

塩害抵抗性を高めたコンクリートの迅速評価試験

櫻庭浩樹・小田部貴憲・俵 道和・古賀裕久

1. はじめに

コンクリート構造物中の鋼材は、かぶりコンクリートにより腐食から保護されている。かぶりコンクリート中に多量の塩化物イオンが侵入すると、鋼材が腐食し、コンクリートのひび割れや剥落の発生、鋼材の断面減少などの塩害が生じる。

構造物の塩害に対する抵抗性を向上させるには、コンクリートの品質を高めて塩化物イオンの侵入を抑制することが有効である。土木研究所では、混和材（高炉スラグ微粉末、フライアッシュ）を用いることにより、コンクリートの塩化物イオンの侵入に対する抵抗性（以下「塩害抵抗性」という。）を向上させる方法を検討している。

ところで、コンクリートの塩害抵抗性を評価する方法としては、数ヶ月間塩水に浸せきした後、侵入した塩化物イオンを測定する方法が一般的である。しかし、塩害抵抗性の高いコンクリートでは、侵入する塩化物イオン量が少なくなるため、その改善の程度を評価するためには試験時間がかかり、評価に用いることは必ずしも容易ではない。

このような背景から、土木研究所では、塩害抵抗性の評価手法として急速塩分浸透試験を提案しており、短時間で高炉スラグ微粉末やフライアッシュの使用による塩害抵抗性の向上効果を評価できることを示している¹⁾。また、さらに簡易に塩害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、全国で使用されているコンクリートへの適用性を確認する必要があった。

そこで、産地等の異なる混和材や品質の異なる細骨材を用いたコンクリートを対象に急速塩分浸透試験および電気抵抗率試験を行い、その結果を塩水浸せき試験の結果と比較して、塩害抵抗性の迅速な評価手法として適用できることを示した。

2. 試験方法

2.1 試験体

試験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。基本とする配合は、工場で作成されるプレストレストコンクリートを想定し、早強ポルトランドセメントを用いた水結合材比 36%のものとした（表-1、H36）。その他の配合は、結合材の種類、細骨材の種類および水結合材比を変化させ、合計 17 種類とした。

混和材には、比表面積 4000 または 6000 (cm²/g) の高炉スラグ微粉末 2 種類、等級 I 種または II 種で供給元の発電所が異なるフライアッシュ合計 8 種類（等級：FN は I 種、それ以外は II 種）を用いた。

細骨材の品質の影響を確認するため、吸水率が異なる川砂を 2 種類（S：吸水率 1.78%、TH：吸水率 3.94%）、石灰砕砂（CR：吸水率 1.45%）を 1 種類、合計 3 種類を用いた。

水結合材比の影響を確認するため、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。

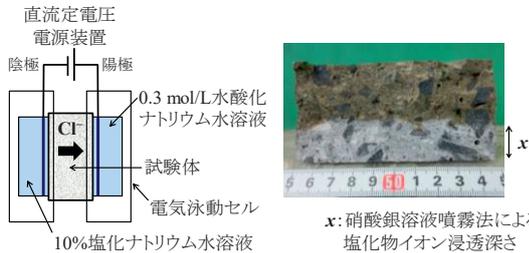
2.2 塩水浸せき試験

塩水浸せき試験には、材齢 28 日まで水中養生した円柱試験体（φ 100×200 mm）を使用した。円柱試験体の両端を切断して高さ 150 mm に成形し、円形の一面以外をエポキシ樹脂塗料でシールした後、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、試験体表面から厚さ 5mm ごとに切断して試料を採取し、電位差滴定法によって全塩化物イオン量を測定した。また、全塩化物イオン量分布を最小二乗法で Fick の拡散式にフィッティングし、塩水浸せき試験による拡散係数を算出した。この拡散係数が小さいほど、塩害抵抗性が高いことを意味する。

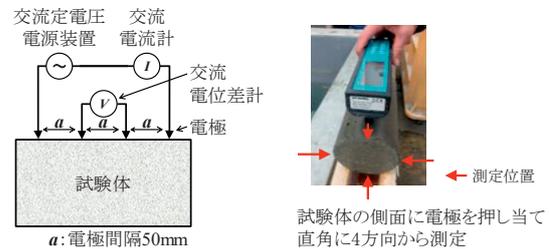
表-1 コンクリートの配合

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	スランブ (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					
早強又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		
N50				50		330	828	100%(N)	—	—	S	13.5	5.1
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%(SG6)	—	S	12.0	4.0		
B33TH				668				—	TH	6.0	3.8		
B33CR				702				—	CR	16.5	3.0		
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		

H：早強ポルトランドセメント、N：普通ポルトランドセメント、SG4：高炉スラグ微粉末4000、SG6：高炉スラグ微粉末6000、FN：フライアッシュI種、NS、HK、CB、KS、MS、ANおよびOK：フライアッシュII種



(A)試験方法の模式図 (B)塩化物イオン浸透深さの測定例
図-1 急速塩分浸透試験の概略



(A)試験方法の模式図 (B)電気抵抗率の測定例
図-2 電気抵抗率試験の概略

2.3 急速塩分浸透試験

材齢 91 日まで 20℃ の水中養生とした円柱試験体の中央から厚さ 50mm の円盤を 2 個ずつ切断・採取した。その後、真空容器中で十分吸水させたものを試験体とした。電気泳動セルに試験体を設置し、通電時間を 6 時間および 24 時間として試験体の内部に塩化物イオンを電気泳動させた (図-1(A))。その後、試験体の割裂面に 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た (図-1(B))。印加した電圧、塩化物イオン浸透深さの進展速度などから、急速塩分浸透試験による拡散係数を算定した¹⁾。

2.4 電気抵抗率試験

電気抵抗率試験は、4つの電極を有する試験装置

を用いて実施した (図-2(A))。20℃ の水中養生とした円柱試験体の側面を4方向から測定し、それらの平均値を求めた (図-2(B))。電気抵抗率は円柱試験体の含水量と温度の影響を受けることが知られていることから、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. 試験結果と考察

3.1 拡散係数の関係

浸せき試験による拡散係数と急速塩分浸透試験による拡散係数の関係を図-3に示す。両者は、配合によらず、相関関係があることを確認できる。ただし、浸せき試験は塩水の濃度勾配、急速塩分浸透試験は

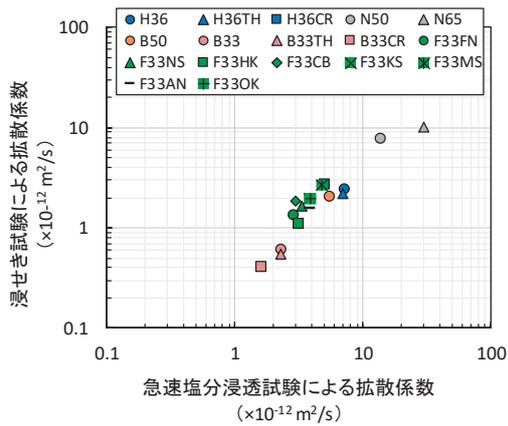


図-3 浸せき試験と急速塩分浸透試験による拡散係数

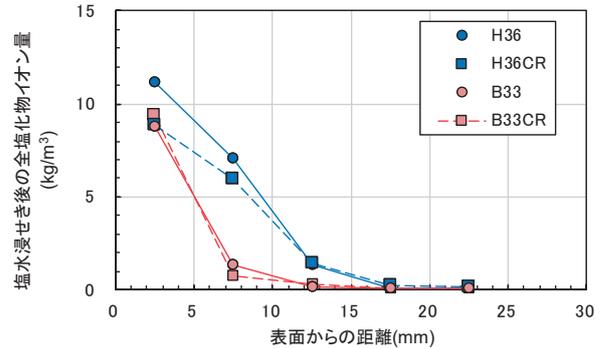


図-6 細骨材種類が異なる場合の全塩化物イオン量分布例

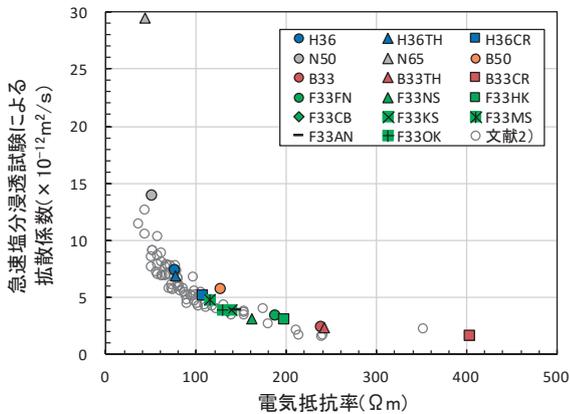


図-4 急速塩分浸透試験による拡散係数と電気抵抗率の関係

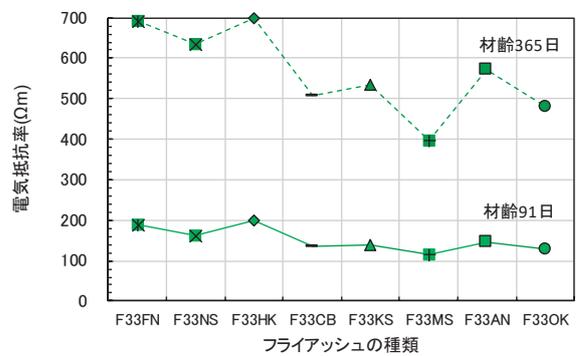


図-7 フライアッシュの種類と電気抵抗率の関係

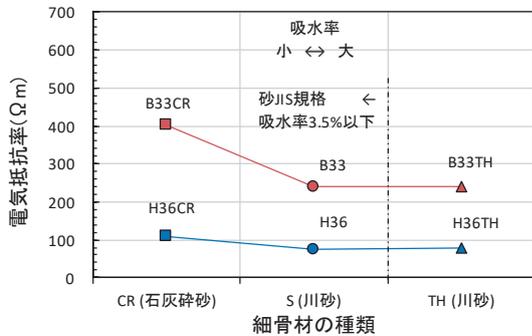


図-5 細骨材の種類と電気抵抗率の関係

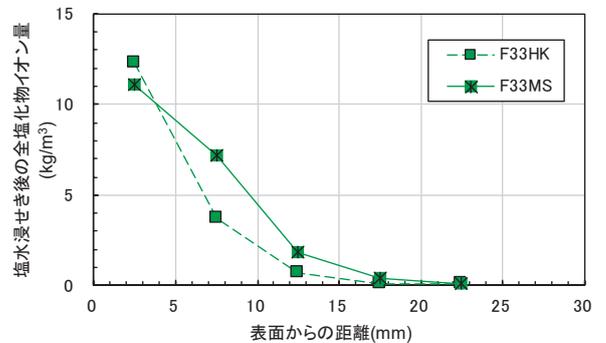


図-8 フライアッシュの種類が異なる場合の全塩化物イオン量分布例

印加による電気泳動により塩化物イオンを試験体に移動させており、原理が異なるため、拡散係数の絶対値は異なる。急速塩分浸透試験の方が、2~4倍程度大きい値を示している。

3.2 急速塩分浸透試験による拡散係数と電気抵抗率の関係

材齢91日時点の急速塩分浸透試験による拡散係数と電気抵抗率の関係を図-4に示す。同図には、参考値として、既往の研究²⁾で得られた結果も併せて示した。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た。また、急速塩分浸透試験による拡散係数と電気抵抗率は反比例の関係にあることを確認できた。

本検討で基本の配合としたH36の電気抵抗率は80Ωm程度であるのに対し、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた配合は120~400Ωm程度となり、混和材の使用による塩害抵抗性の向上を確認できた。

一方、水結合材比50% (N50) と65% (N65) の配合の電気抵抗率は、それぞれ、50 Ω m程度と40 Ω m程度で近い値であるが、拡散係数には2倍程

度の差がある。拡散係数と電気抵抗率の関係は反比例であるため、電気抵抗率が比較的低い普通強度のコンクリートの範囲では、拡散係数が大きく異なっても、電気抵抗率としての違いは大きくない。このため、普通強度のコンクリートについては、塩害抵抗性の評価に用いることが困難であることを示している。本実験では高強度のコンクリートに着目したが、電気抵抗率が低い普通強度のコンクリートの評価手法については、別途検討していく予定である。

3.3 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材齢91日の電気抵抗率試験結果を図-5に示す。吸水率が1.78%のSと3.94%のTHの二種類の川砂は同程度であるが、石灰砕砂CR(吸水率1.45%)は他よりも電気抵抗率が高くなった。

細骨材の種類が異なる場合の全塩化物イオン量分布の例を図-6に示す。CRの方が、塩化物イオンの侵入を抑制する傾向にあり、電気抵抗率の傾向と一致していた。石灰石砕石に関する既往の研究³⁾では、石灰石砕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示されており、これらの効果を電気抵抗率試験で捉えた可能性が考えられる。

3.4 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結果を図-7に示す。フライアッシュの種類により電気抵抗率は異なり、反応性の違いが電気抵抗率に影響したと推察される。

フライアッシュの種類が異なる場合の全塩化物イオン量分布の例を図-8に示す。電気抵抗率(図-7)が高いHKの方がMSより塩分浸透を抑制する傾向にあり、電気抵抗率試験の傾向と一致した。フライアッシュの種類による塩害抵抗性の違いを電気抵抗率試験で評価可能と考えられる。

4. まとめ

本稿では、多様な配合条件においても、急速塩分浸透試験と電気抵抗率試験で塩害抵抗性の評価が可能かを検討した。以下に知見をまとめる。

- 1) 浸せき試験と急速塩分浸透試験による拡散係数の傾向は、配合によらず一致した。
- 2) 急速塩分浸透試験による拡散係数と電気抵抗率の関係は反比例となり、既往の研究の傾向と一致した。
- 3) 細骨材の種類やフライアッシュの種類が異なるなど多様な配合の高強度のコンクリートの塩害抵抗性を急速塩分浸透試験と電気抵抗率試験で迅速に評価できることを示した。

急速塩分浸透試験に関する動画を土木研究所iMaRRCのホームページに掲載しているため参考にさせていただきたい。

<https://www.pwri.go.jp/team/imarrc/activity/movie.html>

なお、本研究は、土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会の共同研究により実施されたものである。

参考文献

- 1) 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
- 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) 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、コンクリート工学年次論文集、Vol.36、No.1、pp.190～195、2014

櫻庭浩樹



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 主任研究
員、博士(工学)
Dr. SAKURABA Hiroki

小田部貴憲



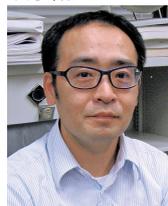
土木研究所先端材料資源
研究センター材料資源
研究グループ 交流研究
員、修士(工学)
KOTABE Takanori

俵 道和



プレストレスト・コンク
リート建設業協会、工修
TAWARA Michikazu

古賀裕久



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、博士(工学)
Dr. KOGA Hirohisa