論文　HVFA コンクリートにおける塩分浸透性状に関する実験的研究

藤田　修平[*1]・伊藤　大輝[*2]・岩下　健太郎[*3]

要旨：本研究では，コンクリートの緻密性や経済性の向上を目的に，フライアッシュ（FA）によるセメントの高置換をしたハイボリューム FA（HVFA）コンクリートの物性と塩分浸透性状を解明するため，FA によるセメント置換率 0%，30%，60%の円柱コンクリート供試体を作製して，圧縮，割裂引張試験で物性を確認し，簡易水分浸透試験，塩分浸透試験を行った。普通コンクリートを基準に，FA によりセメントを 30%以上置換すると，水分および塩分の浸透深さは，普通コンクリートを基準として 50%～60%に抑制された。このとき，練り混ぜや打込みでの課題が明確となった。

キーワード：フライアッシュコンクリート，高置換，水分浸透深さ，塩分浸透深さ

1. はじめに

塩害は RC, PC 構造物における鉄筋腐食の原因となり，中性化など，他の要因との複合劣化となった場合には，腐食が早期に進行するため，RC，PC 構造物の表面を緻密化し，水や劣化要因物質の浸透を抑制することは重要である。

このような場合に，フライアッシュ（以後，FA）をはじめとする混和材によりセメントの一部を置換する方法は 1980 年代から盛んに研究が進められている。長瀧らの研究 [1)]では国内炭および海外炭より副産される様々な種類の FA を用いた場合について検討され，いずれのケースでもスランプや圧縮強度の上昇が見込めることが報告されている。鳥居らの研究 [2)]では，通常のコンクリートは硫酸ナトリウム溶液に長期的に浸漬すると圧縮強度が低下するが, FA による置換率を大きくすると浸漬中でも強度増進することや, FA による置換率を大きくすると硫酸ナトリウム溶液の浸透性が大きく低下することが検証された。鈴木らの研究 [3)]では，FA を 15%～30%混入することで塩化物イオンの浸透深さを小さくし，長期的に見ても塩分浸透への抵抗性が徐々に向上することが検証された。

一方，FA はセメントと比べて安価であり，置換率が大きいほど経済性が上がることから，1980 年代には Malhotra ら [4)] や福留ら [5)] によってハイボリュームフライアッシュ（以後，HVFA）コンクリート，すなわち大量のフライアッシュを使用したコンクリートに関する研究が進められた。 しかし，土木学会の「フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案）[6)]」によると，セメント質量に対するフライアッシュ置換率（以後，FA 置換率と呼称）は 10～40%と定められており，40%を超えるような研究報告例はごく少数に限られる。一例として，HVFA コンクリートに関する研究には吉田らの研究 [7)]や成田らの研究 [8)]がある。これらの研究では FA 置換率 50～70%程度の HVFA コンクリートの配合や圧縮強度と材齢の関係が示されており，材齢 28 日では FA 置換率が高いほど圧縮強度は低いが，材齢が増すごとに FA 置換率が高いものほど強度が上昇する傾向にあることが示されている。また，細川らの研究 [9)]においては，FA を多量添加することで水和熱抑制効果が期待でき，温度ひび割れ抑制にも有効であると考えられることが報告されている。

このように，HVFA コンクリートは FA コンクリートの圧縮強度をより高め，RC，PC 構造物の長寿命化や経済性の向上の可能性を有している。しかし，HVFA コンクリートの塩分浸透性状に関する研究はほぼ見受けられない。そこで本研究では FA 置換率 0%，30%，60%の供試体に対して圧縮，割裂引張試験により物性を確認したうえで，簡易水分浸透試験，塩分浸透試験を行った。そのうえで，材齢 28 日程度が経過した HVFA コンクリートの水分および塩分の浸透性状が，普通コンクリートと比較してどの程度の性能を有しているかを検証した。

2. 実験方法

2.1 コンクリートに用いた材料，配合，打込み方法

本研究ではいずれの配合においても普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm^3，比表面積：3300cm^2/g）および JIS A 6201 における Ⅱ 種に相当する FA を使用した。**表－1** に FA の材料試験成績を示す。細骨材には珪砂 5 号（表乾密度：2.80 g/cm^3），粗骨材には砕石（最大寸法：20mm，表乾密度：2.80 g/cm^3）を用いた。混和剤として標準形（Ⅰ種）の高性能 AE 減水剤を用いた。本研究で作製したコンクリートの配合を**表－2** に示す。配合設計は 2012 年制定コンクリート標準示方書［施工編］（土木

*1 名城大学　理工学部社会基盤デザイン工学科　(学生会員)
*2 名城大学　理工学部社会基盤デザイン工学科
*3 名城大学　理工学部社会基盤デザイン工学科准教授　博(工)　(正会員)

表－1　FA の材料試験成績

化学成分			物理的性質					
二酸化けい素含有量	湿分	強熱減量	密度	粉末度		フロー値比	活性度指数	
				網ふるい方法 45 μm ふるい残分	ブレーン方法比表面積		28 日	91 日
45%以上	0.5%以下	3.5%以下	1.95g/cm^{3}以上	40%以下	3,500±450cm^2/g	95%以上	80%以上	90%以上

表－2　配合設計

供試体 No.	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)					
						セメント	フライアッシュ	水	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤
F0%	20	15	6	43	42.6	420	0	181	706	969	0.9

学会編）[10] に規定されている方法に基づき行った。単位水量を 175kg/m^3 とする場面は少ないが，セメントの単位量と水セメント比から算出した結果，今回は 181 kg/m^3 とした。FA 置換率 0%の普通コンクリートの目標スランプは 15cm，目標空気量は 6%とした。FA 置換率は 0%，30%，および 60%とした。供試体 No.は，F の後に FA 置換率を示したものである。F30%および F60%供試体では，セメント質量の 30%および 60%を FA で置換したが，それ以外の配合設計は F0%と同様であるため，割愛する。

コンクリートの練り混ぜは JIS A 1132-2020「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に規定されている方法に基づき行った。練り混ぜについては，まずセメント，FA，そして事前に表乾状態にした細骨材を偏りがなくなるまで 10 分ほど混ぜる。次に混和剤を混ぜた水を加え，粉体がなくなるまで全体を混ぜる。最後に事前に表乾状態にした粗骨材を投入して 10～15 分程度練り混ぜる手順で行った。

スランプ試験については，60cm×60cm 平板上に置いたスランプコーンに練り混ぜ終えたフレッシュコンクリートをほぼ等しい量の 3 層に分けて詰め，その各層は突き棒で 25 回偏りの無いように一様に突いた。その後高さ 30cm で 2～3 秒でスランプコーンを引き上げて取り去る方法で行った。F0%供試体は通常のスランプ試験であるため，写真は割愛し，**写真－1** に F60%のスランプ試験の様子を示す。F60%はスランプフロー値で評価した。F0%供試体のスランプ値は 14.0cm であり，目標値（15cm）－1.0cm である。一方，F60%供試体が 61.5cm で高い流動性を呈し，F30%も同程度の高い流動性を呈した。

作製した供試体は，28℃±2℃の室温環境下に 24 時間程度静置した上で脱型し，その後，20℃±1℃に保持された養生プールに水没させて湿潤養生した。湿潤養生を 21 日間行った後，28℃± 2℃の室温環境下で材齢 28 日まで乾燥させる。試験前日に 28℃±2℃の室温環境下に静置した上で，形状寸法および質量を測定し，各種試験を行った。なお養生温度については試験の制約上このように設定しており，湿度は制御していない。

写真－1 F60%のスランプ試験の様子

また，本研究では簡易水密試験を行うため，モルタルの供試体も作製した。モルタル供試体は結合材：水：細骨材の質量比を 2 : 1 : 6 として作製し，FA 置換率はコンクリートと同様に 0%，30%，および 60%とした。

2.2 圧縮試験及び割裂引張試験の方法

圧縮試験は JIS A 1108:2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」に規定されている方法に基づき，2000kN 油圧式コンクリート圧縮試験機を用いて行った。試験は養生期間 28 日目の供試体について行い，各 2 本ずつを使用した。ただし，F0%の供試体はテストピースを兼ねて 3 本を試験にかけた。試験は 0.3mm/min 程度の速度で変位制御により行った。荷重には試験機からの出力を採用し，圧縮強度は式(1)より算出した。また，変位からひずみを算出する際には，変位計とひずみゲージの測定値から補正を行った。

$$f_c=\frac{P}{\pi(d/2)^2} \quad (1)$$

ここで，f_c は圧縮強度(N/mm^2)，P は荷重(N)，d は供試　体の平均直径(mm)である。

割裂引張試験は JIS A 1113:2018「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に規定されている方法に基づき，圧縮試験と同様の試験機を用いて行った。割裂引張強度は

表－3　乾湿繰り返しサイクル

日数	1	2	3	4	5	6	7
サイクル	塩分浸漬		乾燥				

式(2)より算出した。

$$f_t=\frac{2P}{\pi dl} \quad (2)$$

ここで，f_t は割裂引張強度(N/mm^2)，P は荷重(N)，d は供試体の平均直径(mm), l は供試体の平均長さ(mm)である。

2.3 簡易水分浸透試験の方法

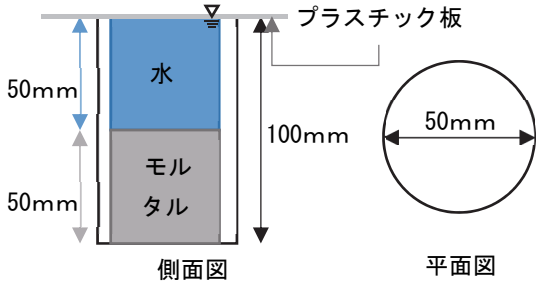
塩化物イオンは水分とともにコンクリート内部に浸透すると考えられるため，コンクリートに対する水の浸透性は塩分の浸透性と関係すると思われる。そこで，まずは HVFA コンクリートの水密性を検証するために，簡易水分浸透試験を行った。**図－1** に試験の様子を示す。φ 50mm×100mm の容器に半分モルタルを打込み，24 時間 16℃±2℃の室温環境下で静置して硬化させた。この時，供試体は FA 置換率（0%，30%，60%）ごとに 3 本ずつ作製した。なお室温については試験の制約上このように設定しており，湿度は制御していない。硬化後，さらに材齢 2 日まで同様の室温環境下にてモルタルを静置して乾燥させた後，容器の残り半分に水を充填し，湿潤養生期間を想定して 123 時間経過後にモルタル上の水を排水して質量を測定し，3 日乾燥させた。その後，再び水を充填し，この 2 回目の乾燥から 168 時間後および 664 時間後にモルタル上の水を一時的に排水し，質量を測定した。ここで，質量の測定後は再び水を充填した。3 日間の乾燥後の容器とモルタル供試体を合わせた質量 w_m，そして容器に入って給水したモルタル供試体の質量（モルタル上の水を排水後）w_{m+w} を用いた式(3)から給水量 w_w を算出した。

$$w_w = w_{w+m}-w_m \quad (3)$$

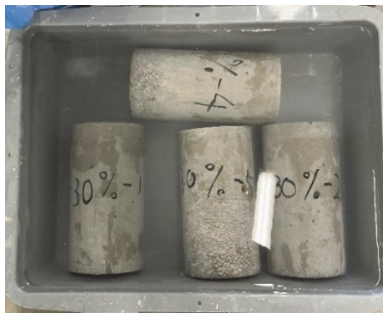
2.4 塩分浸透試験の方法

本研究では，乾湿繰り返し試験と硝酸銀溶液の噴霧によって塩分浸透深さを計測する。

乾湿繰り返し試験では，塩分濃度 3%の NaCl 溶液を用いて**写真－2** のように容器に供試体を沈めることで塩化物イオンの浸透を促進させる。材齢 28 日に達した供試体からサイクルを開始し，**表－3** に示すように 7 日間を 1 サイクルとして 2 日塩分浸漬・5 日乾燥の期間を設けた。塩分浸漬期間と乾燥期間中はともに 28℃±2℃の室温環境下に静置した。この環境下では試験の制約上，湿度の制御は行っていない。試験は 4 サイクルと 8 サイクルの 2 通りで行い，1 サイクルごとに FA 置換率の異なる供試体各 2 本ずつを使用した。



図－1 簡易水分浸透試験の様子



写真－2 塩分浸透試験の様子の一例

硝酸銀溶液を用いた試験は，2021 年に(一社)日本非破壊検査協会規格 NDIS3437:2021[11]の硝酸銀溶液の噴霧による硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さ試験方法が制定されており，この方法を用いた文献は過去にいくつもある[一例として 12),13),14)]。本実験では簡易かつ短時間でできる試験としてこれらを参考に試験を行った。乾湿繰り返しのサイクル終了後，前述の方法で割裂引張試験を行い，断面に硝酸銀溶液を噴霧して数日間放置し，化学反応を進行させる。その後，断面に塩化銀の白色沈殿が出たことを確認し，塩分浸透深さを測定した。なお，塩分浸透深さの測定は割裂引張試験の割裂面の両端について行い，各端部から各変色境界までの距離を 0.1mm 単位で計測し，平均して塩分浸透深さの測定値とした。供試体の上面と下面は削ったため塩分浸透が起こりやすくなっていると考え，測定値から除外した。

3. FA によるセメント置換率と FA コンクリートの物性に関する実験結果と考察

供試体の圧縮強度の平均値を**図－2** に示す。F30%の圧縮強度は F0%の 145.3%であり，福留らの研究[15)]において，養生期間 28 日で FA 置換率 30%の供試体は FA 置換率

0%の供試体の約 80%程度であることが示されているため，本試験で得られた値はかなり大きなものであるといえる。この原因については，練り混ぜ時や打込み時におけるコンクリート内の材料の偏りや FA の種類等が考えられるが，今後より詳細に検討する必要がある。なお，今回の実験では養生温度が福留らのものよりも高いため，強度が多少大きくなっていることが予想されるが，あまり大きな差はないと考えた。一方，F60%の圧縮強度は F0%の 50.9%であり，既出の文献[15]において，28 日養生後に F60%の圧縮強度は F0%の場合の 45%程度と示されているため，妥当な値であるといえる。F60%供試体の破壊後の様子は F0%や F30%のものと比べて脆く，試験後の断面に多くの粉体が確認された。試験後の F60%供試体は粗骨材を素手で容易に取ることができたことから，この粉体は粗骨材の周辺にあったモルタル分が破壊されたことによって生じたものと考えられる。FA を多く配合したことでモルタル部分の強度の発現が遅れ，硬化しきっていなかったため，粗骨材とモルタルの界面に通常よりも大きな脆弱性が発生したと考えられる。このことから F60%は養生期間 28 日目の時点でモルタル部分に十分な強度が出ておらず，土木学会指針[6]や吉田らの研究[7]において示されているように，材齢をより長くとる必要があることが確認された。

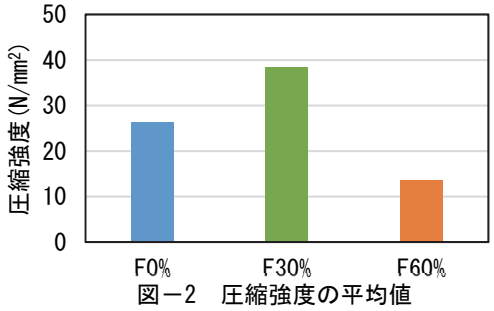
また，**写真－3** に圧縮試験後の供試体外観の一例を示す。試験後の供試体の様子には大きな差がなかったため，FA 置換率ごとに供試体 1 体の写真を掲載した。F0%供試体と F30%供試体には外観の違いは特に見られなかったが，F60%供試体では先にも述べたように，圧縮破壊後の断面に粉体が多く見られたため，28 日間の養生期間ではまだ十分な水和反応が進んでいなかったと思われる。

次に供試体の割裂引張強度を**図－3** に示す。圧縮試験を材齢 28 日目に行ってから乾湿繰り返し試験を行ったため，割裂引張試験の試験材齢は 4 サイクルで 56 日目，8 サイクルで 84 日目となっている。FA 置換率ごとに比べると，F0%供試体は F30%の 58～84%，F60%の 61～73%程度であった。このことから FA を配合した方が割裂引張強度は増加するが，配合量は置換率 30%と 60%であまり変化しないことが分かった。

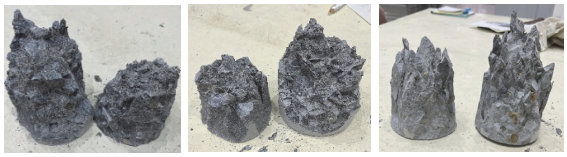
4. FA コンクリートにおける塩分浸透性状と FA のセメント置換率に関する実験結果と考察

4.1 簡易水分浸透試験

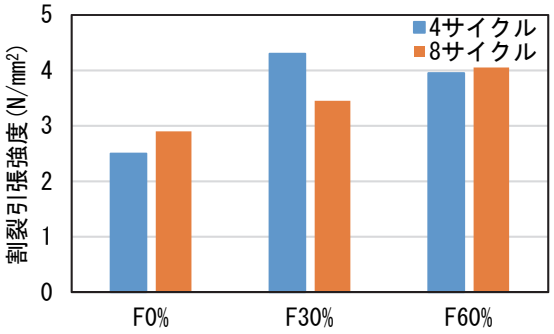
供試体ごとの給水量を**図－4** に示す。給水量を 1 回目乾燥後 123 時間経過時，2 回目乾燥後 168 時間経過時，そして 664 時間経過時の値を比較すると，F0%で若干差が生じているが，概ね同程度である。そこで，給水量の平均値で比較すると，F0%で 14.7g，F30%で 6.6g，F60%で 6.5g であり，F0%を基準として F30%では 45%，F60%では 44%に低減されており，FA の使用により水分の浸透が飛躍的に抑制されている傾向が見られる。また，F30%と F60%では両者は凡そ同程度の値であり，FA 置換率と給水量の低減効果に相関は見られなかった。ただし，給水量の実測値のばらつきの範囲については，F0%の平均値を基準として F30%では 41%～52%，F60%では 18%～71%であり，F30%の範囲は小さいが F60%の範囲はかなり大きくなっている。F30%は流動性が高く，打ち込みも容易にできたが，F60%は F30%より粘性が高まるため，コンクリート内における材料に偏りが生じること



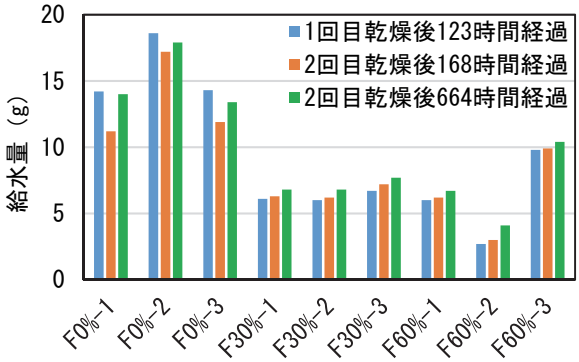
図－2　圧縮強度の平均値


(a) F0%－1　(b) F30%－1　(c) F60%－1

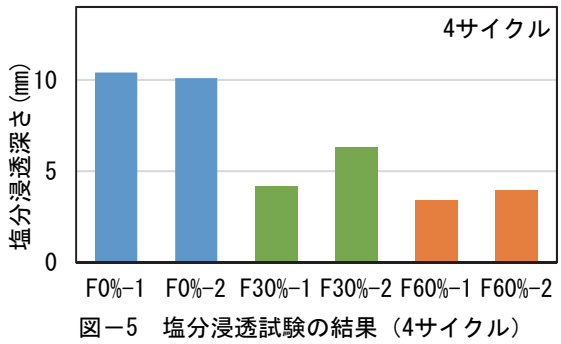
写真－3　圧縮試験後の供試体外観の一例



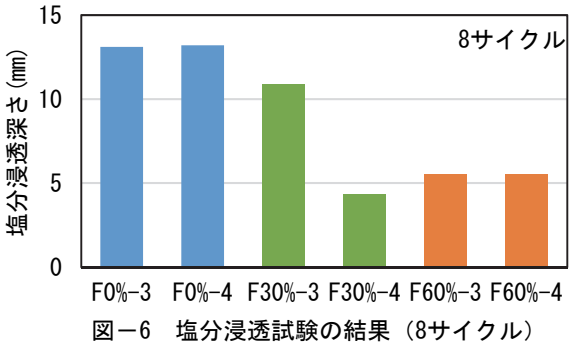
図－3　割裂引張強度の平均値



図－4　簡易水分浸透試験の結果



図－5　塩分浸透試験の結果（4サイクル）

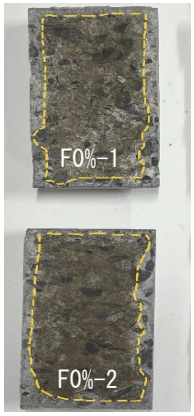


図－6　塩分浸透試験の結果（8サイクル）

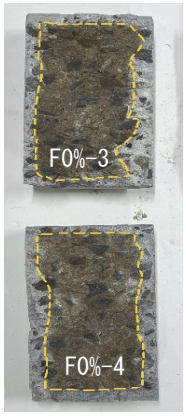
があり，この場合には給水量がより大きくなる傾向にあった。また，F60%-3 は外観からは確認できなかったが，モールドと供試体の界面に隙間があり，そこから水が侵入したことで給水量が増加したと考えられる。

4.2 塩分浸透試験

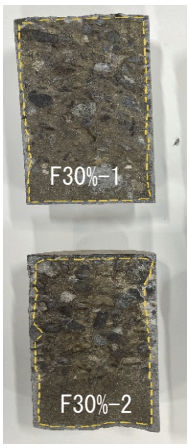
塩分浸透深さの測定値を試験サイクル数（4 サイクルと 8 サイクル）ごとに**図－5** と**図－6** に示す。試験の結果，4 サイクル，8 サイクルともに FA によるセメント置換量が大きいほど塩分浸透深さが低減された。サイクルごとに供試体の平均値で比較すると，4 サイクル終了時点で，塩分浸透深さは，F0%を基準として，F30%では 52%，F60%では 36%に低減された。一方，8 サイクル終了時点では，F0%を基準として，F30%では 58%，F60%では 42%に低減された。よって，前述の水分浸透試験と同様に，FA の使用により塩分の浸透深さが大きく低減される傾向が見られた。また，実験における平均値を見れば， FA 置換率の違いによる塩分浸透の抑制効果に差は見られなかった。しかし，F30%-3 と F30%-4 の間で大きく値が異なっている。その原因を検討するために，塩分浸透試験後の供試体の断面写真を**写真－4～写真－9** に示す。なお，写真中の供試体はすべて上側が型枠の上部である。供試体の上面と下面は削ったため塩分浸透が起こりやすくなっていると考え，測定値から除外したが，写真から観察するに概ね影響はないと考えられる。ほとんどの供試体において，粗骨材が概ね全体に密に配置されているが，**写真－7** において，F30%-3 は粗骨材が比較的中央に集中しており，表面付近はモルタル部が中心となっている。このことから，F30%-3 で塩分浸透深さが大きくなった



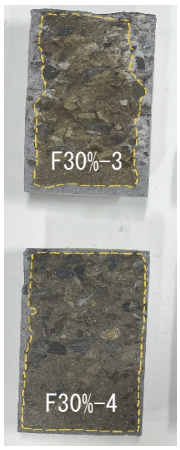
写真－4 塩化物イオン浸透深さ（4 サイクル）



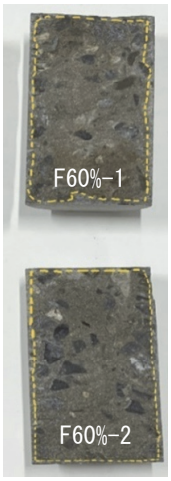
写真－5 塩化物イオン浸透深さ（8 サイクル）



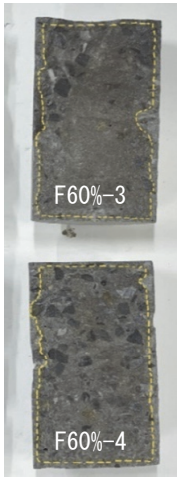
写真－6 塩化物イオン浸透深さ（4 サイクル）



写真－7 塩化物イオン浸透深さ（8 サイクル）



写真－8 塩化物イオン浸透深さ（4 サイクル）



写真－9 塩化物イオン浸透深さ（8 サイクル）

理由としては，締固めの際に振動を加えすぎたことにより，ブリーディング水が型枠に沿って移動し，コンクリート表面に脆弱なモルタル層が形成されたことや，粗骨材が供試体中央に集まってしまったことなどが考えられる。したがって，塩分浸透試験において F30%-3 で見られたブリーディングによるコンクリート表面への脆弱な

モルタル層の形成や，水分浸透試験において F60%で見られたコンクリート内での材料の偏りが，水分や塩分の浸透に影響することが考えられる。なお，F0%供試体ではブリーディングの影響はより大きいものと考えられる。今後，施工時の締固めやブリーディングの状況と水分および塩分の浸透状況の関係に関する研究を進めたい。さらに, FA 置換率を高めてセメントの量を減らしていくと，ポゾラン反応を起こすのに十分な水酸化カルシウムを確保できなくなり，構造物の長期強度や化学抵抗性が低下する恐れがある。そのため, FA 置換率をさらに増した場合，コンクリートの性能向上に寄与できるのかを今後検討する必要があると思われる。

5. まとめ

本研究では HVFA コンクリートの物性を確認したうえで，水分および塩分の浸透性状を実験的に検証した。本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) FA でセメントを置換し，材齢 28 日目の圧縮強度を測定すると，F0%を基準として，F30%は 145.3%，F60%は 50.9%であった。

(2) FA でセメントの 30%以上を置換することにより水分の浸透量が普通コンクリートの 45%程度に低減された。

(3) FA でセメントの 30%を置換することにより塩分の浸透深さが普通コンクリートの 52%に低減された。また，実験における平均値で見れば，60%置換の場合に普通コンクリートの 36%に低減された。

(4) FA 置換率 30%のコンクリートは流動性が高く，打ち込みも容易にできたが，FA 置換率 60%ではより粘性が高まるため，使用したコンクリート内において各種材料の偏りが生じる場合があり，その場合に水分浸透量がより大きくなる傾向にあった。

(5) FA 置換率 60%モルタルの水分浸透試験の一部で，モルタル内での材料の偏りに起因すると思われる浸透量の増大が見られた。ブリーディングによると思われるコンクリート表面への脆弱なモルタル層が形成されたことなどが考えられる。

参考文献

1) 長瀧重義，大賀宏行，越智康介，中村武夫： フライアッシュの品質とその評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol. 7, No. 1, pp. 197-200, 1985.5.

2) 鳥居和之，川村満紀，谷口裕史，伽場重正： コンクリートの耐硫酸塩性に及ぼすフライアッシュの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 9，No. 1，pp. 205-210，1987.6.

3) 鈴木健太，杉山隆文，川北昌宏，志村和紀：フライアッシュコンクリートの塩分浸透性に関する実験的考察，コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1，pp.849-854，2008.6.

4) Malhotra，V.M.：Investigation of high-volume fly ash concrete systems, EPRI TR-103151 Project 3176-06 Final Report，Oct.1993.

5) 福留和人：フライアッシュを大量使用したコンクリート，コンクリート工学，日本コンクリート工学会，Vol. 52，No.5，pp. 415-419，2014.5.

6) 土木学会コンクリート委員会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），土木学会，1999.4.

7) 吉田和隆，吉岡彗，高橋昭裕，浜田純夫：HVFA コンクリートにおける材齢 1 年までのフライアッシュの強度寄与, 土木学会論文集 F,Vol. 64, No. 1, pp. 104-109，2008.3.

8) 成田健，加藤将裕，井上和重：フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの配合設計法の一提案と強度特性，コンクリート工学，日本コンクリート工学会，Vol. 38，No.6，pp.17-22，2000.6.

9) 細川大介，室野井敏之，竹内直也，溝渕利明：フライアッシュ多量添加によるコンクリートの水和熱抑制効果に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33，No. 1，pp. 179-184，2011.

10) 土木学会：2012 年度制定コンクリート標準示方書［施工編］，土木学会，2012.12.

11) 青木優介，澤本武博，森濱和正，川俣孝治：NDIS 3437 : 2021 硝酸銀溶液の噴霧による硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さ試験方法の概要および懸念事項，非破壊検査，Vol. 71，No.10，pp.453-457，2022.10.

12) 青木優介，嶋野慶次，三好佑果，鈴木正志：硝酸銀溶液噴霧法による硬化コンクリート中への塩化物イオン浸透予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.759-764，2008.6.

13) 武藤義彦，大即信明，岸利治：硝酸銀噴霧法を用いた地下鉄トンネルの塩害影響範囲の特定手法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.915-920，2016.6.

14) 大橋夏樹，三澤惠太，青木優介：硝酸銀溶液の噴霧量の個人差が変色境界の塩化物イオン量に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.1564-1569，2020.7.

15) 福留和人，石川嘉崇，大即信明，西田孝弘：フライアッシュを高置換したコンクリートの強度発現に及ぼす NaCl の効果, コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.187-192，2013.6.