

論文 コンクリート構造物の鉄筋破断および配筋不良の ASR 劣化に及ぼす影響

湊 俊彦*1・鳥居 和之*2

要旨： ASR により過大な膨張が発生したコンクリート構造物では、鉄筋破断とそれに伴う躯体内部への割れの進展など、構造物の安全性に係る深刻な劣化が発生している。本研究は、能登地方における ASR 劣化橋梁の調査および対策の事例に基づいて、鉄筋破断が発生した構造物に使用された反応性骨材や部位ごとの ASR 劣化度について調べるとともに、設計・施工時の配慮不足や配筋不良が構造物の ASR 劣化に与えた影響について 2, 3 の考察を行っている。

キーワード： ASR, 安山岩碎石, 鉄筋破断, 配筋不良, ASR 対策の選定

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) により過大な膨張が発生したコンクリート構造物においては、鉄筋破断による新たな劣化形態が問題になっている。能登地方は、安山岩碎石がコンクリート用骨材として長年にわたり使用されており、橋梁やトンネル、擁壁などの道路構造物に ASR 劣化が多く発生している。著者らは、1980 年代後半より能登有料道路の ASR 劣化橋梁の調査診断と補修・補強に取り組んできている¹⁾。能登有料道路 (山側縦貫) では、図-1 に示すように、ASR 劣化橋梁の 19 橋のうち、14 橋の下部構造 (橋台および橋脚) に鉄筋破断が発生している。さらに、2007 年 3 月の能登半島地震後の橋梁の復旧工事では、橋脚のフーチングに ASR による鉄筋破断を伴う劣化が相次いで発見されている。ASR に対する補修としては、水分を遮断する目的で表面被覆工法が実施されてきたが、ASR 膨張を完全に抑制することは不可能であり、とくに鉄筋破断が発生した構造物では打替えや構造変更による、新たな ASR 対策を選定せざるを得なかったのが現状である²⁾。

本研究は、能登有料道路での ASR 劣化橋梁の調査および対策の事例に基づいて、コンクリートに使用された安山岩碎石の岩石・鉱物学的性質と鉄筋破断を伴う ASR 劣化の特徴について調べている。また、鉄筋破断が発生した構造物から採取したコアの力学的性質 (圧縮強度および静弾性係数) を測定するとともに、設計・施工時における配慮不足や配筋不良が構造物の ASR 劣化に与えた影響について考察している。

2. 安山岩碎石の岩石・鉱物学的性質とコンクリートの特徴

能登地方では、河川産骨材が枯渇化してきた 1970 年代以後に、能登半島北部の安山岩がコンクリート用骨材

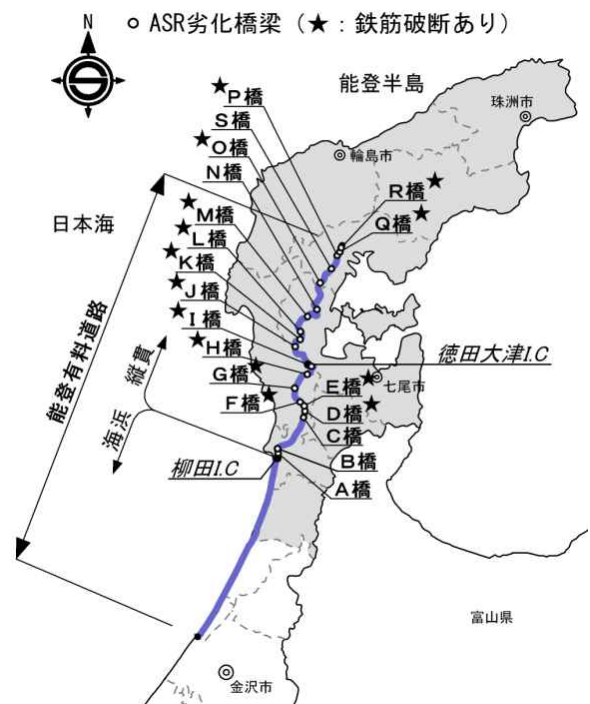


図-1 能登有料道路の ASR 劣化橋梁

として本格的に使用されている。安山岩碎石の化学法 (JISA 1145) による判定結果を図-2 に示す。能登地方の安山岩碎石は、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・変質の影響を受け、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る³⁾。次に、安山岩碎石のモルタルバー法 (JIS A 1146) による判定結果を図-3 に示す。安山岩碎石では、火山ガラスよりもクリストパ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、スメクタイト化がかなり進行したもの以外はモルタルバー法でも「無害でない」と判定される。さらに、ガラス質

*1 東京コンサルタンツ (株) (正会員)

*2 金沢大学理工研究域環境デザイン学系教授 工博 (正会員)

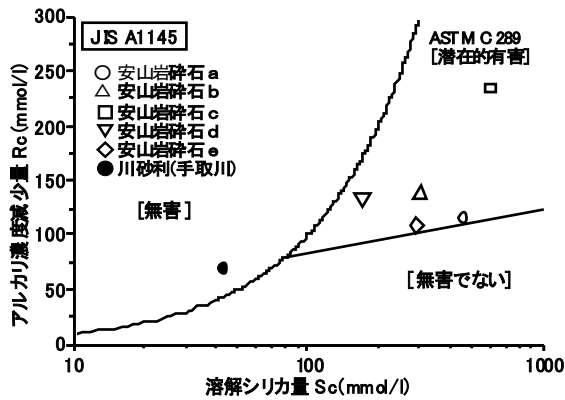


図-2 化学法による判定結果 (JISA 1145) ⁴⁾

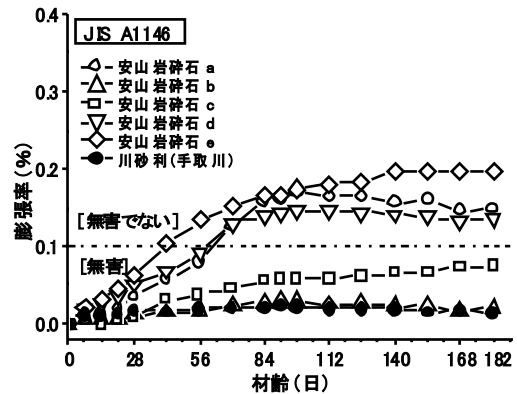


図-3 モルタルバーの膨張挙動 (JISA 1146) ⁴⁾

の安山岩碎石は、骨材自身からも多量のアルカリ分をコンクリート中に溶出する性質があるので、この地方のASRは膨張が長期にわたり継続することが特徴である⁴⁾。実際に、能登有料道路の橋梁において、鉄筋破断を伴う大きな劣化が発生した構造物には高い反応性をもつ安山岩碎石が使用されていた。ただし、2橋梁は富山県常願寺川産の川砂利を使用しており、ASRによる劣化が発生した。図-4は鉄筋破断が発生したO橋の橋脚の外観である。この橋脚は建設後約30年が経過しており、柱頭部に8mm程度の大きな割れが発生していた⁵⁾。コアの薄片試料を偏光顕微鏡およびEPMAにて観察した結果(図-5および図-6参照)より、安山岩碎石の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。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、鉄筋破断という最終的な劣化形態が顕在化しているものと考えている。

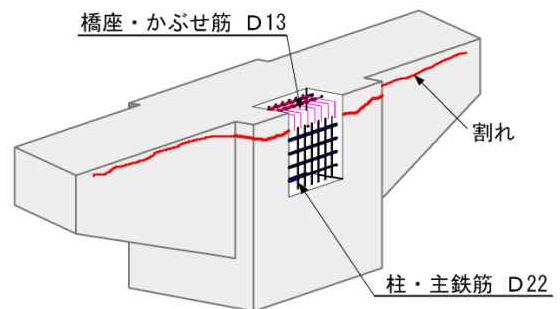


図-4 鉄筋破断が発生した橋脚・はりの外観

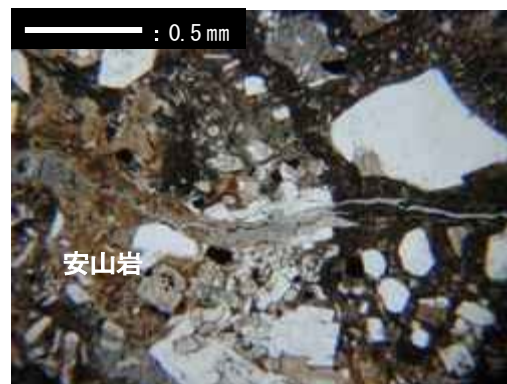


図-5 安山岩碎石を使用したコンクリート薄片の偏光顕微鏡観察結果(単ニコル)

3. ASR劣化橋梁の鉄筋破断の特徴とコアの力学的性質

3.1 構造物の鉄筋破断の特徴

能登有料道路におけるASR劣化橋梁の鉄筋破断状況を写真-1に示す。鉄筋破断を伴う劣化形態は、安山岩碎石に代表される、高い反応性の骨材を使用し、ASRによる膨張が長期にわたり継続した場合に、電炉鉄筋の曲げ加工部に存在するひび割れから誘発されるものであると考えている。能登有料道路においても、降雨や路面排水の影響を常に受ける、橋台の橋座(写真-1(a))や橋脚のはり先端(写真-1(b))で多く確認されているが、最近では橋脚の柱や土中部のフーチングでの鉄筋破断の事例も発生している。一般に、ASRによる鉄筋破断は、構造物内で鉄筋による拘束が相対的に小さくなる、

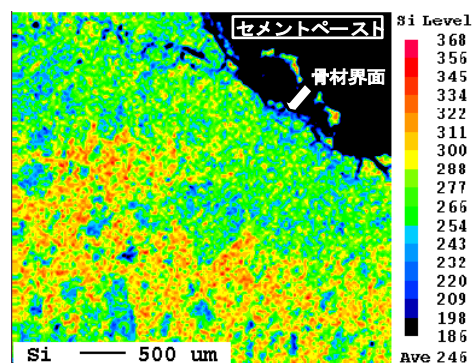


図-6 安山岩碎石を使用したコンクリート薄片のEPMA分析(骨材界面からのSi濃度の変化)⁵⁾



(a) 橋台・橋座 (D橋)



(b) 橋脚・はり (D橋)



(c) 橋脚・柱 (I橋)



(d) 橋脚・フーチング (I橋)

写真-1 ASR劣化橋梁の各部位における鉄筋破断の状況

低鉄筋比の箇所に集中する傾向にあるのが特徴である。例えば、中空橋脚の柱では、中空断面部と土中部分をコンクリートで中埋めした充実断面部との境界から下方方向に著しい割れが発生し、躯体内部の帯鉄筋が破断している事例が発見されている(写真-1(c))。これは、コンクリート断面の増加により帯鉄筋の鉄筋比が相対的に小さくなったために、帯鉄筋の隅角部に大きなASR膨張力が作用したことによるものである。同様に、フーチングでは、躯体内部のASR膨張力が上面主鉄筋の隅角部に集中的に作用したことによるものである(写真-1(d))。

3.2 鉄筋破断を生じた橋脚から採取したコアの力学的性質

能登有料道路の調査では、ASR劣化橋脚の躯体内部からコア(φ55mmまたはφ100mm)を3本ずつ採取し、コアの力学的性質(圧縮強度および静弾性係数)を調べている。この際に、採取位置の選定には日射の有無や路面排水の流出の有無などの橋梁の使用・環境条件を考慮している。ASR劣化橋脚の各部位から採取したコアの圧

縮強度と静弾性係数/圧縮強度比の関係を図-7に示す。この図では、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できる。橋脚の設計基準強度は21 N/mm²または24 N/mm²であり、建設当時(1970年代後半から1980年代前半)の配合強度は設計基準強度の20%

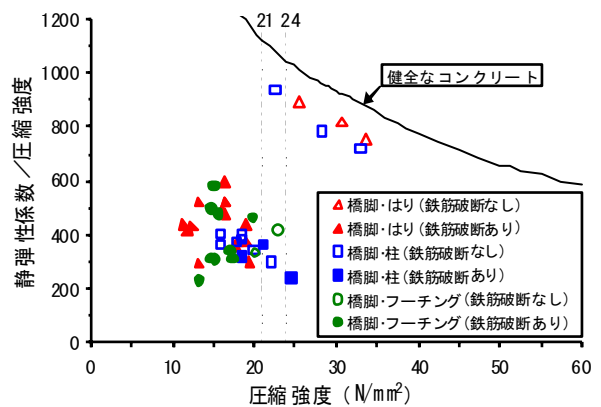


図-7 ASR劣化橋脚から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数の関係

から 30%増しに設定されていることが知られている。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 30 N/mm^2 を下回ることはない。それに対して、ASR により鉄筋破断が発生したコンクリートでは、図-7 に示すように、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で鉄筋破断が発生していることと、鉄筋が破断したことにより、コンクリートへの拘束力が低下し、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。

4. 破断鉄筋の化学成分および機械的性質

能登有料道路でこれまでに確認された破断鉄筋は、すべて電炉鉄筋（SD 295A 相当、富山県内の電炉会社にて製造）であり、鉄筋径は D10 mm から D32 mm であった。鉄筋破断の箇所は橋台の橋座鉄筋、橋脚・はりのスターラップや橋脚・柱の帯鉄筋、橋脚・フーチングの主鉄筋などであり、すべて鉄筋の曲げ加工部で発生していた。また、鉄筋の化学成分に関しては、鋼材の脆性破壊との関係で問題となる、リン、イオウなどの不純物の含有量は基準値を大きく下回っており、鉄筋の機械的性質もすべて JIS 規格を満足していた。ただし、鉄筋の内部組織は通常のフェライト・パーライトであるが、非金属介在物からなる層があり、その影響で鉄筋の衝撃破壊強度が低下していると推察された。曲げ加工部で破断した鉄筋は、これまで報告^{6) 7)}されているように、鉄筋の破断面が平滑で、絞りがなく、鉄筋の破断面には内側からの半月状の割れとそれから進展した破壊の痕跡が観察された。さらに、鉄筋破断には至っていないが、鉄筋の節の付け根に微細な疵や内部に進展した割れが発生している鉄筋も調査時に多く発見されている。当時の鉄筋は、曲げ加工の作業時に異形鉄筋の節の付け根に微細な疵が発生しているものがあり、鉄筋の品質管理にも十分な配慮がなされていなかったために、鉄筋に内在した欠陥が ASR 膨張による鉄筋破断を誘発したと考えている。

5. 橋脚の構造欠陥と ASR 劣化の関係

5.1 構造欠陥による影響

能登有料道路では、反応性の高い安山岩砕石の使用や凍結防止剤の散布による外部からのアルカリ供給、多雨多湿な気候など、ASR 劣化を継続させる要因がすべて整っていたと言える。その一方で、橋梁の調査結果より、橋脚に発生した、深刻な ASR 劣化の多くが、設計・施工時の配慮不足や配筋不良が引き金になっていることも明らかになってきた。通常、ASR 膨張は相対的に弱点となる構造物の箇所に集中的に作用するので、特定の箇所に想定外の劣化を発生させるのを経験してきた。すなわ

ち、構造物の相対的な弱点部とは、コンクリートの初期欠陥（締固め不足、打継目、温度応力によるひび割れなど）や構造細目の不備箇所（端部フック、定着長さの不足、鉄筋の番線による接合部など）であり、コンクリートの表面に 5mm 以上の大きな割れが観察される箇所では、鉄筋破断の問題だけでなく、上記の施工不良や配筋不良を想定した調査が必要であることが明らかになってきた。

橋脚のはり先端に生じた ASR 劣化の事例（割れ）を写真-2 に示す。図-8 には、はり先端部の配筋状態も併せて示している。この箇所では、上面主鉄筋と下面主鉄筋が相互に定着されていないので、そこが外れて開いたことがわかる。この割れは、躯体内部の 20cm まで進展していた。さらに、水平主鉄筋と端部筋も相互に定着されていないので、両鉄筋の境界に鉛直方向の割れが発生している。なお、前述した O 橋の柱頭部の割れも、かぶせ筋が柱・主鉄筋の間隔と異なっていたことで、鉄筋が抜け出した状態となり、定着長さも不足していたので、かぶせ筋先端部から割れが発生したものである。



写真-2 橋脚・はり先端の割れ (D 橋)

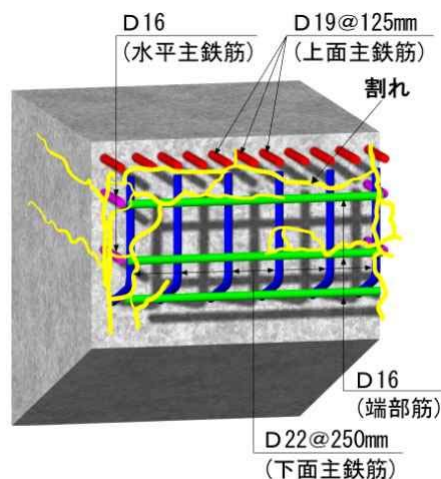


図-8 はり先端の割れと配筋の関係 (D 橋)

同様に、橋脚の柱でも配筋の不具合が原因となり、ASR劣化が躯体内部にまで及んでいる事例があった。写真-3に示すように、P橋の柱の隅角部に1~2cm程度の割れが観察された。割れの深さを調べるために、柱の橋軸方向で貫通コア（長さ3m）を採取した。コアが割れた位置から推定すると、隅角部の割れは45°の方向で躯体中心に伸びており、その深さは約50cmであった。これは、図-9に示すように、柱の周方向鉄筋が4方向にそれぞれ配置されており、フックがないので、コンクリートへの拘束が全く発揮されていなかったことが、割れを躯体内部にまで進展させた要因であった。

一方、橋脚のフーチングでは、上面に締固め不足の脆弱なコンクリートが打設されていたこと、図-10に示すように、躯体下部が下面主鉄筋と埋戻しコンクリートとで拘束されているために、ASRによる膨張力が躯体上部に集中的（末広がり形の膨張）に作用したこと、さらに配筋不足が要因となり、他の部位よりも深刻なASR劣化が発生していた。

能登有料道路は、周囲が谷地形であり、能登地方特有の水分の多い火山灰質土に覆われているのが特徴である。フーチングの周囲は常に地下水が滞水しており、ASRを促進させる条件が揃っていた。写真-4および図-11



写真-3 橋脚・柱の隅角部の割れ (P橋)

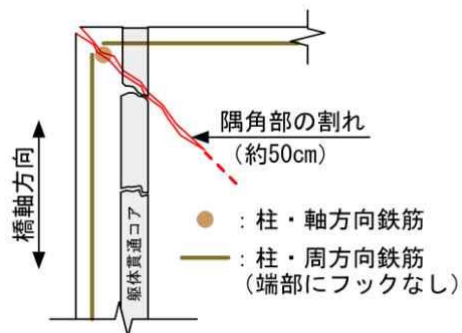


図-9 柱の隅角部の割れと配筋の関係 (P橋)

にフーチングの配筋状態と割れとの関係を示す。上面主鉄筋の定着長さが不足しており、下面主鉄筋にフックもなく、間隔も異なっていた。このため、鉄筋が双方から抜け出した状態になっており、隅角部に著しい割れを発生させたことがわかる。割れの近傍から採取した鉛直コアより、割れの深さが90cmにも達していることが判明した。

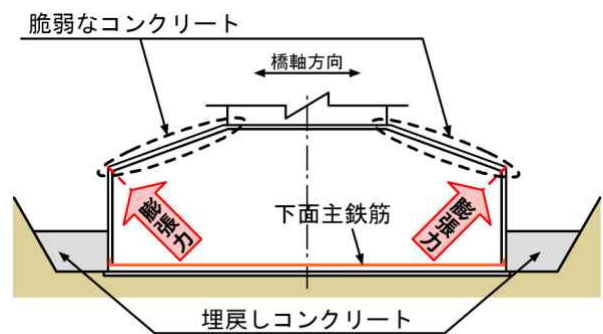


図-10 橋脚・フーチングのASR膨張の模式図



写真-4 橋脚・フーチングの隅角部の割れ (J橋)

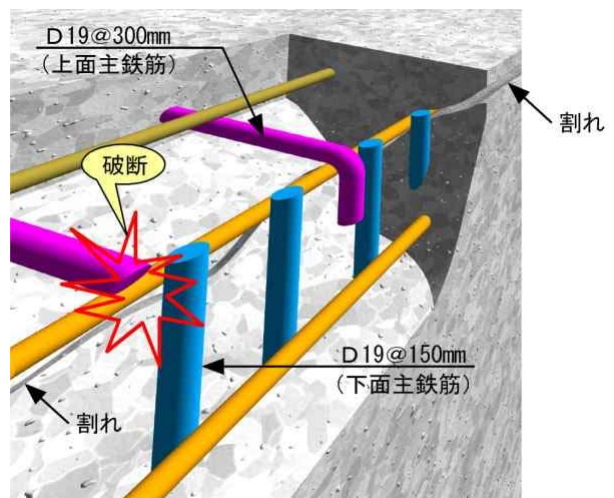


図-11 フーチングの隅角部の割れと配筋の関係 (J橋)



写真-5 橋脚・はりの検査路

5.2 鉄筋破断が発生した橋脚の対策

当然、鉄筋破断が発生した構造物では、安全性や耐久性が低下していることを前提とした対策が必要になる。同時に、能登有料道路では、構造物の重要性や維持管理費用を考慮するとともに、安山岩砕石のASR膨張がまだ収束していないことを対策工の選定において十分に考慮しなければならなかった。

以上の経緯より、橋脚のはりでは、今後の維持管理の容易さから、支保工で仮受けした後に、全面または部分的な打替えを実施することを基本とした。この際に、鉄筋破断および定着長が不足している箇所は添え筋し、フレアー溶接で接合した。写真-5は橋脚のはり先端を部分的に打替えた箇所であり、日常的な監視ができるように、検査路も併せて設置した。一方、土中部の橋脚フーチングは、躯体内部の割れの影響を受けた箇所をすべて取り壊し、打替えた。また、橋脚の柱は、破断した帯鉄筋の接合と割れの影響範囲をポリマーセメントモルタルで断面修復した後に、RC巻立て工法やPC鋼材巻立て工法などの耐震補強を実施した。さらに、大規模な打替えや補強工法の実施時には、それらの効果を検証するためのモニタリングを実施し、得られた成果を今後の対策の改良に反映させるようにした。

6. 結論

能登有料道路のASR劣化橋梁は、1990年代後半より順次、補修・補強工事に着手し、2007年能登半島地震後の橋梁復旧工事においても主要な橋梁のASR対策が施されたことにより、ほぼASR対策の目処がついたと考えている。今後は、これまで実施してきた対策工の有効性を検証していくことが重要であると考えている。

能登有料道路におけるASR劣化橋梁の調査より得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 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と一部、富山県の常願寺川産の川砂や川砂利が使用されていた。
- (2) 構造物の鉄筋破断は、ASRによる膨張が長期にわたり継続したことと、曲げ加工部に微細な疵がある電炉鉄筋が使用されたこと、が原因であった。
- (3) 構造物の鉄筋破断は、構造物内で鉄筋による拘束が相対的に小さくなる箇所、すなわち低鉄筋比の箇所や水の影響を受ける箇所に集中的に発生した。
- (4) ASR劣化は構造物の初期欠陥や施工不良の箇所で顕在化し、さらにその箇所の配筋が適切でないと想定外のASRによる劣化形態が現れた。
- (5) 鉄筋破断が発生した構造物では、ASR膨張が収束していないことを前提にして、全面的または部分的に打替えることによる対策を選定した。

謝辞：本調査の実施に当たり石川県道路公社、石川県土木部ならびに(株)国土開発センター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) 鳥居和之、宮村雅之、湊俊彦、西川元気：能登有料道路の基礎構造物のASR劣化とその対策、コンクリート工学、Vol.46, No.4, pp.27-33, 2008.4
- 2) 奥山和俊、石井浩司、笹谷輝彦、鳥居和之：亀裂変位計を用いたモニタリングによるASR劣化橋梁の維持管理、コンクリート工学年次論文集、Vol.130, No.1, pp.1053-1058, 2008
- 3) 鳥居和之、大代武志、山戸博晃、平野貴宣：石川県の反応性骨材とASR劣化構造物のデータベース化、コンクリート工学年次論文集、Vol.130, No.1, pp.1017-1022, 2008
- 4) 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
- 5) 奥山和俊、鳥居和之：能登産の安山岩砕石のアルカリシリカ反応性とコンクリート橋脚の膨張性状のモニタリング、材料、57(10), 981, 2008.10
- 6) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するかー試験、診断と対策の課題ー、セメント・コンクリート、No.696, pp.1-9, 2005
- 7) 土木学会コンクリート委員会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書ー鉄筋破断と新たなる対応ー、コンクリートライブラリー、No.124, 土木学会, 2005