

プレキャスト部材用コンクリートの耐塩害性能向上に関する実験的研究

上田橋 克^{1,*} 松田 学² 松本 康資² 松本 優朋²

溝口 稔也² 永野 花² 松家 武樹³ 浦野 登志雄⁴

Experimental Study on Improving Salt Insulation of Concrete for Precast Members

Suguru Kandabashi^{1,*}, Manabu Matsuda², Yasushi Matsumoto², Yuho Matsumoto²,
Toshiya Mizoguchi², Hana Nagano², Takeju Matsuka³, Toshio Urano⁴

In this study, an electrophoresis test was carried out to measure the diffusion coefficient of chloride ions in a short period of time for the purpose of improving the durability of precast concrete. In addition, similar experiments were conducted to verify the applicability to the repair material of the concrete cross-sectional defect and the fixing part for connection.

As a result, we were able to confirm the effect of suppressing the permeation of chloride ions by adding a salt damage-resistant admixture to concrete and repair materials. The salt damage resistant admixture can be expected to improve the salt damage resistance performance of not only concrete but also repair materials. However, the addition of expansive materials makes the internal structure of concrete looser and reduces resistance to salt damage. In addition, it was found that electrophoresis inspection is useful in shortening the inspection time compared to the conventional sodium chloride solution immersion inspection.

キーワード：塩害、プレキャストコンクリート、フライアッシュ、塩化物イオン、耐久性

Keywords : Salt damage, Precast Concrete, Fly-ash, Chloride ion, Durability

1. はじめに

我が国のインフラは高度経済成長期以降に整備されたものが多く、インフラの老朽化が急速に進展している⁽¹⁾。こうした時代において我々は適切な維持管理を行うこと

が求められている。そのためには効率的な診断方法やインフラの長寿命化・高耐久化が望まれる。インフラの一つには鉄筋コンクリート構造物がある。鉄筋コンクリート構造物の劣化はいくつか挙げられるが、劣化原因の一つに「塩害」がある。塩害対策としては、樹脂塗装鉄筋の使用とともに、鉄筋のかぶり厚を大きくする等の対策が講じられる。しかしながらいくつかの問題を抱える。その一つが型枠であり、プレキャストコンクリートにおいて、これらの施策では型枠の改善が必要となる。また、かぶり厚を大きくすることは輸送費の問題から経済性の低下が懸念される。

筆者らはこれまでに、プレキャスト部材用コンクリートの耐塩害性能について実験を行い、フライアッシュを用いることで高炉スラグ微粉末と同等以上の塩分浸透抵抗性が得られることを示した⁽²⁾。また、耐塩害用混和材(CG)を併用することで、さらに優れた塩分浸透抵抗性が得られることを示した⁽³⁾。しかしながら、これまでの試験方法では耐塩害性能を明らかにするまでに長期間を要し

¹ 技術・教育支援センター
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627
Center for Technical and Educational Support,
2627 Hirayama-Shinmachi, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

² (株)ヤマックス
〒862-0950 熊本県熊本市水前寺 3-9-5
Department of Research and Development, Yamax Corporation,
9-5, Suizenji 3-chome, Kumamoto-shi, Kumamoto, Japan 862-0950

³ 生産システム工学系 AC-Gr
〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627
Faculty of Production Systems Engineering AC-Gr,
2627 Hirayama-Shinmachi, Yatsushiro-shi, Kumamoto, Japan 866-8501

⁴ 久留米工業大学 工学部 建築・設備工学科
〒830-0052 福岡県久留米市上津町 2228-66
Department of Architecture and Building Services Engineering,
2228-66 Kamitsucho, Kurume-shi, Fukuoka, Japan 830-0052

* Corresponding author:
E-mail address: s-kandabashi@kumamoto-nct.ac.jp
(S. Kandabashi).

表 1 コンクリートの調合

| 略記号 | Fc (N/mm ²) | W/B (%) | 実積率 (%) | s/a (%) | 単位容積質量(kg/m ³) | | | | | | | |
|---------|----------------------------|------------|------------|------------|----------------------------|-----|----|-----|----|-----|------|-------|
| | | | | | W | C | CG | FA | EX | S | G | SP(%) |
| FA-CG-1 | 45 | 32.0 | 59.0 | 35.2 | 165 | 396 | 20 | 100 | — | 577 | 1206 | 0.7 |
| FA-CG-2 | | | | | | 376 | | | 20 | | | |

Fc：設計基準強度，W/B：水結合材比，s/a：細骨材率，W：単位水量，C：単位セメント量

てきた。そこで本研究では、短期間での塩化物イオン拡散係数の測定が可能である電気泳動法による試験を実施するとともに、更なるプレキャストコンクリートの高耐久化を図ることを目的として実験的な検討を実施した。

2. 実験概要

2.1 調合計画

表 1 にコンクリートの調合、表 2 にコンクリートおよび補修材の使用材料、表 3 に補修材の調合を示す。本研究では、維持補修面も視野に PCa 部材だけではなく、部材連結の定着部や現場施工の間詰充填材として用いる補修材も実験対象に加えた。DH は主に欠損部補修・断面修復用プレミックスモルタルとして小手塗り作業に用いられている。PP はプレキャスト部材の隙間への充填性に優れた無収縮モルタルである。耐塩害用混和材(CG)は既往の研究⁹⁾において、耐塩害性能や圧縮強度の向上が確認できた混和材である。

コンクリートの調合は、通常使用しているフライアッシュを用いた配合(FA-CG-1)に加え、PCa 部材の長スパン化・大型化が急激に進んでいることから膨張材を使用した調合(FA-CG-2)を追加した。

2.2 実験項目

表 4 に実験項目及び試験方法を示す。供試体の作製は JIS 規格に準拠するものとし、コンクリートでは圧縮強度試験、静弾性係数試験および電気泳動法試験に Φ100×200mm の円柱供試体を用いた。補修材は圧縮強度試験に Φ50×100mm の円柱供試体、曲げ強度試験に □40×40×160mm の角柱供試体を用い、電気泳動法試験では Φ100×200mm の円柱供試体を用いた。すべての供試体は、所定の材齢まで恒温恒湿室 (20±2°C、60±5%RH) で養生を行った。電気泳動法試験においてコンクリートでは 1 水準あたり 3 つの試験体で実験を行い、補修材においては試験期間の都合上 1 水準あたり 1 つの試験体で実験を行った。

2.3 電気泳動法試験

電気泳動法試験は、JSCE-G571-2013「電気泳動による

表 2 使用材料

| 区分 | 材料名 | 種類 | 略記号 |
|--------|------|--------------|-----|
| コンクリート | セメント | 普通ポルトランド | N |
| | 混和材 | フライアッシュ II 種 | FA |
| | 混和材 | 耐塩害用混和材 | CG |
| | 混和材 | 膨張材 | EX |
| | 細骨材 | 海砂 | S |
| | 粗骨材 | 砕石 (5~20mm) | G |
| | 混和剤 | 高性能減水剤 | SP |
| 補修材 | 補修材 | 断面欠損用補修材 | DH |
| | 補修材 | 定着部用埋戻し材 | PP |
| | 混和材 | 耐塩害用混和材 | CG |

表 3 補修材の調合

| 略記号 | W/P(%) | W(kg) | P(kg) | CG(kg) | SP(%) |
|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| DH | 17.5 | 2.100 | 12 | - | 0.4 |
| DH-CG | | 2.205 | | 0.60 | 0.6 |
| PP | 10.8 | 1.620 | 15 | - | 0.45 |
| PP-CG | | 1.701 | | 0.75 | 0.7 |

W/P：水粉体比，P：補修材

表 4 実験項目および試験方法

| 区分 | 実験項目 | 試験内容 | 試験方法 |
|--------|--------|---------|------------|
| コンクリート | 圧縮強度 | 圧縮強度試験 | JIS A 1108 |
| | 静弾性係数 | 静弾性係数試験 | JIS A 1149 |
| | 塩分浸透速度 | 電気泳動試験 | JSCE-G571 |
| 補修材 | 圧縮強度 | 圧縮強度試験 | JIS A 1108 |
| | 曲げ強度 | 静弾性係数試験 | JIS R 5201 |
| | 塩分浸透速度 | 電気泳動試験 | JSCE-G571 |

コンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)」⁽⁴⁾に準拠し試験を行った。以下に手順を示す。

I. 供試体の作製

- (1)Φ100×200mm の円柱供試体を JIS A 1132 の規定によって作製する。
- (2)円柱供試体は所定の期間、恒温恒湿室 (20±2°C, 60±5%RH) で養生した後、湿式または乾式ダイヤモンドカッターで厚さ 50mm に成形する (図 1)。成形にあたっては両端 25mm ずつを除き、残った 150mm の部分から円盤型供試体を切り出す。
- (3)供試体の直径と厚さを 0.1mm 単位で正確に測定する。

II. 供試体の前処理

- (1)コンクリートを水で飽和させるために、以下の手順で真空飽和处理 (図 2) を行う。
 - ①真空デシケータ内に供試体をセットする。
 - ②真空ポンプで吸引し、デシケータ内の真空度が 500Pa 以下となる状態で 3 時間放置する。
 - ③真空ポンプを稼働しながら、デシケータ内の供試体が水没するまで蒸留水を注入する。この時、蒸留水中に空気を巻き込まないように注意する。
 - ④蒸留水を注入して 1 時間後に真空ポンプを停止する。
 - ⑤デシケータ内に空気を戻して、1 日程度放置する。
- (2)真空デシケータから取り出した供試体の質量を測定した後、試験装置に設置する。
 - ①ゴミや油分を除去するためアセトン等の有機溶剤を用いて外周を清掃し、両端面を養生テープで保護した。セル溶液の漏れを防止するために、供試体と供試体ホルダー (ゴムリング) の接触面にシーリング材を塗布する。
 - ②シーリング材の硬化後、試験面の養生テープを剥がして試験装置に設置する。



図 1 供試体切断



図 2 真空飽和处理

III. 電気泳動試験

- (1)試験体を設置した供試体ホルダーの両端にセルを設置する (図 3)。なお、実験は恒温恒湿室で実施する。
- (2)陰極側のセルに 0.5mol/L の塩化ナトリウム水溶液を、陽極側のセルに 0.3mol/L の水酸化ナトリウム水溶液を試験体面全体が浸漬まで注入する。溶液体積は 0.01L の桁まで計測する。
- (3)直流安定化電源で、直流定電圧 15V を電極間へ印可する。陰極側の塩化物イオン濃度が 0.45mol/L を下回らない、陽極側の濃度が 0.05mol/L を上回らないように適宜交換する。
- (4)測定は 3~4 日/回程度の間隔で行う。測定項目は電流値、電極間の電位差、供試体間の電位差、溶液温度、塩化物イオンの質量%濃度である。塩化物イオンの質量%濃度はソルメイト-100 で測定する。陽極側への塩化物イオンの移動流束が定常状態 (5 回以上) になるまで継続する。



図 3 電気泳動試験

2.4 塩化物イオン流束の計算

定常状態における塩化物イオンの移動流束は、次式(1)で算出される各測定間における移動流束が、通常 5 回の測定でほぼ一定の値とみなされるときにそれらの平均値を求める。

$$J_{cl(t)} = \frac{V_{(t)}^{II} \Delta C_{cl(t)}^{II}}{A \Delta t} \dots\dots\dots (1)$$

$J_{cl(t)}$: 塩化物イオンの各測定間における流束(mol/(cm²・年))

$V_{(t)}^{II}$: 塩化物イオン濃度測定時の陽極側の溶液体積(L)

A : 供試体断面積(cm²)

$\Delta C_{cl(t)}^{II}/\Delta t$: 各測定間における陽極側塩化物イオン濃度の増加割合 ((mol/L)/年)

2.5 塩化物イオンの実効拡散係数の計算

コンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数は、次式(2)により計算する。

$$D_e = \frac{J_{cl}RTL}{|Z_{cl}|FC_{cl}(\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad \dots\dots\dots (2)$$

D_e : 実効拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)

R : 気体定数($8.31\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)

T : 絶対温度測定値(K)

L : 供試体厚さ(mm)

Z_{cl} : 塩化物イオンの電荷($=-1$)

F : ファラデー定数($96,500\text{C}/\text{mol}$)

C_{cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値 (mol/L)

$\Delta E - \Delta E_c$: 供試体表面間の測定電位(V)

2.6 見かけの拡散係数の計算

コンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数は、コンクリート標準示方書に準拠し、次式(3)により算出した⁽⁵⁾。

$$D_{ae} = k_1 \cdot k_2 \cdot D_e \quad \dots\dots\dots (3)$$

D_{ae} : 電気泳動法試験による実効拡散係数から換算した見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

D_e : 電気泳動法試験による実効拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

k_1 : コンクリート表面におけるコンクリート側、陰極側溶液側それぞれの塩化物イオン濃度の釣り合いに関わる係数

k_2 : セメント水和物中への塩化物イオンの固定化現象に関わる係数

フライアッシュセメント B 種相当を使用する場合

$$k_1 \cdot k_2 = 0.37 \exp\{1.1(W/C)\} \quad (0.3 \leq W/C \leq 0.55)$$

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験結果

図 4 に圧縮強度の試験結果を示す。FA-CG-1 と FA-CG-2 を比較すると、強度の差はほとんど確認できない。膨張材を添加しても強度の変化は見られないことが分かる。

補修材について、耐塩害用混和材(CG)使用による強度増進効果は一概には示されなかった。一方、補修材 DH に関しては圧縮強度が 13~21%ほど増加したことから、補修材においても強度増進効果が期待できるものがあることが明らかとなったが、そのメカニズムについては今後

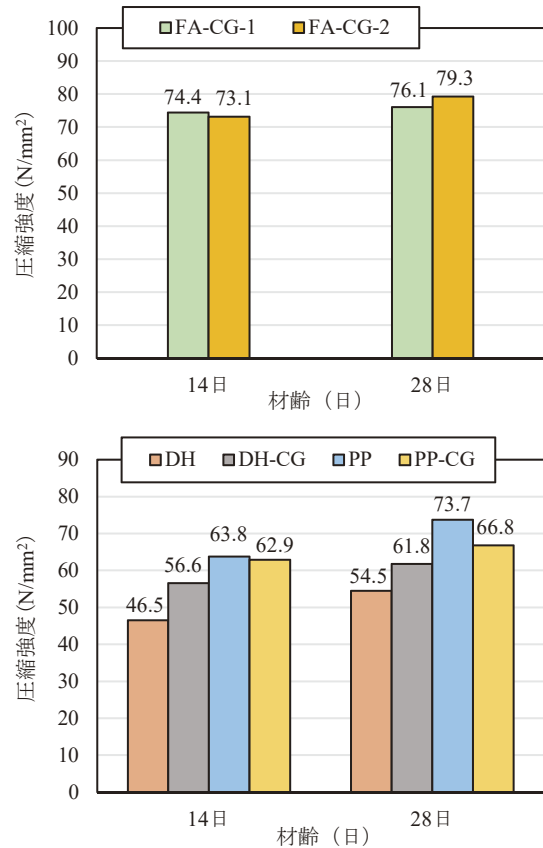


図 4 圧縮強度試験結果

の課題である。

3.2 電気泳動法試験結果

図 5-1, 2 に塩化物イオン濃度の経時変化、図 6-1, 2 に塩化物イオン流束の経時変化を示す。FA-CG-1 と FA-CG-2 を比較すると、FA-CG-1 は経過 70 日で塩化物イオン濃度が上昇し始めているが、FA-CG-2 は経過 20 日程から濃度が上昇している。塩化物イオンの流束に関しても同じことがいえる。これは、膨張材を用いると塩化物イオンの浸透性が増すことを示しており、膨張材を用いることでコンクリートの組織構造が疎になることが原因だと考えられる。

PP と PP-CG の結果を比べると、PP が 30 日から塩化物イオン濃度が上昇しているのに対し、PP-CG は 70 日から濃度が上昇している。DH と DH-CG の比較では、それぞれ 35 日と 55 日から上昇していた。

以上より、補修材 PP および DH においても耐塩害用混和材(CG)使用により耐塩害性能が向上することが確認できた。

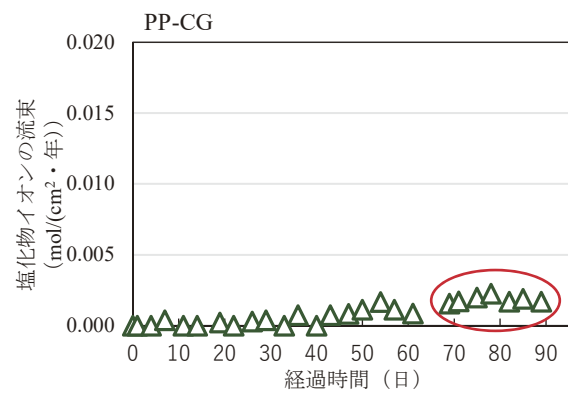
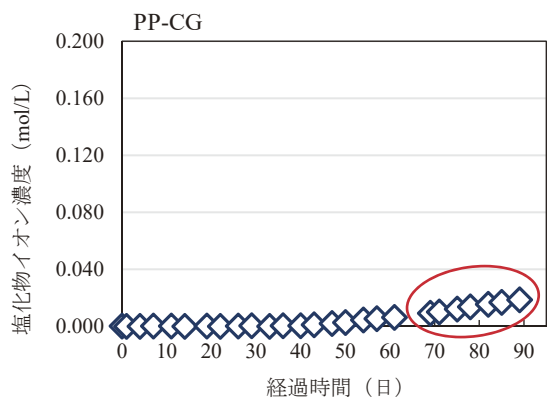
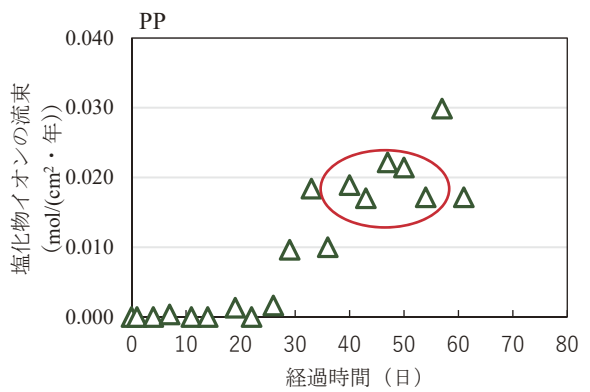
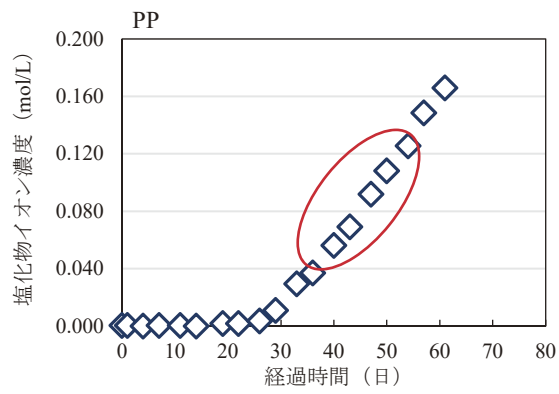
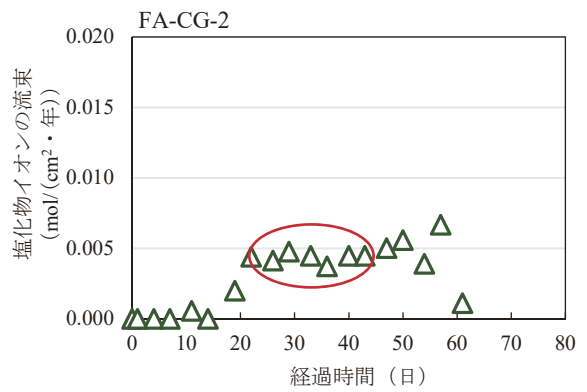
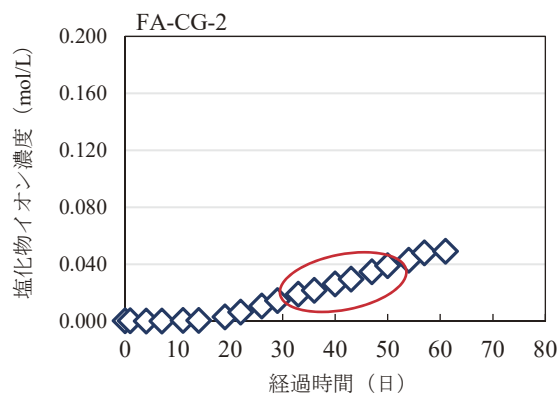
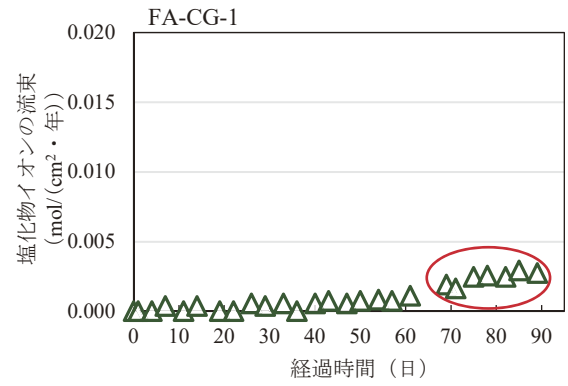
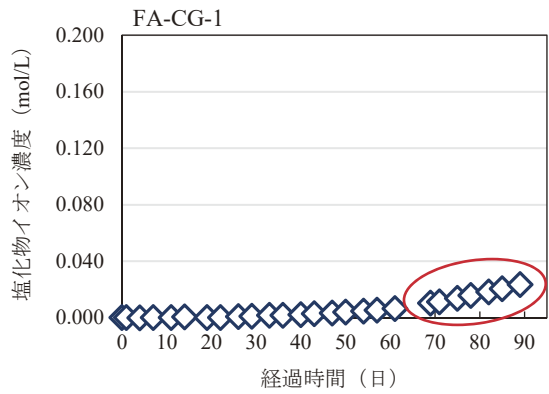


図5-1 塩化物イオン濃度の経時変化

図6-1 塩化物イオン流束の経時変化

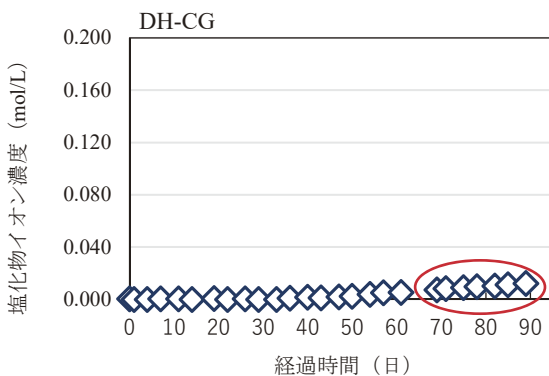
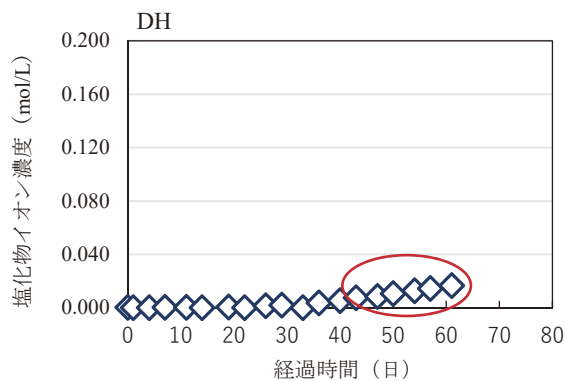


図5-2 塩化物イオン濃度の経時変化

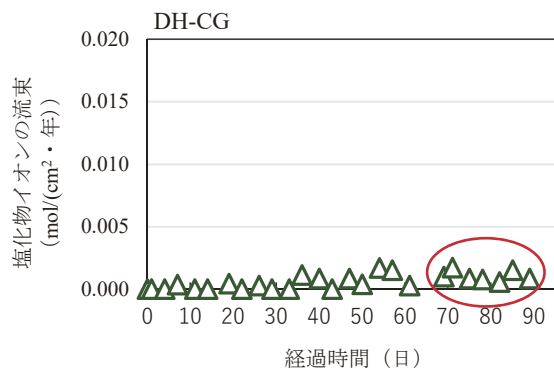
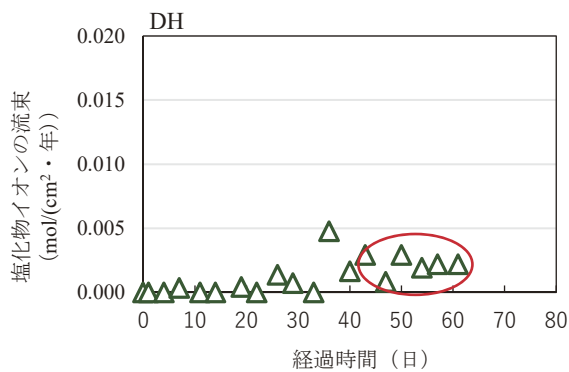


図6-2 塩化物イオン流束の経時変化

図7に本実験と既報の実験⁽³⁾で求めた見かけの拡散係数を示す。本試験結果から塩化物イオンの実効拡散係数を算出し、それから見かけの拡散係数を求め、既実施の研究結果(FA-CG)と比較した。FA-CGの調合はFA-CG-1と同じであるが、FA-CGは従来の塩分浸透性試験において、2年間NaCl水溶液に浸漬したものである。FA-CG-1とFA-CGを比較すると、見かけの拡散係数はほぼ同程度である。耐塩害性能を評価する試験方法による結果に大きな差異はないことから、測定期間を短縮できる電気泳動法試験の方が従来の浸透試験より有用であると考えられる。一方、FA-CG-2はFA-CG-1の約1.6倍見かけの拡散係数が大きい。これは膨張材に含まれる成分から水酸化カルシウム等の結晶が生成され、それが膨張したことによってコンクリートの組織構造が疎になったことが影響していると考えられる。

図8に補修材の実効拡散係数を示す。CGの使用により実効拡散係数がDHで50%程度、PPでは90%程度の低減が認められた。これより補修材においてもCGは塩分浸透抑制に効果があるといえる。

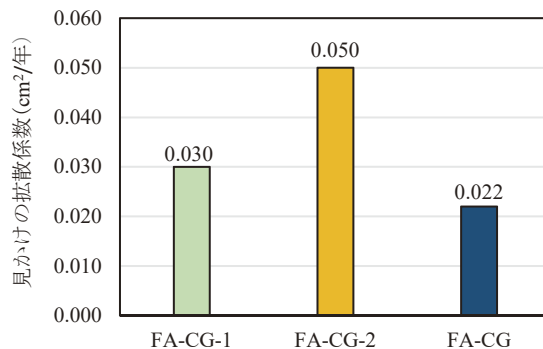


図7 見かけの拡散係数

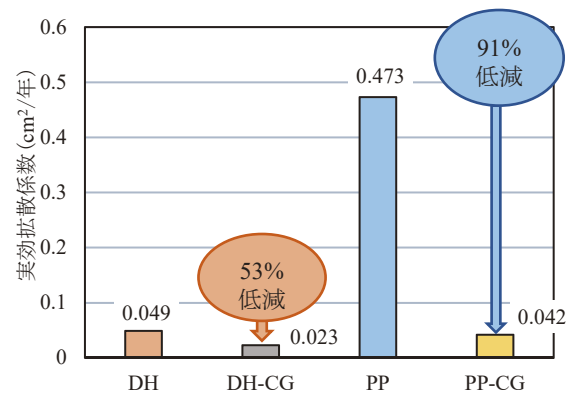


図8 補修材の実効拡散係数

4. まとめ

得られた結果は次のように要約できる。

- (1) 耐塩害用混和材 (CG) および膨張材の添加によりコンクリートおよび補修材の圧縮強度はほぼ同程度であるが、断面欠損用補修材と CG の組合せの場合のみ圧縮強度は増加した。
- (2) 電気泳動法試験において、定常状態に至るまでの経過日数が長いほど実効拡散係数は小さくなる傾向にある。
- (3) 耐塩害用混和材の添加は、電気泳動法試験における実効拡散係数は低くなる傾向にあるが、膨張材を加えることで実効拡散係数は大きくなる傾向がある。
- (4) 耐塩害用混和材の添加は、コンクリートおよび補修材においても塩化物イオンの浸透抑制効果が期待できる混和材である。
- (5) 電気泳動法試験は従来の浸漬試験に比べ、耐塩害性能を定量化する期間を大幅に短縮することが可能であり有用な試験方法である。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、九電産業(株)よりフライアッシュの提供をいただきました。また、熊本高専の濱邊裕子教授には真空飽和处理の方法をご教授いただきました。ここに記して感謝申し上げます。

(令和5年 8月21日受付)

(令和5年10月30日受理)

参考文献

- (1) T. Matsuka, H. Yokota, N. Takeshita, K. Sakai : "Status and future of construction industry and road bridges in Japan from the viewpoint of sustainability", 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2020, pp.2553-2561(2020).
- (2) 浦野, 松田, 松本, 久野 : 「フライアッシュまたは高炉スラグ微粉末を混和材に用いたプレキャスト部材用コンクリートの強度特性および塩分浸透性について」, セメントコンクリート論文集, Vol.69, pp.311-318(2016).
- (3) 井形, 浦野, 松田, 村上 : 「特殊無機微粉末を用いたプレキャスト部材用コンクリートの塩分浸透抵抗性について」, セメントコンクリート論文集, Vol.73, pp.259-265(2020).
- (4) 土木学会編 : 「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G 571-2013)」, 2013年制定コンクリート標準示方書 [規準編], pp.363-371(2013).
- (5) 土木学会 : 2017年制定コンクリート標準示方書 [設計編 : 標準], pp.156-163(2017).