

論文 石川県の反応性骨材と ASR 劣化構造物のデータベース化

鳥居 和之^{*1}・大代 武志^{*2}・山戸 博晃^{*3}・平野 貴宣^{*4}

要旨: アセットマネジメントによる橋梁の維持管理が全国的に実施される機運にある。本研究は、石川県の反応性骨材と ASR 劣化橋梁のデータベースに基づいて、骨材の ASR 反応性と構造物の使用・環境条件から県内各地域の橋梁の ASR 劣化状況を正確に把握することにより、橋梁の合理的かつ経済的な ASR 対策を提言するものである。

キーワード: ASR, 反応性骨材, 岩石・鉱物学的調査, データベース, アセットマネジメント

1. まえがき

現在、アセットマネジメントによるコンクリート構造物の維持管理が地方自治体でも実施されようとしている。このことに関連して、石川県では、平成 16 年度および 17 年度の 2 年間に県内の橋梁（ASR 抑制対策が実施された昭和 61 年以前のもののみを対象としている）の ASR 発生状況を目視点検により調べた結果、能登半島以外の地域にも ASR による劣化の兆候がある橋梁があることが確認された。このため、ASR 劣化橋梁の調査・診断及び補修・補強に関するマニュアル（ASR 対策検討委員会）を作成し、県内の橋梁の ASR 対策に着手している¹⁾。これらの取り組みをより実質的なものとするためには、ASR が発生した橋梁に関して、骨材の ASR 反応性（岩石・鉱物学的特徴、骨材の ASR 試験結果）や構造物からのコアの物性値（圧縮強度、弾性係数、残存膨張性）、補修・補強の履歴（実施時期、再劣化の有無）、などのデータベース化とその整備・充実が必要となる。著者らは、ここ数年、石川県内の骨材の ASR 試験結果の蓄積と ASR 劣化構造物のマップ作成という作業に取り組んできた^{2), 3)}。このような ASR に関する情報は、コンクリートの生産者および構造物の管理者ともに情報公開したがるのが常であり、残念ではあるが、ASR 劣化構造物の補修・補強などに活用されているのは全国的にもきわめて稀であると言わざるをえない。

本研究は、石川県の反応性骨材と ASR 劣化橋梁に関するデータベースを作成し、骨材の ASR 反応性と構造物の使用・環境条件から県内各地域での ASR 劣化橋梁の特徴を整理することにより、ASR 劣化構造物の合理的な ASR 対策を提言するものである。

2. ASR が発生した橋梁の地域的分布状況

石川県における ASR が発生した橋梁の分布状況を図

1 に示す。また、石川県の地質図における岩体分布状況を図 2 に示す。両者を重ねて眺めることで、石川県の ASR の状況が良く理解できる。石川県は、行政管理上の区分として、奥能登地域、中能登地域および加賀地域とに分けられる。但し、ASR 劣化が最も深刻な、能登有料道路（柳田から穴水の間 25 橋梁）は、石川県の道路公社の管理で、ASR 劣化橋梁の維持管理計画が別途作成されているので、図 1 の分布図には含まれていない。また、能登有料道路の ASR 劣化橋梁は、能登半島地震後の災害復旧工事が鋭意実施されており、当初の計画よりも早く、橋梁の補強が完了できるものと期待されている。

奥能登地域では、能登半島北部を外周する国道 249 号線や能登半島を横断する県道など、48% (166 橋梁/全 347 橋梁) の橋梁に ASR が発生している。この地域の ASR は能登半島の北部に帯状に広く分布する安山岩（門前、輪島、珠洲など）を砕石として使用したものがほとんどである。また、中能登地域では、国道 249 号や七尾市の周辺を中心に、23% (61 橋梁/全 263 橋梁) の橋梁に ASR が発生している。この地域は、能登産の安山岩砕石とともに富山県からの川砂、川砂利も使用されている。一方、加賀地域では、15% (64 橋梁/全 417 橋梁) の橋梁に ASR が発生しており、能登地域と比較すると ASR 発生率がかなり少なくなっているのが特徴である。加賀地域の ASR は、金沢市周辺の跨線橋や白山麓に向かう国道 157 号の橋梁に発生している。これまでの調査より、金沢市周辺は富山県の庄川産（または常願寺川産）の骨材が一時期使用されたことによるもの、国道 157 号は手取川産の一部の骨材によるものである、ことが判明している。

3. ASR が発生した橋梁の実態調査

ASR 劣化構造物の実態調査（金沢大学にて取りまとめ）は、構造物の種類（橋梁、トンネル、水理構造物な

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 教授 工博（正会員）

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科 環境科学専攻（正会員）

*3 金沢大学 理工学域 環境デザイン学類 技術官（正会員）

*4 西日本旅客鉄道（株）（正会員）

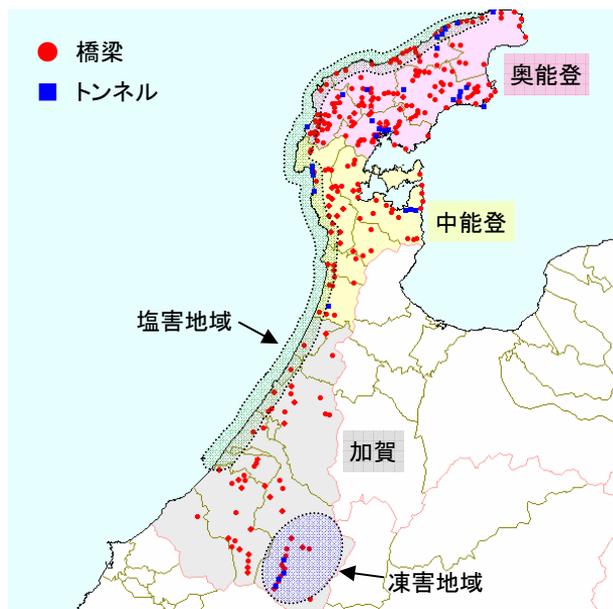


図-1 ASR劣化構造物（橋梁、トンネル）の分布

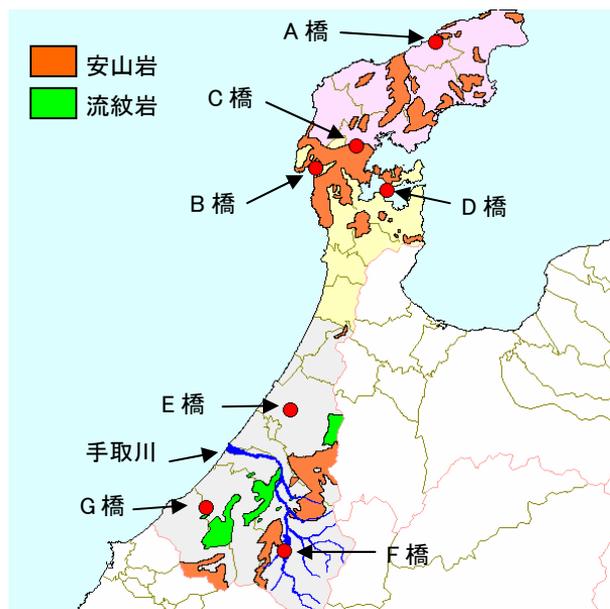


図-2 石川県の地質図における岩体分布

表-1 ASRが発生した橋梁の実態調査の一例

橋梁 (地域区分)	使用骨材 (産出地)	構造物 の位置	ASR劣化 の程度	使用・環境条件		対策 (補修, 補強の履歴)
				日射	水分供給	
奥能登・A橋	安山岩碎石	海岸部	大	小	海水	補修後の再劣化(補強実施済み)
中能登・B橋	安山岩碎石	海岸部	大	大	路面排水	補修後の再劣化(再補修実施済み)
中能登・C橋	安山岩碎石	山間部*	大	大	飛来塩分	梁部の打替え(耐震補強実施済み)
中能登・D橋	黒部川・川砂利	海岸部	小	大	飛来塩分	補修後の再劣化(耐震補強予定)
加賀・E橋	手取川・川砂利	平野部*	小	大	路面排水	点検強化実施(架け替え予定)
加賀・F橋	手取川・川砂利	山間部*	大	中	路面排水	部分的打替えまたは補強計画中
加賀・G橋	川砂利(不明)	平野部*	中	大	路面排水	補修後の再劣化(耐震補強実施済み)

*: 冬期の期間に凍結防止剤(NaCl)が散布される。

ど) ごとに分類し、構造物の使用・環境条件、補修・補強の履歴、コンクリートの配合、骨材の種類、コアの力学的性質、などの情報が網羅されている。これらの調査資料は、JCI・ASR研究委員会(WG2 山路主査)から提案されたフォーマットの形で整理し、約100事例がすでにデータベース化されている。ASRが発生した橋梁の実態調査結果の一例を表-1に示す。

橋梁のASR劣化の形態および補強後の外観を写真-1に示す。能登半島の海岸を通る国道249号では、上部工(PC桁)は塩害対策、下部工(RC橋台)はASR対策が実施されている。A橋の橋台(写真-1(a))は、港湾突堤の海水中に没しており、ASRの進行により躯体に大きな割れや断面欠損が生じたので、鋼板による補強後に、モニタリングによる管理が実施されている。同様に、国道249号の海岸部に位置するB橋の橋脚(写真-1(b))は、PCMによる補強後に、2次的なひび割れが進展し、再々補修が実施された。また、能登有料道路の大きなC橋梁(写真-1(c))では、山間部にある、高い橋脚のASR対策が重要であり、鉄筋破断が発生した橋脚の梁部を部分的または全面的に打替えている。このように、安

山岩碎石を使用したコンクリートは、建設後30年が経過した現段階でもASR膨張が継続していることが多く、補強後も深刻な劣化が発生しているのが特徴である。したがって、残存供用予定期間が長い橋梁は抜本的なASR対策(補強、打替え)の選択が必要とされる。さらに、中能登地域の海上架橋D橋(写真-1(d))は、10年ほど前に表面塗装による塩害対策が実施されたが、能登半島地震でASRが新たに見つかり、耐震補強工事とともにディビダーク部の補修が検討されている。能登半島の七尾湾に面する地域は、骨材の輸送コストの関係から、富山県産の骨材が使用されていることも多いので、調査時に注意する必要がある。一方、金沢近郊の跨線橋E橋(写真-1(e))は、交通量が多い橋梁であるが、使用された川砂、川砂利の反応性が小さく、ASR膨張がほぼ収束しているので、目視点検の継続による維持管理が適当であると判断された。それに対して、白山麓に位置するF橋では、ASRと凍害による複合的な劣化が懸念されるので、早期に路面の排水処理とともに、補修を実施することになった。さらに、加賀平野の跨線橋G橋(写真-1(f))は、ASRとは知らずに、耐震補強を実施したが、そ



(a) A橋



(b) B橋



(c) C橋



(d) D橋



(e) E橋



(f) G橋

写真-1 ASRが発生した橋梁の外観

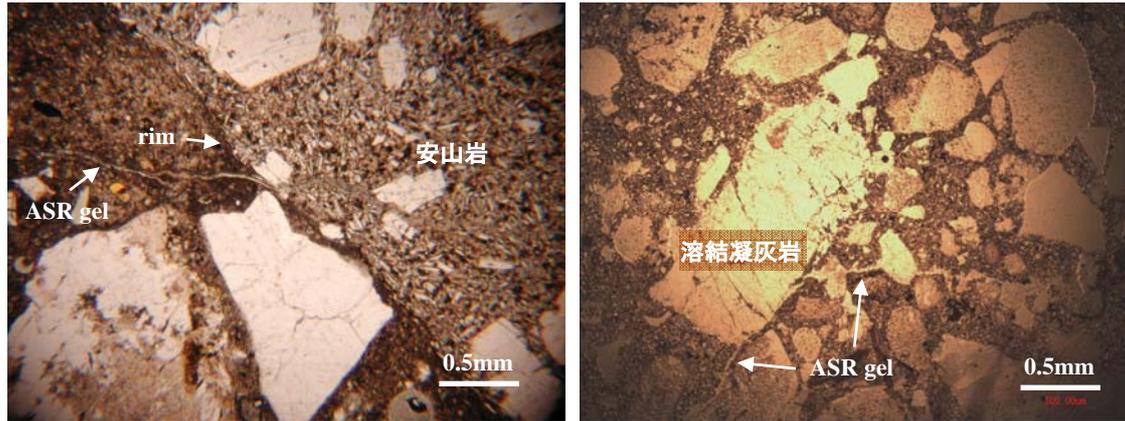
の数年後に補修の再劣化が発生している。この橋梁の付近には、ASRは発生しておらず、骨材の供給源は特定されていない。

4. 骨材の岩種および反応性珪物の実体調査

コンクリートに使用された岩種とASRに関与している反応性珪物を同定するには、岩石・鉱物学的試験（X線回折、偏光顕微鏡観察、酢酸ウラニル蛍光法など）が必要となる。前述したように、石川県内では、ASRが県内全域で発生し、骨材の流通経路が複雑な地域もあることから、各地域の代表的なASR劣化構造物から採取した

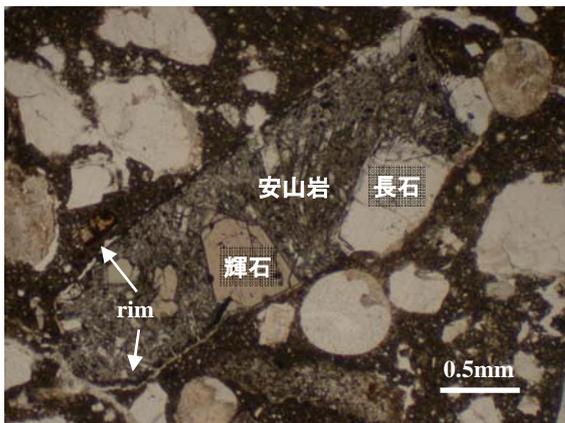
コアを使用して岩石・鉱物学的検討を実施している。

ASRが発生した橋梁の岩石・鉱物学的試験（偏光顕微鏡観察）の一例を写真-2に示す。また、コンクリート破断面の酢酸ウラニル蛍光法による観察結果を写真-3に示す。ここでは、酢酸ウラニル蛍光法は偏光顕微鏡観察の補助的な手段（細骨材と粗骨材のASR反応の区別）として活用している。能登地域の安山岩砕石には、黒色のもの（火山ガラスが多く残存、ガラス質安山岩）と灰茶色の（火山ガラスが変質しており、スメクタイト化（モンモリロナイト）が進行、結晶性安山岩）とがある。調査対象の、昭和40年代後半から50年代の構造物にはガ

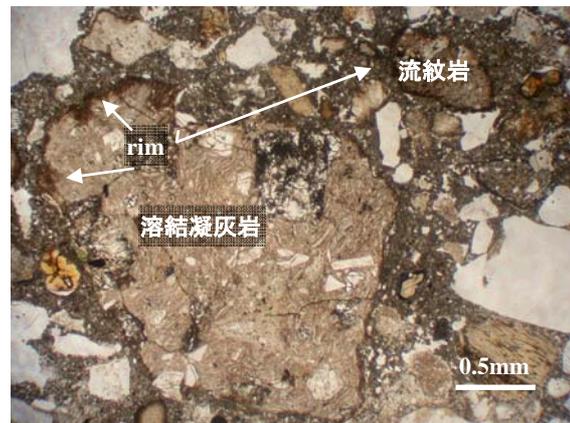


(a) C 橋

(b) D 橋

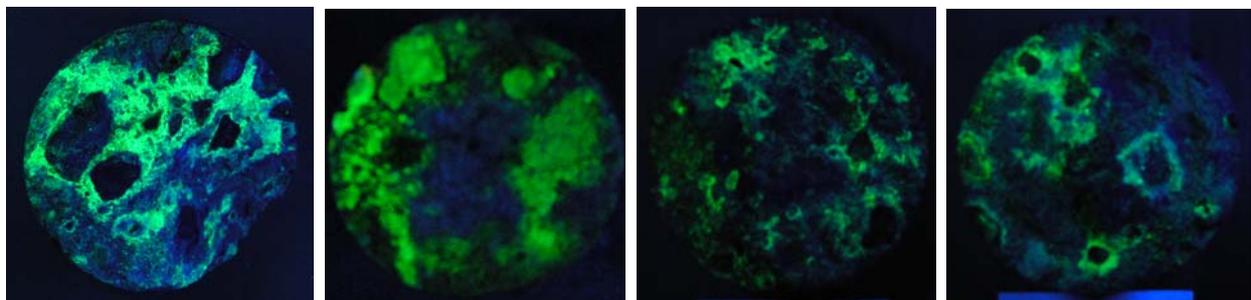


(c) F 橋



(d) G 橋

写真-2 ASR が発生したコンクリートの偏光顕微鏡観察



(a) C 橋

(b) D 橋

(c) F 橋

(d) G 橋

写真-3 コアの酢酸ウラニル蛍光法による観察

ラス質安山岩が多く使用されていた。これは、ガラス質安山岩は内部組織が均質で、密度が高く、吸水率も低いことから、コンクリート用骨材として良質である、ことによるものであった。能登産の安山岩砕石の主要な反応性鉱物はクリストバライトであり、この含有量が骨材の ASR 反応性を決定していると考えて良い。コンクリートの安山岩粒子の周囲には反応環(リム)が存在し、骨材の周囲や骨材中のひび割れには ASR ゲルが生成しているのが観察された(写真-2 (a) および写真-3 (a))。また、中能登地域の D 橋は生コン工場の聞き取り調査より黒部川産のものとして報告を受けていた。しかし、川砂利は安山岩粒子およ

び溶結凝灰岩を含有しており、それらに ASR の痕跡が観察されることから、富山県の他の河川水系(神通川または庄川)の岩種が混入している可能性があった(写真-2 (b) および写真-3 (b))⁴⁾。通常、建設時の工事記録は消失しているものが多いが、記載の間違いがあることにも注意が必要である。一方、加賀地域の F 橋および G 橋は、白山の火山岩系岩石(安山岩、流紋岩、溶結凝灰岩)が反応しており、それらの粒子が ASR を発生させたことが観察された。しかし、G 橋の岩種構成率は F 橋とは大きく相違することから、同一の河川水系のものとは断定できなかった(写真-2 (c, d) および写真-3 (c, d))。

5. 骨材のアルカリシリカ反応性の実態調査

石川県における骨材のアルカリシリカ反応性を調べた試験結果の一例を表-2に示す。ここでは、現行の化学法 (JIS A 1145) およびモルタルバー法 (JIS A 1146) とともに、促進モルタルバー法 (デンマーク法 (50°Cの飽和 NaCl 溶液浸せき養生) および ASTM C 1260 法 (80°Cの 1mol/l・NaOH 溶液浸せき養生)) を実施し、骨材の ASR 試験法の判定結果の整合性についても調べている。

骨材の化学法 (JIS A 1145) の判定図を図-3に示す。能登地域の安山岩砕石は産出場所に係わらずすべて潜在的有害 (ASTM C 289) の領域にプロットされるとともに、風化・変質によりスメクタイト化が進行したもの (結晶性安山岩) ほど Sc 値に対する Rc 値が増大する傾向があった。また、能登産の安山岩砕石では、火山ガラスよりもクリストバライトの ASR 反応性が高いので、クリストバライトを多く含有するものほどモルタルバー法の膨張率が增大しており、ほとんどが「無害でない」または「有害」と判定された。さらに、著者らは、能登産の安山岩砕石からは多量のアルカリ (1kg/m³を想定) がコンクリート中に溶出することを報告している³⁾。JIS A 5308 の ASR 抑制対策では、現行の ASR 試験法により「無害でない」と判定された骨材もアルカリ総量規制値 (3kg/m³) を遵守することによりコンクリートに使用できるとしている。しかし、能登産の安山岩は、ASR 反応性が高く、かつコンクリートに多量のアルカリが溶出することが懸念されるので、このような火山岩系の骨材に対しては、アルカリ総量規制でなく混合セメントの使用による ASR 対策が適当であり、地域的な混合セメントの使用を行政側が指導すべきであると考えている。一方、手取川水系の川砂および川砂利は化学法の判定ライン

(Sc/Rc=1) の付近に位置するものが多いので、モルタルバー法を併用して ASR 反応性を判定することが望ましいと考えている⁵⁾。これまでの調査結果より、白山を起源とする、手取川水系の川砂、川砂利は、上流部と下流部とでは岩種構成が異なり、ASR 反応性を有するものは上流の一部に限られていることが判明している。また、立山を起源とする、富山県の常願寺川水系の川砂、川砂利と比較して、石川県の手取川水系 (福井県の九頭竜川水系も同様) のものは、安山岩および流紋岩粒子の混入率およびそれらの ASR 反応性がかなり小さいと推定された。このため、加賀地域では、コンクリートの ASR 膨張も早期に終了しているものが多く、アルカリ総量規制値を遵守すれば ASR は防止できると考えている。その一方で、手取川水系の川砂、川砂利の ASR 試験では、Sc の値が 100 mmol/l 以上ある場合には ASTM C 1260 により「有害」と判定されることから判断すると、骨材の反応性鉱物の種類とそのペシマム混合率に注意して使用することが必要である。

6. コアの力学的性質の実態調査

補強を実施する ASR 劣化橋梁では、構造物の各部位からコア (直径 55 mm, 長さ 30cm) を 3 本ずつ採取し、コンクリートの力学的性質 (圧縮強度, 弾性係数, 超音波パルス速度など), 残存膨張性, ASR の進行度 (ASR ゲルの生成状況), などを調べてきた。ASR 劣化橋梁から採取したコアの圧縮強度と弾性係数/圧縮強度比の関係を図-4に示す。この図において健全なコンクリートを示す曲線から外れて、プロットが原点に近づくにつれて ASR 劣化度が大きいものと判断される⁶⁾。建設時のコンクリートの設計基準強度は 21 または 24 N/mm²であ

表-2 骨材のアルカリシリカ反応性試験の一例

地区	骨材の種類	骨材の産地	ASR 発生の有無	骨材のアルカリシリカ反応性試験									
				化学法 (JIS A 1145)				モルタルバー法					
				Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	Sc/Rc	判定	JIS A 1146		デンマーク法		ASTM C 1260	
膨張量 (%)	判定	膨張量 (%)	判定	膨張量 (%)	判定								
能登	安山岩砕石 A	輪島	有り	603	223	2.70	無害でない	0.08	無害	0.77	有害	0.50	有害
	安山岩砕石 B	輪島	有り	301	138	2.18	無害でない	0.02	無害	0.62	有害	0.26	有害
	安山岩砕石 C	珠洲	有り	458	115	3.98	無害でない	0.15	無害でない	0.69	有害	0.27	有害
	安山岩砕石 D	門前	有り	289	109	2.65	無害でない	0.20	無害でない	0.36	不明確	0.55	有害
	安山岩砕石 E	門前	有り	170	135	1.26	無害でない	0.14	無害でない	0.61	有害	0.54	有害
	安山岩砕石 F	富来	有り	492	192	2.56	無害でない	0.13	無害でない	0.46	有害	0.28	有害
加賀	石英安山岩砕石	金沢	無し	53	117	0.46	無害	0.01	無害	0.05	無害	0.05	無害
	角閃石凝灰岩砕石	金沢	無し	52	173	0.30	無害	0.01	無害	0.02	無害	0.04	無害
	川砂 A	手取川	有り	121	120	1.01	無害でない	0.03	無害	0.29	不明確	0.36	有害
	川砂 B	手取川	不明	105	116	0.91	無害	0.00	無害	0.06	無害	0.33	有害
	川砂 C	手取川	有り	106	86	1.23	無害でない	0.04	無害	0.09	無害	0.40	有害
	川砂利 A	手取川	無し	60	124	0.48	無害	0.03	無害	0.05	無害	0.13	不明確
川砂利 B	手取川	無し	44	69	0.64	無害	0.01	無害	0.02	無害	0.19	不明確	

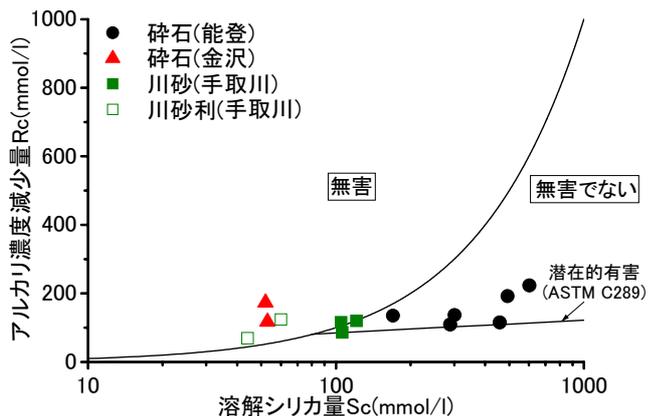


図-3 化学法 (JIS A 1145) の結果

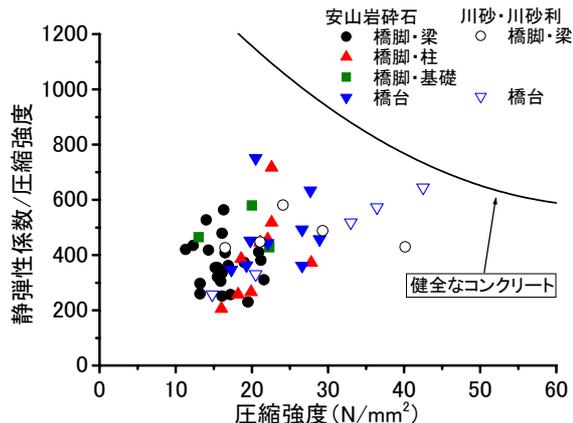


図-4 圧縮強度の静弾性係数の関係

り、配合強度はさらにその20~30%増しが一般的であった。しかし、約30年が経過した段階では、能登産の安山岩砕石のものはASRによってコアの圧縮強度が最大で50%程度まで低下していることが判明した。それに対して、加賀産の川砂利のものは圧縮強度の低下が小さいが、ASRと凍害との複合的な劣化を受けたものではコアの圧縮強度が最大で30%まで低下していた。コンクリートの圧縮強度の低下率は、コンクリートのASR進行度と部材の鉄筋拘束比に関係することから、ASR劣化が顕著な橋脚の補強時には、能登産の骨材および加賀産の骨材に対して、それぞれ10N/mm²および15N/mm²の値を設計の目安として用いている。

7. まとめ

石川県のASR劣化構造物では、橋梁、トンネルの調査資料がデータベース化され、発生地域と骨材の岩石・鉱物学的特徴との関係が明らかになっている。同時に、能登半島の海岸部や白山山麓の山間部でのASR劣化構造物の調査が進み、構造物の使用・環境条件とASR劣化状況の関係も把握されている。

石川県の反応性骨材とASR劣化橋梁の実態調査の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 橋梁のASR発生率は、全橋梁(昭和61年以前に建設)の28%であり、地域区分では奥能登地域48%、中能登地域23%および加賀地域15%であった。
- (2) ASR劣化橋梁に使用された反応性骨材は、奥能登地域が安山岩砕石、中能登地域が安山岩砕石と一部富山県産の川砂、川砂利、加賀地域が手取川水系の川砂、川砂利であった。また、安山岩砕石の主要な反応性鉱物はクリストバライトと火山ガラスであり、川砂、川砂利は安山岩および流紋岩中のクリストバライトと火山ガラスであった。
- (3) 骨材のアルカリシリカ反応性に関して、能登産の安山岩砕石は反応性が高く、化学法の潜在的有害

の領域にあったのに対して、手取川水系の川砂、川砂利は反応性が比較的小さく、化学法の判定ライン付近に位置するものが多かった。

- (4) ASR対策に関して、反応性が高い、能登産の安山岩砕石はアルカリ総量規制でなく混合セメントの使用が適切であった。また、反応性が小さい、手取川水系の川砂、川砂利はアルカリ総量規制でも十分に抑制できると考えられた。

謝辞: コンクリート構造物の調査は多くの方々のご協力を得て実施してきました。石川県土木部道路整備課、(株)東京コンサルタンツ、(株)アルスコンサルタンツなど、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 石川県道路整備課, ASR劣化橋梁の維持管理の手引き(案), 2005.
- 2) 鳥居和之, 樽井敏三, 大代武志, 平野貴宣: 能登半島のASR劣化構造物に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.54-59, 2006.
- 3) 山戸博晃, 南善導, 大代武志, 鳥居和之: 石川県産骨材のアルカリシリカ反応性の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1257-1262, 2007.
- 4) 大代武志, 平野貴宣, 鳥居和之: 富山県の反応性骨材とASR劣化構造物の特徴, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1251-1256, 2007.
- 5) 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, pp.185-197, 2004.
- 6) 小林一輔, 白木亮司, 森弥広: ASRを生じたコンクリートの圧縮強度性状に関する2, 3の考察, 土木学会論文集, No.426, pp.91-100, 1991.