

論文 遅延膨張性を示す細骨材に起因したアルカリ骨材反応に関する基礎研究と抑制対策

富山 潤*¹・大城 武*²・新城竜一*³・金城和久*⁴

要旨：近年、沖縄県のコンクリート用細骨材として使用されている海砂に微晶質石英や隠微晶質石英などの鉱物が含有し、遅延膨張性のアルカリ骨材反応（ASR）を生じることが明らかとなった。これまでに報告された海砂に起因した ASR 被害は軽微なものであるが、道路橋示方書・同解説の改定に伴い耐用年数 100 年が明記されたことから、コンクリート構造物を長年にわたり維持管理するには、遅延膨張性 ASR への対策が急務となってきた。そこで本研究では、遅延膨張性 ASR を起こす海砂の基礎研究とフライアッシュ(FA)による ASR 抑制効果の検証を行い、遅延膨張性の鉱物を含む海砂の基本的な性質と FA の ASR 抑制効果を確認した。

キーワード：遅延膨張性 ASR, 隠微晶質石英, 海砂, 促進膨張試験, フライアッシュ, 抑制対策

1. はじめに

平成 14 年 3 月に道路橋示方書・同解説¹⁾が改定され、耐用年数 100 年のコンクリート構造物の長寿命化が明示され、長寿命化に対する社会的関心が高まっている。構造物の長寿命化を実現するためには、使用材料の適正な選定および構造物の劣化現象の正しい理解と予測が必要である。

沖縄県内のコンクリート構造物の劣化要因としては、主に塩害とアルカリ骨材反応（以下、ASR と称す）がある。塩害に関してはこれまで数多くの調査・研究が行われ、その評価手法および抑制対策は充実されてきている。しかし、ASR に関しては解明すべき課題が多く残されており、今後その検討が必要である。

沖縄県内において検討すべき ASR の特殊な課題は、台湾花蓮産骨材と沖縄本島新川沖産海砂に含有される微晶質石英や隠微晶質石英等の有害鉱物による遅延膨張性の ASR である。台湾花蓮産骨材による ASR 事例はこれまで数多く報告されて広く認識されているが、近年、細骨材として使用されている新川沖産海砂に起因する ASR の発生も報告され^{2), 3)}、その対応が緊急の課題として取り上げられている。県内では良質なコンクリート用骨材が不足しており、また、本部産石灰岩砕砂との混合砂の粒度調整用として海砂は汎用的に使用されている。

遅延膨張性骨材に起因した ASR 対策の大きな問題点は、遅延膨張性を示す骨材に対して現行 JIS の ASR 試験法（JIS A 1145/JIS A1146）では検出が不可能であるという点である⁴⁾。また、国内で一般的に用いられているコンクリートの促進膨張試験である JCI-DD2 においても

遅延膨張性の ASR は検出できないことである⁴⁾。

これまで確認されている海砂に起因する遅延膨張性 ASR の劣化事例は軽微なものである²⁾。しかし、沖縄県は高温多湿で周囲を海に囲まれた亜熱帯海洋性気候下に置かれ、塩害の非常に厳しい地域である。従って、外部からのアルカリ供給量が多く、ASR が進行しやすい環境にあると考えられる。さらに、ASR で生じたコンクリート表面の微細なひび割れから塩分、水、酸素などの腐食要因がコンクリート中に浸透し、塩害を促進する複合劣化の可能性も考えられる。以上のことから、沖縄県において海砂を安全に使用するためには、遅延膨張性の ASR に対する対策を早期に検討する必要がある。そこで本研究では、微晶質石英や隠微晶質石英などの有害な鉱物を含有する新川沖産海砂（以下、海砂と称す）を対象に、遅延膨張性 ASR の基礎的研究と抑制効果の検討を行った。具体的には、1) 海砂の岩種構成および諸性質、2) 海砂への JIS アルカリ骨材試験法（JIS A 1145/JIS A1146）の適用性、3) 本部産石灰岩砕砂（非反応性骨材）と海砂とのペシマム混合率の検証、4) 沖縄県産フライアッシュの ASR 抑制効果に関する検証等を行った。

2. 試験概要

2.1 海砂の岩種構成および諸性質

県内コンクリートの構成材料の細骨材として使用されている沖縄本島北部の新川沖の海砂および同島本部半島安和鉱山産の石灰岩砕砂について、1) 粒度分布、2) 構成岩種の判別、3) 構成岩種の構成比を調査した。その調査方法の概要を以下に示す。

*1 琉球大学 工学部環境建設工学科准教授 博士（工学）（正会員）

*2 琉球大学名誉教授 Ph.D.（名誉会員）

*3 琉球大学 理学部物質地球科学科教授 博士（理学）

*4 琉球大学大学院理工学研究科博士前期課程建設工学専攻 学士（工学）

(1) 粒度分布

海砂の粒度分布を JIS A 1102-2006 「骨材のふるい分け試験法」に基づいて行った。

(2) 構成岩種の判別および構成岩種の構成比

粒度試験の結果、含有率の高い 1.2mm, 0.6mm, 0.3mm の各ふるいに留まる砂粒子について、四分法を繰り返して適量まで縮分し、底面積が約 400mm² の容器に入れてエポキシ樹脂で固化した。固結後に厚さ約 0.03mm の薄片試料を作製し、この薄片試料を使用して偏光顕微鏡観察を行った。また、含有率の高い 1.2mm, 0.6mm, 0.3mm の各ふるいに留まった砂粒子を対象に、粒径ごとの岩種構成を求めた。測定方法は、偏光顕微鏡にメカニカルステージとポイントカウンターを設置し、ポイントカウント法に基づいて行った。

カウント数は各粒度で作製した薄片 1 試料あたりの粒子密度を考慮し、約 400mm² の試料表面を走査できるように 1 枚あたり 2000 点とした。ここでは埋め込み樹脂はカウント対象外とした。なお、ふるいの呼び寸法 1.2mm の試料は、薄片 1 枚あたり 2000 点に満たないため、試料表面を走査し終えた時点で終了とした。粒度ごとの薄片枚数と格子間隔の一覧を表-1 に示す。

表-1 粒度ごとの格子間隔設定

ふるいの呼び寸法(mm)	薄片枚数	格子間隔(mm)	
		水平方向	縦方向
1.2	3	1/2	2/5
0.6	2	1/3	1/5
0.3	1	1/6	1/5

(3) 骨材の各種試験法

コンクリート試験体を作製するため、使用骨材に対して JIS 試験法に基づき各種骨材試験を行った。なお、細骨材は海砂と沖縄本島本部産石灰岩砕砂（非反応性）の混合砂であり、また、粗骨材は沖縄本島本部産石灰岩砕石（非反応性）を用いている。

遅延膨張性を示す骨材に対しては、JIS の ASR 試験である化学法（JIS A 1145）およびモルタルバー法（JIS A 1146）は適用できないことが指摘されている⁴⁾。本研究では上記の指摘を検証するため、海砂を対象に化学法（JIS A 1145）およびモルタルバー法（JIS A 1146）の試験を行った。

2.2 海砂と本部産石灰岩砕砂のペシマム混合率の検証

遅延膨張性を示す ASR にはペシマム混合率は存在しないことが一般的な知見であるが、文献 2) によると、沖縄県の海砂と石灰岩砕砂にペシマム混合率を示す事例が記されている。そこで、本研究においては、海砂と石灰岩砕砂の混合砂を用いたコンクリート試験体を作製し、ペシマム混合率の検証を行った。

ペシマム混合率を検証する目的で、表-2 に示す海砂：石灰岩砕砂の混合比の異なる 11 の実験ケースに対して、カナダ法（NaOH 溶液浸漬法，1 N，80℃）とデンマーク法（飽和 NaCl 溶液浸漬法，50℃）による促進膨張試験を実施した。表-3 に促進膨張試験の概要⁴⁾を示す。試験に供したコンクリート試験体の配合は、W/C=35%一定とし、s/a=42.9%と定めている。コンクリートの配合を表-4 に示す。なお、使用したセメントは普通ポルトランドセメント（(株)琉球セメント製品）であり、セメントおよび混和材（ポリカルボン酸系 高性能 A E 減水剤）のアルカリ量がそれぞれ 0.6%、1.1%であることから、コンクリート試験体のアルカリ量は約 2.7kg/m³ となり、アルカリ総量規制値 3.0kg/m³ 以下である。

表-2 細骨材の混合比

実験ケース	混合比 (海砂：砕砂)
#1	100:0
#2	90:10
#3	80:20
#4	70:30
#5	60:40
#6	50:50
#7	40:60
#8	30:70
#9	20:80
#10	10:90
#11	0:100

表-3 促進膨張試験概要

試験名	試験方法	判定基準
カナダ法	コンクリートコアを温度 80±2℃，1N の NaOH 溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定する。（ASTM C 1260 と同様の条件）	試験開始後 14 日の膨張率で 0.1%以下：「無害」 0.10%～0.20%：「有害と無害な骨材」 ※この場合、試験を継続 0.2%以上：「潜在的に有害」
デンマーク法	コンクリートコアを温度 50℃の飽和 NaCl 溶液に浸漬し、膨張率の経時変化を測定する。	試験開始後 91 日の膨張で 0.4%以上：「膨張性あり」 0.1～0.4%：「不明確」 0.1%未満：「膨張性なし」

表-4 コンクリートの配合

実験ケース	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	砕砂 (kg/m ³)	海砂 (kg/m ³)	砕石 2005 (kg/m ³)	混和剤 (kg/m ³)
#1	156	446	0	749	1004	8.92
#2			76	674		8.25
#3			152	599		7.45
#4			227	524		6.82
#5			303	449		6.02
#6			379	374		5.35
#7			455	299		5.13
#8			531	224		4.68
#9			606	149		4.28
#10			682	74		4.01
#11			758	0		3.79

2.3 フライアッシュの ASR 抑制効果の検証

フライアッシュ（以下、FA と称す）に ASR の膨張抑制効果があることは、既往の研究から明らかである⁴⁾。しかし、燃焼灰の産地、発電所における石炭の粉末処理方法およびその燃焼過程の違いによって FA の品質が変動することから、その効果に関しても相違が生じている。そこで本研究では、沖縄県産の FA (JIS II 種灰) を用いて遅延膨張性の ASR に対する抑制効果の検討を行った。

前述の表-2 に示す実験ケースを対象に、カナダ法およびデンマーク法により促進膨張試験を実施した。試験に際しての FA コンクリートの配合は、FA セメント B 種を想定したセメント置換の内割配合とした。FA セメント B 種の混合割合は、強度等の品質管理による混合率の増減や計量誤差等を考慮し、目標値を 18±2% としている。ここでは、その変動を考慮して混合率の最も低い 16% とした。表-5 に使用した FA の主な品質を示す。

表-5 フライアッシュの品質 (JIS II 種灰)

項目		試験値
二酸化ケイ素(%)		57.5
湿分(%)		0.1
強熱減量(%)		2.4
密度(g/cm ³)		2.31
粉末度	45μm ふるい残分(%)	13
	比表面積(cm ² /g)	3930

3. 結果およびその考察

3.1 海砂の岩種構成および諸性質

(1) 粒度分布

海砂と石灰岩砕砂の粒度曲線を図-1 に示す。図中の破線は、土木学会で定めた標準的な細骨材の粒度範囲である。本試験で対象にしている海砂と砕砂は、一部でこの粒度曲線を満足していない。従って、両骨材をコンクリート用細骨材として使用するためには、粒度調整の必要性がでてくる。この粒度調整に伴い両骨材の混合割合が生じ、ペシマム混合率の懸念が生じている。

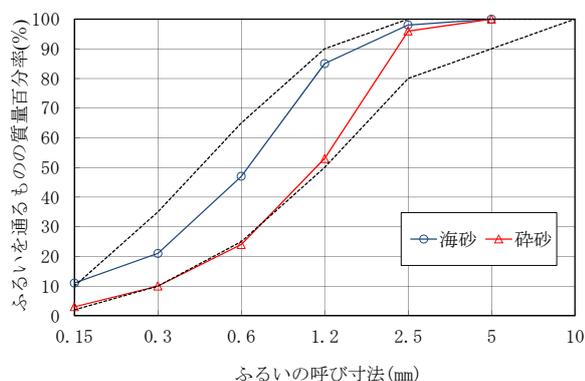


図-1 ふるい分け試験結果

(2) 構成岩種の判別および構成岩種の構成比

海砂は珪質粘板岩、珪岩、砂岩、弱変成砂岩、粘板岩、頁岩、泥岩、緑色片岩、結晶質石灰岩、炭酸塩生物遺骸より構成されている。表-6 に海砂の岩石学的分類を示し、また、図-2 に岩石種の構成比を示す。

表-6 および図-2 より、海砂の約 90% は変成岩と堆積岩系の岩種から構成されている。その変成岩系および堆積岩系の各岩種は、アルカリと反応しやすい状態の微晶質石英や隠微晶質石英などのシリカ鉱物で形成されている。海砂に含まれる変成岩系および堆積岩系の岩種は、RILEM AAR-I⁵⁾ に準じて地域性を考慮した場合、珪質粘板岩、砂岩、弱変成砂岩、粘板岩、頁岩、泥岩は、「Class III:非常に反応性が高い」に分類され、また、珪岩は日本での反応例の報告が表記されていないため、「Class II:潜在的反応もしくは反応性の可能性あり」に分類され、ASR を起こす可能性は高い。

本研究で作製したコンクリート試験体の粗骨材には本部産石灰岩砕石、細骨材には混合砂中に本部産石灰岩砕砂がある。それらの石灰岩骨材に対して酸処理を行って方解石を溶解し、溶け残った残渣の重量を測定して不純分含有率を求めた。その結果、本部産石灰岩の砕石および砕砂とも 1% 未満の不純物を含んでおり、偏光顕微鏡および SEM・EDX による観察では、炭質物や雲母類と共に微晶質なシリカ鉱物（石英やオパールなど）が認められた。しかし、これらの不純物はごく微量であるため、ASR に与える影響はないものと考えられる。分析結果を表-7 に示す。

表-6 海砂の岩石学的分類

	変成岩	堆積岩	その他
シリカ鉱物を多く含む	珪質粘板岩, 珪岩, 弱変成砂岩, 粘板岩	砂岩, 頁岩, 泥岩	
シリカ鉱物をほとんど含まない	結晶質石灰岩, 緑色片岩		炭酸塩生物遺骸

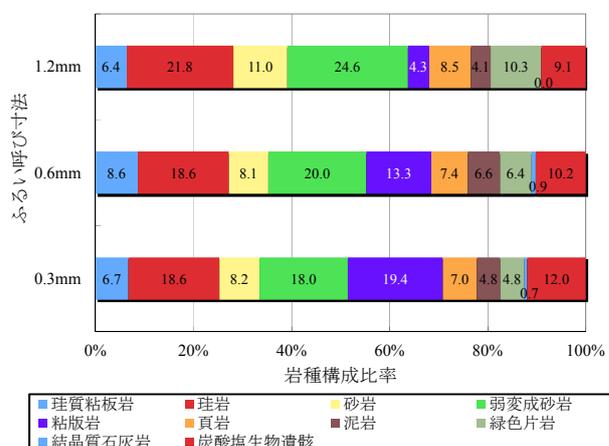


図-2 海砂の岩種構成比

表-7 本部産石灰岩の不純物含有率

	不純物含有率(%)
砕石 (黒色系)	0.24
砕石 (白色系)	0.16
砕砂	0.18

(3) 骨材の各種試験法

骨材試験として、表-8 に示す各種試験を JIS に基づき行った。骨材に対する ASR 試験としては、化学法 (JIS A 1145) およびモルタルバー法 (JIS A 1146) を行った。化学法の結果から、溶解シリカ量 Rc:106(mmol/L)、アルカリ減少量 Sc:36(mmol/L)となり、安全な骨材と判定される。また、モルタルバー法による膨張率は、判定基準 91 日で 0.017%であり、この値から安全な骨材と判定される。これらの結果は、上記のアルカリ骨材反応試験では遅延膨張性に起因する ASR の危険性を検出できないことを示している。

表-8 各種骨材試験

試験項目(JIS)		海砂	砕砂	砕石2005
表乾密度	g/cm ³	2.63	2.66	2.69
吸水率	%	2.06	1.06	0.52
絶乾密度	g/cm ³	2.58	2.63	2.68
ふるい分け (F.M)	-	2.38	3.14	6.65
実積率	%	—	—	61.3
微粒分量	%	4.0	8.4	0.5
安定性	%	1.0	0.9	0.1
粘土塊量	%	0.29	—	—
粒径判定実積率	%	—	56.7	59.9
すり減り減量	%	—	—	22.8
有機不純物		淡い	—	—
塩化物量(NaCl)	%	0.001	—	—
密度1.95に浮くもの	%	0	—	—
化学法	—	無害	—	—
モルタルバー法	%	0.017	—	0.006

3.2 海砂と本部産石灰岩砕砂とのペシマム混合率の検証

ペシマム混合率を検証するため、前述の表-2 に示す海砂：石灰岩砕砂の混合比の異なる 11 の実験ケースに対して、カナダ法とデンマーク法による促進膨張試験を実施した。

サイズ 530×159×159mm のコンクリート試験体を 11 ケースについて作製し、その試験体から直径 55mm、高さ 150mm のコンクリートコアを各ケース 2 本ずつ採取した。ゲージプラグをはんだ付けしたステンレス製ホースバンドをコア試験体に取り付け、基長が 100mm となるように調整を行った。測定はストレインゲージ「MSG-D1」(丸東製作所株式会社製)を用いて行った。

図-3 に 29 日目におけるカナダ法の膨張量を、図-4 に 189 日目におけるデンマーク法の膨張量をそれぞれ示す。図中の No.1, No.2 は、試験体 2 本の値を示している。

対象骨材が遅延膨張性であることから、両試験とも判定基準日において、数ケースの膨張性が不明確な領域に存在していた。そのため、各試験ケースで膨張率の差が判断できる期間まで試験を延長して実施した。

図-3 に示すカナダ法の試験結果では、#1 (海砂 100%) ~ #9 (海砂 20%) では膨張率にばらつきがあり、明らかなペシマムの存在を断定できない。しかし、#10 (海砂 10%)、#11 (海砂 0%) に比較すると明らかに大きな膨張率を示している。また、図-4 のデンマーク法の試験結果は、2 本の試験体の膨張挙動が #1 ~ #6 の配合で大きく差が生じている。これは試験体中の海砂：砕砂の混合割合が均等でないためと考えられ、今後追加実験を行う予定である。図中で明らかな膨張率を示している No.1 の結果を考慮すると #3 ~ #5 付近にペシマム混合率の可能性が高い。

カナダ法とデンマーク法では膨張挙動や ASR ゲルの化学組成の相違が報告⁶⁾されている。そこで本研究においても、両試験後の膨張挙動と ASR ゲルの化学組成の確認を行った。写真-1 にカナダ法 (No.1, #7, 66 日目) とデンマーク法 (No.2, #2, 189 日目) の試験後の試験体の外周表面の写真を示す。実線は目視可能なひび割れである。写真-1 で示されているように、カナダ法の試験体に比較してデンマーク法の試験体の膨張率は小さいにも関わらず、試験体表面に目視可能なひび割れが多数生じている。他の試験ケースの試験体についても同様の現象が確認されている。

次に試験後の試験体から厚さ約 0.03mm の薄片試料を作製し、SEM-DEX により ASR ゲルの点分析を行った。分析条件は、加速電圧：15kV、照射電流：0.5nA、ビーム径：<2μm、測定時間：100 秒、D.T.：25~30%、スタンダード：あり、補正：ZAF とした。

図-5(a), (b) にカナダ法 (No.1, #7) およびデンマーク法 (No.1, #5) の試験により生じた ASR ゲルの化学組成を示す。ASR ゲルは、泥岩、珪質粘板岩、砂岩、千枚岩、弱変成砂岩などから生じ、また、空隙、割れたペーストや石灰岩を充填する ASR ゲルも確認された。

カナダ法およびデンマーク法で生じた ASR ゲルの化学組成は、生じた位置によりわずかに異なっている。本研究では、サンプル数が少なく、文献 6) で報告されているように、デンマーク法は ASTM C 1260 と比較してカルシウム分(CaO)が少なく、アルカリ分(Na₂O+K₂O)が多いゲルを生成しているという現象は確認できなかった。この件については、他の試験体や分析点を増やしてさらに検証を行う予定である。

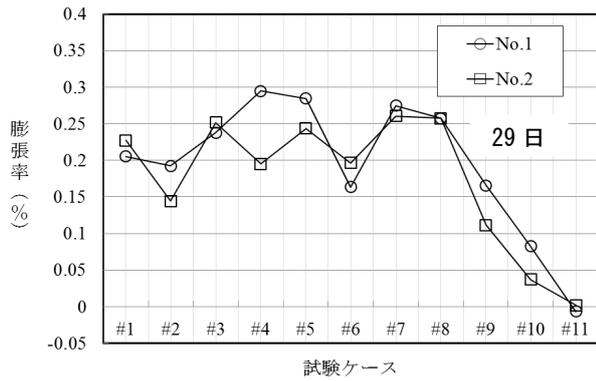
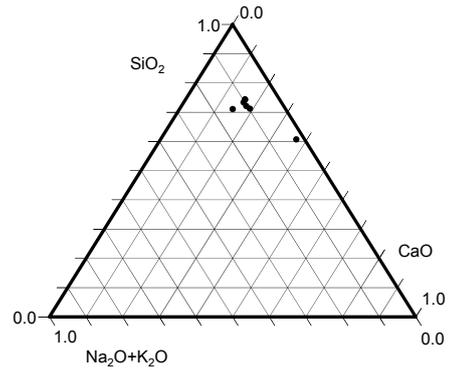


図-3 試験ケースと膨張率の関係（カナダ法）



(a) カナダ法 (No. 1, #7)

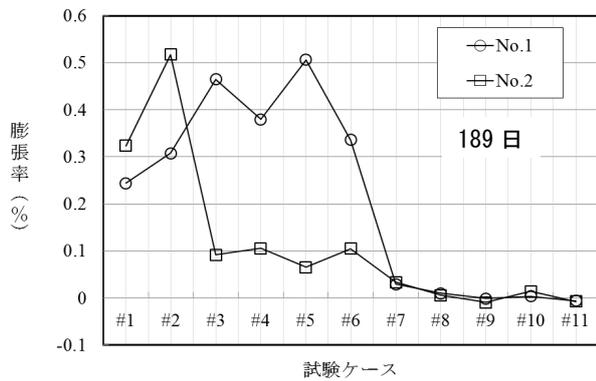
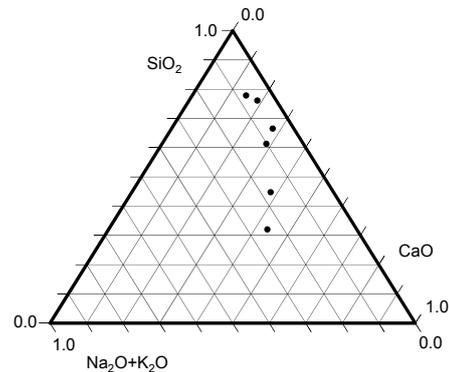
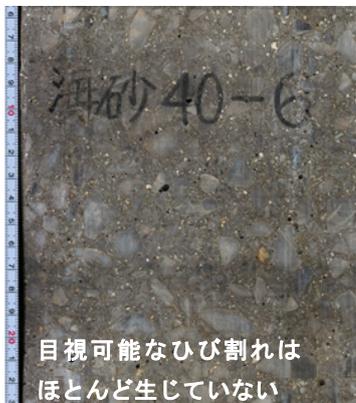


図-4 試験ケースと膨張試験の関係（デンマーク法）



(b) デンマーク法 (No. 1, #5)

図-5 ASR ゲルの化学組成



(a) カナダ法 (#7, 膨張率 0.56%, 66 日目)



(b) デンマーク法 (#2, 膨張率 0.51%, 189 日目)

写真-1 両試験体のひび割れ性状

3.3 フライアッシュの ASR 抑制効果の検証

前述の 3.2 で行ったベシマム混合率の検証結果を参考に、実験ケース #5 とその対称混合である実験ケース #7、および海砂のみの実験ケース #1 について、FA の ASR 抑制効果を検証した。その配合を表-9 に示す。

図-6 および図-7 に、各々、カナダ法およびデンマーク法による促進膨張試験の結果を示す。図中の FA は FA コンクリートを示し、また、FA 無混和の場合の試験体の膨張挙動も示している。なお、試験体サイズは、前述の 3.2 で示した促進膨張試験と同様である。図示した値は、FA 無混和が 2 本、混和が 3 本の平均値である。

図-6 に示すカナダ法の試験結果より、判定基準である 14 日では僅かな膨張率が確認できるが、FA 混和の有無および海砂と砕砂の混合比に関わらず「無害」と判定される。しかし、14 日を超えて試験を継続すると、FA 無混和の試験体は膨張を続けているのに対し、FA 混和の膨張率は、FA 無混和に比べて膨張が抑えられている。

一方、図-7 に示すデンマーク法の試験結果より、判定基準である 91 日の膨張率は、実験ケース #1 および #5 で「不明確」と判断され、それ以外では「膨張性なし」と判断される。しかし、91 日を超えて試験を継続すると、FA 無混和の試験体は膨張を続けるのに対し、FA 混和の試験体には膨張は確認されない。

以上の結果より、いずれの試験においても判断基準内では有害な膨張は確認できない。しかし、判断基準を超えて試験を継続した結果、FA 無混和の試験体では膨張が確認され、FA 混和では膨張が抑制された。従って、FA 混和による ASR の膨張抑制効果を確認できた。

表-9 配合 (FA:フライアッシュ)

ケース	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	砕砂 (kg/m ³)	海砂 (kg/m ³)	砕石2005 (kg/m ³)
#1				0	734	1002
#5	156	375	71	297	440	
#7				455	294	

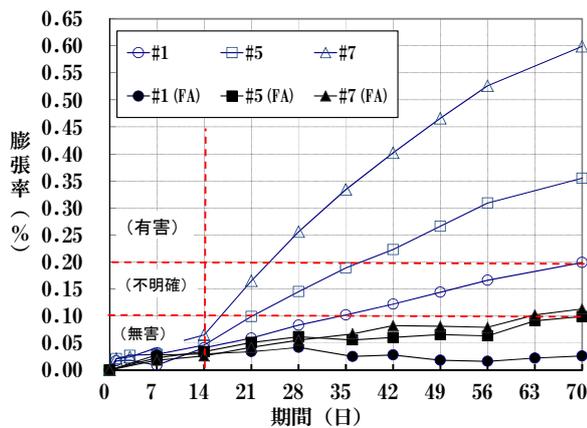


図-6 カナダ法による促進試験結果

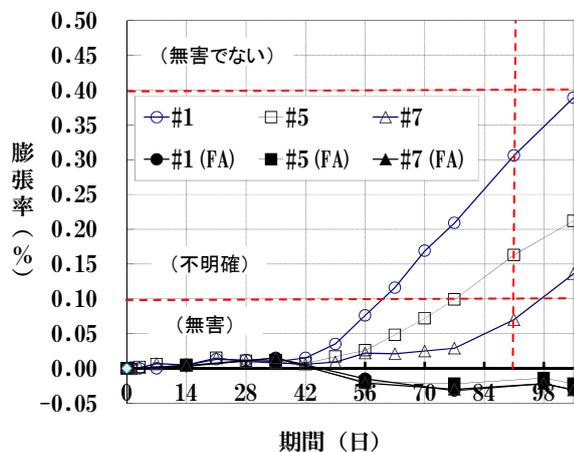


図-7 デンマーク法による促進試験結果

4. まとめ

本研究では、遅延膨張性 ASR を生じる海砂の基礎研究およびその ASR に対する FA の抑制効果の検証を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 岩種判定の結果、海砂には、遅延膨張性の ASR を起こす可能性がある微晶質石英や隠微晶質石英等の有害鉱物が含まれていた。
- (2) ASR に対する JIS の ASR 試験法 (化学法およびモルタルバー法) では、海砂の遅延膨張性 ASR の危険性

が検出できない可能性があることを確認した。

- (3) カナダ法によるペシマム混合率の検証より、実験ケース #1~#8 間にペシマム混合率が存在する可能性、また、デンマーク法によるペシマム混合率の検証より、No.1 の試験結果を採用する事により、カナダ法とほぼ同様に実験ケース #1~#6 の間にペシマム混合率が存在する可能性があることを確認した。
- (4) カナダ法とデンマーク法の膨張挙動の違いが、表面ひび割れの相違として表われた。しかし、ASR ゲルの化学組成には明確な違いを確認できなかった。
- (5) 遅延膨張性の ASR に対して、FA で単位セメント量の 16% を置換 (内割配合) することにより、十分な ASR 抑制効果があることを確認した。

謝辞：本研究は、琉球大学工学部と内閣府沖縄総合事務局との技術協定のプロジェクトのもと行われ、一部は平成 22 年度九州建設技術管理協会研究助成を受けたものである。伊良波繁雄，山田義智琉球大学両教授に有益な助言を頂いた。また、琉球セメント (株)，沖縄県生コンクリート工業組合，学部 4 年次の崎原盛伍君に実験の協力を頂いた。岩石学的試験では理学部研究助手の知念正昭氏の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・III コンクリート橋編)・同解説，2002.3
- 2) Katayama, T., et al: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan. Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008
- 3) 富山潤，知念正昭，大宜見圭太，山田義智：長期暴露したフライアッシュコンクリート試験体を用いた遅延膨張型アルカリ骨材反応に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No.1, pp.947-952, 2010
- 4) 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会：報告書，(社)日本コンクリート工学協会，2008.9
- 5) RILEM Technical Committees：RILEM recommended test method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates—Petrographic method, Materials and Structures, Vol.36, pp.480-496, 2003
- 6) 鳥居和之，友竹博一：アルカリシリカ反応によるモルタル膨張挙動に及ぼすセメントと反応性骨材の組合せの影響，土木学会論文，No.739, V-60, pp.251-263, 2003.8