

論文 促進養生条件および採取コア径の ASR 膨張に与える影響

中川 裕之*¹・平賀 由起*²・真鍋 良輔*³・松島 学*⁴

要旨: アルカリシリカ反応 (ASR) を生じる香川県産の粗骨材を使用した供試体からコア採取し, 促進養生条件およびコア径の違いによる ASR 膨張へ影響を検討した。飽和 NaCl 溶液浸漬法 (デンマーク法) とアルカリ溶液浸漬法 (カナダ法) は, JCI-DD2 法と同様の判断ができるが, カナダ法は, 判断時期やコア径によって異なる判断結果となった。0.01mol/l NaOH 溶液浸潤用紙をラップした JCI-DD2 法では, コア径 80 と 100mm の膨張率が同程度であった。デンマーク法では, 浸漬する NaCl 濃度で膨張傾向が違っていた。カナダ法による膨張は, コンクリートコア内へ浸透した NaOH による化合物の変化が影響している可能性が考えられた。

キーワード: アルカリシリカ反応, JCI-DD2 法, デンマーク法, カナダ法, コア径

1. はじめに

既設構造物に対するアルカリシリカ反応 (以下, ASR) 膨張性の有無や残存膨張性を構造物から採取したコアの促進膨張試験によって判断する機会が増えてきている。一般的な促進膨張試験としては, 養生条件 40°C, 95%RH 以上で膨張量を測定する JCI-DD2 法 (以下, DD2 法) が従来から行われている。その他, 融雪剤による ASR 増大の影響を検討する目的から提案¹⁾された 50°C 飽和 NaCl 溶液に浸漬する方法 (以下, デンマーク法), 従来の化学法やモルタルバー法および DD2 法等では確認が難しい遅延膨張型 ASR を生じる骨材を察知するために提案²⁾された 80°C, 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬する方法 (以下, カナダ法) 等がある。本来目的が違うこれらの促進膨張試験ではあるが, 今後 ASR 膨張性有無を検討するために実施される機会は増えていくことが予想される。

既設構造物から採取したコンクリートコアへのデンマーク法およびカナダ法の適用性は多く検討³⁾されているが, 使用されている骨材岩種, さらに構造物から採取されるコア径によって促進膨張試験結果は異なると考えられる。

本研究は, 香川県産の粗骨材を使用したコンクリートについて, 促進養生条件や採取コア径の違いによる ASR 膨張への影響を検討することを目的として, 供試体を製作後にコアボーリングを行い, 採取コアへの DD2 法, デンマーク法, カナダ法を実施した。以上の 3 方法に加え, コア径の影響を補正するために NaOH 溶液浸潤用紙

をコア表面にラップする方法や沿岸コンクリート構造物を想定した人工海水による促進養生方法を試みた。

2. 促進膨張実験

2.1 供試体使用材料と配合

粗骨材は, ASR 反応性骨材である香川県産安山岩・流紋岩砕石の混合と ASR に関して「無害」である香川県産砂岩砕石を重量比 6:4 で使用した⁴⁾。当該する安山岩・流紋岩は, 現在建設工事には使用されていない。細骨材は, 香川県産砂岩砕石を使用した。各骨材の物性値を表-1 に示す。普通ポルトランドセメントを使用し, セメント全アルカリ量は 0.55% である。コンクリート配合を表-2 に示す。コンクリートには ASR 膨張を促進するために塩化ナトリウム NaCl を Na₂O 換算で 10kg/m³ 添加 (以下, NaCl 添加), 無添加 (以下, NaCl 無添加) の 2 種類とした。

2.2 供試体製作

実構造物診断における促進膨張試験では, コンクリートコアが採取される場合が多い。本検討では, 比較的大型の供試体 (900×500×230mm) を製作, 封かん湿潤状態で 3 ヶ月間養生後, ボーリングコア (以下, コア供試

表-1 使用骨材の物性

骨材種別		表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
ASR粗骨材	安山岩 流紋岩	2.51	3.19	6.68
粗骨材	砂岩	2.58	1.70	6.61
細骨材	砂岩	2.60	1.41	2.54

表-2 コンクリート配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 C× (%)	NaCl Na ₂ Oeq(kg/m ³)
					水	セメント	細骨材	ASR粗骨材	砂岩粗骨材		
20	12±2	5.0±1	59	44.0	190	320	800	611	419	1.50	0, 10

*1 (株) 四国総合研究所 土木技術部主席研究員 博 (工) (正会員)

*2 (株) 四国総合研究所 化学バイオ技術部副主席研究員 博 (工)

*3 四国電力 (株) 土木建築部 建設計画グループ 工修

*4 香川大学 工学部安全システム建設工学科教授 博 (工) (正会員)

表-3 コンクリート物性

供試体名	材齢	NaCl添加			NaCl無添加		
		φ 100	φ 80	φ 55	φ 100	φ 80	φ 55
圧縮強度 (N/mm ²)	28	30.3	26.8	29.3	34.2	35.8	34.4
	91	30.9	31.7	26.9	38.6	36.4	34.8
静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	28	2.51	2.40	2.33	2.42	2.56	2.31
	91	2.31	2.39	2.06	2.80	2.71	2.39

体)を採取した。コア供試体の直径は、φ 100, φ 80, φ 55mm の3種類とした。材齢 28, 91 日に採取したコアの圧縮強度および静弾性係数を表-3 に示す。

2.3 促進膨張試験

促進養生条件は、DD2 法 (40℃, 95%RH 以上), デンマーク法 (50℃, 飽和 NaCl 溶液浸漬), カナダ法 (80℃, 1mol/l NaOH 溶液浸漬) である。DD2 法における測定間隔は、促進養生開始後、2, 4 週間、その後は1ヶ月に1回測定した。本検討における膨張率は、コンタクトゲージ法により、3 方法全てについてφ 100 コア供試体は200mm, φ 80 コア供試体とφ 55 コア供試体は100mmを基長として求めた。測定箇所は、コア側面の表裏2面を測定し平均値を求めた。その他の各促進膨張試験方法は、既往の JCI 報告書⁵⁾ に準じて行った。

3. 実験結果と考察

3.1 各促進方法による判定結果比較

コア供試体は、コア採取後に 20℃, 95%RH 以上の養生条件で 14 日間以上保管し、各促進方法別に全てのコア供試体が 1 週間に 1 回の測定において膨張量変化が 0.009mm 以下となるまで測定した。各コア供試体の開放膨張率を表-4 に示す。

DD2 法, デンマーク法, カナダ法の各促進膨張試験結果を図-1~図-6 に示す。各図に示した膨張率に表-4 に示した開放膨張率は含まれていない。デンマーク法およびカナダ法は、各養生温度で 2 時間保存した後の測定値を基長とした。図中の点線は、各試験において ASR 膨張性有無の判断時期 (縦点線) および膨張率 0.1% (横点線) を示す。図-3, 図-6 に示したカナダ法の判断時期は 21 日間とした。

ASR 膨張性有無の判断基準に関して現在統一された指針等はなく、各促進膨張試験においても様々な見解⁶⁾ があるが、「膨張性なし」あるいは「無害」と判断する膨張率は 0.1% と設定されている場合が多い。本検討では、「無害」と「無害でない」の境界を 0.1% とした。

ASR 膨張性有無の判断時期について、DD2 法は、モルタルバー法 (JIS A1146) と同じく 26 週 (182 日), デンマーク法は 3 ヶ月⁷⁾, カナダ法は 21 日²⁾ とした。

図-1~図-3 に示した NaCl 添加コア供試体では、3 促

表-4 コア供試体の開放膨張率

	養生期間 (日)	コア径 (mm)	NaCl 添加 (%)	NaCl 無添加 (%)
DD2法	15	100	0.006	0.001
		80	0.006	0.003
		55	0.004	0.001
デンマーク法	17	100	0.006	0.000
		80	0.005	0.002
		55	0.006	0.002
カナダ法	22	100	0.009	0.003
		80	0.008	0.001
		55	0.006	0.004

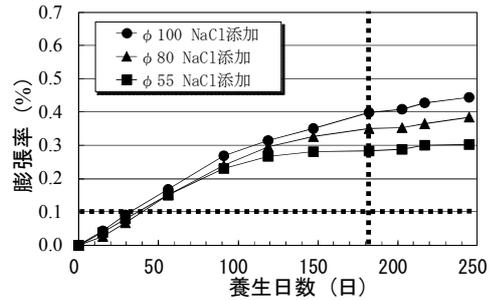


図-1 膨張試験結果 (DD2 法, NaCl 添加)

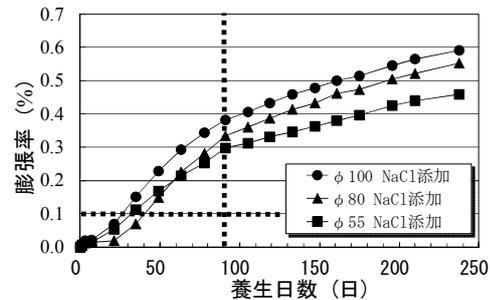


図-2 膨張試験結果 (デンマーク法, NaCl 添加)

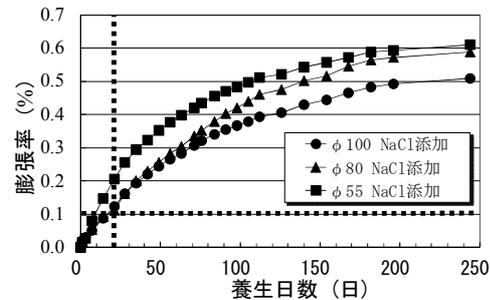


図-3 膨張試験結果 (カナダ法, NaCl 添加)

進方法の全てが図中に縦点線で示した各判断時期に 0.1% を超えており、この場合は、3 促進方法全てにおいて「無害でない」と判断される結果であった。図-4~図-6 に示した NaCl 無添加コア供試体では、3 促進方法全てが 0.1% を下回っており、この場合は、3 促進方法全てにおいて「無害」と判断される結果となった。以上より、本検討に使用した骨材岩種の試験結果からは、ASR 膨張性の判断において、デンマーク法およびカナダ法は DD2 法と同様な判断結果となる可能性が高いことがわかった。カナダ法の促進養生期間は、14 日間⁸⁾ や 21 日間²⁾ などが提案されている。図-3 に示したカナダ法における判断

時期を14日間とした場合、φ100、φ80、φ55 コア供試体の各膨張率は、0.087、0.092、0.147%となり、コア径φ55mm 以外は、DD2法と異なる結果となる。本検討結果から、カナダ法における促進養生期間について少なくとも21日間とすれば、コア径に関係無く、ASR膨張性有無についてDD2法と同じになる可能性は高い。今後さらに他産地の安山岩や流紋岩、他岩種での検討が必要と思われる。

3.2 コア径の影響

図-1に示したDD2法(NaCl添加)では、養生期間6ヶ月でのφ100、φ80、φ55 コア供試体の各膨張率は、0.399、0.351、0.283%であった。φ100 コア供試体の膨張率に対する比は、φ100 : φ80 : φ55 = 1.00 : 0.88 : 0.71 となった。本検討において基長の違いはあるが、既往知見⁶⁾と同様に、コア径が小さくなると膨張率も小さくなっており、促進養生中におけるコア表面からのアルカリ溶脱が考えられる。

実構造物からのコア採取においては、鉄筋間隔等の制約条件からコア径をφ100mmよりも小さくする必要がある場合が考えられる。DD2法におけるアルカリ溶脱対策方法を検討した。コア供試体表面に0.01mol/l NaOH溶液を浸した不織布をラップした。コア供試体は、養生箱内の上げ底に乗せ、養生箱下部に同濃度のNaOH溶液をラップした不織布の一部が浸る高さまでストックして、コア供試体表面が常時NaOH溶液に覆われる状態にした(以下、NaOHラップ法)。コア供試体のラップ状況および養生箱内への設置状況を図-7、図-8に示す。

促進膨張試験結果を図-9、図-10に示す。養生期間6ヶ月でのφ100、φ80、φ55 コア供試体の各膨張率は、0.434、0.427、0.277%で、φ100 コア供試体の膨張率に対する比は、φ100 : φ80 : φ55 = 1.00 : 0.98 : 0.64 となった。NaOHラップ法によって、コア径φ80mmはφ100mmと同程度の促進膨張試験結果が得られることがわかった。ただし、φ100 コア供試体のNaOHラップ法での膨張率は0.434%とDD2法での0.399%よりも若干大きくなっており、ラップしたNaOH溶液による影響と思われる。NaOH溶液の濃度および養生箱内でのNaOH溶液の供給方法等に関するさらなる検討が必要と思われる。

図-2に示したデンマーク法(NaCl添加)では、養生期間3ヶ月でのφ100、φ80、φ55 コア供試体の各膨張率は、0.382、0.333、0.298%であった。φ100 コア供試体の膨張率に対する比は、φ100 : φ80 : φ55 = 1.00 : 0.87 : 0.78 となっており、コア径が大きくなると膨張率も大きくなっていった。コア供試体内へのNaClの浸透が膨張を促進すると考えた場合には、小さなコア径の方がコア全体は膨張しやすいと思われるが、本検討結果は、野村ら⁹⁾の実験結果と同様であった。

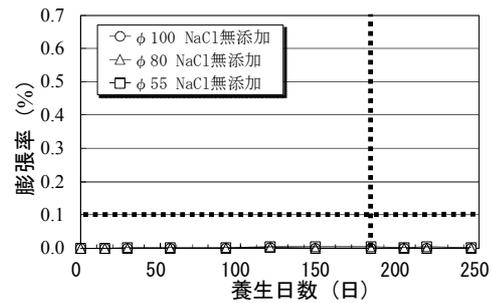


図-4 膨張試験結果 (DD2法, NaCl 無添加)

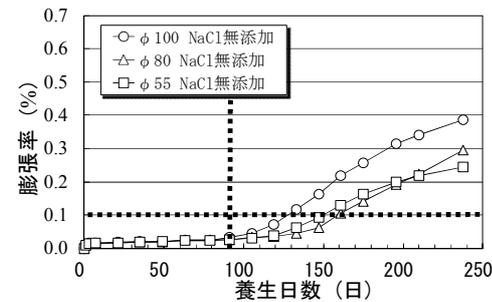


図-5 膨張試験結果 (デンマーク法, NaCl 無添加)

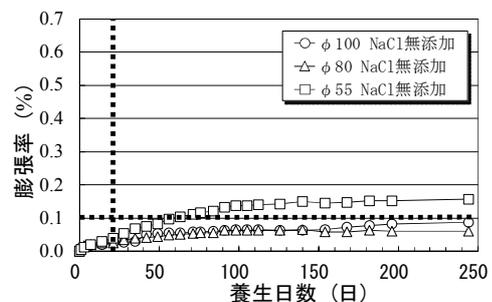


図-6 膨張試験結果 (カナダ法, NaCl 無添加)



図-7 ラップ状況



図-8 養生箱内設置状況

図-3に示したカナダ法(NaCl添加)では、養生期間21日でのφ100、φ80、φ55 コア供試体の各膨張率は、0.124、0.113、0.206%であった。φ100 コア供試体の膨張率に対する比は、φ100 : φ80 : φ55 = 1.00 : 0.91 : 1.66 となった。本検討における最終(244日間)での各膨張率は、0.508、0.588、0.611%であった。養生期間21日の膨張率は、コア径φ100mmとφ80mmが同程度に対してφ55mmは大きかった。最終での膨張率は、コア径が小さくなるに従って膨張率は大きくなっており、既往知見⁵⁾と同様であった。先に示したように、促進養生期間14日間で判断する場合、DD2法と同様の結果を得るためには、コア径をφ55mm程度にする必要があると思われる。デンマーク法やカナダ法におけるASR膨張性有無の判断や試験に使用するコア径に関しては、判断時点にお

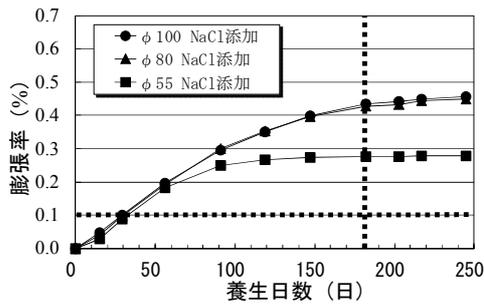


図-9 膨張試験結果 (NaOH ラップ法, NaCl 添加)

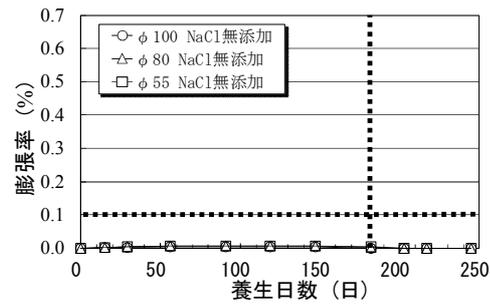


図-10 膨張試験結果 (NaOH ラップ法, NaCl 無添加)

ける膨張変化がまだ収束しておらず膨張段階途中での判断となるため、例えば、分析対象とするコンクリートに関して、類似する過去の DD2 法による試験結果等を含めた総合的な分析考察など、十分な検討が必要ではないかと思われる。

3.3 デンマーク法に関する検討

デンマーク法は、約 1 年間 (353 日) まで試験を継続した。結果を図-11、図-12 に示す。膨張測定間隔を長く取ったと思われる影響が見られるが、膨張の増大と長期化の傾向が見られ、参納¹⁰⁾の実験結果と同様であった。特に図-12 に示したデンマーク法 (NaCl 無添加) では、一般的に ASR 膨張性有無を判断する 3 ヶ月の養生期間経過後から膨張し始め、φ80、φ55 コア供試体は、1 年経過時に膨張収束傾向が見られた。養生開始から一定期間経過後に膨張し始め、コア径の小さな方より膨張収束傾向を示すことから、膨張が顕在化する NaCl のしきい値や膨張が収束する NaCl の浸透量が存在することが考えられるが、本検討では、定量化まで至らなかった。

ASR を生じた構造物が海岸近くにある場合、NaCl による同様の影響が考えられるが、飽和 NaCl 溶液浸漬ほど厳しい条件ではない。そこで促進養生条件を 50°C 人工海水浸漬とした膨張試験結果 (以下、人工海水浸漬法) を図-13、図-14 に示す。人工海水は、市販の粉末を NaCl 濃度 3.0% 程度の溶液にして使用した。

図-13 に示したように、人工海水浸漬法 (NaCl 添加) でも膨張が生じたが、デンマーク法 (NaCl 添加) と違って、養生期間 3 ヶ月経過後から膨張の収束が見られた。図-14 に示した人工海水浸漬法 (NaCl 無添加) は、ほとんど膨張しなかった。羽瀨¹¹⁾は、コンクリート供試体より採取したコアの人工海水浸漬法について、本検討と同様の傾向を得たが、実構造物から採取したコアでは人工海水浸漬法による方がデンマーク法よりも膨張量が増大する場合があります、その原因として、構造物に生じた微細な ASR ひび割れなどから侵入する硫酸イオン (以下、 SO_4^{2-}) によるエトリンガイト生成を示唆している。

本検討結果から、コンクリート内へ浸透する NaCl 濃度によって、潜在 ASR の顕在化つまり ASR 膨張の発生、

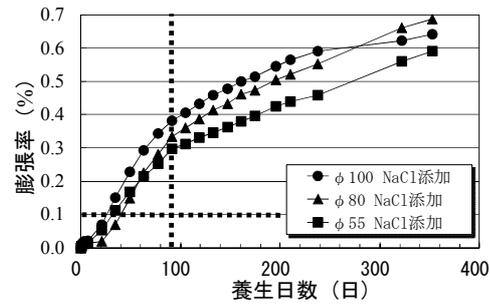


図-11 膨張試験結果 (デンマーク法, NaCl 添加)

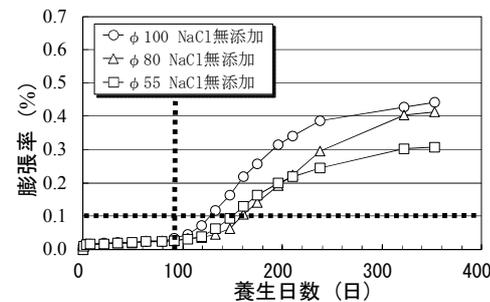


図-12 膨張試験結果 (デンマーク法, NaCl 無添加)

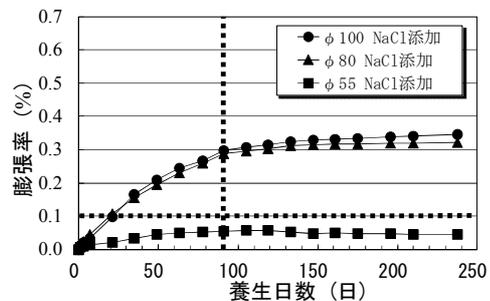


図-13 膨張試験結果 (人工海水浸漬法, NaCl 添加)

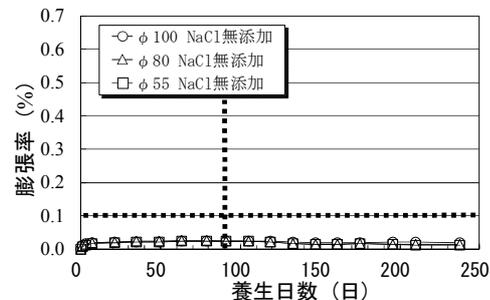


図-14 膨張試験結果 (人工海水浸漬法, NaCl 無添加)

ASR 膨張増大や長期化程度が違うことがわかった。今後、ASR への塩化物イオン濃度影響に関する定量化や構造



図-15 φ55 コア外観 (DD2法)



図-16 φ55 コア外観 (デンマーク法)



図-17 φ55 コア外観 (カナダ法)

物からの採取コアによる検討等が必要と思われる。

3.4 カナダ法に関する検討

促進膨張試験を終了した時点におけるφ55mm コア供試体の外観を図-15～図-17に示す。いずれもNaClを事前に添加したコア供試体である。DD2法(図-15)やデンマーク法(図-16)では、ASR特有の骨材リム変色や白色生成物が観察されるが、カナダ法(図-17)は、膨張によるひび割れは見られるが骨材が反応したような様子が他の方法に比べあまり見られない。NaClやNaOHによるASR膨張への影響は、川村ら¹²⁾が水酸化イオン生成によるASR促進に加えてエトリンサイト生成に起因する可能性を示唆している。塩化物イオンによるASR促進は、本検討でも確認されたが、NaOH溶液浸透による膨張要因について検討した。

図-6に示したカナダ法(NaCl無添加)による養生期間244日でのφ100、φ80、φ55コア供試体(以下、カナダ法コア)の各膨張率は、0.087、0.061、0.157%であった。今回、養生温度による膨張量への影響は検討していないが、DD2法やデンマーク法と違って、カナダ法の膨張はNaOHによるものと思われる。

カナダ法コア(φ100mm, NaCl無添加)をコア側面から深さ方向に5分割(図-18)、150μm以下に粉碎した。粉碎した試料は蛍光X線分析装置を用いて化学組成を調べ、表-5に結果を示す。ブランクは、コア供試体と同じ配合で促進養生を施していないコンクリート試料である。NaOH溶液に浸漬することによってコア内のCaOおよびSO₃は減少、Na₂Oは増加傾向を示した。

粉碎した各試料(10g)に純水(100ml)を加え、6時間振とうを行った。振とう後の混合溶液を0.45μmのフィルターでろ過を行い、得られたろ液中のナトリウム(以下、Na)はICP発光分析装置、SO₄²⁻はイオンクロマトグラフィーにて定量を行った。NaおよびSO₄²⁻溶出量の分布を図-19、図-20に示す。カナダ法コアでのNaおよびSO₄²⁻溶出量はブランクよりも高い値を示した。Naは中心よりも外周の方が高い値であり、NaOH溶液が外周から中心部に向かって浸透したことを示している。一方、SO₄²⁻はNaOH溶液に含まれていないことから、コア内に存在していたSO₄を含む難溶解性の化合物がNaOH溶液の浸透によって溶解性の化合物に変化したため、溶解量が増加したと考えられる。

また、当該粉碎試料のXRD分析ではSO₄²⁻を有するエトリンサイト等の結晶は確認できず、エトリンサイト等

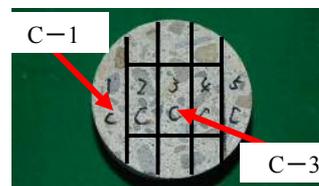


図-18 粉碎試料採取位置 (φ100mm)

表-5 蛍光X線分析での化学組成

	ブランク (%)	カナダ法 (%)	
		外周部 (C-1)	中心部 (C-3)
Na ₂ O	2.1	5.0	3.1
MgO	1.4	1.3	1.5
Al ₂ O ₃	11.1	12.2	11.8
SiO ₂	54.3	56.8	57.8
SO ₃	0.8	0.4	0.6
K ₂ O	2.5	2.8	2.6
CaO	23.1	17.0	18.0
Fe ₂ O ₃	3.9	3.8	3.9

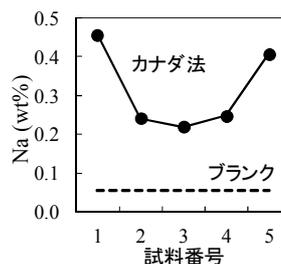


図-19 Na溶出量

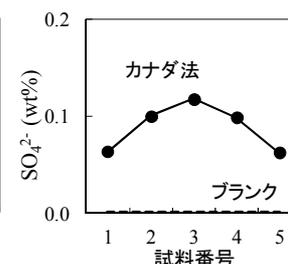


図-20 SO₄²⁻溶出量

による膨張影響はないと思われる。XRDおよび化学組成、溶解量等の結果より、NaOHがコア内に浸透することによってCa化合物の一部がNa化合物に変化し、化合物から外れたCaはCa²⁺となりコア内を移動し、外周部からSO₄²⁻等とともに流出、コア内にはブランクよりも高い濃度のNaが残存したと推察される。

φ55mmカナダ法コアの中央付近を厚さ1cm程度切断採取、切断面を研磨し、走査型電子顕微鏡(JXA-8200, 日本電子)を用いて表面観察および定性分析を行った。比較的白色を呈する2箇所を拡大図(加圧電圧5kV, 200倍)を図-21、図-22に示す。A部(図-21)は、図中に示した定性分析(加圧電圧15kV)結果より、粒状で非晶質のアルカリシリカゲル生成物⁶⁾と思われる。B部(図-22)は、定性分析(加圧電圧15kV)での高いNaピークおよび図-19に示したNa溶出量分布から、コア中心部よりも外周部の方が相対的に高い濃度のNaが存在していた。今後、コンクリート膨張への影響因子に関して、生成物の定性・定量化等による検討が必要と思われる。

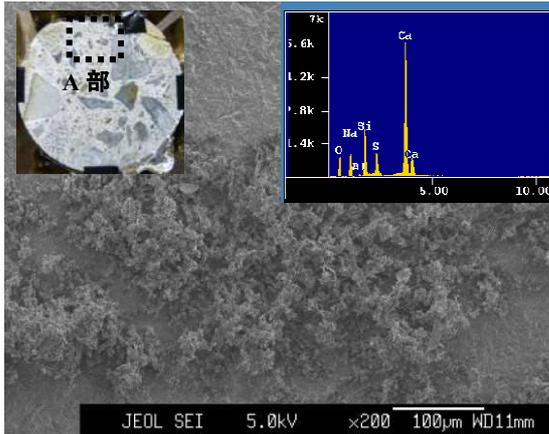


図-21 コア断面拡大図 (A部)

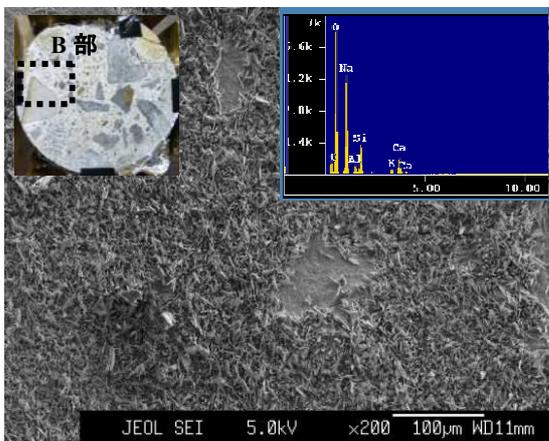


図-22 コア断面拡大図 (B部)

5. まとめ

ASR を生じる香川県産の粗骨材を使用した供試体から採取したコアを用いて、養生条件の異なる促進膨張試験結果を比較検討した。本検討結果を以下に示す。

- (1) ASR 膨張性の判断において、デンマーク法およびカナダ法は DD2 法と同様な判断結果となる可能性が高いが、判断時点における膨張変化がまだ収束しておらず膨張段階途中での判断となること、コア径によって判断結果が異なる可能性があることがわかった。実務上は、DD2 法と併用する診断箇所を少なくとも 1 箇所以上設けること等が有用と思われる。
- (2) JCI-DD2 法のアルカリ溶脱対策として、コア表面に 0.01mol/l NaOH 溶液を浸した不織布をラップすることにより、φ 80mm コア径の DD2 法による試験結果が φ 100mm コア径と同程度となった。
- (3) カナダ法は、コア径が小さくなるほど膨張は大きくなるが、デンマーク法は、コア径が大きくなるほど膨張が大きくなった。
- (4) コンクリート内へ浸透する NaCl 濃度によって、潜在 ASR の顕在化つまり ASR 膨張の発生、ASR の増大および長期化が違っていることがわかった。

- (5) NaOH 溶液浸透による ASR 膨張起因には、促進養生中にコア内部へ浸透した NaOH による化合物の変化および流出等の影響が考えられるが、本検討では定性・定量化までには至らなかった。

参考文献

- 1) S.Chatterji: An Accelerated Method for the Detection of Alkali-aggregate Reactivities of Aggregate, Cement and Concrete Research, Vol.8, No.5, pp.647-649, 1978
- 2) Tetsuya Katayama, Masahiko Tagami, Yoshinori Sarai, Satoshi Izumi, Toshikatsu Hira: Alkali-aggregate reaction under the influence of deicing salts in the Hokuriku district, Japan, Materials Characterization, 53, pp.105-122, 2004
- 3) 例えば野村 昌弘, 平 俊勝, 鳥居 和之: コアによるコンクリート構造物のアルカリシリカ反応の判定, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1147-1152, 2001.6
- 4) 中川 裕之, 横田 優, 長尾 和明, 松島 学: 超音波法による ASR 既存膨張率の算定, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1709-1714, 2010.6
- 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報告書, 日本コンクリート工学会, pp.311-323, 2014.7
- 6) 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術'16, 日本コンクリート工学会, pp.206-208, 2016.2
- 7) 川村 満紀, 竹内 勝信, 武田 泰平: ASR によって劣化したコンクリートの残存膨張量の予測, セメント・コンクリート論文集, No50, pp.394-397, 1996
- 8) ASTM C1260-94: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)
- 9) 野村 昌弘, 鳥居 和之, 青山 實伸: 北陸地方の河川産骨材を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応の評価法の開発, 材料, Vol.53, No.10, pp.1065-1070, Oct.2004
- 10) 参納 千夏男, 鳥居 和之, 齋藤 匠, 友竹 博一: ポズラン材料を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価, Cement Science and Concrete Technology, No59, 2005
- 11) 羽瀨 貴士, 鳥居 和之: アルカリシリカ反応と海水の複合的な作用によるコンクリートの劣化現象とその評価手法の提案, 土木学会論文集, No.774/V-65, pp.149-161, 2004.11
- 12) 川村 満紀, 竹内 勝信, 杉山 彰徳: 外部から供給される NaCl がアルカリシリカ反応によるモルタルの膨張に及ぼす影響のメカニズム, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.93-102, 1994.11