

# 論文 コンクリートの比抵抗モデルを用いた腐食レベルの推定

鈴木 三馨\*1・石田 哲也\*2

**要旨**：実構造物において、コンクリートの比抵抗は内部鉄筋の腐食性を評価する判定基準として用いられている。本論文では、任意の水結合材比、高炉スラグ微粉末（以下、BFS）の混合率、骨材体積率およびコンクリートの含水状態におけるコンクリートの比抵抗の推定モデルを提案するとともに、提案したモデルにより乾湿繰返し条件におけるコンクリートの比抵抗による腐食性の評価を行った。その結果、乾燥期間を考慮した腐食リスクの判定が可能となった。また、乾湿条件下の腐食リスク“なし”の判定となる水結合材比は、BFSを質量比で0.5混合することで39%から64%になるなど、BFSの耐腐食性を示すことができた。

**キーワード**：比抵抗, 腐食レベル, 塩害, 高炉スラグ微粉末, 水掛かり

## 1. はじめに

実構造物においてコンクリートの比抵抗の測定結果は、国内では表-1に示すコンクリート内部の鉄筋の腐食性を評価する判定基準として用いられている<sup>1)2)3)</sup>。海外ではFeliuらやRILEMにおいてコンクリートの比抵抗により腐食リスクを判定する方法が提案されている<sup>4)5)</sup>。

このように、コンクリートの比抵抗はコンクリート中の鋼材の腐食状況を直接表すものではないが、腐食電流密度を支配するので、塩害を受けるコンクリート構造物内にある鉄筋の腐食リスクを評価する重要な指標である。

従来、このような腐食性評価は実構造物で測定された比抵抗を用いているが、任意の配合、環境条件下、かぶり位置のコンクリートの比抵抗を解析的に算定することができれば、実構造物の比抵抗の測定を必要とせずに腐食リスクを予測することが可能となる。

そこで本論文では、任意の水結合材比、高炉スラグ微粉末（以下、BFS）の混合率（質量比）、骨材体積率およびコンクリートの含水状態におけるコンクリートの比抵抗の推定モデルを提案するとともに、提案したモデルにより乾湿繰返し条件と常時湿潤条件におけるコンクリートの比抵抗による腐食リスクの予測を行った。

## 2. コンクリートの比抵抗のモデル化

コンクリートの比抵抗のモデル化に際して、まずセメ

ントペーストの比抵抗を既知として骨材体積率がコンクリートの比抵抗に与える影響について検討し、その後、セメントペーストのモデル構築を行った。

胡桃澤らは、並列回路モデルでセメントペーストと骨材体積率からモルタルの比抵抗の予測をしている<sup>6)</sup>。結合材には普通ポルトランドセメント（以下、OPC）を用い、水結合材比、骨材体積率をパラメータとしている。試験体の比抵抗の測定方法は交流インピーダンス法である。並列回路モデルによるコンクリートの比抵抗の予測値の実験値との比較を図-1に示す<sup>6)</sup>。凡例のOPC\_40\_0.58は、OPCを使用材料とし、水結合材比は40%、骨材体積率は0.58を示す。なお、図-1は縦軸の電気伝導率をその逆数である比抵抗に修正している。また、測定した材齢は1, 3, 7, 14, 28, 56, 91日である。水結合材比40%では、骨材体積率0.2, 0.4では良く実験値を示しているが、骨材体積率0.58では、実験値に比べ比抵抗を小さく予測する傾向がある。そこで、著者らはMcCarterのコンクリートのモデル<sup>7)</sup>を元に、コンクリートの比抵抗のモデルとして、図-2のような直列並列複合回路の設定を試みた。その際、骨材のみの接触によって流れる場合はほとんどないとし、その影響を無視した。直列並列複合回路によるコンクリート全体の比抵抗を式(1)～式(2)に示す。ここで、骨材体積率 $V_{s+g}$ はパラメータ

表-1 コンクリートの比抵抗による鋼材腐食性評価の例<sup>1)</sup>

Cavalier and Vassie		Taylor Woodrow Res.Lab.		武若および小林	
比抵抗の範囲	腐食性	比抵抗の範囲	腐食性	比抵抗の範囲	腐食性
>12,000	微候なし	>20,000	なし	>10,000	小さい
5,000~12,000	危険性あり	10,000~20,000	小さい	5,000~10,000	不確定
		5,000~10,000	大きい		
<5,000	確実	<5,000	非常に大	<5,000	大きい

注)測定方法はいずれも4点電極法(Wenner法)による。(単位:  $\Omega \cdot \text{cm}$ )

\*1 大成建設(株) 横浜支店横浜環状南線桂台トンネル工事作業所 工博 (正会員)

\*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

A, Bの積となる(図-2)。胡桃澤らの並列回路モデル<sup>6)</sup>は、このパラメータBを1とし、骨材の比抵抗を無限大としたものと同様となる。

骨材の体積率の影響を正規化する目的で、細粗混合骨材の体積率を細粗混合骨材の最大混合体積率(実積率)で除した正規化骨材体積率を定義し、式(2)に示すパラメータAの関数とした。細粗混合骨材の最大混合体積率の算定には、セメント協会の流動性研究委員会報告書<sup>8)</sup>の手法を用いた。

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{1-A}{\rho_p} + \frac{A}{\rho_p(1-B) + \rho_{s+g} \cdot B} \quad (1)$$

$$A = a_1 \cdot V_{s+g} / V_{s+g,max} \quad (2)$$

ここに、

- $\rho_c$  : コンクリートの比抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
- $\rho_p$  : セメントペーストの比抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
- $\rho_{s+g}$  : 細粗混合骨材の比抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
- A, B : 骨材の体積率がコンクリートの比抵抗に与えるパラメータ ( $V_{s+g} = A \cdot B$ ) ( $0 \leq A, B \leq 1$ )
- $V_{s+g}$  : 細粗混合骨材の体積率
- $V_{s+g,max}$  : 細粗混合骨材の最大混合体積率
- $V_{s+g} / V_{s+g,max}$  : 正規化骨材体積率
- $a_1$  : 細粗混合骨材が比抵抗に及ぼす影響パラメータ

胡桃澤らの比抵抗測定実験<sup>6), 9)</sup>および皆川らの比抵抗測定実験<sup>11)</sup>を元に、細粗混合骨材が比抵抗に及ぼす影響パラメータ $a_1$ を算定した。胡桃澤らの実験に用いた結合材はOPCであり、水結合材比は40%、骨材体積率は0.2, 0.4, 0.58の3水準である。皆川らの実験に用いたBFSの混合率は0.5であり、水結合材比は50%、骨材体積率は0.32~0.67である。細粗混合骨材が比抵抗に及ぼす影響パラメータA, Bの算定には、セメントペーストの比抵抗 $\rho_p$ は各材齢の測定値<sup>9)</sup>を用い、骨材の比抵抗 $\rho_{s+g}$ は既往の岩石の比抵抗値<sup>10)</sup>を参考に $1.0 \times 10^8$  ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )とし

た。実験諸元およびパラメータA, Bの計算結果を表-2に示す。

正規化骨材体積率と細粗混合骨材が比抵抗に及ぼす影響パラメータAとの関係を図-3に示す。正規化骨材体積率とパラメータAは線形の関係となり、式(2)の $a_1 = 0.88$  (OPC),  $0.95$  (BFSの混合率0.5)とした。

前述した胡桃澤らによる材齢1,2,3,14,91日の比抵抗測

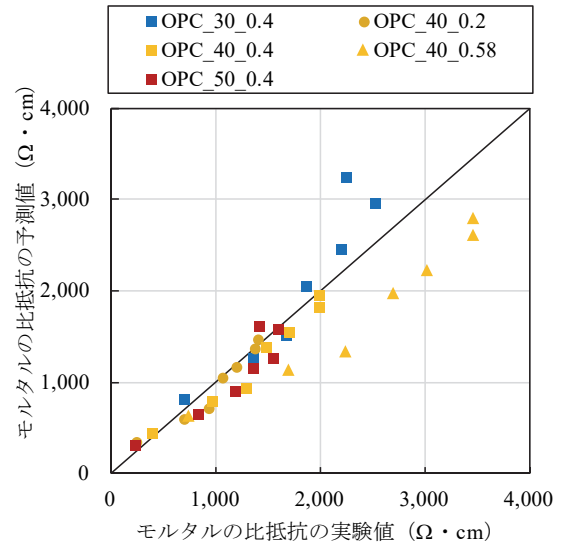


図-1 並列回路モデルによるコンクリートの比抵抗の比較<sup>6)</sup>

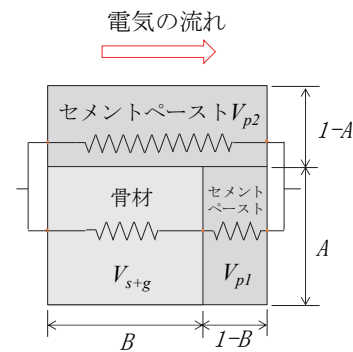


図-2 直列並列複合回路

表-2 胡桃澤らおよび皆川らの実験諸元およびパラメータA, Bの計算結果<sup>6), 9), 10)</sup>

水結合材比(%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )					BFSの混合率	$V_{s+g}$	$V_{s+g} / V_{s+g,max}$	材齢(日)	モルタル比抵抗 $\rho_m$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	セメントペースト比抵抗 $\rho_p$	骨材比抵抗 $\rho_{s+g}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	パラメータ					
	W	OPC	BFS	S	G								A	B				
40	422	1055	0	528	0	0	0.2	0.26	28	1,202	933	1.E+08	0.22	0.89				
													0.21	0.97				
	310	776		1056			0	0	0.4	0.53	28		1,698	933	0.45	0.89		
															0.45	0.89		
	210	524		1531			0	0	0.58	0.77	28		3,020	933	0.69	0.84		
															0.68	0.85		
50	411	411	0.5	834	0.5	0.5	0.32	0.42	92	5,040	2,660	1.E+08	0.47	0.67				
													0.69	0.70				
	312	312		1265			0	0		0.48			0.64	92	8,540	2,660	0.80	0.73
																	0.72	0.73
	252	252		1525			0	0		0.58			0.77	92	13,300	2,660	0.81	0.74
																	0.81	0.74
216	215	861	0	0	0.60	0.79	92	13,870	2,660	0.83	0.80							
										0.83	0.80							
174	173	693	0	0	0.67	0.88	92	16,090	2,660	0.83	0.80							
										0.83	0.80							

定実験<sup>9)</sup>および皆川らによるセメントペースト、モルタル (M) およびコンクリート (C) の比抵抗測定実験<sup>11)</sup>を用いて、コンクリートの比抵抗モデルの検証を行った。皆川らの研究の BFS の混合率は 0, 0.5 で、水結合材比は 40%, 50%, 60%, 骨材体積率は 0.32~0.67 である。セメントペーストの比抵抗は各材齢の測定値を用い、骨材の比抵抗は  $1.0 \times 10^8 (\Omega \cdot \text{cm})$ <sup>10)</sup>とした。直列並列複合回路による比抵抗の実験値と予測値の比較を図-4 に示す。凡例の BFS\_50\_M は BFS の混合率を 0.5, 水結合材比を 50%, モルタルを示す。ピンクの白抜きで示す OPC\_40\_M が図-1 で示す水結合材比 40%の骨材体積率 0.2, 0.4, 0.58 の結果をまとめて示したものであるが従来の並列回路モデルに比べて、材齢 1 日から 91 日においても、骨材

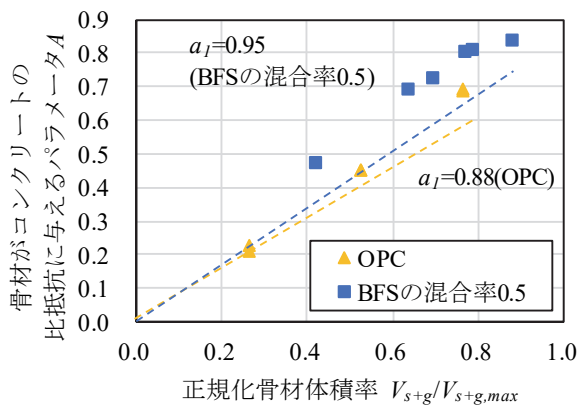


図-3 正規化骨材体積率と骨材がコンクリートの比抵抗に与えるパラメータ A (OPC, BFS)

▲ OPC_40_M	▲ OPC_60_M	▲ OPC_50_M
▲ BFS_50_M	■ OPC_50_C	■ BFS_50_C
△ OPC_30_M	△ OPC_40_M	△ OPC_50_M

凡例 塗りつぶし：皆川ら実験，白抜き：胡桃澤ら実験

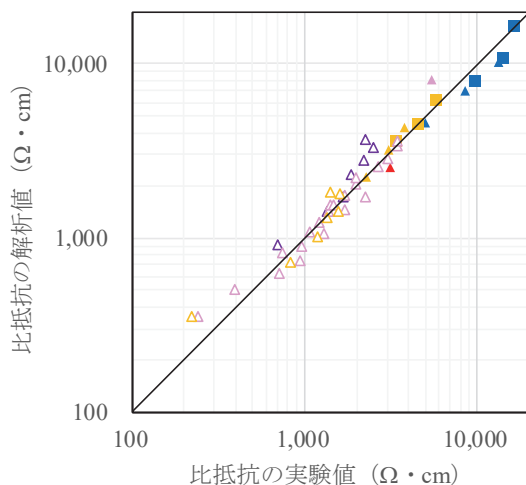


図-4 直列並列複合回路モデルによるコンクリートの比抵抗の比較

体積率 0.2 から 0.58 までの実験値を精度良く予測できるようになり、また BFS の混合率 0.5 の場合を考慮できた。BFS を混合することによりパラメータ  $a_1$  が大きくなり直列回路寄りとなる。BFS の混合により、セメントペーストと骨材の界面 (遷移帯) を強化し、品質が改善したものと考えられる。

### 3. セメントペーストの比抵抗のモデル化

これまでに BFS を混合することで、セメントペーストの比抵抗が増大することが確認されている<sup>例え ば 9), 12), 13)</sup>。しかし、BFS を混合したコンクリートの比抵抗を考慮した解析的研究例はほとんどない。そこで、水結合材比だけでなく BFS の混合率の影響を考慮したセメントペーストの比抵抗のモデルの構築を目指した。

モルタルおよびコンクリートの比抵抗測定実験の結果<sup>15)</sup>を用いて、2 章でモデル化したコンクリートの比抵抗モデルから逆算してセメントペーストの比抵抗を算出した。比抵抗測定実験に使用した結合材は、OPC のみおよび OPC に BFS を置換したもの (BFS の混合率 0.48) とし、水結合材比は 35, 45, 55% である。東京大学コンクリート研究室が開発している熱力学連成解析システム DuCOM<sup>16)</sup>にて比抵抗測定実験の条件を与えてセメントペースト中の電子は、主にセメントペースト中の水中を移動し空隙表面の電気二重層により拘束されると仮定した。毛細管空隙とゲル空隙中の液状水量から、空隙表面の電気二重層による拘束されて電子移動に影響を与えない水量を差し引いたものを毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水量と定義して、DuCOM で算出した毛細管空隙とゲル空隙の空隙率 ( $\phi_{cp}, \phi_{gl}$ ), 飽和度 ( $S_{cp}, S_{gl}$ ), 比表面積 ( $S_{urf, cp}, S_{urf, gl}$ ) を用いて、毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水量を求めた。

想定する毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水量とセメントペーストの比抵抗の関係を図-5 に示す。セメントペーストの比抵抗は、a) 毛細管空隙とゲル空隙中の有効液状水量、および b) 毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水中の電子の移動経路長の影響を受けると仮定した。毛細管空隙とゲル空隙中の有効液状水量を式 (3)~式 (10) に示す。

$$W_{ef} = (\Phi_{cp} \cdot S_{cp} + \Phi_{gl} \cdot S_{gl}) - (W_{trap, cp} + W_{trap, gl}) \quad (3)$$

$$W_{trap, cp} = S_{urf, cp} \cdot \left(\frac{1}{\kappa}\right) \quad (4)$$

$$W_{trap, gl} = S_{urf, gl} \cdot \left(\frac{1}{\kappa}\right) \quad (5)$$

$$\frac{1}{\kappa} = W/B + 0.188 \cdot P_{sg} - 0.03 \quad (6)$$

$$\rho_p = \Omega \cdot \alpha_2 \cdot W_{ef}^{\beta_2} \quad (7)$$

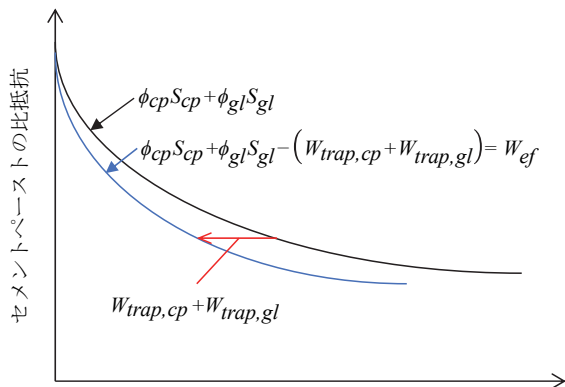
$$\Omega' = \left(\frac{\tau}{\tau_0}\right)^2 \quad (8)$$

$$\tau = \frac{L_e}{L} \quad (9)$$

$$\frac{\tau}{\tau_0} = 0.96 \cdot P_{sg} + 1 \quad (10)$$

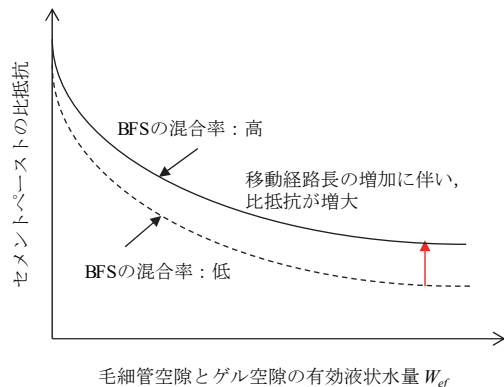
ここで、

$\phi_{cp}$  : 毛細管空隙の空隙率,  $\phi_{gl}$  : ゲル空隙の空隙率,  $S_{cp}$  : 毛細管空隙の飽和度,  $S_{gl}$  : ゲル空隙の飽和度,  $W_{ef}$  : 毛細管空隙とゲル空隙中の有効液状水量,  $W_{trap,cp}$ ,  $W_{trap,gl}$  : 毛細管空隙またはゲル空隙表面の電気二重層による拘束されて電子移動に影響を与えない水量,  $\kappa$  : デバイパラメータ (1/m),  $S_{surf,cp}$  : 毛細管空隙の比表面積 (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>),  $S_{surf,gl}$  : ゲル空隙の比表面積 (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>),  $\Omega'$  : BFS を混合したセメントペーストの屈曲度のパラメータ,  $\tau$  : セメントペーストの屈曲度,  $\tau_0$  : OPC のセメントペーストの屈曲度,  $L_e$  : 屈曲経路長,  $P_{sg}$  : BFS の混合率 (質量比)



毛細管空隙とゲル空隙の液状水量  $\phi_{cp}S_{cp} + \phi_{gl}S_{gl}$  (黒線)  
毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水量  $W_{ef}$  (青線)

a) 毛細管空隙とゲル空隙中の有効液状水量とセメントペーストの比抵抗



毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水量  $W_{ef}$

b) 毛細管空隙とゲル空隙中の電子の移動経路長の効果  
図-5 セメントペーストの比抵抗モデルのイメージ

式 (6) に示すデバイ長の算定式は菊池による水結合材比および BFS の混合率とデバイ長の関係から、式 (10) に示す BFS の混合率の影響は菊池による屈曲度と混合率の関係から簡易的に定式化した<sup>14)</sup> (図-6)。BFS の混合率が大きくなると、C-S-H の Ca/Si 比が小さくなるということが明らかになっており<sup>14)</sup>、C-S-H の形態の変化が電子の移動経路長に影響しているものと推察される。

参考文献 15) の実験結果の毛細管空隙およびゲル空隙の有効液状水量とセメントペーストの比抵抗を図-7 に示す。OPC のデータの近似により、OPC のセメントペーストの比抵抗の実験式が得られた。OPC の実験式と式 (7) ~ 式 (10) による、BFS の予測式は実験結果を精度良く予測することができた。

4. コンクリートの比抵抗モデルを用いた塩害による腐食リスクの予測

第2章~第3章で構築したコンクリートの比抵抗モデルを用いて、任意の配合、乾湿条件下、かぶり位置のコンクリートの比抵抗を算定し、表-1 に示す鉄筋の腐食性を評価する判定基準の内 Taylor Woodrow Res. Lab. の基準を用いて、腐食リスクを予測した。

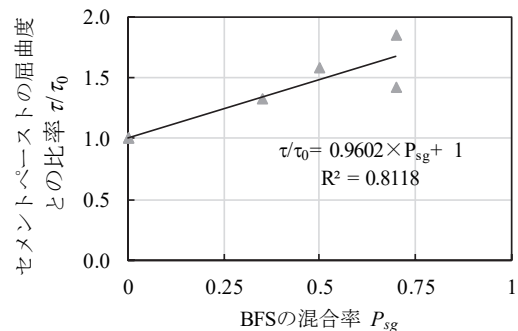


図-6 BFS の混合率と BFS なしのセメントペーストの屈曲度との比率の関係<sup>13)</sup>

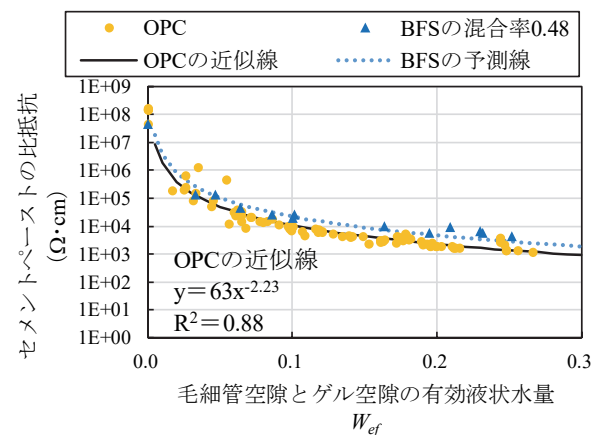


図-7 毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水量とセメントペーストの比抵抗

#### 4.1 計算条件

結合材に OPC を使用したもの (OPC) と結合材に OPC に BFS を混合比 0.5 (質量比) で混合したもの (BFS0.5) とした。水結合材比は 35, 45, 55, 65% とした。配合名は、結合材\_水結合材比 (例えば, OPC\_45) とした。骨材体積率は一律で 0.69 とし、コンクリートの比抵抗の骨材体積率による影響を排除した。解析ソフトは DuCOM<sup>16)</sup> を用い、解析モデルは片端部を曝露面にして奥行 400mm の 1/2 モデルで行った。出力位置は表面から 25mm, 50mm, 100mm, 150mm, 200mm の位置とした。曝露面の環境条件は、材齢 28 日までを 20°C, 99.9%RH とし、その後、湿潤期間を 20°C, 99.9%RH, 乾燥期間を 20°C, 60.0%RH とする乾湿繰返しとした。乾湿繰返しは、3 日湿潤 4 日乾燥 (3W4D), 1 日湿潤 13 日乾燥 (1W13D) および 1 日湿潤 27 日乾燥 (1W27D) の 3 通りを行い、参考に 20°C, 99.9%RH で湿潤養生一定のケース (W) も行った。

#### 4.2 計算結果

一例として、配合名 OPC\_45 の曝露条件 3W4D の場合の毛細管空隙とゲル空隙中の有効液状水量から算出したコンクリートの比抵抗の経時変化を図-8 に示す。凡例の L25 はかぶりが 25 mm を示す。かぶり 25mm において乾湿繰返しの影響を強く受ける。また、材齢とともにコンクリートの比抵抗は緩やかに増大し材齢 200 日以降ではほぼ一定となる。

かぶり 50mm 位置における曝露条件 3W4D の場合の、配合が腐食リスクに与える影響を図-9 に示す。検討した材齢はコンクリートの比抵抗がほぼ一定となる 300 日付近の湿潤 3 日目末とした。水結合材比が小さいほど、また、BFS を混合することで比抵抗が増大する結果が得られた。3W4D の場合の乾湿条件下のかぶり 50mm 位置において腐食リスク“なし”の判定となる水結合材比は、BFS を質量比で 50% 混合することで 39% から 64% になる

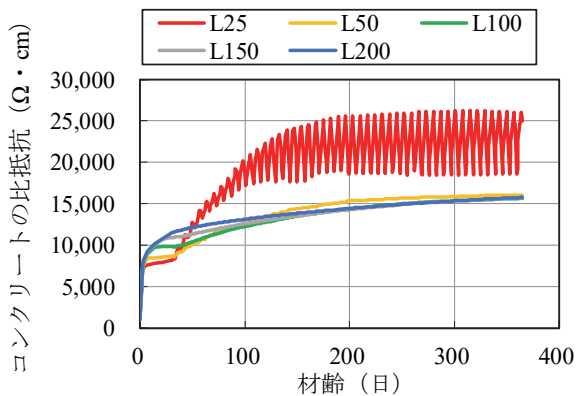


図-8 コンクリートの比抵抗の経時変化  
(配合名 OPC\_45, 曝露条件: 3W4D)

など、BFS を用いたコンクリートが発揮する鋼材の保護性能を示すことができた。一般にかぶりが浅いほど、水掛かりがコンクリートの比抵抗に与える影響が大きい。毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水量によりセメントペーストの比抵抗モデルを用いる本手法により、降雨などによる水掛かりが腐食リスクに与える影響を評価することができる。結合材に OPC を用いた場合のかぶり 50mm 位置での乾燥期間と比抵抗の関係を図-10 に示す。凡例の OPC35 は結合材に OPC を使用し、水結合材比 35% を示す。環境条件の W, 3W4D, 1W13D, 1W27D の乾燥期間は、それぞれ 0, 4, 13, 27 日とした。コンクリートの比抵抗は材齢 300 日付近の湿潤時の値とした。

乾燥環境 (3W4D, 1W13D, 1W27D) では、水和反応で消費された水が戻らないため、湿潤環境 (W) に比べて、コンクリートの比抵抗は大きくなる。一方で、湿潤環境のコンクリートの比抵抗は小さいが、実環境において腐食因子のひとつである溶存酸素の供給量が少ないため実際の腐食リスクは小さいと考えられる。

本条件での腐食リスクの算定では、水結合材比が 35% の場合は乾燥期間によらず腐食リスクなしとなり、水結合材比 45% では乾燥期間 11 日以上で、結合材比 55% で

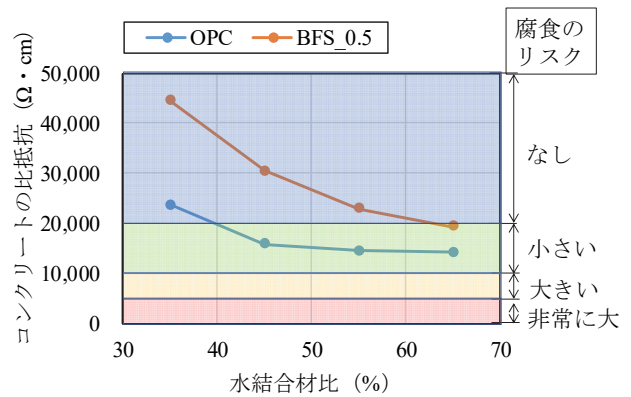


図-9 配合が腐食リスクに与える影響  
(3W4D, かぶり 50mm)

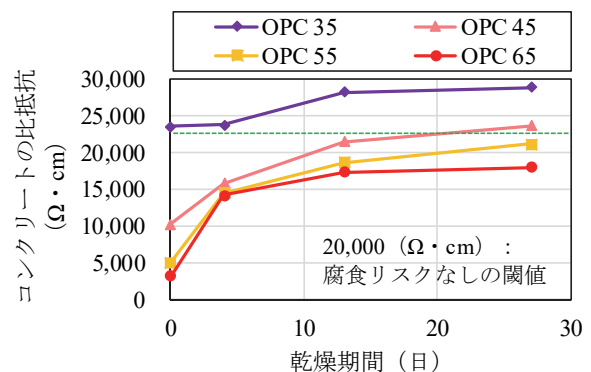


図-10 乾燥期間と比抵抗の関係 (かぶり 50mm)

は乾燥期間 20 日以上で腐食リスクなしとなり、水結合材比 65%では乾燥期間を 27 日としても腐食リスクなしとはならない結果となる。

このように、腐食リスクの閾値とコンクリートの比抵抗を比較することで、配合毎に乾燥期間が腐食リスクに与える影響を算定することが可能となる。

## 5. まとめ

本論文では、任意の水結合材比、BFS の混合率、骨材体積率およびコンクリートの含水状態におけるコンクリートの比抵抗の推定モデルを提案するとともに、提案したモデルにより乾湿繰返し条件と湿潤条件におけるコンクリートの比抵抗による腐食リスクの予測を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 直列並列複合回路モデルによるコンクリートの比抵抗モデルを構築した。任意の骨材体積率のコンクリートの比抵抗の予測が可能となり、並列回路モデルに比べて骨材体積率が 0.58 の場合の予測精度を向上させることができた。また、BFS の混合率 0.48 の場合を考慮できた。BFS を混合することにより細粗混合骨材が比抵抗に及ぼす影響が大きくなり直列回路寄りとなる。BFS の混合により、セメントペーストと骨材の界面（遷移帯）を強化し、品質が改善したものと考えられる。
- (2) 毛細管空隙とゲル空隙の有効液状水量を用いたセメントペーストの比抵抗モデルを構築した。任意の水結合材比、BFS の混合率、および含水状態におけるセメントペーストの比抵抗の予測が可能となった。
- (3) 鉄筋の腐食性を評価するコンクリートの比抵抗の判定基準とコンクリートの比抵抗モデルを用いて、任意の配合、環境条件下、かぶり位置のコンクリートの腐食リスクを予測することを可能とした。また、BFS を混合することによる耐腐食性の向上および水掛かりがコンクリートの腐食リスクに与える影響を示すことができた。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338 委員会）成果報告書（その 2）およびシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ 99，2012.10.
- 2) 武若耕司：コンクリートの非破壊検査方法（原理と手法）—鋼材腐食—，特集\*コンクリートの非破壊検査/3.8，コンクリート工学，Vol.27，No.3，pp.69-74，1989.
- 3) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'17

[基礎編]，pp.198-199，2017.

- 4) Feliu, S., Andrade, C., Gonzalez, J.A. and Alonso, C. : A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete, *Materials and Structures*, Vol.29, pp.362-365, 1996.
- 5) Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, O., Gulikers, J., Weidert, R. and Raupach, M. : Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, *Materials and Structures*, Vol.33, pp.603-611, 2000.12.
- 6) 胡桃澤清文，名和豊春：モルタルの電気伝導性に及ぼす水セメント比と骨材量の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.68，pp.171-177，2014.
- 7) McCarter, W. J. : Resistivity testing of piled foundations, A thesis submitted for the degree of doctor of philosophy, 1981.
- 8) セメント協会：流動性研究委員会報告書，pp.279-284，2003.9.
- 9) 胡桃澤清文，名和豊春：高炉スラグペーストの電気伝導性による塩分浸透性と微細構造評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.66，pp.127-134，2012.
- 10) 関根一郎，西牧均，石垣和明，原敏昭，斎藤章：岩石の比抵抗値とその力学的性質との関係，土木学会論文集，No.541，III-35，pp.75-86，1996.
- 11) 皆川浩，久田真，榎原彩野，齊藤佑貴，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の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，No.1，pp.119-131，2010.3.
- 12) 榎原彩野，皆川浩，久田真：モルタルの電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数との関係に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.789-794，2008.
- 13) Hou, W.M., Chang, P.K., Hwang, C.L. : A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag, *Cement and Concrete Research*, 34,pp.625-622,2004.
- 14) 菊池道生：水和物の物理科学的性質に基づくセメント系硬化体における物質移動性状の評価，新潟大学学位論文，2014.9.
- 15) 鈴木三馨，石田哲也：コンクリートの比抵抗の相違を考慮した鋼材腐食解析手法による進展期末の推定，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.38，No.1，pp.879-884.
- 16) 石田哲也：微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム，東京大学博士論文，1999.