

論文 骨材のアルカリシリカ反応性試験の判定結果の整合性に関する研究

南 善導^{*1}・大代武志^{*2}・野村昌弘^{*3}・鳥居和之^{*4}

要旨：本研究では、北陸地方で流通している骨材 15 種類に対して岩石・鉱物学的調査を実施するとともに、骨材のアルカリシリカ反応性試験として化学法および 3 種類のモルタルバー法を実施した。その結果、北陸地方では火山岩（安山岩および流紋岩）が主要な反応性岩種であること、化学法とモルタルバー法とで判定結果が相違する場合があること、実構造物における ASR 損傷との関係より、安山岩が主要な反応性岩種である北陸地方ではデンマーク法による骨材の ASR 判定が適していること、などが明らかになった。

キーワード：アルカリシリカ反応性試験, 川砂利, 安山岩碎石, ASTM C1260, デンマーク法

1. まえがき

北陸地方では、アルカリシリカ反応（以下、ASR）による損傷が顕在化しており、その背景には反応性が高い安山岩碎石や安山岩粒子を含有する川砂、川砂利が骨材として使用されてきた経緯がある。最近の調査により、北陸地方の ASR 劣化構造物は広い範囲に分布し、ほとんどが火山岩系の岩石（1000 万年～2000 万年の火山活動で噴出した溶岩）を起源とすることが判明した^{1),2)}。火山岩（安山岩および流紋岩）は、同一の岩種であってもマグマの噴出時における結晶化作用の程度により、含有する反応性鉱物の種類とその量が大きく異なり、骨材の岩石名のみでは ASR の発生を予測することが困難である。北陸地方の火山岩は反応性鉱物としてクリストバライト、トリジマイト、オパールおよび火山ガラスを含有する。これらの中で、クリストバライト、トリジマイトおよびオパールを含有するものは、アルカリシリカ反応性が高く、ペシマム現象が顕著であるのに対して、火山ガラスを多く含有するものは、反応性が比較的小さく、明瞭なペシマム現象を示さないのが特徴である³⁾。

また、同地方の火山岩は、風化・変質の影響を受けており、スメクタイト化（モンモリロナイト、緑泥岩などの粘土鉱物を含有する）したものも多く存在する。このような火山岩の岩石・鉱物学的特徴は骨材のアルカリシリカ反応性の評価をより複雑なものにしていると予想される。実際、現行の ASR 試験法である JIS A1145-2001（化学法）および JIS A1146-2001（モルタルバー法）では適切に判定できない骨材が多くあることも指摘されている¹⁾。

本研究では、北陸地方を網羅した地域から 15 種類の骨材を収集し、骨材の主要な反応性鉱物を把握するとともに、化学法と 3 種類のモルタルバー法（JIS A1146-2001, ASTM C1260-1994, デンマーク法）での ASR 試験結果の整合性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究では、北陸地方（新潟、富山、石川および福井）の全域より収集した合計 15 種類の骨材を使用した。北陸地方では河川産の骨材がコ

*1 東京コンサルタンツ（株）（正会員）

*2 金沢大学 自然科学研究科環境科学専攻（正会員）

*3 （株）クエストエンジニア 土木調査設計部 博（工）（正会員）

*4 金沢大学 自然科学研究科社会基盤工学専攻教授 工博（正会員）

ンクリート用骨材として一般に使用されているため、北陸地方の代表的な河川水系から川砂 5 種 (RS1～5) および川砂利 4 種 (RG1～4) を選別した。北陸地方の河川産の骨材には、火山岩系の岩石 (安山岩および流紋岩) が含有されており、これらの中で安山岩の含有率が多いものに ASR が発生していることが判明している²⁾。一方、北陸地方の砕石は、6 種類 (CS1～6) を選別し、それらは ASR 損傷が発生している能登産の砕石 3 種 (両輝石安山岩) と ASR 損傷が発生していない金沢産の砕石 2 種 (石英安山岩, 角閃石凝灰岩), 福井県産の砕石 1 種 (チャート) である。

2.2 試験方法

(1) 骨材の岩石・鉱物学的特徴

骨材の反応性鉱物の種類を調べるために、岩石の薄片試料を作製し、偏光顕微鏡による観察を実施した。また、粉末 X 線回折分析 (XRD) および示差走査型熱量分析 (DSC) を実施し、骨材中に含有される反応性鉱物 (クリストバライト, 火山ガラスなど) および粘土鉱物 (モンモリロナイト, 緑泥岩など) の同定を行った。

(2) 骨材のアルカリシリカ反応性

骨材のアルカリシリカ反応性試験は、化学法 (JIS A1145-2001) および 3 種類のモルタルバー法 (JIS A1146-2001 (温度 40℃, 相対湿度 100%), ASTM C1260 (温度 80℃, 1N・NaOH 溶液に浸せき) およびデンマーク法 (温度 50℃, 飽和 NaCl 溶液浸せき)) である。

3. 実験結果および考察

3.1 骨材の採取地と岩石・鉱物学的特徴

試験に使用した骨材の採取地を図-1 に示す。試験に使用した骨材は、それぞれの県を代表する川砂, 川砂利および砕石である。北陸地方はグリーンタフと呼ばれる火山岩を主体とする地層に位置している。この地層の下部は安山岩および玄武岩を主体とし, 上部は流紋岩およびデイサイトを主体としている³⁾。同地方で産出する火山岩 (安山岩および流紋岩) はアルカリシリ

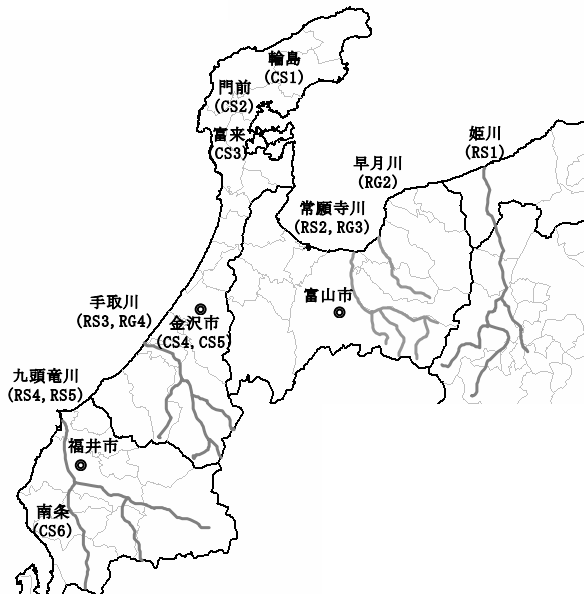


図-1 本研究に使用した骨材の採取地

表-1 骨材の採取地および岩石・鉱物学的特徴

骨材の種類	骨材の河川名 および産地	反応性鉱物 および粘土鉱物*	実構造物における ASR損傷の有無
川砂 RS1	堀川水系	Cr, G1, Ch	有
川砂 RS2	常願寺川水系	Cr, G1, Mo, Ch	有
川砂 RS3	手取川水系	Cr, G1, Mo, Ch	有
川砂 RS4	九頭竜川水系	Cr, G1, Mo, Ch	有
川砂 RS5	九頭竜川水系	Cr, G1, Ch, M	有
川砂利 RG1	信濃川水系	Cr, G1, Ch	有
川砂利 RG2	早月川水系	Ch	無
川砂利 RG3	常願寺川水系	Cr, G1	有
川砂利 RG4	手取川水系	Cr, G1, Ch	有
安山岩砕石 CS1	石川県輪島市	Cr, G1, Mo	有
安山岩砕石 CS2	石川県門前町	Cr, G1	有
安山岩砕石 CS3	石川県富来町	Cr, G1, Mo	有
石英安山岩 CS4	石川県金沢市	Ch, Bt	有
角閃石凝灰岩 CS5	石川県金沢市	Ch, Bt	無
チャート砕石 CS6	福井県南条市	MQ	無

* 反応性鉱物および粘土鉱物の略号を以下に示す

MQ: 微晶質石英, Cr: クリソバライト, G1: 火山ガラス

Mo: モンモリロナイト, Ch: 緑泥岩, Bt: パーミキュライト, M: 雲母類

カ反応性が高いことが知られており、このため、北陸地方では ASR による損傷を受けた構造物が広範囲に分布している。同様に、北陸地方の反応性骨材として石川県能登半島北部で産出される安山岩砕石 (両輝石安山岩) が知られているが、安山岩および流紋岩の岩体が各河川の後背地にも存在するため、川砂および川砂利にも各種の反応性岩種が混入している。

骨材の岩石・鉱物学的調査の結果を表-1 に示す。X 線回折分析の結果より、川砂, 川砂利および安山岩砕石には反応性鉱物であるクリソバライトと火山ガラスが含有されていた。また、実構造物にて ASR 損傷が確認されている構造物では、骨材中にクリソバライトまたは火山ガラスが含有されていた。とくに、河川産骨材中

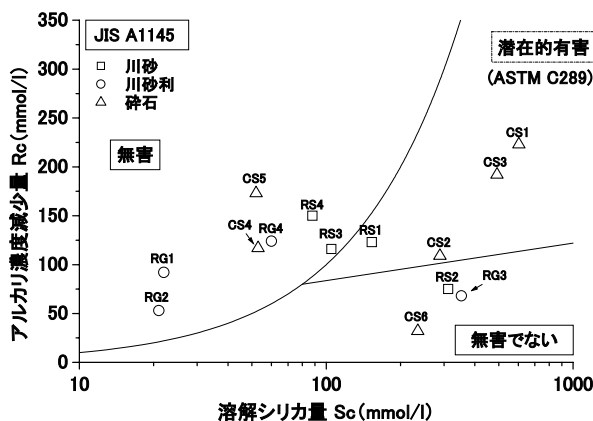


図-2 化学法 (JIS A1145) による判定結果

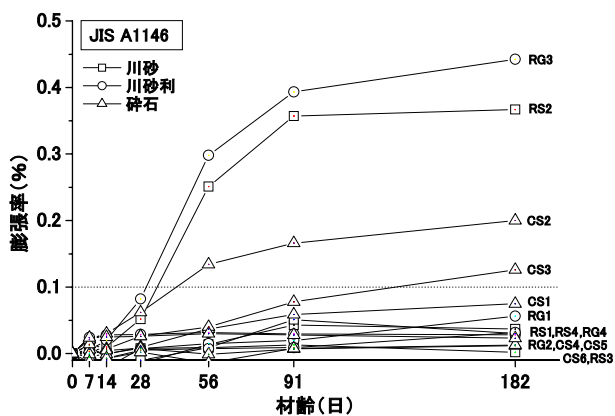


図-3 モルタルバー法 (JIS A1146) による判定結果

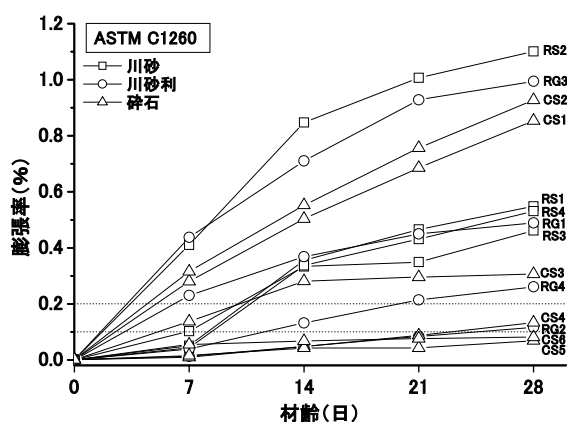


図-4 ASTM C1260 による判定結果

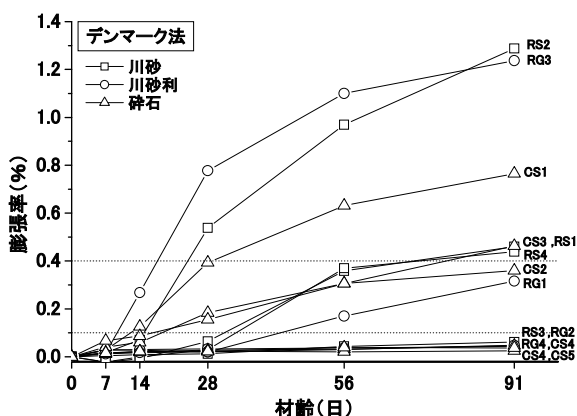


図-5 デンマーク法による判定結果

の火山岩系の岩種の中では安山岩粒子が最も反応しており、河川砂利中の安山岩粒子の含有率とその反応性が実構造物の ASR 損傷度と密接に関係していることが判明している²⁾。

3.2 骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果

(1) 化学法 (JIS A1145) による判定結果

化学法 (JIS A1145) の結果を図-2 に示す。川砂および川砂利については、川砂には岩石と岩石の造岩鉱物 (長石、雲母など) も含有されるため、化学法による判定が困難なものになっている。また、川砂の判定結果の多くは、境界線付近 ($Sc/Rc=1$) に存在しており、化学法の結果のみで判定することは危険であるということを示している⁴⁾。一方、能登半島産の3種類の安山岩砕石はすべて「無害でない」と判定された。また、この3種類の安山岩砕石のうち、CS1 および CS3 は溶解シリカ量 (Sc)、アルカリ濃度減少量 (Rc) とともに大きいことから、アルカリ

シリカ反応性がとくに高いものと推察される。また、これら3種の安山岩砕石は ASTM C289 における「潜在的有害」の領域にプロットされることから判断すると、モルタルバー法 (JIS A1146) ではペシマム混合率の影響を考慮してモルタル試験体を作製する必要がある⁵⁾。

(2) モルタルバー法 (JIS A1146) による判定結果

モルタルバー法 (JIS A1146) の結果を図-3 に示す。川砂および川砂利の膨張率は常願寺川水系のものが最大であった。これは、骨材中に反応性の高い安山岩粒子が多く混入しており、その混入率がペシマム値付近 (20~30%) にあったことによるものである。また、河川産の骨材は同一の河川水系であっても採取場所や採取時期により岩石の構成比率が相違することが予想されるので、JIS A1146 による骨材の ASR 判定には注意する必要がある⁶⁾。一方、安山岩砕石

表－2 骨材のアルカリシリカ反応性試験法の適合性

骨材の種類	化学法 (JIS A1145)				モルタルバー法 (JIS A1146)		ASTM C1260		デンマーク法	
	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	Sc/Rc	判定	膨張率 (%)	判定	膨張率 (%)	判定	膨張率 (%)	判定
川砂 RS1	153	123	1.24	無害でない	0.037	無害	0.355	有害	0.460	有害
川砂 RS2	312	75	4.16	無害でない	0.367	無害でない	0.847	有害	1.288	有害
川砂 RS3	105	116	0.91	無害	0.002	無害	0.333	有害	0.062	無害
川砂 RS4	88	150	0.59	無害	0.030	無害	0.337	有害	0.439	有害
川砂 RS5	95	123	0.77	無害	0.384	無害でない	0.390	有害	－	－
川砂利 RG1	22	92	0.24	無害	0.056	無害	0.368	有害	0.317	不明確
川砂利 RG2	21	53	0.40	無害	0.028	無害	0.047	無害	0.043	無害
川砂利 RG3	353	68	5.19	無害でない	0.443	無害でない	0.710	有害	1.237	有害
川砂利 RG4	60	124	0.48	無害	0.032	無害	0.132	不明確	0.048	無害
安山岩碎石 CS1	603	223	2.70	無害でない	0.075	無害	0.503	有害	0.766	有害
安山岩碎石 CS2	289	109	2.65	無害でない	0.200	無害でない	0.552	有害	0.361	不明確
安山岩碎石 CS3	492	192	2.56	無害でない	0.126	無害でない	0.280	有害	0.463	有害
石英安山岩 CS4	53	117	0.46	無害	0.012	無害	0.047	無害	0.047	無害
角閃石凝灰岩 CS5	52	173	0.30	無害	0.013	無害	0.042	無害	0.025	無害
チャート碎石 CS6	235	32	7.34	無害でない	0.023	無害	0.067	無害	0.037	無害

は材齢 91 日以後の膨張率の増加が小さくなる傾向があった。これは、JIS A1146 では反応に携わるアルカリが打設時に限定されていることや、養生中に試験体から比較的多くのアルカリが漏出すること、が影響しているものと推測される。また、粘土鉱物を含有する安山岩碎石 (CS1) は粘土鉱物によるアルカリの吸着により膨張率が大きく抑制され、同試験法の ASR 判定の結果においては「無害」と判定された。さらに、チャート碎石 (CS6) は遅延型の膨張挙動を示す場合もあると報告されているが、南条産のものは微晶質石英および玉髓の含有量が比較的少ないことから、JIS A1146 の条件では膨張がまったく発生しなかった。

(3) 促進モルタルバー法 (ASTM C1260 およびデンマーク法) による判定結果

促進モルタルバー法 (ASTM C1260) の膨張挙動を図－4 示す。外部から常にアルカリが供給される ASTM C1260 では、材齢とともにモルタルの膨張率が直線的に増大しており、最終的な膨張率も JIS A1146 と比較してかなり大きくなった。また、安山岩碎石と比較して川砂および川砂利の膨張率が大きい結果となったことから判断すると、1N・NaOH 溶液浸せき条件下では安山岩粒子のペシマム混合率が顕著なもののほど膨張率がより大きくなるものと推測された。

促進モルタルバー法 (デンマーク法) の膨張挙動を図－5 示す。デンマーク法では、ASTM

C1260 とほぼ同様な膨張挙動が認められた。また、材齢 91 日における膨張率が 0.1%以上のものと未満のものとの区別でき、両者の膨張挙動に明確な相違が見られた。すなわち、デンマーク法による判定結果は ASTM C1260 のものよりも、骨材間の相違がより明確であり、このため、骨材の ASR 判定が容易になった。また、川砂利 (RG4) は ASTM C1260 では「不明確」と判定されたが、デンマーク法では膨張がまったく発生せず、この結果は実構造物における ASR 損傷の有無とも一致した。

3.3 ASR 試験法の判定結果の整合性

(1) 化学法と 3 種類のモルタルバー法 (JIS A1146, ASTM C1260, デンマーク法) の関係

化学法と 3 種類のモルタルバー法の試験結果を表－2 に示す。わが国では化学法で「無害でない」と判定された場合についてのみモルタルバー法で判定すると規定されている。従来、モルタルバー法は判定までに 6 ヶ月間かかることから、実際の骨材の品質管理に用いられることは少なかった。モルタルバー法 (JIS A1146) では、実構造物で ASR が発生している RS1, RS4, RG1 および CS1 は「無害」と判定された。一方、化学法で「無害でない」と判定され、モルタルバー法 (JIS A1146) で「無害」と判定されるものの中で、RS1 は反応性骨材 (安山岩粒子) の含有量そのものが限界量以下であること、CS1 は安山岩碎石がスメクタイト化していること、が

影響しているものと考えられる。このように、化学法で「無害」と判定され、モルタルバー法（JIS A1146）で「無害でない」と判定されたものは、安山岩粒子のペシマム混合率が影響しているものと考えられる。

(2) 化学法とモルタルバー法との関係

化学法（溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の比（ Sc/Rc ））とモルタルバー法（JIS A1146）の膨張率（材齢6ヵ月）との関係を図-6に示す。溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の比が大きいものほど、モルタルの膨張率が大きくなっていることがわかる。また、チャート碎石（CS6）からは多くのシリカが溶解し、「無害でない」と判定されるが、これは、化学法を実施する際の粒度調整（0.15～0.30mm）によって、粉碎されたチャートの骨材界面から多量のシリカが溶解したことによるものである。

(3) 化学法と ASTM C1260 との関係

化学法（溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の比（ Sc/Rc ））と ASTM C1260 の膨張率（材齢14日）との関係を図-7に示す。化学法と ASTM C1260 との関係については、実構造物にて ASR 損傷が確認されていないにもかかわらず、RS3 のように ASTM C1260 で「有害」と判定されるものがあることから判断すると、北陸地方のように火山岩系の岩石を含む川砂および川砂利には ASTM の判定基準は厳しすぎるものと考えられる。また、チャート碎石（CS6）は ASTM C1260 では膨張がまったく発生しなかった。本研究で使用したチャートは微晶質石英を含有しているが、その含有量が比較的少ないことから、実際の構造物でも ASR は発生しなかったものと推測される。

(4) 化学法とデンマーク法との関係

化学法（溶解シリカ量とアルカリ濃度減少量の比（ Sc/Rc ））とデンマーク法の膨張率（材齢91日）との関係を図-8に示す。デンマーク法による ASR 判定の結果は実構造物の ASR 損傷の有無とほぼ一致していた。また、RS3 および RS4 のように複雑な岩種構成をもつ骨材に対しても

適切に判定できた。さらに、CS4 および CS5 のような無害骨材は、ASTM C1260 と異なり膨張がまったく発生しなかった。したがって、北陸地方のような火山岩（安山岩および流紋岩）が主要な反応性岩種である場合には、川砂、川砂利および安山岩碎石の両者に対して、デンマー

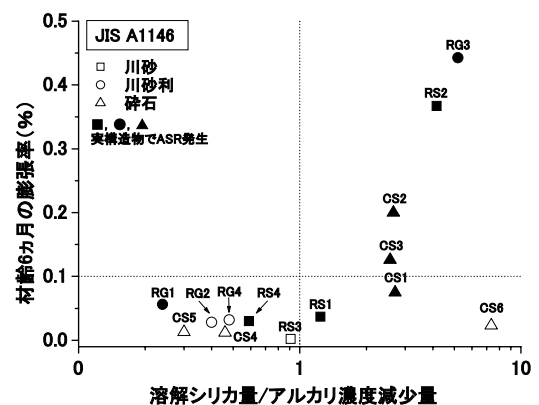


図-6 化学法の溶解シリカ量/アルカリ濃度減少量比とモルタルバー法の膨張率との関係

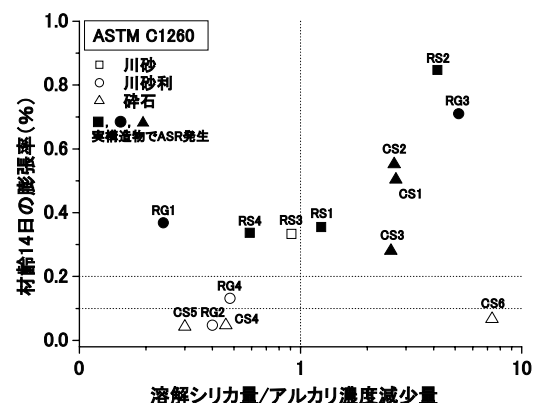


図-7 化学法の溶解シリカ量/アルカリ濃度減少量比と ASTM C1260 の膨張率との関係

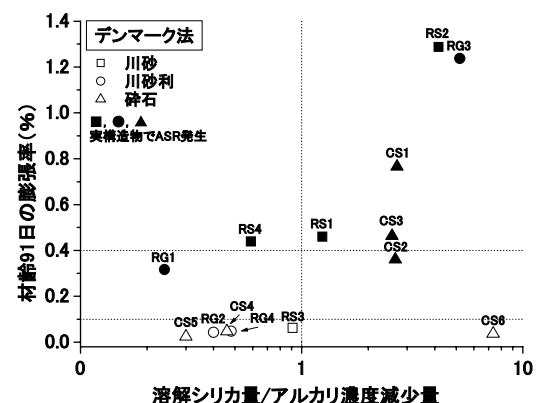


図-8 化学法の溶解シリカ量/アルカリ濃度減少量比とデンマーク法の膨張率との関係

ク法による判定が有用であることが判明した。

(5) ASTM C1260 とデンマーク法との間の膨張率の関係

ASTM C1260 とデンマーク法との膨張率の関係を図-9 に示す。両試験法における膨張率には RS3 を除いて高い相関性が認められた。RS3 については、ASTM C1260 において「有害」と判定されたが、デンマーク法による判定結果および実構造物の ASR 損傷の有無から判断すると、RS3 はアルカリシリカ反応性がないものと推測される。また、促進養生試験である ASTM C1260 およびデンマーク法は、JIS A1146 と比較して短期間に判定できることや、外部からアルカリが供給されるので、骨材の反応が持続し、大きな膨張が得られるので、ASR 判定の結果が明瞭になること⁷⁾などの利点がある。

4. まとめ

本研究で得られた主要な結果は以下の通りである。

- (1) 実構造物の ASR 損傷の調査結果より、北陸地方では安山岩および流紋岩を含有する川砂、川砂利および安山岩碎石で ASR が発生していた。
- (2) 北陸地方の安山岩粒子は、風化・変質の影響を受けたものが多くあり、現行の化学法 (JIS A1145) およびモルタルバー法 (JIS A1146) による ASR 判定を困難なものにしていた。
- (3) 促進養生試験である ASTM C1260 およびデンマーク法によるモルタルの膨張率は JIS A1146 よりもかなり大きくなり、それらの ASR 判定の結果は実構造物における ASR 損傷の有無とも概ね一致した。
- (4) 火山岩 (安山岩および流紋岩) が主要な反応性骨材である北陸地方では、デンマーク法による ASR 判定が最も適していた。
- (5) 促進養生試験である ASTM C1260 およびデンマーク法の膨張率の間には高い相関があった。

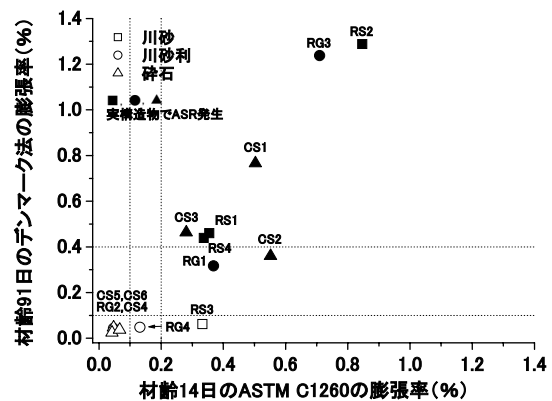


図-9 ASTM C1260 とデンマーク法との膨張率の関係

参考文献

- 1) 鳥居和之, 野村昌弘, 本田貴子: 北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性, 土木学会論文集, No. 767/V-64, pp. 185-197, 2004.
- 2) 野村昌弘, 青山實伸, 平俊勝, 鳥居和之: 北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法, コンクリート工学論文集, Vol. 13, No. 3, pp. 105-114, 2002.
- 3) Katayama, T., Tagami, M., Sarai, Y., Izumi, S., Hira, T.: Alkali-aggregate Reaction under the Influence of Deicing Salts in the Hokuriku District, Japan, Materials Characterization, Vol. 53, No. 2-4, pp. 105-122, 2004.
- 4) 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性の評価法の開発, 材料, Vol. 53, No. 10, pp. 1065-1070, 2004.
- 5) (社) 日本材料学会: 建設材料実験, pp. 68-74, 2004.
- 6) 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, No.60, pp. 390-395, 2006.
- 7) 鳥居和之, 友竹博一: アルカリシリカ反応によるモルタルの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, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.251-263, 2003.