

論文 アルカリ骨材反応試験体の各地暴露試験

小川 彰一*1・山田 一夫*2・佐川 康貴*3・俵積田 新也*4

要旨: 各種アルカリシリカ反応性骨材を用いた比較的大型のコンクリート試験体 (40×40×60 cm) を作製し、北海道、九州、沖縄での暴露試験を開始した。用いた骨材は、急速膨張性を示すと考えられる安山岩と、遅延膨張性を示すと考えられる堆積岩であり、一部試験体にはフライアッシュ (FA) を用いた。暴露開始から約 1.5 年で一部水準に膨張が認められた。膨張は、急速膨張性細骨材で大きくなること、温暖地でより大きくなること、試験体の上面と南西面で大きくなること、また、同時に暴露を開始した φ10 cm の小型円柱試験体では膨張が小さくなること、が明瞭に認められた。

キーワード: アルカリ骨材反応, ASR, 暴露試験, アルカリ溶脱, 環境影響, 寸法依存性

1. はじめに

アルカリ骨材反応 (ASR) は反応性骨材とアルカリ (Na, K) とが反応し、アルカリシリカゲルが生成してコンクリートに膨張を生じる現象である。ASR は、骨材の反応性だけでなく、コンクリート配合の違いによるペシマムの問題、アルカリ量や構造物条件のほか、水分供給、温度、日射などの環境条件の影響を受ける。そして、ASR 劣化のリスク回避や維持管理において、ASR 構造物の膨張挙動とその将来予測は重要であり、実環境における膨張挙動に及ぼす要因を明らかとし、また、化学法、モルタルバー法あるいはコンクリートを用いた試験など短期で評価できる室内試験との関係性を把握して、実環境においても有効な対策を講じる必要がある。

ASR の実環境における膨張挙動を把握するために、暴露試験が実施されている。各地で暴露するなどの環境要因を検討した事例は少ないが、欧州では ASR 試験法を確立するため、大規模な“PARTNER”プロジェクトが 2002 年から行われ、欧州各地で同一配合の試験体を設置して膨張を測定し、室内における ASR 試験法の適正性が検討されている¹⁾。しかしながら、実環境と室内との相関性に課題があり、RILEM Technical Committee 258-AAA (2014-2019 年) に引き継がれて検討が継続されている²⁾。この相関性の課題は、室内試験では骨材試験を原則としているためペシマムなどの評価ができず、また、コンクリートプリズム試験 (以下、CPT) では試験期間中にアルカリ溶脱が生じることが一因である。

一方、屋外暴露試験は小型の試験体では評価が難しい

ことが指摘されている。これは、暴露試験でも小型の試験体ではアルカリ溶脱が生じる可能性が指摘され、Thomas³⁾らは一辺が 90 cm の試験体で 8~9 年間屋外暴露し、同じセメントアルカリ量のモルタルバーおよび CPT よりも暴露試験体は大きく膨張することを示している。また、“PARTNER”プロジェクト⁴⁾でも比較的大きい 30 cm 角のコンクリートを用いている。

加えて、ASR 膨張は気象条件に大きく影響され、気温だけでなく湿度や降雨量が膨張に寄与することが指摘されている⁴⁾。多湿となる国内でも暴露試験は多くの研究者により実施されているが、10×10×40 cm など、比較的小型な試験体を用いた例が多く、また、環境要因を把握するために ASR 試験体を各地に暴露した例は少ない。

本研究では、ASR 膨張に及ぼす環境要因の影響を把握することを目的とし、ペシマムを考慮した配合で寸法が 40×40×60 cm と比較的大きな ASR 試験体を作製して、北海道、九州、沖縄の 3 箇所での暴露試験を開始した。暴露期間 1.5 年までの知見を示す。

2. 試験体および暴露方法

2.1 使用材料

セメント (OPC) は普通ポルトランドセメント (太平洋セメント製) を、フライアッシュ (FA) は JIS II 種適合品 (東北発電工業製) を用いた。蛍光 X 線回折によって得られた化学組成を表-1 に示す。なお XRD/リートベルトの結果、FA 中のガラス相は 76.4 mass% であり、ガラス相中の SiO₂、Al₂O₃ および CaO の含有率はそれぞれ

表-1 セメントおよびフライアッシュの化学組成

	密度 (g/cm ³)	化学組成 (mass%)									
		Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Total
OPC	3.16	2.32	20.53	5.13	3.02	64.24	0.91	2.12	0.34	0.33	98.9
FA	2.30	1.55	61.68	24.43	3.96	2.70	1.26	0.34	0.87	1.19	98.0

*1 株式会社太平洋コンサルタント 営業推進部 博士 (工学) (正会員)

*2 国立環境研究所 汚染廃棄物管理研究室 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻

表-2 用いた骨材の物性および ASR 反応性

骨材記号	産地	粗/細	物性値				ASR 関連試験						
			表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	微粉量 (%)	粗粒率	JIS 化学法 (mmol/l)			JIS モルタルバ一法(%/26週)		ASTM C 1260 (%/16日)	
							Sc	Rc	判定	膨張率	判定	膨張率	判定
N2	東北	粗骨材	2.53	2.02	—	6.61	710	168	無害でない	0.228	無害でない	—	—
OT	北海道	粗骨材	2.69	1.54	—	6.54	592	112	無害でない	0.583	無害でない	0.469	潜在的有害
		細骨材	2.66	1.96	7.2	3.02							
EH	四国	粗骨材	2.69	0.69	—	6.50	35	49	無害	0.057	無害	0.315	潜在的有害
LS	九州	粗骨材	2.68	0.46	—	6.50	—	—	—	—	—	—	—
		細骨材	2.67	0.35	12.2	3.11	—	—	—	—	—	—	—

— : 未実施

66.0, 18.3 および 4.2 mass% であった。

ASR 反応性骨材としてオパールを含有する東北産安山岩 (以下, N2), トリディマイトを多量に含む北海道産安山岩 (以下, OT), および微晶質~隠微晶質石英を含む四国産ホルンフェルス (以下, EH) を, また, 非反応性骨材として九州産高純度石灰石 (以下, LS) を用いた。いずれの粗骨材も水洗によって微粉分を除去した後, 10~20mm および 5~10mm にふるい分けし, 質量比で 6:4 となるように混合して粒度がほぼ一定となるようにして用いた。また, 骨材 OT は粗骨材を破碎, および, ふるい分けによって調整して細骨材としたもの, また, 非反応性骨材 LS は同一産地の石灰砕石および石灰砕砂を用いた。用いた骨材の物性およびアルカリシリカ反応性 (以下, 反応性) を表-2 に示す。

2.2 コンクリート試験体および配合

(1) 水準

コンクリートは7つの水準とし, 暴露地との関係を表-3 に示す。ASR 反応性骨材は粗骨材または細骨材として用い, 非反応性骨材は石灰石砕石および石灰石砕砂を用いた。ペシマムを考慮して粗 (細) 骨材中に対する含有率を変えた。骨材 N2 は, 反応性が高く, ロットは異なるが同一産地の骨材が含有率 5% でも長期的に膨張を継続している⁵⁾ことから含有率を 10% とした。骨材 OT は同一山地の骨材のペシマムが 30% 程度にあると考えられる⁶⁾ことから含有率を 30% に設定した。また, 骨材 EH は遅延膨張性であり, ペシマムは 50% 以上⁷⁾と考えられることから粗骨材 100% として用いた。なお, 骨材 OT については, 粗骨材だけでなく細骨材とした場合の水準,

骨材 N2 については反応性が高く FA の抑制効果を確認するためセメントに対して FA を 15 mass% 置換した水準も実施した。

(2) 試験体サイズおよび数

暴露試験体は, コンクリートブロック (40×40×60 cm), およびφ10 cm の円柱とした。試験体サイズについて, CPT では促進養生中にアルカリ (Na, K) が溶脱することが知られ⁸⁾, 過去に実施された暴露試験では 10×10×40 cm などの小型の試験体がいられることが多く, 暴露試験においてもアルカリが溶脱する懸念がある。本研究では, 暴露試験における寸法効果を検討するため, 円柱形状の小型試験体についても暴露した。なお, コンクリートブロックは 1 水準あたり各 1 体とし, 円柱試験体は 1 水準あたり 15 体とした。円柱試験体の長さは, 膨張率測定用に用いた試験体のみφ10×35 cm で 3 体/水準とし, その他の物性および分析用にはφ10×20 cm とした。

(3) 配合

コンクリート配合は, 水セメント比 W/C = 50%, 単位水量 160 kg/m³, 細骨材率 s/a = 45% とし, 表-3 に示す所定のアルカリ総量, FA 置換率となるように練り混ぜた。アルカリ総量は, ファクターが既知である市販の 5N NaOH 溶液を用い, OPC および FA のアルカリ量との合計が所定のアルカリ量 (5.5 または 3.0 kg/m³, Na₂O_{eq}) となるよう練混ぜ水に添加した。練混ぜには 1000パン型ミキサーを用い, 直後のコンクリートは, いずれの水準も, スランプ 10.5~17.0 cm, 空気量 3.5~5.5% の範囲であった。なお, スランプおよび空気量はポゾリス No.70(Cx 1.4~1.6%) および 303A(Cx 0.001~0.005%) で調整している。

表-3 試験水準および暴露地

水準名	反応性骨材粗 or 細*1	反応性骨材混合率*2	アルカリ総量	FA*3	RFID*4	暴露地
N2-G10-3.0	N2 (粗)	10 %	3.0 kg/m ³	—	○	九州・沖縄・北海道
N2-G10FA15-3.0			3.0 kg/m ³	15 %	—	九州・沖縄・北海道
OT-G30-5.5	OT (粗)	30 %	5.5 kg/m ³	—	—	九州
OT-G30-3.0			3.0 kg/m ³	—	—	九州
OT-S30-3.0	OT (細)	30 %	3.0 kg/m ³	—	—	九州
EH-G100-5.5	EH (粗)	100 %	5.5 kg/m ³	—	—	九州・沖縄・北海道
EH-G100-3.0			3.0 kg/m ³	—	—	九州

*1: カッコ内は反応性骨材を粗骨材または細骨材のいずれに用いたかを表す。 *2: 非反応性粗骨材 (or 細骨材) に対する反応性粗骨材 (or 細骨材) の質量率 (反応性骨材を粗骨材 (or 細骨材) とした場合は, 細骨材 (or 粗骨材) は 100% 非反応性骨材を使用)。 *3: FA は OPC に対する置換率 mass%。 *4: RFID ひずみセンサを 40x40x60cm 試験体に設置した水準。

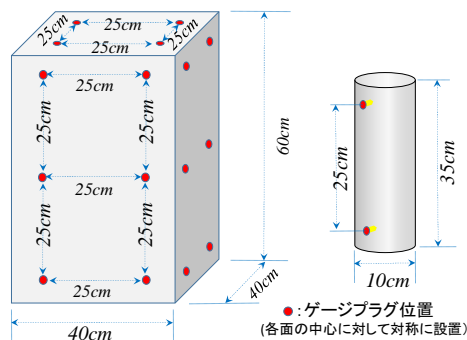
2.3 膨張率測定

コンクリートブロックおよび膨張率測定用の円柱試験体には、JIS A 1129-2 に規定される埋め込み用ゲージプラグを図-1 に示すように 25 cm 間隔でコンクリートに埋設し、コンタクトゲージを用いて材齢ごとに長さを測定して膨張率に換算した。なお、本稿ではコンクリートの熱膨張係数を考慮していないため、示した膨張率はコンクリート温度の影響を受けることを付記する。

試験体の一部には RFID ひずみ計測システム⁹⁾を用い、コンクリートブロック試験体中心部に鉛直方向に設置した。用いたセンサは「コンクリートひずみタイプ SSC-3725 (センサ長 250 mm)」であり、コンクリート中心部の膨張率とコンクリート温度を把握することを目的とした。なお、このシステムは非接触で測定可能なため長期暴露における配線劣化の懸念が無く、ASR 膨張を生じるコンクリートの膨張率測定で実績がある¹⁰⁾。

2.4 試験体の暴露

2016 年 2 月中旬に打込みしたコンクリートは 2 週間後に脱枠し、乾燥しないようにビニール等で覆い暴露地に輸送して 3 月中旬～4 月中旬から暴露を開始した。北



(A) ブロック試験体 (B) 円柱試験体
図-1 膨張率測定用ゲージプラグの設置位置



図-2 各地での試験体暴露状況
(左上：沖縄，左下：北海道，右：九州)

海道は紋別町，九州は九州大学伊都キャンパス（福岡市西区），沖縄は琉球大学（中頭郡西原町）である。各暴露地近郊のアメダスによる 2007 年から 10 年間の平均気温は，北海道 6.4℃（紋別小向），九州 16.7℃（前原），沖縄 23.4℃（那覇）である。ブロック試験体はコンクリート打込み面を上面とし，各側面は東西南北を向くように設置し，また，円柱試験体は縦置きとした。北海道は地面に直接，その他はコンクリートスラブ上に設置した。暴露状況を図-2 に示す。

3. 結果と考察

3.1 表面膨張率

(1) 配合条件の影響

図-3 (A) に，水準数を多く実施した九州のブロック試験体の膨張率を示す。膨張率は各ゲージプラグ間の膨張率の全平均で，材齢は 2 月下旬からの日数である。全体的には夏場（6 月～9 月頃(図中の材齢約 100～200 日および 450～550 日)）に膨張した傾向を示している。

各水準について，まず骨材 OT では，この骨材を用いた試験体の膨張率はいずれも高く，細骨材として用いた配合（OT-S30-3.0）はアルカリ総量が 3.0kg/m^3 にもかかわらず材齢約 600 日（約 1.5 年）で膨張率 0.4% に達し，さらに膨張は継続する傾向を示した。反応性の高い骨材を用いた場合，アルカリ総量規制を満足しても実環境で膨張する可能性があることが分かる。対して，骨材 OT でも粗骨材として用いた水準では，アルカリ総量が 3.0kg/m^3 の試験体（OT-G30-3.0）の膨張率 0.12% 程度と低く，アルカリ総量を 5.5kg/m^3 とした試験体でも膨張率 0.3% 程度と低かった。

ASR 膨張における骨材粒子径の影響について，魚本ら¹¹⁾，Multon ら¹²⁾は，骨材の粒子径，ASR 反応性鉱物，アルカリ濃度に着目して解析的に膨張を予測するモデルを提案した。いずれも 5mm 程度の細骨材を用いたモルタルでの検討範囲であるが，粒子径が 0.3～1.25mm 程度で最大の膨張を示し，それ以上の粒子径での膨張は小さくなる。また，CPT を用いた ASR 反応性の高い骨材を用いた検討では，アルカリ総量が 5.5kg/m^3 であるが，粗骨材と比較して細骨材として用いた場合におおよそ 2 倍の膨張率を示す結果が示されている¹³⁾。本研究では粗骨材と細骨材との比較であるが，実環境においても反応性骨材を細骨材として用いた方が大きく膨張する可能性がある。

骨材 N2 を用いた水準 N2-G10-3.0 では，約 1.5 年経過における膨張率は約 0.1% 程

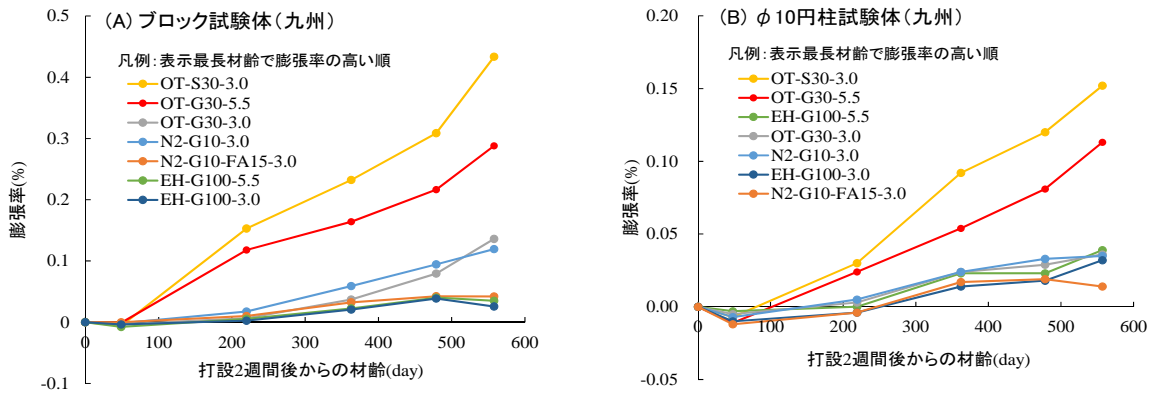


図-3 九州に暴露した試験体の表面膨張率

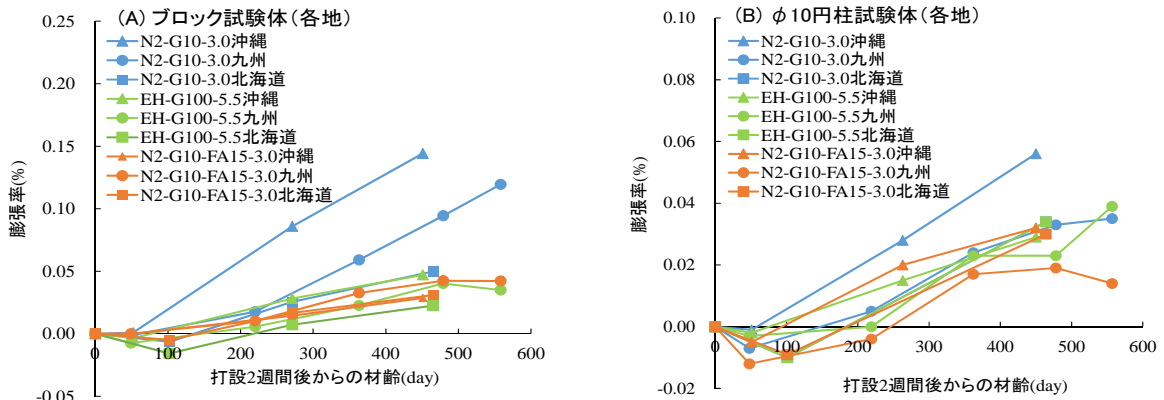


図-4 暴露環境の差異による膨張率への影響

度であった。粗骨材として用いたこと、骨材含有率が10%と低いことによるが、用いた骨材N2と同じ産地の骨材、同じ寸法形状、同じ暴露試験場（九州大学）で実施している検討⁷⁾では、粗骨材として含有率5%、本研究よりアルカリ総量が低い 2.6kg/m^3 としたコンクリートで、材齢約1.5年から膨張を開始し材齢約5年時点においても膨張が一定して継続しており、本研究の試験体においても、今後、膨張を生じると考えられる。

一方、骨材EHについて、この骨材は遅延膨張性を示すと考えられ、材齢約1.5年では僅かに膨張傾向にあるのみであった。この水準の試験体についても、今後、膨張を継続して測定し評価する予定である。

(2) 試験体サイズの影響

図-3 (B) に、円柱試験体の膨張率をブロック試験体との比較 (図-3 (A)) で示す。なお、両図の縦軸 (膨張率 (%)) のスケールは異なる。

円柱試験体の膨張挙動は、ブロック試験体の膨張挙動とほぼ同様であるが、円柱試験体の膨張率はブロック試験体に対し約4割程度となった。暴露試験におけるASR膨張に及ぼす寸法効果のうち、小型試験体ではアルカリ溶脱と乾燥のしやすさが考えられる。これらがどの程度ASRの反応や膨張率に影響するか、今後の試験体の分析を実施し、さらなる検討を要する。

(3) 暴露地の差異

図-4 (A) に各地に暴露したブロック試験体の膨張率を示す。配合は何れも3種類である。未だ膨張率は低いが、N2-G10-3.0は膨張する傾向を示し、膨張率は、沖縄>九州>北海道の順で大きく、温度の影響が大きいと考えられる。

ASR膨張の温度依存性については、モルタルバーにおいて $20\sim 70^\circ\text{C}$ の試験温度で低温ほど膨張開始は遅れるが最終的な膨張率が大きくなる現象が知られている¹⁴⁾。しかしながら、“PARTNER”プロジェクトで実施された欧州各地の暴露試験¹⁾では、年間平均気温 5.9°C のトロンハイムと 17.8°C のバレンシアで (本研究における北海道と九州のそれぞれの年間平均気温に近い)、材齢約6年において遅延膨張性などの一部の骨材でバレンシアでの膨張率は高いが、各地で膨張率に大きな差異はない。ASR膨張は温度だけでなく降雨量も関与する可能性が指摘されており⁴⁾、温度だけでなく、骨材の反応性や降雨、湿度などの関与が考えられる¹⁵⁾。

一方、円柱試験体の膨張率についても図-4 (B) に示した。未だ膨張は僅かに生じた程度であるが、各水準の膨張傾向はブロック試験体と同様で、膨張率はブロック試験体と比較して膨張率は約4割程度となった。

3.2 膨張の異方性

各ブロック試験体の設置は、各側面が東西南北となる

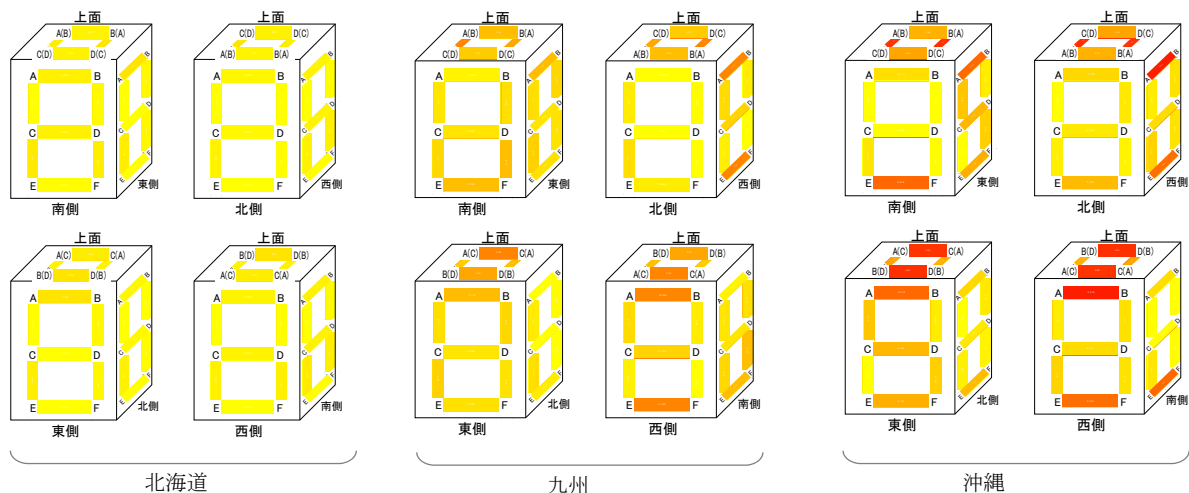


図-5 N2-G10-3.0におけるブロック試験体各位置の膨張

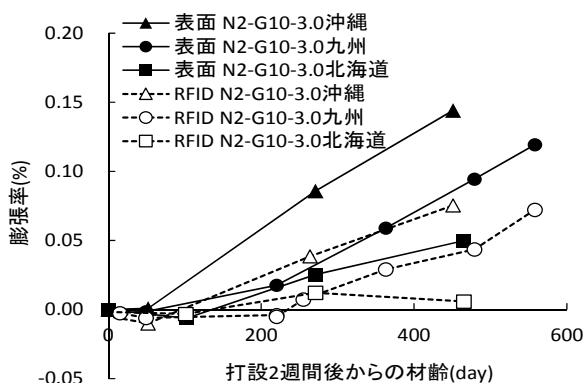
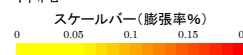


図-6 ブロック試験体における表面膨張率と内部膨張率 (RFID) との比較

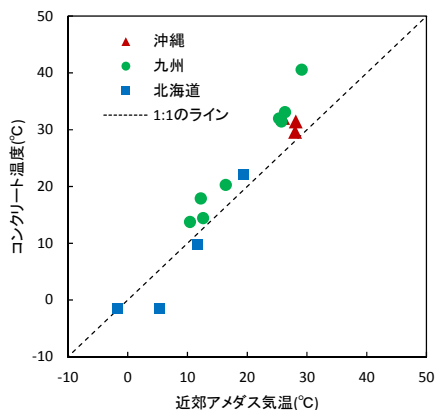


図-7 ブロック試験体におけるコンクリート温度 (RFID) と気温 (近郊のアメダス) との関係

ようにしている。ASR 膨張には日射の影響も考えられるため、各ゲージプラグ間の膨張率を、色の濃淡で表して図-5に示す。未だ膨張率が低い北海道を除き、膨張率は上面で大きく、次いで南西面で大きい傾向を示した。これは、日射によるコンクリート温度の上昇が要因と考えられる。また、上面、上面に近い側面、および地面と接している試験体下面に近い側面で、膨張率が大きい傾向にあり、中央部がくびれた形状 (以下、ポビン型と称

す) を呈しているようであった。この理由は不明であるが、ひび割れや組織の緩みが生じると、ひび割れ部から水が供給され、コンクリート表面付近から膨張を生じた可能性が考えられる。

3.3 内部膨張率

図-6にRFIDひずみ計測システムで測定したコンクリート中心部 (内部) を、ゲージプラグ間長さ測定での表面の膨張率との比較で示す。内部膨張率は表面膨張率のおおよそ半分程度となり、これはコンクリート内部の膨張は表面付近より遅れるためと考えられ、ブロック試験体がポビン型に膨張するとの推測と合致した。

3.4 コンクリート温度

図-7にRFIDひずみ計測システムで測定されたコンクリート温度と、測定日時に近い暴露地近郊のアメダスのデータとの関係をプロットした。コンクリート温度はアメダスの気温よりも高い傾向を示し、これは、表面膨張率の測定は晴天または曇りの日中に行っているため、日射の影響でコンクリート温度が気温を上回ったものと考えられる。

3.5 圧縮強度および静弾性係数

コンクリート打込み後から封かん養生材齢 28 日と、材齢約 1 年における円柱試験体の圧縮強度と静弾性係数との関係を図-8に示す。圧縮強度は約 1 年間の暴露で増大した。圧縮強度と静弾性係数との関係は、JASS 5 (2015 年版) に記載される計算式 ($k_1 = 1.2$ (石灰石), $k_2 = 1$, 単位容積質量 $2.33t/m^3$) と近い値を示した。OT-G30-5.5 九州 (図中 A) および OT-S30-3.0 九州 (図中 B) は材齢約 1 年で膨張を生じており (それぞれ膨張率 0.16% および 0.23%), 圧縮強度に対する静弾性係数は低下した。なお、N2-G10FA15-3.0 (図中 C) も静弾性係数は低下する傾向を示したが材齢 1 年で膨張傾向にあるが膨張率は 0.02% と低く、これは静弾性試験を試験体 n 数を何れも 1 本としたことによるばらつきも一因と考えられる。

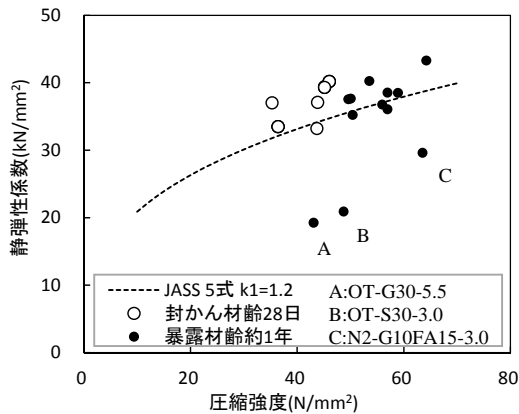


図-8 圧縮強度と静弾性係数との関係

4. まとめ

ASR 反応性骨材を用い、ペシマムやアルカリ溶脱を考慮して $40 \times 40 \times 60$ cm のブロック試験体を作製し、北海道、九州、沖縄において暴露試験を開始した。材齢は約 1.5 年の段階であるが一部の水準は膨張した。反応性骨材を粗骨材として用いた場合よりも細骨材として用いた場合に膨張は大きくなり、アルカリ総量 3.0 kg/m^3 でも膨張率 0.4% に達した。膨張率は沖縄 > 九州 > 北海道の順で大きく、膨張は上面と南西面で大きくなる傾向を示し、また、コンクリート内部よりも表面付近の膨張が卓越して膨張していると考えられた。同時に暴露した $\phi 10$ cm の円柱試験体の膨張率はブロック試験体の膨張率と比較して約 4 割程度となり、暴露試験における ASR 膨張の寸法効果の一因としてアルカリ溶脱も考えられる。

今後、暴露試験を継続し、膨張変化と各種分析を行う予定である。

<謝辞>

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご助言、ご協力を、以下の方々はじめ、多くの方々に賜りました。ここに感謝の意を表します。琉球大学 山田義智教授、同富山潤准教授、北見工業大学 井上真澄准教授、九州大学大学院 濱田秀則教授、山本大介技術職員、建設材料システム工学研究室の多くの学生各位、港湾空港技術研究所 川端雄一郎主任研究官、太平洋セメント(株) 江里口玲氏、佐藤達三氏。

参考文献

- 1) Lindgård, J. et al.: The EU "PARTNER" Project - European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations, Cement and Concrete Research, Vol.40, No.5, pp.611-635, 2010
- 2) Sims, I. and Poole, A.B.: Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review, CRC Press, July 2017

- 3) Thomas, M. et al. : Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete, Cement and Concrete Research, Vol.36, pp.1842-1856, 2006
- 4) Kawabata, Y. et al. : Correlation between laboratory expansion and field expansion of concrete : prediction based on modified concrete expansion test, 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Abstracts 34, 2016
- 5) 小田聡 ほか : 促進コンクリートプリズム試験および屋外暴露試験による ASR 膨張挙動の違いに関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.16, pp.61-66, 2016
- 6) 井上祐一郎 ほか : ペシマム現象を生じる安山岩骨材を用いたモルタルのフライアッシュによる ASR 抑制効果, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.759-760, 2009.3
- 7) 鳥居和之 監修, 山田一夫 編集 : コンクリート診断 ASR の的確な診断/抑制対策/岩石学的評価, p.233, 森北出版, 2017
- 8) 山田一夫, 川端雄一郎, 小川彰一, 丸山一平 : 原子力施設におけるアルカリ骨材反応の一考察, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, pp.457-464, 2014
- 9) RFID ひずみ計測システム : <http://www.taiheiyocement.co.jp/rd/rfid/hizumi/index.html> (閲覧日: 2018 年 1 月 4 日)
- 10) 佐川康貴, 山田一夫, 鳥田慎也, 江里口玲 : ペシマム現象を示す骨材を用いたコンクリートの加速試験および暴露試験における膨張挙動, コンクリート工学論文集, Vol.25, pp.135-145, 2013
- 11) 魚本健人, 古澤靖彦 : アルカリ・シリカ反応によるモルタルバーの膨張挙動を予測するモデルの構築, コンクリート工学論文集, Vol.3, No.1, pp.109-119, 1992
- 12) Multon, S. et al. : Effects of aggregate size and alkali content on ASR expansion, Cement and Concrete Research, Vol.40, pp.508-516, 2010
- 13) Yamada, K. et al. : CPT as an evaluation method of concrete mixture for ASR expansion, Construction and Building Materials, Vol.64, pp.184-191, 2014
- 14) Chatterji, S. and Christensen, P. : Studies of alkali-silica reaction. Part 7. Modelling of expansion, Cement and Concrete Research, Vol.20, pp.285-290, 1990
- 15) Y. Kawabata et al. : Alkali-Wrapped Concrete Prism Test (AW-CPT) - New Testing Protocol Toward a Performance Test against Alkali-Silica Reaction-, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp.429-440 2018