

論文 地中環境下を模擬した水温および弱アルカリ性養生水によるアルカリシリカ反応の特徴とその膨張挙動に関する検討

津田 誠^{*1}・部谷 和也^{*2}・野村 昌弘^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨：土木および建築構造物の地中部において、アルカリシリカ反応（ASR）による劣化が報告されており、使用されている骨材と環境条件が関係していると推察される。また、地中部の点検、診断は地上部などの可視部と比較し、困難な場合が多い。そこで可視部から得られる結果により、不可視部の状態を推定、診断を行う技術の確立が不可欠と考える。本研究では、ASR 劣化が生じたフーチングが建設されている環境条件を再現した、モルタルおよびコンクリート供試体を用いた各種 ASR 関連の試験を実施し、地下水の水温および弱アルカリ性養生水での膨張挙動および動弾性係数並びに偏光顕微鏡観察結果について考察を行った。

キーワード：ASR，地中環境，地下水養生，促進膨張試験，偏光顕微鏡，暴露試験

1. はじめに

北陸地方では、砂利砂や砕石などがコンクリート用の骨材として流通し、これら一部の骨材にて、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。

わが国の ASR 抑制対策は¹⁾、骨材資源の有効活用の観点からアルカリ総量規制値（3kg/m³）を基本としている一方で、反応性の高い骨材の使用や骨材から溶出するアルカリや供用環境により、ASR が長期にわたり進行する可能性があることも指摘されている^{2) 3)}。

平成 25 年に道路法が改正され、現在 3 回目の近接点検が実施されているが、点検が困難な構造形式や供用条件を有する橋梁についての点検および維持管理に関する課題も判明してきている。その中でも地中部などの不可視部の点検は未実施の場合が多く、点検および評価手法についてはほとんど検討がされていないのが現状である。

写真-1 に示すように、アルカリ総量規制以前に建設された道路構造物において、地上部の ASR 劣化が軽微な橋脚のうち、地中部に位置するフーチングにて、鉄筋破断をとまなう深刻な ASR の発生が確認されている。

このため、対象の橋脚の地上部では ASR 劣化によるひび割れは地中部よりも少なく、可視部だけの点検で地中部の劣化を推定することは多くのリスクを内在することになることも報告されている⁴⁾。

わが国において、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⁵⁾、急速膨張性の反応鉱物を含む岩石により日本各地で ASR が発生していると予測される。これより、ASR 劣化構造物の報告が少ないとされている地域でも、可視部や不可視部も含めて潜在的に ASR 劣化した構造物が多く存在している可能性があり、ASR 劣化に対するリスクマネジメントについての研究が進められている⁶⁾。



写真-1 ASR が発生したフーチングの劣化状況

*1 石川工業高等専門学校 環境都市工学科教授 博士（工学）（正会員）

*2 石川工業高等専門学校 専攻科 建設環境工学専攻

*3 朝日エンジニアリング（株） 博士（工学）（正会員）

*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株） 工博（名誉会員）

また、持続可能な社会を目指し、ASR 発生リスクのない骨材のみを選択し使用することは現実的ではなく、当該地域ごとに使用する骨材に対応した ASR 抑制対策を確立することにより、地元で産出する骨材の有効利用を図ることがより重要であると考えている。

一方、地中部における ASR に関する研究は耐震補強されたフーチングでのモニタリング⁷⁾や養生温度が 40℃より低い条件での反応性試験などがあるが⁷⁾、ASR 劣化した構造物の現地条件にて反応性試験を実施した事例はほぼないと考えられる。

そこで本研究では、ASR 劣化の可能性ある地中構造物の ASR 反応性の特徴を明らかにするとともに、5 年に 1 回実施されている橋梁の詳細点検において、可視部から不可視部の ASR 劣化を推定できる仕組みの構築を目的としている。

今回、ASR 劣化が生じた橋脚フーチングで採取した地下水および現地土にて ASR 反応性試験と工学的特性に関する検討を行った。本研究では、ASR 劣化が生じたフーチングが建設されている環境条件を再現した、モルタルおよびコンクリート供試体を用いた各種 ASR 関連の試験を実施し、地下水の水温および弱アルカリ性養生水での膨張挙動および動弾性係数の時間的変化並びに偏光顕微鏡観察結果について考察を行った。

2. 試験方法

2.1 試験体の概要

写真-1 に示すフーチングでは、表面には高密度でひび割れが見られるものの、その多くは鉄筋が破断した箇所を除き、鉄筋かぶり部分で止まっていた。また、フーチング施工時のブリーディングの影響により、コンクリート中のセメント分の不均衡に伴う、アルカリ濃度と ASR 反応性の違いが推察された。これらより、フーチングのかぶり付近において、高いアルカリ濃度とアルカリの溶出が生じている箇所の存在が考えられる。このためコンクリート中の高濃度のアルカリが地下水に溶出する状況でのアルカリ骨材反応性について再現する実験を実施した。

以上より、地中環境の影響を再現した ASR 試験として、モルタルおよびコンクリート試験体を製作し、現地地下水、現地土での膨張試験を行った。試験は表-1 に示す条件にて 30 ケース実施した。ASR 非反応性骨材として富山県庄川産の川砂、ASR 反応性骨材として富山県常願寺川産の川砂を使用した。使用した骨材の ASR 判定結果を表-2 に示す。使用した骨材の反応性の相違は反応性岩石（安山岩、流紋岩）と非反応岩石（花崗岩、閃緑岩）の構成率によっている。なお、試験体寸法、砂およびセメントの配合は JIS A1146 のモルタルバー法に準拠し、

表-1 試験体の種類および実験水準

ケース	使用骨材	配合	アルカリ量の調整	試薬による全アルカリ量	養生温度	養生の状態	水位変動	
1	常願寺川 反応性	JIS A1146 準拠	あり JIS A1146 準拠	JISと同じ	18℃	地下水	あり	
2						水道水	なし	
3						地下水	あり	
4						水道水	なし	
5						地下水	あり	
6						水道水	なし	
7	庄川 非反応性			JISと同じ	18℃	地下水	あり	
8						水道水	なし	
9						地下水	あり	
10						水道水	なし	
11						地下水	あり	
12						水道水	なし	
13	常願寺川 反応性			JISと同じ	40℃ ↓ 20℃	地下水	あり	
14						水道水		
15						土中		
16						地下水		
17						水道水		
18						土中		
19	庄川 非反応性			JISと同じ	40℃ ↓ 20℃	地下水	なし	
20						土中		
21						地下水		あり
22						水道水		
23						土中		
24						地下水		
25	水道水							
26	土中							
27	JISの2倍			20℃	地下水	なし		
28					土中			
A	常願寺川	コンクリート	なし	—	20℃	水道水	なし	
B	庄川					水道水		

表-2 使用骨材の ASR 判定結果

骨材産地	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
常願寺川※	215	84	2.56	無害でない	0.25	無害でない
庄川※※	64	71	0.90	無害	0.05	無害

※常願寺川の骨材は反応性の高い安山岩を30%程度含有する
 ※庄川の骨材は安山岩および流紋岩の含有が少くない

表-3 コンクリート供試体の配合表

水 (kg/m³)	セメント (kg/m³)	細骨材 (kg/m³)	粗骨材 (kg/m³)	混和剤 (kg/m³)	
				減水剤	A E 剤
168	305	769	1006	0.812	0.012

骨材は粒度調整を未実施で使用した。表-1 のケース A、B のコンクリート供試体の配合を表-3 に示す。表-3 のコンクリート供試体は本来別の試験用で製作された強度試験用の予備のもので、ASR 促進試験で多くの場合で実施するアルカリの添加や調整は実施していない。

2.2 各試験法

モルタル供試体を用いた試験は ASR が発生した橋梁のフーチングに設置されている地下水が流入する点検坑（以下、点検坑と記す）にて採取した地下水 (pH8.7) を

使用した弱アルカリ性養生水と水道水 (pH8.0) および周辺地盤で採取した土を用い、写真-2 の耐熱プラスチック容器に供試体を格納し、膨張量試験を実施した。

試験を実施する温度選定は恒温室の室温である 20℃、JIS A1146 のモルタルバー法の養生温度である 40℃とした。また、年間の温度変化がほぼない点検坑に流入する地下水の温度である 18℃を選定した。ケース 1,4,7,10 の水位変動ありのケースでは、養生水を抜いて、点検坑の温度および湿度と同様の温度 18℃、湿度 95%と養生水に浸漬した状態を2週間おきに繰り返した。ケース 13~18, 21~26 において現地土を現地地下水にて飽和状態にし、40℃にて養生を行った状態と現地土を 4 kg に対して地下水 1 kg で混合し、不飽和にて 20℃、湿度 95%とした状態を2週間ごとに繰り返した。ASR 劣化度と膨張率との関係を、JIS A1127 の共鳴振動により動弾性係数を調査した。

表-4 にコンクリート供試体を用いた試験概要を示す。コンクリート供試体は20℃の養生水で4年間養生したもので、供試体表面に ASR 特有のひび割れが見られたため、ASR に関連する試験を実施した。円柱の供試体を各試験用に切断、成型後に各試験を実施した。

DRI 法については文献 8 に示す条件で実施した。石灰石砕石の ASR 判定として用いられているものを試験的に反応の進行状況を比較するため使用し、試験では、コアを水平方向に切断した面と鉛直方向に切断した面にて、アルカリシリカ反応の進行状況を比較した。観察範囲は、縦 70mm×横 70mm の範囲にて 5mm メッシュの中で確認できた変状項目の個数を、紫外線を照射しながら実体顕微鏡にてカウントした。

ASR の状況を確認するため蛍光塗料エポキシ樹脂を含浸させた断片試料、偏光顕微鏡の観察試料としてエポキシ樹脂を含浸させた薄片試料 (幅 20mm×長さ 20mm×厚さ 20 μ m 程度) を作成した。試料の観察は実体顕微鏡および蛍光顕微鏡では低倍率の 10~40 倍程度、偏光顕微鏡では 25 倍~600 倍の低倍率~中倍率で実施した。

3. 試験結果および考察

3.1 モルタルの供試体による結果

図-1、図-2 に養生日数 120 日での膨張試験の結果を示す。養生初期において膨張率の変動が見られるケースがあり、図-1 において膨張率が大きい常願寺川産骨材を使用したケース 3 のアルカリ量は JIS A1146 どおりで水道水にて、浸水養生を継続した供試体の膨張率は養生日数 7 日にて 0.03%を超え、その後も膨張傾向を示し、120 日では 0.044%であった。また、試験の目安として、JIS A1146 を参考にし、個々の供試体の膨張率は規定 (平均膨張率 $\pm$ 0.010%) の範囲内であった。

図-1 より反応性骨材を用いているケースにおいて、



写真-2 試験体養生方法

表-4 コンクリート供試体での試験概要

試験項目	概 要	数 量	
		常願寺	庄川
試験体の加工	円柱供試体を各試験用に必要な形に切り取り整形する	2本	1本
アルカリ溶液浸漬法	コア (φ55) を温度 80℃、1 N・NaOH 溶液に浸漬して、コアの膨張量を定期的に測定する	2本	1本
DRI 法による劣化度判定	断片試料に蛍光塗料入りエポキシ樹脂を含浸させ、研磨後、70×70mm の範囲で 5mm メッシュごとに変状個数をカウントする	4試料	2試料
偏光顕微鏡観察	断片試料を実体顕微鏡にて観察し、その後数枚の薄片を作製して偏光顕微鏡にてアルカリシリカ反応の状況を確認する	4試料	2試料

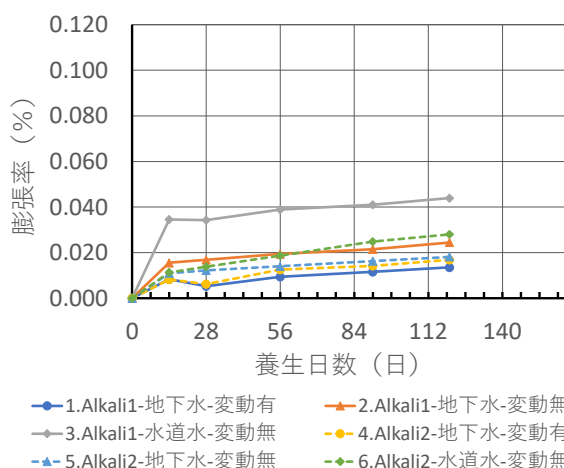


図-1 膨張試験結果 (反応性骨材・ケース 1~6)

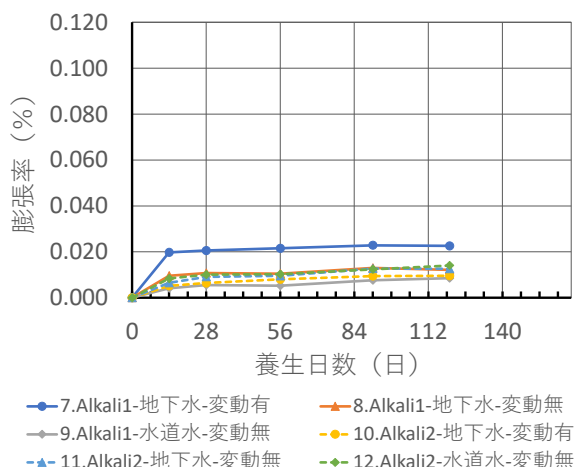


図-2 膨張試験結果 (非反応性骨材・ケース 7~12)

養生温度が 18℃と JIS A1146 と比較し低温での養生温度でありながら、反応性にケースごとに差はあるものの、全体的に膨張の傾向が見られた。実験当初の予想として、高いアルカリ量のケースや地下水の使用、地下水の変動を模擬した場合にて、膨張量が大きくなる傾向を想定していたが、本実験においては明確な差が見られなかった。

アルカリ量 2 倍のケースにおいて膨張量が際立って膨張しない理由として、アルカリの溶脱を考えられた。試験容器中のアルカリを計測した結果、pH は養生後 14 日で 12 を超える値となった。養生温度が 18℃と低温であったことで、水和反応の速度が後述する 40℃のケースと比較して遅く、その間に添加したアルカリが溶出した可能性が考えられた。

地下水の変動を模擬したケース 1,4 において、水位低下時として、温度 18℃、湿度 95%の状況では湿気環境での養生とあまり違いがなく、また、供試体寸法が小さく、これらより、実構造物の状態の再現が不十分であったためと考えられた。

図-2 より非反応性骨材を用いてのケースは反応性骨材を使用した図-1 と比較し全体的に膨張量が小さく、各ケースにおいても差が小さい結果となった。

図-3、図-4 に養生日数 180 日での膨張試験の結果を示す。図-3 よりアルカリ量が 2 倍のケースにおいて、養生初期から大きな膨張を示し、ケース 16, 17 の養生水のケースでは養生日数 180 日で 0.2%を超える膨張を示し、高い ASR 反応性が見られ、養生温度 18℃のケースとは異なる結果となった。養生温度以外が同一条件の図-1 のケース 4 と図-3 のケース 16 の膨張量に差が見られることから、養生温度の影響が大きいことが推察された。また、土中養生を行ったケース 15, 18 は膨張量が小さい結果となった。土中のケースでは地下水にて飽和および不飽和を繰り返すことから、ASR が発生した現地条件に最も近いと考えられていたが、本実験条件では明確な違いは見られなかった。さらに、養生水の違いによる膨張量の差は見られなかった。養生水の変動がないケース 19, 20 と同じアルカリ量のケースとの膨張量に違いがなく、反応性の高い骨材では乾湿と ASR との関係については本実験では不明であった。

図-4 より非反応性骨材のケースではアルカリ量を 2 倍にしたケース 24 で 0.05%を超える膨張が見られるが、他のケースでは、目立った違いはなく、全体的に膨張量は小さい結果となった。養生水の変動がないケース 27, 28 と比較した場合、若干ではあるが反応性骨材を使用したケースとは異なり、非反応性骨材のケースの場合、全体的に養生水の変動があるケースのほうの膨張量が大きい結果となった。

図-5、図-6 に共鳴振動により推定した動弾性係数の

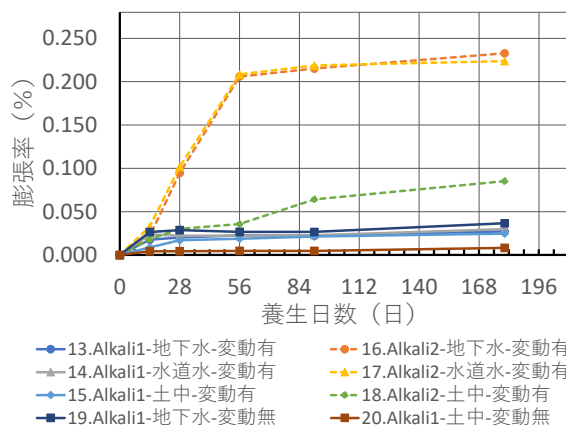


図-3 膨張試験結果 (反応性骨材・ケース 13~20)

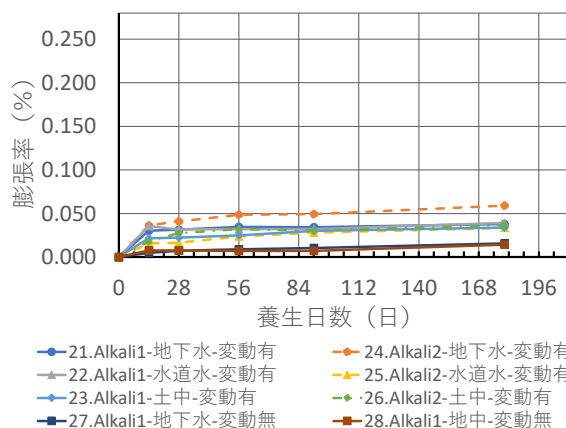


図-4 膨張試験結果 (非反応性骨材・ケース 21~28)

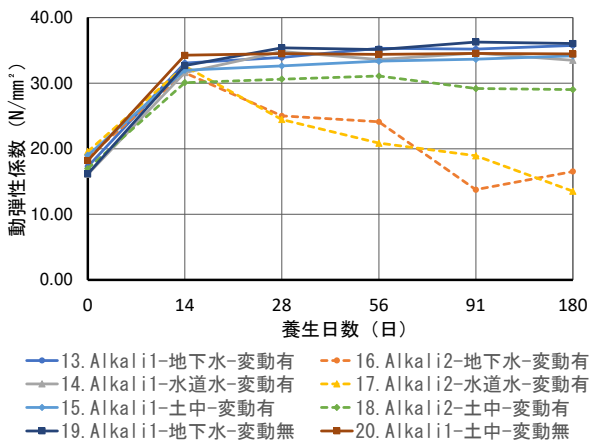


図-5 動弾性係数試験 (反応性骨材・ケース 13~20)

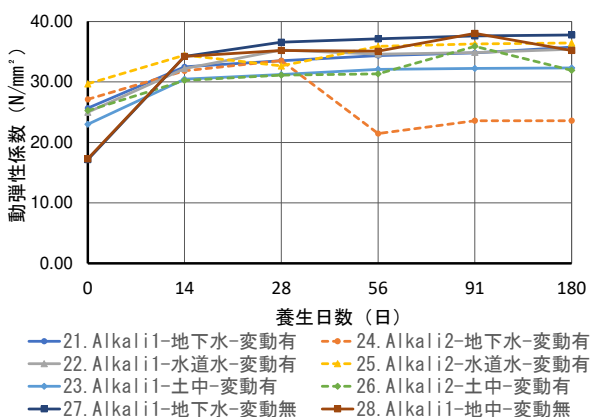


図-6 動弾性係数試験 (非反応性骨材・ケース 21~28)

結果を示す。図-5 により、膨張量計測時に合わせて共鳴振動数の計測を実施している中で、アルカリ量 2 倍のケースでは養生日数 14 日経過後から動弾性係数の低下が見られ、膨張量が大きいケース 16、17 では養生日数 14 日時点と比較し約 50%減少した。

写真-3 に 0.2%を超える膨張を示し、また動弾性係数の低下が大きいケース 16 の 180 日間養生後の写真を示す。供試体の長辺方向および短辺方向ともにひび割れが生じており、各測定値との相関性が見られた。

3.2 コンクリートの供試体による結果

写真-4 より供試体には ASR で見られる析出物を伴うひび割れおよびポップアウトが見られた。

試料が粉碎後、温度 40℃の温水抽出法にて溶出した Na⁺イオン濃度、K⁺イオン濃度を ICP 質量分析装置にて分析して、等価アルカリ量 Na₂Oeq.を算出した。表-5 より、水溶性アルカリ量は 1.68 kg/m³であり、低濃度であった。また、配合からの推定値も同一の値となった。

アルカリ溶液浸漬法は、カナダおよび米国の促進モルタルバー法に準拠したコアの促進養生試験を実施した。試験結果を図-7 に示す。

表-1 に示すケース B の非反応性骨材の庄川産のコアの膨張率は、図-7 よりケース A の反応性骨材の常願寺川産に比較して小さく、試験日数 28 日でも 0.1%を超えなかった。コアの膨張率によるカナダや米国の促進モルタルバー法の判定基準との照合結果では骨材が「無害」、北陸地方の判定基準では「膨張性なし」と判断された。

ケース A の常願寺川 2 および常願寺川 5 のコアの膨張率はほぼ同じであった。膨張率はほぼ直線的に増加し、試験日数 28 日にて 0.6%以上となった。コアの製作から 4 年程度しか経過していないことや、低アルカリのコンクリートであることから、アルカリシリカ反応が十分に進行しておらず、コアの膨張率が逆に大きくなったものと考えられた。

DRI 法により検討した試験結果を図-8 に示す。表の 1～10 の状態ごとにカウントした。コアの水平方向および鉛直方向にて切出した断片試料にて、アルカリシリカ反応における異方向性における進行状況を DRI 法により検討した。ケース B では、断片試料の異方向性の違いによるカウント数にほとんど差がなく、アルカリシリカ反応が十分に進行していないためと考えられた。ケース A では、水平方向よりも鉛直方向でのカウント数が多くなる傾向があった。カウント数の差は細骨材の反応リムや細骨材のひび割れを満たすゲルが影響していた。また、供試体ではコア表面にひび割れの発生が認められたが、セメントペーストに進展するひび割れは確認できなかった。

写真-5～写真-7 に偏光顕微鏡での観察結果を示す。写真-5 はケース B で水平方向の断片試料による観察結

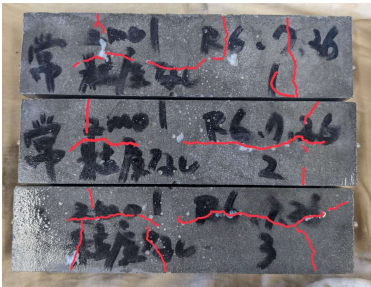


写真-3 モルタル供試体の状況（180 日養生後）

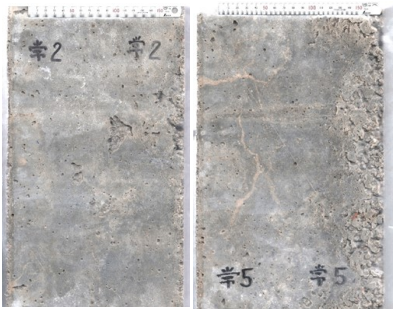


写真-4 コンクリート供試体の状況（4 年養生時点）

表-5 水溶性アルカリ量の分析結果

試料名	コンクリート中の水溶性アルカリ					
	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ Oeq. (%)*	Na ₂ O (kg/m ³)	K ₂ O (kg/m ³)	Na ₂ Oeq. (kg/m ³)*
常願寺川2	0.049	0.038	0.073	1.12	0.86	1.68

※:Na₂O+0. 658K₂O

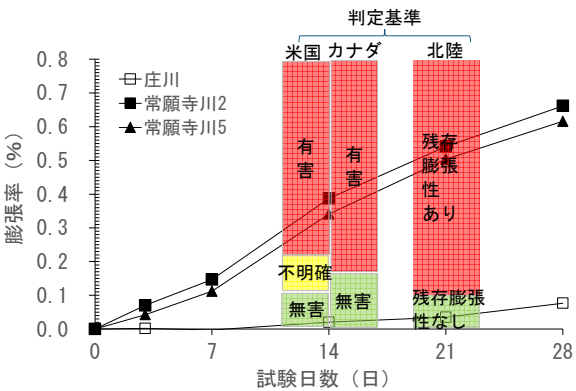


図-7 アルカリ溶液浸漬法の結果

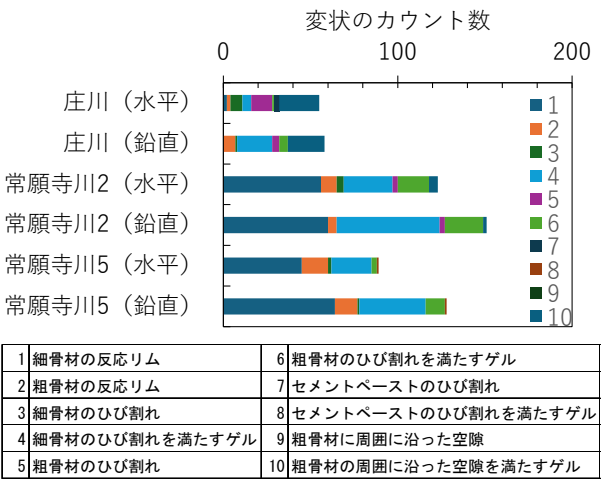


図-8 DRI 法による集計結果

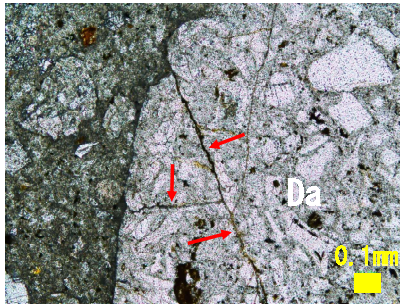


写真-5 偏光顕微鏡観察
(ケース B 水平方向・単ニコル)

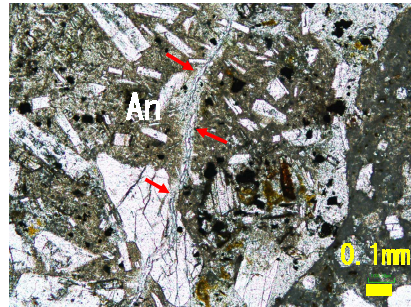


写真-6 偏光顕微鏡観察
(ケース A 水平方向・単ニコル)

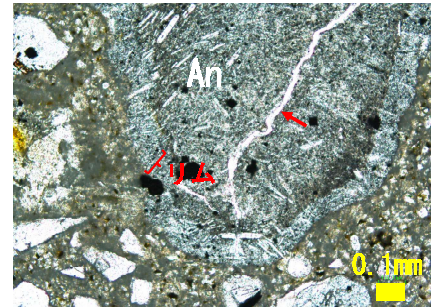


写真-7 偏光顕微鏡観察
(ケース A 鉛直方向・単ニコル)

果で流紋岩や安山岩に軽微なアルカリシリカ反応性のひび割れが認められ、赤色の矢印の砂利のデイスait (Da) に発生したひび割れが確認され、ひび割れは骨材の中に納まっており、セメントペーストへの進展はなかった。

写真-6、写真-7 はケース A で写真-6 は水平方向の断面試料による観察結果で、砂の安山岩や流紋岩の内部のひび割れや反応リム、砂周囲に白色ゲル・ゾルの滲出しが認められた。また、赤色の矢印のとおり砂利の安山岩 (An) 内部のゲルで満たされたひび割れが確認された。写真-7 は鉛直方向の断面試料の観察結果で、砂の安山岩 (An) に発生しゲルを充填したひび割れと反応リムが見られた。低アルカリの配合でありながら、反応性骨材を使用したケースだけではなく、非反応性の骨材を使用したケースにおいても ASR の進行度合いに差はあるが、20℃の養生温度でありながら ASR の発生が確認された。

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) 水温が 18℃の養生条件において、反応性にケースごとに差は生じているが、全体的に膨張の傾向が見られた。実験当初の仮定として、アルカリ量が 2 倍のケースや地下水の使用、地下水の変動を模擬した場合において、膨張量が大きくなる傾向を想定していたが、本実験においては明確な差が見られなかった。
- (2) 膨張率が 0.2%を超えたケースでは養生日数 14 日時点と比較し約 50%動弾性係数が減少し、膨張率と動弾性係数との関係性が判明した。
- (3) 強度試験用の予備として、20℃の養生水で 4 年間養生されたコンクリート供試体において、表面に ASR 特有のひび割れが見られた。薄片試料による偏光顕微鏡観察結果において、水溶性アルカリ量 1.68 kg/m³である低アルカリの配合および養生温度 20℃の環境でありながら、反応性骨材を使用したケースだけではなく、非反応性の骨材を使用したケースにおいても ASR の進行度合いに差はあるものの、ASR の発生が確認された。

謝辞

本研究は、科学研究費 21K04225 の助成を受け実施したものである。また、石川工業高等専門学校環境都市工学科大平碧氏に協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

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) 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
- 4) 津田誠，相良明日香，加賀谷将伍，鳥居和之：地中環境下における ASR 反応性と抑制対策の検証，コンクリート構造物の補強，補修，アップグレード論文報告集，Vol.20，pp.185-190，2020
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 北川空良，佐川康貴，山田一夫，川上隆：低温条件（10℃）の室内試験における ASR の膨張挙動および内部ひび割れ性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.598-603，2023
- 8) Katayama, T: An Attempt to Estimate Past Expansion of Concrete Based on Petrographic Stage of Alkali-silica Reaction, Proc.39th International Conference on Cement Microscopy, April 9-13, Toronto, Ontario, Canada, pp.217-236, 2017