

論文 ポリマーセメントモルタルの中性化および塩化物イオン浸透深さ推定式の提案

西 陸登*1・齋藤 俊克*2・出村 克宣*3

要旨: 本研究では、ポリマーセメントモルタル (PCM) の中性化および塩化物イオン浸透深さに及ぼす調査要因の影響について明らかにし、特に、既往の研究によって提案したそれらの推定式における水セメント比 (W/C) および空気量の項について再検討している。その結果、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さは W/C および空気量の増加によって増大することを明確にして、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さに関する新たな推定式を提案している。また、既往の研究におけるデータを用いて、本研究で提案する推定式の妥当性を確認している。

キーワード: ポリマーセメントモルタル, 中性化・塩化物イオン浸透深さ, 推定式, 水セメント比, 空気量

1. はじめに

著者らはこれまで、ポリマーセメントモルタル (PCM) の耐透水性および耐久性に及ぼすポリマー混入率の影響について検討し、その中性化および塩化物イオン浸透深さ推定式を提案している¹⁾。なお、その提案にあたっては、PCM の曲げおよび圧縮強さ推定に関する既往の研究成果^{2), 3)}を基本にし、ポリマー混入率の項のみを対象にしており、推定式における水セメント比 (W/C) および空気量の項については、曲げおよび圧縮強さ推定式と同様に取り扱っている。しかし、それらの項については、強さ性状に及ぼす影響とは異なるものと考えられる。

そこで、本研究では、既に提案した PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さ推定式における W/C および空気量の項について再検討し、新たな推定式を提案することを目的としている。なお、提案する推定式については、既往の研究¹⁾における試験データを用いて、その妥当性を検討する。

2. 使用材料

2.1 セメント, 細骨材および練混ぜ水

セメントとしては、JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に規定される普通ポルトランドセメント、細骨材としては、阿武隈川産川砂を使用した。それらの性質を **Table 1** および **Table 2** に示す。また、練混ぜ水としては、上水道水を使用した。

2.2 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、スチレンブタジエンゴムラテックス (SBR), エチレン酢酸ビニル合成高分子樹脂エマルジョン (EVA) およびアクリル酸エステル・

メタクリル酸エステル共重合体エマルジョン (AME) を用いた。それらの性質を **Table 3** に示す。

3. 試験方法

3.1 PCM の調製

質量比で表される細骨材セメント比 (S/C) を 2, 2.5 および 3, W/C を 45, 50, 55 および 60%, ポリマー混入率を 0, 2, 4 および 6% とした調合の PCM を、JIS A 1171

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	2-08	3-32	31.0	47.8	65.1
Chemical Compositions (%)						
MgO	SO ₃	ig. loss	Total Alkali	Chloride Ion		
1.35	2.14	2.21	0.51	0.023		

Table 2 Properties of Fine Aggregate.

Size (mm)	Density (g/cm ³)	Water Absorption (%)
≤2.5	2.63	2.46

Table 3 Properties of Polymer Dispersions for Cement Modifier.

Type of Polymer	Viscosity (mPa · s)	Non Volatile Matter (%)	Glass-Transition Temp., Tg (°C)	Density of Polymer as Solids (kg/m ³)
SBR	50	45	3	1.02
EVA	1000±200	45	0	1.11
AME	300	45	4	1.11

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 工学部建築学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 日本大学 名誉教授 工博 (フェロー会員)

Table 4 Mix Proportions of PCM with Various W/C and Polymer Content.

S/C*	W/C (%)*	Polymer Content (%)**
2	45	0, 2, 4, 6
3	45, 50, 55, 60	

Notes, *: By Mass., **: By Volume.

Table 5 Mix Proportions of PCM with Various S/C.

W/C (%)*	S/C*	Polymer Content (%)**	P/C (%)*
	2, 2.5, 3	0	0
45	2		6.9~7.1
	2.5	4	7.3~7.9
	3		8.1~8.8

Notes, *: By Mass., **: By Volume.

(ポリマーセメントモルタルの試験方法)に準じて練混ぜ調製した。Table 4 には、S/C ごとに W/C およびポリマー混入率の及ぼす影響を、Table 5 には W/C を 45%一定として、S/C の影響を検討することを目的とした PCM の調合を示す。なお、PCM の W/C は、ポリマー固形分量を除く水量と練混ぜ水量の合計値から算出した。また、調合にかかわらず、すべて同様の練混ぜ容量とした。

3.2 空気量試験

JISA 1171 に従い、調製した PCM の空気量を測定した。

3.3 供試体の作製

JIS A 1171 に従い、調製した PCM を寸法 40×40×160mm に成形し、2d 湿空 [20℃, 90% (RH)], 5d 水中 (20℃) および 21d 乾燥 [20℃, 60% (RH)] 養生を行い、PCM 供試体を作製した。

3.4 促進中性化試験および塩化物イオン浸透試験

JISA 1171 に従い、促進中性化試験用供試体を、30℃, 60% (RH), CO₂ 濃度 5% の CO₂ 環境槽内に 28d 静置、塩化物イオン浸透深さ試験用供試体を JIS A 6205 (鉄筋コンクリート用防せい剤) の付属書 1 (鉄筋の塩水浸せき試験方法) の 3.2.1 (塩分溶液) に規定する塩分溶液に 28d 浸せきして、促進中性化および塩化物イオン浸透試験を行った。

4. 試験結果および考察

4.1 PCM の空気量、中性化および塩化物イオン浸透深さ

Fig.1 および Fig.2 には、PCM の空気量とポリマー混入率および S/C の関係を示す。セメント混和用ポリマーの種類、W/C および S/C にかかわらず、ポリマー混入率の増加に伴い、空気量は増加する傾向にある。これは、本研究において使用したセメント混和用ポリマーが空気連行性を有することに起因するものと考えられる。なお、SBR 混入 PCM では、同一ポリマー混入率において W/C が小さいものほど空気量が大きい傾向にある。しかし、他の PCM においてはそのような傾向は認められず、同一ポリマー混入率においてはほぼ一定の値を与える。

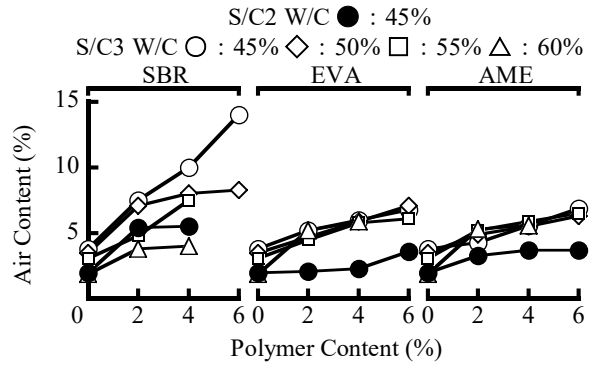


Fig.1 Polymer Content vs. Air Content of PCM with Mix Proportions of Table 4.

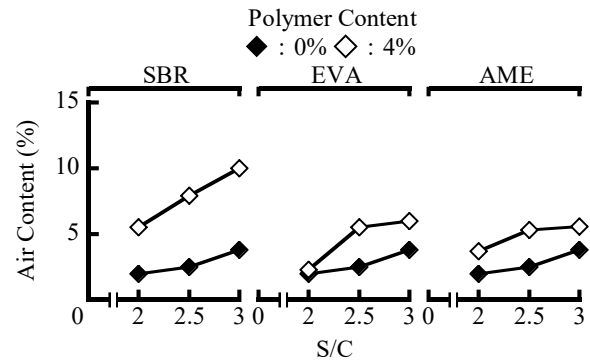


Fig.2 S/C vs. Air Content of PCM with Mix Proportions of Table 5.

一方、S/C が大きいものほど、PCM の空気量は大きい傾向にある。なお、空気泡は PCM のポリマーを含むセメントペースト相内に形成される。従って、S/C の増大、換言すれば、単位細骨材量が增大すると、PCM の攪拌に伴うエントラップトエアが増大することを示唆するものと考えられる。

Fig.3 および Fig.4 には、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さとポリマー混入率の関係を示す。一部を除いて、セメント混和用ポリマーの種類および S/C にかかわらず、W/C の小さいものほど、また、ポリマー混入率の大きなものほど、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さは小さい傾向にある。これは、W/C の低下に伴い、PCM 中の組織構造がち密になること、更に、ポリマー混入率の増加に伴い、PCM 中に形成されるポリマーフィルム相が増加することに伴い、CO₂ や水の浸入に対するバリア効果が向上するためと推察される。なお、ポリマーの種類にかかわらず、同一 W/C において、ポリマー混入率の増加に伴う、中性化および塩化物イオン浸透深さの低減の程度はほぼ同様の傾向にある。一方、S/C を一定として、セメント混和用ポリマーの添加量を練混ぜ容量に対して、0~20kg/m³ とした範囲において、気体拡散性状にほとんど変化がないという報告⁴⁾がある。本研究においても、ポリマー混入率 2% (練混ぜ容量に対して 20 から 22kg/m³) とした場合には、中性化および塩化物イオン浸透に対する抑制効果が確認できないものもあり、そ

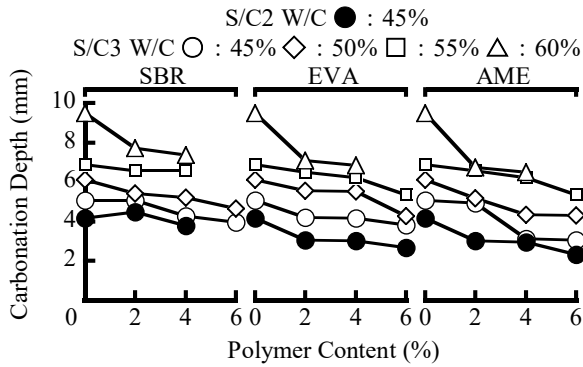


Fig.3 Polymer Content vs. Carbonation Depth of PCM with Mix Proportions of Table 4.

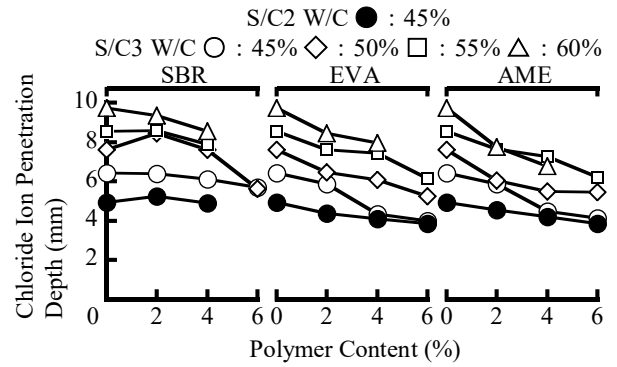


Fig.4 Polymer Content vs. Chloride Ion Penetration Depth of PCM with Mix Proportions of Table 4.

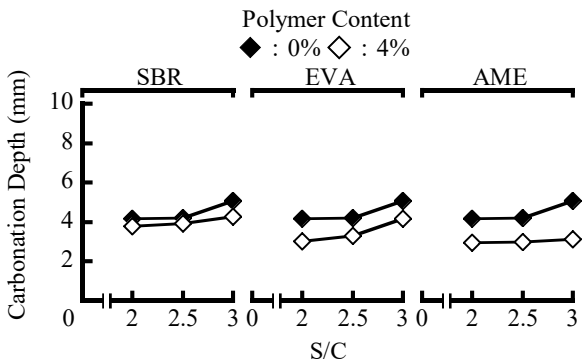


Fig.5 S/C vs. Carbonation Depth of PCM with Mix Proportions of Table 5.

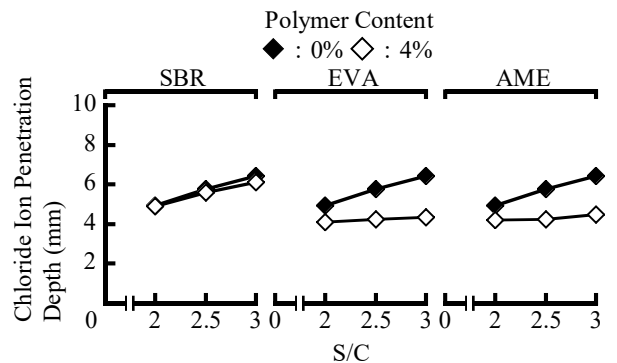


Fig.6 S/C vs. Chloride Ion Penetration Depth of PCM with Mix Proportions of Table 5.

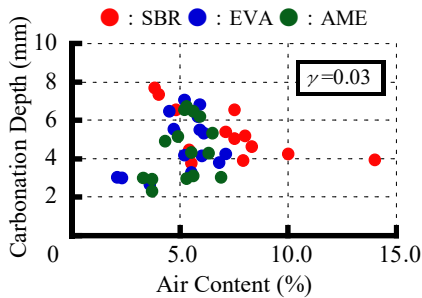


Fig.7 Air Content vs. Carbonation Depth of PCM with Mix Proportions of Table 4 and 5.

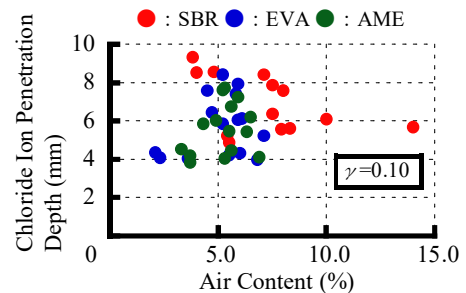


Fig.8 Air Content vs. Chloride Ion Penetration Depth of PCM with Mix Proportions of Table 4 and 5.

の効果が発揮されるポリマー混入率については、セメント混和用ポリマーの種類によって差異があるといえる。

Fig.5 および Fig.6 には、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さと S/C の関係を示す。セメント混和用ポリマーの種類およびポリマー混入率にかかわらず、S/C の増加に伴い、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さは増大する傾向にある。これは、S/C の大きいものほど空気量が増大し、PCM の内部構造が粗になることによるものと推察される。

Fig.7 および Fig.8 には、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さと空気量の関係を示す。しかし、その関係に明確な相関性を見出すことはできない。これは、前述したように、PCM の空気量はポリマー混入率および S/C によって大きく影響されることによるためと考える。

4.2 PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さ推定式の

提案

著者らは、PCM の曲げおよび圧縮強さ推定に関する既往の研究成果^{2),3)}をもとに、PCM の耐久性試験結果から、「PCM と同様の養生条件で作製された、同一の S/C および W/C を持つポリマー未混入モルタル（以下、ポリマー未混入モルタルと略称する）の中性化および塩化物イオン浸透深さ」と「式(3)および(4)で算出されるそれぞれの影響因子」との積の関数で表される、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さ推定式として式(1)および(2)を提案している¹⁾。

$$C_p = A(C_0 \cdot F_c) + B \quad (1)$$

$$Cl_p = D(Cl_0 \cdot F_{cl}) + E \quad (2)$$

ここに、 C_p 、 Cl_p :それぞれ、PCM の中性化深さ (mm)

および塩化物イオン浸透深さ (mm)

C_0 、 Cl_0 :それぞれ、ポリマー未混入モルタル

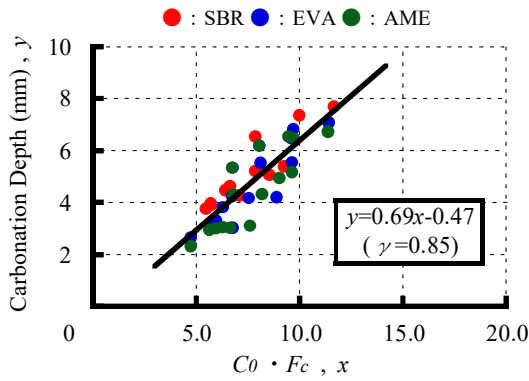


Fig.9 Product of Carbonation Depth of Unmodified Mortar and Its Effective Factor vs. Carbonation Depth of PCM.

Notes, C_0 : Carbonation depth of unmodified mortar with same S/C, W/C and curing condition of PCM.

F_c : Carbonation depth effective factor calculated by eq.(3).

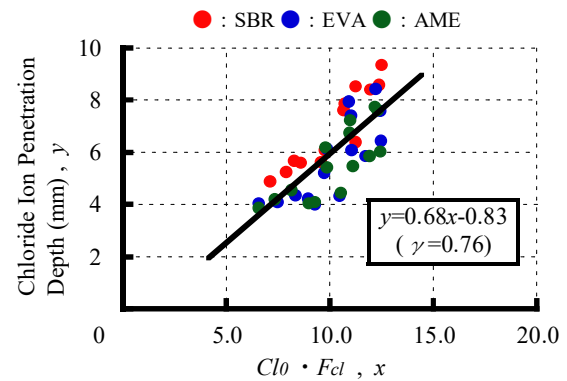


Fig.10 Product of Chloride Ion Penetration Depth of Unmodified Mortar and Its Effective Factor vs. Chloride Ion Penetration Depth of PCM.

Notes, Cl_0 : Chloride ion penetration depth of unmodified mortar with same S/C, W/C and curing condition of PCM.

F_{cl} : Chloride ion penetration depth effective factor calculated by eq.(4).

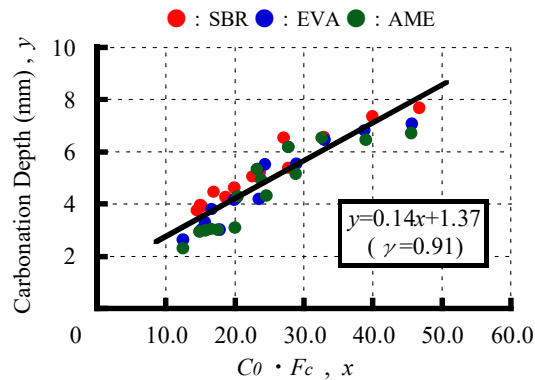


Fig.11 Product of Carbonation Depth of Unmodified Mortar and Its Effective Factor vs. Carbonation Depth of PCM.

Note, F_c : Carbonation depth effective factor calculated by eq.(5).

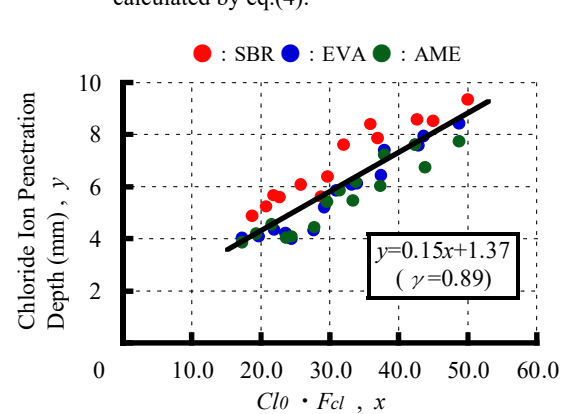


Fig.12 Product of Chloride Ion Penetration Depth of Unmodified Mortar and Its Effective Factor vs. Chloride Ion Penetration Depth of PCM.

Note, F_{cl} : Chloride ion penetration depth effective factor calculated by eq.(6).

の中性化深さ (mm) および塩化物イオン浸透深さ (mm)

F_c, F_{cl} : それぞれ, 中性化深さ影響因子および塩化物イオン浸透深さ影響因子

A, B, D, E : 実験定数

$$F_c = (1-W/C)(1-6V_p)(1-V_a)(1+5V_s) \quad (3)$$

$$F_{cl} = (1-W/C)(1-4V_p)(1-V_a)(1+5V_s) \quad (4)$$

ここに, F_c : 中性化深さ影響因子

F_{cl} : 塩化物イオン浸透深さ影響因子

W/C: 水セメント比 (kg/kg)

V_p : ポリマー固形分の体積分率 (m^3/m^3)

V_a : 空気の体積分率 (m^3/m^3)

V_s : 細骨材の体積分率 (m^3/m^3)

本研究の結果について, 式(3)および(4)で算出した影響因子を適用した場合の「ポリマー未混入モルタルの中性化および塩化物イオン浸透深さとそれらの影響因子との積」とPCMの中性化および塩化物イオン浸透深さの関係を Fig.9 および Fig.10 に示す。それらの間には相関性が認められ, その関係は, それぞれ図中に示す一般式,

換言すれば, 推定式(1)および(2)のような関数式で表すことができる。

しかしながら, 4.1 で述べたように, W/C が大きいものほど, 中性化および塩化物イオン浸透深さは大きいことは明らかであり, 式(3)および(4)における W/C に係る項は「 $(1+W/C)$ 」とするべきであると考え。そこで, 式(3)および(4)の W/C の項「 $(1-W/C)$ 」を「 $(1+W/C)$ 」とした式(5)および(6)を影響因子とした場合の Fig.9 および Fig.10 と同様の関係を Fig.11 および Fig.12 に示す。

$$F_c = (1+W/C)(1-6V_p)(1-V_a)(1+5V_s) \quad (5)$$

$$F_{cl} = (1+W/C)(1-4V_p)(1-V_a)(1+5V_s) \quad (6)$$

それらの関係については, W/C の項を「 $(1-W/C)$ 」とした場合に比べて高い相関性が認められる。

一方, 空気量が増加すれば PCM の組織構造は粗になることから, 式(3)および(4)の空気体積分率に係る項についても, W/C の場合と同様, 「 $(1+V_a)$ 」とするべきであると考え。しかし, Fig.7 および Fig.8 に示したように, 中性化および塩化物イオン浸透深さと空気量の間に明確

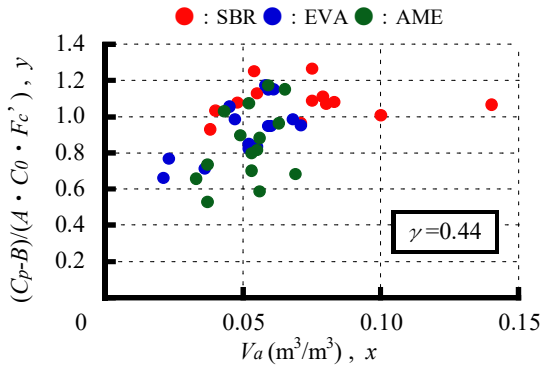


Fig.13 Effect of Air Volume on Carbonation Depth of PCM.
Notes, C_p : Carbonation depth of PCM.

F_c' : Carbonation depth effective factor calculated by eq.(7).

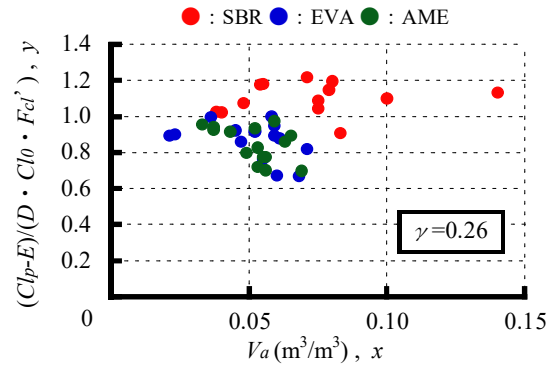


Fig.14 Effect of Air Volume on Chloride Ion Penetration Depth of PCM.

Notes, Cl_p : Chloride ion penetration depth of PCM.

F_{cl}' : Chloride ion penetration depth effective factor calculated by eq.(9).

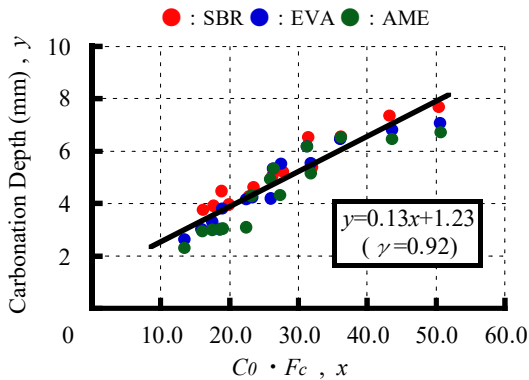


Fig.15 Product of Carbonation Depth of Unmodified Mortar and Its Effective Factor vs. Carbonation Depth of PCM.

Note, F_c : Carbonation depth effective factor calculated by eq.(11).

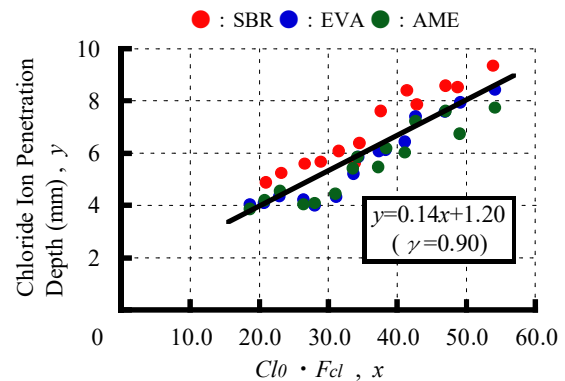


Fig.16 Product of Chloride Ion Penetration Depth of Unmodified Mortar and Its Effective Factor vs. Chloride Ion Penetration Depth of PCM.

Note, F_{cl}' : Chloride ion penetration depth effective factor calculated by eq.(12).

な相関関係を見出すことはできない。

そこで、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さと空気量の関係を明らかにすることを試みた。

中性化深さの場合、式(1)のように表すことができることから、式(1)の両辺を「ポリマー未混入モルタルの中性化深さ C_0 と、式(7)に示す空気の体積分率の項を除いた中性化深さ影響因子との積」で除することにより、式(8)のように、空気量の影響を表すこととした。また、塩化物イオン浸透深さについても、空気の体積分率の項を除いた式(9)を用いて、式(10)に示すように、空気量の影響を表すこととした。Fig.13 および Fig.14 には、式(8)および(10)の左辺と空気の体積分率の関係を示す。なお、Fig.11 および Fig.12 において、式(5)および式(6)の影響因子の算定式を用いた結果を示しているが、それらの関係を近似した実験式の相関係数が高い値として得られていることから、式(8)および式(10)の左辺の実験定数 A 、 B 、 D および E については、それぞれ、それらの図中に示す実験式の実験定数を用いている。

$$F_c' = (1+W/C) (1-6V_p) (1+5V_s) \quad (7)$$

$$(C_p-B)/(A \cdot C_0 \cdot F_c') = (1-V_a) \quad (8)$$

$$F_{cl}' = (1+W/C) (1-4V_p) (1+5V_s) \quad (9)$$

$$(Cl_p-E)/(D \cdot Cl_0 \cdot F_{cl}') = (1-V_a) \quad (10)$$

ここに、 F_c' 、 F_{cl}' : 空気の体積分率の項を除く中性化および塩化物イオン浸透深さ影響因子

Fig.13 および Fig.14 において、式(8)および(10)の左辺と空気の体積分率の関係については、相関性は弱いものの、正の相関が認められる。従って、PCM の空気量が増加すれば中性化および塩化物イオン浸透深さが増大することが確認でき、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さ影響因子における空気の体積分率の項を「 $(1+V_a)$ 」とするの妥当性が説明できると考える。

以上のことから、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さ推定のための影響因子の算定式としては以下に示す式(11)および式(12)とすることが適当であるといえる。

$$F_c = (1+W/C) (1-6V_p) (1+V_a) (1+5V_s) \quad (11)$$

$$F_{cl} = (1+W/C) (1-4V_p) (1+V_a) (1+5V_s) \quad (12)$$

なお、本研究結果について、これらの式を適用した場合の結果を Fig.15 および Fig.16 に示す。図中に付記する相関係数は、Fig.11 および Fig.12 よりも高い値として得られている。また、これらの影響因子を用いた推定式の適用性の確認を目的として、既往の研究⁷⁾で得られたデータについて再計算した結果を Fig.17 に示す。なお、既

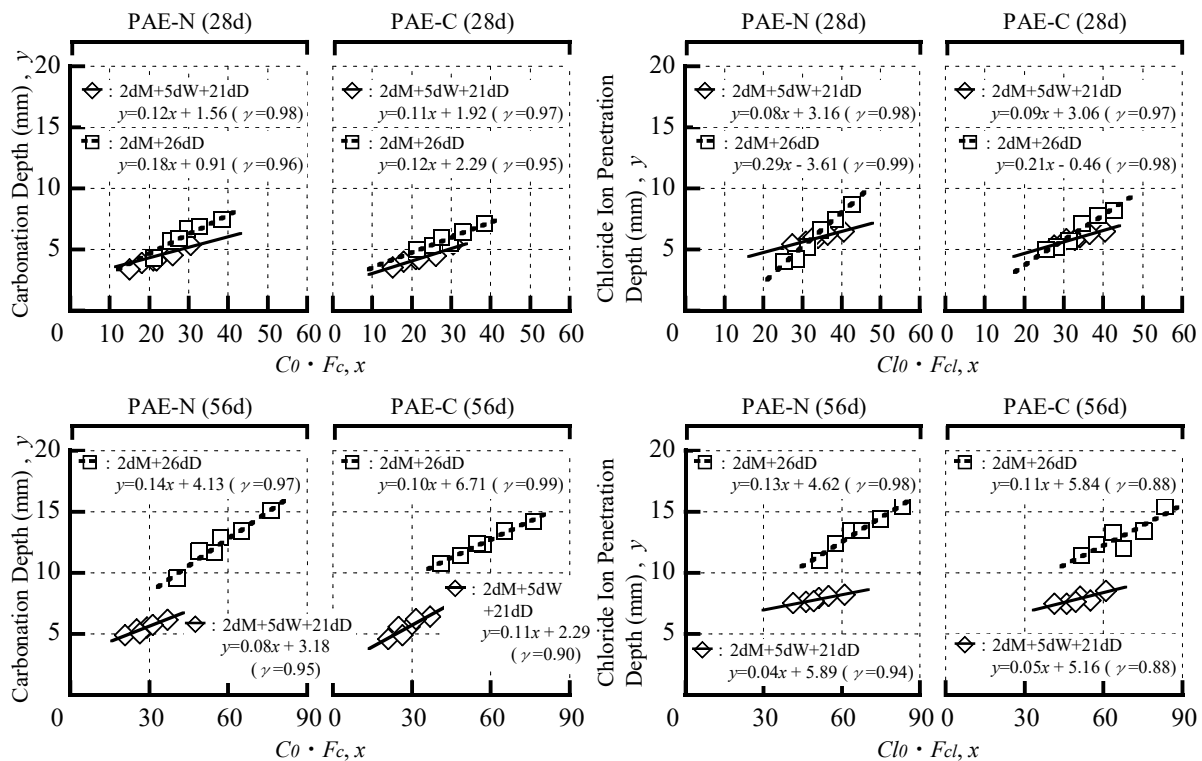


Fig.17 Product of Carbonation Depth and Chloride Ion Penetration of Unmodified Mortar and Those Effective Factors vs. Carbonation Depth and Chloride Ion Penetration of PCM Using Redispersible Polymer Powders.

Notes, F_c : Carbonation depth effective factor calculated by eq.(11).

F_{cl} : Chloride ion penetration depth effective factor calculated by eq.(12).

往の研究において、セメント混和用ポリマーとしてはノニオン系およびカチオン系アクリル酸エステル共重合樹脂の再乳化形粉末樹脂 (PAE-N および PAE-C) を使用し、各図上の 28d および 56d とは試験期間を示している。また、試験前の PCM の養生を標準養生 (2d 湿空+5d 水中+21d 乾燥) および乾燥養生 (2d 湿空+26d 乾燥) としている。図に示すように、セメント混和用ポリマーの種類、養生方法および試験期間にかかわらず、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さとその推定値との間には高い相関性が認められ、回帰式の信頼度を示す決定係数 R^2 は最も小さいものでも 0.77 である。

以上のことから、PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さ推定式として式(1)および(2)、その影響因子算定式として式(11)および式(12)が提案できるものとする。

5. 結論

本研究を結論づければ、以下の通りである。

- (1) PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さは、W/C、空気量および S/C の増加に伴い増大し、ポリマー混入率の増大に伴い減少する傾向にある。
- (2) PCM の中性化および塩化物イオン浸透深さ推定式

として式(1)および(2)が提案でき、それに用いる中性化および塩化物イオン浸透深さ影響因子の算定式として、式(11)および式(12)が提案できる。

参考文献

- 1) 出村克宣, 齋藤俊克, 武田昌也: ポリマーセメントモルタルの耐透水性及び耐久性に及ぼすポリマー混入率の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.73, pp.95-102, 2020.3
- 2) 西田 電, 齋藤俊克, 出村克宣, 我喜屋宗満: ポリマーセメントモルタルの曲げ及び圧縮強さ性状に及ぼすポリマー混入率の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.72, pp.99-105, 2019.3
- 3) 西 陸登, 齋藤俊克, 出村克宣: ポリマーセメントモルタルの圧縮および曲げ強さ推定式の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.928-933, 2023.6
- 4) 白川敏夫, 花井信明: ポリマーセメントモルタルの気体拡散性状へのポリマー量及びセメント水和の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, pp.231-236, 2014.3