

論文 塩害環境下における実コンクリート配合の試験体での ASR 抑制対策の検証

津田 誠^{*1}・加賀谷 将伍^{*2}・相良 明日香^{*2}・鳥居 和之^{*3}

要旨：北陸地方では、現在の JIS に準拠した一部の構造物にて ASR が発生し、その原因として、ASR 反応性の判定の難しい骨材の使用、飛来塩分や凍結防止剤の散布による塩化物イオンの影響などが指摘されている。一方、近年の研究にてフライアッシュの ASR 抑制効果が報告され、北陸新幹線敦賀延伸事業などで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、供用されている構造物の実配合にてコンクリートによる供試体を用いて膨張量試験を実施し、環境条件と ASR 反応性について検証を行った結果、両者には密接な関係性が見られた。

キーワード：ASR、フライアッシュ、塩水養生、促進膨張量試験、コンクリート供試体、硝酸銀噴霧法

1. はじめに

北陸地方では河川産の砂利砂や碎石、砕砂、浚渫に伴い発生した砂など様々な骨材が使用され、さらに、県を超えて骨材が流通しており、これらの一部の骨材により、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。

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⁾。

写真-1 に示すとおり、アルカリ総量規制を準拠している構造物において、ASR の発生が確認されている。さらに、アルカリ総量規制より低いアルカリ量で ASR が発生している構造物も見られた。また、無害と判断された骨材の使用により ASR が発生している事例もあり、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。

近年、ASR の発生が少ないとされている地域においても砂を原因とする ASR が発見されている。この原因として、骨材の地域を超えての流通によるものや調査や診断技術の向上などと考えられる。

また、使用骨材を石灰石碎石に変更するレディーミクストコンクリートプラントが増えてきている。しかし、石灰石碎石はアルカリを吸収しないため、2.4kg/m³ 程度のアルカリ量でも砂による ASR が報告されている³⁾。

さらに、反応性が低いとされている遅延膨張性の鉱物を含む骨材においても ASR 劣化が見られ、これら ASR 反応性が認められる鉱物が含まれている地層は日本各地



写真-1 ASR 発生構造物の状況

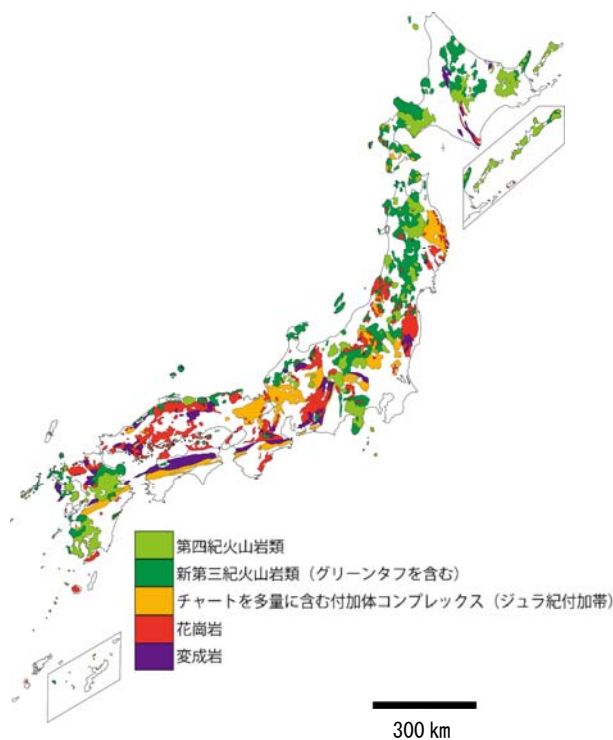


図-1 調査対象地区と ASR と関連の深い地層や岩体⁴⁾

*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 環境都市工学科

*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

供試体名	規格	骨 材		W/B (%)	空気量 (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	FA置換率 (%)	単位量(kg/m ³)							
		粗骨材	細骨材						セメント	水	混和材 (FA)	細骨材	粗骨材	AE減 水剤	高性能 減水剤	FA用 AE剤
A	40-12-25H	九頭竜	九頭竜あわら陸砂	38	4.5	42.8	25	－	398	151	－	743	1026	3.98		
B	18-5-40N	九頭竜	九頭竜あわら陸砂	58	4.5	40.5	40	15	202	138	36	764	1163	2.854		2.38
C	21-12-25N	手取川	手取川	59	4.5	45.9	25	17	228	163	47	928	989	2.75		
D	40-12-25H	手取川	手取川	36	5.5	36	25	15	366	155	65	680	997	2.59		
E	50-15-20H	今津碎石	三国陸砂敦賀砕砂	32	5.5	40.9	20	15	415	156	73	664	1036		3.42	1.95

表－2 骨材の ASR 判定試験

	主な岩種	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
手取川産砂利	火山岩(河川産)	66	84	0.786	無害	0.0319	無害
九頭竜川産砂利	火山岩(河川産)	95	123	0.772	無害	0.0300	無害
今津産砕石	硬質砂岩	10	54	0.185	無害	0.0100	無害
あわら産陸砂	火山岩(山砂)	7	177	0.040	無害	0.0100	無害
三国産陸砂	火山岩(山砂)	87	112	0.777	無害	－	－
敦賀産砕砂	硬質砂岩	67	135	0.496	無害	－	－

2. 試験方法

実際にレディーミクストコンクリートプラントにて製造する材料および配合にてコンクリート供試体を作成し、ASR 反応性試験として膨張量試験を行った。試験は表－1 に示す配合にて 5 ケース実施した。使用した骨材は白山を起源とする新生代第三期および第四期の火山岩である石川県手取川産、福井県九頭竜川産の河川産砂利および福井県産の陸砂、砕砂並びに滋賀県今津産の微晶質または隠微晶質石英を含有した硬質砂岩で、いずれも ASR 非反応性であった。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 FA を使用し、混合率は各レディーミクストコンクリートプラントでの混合率とし、FA の産地はすべて北陸電力七尾大田火力発電所産の分級 FA であり、物理的性質を表－3 に示す。

試験は直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を製作し、脱型後封かん状態とし 3 日以内に促進養生試験を開始した。供試体作製時にアルカリ総量の調整は実施していない。湿潤養生による促進膨張量試験は 40℃、湿度 95% 以上の恒温槽にて実施した。また、塩水養生は飽和塩化ナトリウム溶液に浸漬し、50℃の恒温槽にて養生を実施した。その後、写真－2 に示すとおり、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

に分布し、また、慢性的な骨材不足により、将来にわたり ASR 劣化が各地で発生する可能性が考えられる。

一方、東日本大震災以降、ベース電力の不足を解消するため比較的発電コストが安価な石炭火力発電所の稼働率の増加に伴い、フライアッシュ（以下、FA と記す）の処分地の確保が課題となっている。

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^{7), 8)}。このため、資源を有効活用し、社会情勢の変化にも対応でき、様々な供用環境において ASR 発生のリスクを軽減させることが求められている。

本研究では、北陸地方におけるレディーミクストコンクリートプラントでの実配合（RC および PC 構造物に使用）のコンクリートを用いて、北陸地方などの厳しい塩分環境下（内におよび外来）における FA コンクリートの ASR 抑制効果を実験的に検証した。これより、分級 FA の ASR 抑制効果を明らかにするため、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飽和塩化ナトリウム水溶液や湿潤による養生での膨張量試験を実施した。

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)	45μm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

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、養生後に動弾性係数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、モルタルで供試体を作成し飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法による促進膨張量試験を実施した。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⁷⁾を準拠した。飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法の ASR 判定は材齢 91 日において膨張率が 0.2%未満のものを「無害」、0.2%以上 0.4%未満のものは無害と有害が混在しているとして「不明」、0.4%以上は「有害」と判定する⁸⁾。また、飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法のモルタル供試体作製時にアルカリ総量の調整は実施していない。

供試体への塩化物イオンの浸透深さを調査するため、ASR 促進膨張量試験用の供試体とは別に、同じ仕様の供試体を用いてドリル法にて試料を 5mm 深さごとに採取し、0.1mol/l の硝酸銀水溶液を噴霧し、白濁した深さの最大値を塩化物イオン浸透深さとした^{9), 10)}。

供試体の強度を推定するため、JIS A1127 の共鳴振動¹¹⁾によりコンクリートの動弾性係数を求めた。

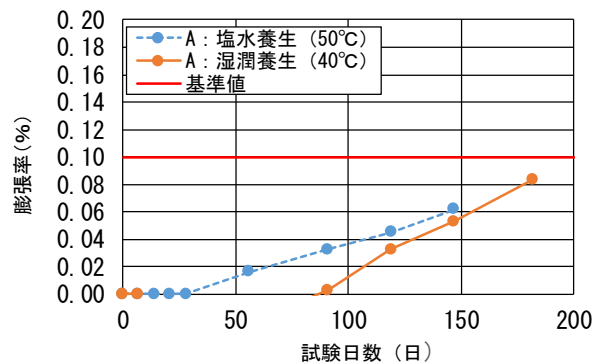
3. 試験結果および考察

図－2、図－3 に福井県九頭竜川産のコンクリート供試体による促進膨張量試験の結果を示す。図中の膨張量は塩水養生 3 本、湿潤養生は 2 本の供試体の平均値としている。また、グラフのポイントのうち、○印は普通セメント単味の配合の供試体を示し、△は FA を混和した供試体を示す。図－2 に示す供試体 A の九頭竜川産骨材を用いた促進膨張量試験の結果より、塩水養生は開始時期の関係で試験期間 180 日に到達していないが、両供試体とも初期では収縮し、その後膨張し、閾値としている試験期間 180 日間で膨張率 0.1%⁶⁾に近い膨張量を示した。また、試験期間 90 日では塩水養生が湿潤養生と比較し、約 3 倍の膨張量を示したが、その後養生条件による差が減少し、140 日目ではほぼ同じ値になった。

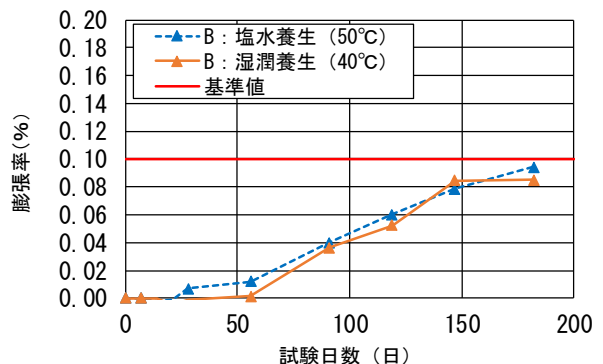
今回の試験条件は初期段階では水和反応とあわせて塩化物イオンの浸透が同時に行われていると考えられる。表－4 に示すとおり、供試体ごとに塩化物イオン量の浸透深さに差があるものの、供試体 A, B では試験日数 180 日間で 25mm を超える浸透が確認されることから、初期段階ではこれら塩化物イオンの浸透に伴い、ASR が促進



写真－2 コンクリート供試体および計測状況



図－2 コンクリート供試体による促進膨張量試験結果
供試体：A 九頭竜川 40-12-25H



図－3 コンクリート供試体による促進膨張量試験結果
供試体：B 九頭竜川 18-5-40N FA

表-4 塩化物イオン浸透深さ

供試体名	試験日数	試料採取深さ (mm) 上段～下段									
		0 5	5 10	10 15	15 20	20 25	25 30	30 35	35 40	40 45	45 50
A	180	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△
B		○	○	○	○	○	○	※			
C		○	○	△	△	△	×	×	×	×	×
D		○	○	○	△	△	△	※			

硝酸銀水溶液をかけると

○	白く変化した
△	白と茶色（黒）の混在
×	ほとんど茶色（変化なし）

※ ドリル削孔不可による試料未収集

され膨張が生じた可能性が考えられた。

一方、図-3 では塩化物イオンが浸透しているにもかかわらず、養生条件の違いが生じていない。これは呼び強度が 18N/mm^2 のため単位セメント量が少なく、さらにフライアッシュをセメント量の内割での混和による影響で単位セメント量が減少し、試験初期の水和反応が遅くなり、これに伴い十分な FA のポズラン反応の進行前に塩化物イオンの浸透や温度、湿度の影響が卓越して、両者一様に ASR 膨張を促進させた可能性が考えられた。

さらに、写真-3、図-4 は試験期間 224 日での塩水養生を行った供試体の写真およびひび割れ状況のスケッチ図である。この写真および図より拘束力の小さい供試体の上下面および、ステンレスバンドにより拘束を受けない軸に直角方向のひび割れが多く生じていることから、ASR 膨張に伴う特有のひび割れが観察された。発生したひび割れの原因として、表-4 より、塩化物イオンの浸透深さが約 30mm であり、使用した骨材の最大粒径が 20mm か 25mm で、また骨材の周囲には ASR 反応に伴う反応リムも観察できないことから、細骨材が養生初期において塩化物イオンの浸透にて段階的に ASR により膨張したためと考えられた。しかし、湿潤養生を行った供試体においては微細なひび割れはあるものの、塩水養生の供試体のようにはっきりと連続したひび割れは生じていなかった。このため、塩水養生と湿潤養生の供試体において同じ膨張率でありながら、供試体内部のミクロな部分での膨張量や膨張過程の違いがひび割れの形状の違いにつながっていると推測された。

この結果により、水和反応の初期段階の組織がポーラスな状態では、温度および湿度による促進環境下は塩化物イオンの浸透と同等程度の影響が考えられ、ASR 膨張が促進されていると考えられた。

図-5、図-6 に手取川産のコンクリート供試体による促進膨張量試験の結果を示す。図-5 より、塩水および湿潤養生とも試験期間 180 日間で膨張率 0.1% を超える膨張を示し、試験期間中における膨張挙動は試験期間後半において膨張量の収束が見られないことから、ASR により供用中の構造物に影響が生じる可能性が推測された。



写真-3 供試体の外観状況
(試験日数 224 日)

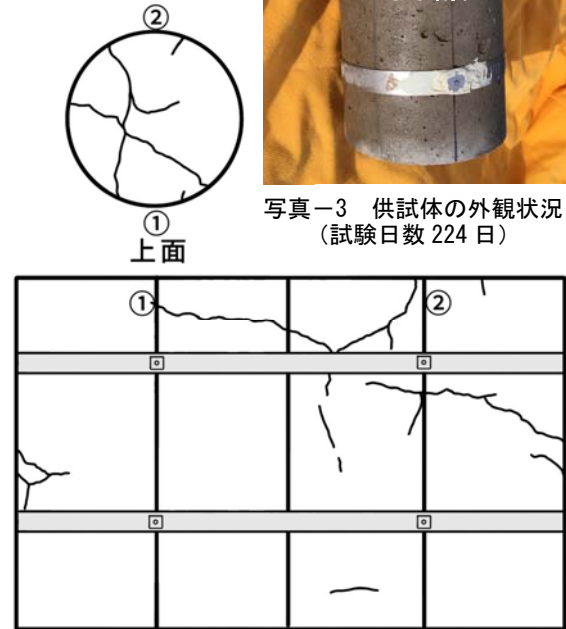


図-4 供試体のひび割れスケッチ図
供試体：A 塩水養生

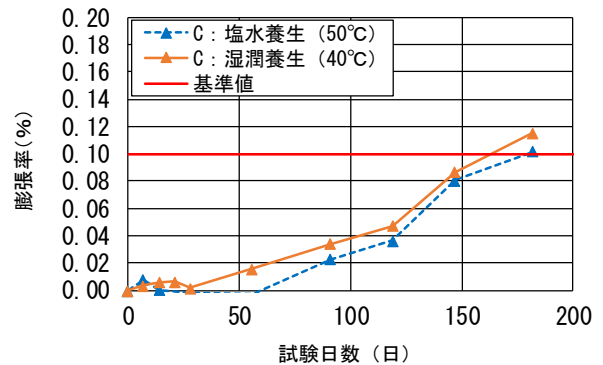


図-5 コンクリート供試体による促進膨張量試験結果
供試体：C 手取川 21-12-25N FA

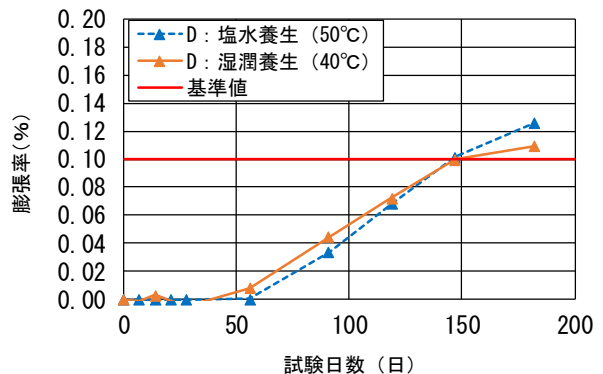


図-6 コンクリート供試体による促進膨張量試験結果
供試体：D 手取川 40-12-25H FA

また、試験期間中これまでの九頭竜川産骨材を使用した供試体と異なり、湿潤養生の膨張量が塩水養生より大きい膨張挙動を示した。本試験では、一般的には養生温度が高く、かつ ASR 反応性が促進される塩水養生の膨張量が大きくなる予想に対し反対の結果となった。しかし、これらの理由は現在のところ不明で、今後偏光顕微鏡観察や反応生成物の成分分析を行う予定としている。

図-2、図-6 は PC 橋の現場製作時に用いるコンクリートで早強セメントに混和材として FA を混和している。当初の予測では水和反応が普通セメントより早い早強セメントを使用していることから、FA の混和で減少した 15% のセメント分の初期の水和を補うことにより、FA のポゾラン反応相のアルカリ吸着効果や組織が緻密化し、温度や湿度、塩化物イオンなどの促進環境においても、ASR 膨張を抑制できると予測していた。しかし、今回の促進試験において ASR による膨張が見られることから、既往の研究より¹²⁾、FA による ASR の抑制効果を発揮させるためには、十分な養生が必要であると考えられた。

図-7 はモルタル供試体による飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法の結果を示す。ASR 反応性が高いとされている常願寺川産細骨材のセメント単味の供試体は 91 日で 0.9% を超える大きな膨張を示した。また、コンクリート供試体により ASR 膨張の可能性があるとされた手取川産の細骨材の膨張量は 0.3% に近い膨張が見られ、不明確の判定となり、コンクリート供試体のケースと近似した結果となった。また、FA を混和したケースでは ASR 反応性が高い常願寺川産の細骨材においても、まだ試験期間は所定の日数に満たないが、膨張挙動は見られない。さらに、手取川産の細骨材においても同様の結果が得られ、FA の ASR 抑制効果が確認された。

これより、同一の骨材で養生日数を取らない条件において、モルタルとコンクリート供試体による各 ASR 促進膨張量試験とは異なる結果となった。このため、コンクリート供試体により ASR 膨張による影響を試験する場合、モルタル供試体と異なり、促進膨張量試験を行う前の供試体の条件の違いの影響が大きいことがわかった。

図-8 に滋賀県今津産砕石と福井県三国産陸砂と敦賀産砕砂を混合したコンクリート供試体による促進膨張量試験の結果を示す。塩水および湿潤養生とも試験期間 140 日間で膨張率 0.1% を超える膨張を示し、試験期間中において膨張挙動には収束傾向は見られなかった。さらに、養生条件による違いについては、塩水養生が 91 日では湿潤養生の 2 倍、180 日では 1.6 倍の膨張量であった。河川産骨材と異なり本配合での砕石、砕砂の場合、塩化物イオンが ASR 膨張に寄与する影響が大きい可能性が考えられた。また、膨張量が大きい理由の 1 つとして、呼び強度が 50N/mm² のため、単位セメント量が多いこと

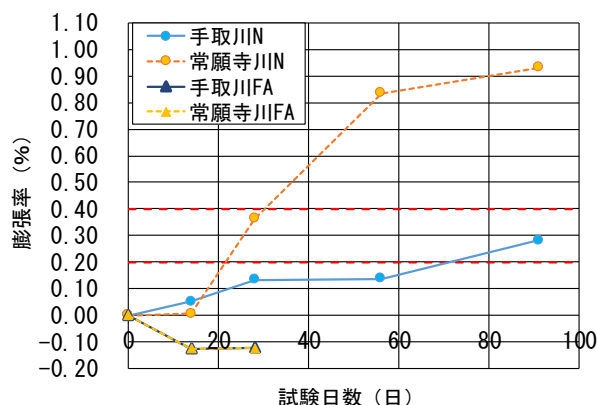


図-7 モルタル供試体による促進膨張量試験結果
飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法

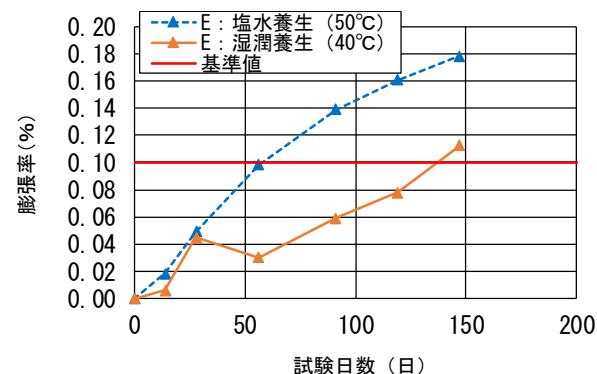


図-8 コンクリート供試体による促進膨張量試験結果
供試体：E 砕石・砕砂 50・15・20H FA

表-5 養生方法別動弾性係数

供試体名	呼び強度	試験日数	養生条件	動弾性係数 ED (kN/mm ²)
A	40	180	塩水 (50℃)	29,700
			湿潤 (40℃)	39,900
B	18		塩水 (50℃)	26,900
			湿潤 (40℃)	37,500
			水中 (20℃)	37,600
D	40		塩水 (50℃)	37,200
			湿潤 (40℃)	40,100

によるアルカリ量の増加に伴う影響が考えられた。

表-5 に試験日数 180 日間での共鳴振動により推定した各供試体の動弾性係数を示す。標準養生を行った供試体の動弾性係数を求め比較を行った結果、湿潤養生 (40°C) の供試体とほぼ同じ値となった。このため、湿潤養生を行った供試体では ASR による膨張は見られるものの、力学的性能の低下は少ないと考えられた。その一方で塩水養生を行った供試体の動弾性係数は湿潤養生を行ったものと比較し 70%~90% しかなく、ASR に伴い力学的性能の低下が顕著であった。前述の写真-3、図-4 に示すとおり、塩水養生の供試体にのみはっきりと連続したひび割れが発生しており、このひび割れ発生の特徴の差異が、動弾性係数の違いに影響している可能性が考えられた。

本実験で使用されている細骨材の JIS A1145 化学法の結果は表-2 よりすべて「無害」判定であるが、あわら産骨材を除き溶解シリカ量 Sc が 50mmol/l を上回っており、これは既往の研究よ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¹³⁾。これより、本実験において無害な骨材を使用したコンクリート供試体において細骨材が反応し、供試体を膨張させた可能性があると推察された。

また、本試験では養生を行わずに各条件下において促進膨張量試験を行ったため、水和反応が十分に行われていないことからポズラン反応の進みが少なく、コンクリート内部の密実性が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、これらの原因が FA 混和のケースにおいて膨張した理由と考えられた。

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) 塩水養生の供試体は ASR 膨張に伴う特有のひび割れが観察され、この原因として塩化物イオンの浸透深さが約 30mm で、粗骨材の周囲に ASR による反応リムが見られないことから、細骨材が養生初期において塩化物イオンの浸透深さにて段階的に ASR により膨張したためと考えられた。一方で、湿潤養生を行った供試体においては微細なひび割れはあるものの、塩水養生の供試体のようにはっきりと連続したひび割れは生じておらず、供試体内部のミクロな部分での膨張量や膨張過程の違いがひび割れの形状の違いにつながっていると推測された。

(2) 共鳴振動により動弾性係数を推定した結果、湿潤養生 (40°C) を行った供試体は標準養生の供試体とほぼ同じ値となったのに対し、塩水養生を行った供試体の動弾性係数は湿潤養生を行ったものと比較し $70\%\sim 90\%$ しかなく、ASR に伴い力学的性能の低下が顕著であった。

(3) 早強セメントに FA の混和したケースにおいて、初期の水和反応の速さが FA 混和により減少した 15% のセメント分の養生初期の水和を補うことにより、組織が緻密化し、温度や湿度、塩化物イオンなどの促進環境においても、ASR 膨張を抑制できると予測していた。しかし、今回の促進試験においては ASR による膨張が見られることから、FA による ASR の抑制効果を発揮させるためには、十分な養生が必要であると考えられた。

(5) モルタル供試体による飽和塩化ナトリウム溶液浸漬法の結果、FA を混和した場合、ASR 反応性が高い常願寺川産の細骨材や「不明」と判定された手取川産の細骨材の両ケースとも、高い ASR 抑制効果が確認された。

(6) JIS A1145 化学法において「無害」と判定された骨材の使用した場合でも、細骨材の溶解シリカ量 Sc が 50mmol/l を上回っている場合、これら細骨材が反応し ASR 膨張が生じた可能性が推察された。

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) 菊池弘紀, 山戸博晃, 広野真一, 鳥居和之:細・粗骨材の組み合わせのペシマム現象による ASR 劣化事例の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1041-1046, 2016
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 日本コンクリート工学会:性能期待に基づく ASR 制御型設計・維持管理シナリオに関するシンポジウム委員会報告書・論文集, 2017
- 7) JIS A1146-2017:骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)
- 8) 広野真一, 鳥居和之:北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる抑制機構, セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.499-506, 2013
- 9) 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
- 10) 澤本武博ほか:硬化コンクリートの塩化物イオン浸透深さの簡易測定方法に関する研究, ものづくり大学紀要, 第2号, pp.36-41, 2011
- 11) JIS A1127-2010:共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数, 動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法
- 12) 山本武志, 廣永道彦:フライアッシュのアルカリシリカ反応抑制メカニズムに関する実験的検討, 電力中央研究所報告, N07016, 2007
- 13) 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