

論文 分級フライアッシュによる塩害環境下での ASR 抑制効果および施工性に関する検証

津田 誠*1・中田 有香*2・鳥居 和之*3

要旨：石川県能登半島の奥能登地方では、現在の JIS に準拠した構造物であっても ASR が発生し、その原因として飛来塩分と凍結防止剤の散布が指摘されている。一方、近年の研究にてフライアッシュが ASR に対して抑制効果が報告され、地域実装がなされている。本研究では塩害環境における分級フライアッシュの ASR 抑制効果を調べるため、複数の条件にて膨張量試験を実施し、ASR 反応性が高い骨材においても十分な効果が確認された。さらに、フライアッシュを混和したコンクリートの施工性に関してフライアッシュ専用の混和剤の使用により夏季においても十分なコンシステンシーが認められた。

キーワード：ASR, フライアッシュ, 塩水養生, 促進膨張量試験, スランプロス, AE 減水剤

1. はじめに

石川県能登半島に位置する奥能登地方では砂利資源に乏しく、このため、安山岩砕石や隣県からの河川産砂利などの火山岩類を重要な骨材資源として使用していた。その一方で、これら火山岩類の骨材を使用したコンクリート構造物で深刻なアルカリシリカ反応（以下、ASR と記す）による劣化が発生している。

能登半島北西部の地質で、もっとも広大な面積を占めるのは、穴水累層と呼ばれる中新世の火山性岩石であり、主として安山岩質の溶岩および火砕岩からなっている。このような火山岩類は一般に、火山ガラスやクリストバライトなどを含み ASR による劣化を発生させてきた。

また、わが国の ASR 抑制対策は、アルカリ総量規制値（3kg/m³）を基本に据えているが¹⁾、骨材から溶出したアルカリの影響により、ASR が長期にわたり進行する場合があることも指摘されている²⁾。一方、ASR 抑制対策の1つとして、アルカリ総量規制を遵守しているが、現在でも ASR が発生しているコンクリート構造物が確認されている。**写真-1** に示すとおり無害と判断された骨材の使用により ASR が発生し、その原因として、骨材からのアルカリの溶出、凍結防止剤の散布および飛来塩分などの使用環境による影響が考えられている。

しかし、地産地消および環境への負荷軽減ならびに現在の社会情勢から、ASR に対して全くリスクを伴わない骨材を選択することは現実的ではなく、むしろ、地元で産出される骨材を有効に利用し、当該地域ごとに、使用する骨材にあった抑制対策のルール作りを行い、ASR による劣化のないコンクリート構造物を構築することが重要であると考えている。

図-1 に示すように、急速膨張性の反応鉱物を含む岩



写真-1 ASR 発生構造物の状況（無害判定骨材使用）

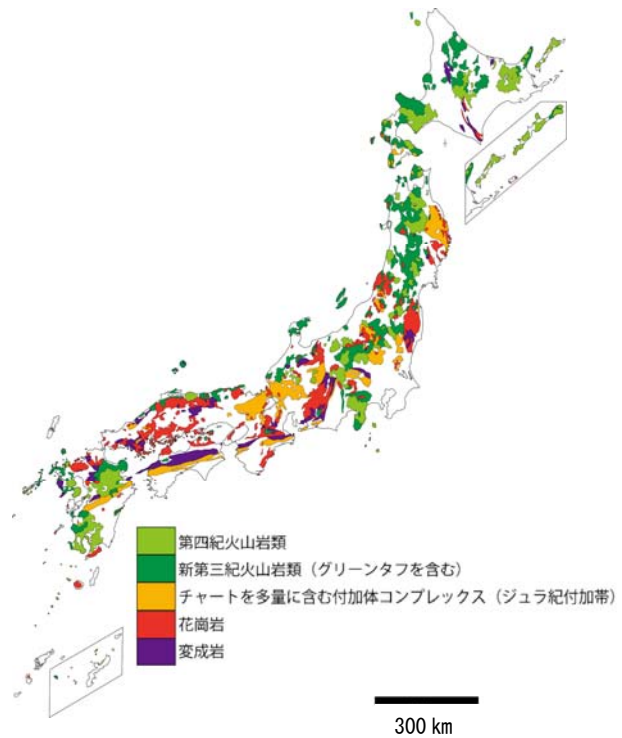


図-1 調査対象地区と ASR と関連の深い地層や岩体³⁾

*1 石川工業高等専門学校 環境都市工学科 准教授 博士 (工学) (正会員)
 *2 石川工業高等専門学校専攻科 環境建設工学専攻
 *3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 顧問 工博 (フェロー会員)

表-1 供試体名および配合表（塩害環境下での ASR 反応性試験）

供試体名	骨 材	養生条件	W/B (%)	空気量 (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	FA置換率 (%)	単位量 (kg/m ³)										
								水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	AE減水剤	FA専用 AE剤				
N-OPC	河川産 (非ASR反応性)	40°C湿潤	55	5.0	43.5	25	-	168	305	-	769	1006	0.405	0.0122				
N-OPC-S		40°C塩水																
N-FA		40°C湿潤																
N-FA-S		40°C塩水																
R-OPC	河川産 (ASR反応性)	40°C湿潤					55	5.0	43.5	25	-	168	305	-	769	1006	0.405	0.0122
R-OPC-S		40°C塩水																
R-FA		40°C湿潤																
R-FA-S		40°C塩水																

石として新第三紀と第四紀の新しい火山岩類は日本全国に分布しており、日本各地で ASR が発生してもおかしくない状態であることが分かる。このため、現在 ASR の発生が報告されていない地域でも潜在的に ASR 劣化した構造物が多く存在し、それら ASR 劣化に対するリスクマネジメントについても研究が進められている^{4), 5)}。このため、資源を有効活用し、様々な供用環境において ASR 発生リスクを軽減させることが求められている。

一方、ASR 抑制効果としてフライアッシュ（以下、FA と記す）の使用が研究されているが、夏季の高温時に FA を混和したコンクリートのスランプロスにより、現場でのコンクリート打設時のコンシステンシーの確保が難しく、ポンプ打設の際に配管内にて閉塞する事例も発生している。さらに、北陸新幹線の建設現場にてコンクリートの需要が集中し、プラントから現場までの運搬時間が長時間になることが発生している。このため、暑中コンクリートでのスランプの確保およびスランプロスが少ないコンクリートを供給することが重要となっている。

本研究では、日本の様々な骨材を ASR のリスクがなく安全に使用可能にすることを目的として、ASR 抑制に対してより厳しい条件の1つである塩害環境を想定して試験を実施した。これより、分級 FA の ASR 抑制効果を検証するため、モルタルとコンクリートによる供試体を用いて、ASR 反応性が高い骨材にて塩水や水酸化ナトリウム溶液による養生での膨張量試験を実施した。さらに、夏季における FA を混和したコンクリートのスランプロスに対して、練り混ぜ後 30 分経過した時点でのスランプ値に着目し、FA 専用の混和剤の使用により、スランプ値および空気量の経時変化を調査し、温度とフレッシュコンクリートのコンシステンシーの変化の関係性について検討を行った。

本文では塩害環境における FA の ASR 抑制効果および暑中コンクリートでの FA を混和したコンクリートのコンシステンシーについて検証し、それらの結果について報告する。

表-2 骨材の ASR 判定試験

	化学法 (JIS A1145)				モルタルバー法 (JIS A 1146)	
	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	Sc/Rc	判定	膨張量 (6ヶ月) (%)	判定
手取川産	66	84	0.786	無害	0.0319	無害
常願寺川産	215	84	2.560	無害でない	0.2508	無害でない

2. 試験方法

2.1 塩害環境下での ASR 反応性試験

骨材の ASR 反応性試験として、コンクリート供試体による膨張量試験を行った。試験は表-1 に示す配合にて 8 ケース実施した。ASR 反応性ありの供試体では粗骨材および細骨材の両方とも富山県の常願寺川産砂利を使用した。また、比較用の供試体として非反応性骨材とされている石川県手取川産の河川砂利および砂を使用した。使用した骨材の ASR 判定試験結果を表-2 に示す。また、混和材として表-3 に示す物理的性質の北陸電力七尾大田火力発電所産の分級 FA を用いた。FA の混合率は、北陸地方で実績が多いセメントの内割として 15%とした。

試験は直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を製作し、28 日間水中にて標準養生後に 40°C の恒温槽にて養生を実施した。また、塩水養生のみ 1 mol の NaCl 溶液に浸漬し、40°C の恒温槽にて養生を実施した。その後、湿潤、塩水養生とも膨張量は JIS A1146 のモルタルバー法に準拠し、供試体にステンレスバンドを約 100mm 間隔に取り付け後チップを接着し、コンタクトゲージにて計測した。また、標準養生後に圧縮試験も合わせて実施した。

さらに、コンクリートによる供試体で使用した同じ骨材を用いて、促進モルタルバー試験 (ASTM C1260) を実施した。供試体寸法および骨材の粒度調整は JIS A1146 のモルタルバー法を準拠した。ASTM C1260 の ASR 判定は、材齢 14 日において膨張率が 0.1%未満のものを「無害」、0.1%以上 0.2%未満のものは無害と有害が混在しているとして「不明確」、0.2%以上は「有害」と判定する。ASTM C1260 では、供試体作製時にアルカリ総量の調整を実施していない。

表-3 七尾大田火力発電所産の分級フライアッシュの物理的性質

産出箇所名	品質規格	密度	比表面積 (cm ² /g)	45 μmふるい残分 (Wt%)	フロー 値比 (%)	活性度指数		メチレンブ ルー吸着量 (mg/g)
						材齢28日 (%)	材齢91日 (%)	
JIS規格(Ⅱ種)		>1.95	>2,500	<40	>95	>80	>90	—
七尾大田火力	JIS規格(Ⅱ種)	2.45	4770	1	111	91	105	0.34

表-4 供試体名および配合表(コンシステンシー試験用)

供試体名	骨材	実験条件 気温(°C)	W/B (%)	空気量 (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	FA置換率 (%)	単位量(kg/m ³)						
								水	セメント	混和材	細骨材	粗骨材	AE減水剤	FA専用 AE剤
秋季-OPC	河川産 (非反応性)	10以上 20以下	55	5.0	43.5	25	—	165	300	—	774	1014	0.40	0.012
秋季-FA							15	165	255	45	769	1004	0.40	0.120
夏季-OPC		25以上					—	178	324	—	751	983	0.43	0.013
夏季-FA							15	178	275	49	743	975	0.43	0.130
冬季-OPC		10未満					—	168	305	—	769	1006	0.41	0.012
冬季-FA							15	168	259	46	764	1001	0.41	0.122

2.2 フライアッシュを混和したコンクリートのコンシステンシー試験

フライアッシュを混和したコンクリートの暑中コンクリート時におけるコンシステンシーの変化を検証するため、表-4に示す気温の異なる3条件を設定して試験を実施した。本試験時の配合決定にあたり、運搬時間の増加が見込まれるため、目標スランブ値の設定を練り上がり直後ではなく練り上がり後30分経過した時点で8±2.5cmを確保することとした。さらに、現場での施工性を鑑み、30分経過時点からスランブロスを最小限とすることを目標とし、練り上がり後60分経過時点においても、目標スランブ値として、8±2.5cmを確保することとし、この30分間を実工事での施工時間と仮定し、スランブ保持時間とした。スランブ値の調整は完成後の乾燥収縮を考慮し、単位水量を極力増加させずに混和剤で行うものとし、FAとの実績が多いAE減水剤とFA専用のAE剤の2種類の混和剤を使用した。

また、比較のため同一条件で普通コンクリートも合わせて実施した。それぞれの配合を表-4に示す。

試験は強制ミキサーにて練り混ぜを行い、練り上がり時点を経過時刻のスタートとし、30分置きに2時間までスランブ値および空気量を測定し、合わせて気温とコンクリートの温度も計測した。試験中はコンクリートにブルーシートをかけて静止した状態とした。試験後、品質の確認も含めて直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を製作し、7日、28日および91日間標準養生を行った後、圧縮強度試験を実施した。

なお、使用したFAは表-3に示すASR反応性試験と同じものを使用した。

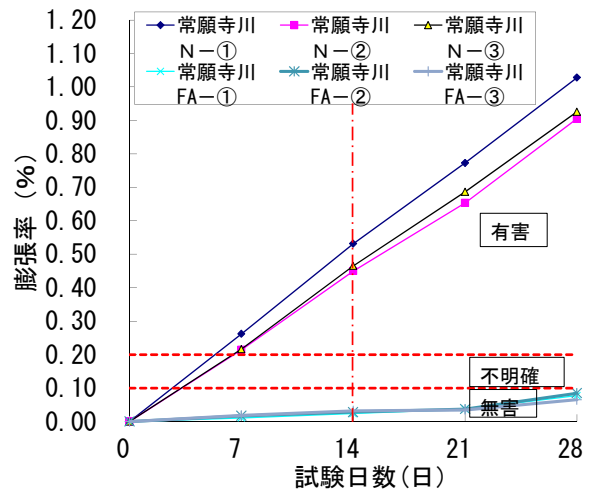


図-2 促進モルタルバー試験結果(ASTM C1260)
(反応性骨材)

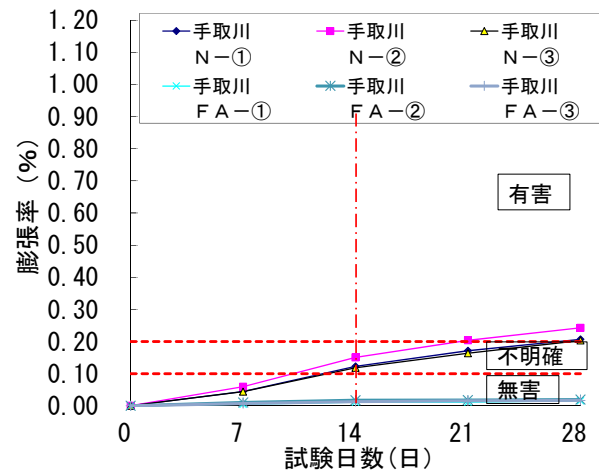


図-3 促進モルタルバー試験結果(ASTM C1260)
(非反応性骨材)

3. 試験結果および考察

3.1 塩害環境下での ASR 反応性試験

図-2、図-3 に促進モルタルバー試験の結果を示す。グラフは試験に用いた各3つの供試体による結果を平均せず、個々の値を示し結果、反応性骨材および非反応性骨材の両方とも数値のばらつきが少ないことが分かる。

図-2 に反応性骨材を用いた促進モルタルバー試験の結果を示す。普通セメント単味での供試体は試験初期から大きな膨張量を示し、判定日数である14日にてどの供試体も有害の基準である膨張率 0.2%を大きく上回る基準値の倍の0.4%の膨張があり、さらにその後もほぼ直線的に膨張量が増大し、高いASR反応性が確認された。これに対して、混和材としてセメントの15%をFAにて置換した場合、すべての供試体において膨張は見られず、判定日数の2倍の試験期間である28日においても無害の基準である0.1%を下回る結果となり、ASR反応性が高い骨材においても良好なASR抑制効果が見られた。

図-3 に非反応性とされている骨材を用いた促進モルタルバー試験の結果を示す。判定日数である14日での値はどの供試体でも不確定の領域にあり、さらに試験期間を延長した結果、試験期間14日～28日間の膨張量は有害である0.2%を超え、0日～14日間の膨張量に対して約70%と高い膨張を示した。さらに、JIS A 1145の化学法での溶解シリカ量Scが50mmol/lを上回っており、モルタルバー法にて有害と判定される可能性があることが指摘されている⁶⁾。

促進モルタルバー試験後の供試体を比較すると写真-2および写真-3より反応性骨材を使用し、普通セメント単味の供試体はASRの膨張により網の目状のひび割れが高密度で発生しているのに対し、FAを置換した供試体ではひび割れが発生しておらず、供試体外観においてもASRに対する抑制効果が見られた。セメント単味の供試体ではほぼ一様に網の目状のひび割れが生じていることから、試験期間中において供試体の部位に対して均一に膨張したものと推察された。

図-4 にコンクリートによる供試体での膨張量試験結果で三角および丸のポインタにて使用骨材の反応性の有無、実線と破線でFA混和の有無を示す。これよりセメント単味で反応性骨材を用いた供試体は養生直後から膨張を示した。また、FAを混和したケースでは反応性骨材の使用や塩水での養生においても膨張が抑えられていた。

しかし、FAを混和したケースの養生初期において、前述のモルタルバー試験同様にセメント単味と比較して膨張量が小さくなる予想に反して、反対の結果となった。この理由として、表-5に示す通り促進膨張量試験開始時の圧縮強度の差が原因と考えられた。FA混和のケースは標準養生の28日では水和反応後のポズラン反応の進



写真-2 促進膨張量試験後の状況
(反応性骨材・セメント単味)



写真-3 促進膨張量試験後の状況
(反応性骨材・FA混和)

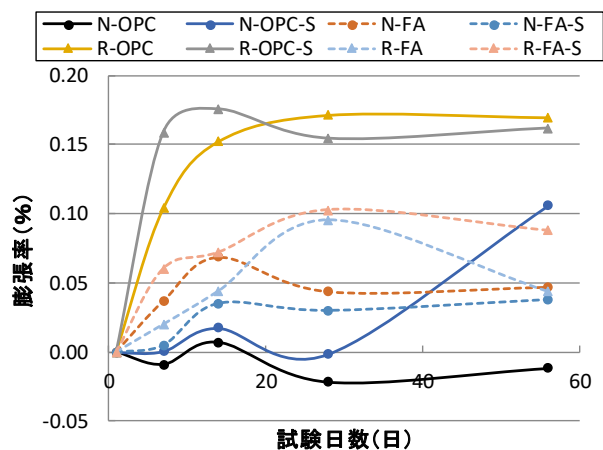


図-4 コンクリート供試体による促進膨張量試験結果

表-5 コンクリート供試体による圧縮試験結果

供試体名	使用骨材	圧縮強度 (材齢28日) (N/mm ²)	圧縮強度比 (基準:手取川N)
手取川N	非反応性	44.3	1.0
手取川FA		31.4	0.71
常願寺川N	反応性	32.3	0.73
常願寺川FA		26.8	0.60

みが少なく、コンクリート内部の密実性がセメント単味のケースより小さいと推察された。また、FA混和のケースにおいて、アルカリイオンの吸着効果として考えられているポズラン反応により生成される低Ca/Si比のC-S-Hからなる反応領域が十分に形成されなかったものと推察され、これら2つの原因が養生初期においてFA混和のケースが膨張した理由と考えられた。

一方で非反応性骨材を使用し、塩水養生を行ったケースにおいて養生28日後より急激な膨張が見られ、塩化物がASRを促進させた可能性が示唆された。これらは前

述のモルタルバーによる試験とも整合する結果となった。

以上より、現在の JIS 法にて「無害」と判定された骨材でも飛来塩分や凍結防止剤の散布などの外来塩分環境下では供用後に ASR が生じる可能性があり、「無害」と判定された骨材の使用による対策を行っただけでは ASR 対策としては不十分であると考えられる。

また、FA をセメントの一部に置換したケースでは反応性骨材を使用した場合と同様に、ほとんど膨張は見られず、ASR に対する抑制効果が確認された。

3.2 フライアッシュを混和したコンクリートのコンシステンシー試験

試験時期の気温およびコンクリートの温度を表-6 に示す。試験時期は実際の北陸地方でのコンクリート工事を想定して、夏季、秋季および冬季の季節で実施した。それぞれの季節の気温とコンクリート温度の関係はコンクリートに使用する水道水の温度が気温の変化に比較して鈍感であり、さらに骨材およびセメントの保存している温度より、夏季ではコンクリート温度は気温より低く、冬季ではコンクリート温度が気温より高い結果となり、実際のレディーミクスト工場での傾向と概ね一致した。

図-5 にコンクリート季節別スランプの経時変化を示す。練り上がり後 30 分経過した時点で夏季および冬季の FA 混和のケースではスランプは大きめではあるが、それ以外の季節では目標である 8 ± 2.5 cm を確保している。さらに、スランプの保持時間としている練り上がり後 30 分から 60 分の間のスランプロスについても、夏季において FA 混和のケースで 4.5 cm に収まり、スランプの変化の傾向も普通コンクリートと差が見られなかった。また、秋季において練り上がり後 30 分から 60 分のスランプロスは 1 cm 以下と目標としているスランプ保持時間でのコンシステンシーの変化が抑えられた傾向になった。また冬季において FA 混和のケースでは経過時間 90 分までほぼスランプロスがなく、FA 混和なしのケースと比較スランプ値の変化の傾向に差が生じた。この原因として混和剤の使用量の差が考えられるが、今回の実験では明確な原因は不明であった。

使用した FA の強熱減量は 1.3% である。強熱減量は未燃カーボンの量を表す指標の 1 つである。各季節での FA 混和のケースにて、未燃カーボンの影響により空気量が減少すると予想されたが、図-6 より空気量の減少が抑えられたため、スランプロスが練り上がり後 30 分から 60 分の間において微少であったものと考えられた。

秋季では空気量の減少が見られず、その結果スランプ保持時間でのスランプの保持につながったと推察され、将来的には夏季のケースにおいてもこの秋季の傾向に近づけることが更なる現場での施工性向上につながり品質の確保になると考えられる。

表-6 試験時期の気温および試験体の温度

時期	気温(°C)		フライアッシュコンクリートの温度(°C)	
	直後	2時間経過	直後	2時間経過
夏季	28.5	28.5	24	25.5
秋季	17	18	17	17
冬季	5.5	5	7	6

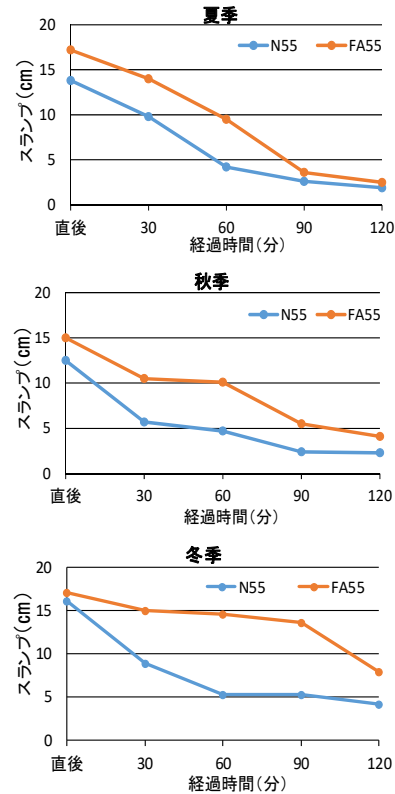


図-5 季節別スランプの経時変化

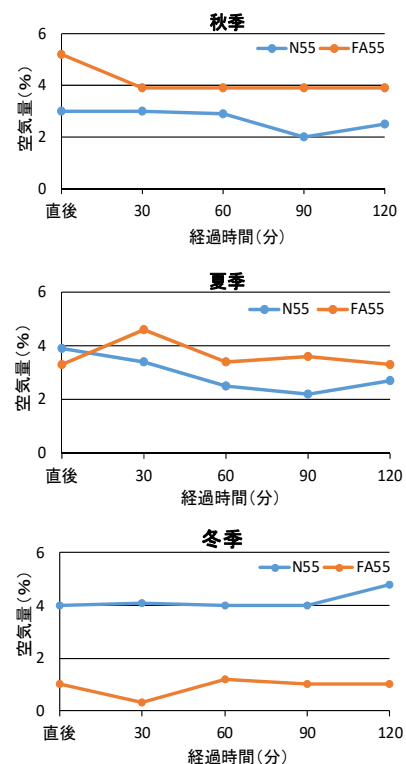


図-6 季節別空気量の経時変化

夏季の打設後 30 分で FA 空気量が増加した理由について明確な原因は不明であるが秋季の結果から推察すると、練り上がり直後の空気量が 6%前後であったものが何らかの理由で小さい値となったものと推定された。また、冬季は空気量が少なくても目標スランプ値を確保できたため、今後は空気量とスランプ値の確保が必要とされた。

コンクリートはフレッシュコンクリートの状態だけではなく、硬化後の性質も重要である。一般的に混和剤の使用量が多すぎると凝結遅延や硬化後のコンクリートの品質低下につながる。このため、本研究ではコンシステンシー試験後のコンクリートにて圧縮強度試験を実施した。図-7に示すとおり材齢 28 日では FA 混和したケースよりセメント単味の方の圧縮強度が大きい結果となった。また、材齢 91 日ではポズラン反応のため FA 混和のケースにおいて高い強度発現が見られ、セメント単味の圧縮強度とほぼ同じ結果となり一般的な混合セメントによる強度発現の挙動と一致した。これより、混和剤によりコンシステンシーの調整を行った FA を混和したコンクリートの品質および特徴は一般的なものと変わらないものと考えられた。

4. まとめ

本研究より得られた主な結果を次にまとめた。

(1) 反応性骨材を用いた促進モルタルバー試験の結果、普通セメント単味での供試体は試験初期から基準値の倍を超える大きな膨張量を示し、高い ASR 反応性があることがわかった。これに対して、混和材としてセメントの 15%を FA にて置換した場合、すべての供試体において膨張は見られず、判定日数の 2 倍の試験期間で無害の基準値を下回る結果となり、ASR 反応性が高い骨材においても ASR 抑制効果が確認された。

(2) 非反応性とされている骨材を用いた促進モルタルバー試験の結果、膨張量は不確定の領域にあり、さらに判定基準日後の 14 日間の膨張量は有害である値を超える膨張を示した。さらに、コンクリートによる供試体でも塩化物が ASR を促進させている結果が得られた。これらより、現在の JIS 法にて「無害」と判定された骨材でも飛来塩分や凍結防止剤の散布などの外来塩分環境下では供用後に ASR が生じる可能性があり、「無害」と判定された骨材の使用による対策を行っただけでは ASR 対策としては不十分であると考えられる。

(3) コンクリートによる供試体での ASR 膨張量試験結果、セメント単味で反応性骨材を用いた供試体は養生直後から膨張を示したが、FA を混和したケースでは反応性骨材の使用や塩水での養生においても膨張が抑えられ、FA による ASR 抑制効果が確認された。

(4) FA を混和したコンクリートの夏期におけるコンシ

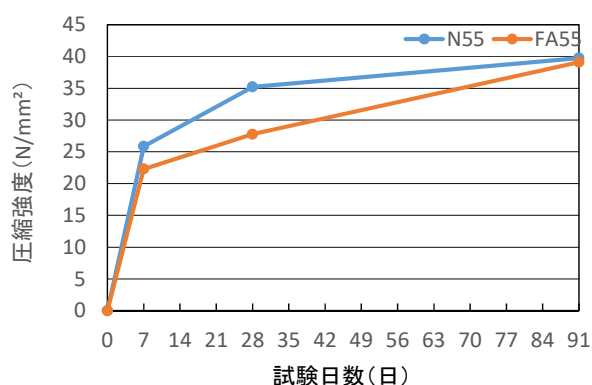


図-7 圧縮強度試験結果 (夏季供試体)

ステンシーの確保として、AE 減水剤と FA 専用の AE 剤を併用し、練り上がり後 30 分経過した時点においての目標スランプ値を設定し試験を実施した。その結果、概ね目標のスランプ値を確保し、さらにスランプの保持時間としている練り上がり 30 分から 60 分の間のスランプロスについても小さい結果となり、スランプの変化の傾向も普通コンクリートと差が見られなかった。また、試験後の供試体の圧縮強度にも問題がないことから、夏季における FA を混和したコンクリートの使用の可能性が示唆された。

謝辞

本研究にあたりご協力いただいた中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)、石川工業高等専門学校環境都市工学科中村晴朝さん、Mr. AMIN KHALILI BIN AHMAD RIZAL に感謝いたします。

参考文献

- 1) 国土交通省:アルカリ骨材反応抑制対策(土木構造物)実施要領, 2002
- 2) 鳥居和之, 野村昌弘, 南善導:北陸地方の川砂のアルカリシリカ反応性とアルカリ溶出性状, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.390-395, 2006
- 3) 広野真一, 山田一夫, 佐藤友美, 鳥居和之:わが国の代表的な反応性骨材と ASR の発生に関するデータ整理, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1035-1040, 2016
- 4) 鳥居和之, 橋本徹:今, 何故, 北陸地方でフライアッシュコンクリートなのか, セメント・コンクリート, No.810, pp.18-23, 2014
- 5) 日本コンクリート工学会: ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, 2014
- 6) 津田 誠, 麻田正弘, 参納千夏男, 鳥居和之:富山産河川砂利のアルカリシリカ反応性と外来塩分環境下での ASR 劣化構造物の特徴, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.1363-1368, 2015