論文　フライアッシュで粉体量を高めた流動コンクリートの ASR 抑制効果

山本　武志[*1]

要旨：単位セメント量 330kg/m^3，JIS-II 種-フライアッシュ（FA）混和量を 49.5～115.5kg/m^3，単位水量 165kg/m^3 とした締固めを要する高流動コンクリート（28 日圧縮強度 50N/mm^2 以上）における ASR 抑制効果を評価した。FA 量が 82.5kg/m^3 以上の場合に暴露期間 3 年時点でコンクリート表層部においても膨張挙動を抑えることができた。これは，ポゾラン反応の進展と併せて 40℃-NaCl 湿布暴露の条件下で NaCl の浸透抑制効果によることを確認した。呼び強度が 36N/mm^2 を超える場合においても単位 FA 量を 82.5kg/m^3 以上とすることで ASR を抑制できることが示唆された。

キーワード：ASR，アルカリ，フライアッシュ，NaCl，塩分，高流動，中流動

1. はじめに

ASR が発生する可能性のある骨材を使用せざるを得ない場合は，JIS A 6201 で規定されるⅡ種相当のフライアッシュ（FA）をセメント置換率で 15%以上として混合することが推奨されている [1),2),3)]。一方でコンクリート中のアルカリ総量の規定値 3.0kg/m^3 以下，とする規定から単位セメント量に上限を設け，FA を混和する場合でも ASR 抑制目的であれば設計基準強度が 36N/mm^2 を超えない範囲で FA を 80kg/m^3 以上，もしくは FA 混合セメント B 種もしくは C 種の使用が推奨されている [4)]。

寒冷地方のコンクリート製橋梁等では NaCl，ギ酸 Na 等を含む融雪剤によって ASR の進行が速まる [5),6)]ことが知られており，そのような場合においても FA をより多く混和することで ASR を抑制できることが示されている [6)]。なお，FA の多量混和と併せて水結合材比を低めに設定することで NaCl の浸透に対する抑制効果が高まる [7)]ため，NaCl 等の融雪剤の浸透が想定されるコンクリートに対しては適切な配合を設定することで対処できると考える。

コンクリートの品質に大きな影響を及ぼす骨材のうち，細骨材として砕砂が現在多く使われており，その特異な粒子形状がコンクリートの単位水量を引き上げる要因になっている [8)]。この砕砂によるフレッシュ性状への影響，特に材料分離への対応として FA を多く混和した粉体系中流動コンクリート（締固めを必要とする高流動コンクリート）の普及が期待される [9)]。

本研究では，FA 混和量を高め，設計基準強度を 36N/mm^2 以上とした中流動コンクリートにおける FA の ASR 抑制効果を塩分環境下に暴露した反応促進条件下で評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および試験体準備

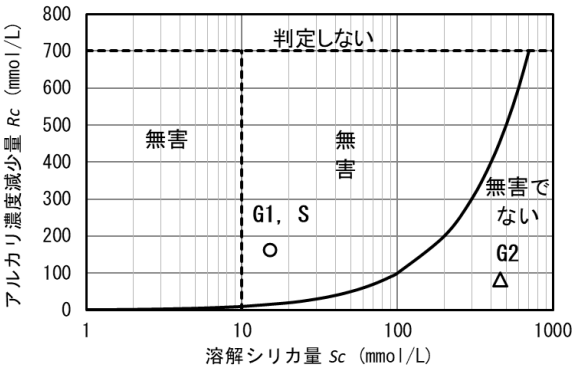
(1) 使用材料

JIS A 6201 のⅡ種に相当する FA および JIS R 5210 の普通ポルトランドセメント（OPC）を結合材に用いた。それらの比表面積，密度，Na_2O+0.658K_2O（全アルカリ量，R_2O）を**表－1** に示す。

表－1　結合材の物理化学特性値

材料	ブレーン値 (cm^2/g)	密度 (g/cm^3)	全アルカリ量 (R_2O, %)
FA	4010	2.29	1.61
OPC	3300	3.16	0.44

ASR に対して無害でない安山岩（G2，Rc：84mmol/L，Sc：456mmol/L）と無害の石灰岩（G1，Rc：163mmol/L，Sc：15mmol/L）（**図－1**）をそれぞれ粉砕し 20～5mm の範囲で JIS A 5005 に適合する粒度分布に整えた。これらの骨材を用いた研究成果 [10),11)]で最大膨張量をもたらす混合割合（ペシマム）で調整した粗骨材，上記石灰石を破砕，粒度調整した細骨材を用いて試験体を作製した。



図－1　化学試験法(JIS A 1145)による ASR 性評価結果

(2) 試験体の作製および養生条件

通常は ASR を促進させるために練混ぜ水に所定量の NaOH を添加してセメントの見かけ上の R_2O 量を 1.2%に高めるが，本研究では OPC の水和反応および FA のポ

*1 (一財)電力中央研究所　サステナブルシステム研究本部　構造・耐震工学研究部門　上席研究員　工博　(正会員)

表－2　膨張量・強度特性評価用試験体の配合およびフレッシュ性状

配合	水	結合材		細骨材	粗骨材		化学混和剤			空気量	スランプ
	W (kg/m³)	OPC (kg/m³)	FA (kg/m³)	S (kg/m³)	G1 (kg/m³)	G2 (kg/m³)	SP1 (kg/m³)	SP2 (kg/m³)	AE (g/m³)	(%)	フロー(cm)
N	165	330	0	860	587	391	3.40		4.95	4.9	42.0
F15			49.5	735				4.29	23.10	6.6	44.5
F25			82.5	696				4.46	37.95	7.2	40.0
F35			115.5	657				5.61	99.00	6.5	42.0

注）S：石灰岩（無害），G1：石灰岩（無害），G2：安山岩（無害でない），
SP 1 ：高性能 AE 減水剤増粘剤一液タイプ，SP2：混和材高含有対応型高性能 AE 減水剤
AE：変性ロジン酸化物系陰イオン界面活性剤

ゾラン反応に影響を及ぼすことを避け，さらに融雪剤の浸透による ASR 促進の影響を見極めるために NaOH 添加を行わず, NaCl 溶液を染み込ませた湿布養生を行った。

試験体を製造するためのコンクリートは呼び強度 45N/mm², スランプフロー45cm とした。目標空気量を N（OPC 単味）に対して 4.5±1.0%としたが，FA コンクリートでは型枠への打設後，硬化の過程で空気量が 1.5～2.0%程度減少する [9]ため，F15，F25，F35 は 7.0±1.0%とした。配合および添加した高性能減水剤および AE 剤の種類を**表－2** に示す。混練直後に目標とするフレッシュ性状を確認した後に膨張量測定用試験体はゲージプラグ埋込型の型枠（10×10×40cm）に打設し，20±2℃の恒温室で 24 時間初期養生を行い，脱型，そして材齢 28 日まで水中養生（20±2℃）を行い，基長測定を行った。基長測定後に NaCl 溶液を 200g 沁み込ませた不織布で各試験体を覆い，さらにラップフィルムとビニール袋で密封した状態で 40±2℃の恒温槽内で直立した状態で所定材齢まで静置した。NaCl 溶液の濃度は暴露期間 6 ヶ月まで 10%としたが，膨張挙動が認められなかったため，暴露期間 6 ヶ月以降は溶液濃度を 20%に高めた。なお，測定材齢毎に NaCl 溶液を含侵させた不織布を取り換えた。強度測定用試験体はφ10×20cm の型枠に打設した後，20±2℃の恒温室で 24 時間初期養生を行い，脱型，そして，所定材齢まで 20±2℃で水中養生（標準養生）を行った。また，膨張量測定試験と同様に材齢 28 日までの 20±2℃水中養生後に NaCl 溶液（28 日以降 6 ヶ月間は濃度 10%，暴露期間 6 ヶ月以降は濃度 20%）を 100g 含ませた湿布養生を行う強度試験も実施した。

2.2 状態分析

(1) 塩分浸透深さ

塩分浸透深さを把握するために 10×10×40cm の試験体を別途作製し，10×40cm の 1 面以外の 5 面をシールした状態で膨張量測定用試験体と同様の養生および暴露を行い，代表的な材齢で 1cm 程度の厚さで切り出し，試料を採取した。塩水に接する面から中心方向に向かって 45×45mm，厚さ 5mm 程度の試料片を切り出し，ダイヤモンドスラリーによる研磨を複数段階実施し，アセトン浸漬と D-dry による乾燥処理後に試料台に固定し，炭素蒸着を行った。そして，FE-EPMA（島津製作所製，8050G）を加速電圧 15kV, プローブ電流 200nA, プローブ径 40μm の条件で Na, Cl, Ca 等 9 元素の濃度分布測定を行った。

(2) ASR ゲルの組成分析

上記(1)と同じ試料断面上で ASR ゲルの存在が認められた個所を中心に高倍率とした微小領域を対象として FE-EPMA による元素濃度分布測定を行った。分析条件は，加速電圧 15kV，プローブ電流 20nA，プローブ径最小（1μm 程度）であり，分析対象は Na，Cl，K 等 9 元素である。

3. 実験結果および考察

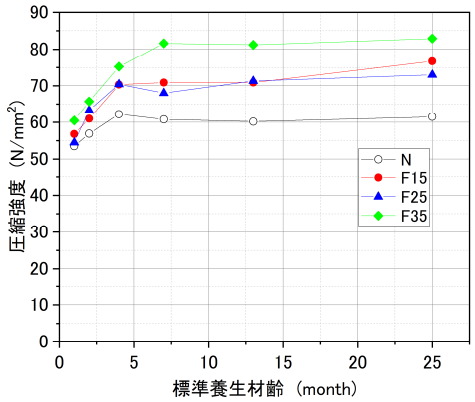
3.1 強度特性

(1) 標準養生における試験体

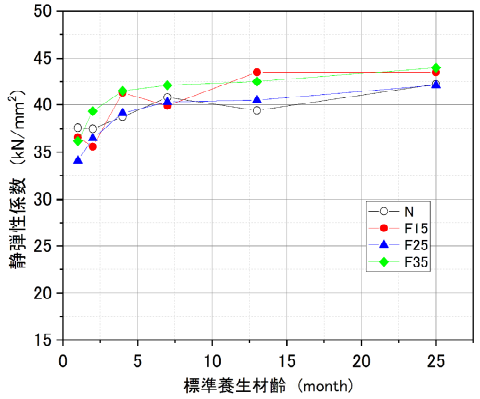
標準養生を行った各試験体の圧縮強度を**図－2** に示す。材齢 28 日における圧縮強度は 53.5～60.5N/mm² の範囲で試験体間の差は比較的小さいが, 材齢 4 ヶ月後以降 FA を混和した試験体, 特に 115.5kg/m³ 混和した試験体（F35）の圧縮強度増進が顕著であった。これはポゾラン反応の進展による。各試験体の静弾性係数の変化を**図－3** に示す。材齢 28 日で FA 無混和の N の静弾性係数は最大となるが，材齢 2 ヶ月以降の増大幅は比較的小さいことが分かる。一方，FA を混和した試験体の静弾性係数は材齢 2 ヶ月以降に増大傾向が顕在化し，特に F35 における増大が顕著であった。土木学会コンクリート標準示方書[設計編]に示される圧縮強度から静弾性係数を求める式より得られる値（JSCE）との関係を**図－4** に示す。いずれの試験体においても JSCE の値と同程度以上であり, ASR は発生していないと考える。

(2) NaCl 湿布養生における試験体

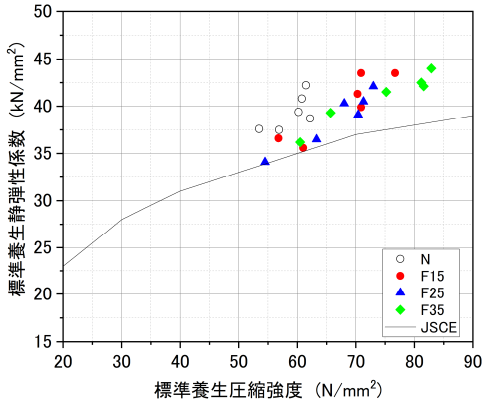
NaCl 湿布養生を 40℃下で行った各試験体の圧縮強度を**図－5** に示す。40℃下で水和反応およびポゾラン反応が進展し，暴露期間 1 ヶ月時点で FA を混和した試験体の圧縮強度の増大が顕在化した。そして，FA 混和量が多いほど高い圧縮強度を示し，ポゾラン反応の発生量が大きくなることが分かる。N は暴露期間 6 ヶ月以降の強度低下が顕著であった。静弾性係数の経時変化を**図－6** に示す。N は暴露期間 6 ヶ月以降に顕著な静弾性係数の低下傾向を示すが，F15，F25，F35 は静弾性係数の増大傾向を示した。圧縮強度から静弾性係数を求める値（JSCE）



図－2　圧縮強度の経時変化（標準養生）



図－3　静弾性係数の経時変化（標準養生）



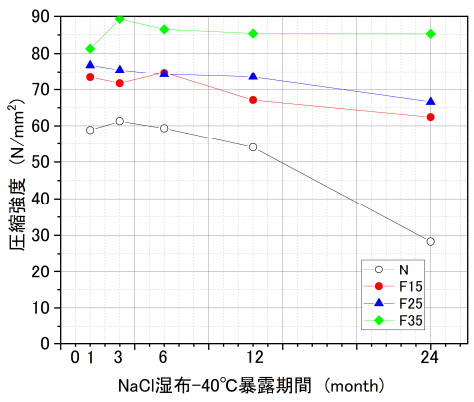
図－4　圧縮強度と静弾性係数の関係（標準養生）

を下回るのはNの1点，暴露期間24ヶ月のみであった。このことから暴露期間24ヶ月におけるNで骨材近傍に生成したASRゲルの影響が顕在化したと推察する。一方，**図－5**ではF15およびF25の圧縮強度が暴露期間6ヶ月以降に低下する傾向を示したが，静弾性係数がJSCEの換算値よりも高いことから骨材表層部での変質，すなわちASRゲルの発生による影響ではなく，その現象は別の要因によると推察するがその特定に至らなかった。

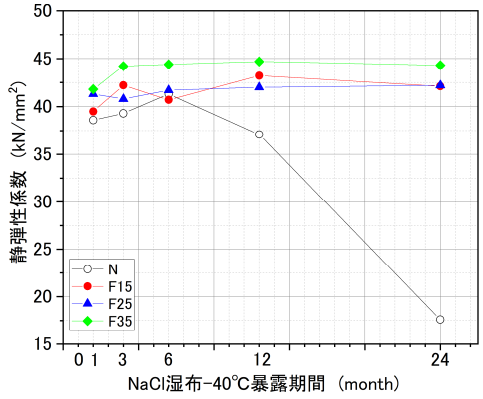
3.2 膨張挙動

(1) 長さ変化率

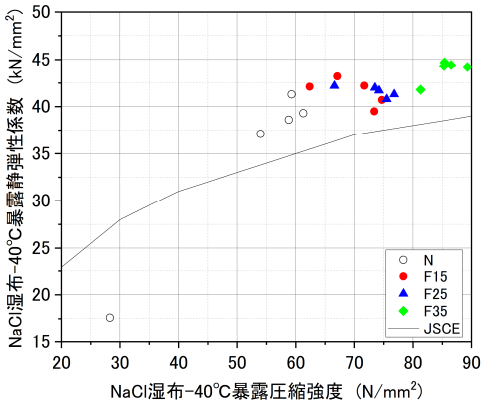
材齢28日を基準長としてNaCl湿布暴露期間と各試験体の長さ変化率の関係を**図－8**に示す。Nのみが12ヶ月



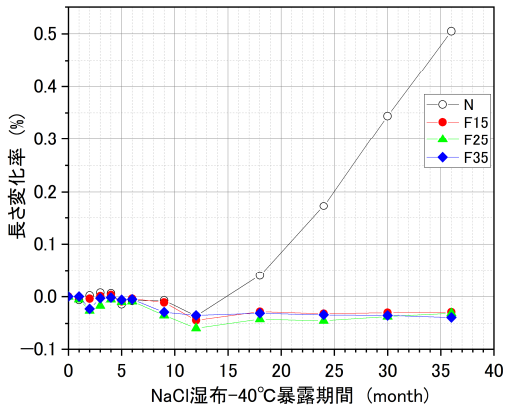
図－5　圧縮強度の経時変化（NaCl 湿布養生）



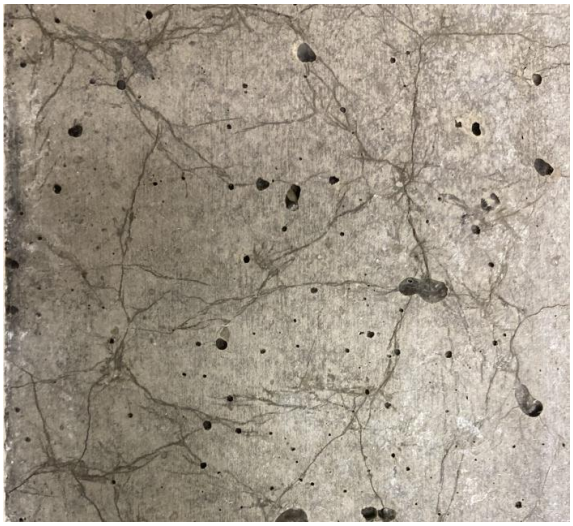
図－6　静弾性係数の経時変化（NaCl 湿布養生）



図－7　圧縮強度と静弾性係数の関係（NaCl 湿布養生）



図－8　長さ変化率の比較（NaCl 湿布養生）



図－9　NaCl 湿布暴露期間 36 ヶ月における N の表面

図－10　NaCl 湿布暴露期間 36 ヶ月における F15 の表面

以降に顕著な膨張挙動を示したが, FA を混和したコンクリートでは僅かな収縮傾向を示すに留まった。36 ヶ月時点で N は 0.51%の膨張率を示し，収束する傾向を示していない。

(2) 外観観察

40℃-NaCl 湿布暴露を 36 ヶ月行った時点で 0.5%もの膨張率を示した N の表面を**図－9** に示す。粗骨材に沿った網目状の微細なひび割れが試験体表面全体に発生した。そして，その表面に触れるとひび割れ部分が低く，ひび割れで囲まれた領域は中央部にかけて高くなる凹凸を感じ取れた。粗骨材表層部が ASR ゲルの吸水膨張による膨潤状態にあると考える。なお，粗骨材の 6 割が無害な石灰岩であるが，**図－9** に示す一様な網目状のひび割れの発生は石灰岩の表層部も膨張していることを示唆するため, 骨材周囲での ASR ゲルの生成状態に関する分析を基に後段で考察する。

同材齢における F15 の表面を**図－10** に示す。開口幅が非常に狭い微細なひび割れが不規則に発生していた。N とは異なり，表面に触れても平滑な状態であり，粗骨材表層部における ASR ゲルの膨潤は顕在化していないが, ASR による膨らみによると考える。**図－8** に示すように F15 は全く膨張していないが, 暴露期間 36 ヶ月以降に膨張挙動を示す可能性がある。

3.3 状態分析

(1) Cl イオンの浸透深さ

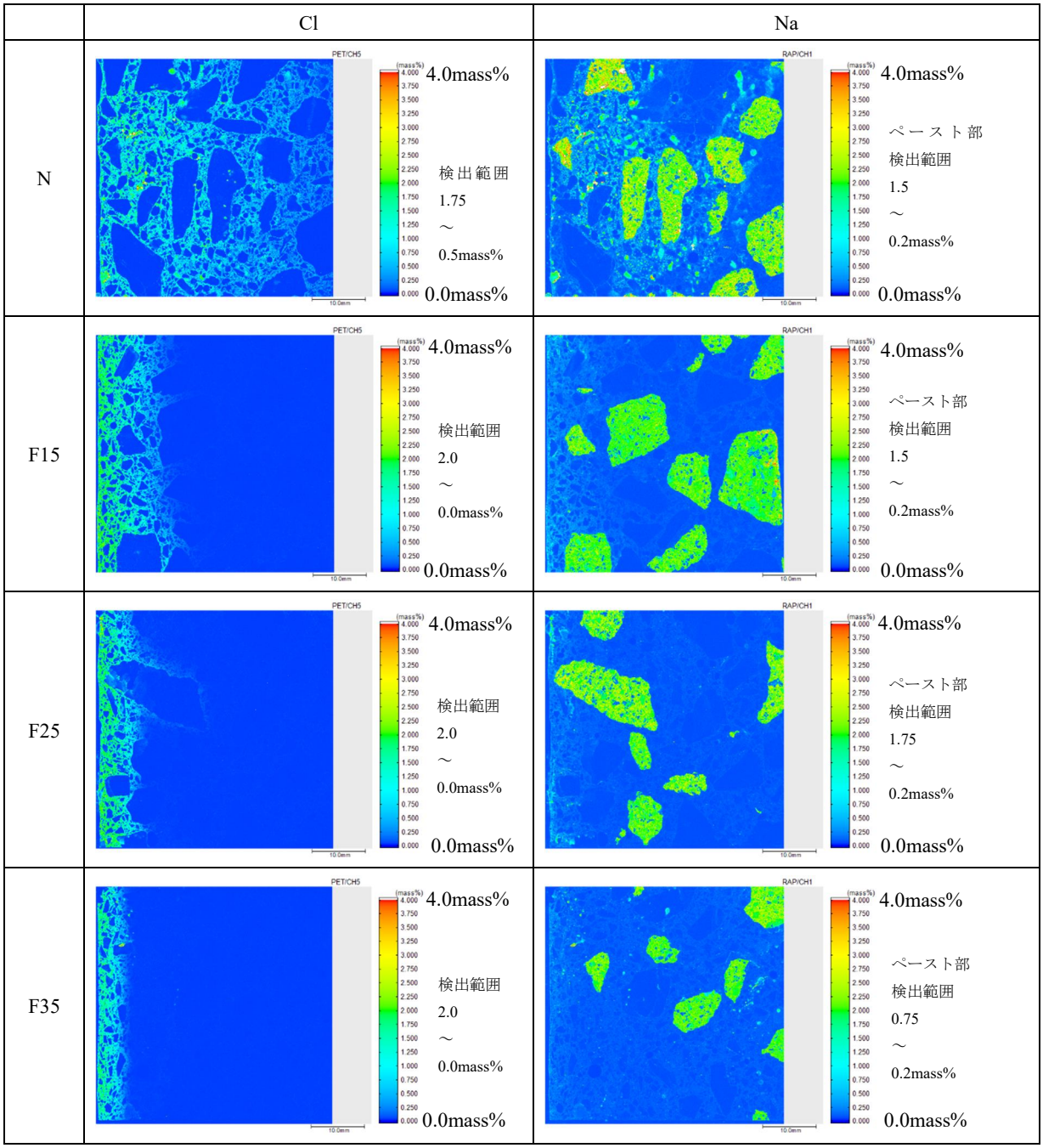
40℃-NaCl 湿布養生を行った塩分浸透深さ分析用の各試験体を暴露期間 6 ヶ月で採取し，前述の一連の試料調整を行った後に FE-EPMA による広域分析（45×45mm）を行った。Cl と Na の元素濃度分布を**図－11** に示す。N において Cl の浸透深さは暴露面から 45mm に達していたため，さらに 45mm 深い位置まで分析し，その端部まで Cl が浸透していることが分かった。N においては暴露期間 6 ヶ月で暴露面から 90mm 以上の深さまで Cl が浸透していた。F15，F25，F35 では各々17.5mm，10mm，6mm 程度まで Cl が浸透していたが，N に比べて浸透深さは限定的であった。F25 では，Cl が粗骨材表層部を伝ってより深部にまで拡散した箇所が認められた。なお，暴露面近傍では，N に比べて FA を混和したコンクリートの方が高い Cl 濃度を示しており，Cl が表層部に濃縮していることが分かる。

(2) Na イオンの浸透深さ

N においては暴露面から 40mm 程度まで Na が浸透していたが，F15，F25，F35 では各々12.5mm，10mm，5mm 程度の浸透であり, いずれも Cl に比べて浸透深さが小さい。これは各試料の C-S-H 相に対して Na^+に比べて Cl^-は吸着しづらいことに起因すると考えられる。

(3) ASR ゲルの組成

40℃-NaCl 湿布養生を行った試験体 N の暴露期間 24 ヶ月における ASR ゲルの組成分析を FE-EPMA を用いて行った。300×600μm とした微小領域を対象とした分析結果を**図－12** に示す。COMPO 像は対象物を構成する元素が重い場合は白色に近づき，軽い場合は黒色に近づく画像である。画像の左下から右上に向かって ASR ゲルが存在しており，その組成は Si，Ca，Na，K，Cl である。ASR ゲルを挟む骨材は Ca を多く含み，Si を含まないことから石灰岩（G1）であると判断した。**図-12** に示す ASR ゲルは Ca を比較的多く含むことから，近傍の安山岩を起点として発生した ASR ゲルがセメント水和物 C-S-H 相に一定期間以上接することで Ca を取り入れ，変質したと推察した。ペースト部で ASR ゲルが膨張する過程で石灰岩骨材 G1 にひび割れを発生させ，ASR ゲルが入り込み，見掛け上その骨材が膨張したと考える。この現象により**図－9**（試験体 N）に示すように安山岩（G2）よりも多く石灰石（G1）を使用したコンクリートの側面で均



図－11　40℃-NaCl 湿布 1 面暴露試験体(暴露期間 6 ヶ月)における Cl と Na の元素濃度分布

注 1）各画像は 45×45mm の分析範囲を示す。
注 2）各画像の左端が NaCl 湿布暴露面である。
注 3）Na を 2～3%含む 5～20mm の粒子は安山岩粗骨材，Na を含まない粒子は石灰岩粗骨材および細骨材を示す。

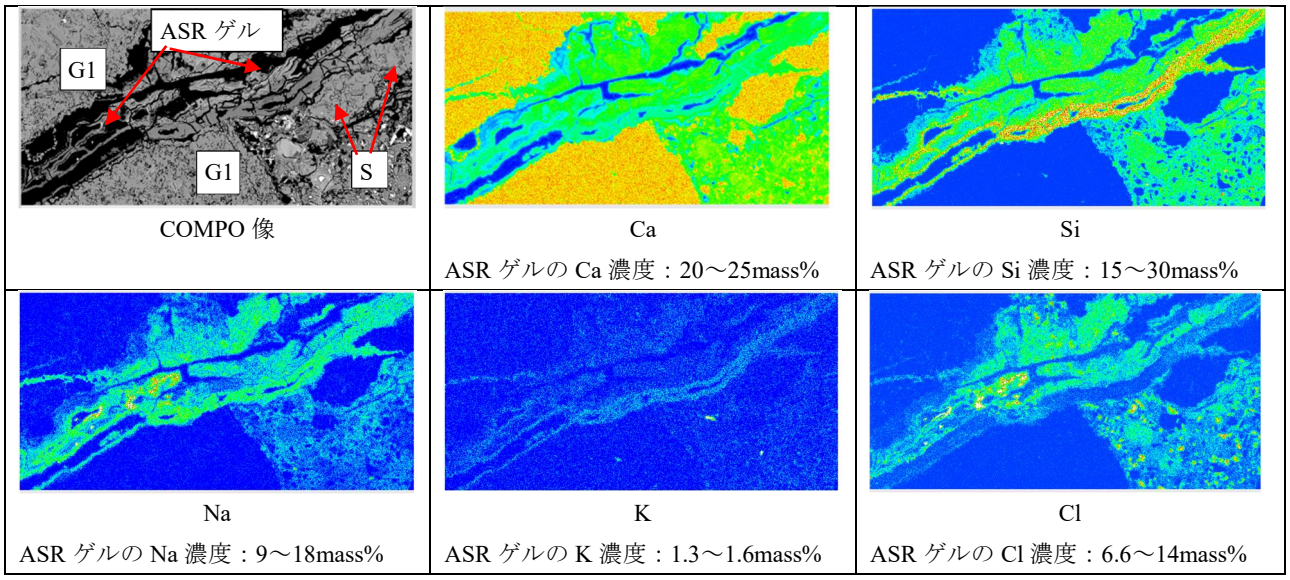
等に凹凸が生じ，網目状の微細なひび割れが発生したと考える。なお，この個所以外では，G1 周囲に ASR ゲルが接している状況が複数存在し，その組成は Si：25～35mass%，Ca：16～20mass%，Na：10～15mass%，K：1.3～2.5mass%，Cl：1.9～3.1mass%であった。

4. まとめ

本研究では ASR 有害判定となる安山岩を使用し，単位 FA 量を 49.5kg/m^3，82.5kg/m^3，115.5kg/m^3 とした高粉体量型の中流動コンクリートを呼び強度 45N/mm^2 で製造し，強度発現性と ASR 抑制効果を評価した。得られた知見を以下に示す。

(1) NaOH を練混ぜ水に添加しないことにより，40℃-NaCl 湿布暴露期間 28 日で水和反応およびポゾラン反応が十分に進展した状態を確保できた。そして暴露期間 12 ヶ月以降に FA 無混和の N において ASR が進展したことから，現実的な状態を模擬した促進試験だと考える。

(2) 試験体 N は，40℃-NaCl 湿布暴露期間 36 ヶ月で試験体表面に微細な網目状のひび割れが発生し，粗骨



図－12　40℃-NaCl 湿布暴露 24 ヶ月の試験体 N の石灰石骨材(G1，S)近傍に生成した ASR ゲルの化学組成

注）分析領域は横 600μm×縦 300μm である。

材の膨らみによる凹凸が等間隔で一面に生じた。これは ASR ゲルが石灰岩骨材中のひび割れに入り込むことおよび表面に接する形で生成することによる。

(3) FA を 49.5kg/m^3 混和した場合は，NaCl 湿布-40℃暴露開始後 25 ヶ月で試験体表面に粗骨材の ASR による膨らみによると考えられる微細なひび割れが発生した。これは NaCl の浸透を抑制しきれなかったことによる。FA を 82.5kg/m^3 以上混和した場合は NaCl 浸透抑制効果が高く，さらにポゾラン反応の発生量も多いため，呼び強度を 45N/mm^2 とした場合においても ASR も良好に抑制できると考える。

謝辞

骨材の選定，試験体作製および各種データ取得では，北電総合設計(株)の斎藤敏樹氏，坂本久宣氏に尽力頂いた。謝意を表する。

参考文献

1) 建設省：アルカリ骨材反応抑制対策に関する指針について，住指発 第 244 号，1989 年 7 月
2) 国土交通省：アルカリ骨材反応抑制対策，国営技 112 号，2002 年
3) JIS A 5308 付属書 2（規定）：アルカリ骨材反応の抑制対策の方法，2003 年
4) 建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2024 年 3 月
5) 野田幹夫，小川健，小柳洽，川村満紀：凍結防止剤散布環境下における ASR によるコンクリート構造物の損傷状況調査，コンクリート工学，Vol.36，No.9，pp.15-21，1998 年 9 月
6) 小林知美，山戸博晃，オズバルトアンドレ，鳥居和之：融雪剤によるコンクリートの ASR 発生機構とその防止対策，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.905-910，2010
7) 佐藤道生，蓮見亮，皆川浩，久田真：フライアッシュの混和によるコンクリートの遮塩性能の向上について，土木学会論文集 E2，Vol.67，No.2，pp.309-321，2011
8) 片平博，河野広隆：砕砂を使用したコンクリートの単位水量低減手法の検討，土木技術資料，44-1，pp.26-31，2002
9) 山本武志：フライアッシュを利用した実規模施工における粉体系中流動コンクリートの諸特性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.157-162，2024
10) 齋藤敏樹，関谷美智他：フライアッシュの ASR 抑制効果に関する検討のうち骨材品質，土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，V-358，2021
11) 坂本久宣，関谷美智他：フライアッシュの ASR 抑制効果に関する検討，土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，V-359，2021