

論文 種々の使用材料や配合が異なるコンクリートを用いた電気抵抗率試験の適用性評価

小田部 貴憲^{*1}・櫻庭 浩樹^{*2}・俵 道和^{*3}・古賀 裕久^{*4}

要旨: コンクリートの塩分侵入抵抗性の迅速評価手法としての適用性を検討する目的で、使用材料や配合が様々なコンクリートを対象に電気抵抗率試験を行い、その結果を非定常・電気泳動試験および浸せき試験と比較した。その結果、産地等の違いにより品質の異なるフライアッシュや細骨材を使用したコンクリートについても、電気抵抗率と非定常・電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数は概ね反比例の関係にあることがわかった。また、電気抵抗率が大きいコンクリートは、浸せき試験中の塩分侵入抵抗性に優れる傾向にあることを確認した。

キーワード: 電気抵抗率, 非定常・電気泳動試験, 浸せき試験, 塩分侵入抵抗性, 迅速評価

1. はじめに

近年、プレストレストコンクリート橋の高耐久化を実現するための方法の一つとして高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を用いる方法が注目されている。塩害環境での長期暴露試験結果からも、低水結合材比で混和材を活用したコンクリートは、高い塩分侵入抵抗性を有し、見掛け上塩化物イオンの侵入が停止しているように見える場合もあることが明らかにされている¹⁾。しかし、この効果を定量的かつ迅速に評価する試験方法は確立していない。既存の塩分侵入抵抗性の評価には浸せき試験や電気泳動試験があるが、混和材を用いた水結合材比が低い、特に緻密なコンクリートの場合、これらの試験に要する期間は長期化し、品質管理の手法として用いるのは難しいと考えられる。

このような背景から、著者らは、塩分侵入抵抗性の評価手法として非定常・電気泳動試験を提案している。これまでの検討において、この試験方法は高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用による塩分侵入抵抗性の向上効果を評価でき、比較的短い期間で実施できることを示している²⁾。また、非定常・電気泳動試験から得られる塩化物イオン拡散係数とコンクリートの電気抵抗率が概ね反比例の関係であることから、近年は、さらに簡易に塩分侵入抵抗性を評価できる手法として電気抵抗率試験が活用できる可能性を示してきた²⁾。しかし、これまでの検討で用いた材料の種類はある程度限定されており、様々な条件に適用するためには信頼性を高める必要があった。

そこで、産地等の異なる混和材や骨材を用いたコンクリートを対象に電気抵抗率試験を行い、その結果を非定常・電気泳動試験および浸せき試験の結果と比較し、塩分侵入抵抗性の評価手法としての適用性を検討した。

2. 実験方法

2.1 コンクリート配合と基礎物性

コンクリートの配合と基礎物性を表-1に示す。また、用いたポルトランドセメントの品質を表-2に示す。配合は計24種類である。従来のプレキャストプレストレストコンクリートを想定した配合を基本として、結合材の一部を高炉スラグ微粉末やフライアッシュで置換した場合、結合材の品質が異なる場合、配合条件が異なる場合などを想定して配合を計画した。

(1) 結合材種類

プレキャストプレストレストコンクリートを想定した結合材を早強ポルトランドセメントのみとした配合では水結合材比を36%(以下、H36シリーズ)とした。また、材齢初期の圧縮強度を同程度とするために、結合材の一部を高炉スラグ微粉末で置換した配合(以下、B33シリーズ)およびフライアッシュで置換した配合(以下、F33シリーズ)では水結合材比を33%とした。なお、膨脹材を添加した配合(B33EX)や三成分混合とした配合(B33FA)も併せて検討した。

(2) 使用材料

材料品質の違いが各試験の結果に与える影響を検討するため、複数の産地等から高炉スラグ微粉末(表-3)、フライアッシュ(表-4)、細骨材(表-5)を入手して使用した。フライアッシュは、供給元の発電所により品質が異なること³⁾が知られており、I種を1種類、II種を7種類と数多く集めた。細骨材は品質の異なる3種類を使用した。

(3) 配合条件

基本とした配合のフレッシュ性状の目標値はスランプ12cm、空気量4.5%であるが、比較のためこれよりス

*1 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 交流研究員 (正会員)

*2 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 研究員 (正会員)

*3 一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会 (正会員)

*4 国立研究開発法人土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 上席研究員 (正会員)

表-1 コンクリートの配合と基礎物性

記号	水結合材比(%)	単位量(kg/m ³)				結合材の構成割合と種別				細骨材種別	スランプ(cm)	空気量(%)
		水	結合材	細骨材	粗骨材	セメント	高炉スラグ微粉末	フライアッシュ	膨張材			
早強または普通ポルトランドセメント単味の配合, 高炉セメントB種を想定した配合												
H36	36	165	458	721	968	100%(H)	—	—	—	S	13.5	5.5
H36TH				718			—	—	TH	9.5	5.4	
H36CR				755			—	—	CR	12.5	3.8	
H36SL				721			—	—	S	20.0	5.0	
H36AI				—			—	—		12.5	6.4	
N50				50			330	828	100%(N)	—	—	—
N65	65	254	889	—	—	—	—	10.5		5.6		
B50	50	330	816	55%(N)	45%(SG4)	—	—	—	11.0	5.8		
高炉スラグ微粉末6000を用いた配合												
B33	33	165	500	671	968	50%(H)	50%(SG6N)	—	—	S	12.0	4.0
B33TH				668				—	—	TH	6.0	3.8
B33CR				702				—	—	CR	16.5	3.0
B33SL				671				—	—	S	21.5	3.8
B33AI						—	—	12.5	2.5			
B33DC						50%(SG6D)	—	—	11.0	3.6		
B33EX						48%(H)	48%(SG6N)	—	4%	16.5	4.0	
B33FA				659		50%(H)	40%(SG6N)	10%(CB)	—	10.5	4.8	
フライアッシュを用いた配合												
F33FN	33	165	500	661	968	80%(H)	—	20%(FN)	—	S	16.0	4.8
F33NS				649			—	20%(NS)	—		15.5	4.4
F33HK				664			—	20%(HK)	—		12.5	4.0
F33CB				656			—	20%(CB)	—		9.5	3.8
F33KS				654			—	20%(KS)	—		15.0	4.8
F33MS				650			—	20%(MS)	—		17.0	4.0
F33AN				656			—	20%(AN)	—		10.0	4.1
F33OK				657			—	20%(OK)	—		16.5	4.1

※結合材および細骨材の記号の詳細は、表-2～表-5を参照

表-2 コンクリートに用いたポルトランドセメントの品質

記号	種類	密度(g/cm ³)	比表面積(cm ² /g)	凝結(h-min)		安定性バット法	圧縮強さ(N/mm ²)			
				始発	終結		1d	3d	7d	28d
N	普通ポルトランドセメント	3.16	3270	2-15	3-45	良	—	30.3	47.2	64.2
H	早強ポルトランドセメント	3.14	4650	1-40	2-40	良	25.9	47.2	58.9	68.3

ランプを大きくした2配合(H36SL, B33SL), 空気量を大きくした1配合(H36AI), 空気量を小さくした1配合(B33AI)を設定した。これらは化学混和剤の使用量等によって変化させており、顕著な材料分離等は生じていない。なお、本実験では単位水量や単位粗骨材量の条件を一定としたため、材料によっては、目標としたスランプ12cm, 空気量4.5%からの差が大きい配合もある。

(4) その他の配合

比較のために、普通ポルトランドセメントを用いた水結合材比が50%の配合(N50)と65%の配合(N65), および高炉セメントB種相当の結合材を使用した配合(B50)を用意した。全ての配合で単位水量を165kg/m³, 単位粗骨材量を968kg/m³とした。

2.2 試験方法

各配合のコンクリートで円柱供試体(φ100×200mm)を製作し、圧縮強度試験, 電気抵抗率試験, 非定常・電気泳動試験, および浸せき試験を行った。製作した供試

体は、コンクリート打込み翌日に脱型し、各々の試験材齢まで20℃の水中養生とした。

(1) 圧縮強度試験の方法

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準拠し、材齢28, 91日に行った。

(2) 電気抵抗率試験の方法

電気抵抗率試験は、JSCE-G 581-2018 に準拠し、材齢7, 14, 28, 56, 91, 365日に行った。本実験では、試験方法はB法とし、測定装置(電極間隔50mm, 周波数40Hz, 測定範囲10~10000Ωm)を用いて、円柱供試体の側面を4方向から測定し、供試体3本の平均値を求めた。B法では、供試体に交流電流を印加し、その際に測定された電流と電位差から電気抵抗率を求めるが、電気抵抗率の測定値は供試体の形状や寸法、また電極の配置間隔の影響を受ける⁴⁾ため、JSCE-G 581-2018 付属書1(参考)に例示されているセル定数を用いて、測定結果を換算した。

なお、電気抵抗率は円柱供試体の含水量と温度の影響

表-3 高炉スラグ微粉末の品質

記号	種類	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	活性度指数(%)			フロー 値比 (%)	酸化マグ ネシウム (%)	三酸化 硫黄 (%)	強熱 減量 (%)	塩化物 イオン (%)
				7日	28日	91日					
SG4	高炉スラグ微粉末4000	2.89	4370	68	91	105	96	6.21	1.97	0.25	0.005
SG6D	高炉スラグ微粉末6000	2.91	6450	89	99	—	97	6.03	3.61	0.40	0.004
SG6N		2.91	5940	95	114	—	97	5.18	2.98	0.21	0.004

表-4 フライアッシュの品質

記号	種類	二酸化 けい素 (%)	湿分 (%)	強熱 減量 (%)	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	フロー 値比 (%)	活性度指数(%)		MB 吸着量 (mg/g)
								7日	91日	
FN	フライアッシュ I 種	65.8	0.15	1.9	2.37	5320	108	94	109	—
NS	フライアッシュ II 種	66.5	0.2	2.5	2.14	3810	104	90	103	0.48
HK		57.8	0.1	1.3	2.45	4770	111	91	105	0.34
CB		62.3	0.08	1.8	2.26	3660	107	86	101	0.28
KS		65.3	0.1	1.9	2.23	3650	101	83	99	0.39
MS		61.5	0.1未満	3.1	2.16	3200	104	81	93	0.54
AN		65.5	0.26	2.6	2.26	3750	104	83	100	—
OK		67.9	0.0	0.8	2.28	4700	105	80	94	—

を受けることが知られていることから、20℃の水中養生から取り出した後、速やかに表面水を拭き取り、その影響を極力受けない条件下で測定を行った。

(3) 非定常・電気泳動試験の方法

非定常・電気泳動試験は、材齢 91 日まで 20℃の水中養生とした円柱供試体の中央から厚さ 50mm の円盤型供試体を 2 個ずつ切断し、真空飽和処理は JSCE-G 571-2013 と同様の方法で行った。電気泳動セルに供試体を設置し、通電を行って供試体内部に塩化物イオンを電気泳動させた(図-1(A)、印加電圧 30V、通電時間 6、24 時間)。その後、供試体の割裂面に 0.1mol/L 硝酸銀溶液を噴霧して塩化物イオン浸透深さを測定し(図-1(B))、塩化物イオン浸透速度係数 K を求め、式(1)を用いて非定常・電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数(以下、塩化物イオン拡散係数) D_{nssm} を算出した⁵⁾。

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} K \quad (1)$$

ここに、 D_{nssm} : 塩化物イオン拡散係数(m²/s)、 R : 気体定数(= 8.31 J/(K·mol))、 T : 通電時の陽極側と陰極側の溶液温度の平均値(K)、 z : 塩化物イオンの電荷の絶対値(= 1)、 F : ファラデー定数(= 9.65×10⁴ J/(V·mol))、 E : 電位勾配(試験の開始時と終了時での両溶液間の電圧の平均値を供試体厚さ(= 0.05 m)で除した値、V/m)、 K : 塩化物イオン浸透速度係数(m/s)である。

(4) 浸せき試験の方法

浸せき試験は、材齢 28 日まで 20℃の水中養生とした円柱供試体を JSCE-G 572-2018 に準じて加工し、本検討では、濃度 3%の塩化ナトリウム水溶液に浸せきした。浸せき期間は 180 日とし、その後、供試体表面から厚さ

表-5 細骨材の品質

記号	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
S	細骨材(川砂)	2.58	1.78	2.67
TH		2.55	3.94	3.33
CR	細骨材(石灰砕砂)	2.64	1.45	—

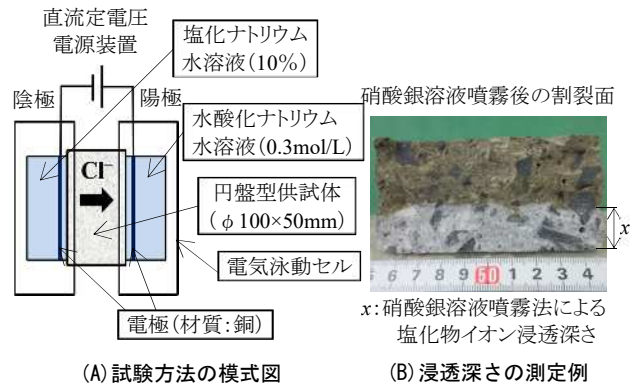


図-1 非定常・電気泳動試験の概略

5mm ごとに切断して試料を採取し、電位差滴定法によって塩化物イオン濃度を測定した。また、塩化物イオン濃度分布を最小二乗法で式(2)にフィッティングし、浸せき試験から得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数(以下、塩化物イオンの見掛けの拡散係数)を算出した。

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right\} + C_i \quad (2)$$

ここに、 $C(x, t)$: 距離 x と試験期間 t の塩化物イオン濃度(kg/m³)、 x : コンクリート表面からの距離(m)、 t : 試験期間(s)、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度(kg/m³)、 C_i : 初期含有塩化物イオン濃度(kg/m³)、 D_{ap} : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数(m²/s)、 erf : 誤差関数である。

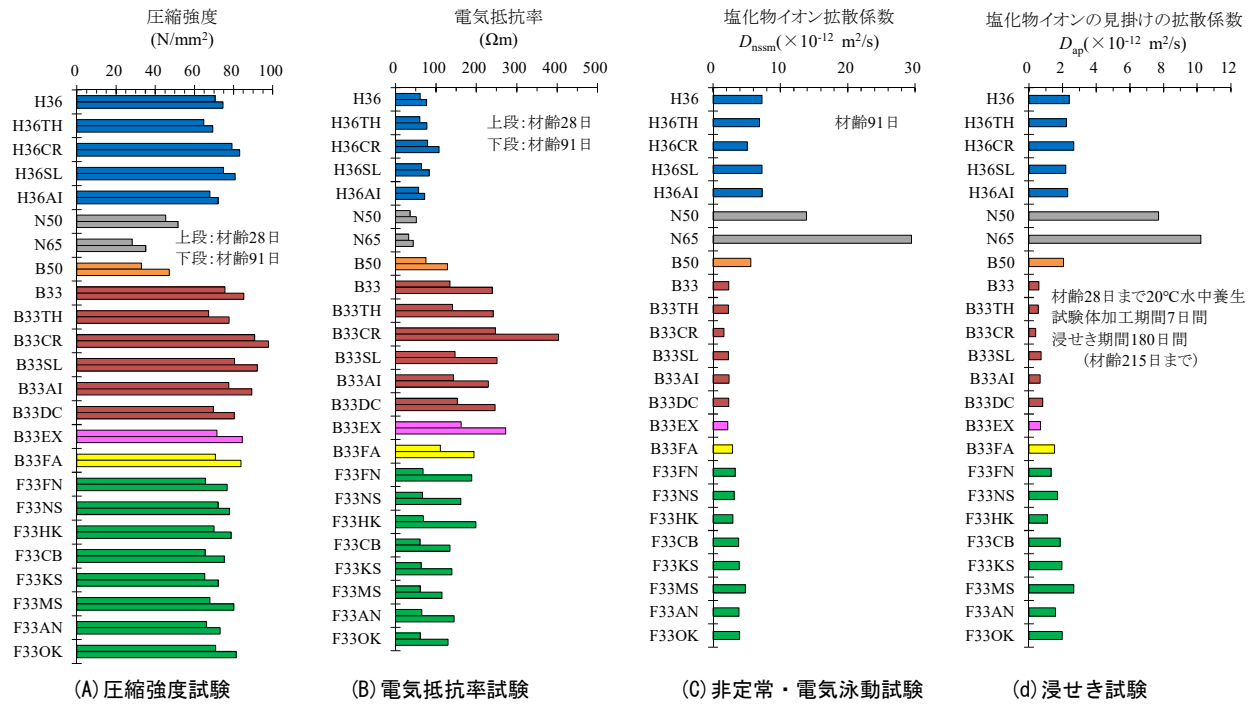


図-2 各試験の結果一覧

3. 実験結果と考察

3.1 電気抵抗率と圧縮強度および非定常・電気泳動試験による塩化物イオンの拡散係数との関係

各試験結果の一覧を図-2 に示す。圧縮強度は、結合材が早強ボルトランドセメントのみのH36シリーズと結合材の一部を混和材で置換したB33シリーズおよびF33シリーズで大きくは変わらなかった。これに対して、電気抵抗率試験と非定常・電気泳動試験および浸せき試験では、混和材の使用の有無で試験結果に差があることが確認された。

各材齢での電気抵抗率試験の結果を図-3 に示す。混和材を使用したB33シリーズとF33シリーズでは、材齢の経過による電気抵抗率の変化が大きく、特にフライアッシュを使用した場合は、長期的な変化が大きかった。

材齢91日時点における電気抵抗率と非定常・電気泳動試験から得られた塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} の関係を図-4 に示す。同図には、参考値として、既往の研究²⁾で得られた電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} の関係を示した。本検討では種々の使用材料や配合が異なるコンクリートが用いられているが、得られた結果は既往の研究結果²⁾とほぼ同様の位置にプロットされており、電気抵抗率と塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} には反比例の関係が見られた。

3.2 使用材料や配合の違いと電気抵抗率の関係

使用材料や配合の違いが電気抵抗率に与える影響を確認したところ、フライアッシュと細骨材については、その品質の違いが電気抵抗率に変化を与えているように

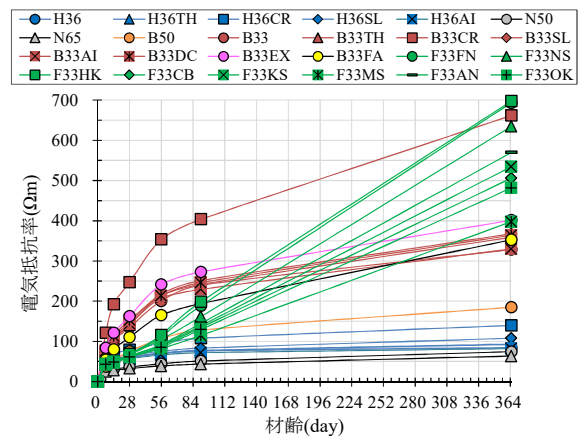


図-3 電気抵抗率試験の結果

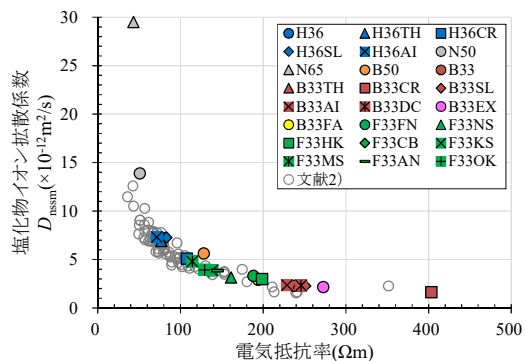


図-4 塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} と電気抵抗率の関係

見られた。一方、これらと比較すると、本実験の範囲においては高炉スラグ微粉末の産地による違いや膨脹材添加および三分混合とした場合の影響、またフレッシュ性状の品質状態が電気抵抗率に与える影響は僅かなものであることがわかった。

(1) フライアッシュの違いによる影響

異なるフライアッシュを用いた場合の材齢 91 日と 365 日の電気抵抗率試験の結果を図-5 に示す。フライアッシュの種類により電気抵抗率には違いがあり、反応性の違いが電気抵抗率に影響したと推測される。なお、材齢 91 日、材齢 365 日で種類による大小関係は類似しており、電気抵抗率の違いは偶然の誤差ではなく、フライアッシュによる細孔構造の緻密化などとの関係が考えられる。

(2) 細骨材の違いによる影響

異なる細骨材を使用した場合の電気抵抗率試験の結果を図-6 に示す。これら 3 種類の中では、吸水率が 1.78% の S と 3.94% の TH は同程度を示したが、1.45% の CR は他よりも電気抵抗率が大きかった。また、S と TH は川砂であるのに対して CR は石灰砕砂であった。

石灰石碎石に関する既往の研究⁶⁾では、石灰石碎石中の微粒分による空隙充填効果や微粒分とセメントペーストとの化学反応による効果が圧縮強度に寄与する可能性が示されており、本検討においても、図-2 (A) で細骨材 (石灰砕砂) CR を用いた場合に強度が高い傾向にあった。微粒分による空隙充填効果を電気抵抗率試験で捉えた可能性が考えられる。

3.3 電気抵抗率と浸せき試験結果の比較

材齢 91 日の電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} の比較を図-7 に示す。なお、図-3 に示すように、電気抵抗率は試験材齢によって大きく変化する。特にフライアッシュを混入した配合は変化が大きい、ここでは、浸せき期間の中ほどにあたる材齢 91 日の電気抵抗率を用いた。

(1) 結合材種類の違いに対する評価

図-7 より、電気抵抗率が大きいコンクリートほど、既往の研究⁴⁾と同様に塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} が小さいことが確認された。また、低水結合材比のコンクリートの中でも、結合材種類の違いによって塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} が異なることがわかる。

なお、図-7 は、図-4 に比べると関係がばらついて見えるようにも見える。これは、非常・電気泳動試験は電気抵抗率とほぼ同じ材齢のコンクリートを評価できることに対し、浸せき試験では比較的長期にわたって実施され、この間のコンクリートの品質変化の影響を受けるためと考えられる。

(2) フライアッシュの違いに対する評価

使用材料の違いに着目するため、図-7 の一部を拡大し、F33 シリーズのみ表した図を図-8 として示す。

使用したフライアッシュが異なる配合のみで比較した場合においても電気抵抗率が大きいコンクリートほど塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} が小さい傾向にあることが確認された。

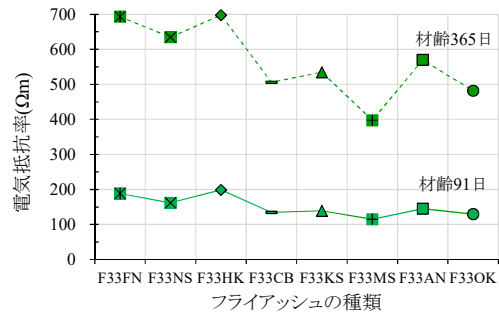


図-5 フライアッシュの種類と電気抵抗率の関係

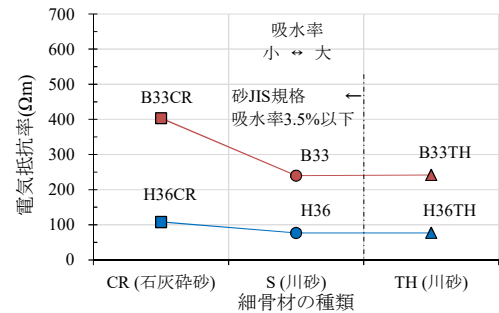


図-6 細骨材の種類と電気抵抗率の関係

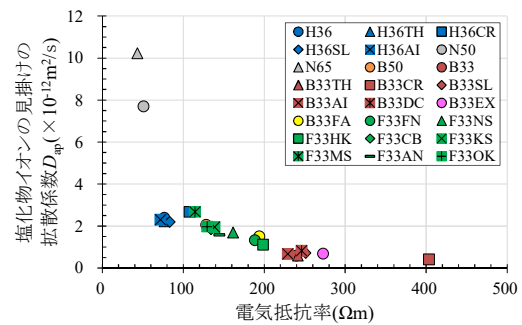


図-7 見掛けの拡散係数 D_{ap} と電気抵抗率の関係

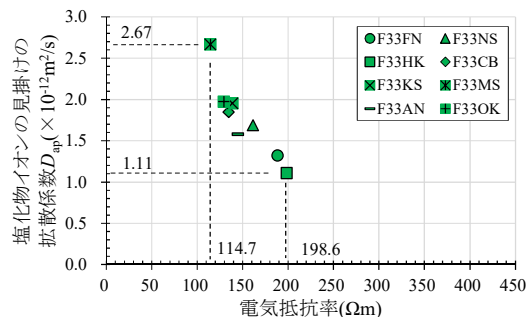


図-8 見掛けの拡散係数 D_{ap} と電気抵抗率の関係 (F33 シリーズ)

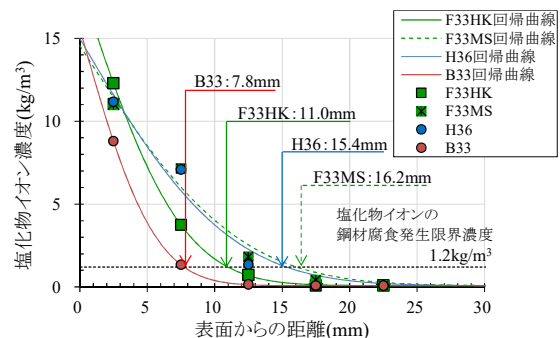


図-9 塩化物イオン濃度分布の例 (その 1)

図-9 に、塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} が大きい F33MS と小さい F33HK について、各々の回帰曲線が塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 となる際の浸透深さを示す。塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} の差は浸透深さにも表れており、H36 や B33 との関係を鑑みると、電気抵抗率によってコンクリートの塩分侵入抵抗性の優劣を適切に評価できたと考えられる。

(3) 細骨材の違いに対する評価

図-7 の一部を拡大し、細骨材種類が異なる配合に着目した図を図-10 として示す。両シリーズともに、細骨材の吸水率が小さい石灰砕砂を使用した H36CR と B33CR を除くと、電気抵抗率と塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} はほぼ同じ位置にあることが確認された。H36CR と B33CR については、他の配合よりも電気抵抗率が大きく、B33CR では見掛けの拡散係数 D_{ap} も小さい。

全体的な傾向は概ね整合していたが、H36CR は他より塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} がやや大きな値を示した。図-11 に、H36 と H36CR および B33 と B33CR の塩化物イオン濃度分布を示す。両関係ともに、細骨材の吸水率が小さい石灰砕砂を使用したものは塩分の侵入が抑えられている。しかし、H36CR は、コンクリート表層部 (0~5mm) についても塩化物イオン濃度が低く、このため、回帰曲線の曲率が小さくなり塩化物イオンの見掛けの拡散係数 D_{ap} が大きな値を示したことがわかった。

5. まとめ

電気抵抗率試験の適用性をより明確にするため、使用材料や配合が異なるコンクリートを対象に電気抵抗率試験を行い、その結果を非定常・電気泳動試験および浸せき試験の結果と比較した。本稿の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) プレキャストプレストレストコンクリートを想定した水結合材比の低い配合について、混和材の使用等による電気抵抗率の変化は顕著であり、電気抵抗率試験ではこの変化を明瞭に捉えることができた。
- (2) 使用材料や配合が異なるコンクリートの電気抵抗率と非定常・電気泳動試験による塩化物イオン拡散係数 D_{nssm} は反比例の関係にあり、高い相関にあることが認められた。
- (3) 使用材料や配合が異なるコンクリートの電気抵抗率試験と浸せき試験の結果を比較したところ、電気抵抗率が大きいものほど塩分侵入抵抗性に優れる傾向にあった。

本稿は、国立研究開発法人土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究「新設プレストレストコンクリート橋の品質・信頼性向上方法の構築」

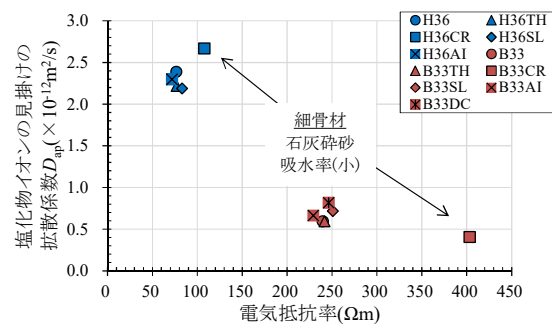


図-10 見掛けの拡散係数 D_{ap} と電気抵抗率の関係 (H36 シリーズ, B33 シリーズ)

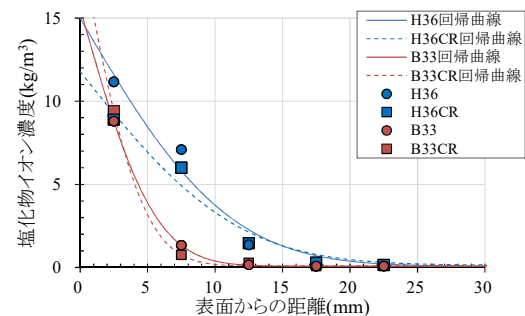


図-11 塩化物イオン濃度分布の例 (その2)

における実験結果の一部を報告したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会：日本の誇れる PC 技術 第 46 回 PC 技術講習会 コンクリートの耐久性実証へのチャレンジ pp.1-22, 2018
- 2) 中村英佑, 水戸健介, 古賀裕久：高炉スラグやフライアッシュを用いたコンクリートの遮塩性能の迅速評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.219-224, 2018
- 3) 土木学会：コンクリートライブラリー94 フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案) pp.139-1444
- 4) 皆川浩, 駒井道哉, 藤田亮, 宮本慎太郎, 久田真：4 プローブ法をコンクリート供試体に適用した時のセル定数の数値解析による算定とその検証, 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.17, pp.447-452, 2017
- 5) 中村英佑, 皆川浩, 宮本慎太郎, 久田真, 古賀裕久, 渡辺博志：通電後の塩化物イオン浸透深さをを用いたコンクリートの遮塩性能の評価, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.72, No.3, pp.304-322, 2016
- 6) 白根勇二, 橋本徹, 高橋春香, 鳥居和之：分級フライアッシュと石灰石骨材によるコンクリートの強度発現の改善効果, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.36, No.1, pp.190-195, 2014