

能登有料道路の ASR 劣化橋梁と反応性骨材の岩石学的特徴[†]

湊 俊彦* 鳥居 和之**

ASR-Deteriorated Bridges and Rock Type of Reactive Aggregate on Noto Expressway

by

Toshihiko MINATO* and Kazuyuki TORII**

There exist large numbers of ASR-deteriorated bridges on the Noto expressway through the center of Noto peninsula in Ishikawa Prefecture. In some serious cases, a very severe deterioration which appears to directly be related with the reduction in load carrying capacity of structures has occurred; the significant decrease in compressive strength of concrete, the loss in bonding strength around steel reinforcement, and the fracture of steel reinforcement at the bent and so on. This study aims at investigating both the mix proportions of concrete and the rock type of reactive aggregates used in ASR-deteriorated bridges. Furthermore, the relationships between mechanical properties of cores taken from various portions of bridge pier and ASR degradation ranks classified by the various inspection were discussed for the purpose of the diagnosis and maintenance procedures of these bridges.

Key words: Alkali-silica reaction, Crushed andesites, Rock and mineralogical properties, Fracture of steel reinforcement, Classified ASR-degradation level

1 緒 言

石川県能登半島にある能登有料道路では、2001年に実施した全橋点検において、19橋のASR劣化橋梁が確認されたが、本路線の橋梁44橋(跨道橋1橋含む)は、海岸部と山間部、谷を跨ぐ架橋位置などにより橋梁の構造(形式、橋長、橋脚高)が大きく異なっている。すなわち、Fig. 1に示すように、全長82.9kmのうち、海岸線に面する柳田I.C以南(海浜道)には、川を跨ぐ直線

橋が多く、橋脚高が低く、これらの橋梁では飛来塩分による塩害と軽微なASRが発生している。それに対して、山間部を通る柳田I.C以北(縦貫道)には、谷を跨ぐ多径間の曲線橋が多く、橋脚高も高い。鉄筋破断をとまなう、深刻なASRによる劣化が発生した橋梁19橋は柳田I.C以北に集中しており、凍結防止剤の散布による、ASRと塩害との複合的な劣化が発生している。能登産の安山岩砕石が主に使用されたASR劣化橋梁では、コンクリートの圧縮強度の低下、鉄筋とかぶりコンクリートとの付着損失、スターラップや帯鉄筋の曲げ加工部での破断などが確認されている。^{1), 2)}著者ら³⁾は1990年代の始めから能登有料道路のASR劣化橋梁の調査・診断とその対策の選定に携わってきた。

そこで本研究では、能登有料道路(縦貫道)の19橋のASR劣化橋梁に関するこれまでの調査結果を整理して、橋梁に使用されたコンクリートの配合や反応性骨材の岩石・鉱物学的特徴について調べるとともに、ASR劣化橋梁(橋脚および橋台)の各部位から採取したコアの力学的性質とコンクリートのASR劣化度の評価との関係について考察している。

2 ASR劣化橋梁の調査概要

2.1 ASR劣化度の調査

ASRによるひび割れの発生位置や形態は、構造物の耐久性、安全性および劣化の進行性などを評価するための重要な指標である。このため、能登有料道路では、まず目視調査を橋梁の部位ごとに実施し、ASRによるひび割れの発生状況を把握することになっている。目視調査にお

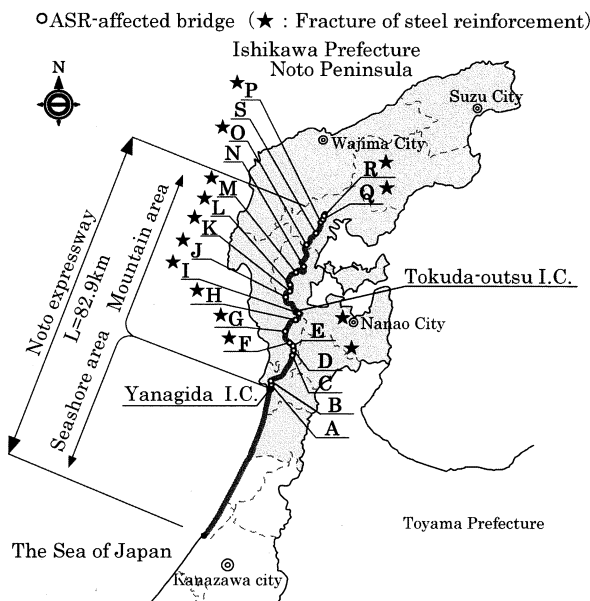


Fig. 1 Location map of ASR-deteriorated bridges on Noto Expressway.

[†] 原稿受理 平成22年2月8日 Received Feb. 8, 2010 ©2010 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 東京コンサルタンツ(株) 〒920-0027 金沢市駅西新町, Tokyo Consultants Ltd., Ekinishishin-machi, Kanazawa, 920-0027

** 正会員 金沢大学理工研究域 〒920-1192 金沢市角間町, College of Sci. & Eng., Kanazawa Univ., Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192

Table 1 Ranking of ASR deterioration level of bridges classified by various inspections.

Bridges	Years passed	ASR deterioration level			
		Bridge abutment	Bridge pier		
			Beam	Column	Footing
A	28	○	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
B	29	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
C	31	Ⅱ	—	Ⅲ	○
D	28	I*	Ⅱ*	Ⅲ	I*
E	27	Ⅲ	I*	Ⅱ	Ⅱ
F	28	Ⅱ*	○	○	○
G	31	Ⅱ	Ⅱ*	Ⅱ	Ⅲ
H	31	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ*
I	30	Ⅲ	Ⅱ*	I*	I*
J	30	Ⅱ*	I*	I	I*
K	33	Ⅱ*	—	Ⅱ	Ⅲ
L	32	Ⅱ*	—	Ⅱ	Ⅲ
M	30	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ*
N	34	Ⅲ	—	Ⅱ	—
O	32	Ⅱ	I*	Ⅲ	Ⅲ
P	32	Ⅱ	—	I*	I*
Q	33	Ⅱ	—	Ⅲ	Ⅱ*
R	33	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	I*
S	32	Ⅲ	—	Ⅲ	○

○ : No deterioration

* : Fracture of steel reinforcement

I, II, III : Ranking of deterioration due to ASR

いて計測したひび割れの幅や長さのひび割れ図は経時的な変化が分かるように記録されている。この際に、ASRによるひび割れの発生状況に基づいて、Table 1に示すように、ASR劣化度を3つのランクに分類しており、劣化度の高い順から、I（幅5mm以上の一方向に卓越した連続的な割れ）、II（幅1mm以上の広範囲にわたる連続的なひび割れ）、III（幅1mm未満の局所的な微細なひび割れ）としている。橋脚の部位ごとのASR劣化度のランクの一例をFig. 2に示す。能登有料道路では、ランクⅢはすぐに補修を実施せず、定期的な経過観測（1度/年）を実施することになっている。ランクⅡはASR膨張が、いまだ収束していないことを前提とした補修（大きなひび割れの注入と断面修復に留める）を実施することになっている。ランクⅠは、鉄筋破断または配筋不良により躯体に大きな割れが進展している可能性があるため、かぶりコンクリートをはつりとり、躯体内部のコンクリートの強度と鉄筋の損傷状況を確認することになっている。とくに、ランクⅠは、それらの試験結果に基づいて、部材の断面力を照査し、補強や打替え、構造変更などの対策を選定することになっている。このようにASR劣化構造物の目視調査の結果を標準化することにより、点検者による評価のばらつきを少なくし、対策の選定をより合理的なものにすることができたと考えている。

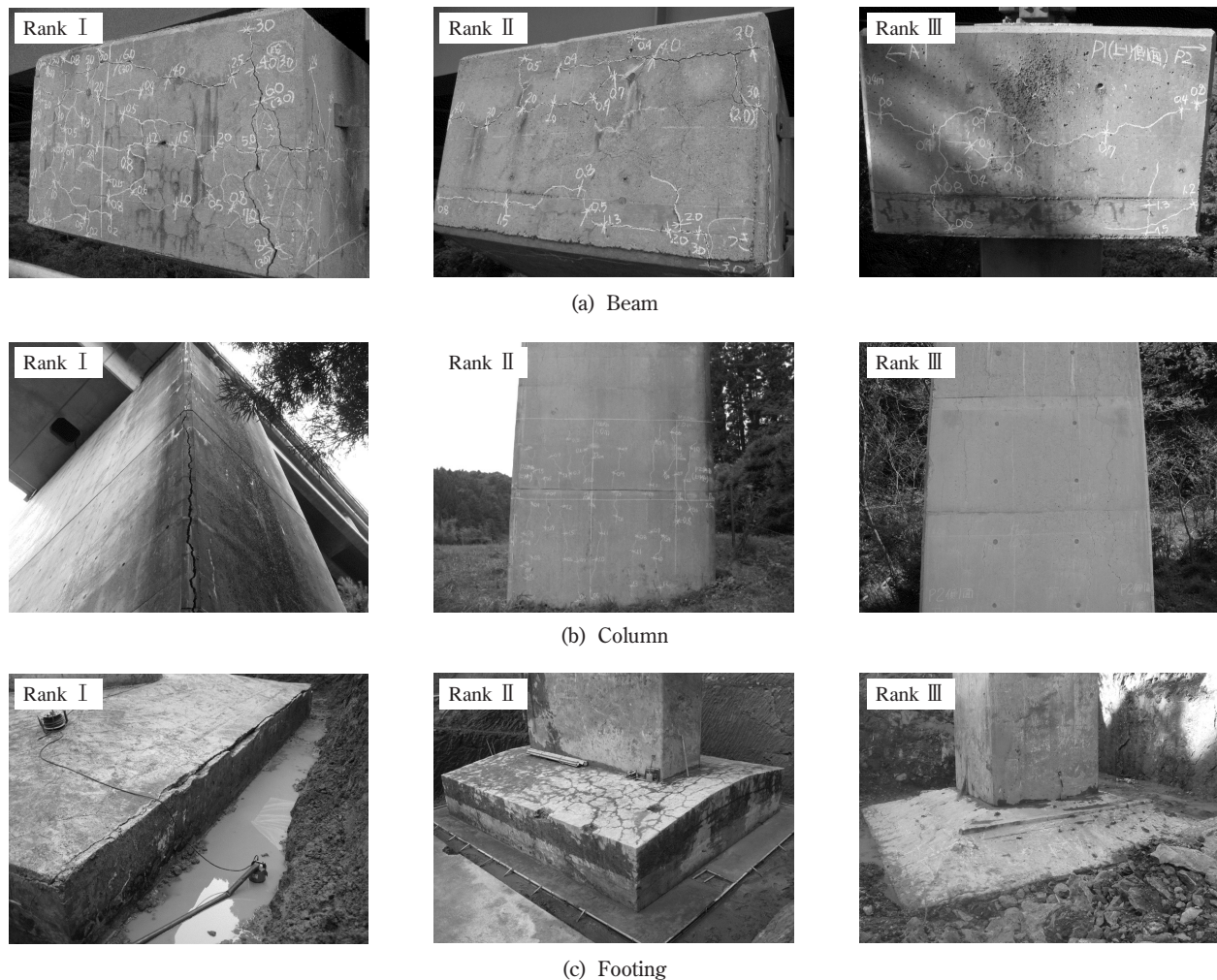


Fig. 2 Classified cracking level for beam, column and footing of ASR-deteriorated bridge pier.

2・2 使用骨材の種類とコンクリートの配合

ASR 劣化橋梁については、今後の ASR の進行性および対策工の必要性などを検討する上で、コンクリートの配合などを確認する机上調査が必要不可欠である。このため、能登有料道路の建設時（1970 年代後半から 1980 年代前半）の工事設計書から生コンプラントを特定し、使用骨材の産地や種類とコンクリートの配合（設計基準強度、セメント量）を調べてきた。なお、通常、使用骨材の種類は配合表には記載されていないものが多いので、聞き取り調査より把握することに努めてきた。

2・3 コアによる各種試験

コア採取の概要を Fig. 3 に示す。コア径は鉄筋との接触を避けるために $\phi 55\text{mm}$ とし、橋脚のはり、柱およびフーチングの各部位から長いコアを採取することを原則としている。また、コアの採取位置は、橋梁の使用・環境条件より日射の有無および路面排水の流出の有無などを考慮している。躯体から採取した貫通コアの外観を Fig. 4 に示す。採取したコアは骨材のひび割れや ASR ゲルの有無を記録後に圧縮強度および静弾性係数を測定している。

3 コンクリートの配合と骨材のアルカリシリカ反応性

3・1 反応性骨材の岩石・鉱物学的特徴と骨材からのアルカリ溶出

能登有料道路のコンクリートに使用された骨材のアルカリシリカ反応性を化学法 (JIS A 1145) により測定した結果を Fig. 5 に示す。金沢大学で実施したコンクリート

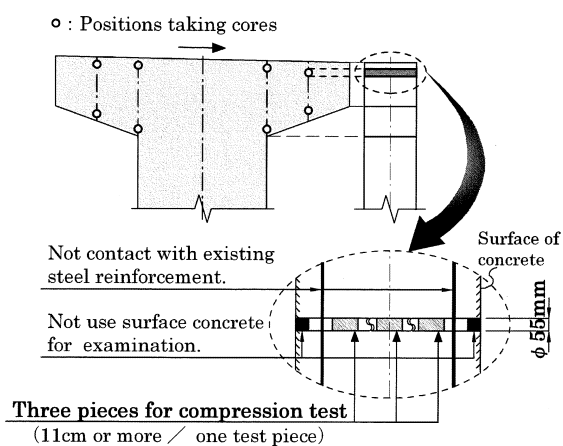


Fig. 3 Outline of core drilling from concrete structure.

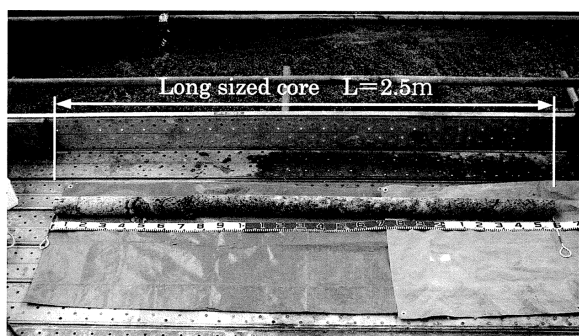


Fig. 4 External appearance of long-sized core taken from internal concrete structure.

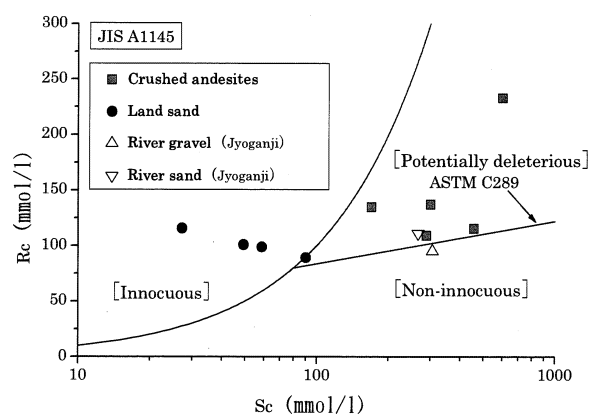


Fig. 5 Alkali-silica reactivity of aggregates assessed by chemical method. (JIS A1145)

試験により、能登産のガラス質安山岩砕石は 60% 程度の骨材置換率にてなだらかなペシマム現象が発生することが確認されているので、ASTM C 289 の「潜在的有害」を示すラインを図中に併記している。

粗骨材に使用された安山岩砕石は、ガラス質の安山岩砕石（骨材の産地：輪島市門前地区、岩石・鉱物学的特徴：火山ガラス質を比較的多く含む両輝石安山岩）と結晶性の安山岩砕石（骨材の産地：輪島市および珠洲市、岩石・鉱物学的特徴：クリストパライトを多く含む、火山ガラスが一部変質しており、スメクタイト化（モンモリロナイト）が進行）の 2 種類があった。能登有料道路が建設された当時の骨材の流通経路を Fig. 6 に示す。19 橋の ASR 劣化橋梁の中で、富山県庄川産または石川県手取川産の骨材を使用した 2 橋（A 橋および B 橋、柳田 I.C 付近）は ASR 劣化が比較的軽微であった。残りの 17 橋のうち、13 橋で門前産の安山岩砕石を使用していた。Fig. 6 に示すように、能登半島の北部には 3 つの主要な安山岩の採石場（珠洲、輪島および門前）が存在するが、今回の調査より、能登有料道路の橋梁建設には骨材の搬送距離が最も短い、門前産の両輝石安山岩砕石が使用されたことが判明した。その他に、安山岩砕石と富山県の黒部川産の川砂利の混合物を使用した 2 橋（J 橋および L 橋）と富山県の常願寺川産の川砂利を使用した 2 橋（C 橋および N 橋）があった。

一方、細骨材は C 橋および N 橋の川砂を除く能登産の川砂、陸砂に ASR は発生していなかった。

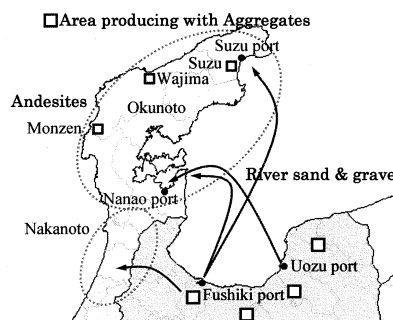


Fig. 6 Transportation route of aggregates in construction of bridges.

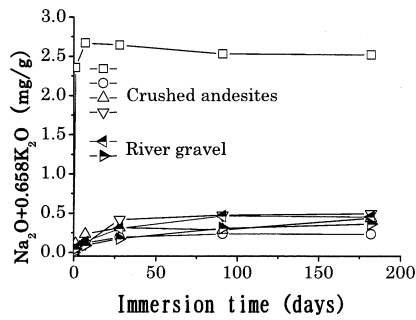


Fig. 7 Amount of alkalis released from crushed andesites and river gravels.

安山岩砕石のアルカリ溶出量の測定結果を Fig. 7 に示す。骨材からのアルカリ溶出試験法は、水酸化カルシウム飽和溶液浸漬法 (38°C) を用いている。アルカリ溶出試験では、破碎した骨材 (5mm 以下) を水酸化カルシウム飽和水溶液に攪拌・混合した後に、温度 38°C のプラスチック容器中に保存し、所定の材齢にて溶液中のナトリウムイオン (Na^+) およびカリウムイオン (K^+) の濃度を原子吸光光度分析により測定した。骨材からのアルカリ溶出量 (mg/g) は骨材 1g あたりの Na_2O 等価アルカリ溶出量 ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658\text{K}_2\text{O}$) で表示した。これまでの調査により、能登有料道路のコンクリートでは 30 年以上が経過した現在でも ASR が終了していないことが明らかになってきた。これは、Fig. 7 に示すように、安山岩砕石の含有鉱物である長石や火山ガラス、粘土鉱物などから長期にわたりアルカリがコンクリート中に溶出しているのが主要な原因と考えられた。⁴⁾ また、コアの薄片研磨試料の代表的な偏光顕微鏡観察の結果を Fig. 8 に示す。これまでの研究^{1), 3)}より、ガラス質の安山岩砕石は一旦 ASR が発生すると火山ガラスの溶解により骨材からもアルカリが供給され、ASR ゲルの生成が長期にわたり生じ

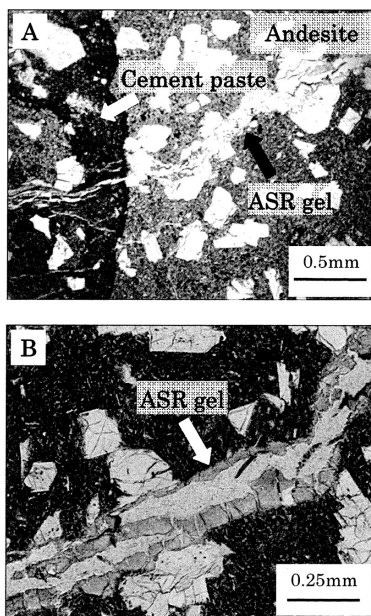


Fig. 8 Polarization microscopic observations for thin section of cores taken from E bridge. (A : Interfacial zone, B : Andesite particle zone)

るものと考えられる。一方、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、両者の含有率の相違と火山ガラスの変質の程度 (ス멕タイト化) により能登産の安山岩砕石のアルカリシリカ反応性を適切に評価できるものと考えられる。⁵⁾

3・2 コンクリートの配合とセメントのアルカリ量

能登有料道路に使用されたセメントは早強ポルトランドセメントの一例 (E 橋) を除くとすべて普通ポルトランドセメントであった。当時の能登地方では七尾市の S セメントのものが流通していた。セメントのアルカリ量を未水和セメント粒子の EPMA による分析結果より推定すると、セメントの等価アルカリ量は約 0.8% であった。⁶⁾ 橋台や橋脚に使用されたコンクリートの単位セメント量は $270 \sim 320\text{kg/m}^3$ なので、セメントからのアルカリ量を計算すると $2.2 \sim 2.6\text{kg/m}^3$ になる。この値は JIS A 5308 の ASR 抑制対策としてのコンクリート中のアルカリ総量規制値 3.0kg/m^3 を十分に下回っている。なお、路面排水が流出する部位は凍結防止剤 (NaCl) の影響を受けるが、その影響の範囲はコンクリートのかぶり部分 (最大 10cm 程度) までであり、ASR が発生している躯体の内部は凍結防止剤の影響を受けていないと推察された。したがって、能登有料道路の ASR はコンクリートの単位アルカリ量が 2.5kg/m^3 以下で発生しており、これは安山岩砕石からのアルカリの影響 ($0.5 \sim 1.0\text{kg/m}^3$) が ASR 抑制対策において考慮されていなかったことによるものと考えている。

4 構造物の ASR 劣化度とコンクリートの強度特性

4・1 骨材の種類との関係

能登有料道路の ASR 劣化橋梁には、前述したとおり、主に 3 種類の骨材が使用されていた。安山岩砕石を使用した 13 橋では、Fig. 9 に示すように、鉄筋破断やかぶりコンクリートと鉄筋との付着損失などの、深刻な ASR 劣化が発生した。また、安山岩砕石と黒部川産川砂利の混合物を使用した 2 橋では、骨材に塩分が付着していたこともあり、安山岩砕石のみの場合よりも ASR 劣化がより顕著になった。さらに、常願寺川産の骨材が使用された 2 橋では、鉄筋破断やコンクリートの強度低下などは発生しなかった。常願寺川産の骨材は富山県内の河川産骨材の中でもっとも反応性が高いものであり、鉄筋破断

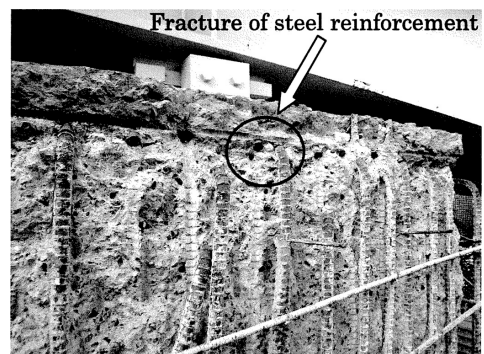


Fig. 9 Overview of fracture of steel reinforcement in beam of bridge pier. (J bridge)

やコンクリートの脆弱化が発生した事例も報告されているが、能登有料道路の骨材にはアルカリシリカ反応性が比較的小さいものが使用されたようである。⁷⁾

4・2 部位による ASR 劣化度の相違

能登有料道路でのコアの強度試験の全結果をまとめると、Fig. 10 に示すとおりである。能登有料道路の橋台および橋脚（はり、柱およびフーチング）の設計基準強度は、ラーメン構造と SRC 構造の橋梁以外、21 または 24N/mm² である。また、能登有料道路の建設当時の配合強度は設計基準強度の 20 から 30% 増しに設定されていることが知られている。したがって、通常、ASR が発生していない、健全なコンクリートから採取したコアの圧縮強度は 30N/mm² を下回ることはないことを確認している。一方、代表的な橋梁（D 橋）の各部位から採取したコアの強度試験の結果をまとめると、Fig. 11 に示すとおりである。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、コンクリートの ASR 劣化度が大きいものと判断できる。Fig. 10 および Fig. 11 より明らかなように、橋脚のはりやフーチングより採取したコアは柱からのものと比較して ASR 劣化度がより大きくなるのが分かる。これは部位ごとの使用・環境条件の影響よりも部材の鉄筋比による拘束条件の相違が大きいことによるものである。また、

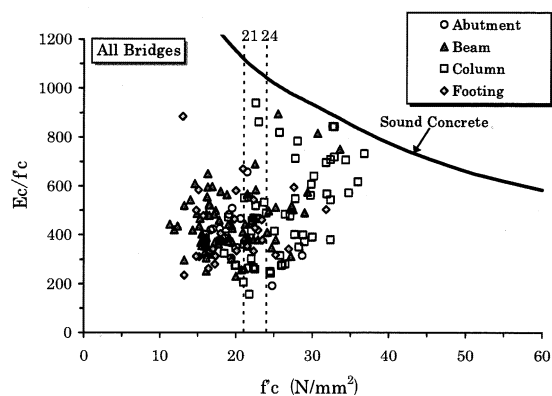


Fig. 10 Relations between compressive strength ($f'c$) and elastic modulus ($E_c/f'c$) in cores taken from all bridges.

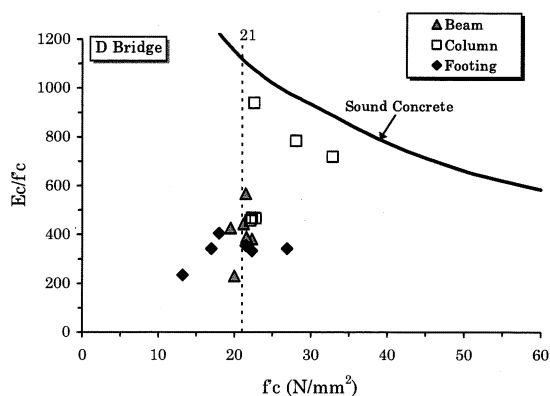


Fig. 11 Relations between compressive strength ($f'c$) and elastic modulus ($E_c/f'c$) in cores taken from D bridge.

D 橋の橋脚・はりでは、圧縮強度の大きな低下がないにも係らず静弾性係数の最小値が標準値の 20% と著しく低下していたのが特徴である。とくに、橋脚のはり張出し部は水分と日射（温度変化）の影響を顕著に受ける箇所であり、路面に片勾配がついている単純桁形式の橋梁では、伸縮装置から橋脚のはり上面へ落下した路面排水が一方に偏って流出するので、同一橋脚においても流出側とその反対側とで ASR 劣化度が大きく相違することがあった。それに対して、柱の圧縮強度は設計基準強度を上回っており、静弾性係数の低下もわずかであった。ただし、一部の ASR 劣化橋梁の柱では、Fig. 12 に示すように、配筋の不具合や帯鉄筋の破断が重なり、躯体内部にまで著しい ASR 劣化が発生していた事例があった。一方、能登有料道路の橋脚フーチングは岩着した直接基礎形式であった。また、周囲は谷地形であり、能登地方特有の水分の多い火山灰質土に覆われており、フーチングの周囲は常に地下水が滞水していたことから、フーチングははりや柱より ASR が促進されていた。さらに、フーチングの上面は、締固め不十分なコンクリートが打設されたことや、鉄筋破断により拘束効果が減少したことにより、コアの圧縮強度が設計基準強度を大きく下回っていた。それに対して、フーチングの柱基部の付近や躯体下部では、静弾性係数は低下しているが、圧縮強度の低下が小さくなった。これは、フーチング下面の鉄筋量が多いことや、埋戻しコンクリートの拘束により、フーチング下部の ASR による膨張が抑制されたことによるものと考えられる。³⁾

4・3 鉄筋破断の有無の影響

ASR 劣化橋脚の各部位における鉄筋破断の有無の影響をまとめると、Fig. 13 に示すとおりである。鉄筋破断が発生した部位は、コアの圧縮強度および静弾性係数ともに大きく低下しているのが明らかになった。これは過大な膨張が発生した箇所鉄筋破断が発生していることや、鉄筋が破断したことにより、コンクリートの拘束力が低下し、ASR 膨張による劣化がさらに進行したことが関係している。また、能登産の安山岩碎石における ASR の反応領域は、骨材の表面から 2mm 程度の領域に限られており、わずかな骨材の反応でも大きな膨張力をコンク

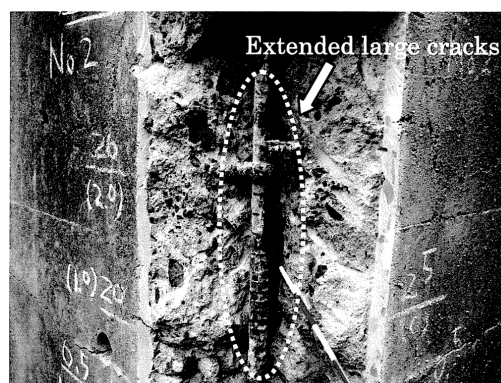


Fig. 12 Overview of large cracks extended from corner of column. (P bridge)

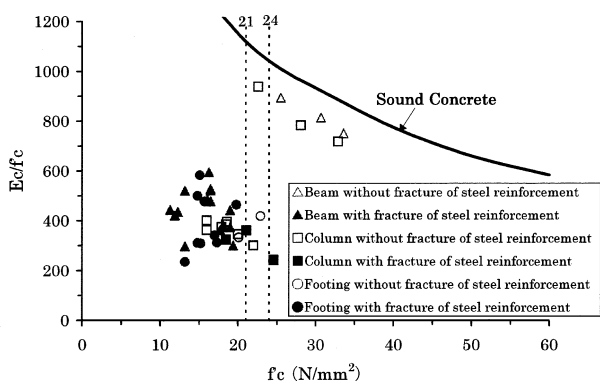


Fig. 13 Relations between compressive strength ($f'c$) and elastic modulus ($E_c/f'c$) in cores with and without fracture of steel reinforcement.

リートに発生させていることに注目すべきであると考えている。¹⁾同時に、このことは骨材の内部には未反応部分が多く残っていることを意味しており、コンクリートにアルカリと水分が存在すれば、コンクリートの膨張はさらに長期にわたり継続することになり、20年以上の年月を経て鉄筋破断という最終的な劣化形態が顕在化してきたと考えている。

5 結 言

本研究では、能登有料道路の ASR 劣化橋梁に使用されたコンクリートや骨材の特徴を調べるとともに、部位ごとの ASR 劣化度の評価との関係について検討した。能登有料道路における ASR 劣化橋梁の調査を通して得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

(1) 目視による調査結果の評価基準を標準化することにより、評価のばらつきを少なくし、詳細調査およびその後の対策の選定をより合理的なものにすることができた。

(2) 能登有料道路の ASR 劣化橋梁 19 橋のうち、13 橋で、能登産の安山岩砕石が使用されていた。また、能登産の安山岩砕石はアルカリシリカ反応性が高く、長期に渡りアルカリを溶出する性質が確認された。

(3) 安山岩砕石を使用した橋脚において、はりやフーチングより採取したコアは柱からのものと比較して、ASR

劣化度がより大きくなった。これは、橋脚の部位ごとの使用・環境条件や部材の鉄筋比の相違によるものであった。

(4) 鉄筋破断が発生した ASR 劣化橋梁には能登産の安山岩砕石のみの場合と、安山岩砕石および川砂利の混合骨材による場合があった。

本調査の実施に当たり、石川県道路公社にご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) K. Okuyama and K. Torii, "Alkali-silica reactivity of andesite in Noto peninsula and monitoring of expansion behavior of concrete bridge piers", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.57, No.10, pp.981-986 (2008).
- 2) K. Ishii, Y. Okuda, S. Wasada and K. Torii, "Case studies of countermeasures for ASR-deteriorated concrete piers", *Concrete Journal*, Vol.46, No.1, pp.55-60 (2008).
- 3) K. Torii, M. Miyamura, T. Minato and G. Nishikawa, "Deterioration of ASR-affected footing and its countermeasures", *Concrete Journal*, Vol.46, No.4, pp.27-33 (2008).
- 4) H. Yamato, Y. Minami, T. Daidai and K. Torii, "Evaluation of alkali-silica reactivity of aggregates in Ishikawa prefecture", *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.29, No.1, pp.1257-1262 (2007).
- 5) K. Torii, T. Daidai, H. Yamato and T. Hirano, "Data base of reactive aggregates and ASR-deteriorated structure in Ishikawa prefecture", *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.30, No.1, pp.1017-1022 (2008).
- 6) M. Nomura, N. Nishitani, T. Shimizu and K. Torii, "Investigation on alkalies release from aggregates in concrete structures", *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.28, No.1, pp.791-796 (2006).
- 7) T. Daidai and K. Torii, "A proposal for the Mitigation and maintenance procedure based on the survey on actual condition of ASR-affected bridge in Toyama prefecture", *Concrete Research and Technology*, Vol.20, No.1, pp.45-57 (2009).