、材齢の経過に伴い、PCM の電気抵抗率は含水率の小さいものほど大きい傾向にある。一方、材齢 182d から 364d における S/C=3 の PCM の電気抵抗率は

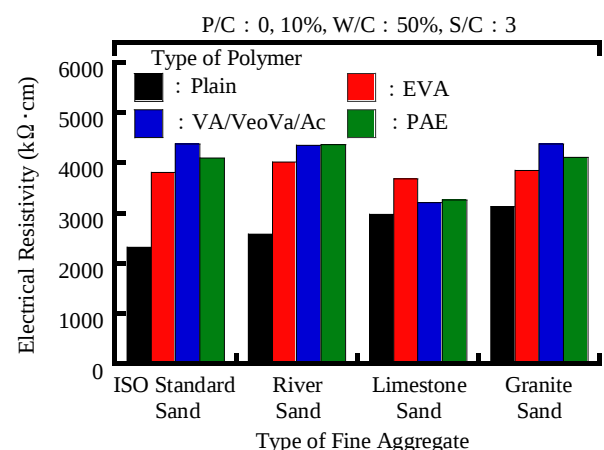


Fig.11 Electrical Resistivity at Age of 364d of PCM Using Various Fine Aggregates.

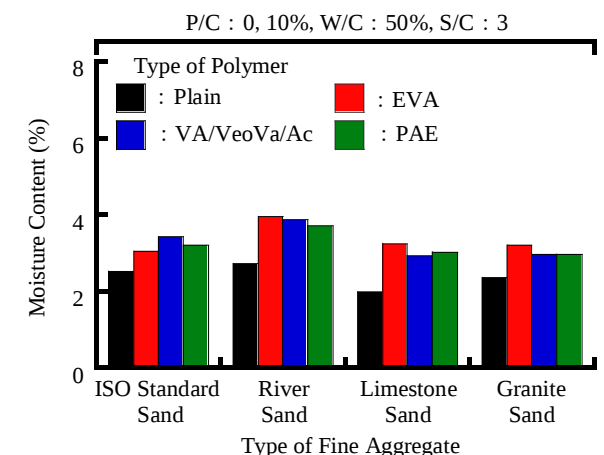


Fig.12 Moisture Content at Age of 364d of PCM Using Various Fine Aggregates.

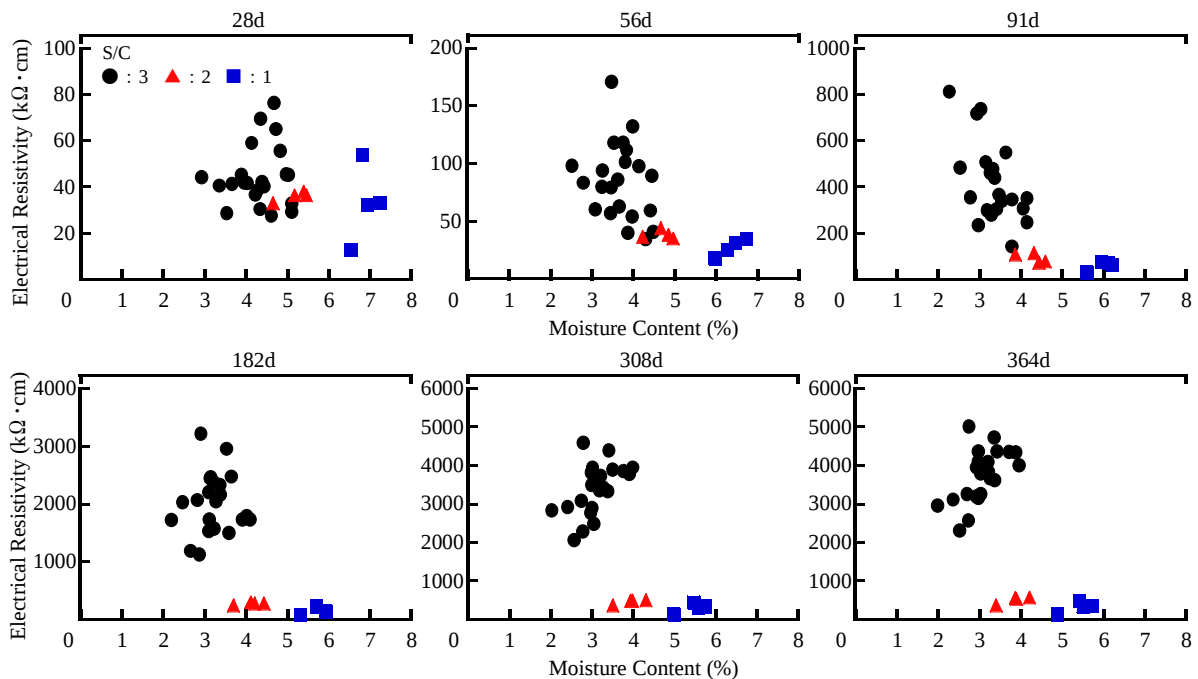


Fig.13 Moisture Content vs. Electrical Resistivity of PCM with Various S/C at Each Curing Period.

S/C=2 と同様の含水率であっても著しく大きい傾向にある。また、S/C=2 および 1 で PCM と Plain の電気抵抗率に大きな差が認められないことから PCM の電気抵抗率は、ポリマー混入による影響よりも前述の水和物中の水酸化カルシウム量による影響が大きいと推察される。

5. 結論

本研究を結論づければ、以下の通りである。

- (1) ポリマー混入の有無およびポリマーの種類にかかわらず、PCM の電気抵抗率は、材齢の経過に伴い増大する傾向にある。
- (2) ポリマー混入の有無およびポリマーの種類にかかわらず、PCM の含水率は、材齢の経過に伴い減少する傾向にあるが、材齢 91d から 364d にかけては、その値はほぼ一定値を示す。
- (3) ポリマーの種類にかかわらず、一部のものを除いて、PCM の電気抵抗率は、P/C および S/C の増加に伴い増大する傾向にあり、同様の含水率であっても特に、S/C=2 と S/C=3 において著しい差異が認められる。
- (4) 本研究の限りでは、PCM の電気抵抗率にポリマーおよび細骨材の種類が影響を及ぼすと考えられるが、それらの種類が異なる場合でも、S/C=2 と S/C=3 におけるような著しい差異は認められない。

謝辞

本研究に当っては、ジャパンコーティングレジジン (株) にセメント混和用ポリマーの提供を頂いた。また、日本大学名誉教授 出村克宣博士、(株) ケミカル工事 若杉三紀夫博士に御指導頂いた。ここに記して謝意を表す次

第である。

参考文献

- 1) 内藤英晴, 守屋 進, 川俣孝治, 皆川 浩: 各種セメント系断面修復材の電気抵抗率に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.595-600, 2008.6
- 2) 荒木裕人, 福井拓也, 神田利之, 齋藤俊克: 再乳化形粉末樹脂を用いたポリマーセメントモルタルの電気抵抗率および強さ性状に及ぼす使用材料と調合因子の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.1, pp.988-993, 2022.6
- 3) 福井拓也, 神田利之, 若杉三紀夫, 出村克宣: セメント系断面修復材の構成成分が電気抵抗率に与える影響, 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, Vol.21, pp.367-372, 2021.10
- 4) 土木学会規準: 四電極法によるコンクリートの電気抵抗率試験方法 (案), JSCE G 581, 2018
- 5) 佐藤道生, 酒井隆行, 皆川 浩, 久田 真: フライアッシュを混和したコンクリート及びモルタルの比抵抗の経時変化, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.695-700, 2010.6
- 6) 皆川 浩, 久田 真, 榎原彩野, 齋藤佑貴, 市川聖芳, 井上浩男: コンクリートの電気抵抗率と塩化物イオンの見掛け拡散係数との関係に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, pp.119-131, 2010.3
- 7) 大濱嘉彦, 出村克宣: ポリマーセメントモルタルの組織構造の形成過程, 第 25 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp.167-172, 1998.10