

## 論文 能登半島の ASR 劣化構造物に関する一考察

鳥居和之\*<sup>1</sup>・樽井敏三\*<sup>2</sup>・大代武志\*<sup>3</sup>・平野貴宣\*<sup>4</sup>

**要旨:** 能登地方にはアルカリシリカ反応 (ASR) による劣化を受けた構造物が多く存在する。本研究では、能登地方の ASR 劣化構造物の発生状況をコンクリートに使用された安山岩砕石の岩石・鉱物学的特徴やアルカリシリカ反応性との関係から検討するとともに、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の変化について明らかにした。また、破断鉄筋の詳細調査より、ASR 膨張によって鉄筋破断に至るまでの亀裂の発生とその進展の過程を解明した。

**キーワード:** ASR, 鉄筋破断のメカニズム, 岩石・鉱物学的調査, アルカリシリカ反応性試験

### 1. まえがき

石川県の能登地方にはアルカリシリカ反応 (ASR) による劣化を受けた構造物が多く存在する。これらの構造物の中で、能登有料道路の ASR 劣化構造物 (橋梁, トンネルなど) は、10 年ほど前から対策が実施され、構造物の調査・診断や補修・補強の検討結果を逐次報告してきた<sup>1)</sup>。昨年度、石川県では ASR 対策検討委員会を立ち上げ、能登有料道路以外の、能登地方の橋梁の ASR 発生状況を調べた結果、橋梁数 620 の内の約 230 のものに ASR による劣化の兆候があることを確認した。橋梁の建設時期は、全国と同様に昭和 40 年代および 50 年代に集中しており、建設後 20 年から 30 年が経過した現在ではコンクリートの強度低下、はく離・はく落、鉄筋の破断などの重大な ASR 損傷が発生しているものがある。著者の一人は全国の ASR 劣化構造物の状況を調べてきたが、一地域にこれほど多くの ASR 劣化構造物が集中しているのは能登地方だけである。能登地方の ASR は半島北部で産出する安山岩が昭和 40 年代半ばから本格的にコンクリート用砕石として流通したことによるものである。最近の調査では、能登地方の安山

岩は新鮮なもの (黒色) と風化・変質を受けたもの (茶褐色) の 2 種類があり、とくに後者のものは ASR 損傷が顕著であることが明らかになってきた<sup>2)</sup>。

本研究は、能登地方の ASR 劣化構造物の発生状況をコンクリートに使用された安山岩砕石の岩石・鉱物学的特徴や構造物から採取したコアの力学的性質より検討したものである。さらに、能登地方の構造物で問題となっている鉄筋破断の調査結果より、ASR 膨張による鉄筋破断のメカニズムについても 2, 3 の考察を行っている。

### 2. ASR 劣化構造物の発生地域と反応性骨材の分布状況

能登半島における ASR が発生した橋梁の分布状況 (平成 16 年度実施) を図-1 に示す。能登半島は行政・管理上、奥能登と中能登とに分けられるが、橋梁の規模や ASR 損傷度とは無関係に ASR 劣化橋梁の分布状況だけを見ると、奥能登地域に ASR 劣化橋梁が多く存在しているのが分かる。奥能登地域の ASR はすべて安山岩砕石によるものであることが明らかになっている。一方、中能登地域の一部や金沢市に近接した地

\*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 新日本製鐵 (株) 鉄鋼研究所 主幹研究員

\*3 富山県 富山土木センター 主任

\*4 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻

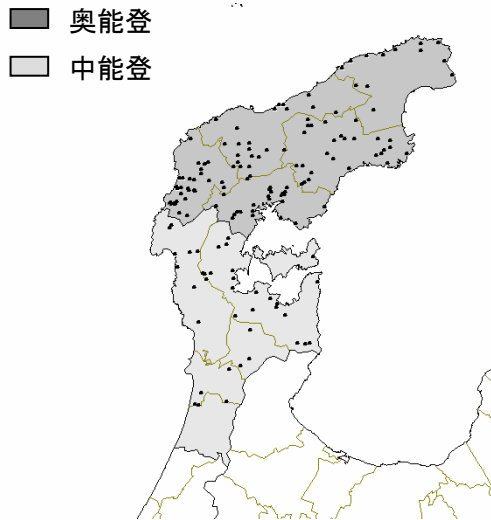


図-1 能登地方における ASR 劣化橋梁の分布

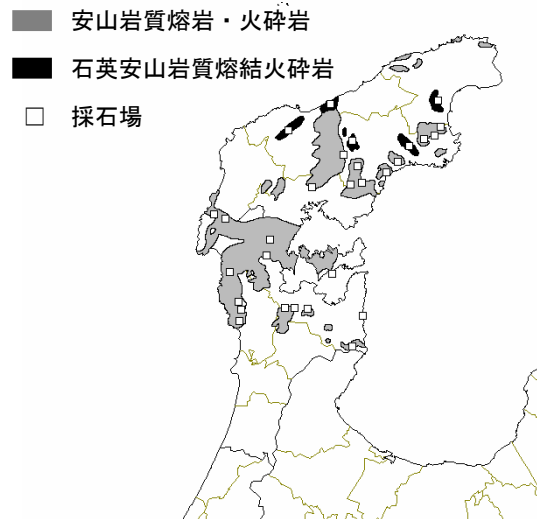


図-2 能登地方における岩体の分布

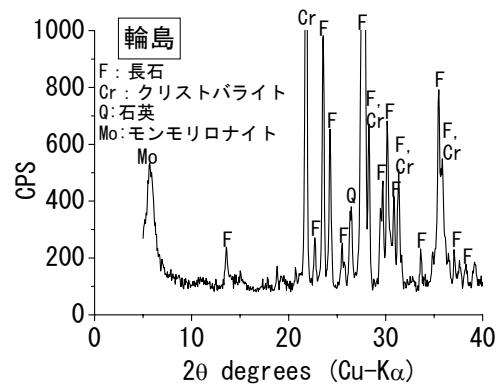
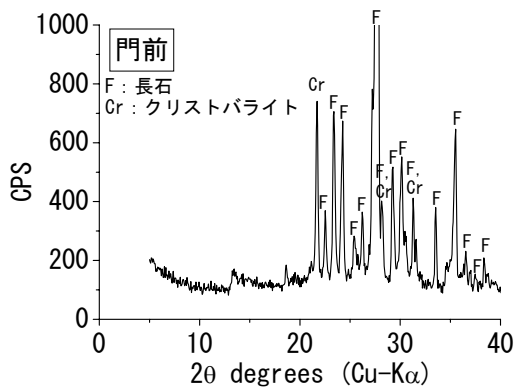


図-3 安山岩（門前産および輪島産）の X 線回折図

表-1 骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果

骨材	化学法 (JIS A 1145)				JIS A 1146		ASTM C 1260		デンマーク法	
	Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	Sc/Rc	判定	膨張量 (%)	判定	膨張量 (%)	判定	膨張量 (%)	判定
門前	289	109	2.65	無害でない	0.20	無害でない	0.55	有害	0.36	不明確
輪島	603	223	2.70	無害でない	0.07	無害	0.50	有害	0.77	有害

域でも ASR が発生しているが、これらの地域の ASR は川砂や川砂利が原因であり、ASR 損傷度も比較的軽微なものが多い。川砂や川砂利は庄川水系（富山県）または手取川水系（石川県）から供給されたものであると考えている。能登地方の砕石原料としての岩体の分布状況を図-2 に示す。本分布図には ASR 劣化構造物が建設された当時（昭和 40 年代から 50 年代前半）の採石場の位置を図中に記載している。能登半島の北部には安山岩の岩体が帯状に分布しており、岩体は安山岩質溶岩・火砕岩と石英安山岩質溶結火砕岩とに区別される。代表的な産地（門前

町と輪島市）から採取した岩石（両輝石安山岩）の X 線回折図を図-3 に、それらの骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果を表-1 に示す。安山岩砕石には反応性鉱物としてクリソバライトと火山ガラスが含まれており、骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果は輪島市産のもの JIS A 1146 の結果を除いて、すべて「無害でない」または「有害」と判定されている。興味深い点は、門前町産と輪島市産では火山ガラスの残存量に大きな相違があり、門前町産は火山ガラスが多く残存しているのに対して、輪島市産は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) が進行していることである。輪島市産のものが JIS A 1146 で「無害」と判定されたのはモンモリロナイトを含有していることが関係している<sup>2)</sup>。実構造物の調査では、後者のものは前者のものより ASR が発生した場合の骨材の割れやコンクリートのひび割れが顕著であることから判断すると、後者のものには乾燥湿潤や凍結融解の繰り返しによる劣化作用の影響がさらに加わっているものと推測される。

### 3. 骨材のアルカリシリカ反応性

骨材の化学法の結果(昭和 63 年に実施)を図-4 に示す。この結果は石川県全域で実施した最初の調査であり、石川県を奥能登、中能登および加賀の 3 地域に区分している。奥能登地域のものは約 60% が「無害でない」と判定されており、それらはすべて安山岩砕石であった。また、能登地方ではこれまで安山岩の砕砂は使用されておらず、川砂(または山砂)と安山岩砕石との組み合わせが一般的なものであった。一方、中能登や加賀のものはほとんどが「無害」の川砂や川砂利であり、溶解シリカ量が 100 mmol/l 以下であることから判断すると、骨材のアルカリシリカ反応性は能登地方のものと比較してかなり低いものと推察できた。

骨材の化学法とモルタルバー法の判定結果の整合性を図-5 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のみモルタルバー法をさらに実施することが規定されている。このため、両試験法の判定結果の整合性が県内全域で調べられた例はこれまで皆無である。ここで問題となるのは、骨材の化学法とモルタルバー法の判定結果が一致しない場合(I および IV) が比較的多く存在することである。I のケース(化学法で「無害」と判定され、モルタルバー法にて「無害でない」と判定)は川砂や川砂利中の安山岩粒子または流紋岩粒子混入のペシマム現象から、IV のケース(化学法で「無害でない」と判定され、モルタルバー法にて「無害」と判定)は前述したように安山岩砕石のスメク

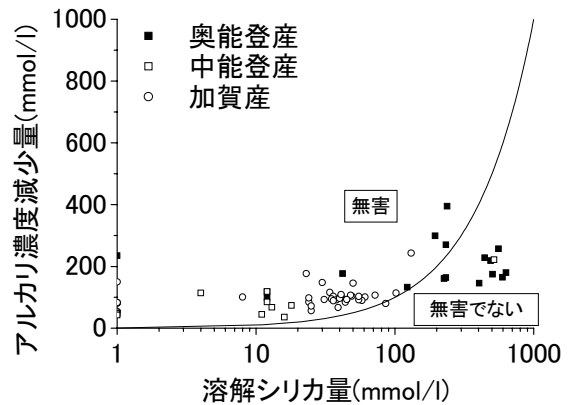


図-4 骨材のアルカリシリカ反応性(化学法)の判定結果

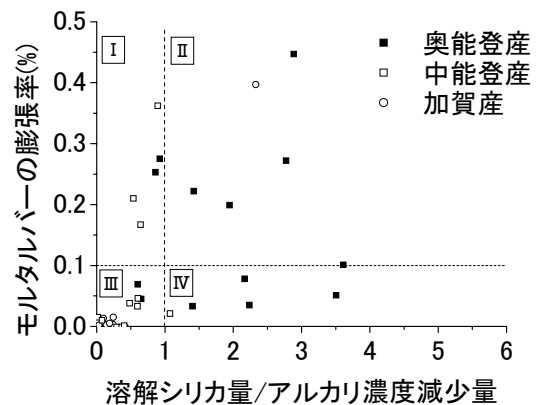


図-5 モルタルバー法の膨張率と化学法の溶解シリカ量/アルカリ濃度減少量との関係

タイト化(モンモリロナイトの含有量)との関係から、それぞれ説明が可能である<sup>2)</sup>。

### 4. 構造物の ASR 劣化度とコアの力学的性質

能登半島の構造物の ASR 劣化度の調査は 40 数例あり、コア(直径 55 mm, 長さ 30cm)を構造物の各部位から 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, アルカリシリカゲルの生成状況などを調べてきた。コンクリートの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度比の関係を図-6 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 による損傷度が大きいものと判断される<sup>3)</sup>。本調査データは約 80% が橋脚または橋台を対象としたものであり、それらの建設時の設計基準強度は 21 または 24 N/mm<sup>2</sup>であ

った。図-6 に示すように、20 年以上が経過したコアの強度は設計基準強度を大きく下回るものがあり、ASR が発生した構造物からのコアは圧縮強度がかなり低下しているのが明らかである。

能登半島の構造物の鉄筋破断に関する調査結果を表-2 に示す。平成 17 年末の時点で、せん断補強筋および帯鉄筋に関しては、橋脚の枕梁 7 基、フーチング 4 基で、鉄筋破断を確認している。主鉄筋に関しては、橋脚の枕梁 3 基で圧接部のはずれ（破断面は平滑であり、施工不良が原因と推察される）を確認している。橋脚以外では、柱部 2 基、フーチング 4 基、橋台の本体 6 基、鉄筋コンクリート堤体 2 基、トンネル坑口 1 基で、同様な鉄筋破断を確認している。これらの事例ははつり点検または打ち替え時に発見されたものだけであり、今後本格的な調査が進む段階で鉄筋破断の事例数はさらに増えることが予想されている。図-6 に示されるように、鉄筋破断が発生した箇所から採取したコアは通常のコアと比較して圧縮強度および弾性係数ともに大きく低下しているのが特徴である。これには、20 年以上が経過し、大きな ASR 膨張が発生した箇所で鉄筋破断が発生していることと、鉄筋破断が発生した箇所では鉄筋による拘束が減少したために、コンクリートの劣化がさらに進行したことが関係している。

## 5. 鉄筋の破断状況とそのメカニズム

能登有料道路の調査では徳田 2 号橋および鹿島橋の 2 橋梁の枕梁を打ち替えた際に鉄筋破断の詳細な調査が実施された（写真-1 および 2 参照）。両調査より、枕梁やフーチングのような鉄筋比の小さい部位では鉄筋破断の個数が全体の 70~80%になる場合があること、せん断補強筋の折り曲げ部（90 度）や主鉄筋の曲げ下げ・曲げ上げ部（90 度）だけでなく主鉄筋の折り曲げ部（135 度）でも破断していること、外側の箇所だけでなく躯体の内部に位置するせん断補強筋や幅止め筋が破断していること、橋脚柱部の帯鉄筋が破断する場合もあること、などの新たな事実が明らかになった。

破断鉄筋の化学成分分析の結果を表-3 に示す。破断鉄筋は鉄筋の径が D16 から D32 の範囲

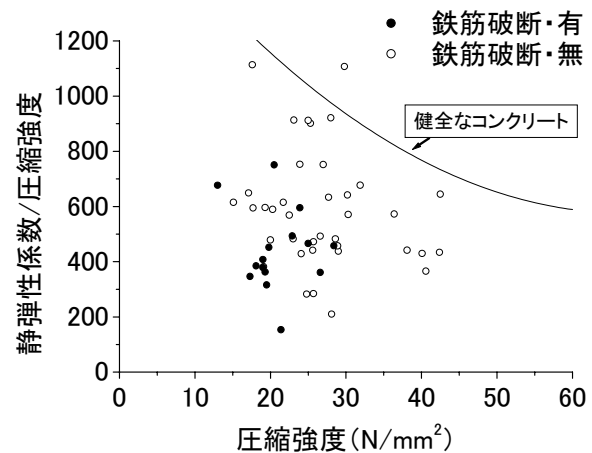


図-6 ASR劣化構造物から採取したコアの圧縮強度と静弾性係数/圧縮強度との関係

表-2 能登半島における鉄筋破断が確認された主要な構造物の概要

構造物の部位	供用年数 (年) *	使用・環境条件		鉄筋の径と間隔 (SD295A)
		日射の影響	水分の浸透	
NダムRC堤体	22	大	貯留水	D19@200mm
O橋脚フーチング	20	無し	地下水	D19@250mm
K橋脚フーチング	20	無し	地下水	D16@300mm
A橋脚枕梁	23	大	路面排水**	D19@150mm
橋台	23	小	路面排水**	D16, D32@250mm
T橋脚枕梁	25	大	路面排水**	D19, D25, D32
柱部 (地中)	25	無し	地下水	D16@150mm
フーチング	25	無し	地下水	D16@300mm
K橋脚枕梁	24	大	路面排水**	D19@150mm

\* : 鉄筋破断が発見された調査時点での経過年数

\*\* : 路面排水には凍結防止剤 (NaCl) が含まれる

表-3 破断鉄筋 (T橋枕梁) の化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	N
鉄筋Ⅰ	0.25	0.28	0.75	0.012	0.018	0.12	0.02	0.11	0.35	0.004	0.0094
鉄筋Ⅱ	0.28	0.18	0.73	0.018	0.026	0.18	0.01	0.10	0.45	0.002	0.0103



写真-1 橋脚梁（折り曲げ鉄筋）の鉄筋破断



写真-2 橋脚フーチング端部の鉄筋破断

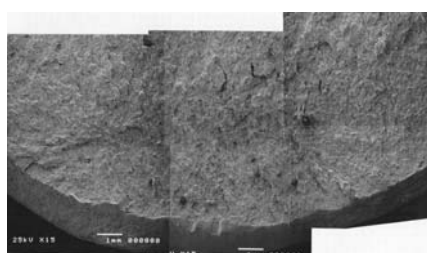


写真-3 破断鉄筋のSEM像

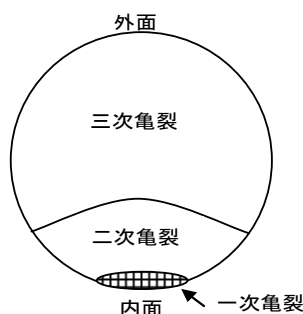


図-7 鉄筋破断面の模式図

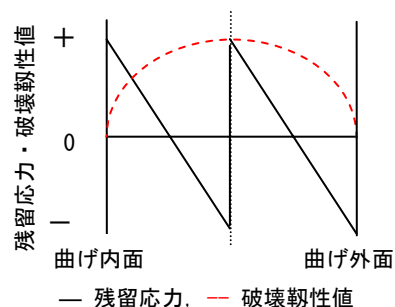


図-8 残留応力・破壊靱性値の変化

の電炉鉄筋であった。また、脆性破壊で問題となる、リン、イオウなどの不純物の含有量は基準値を下回っており、鉄筋の化学成分および機械的性質はいずれも規格を満足していた。既に報告<sup>4)</sup>されているように、鉄筋の曲げ加工部の破断面は、絞りがなく、脆性的であり、破断面のSEM観察より破断組織には曲げ加工部の内側からの半月状の割れ(5mm程度)とそれを起点として破壊した劈開破壊の痕跡が確認された(写真-3参照)。さらに、その後の調査により、鉄筋破断までは至っていないが、鉄筋の内側の節の付け根にひび割れが入っているものも多数発見された。鉄筋腐食の影響に関しては、躯体の内部から採取した鉄筋には腐食が発生していないものもあり、水素脆性破壊や応力腐食割れとの関係は現時点では明確にはできなかった。

鉄筋破断面の模式図<sup>4)</sup>を図-7に示す。徳田2号橋の枕梁の解体時に得られた鉄筋の破断箇所(せん断補強鉄筋および折り曲げ鉄筋)について化学成分、機械的性質、SEM観察などの詳細調査を実施した。鉄筋破断面はSEM観察より3

つの破壊過程(1次亀裂, 2次亀裂および3次亀裂の形成とそれらの進展過程)に分類できた。鉄筋の曲げ加工時に発生した1次亀裂は延性破壊(局所的なすべり変形によって生じたもの)であった。鉄筋の節の付け根部分は曲げ加工時の応力集中が大きく、曲げ加工後のスプリングバックまたは曲げ戻し時の過程で亀裂が発生したものと考えられた。このような1次亀裂の発生には鉄筋の節の付け根の形状、曲げ加工半径、材質などが大きく影響するものと推察される<sup>5)</sup>。次に、鉄筋破断に至る過程で最も重要であると考えられた2次亀裂は劈開破壊(脆性破壊)であった。これは鉄筋の破壊靱性値の低下によって引張応力下で亀裂が進展したことによるものと考えられた。すなわち、鉄筋の破壊靱性値の低下(亀裂進展性)は鉄筋の曲げ加工による加工硬化と固溶C, Nによる歪時効硬化による硬さの増加に起因するものであり、電炉鉄筋は高炉鉄筋と比較するとそれらの影響がより大きくなると想定された<sup>4), 5)</sup>。一方、図-8に示すように、鉄筋の曲げ加工部の内側にはもともと引張残量

応力が存在しており、ASR 膨張でさらに引張応力が長期にわたり曲げ加工の内側に加わった結果、1次亀裂が2次亀裂へと進展したものと考えられた。また、2次亀裂が鉄筋内部に進展するにつれてASRによる引張応力が次第に小さくなるとともに、圧縮残留応力域に到達した付近で一旦亀裂の進展が停止しているのが観察された（この付近にはわずかな延性破壊領域（ストレッチゾーン）が存在）。最後に、3次亀裂は劈開破壊（脆性破壊）であり、ASR膨張によりさらに大きな引張応力が発生した段階で破断にまで至ったものと推察された。これまでの調査結果の範囲では、曲げ加工時に1次亀裂（亀裂が進展する際の切り欠き部分）が鉄筋に発生していなければ、残留応力とASR膨張とによる引張応力だけでは鉄筋破断にまでは至らない、と結論づけられた。

## 6. まとめ

能登半島における構造物のASR損傷の特徴は、同地域で使用された安山岩砕石がアルカリシリカ反応性のきわめて高いものであり、このため長期にわたって大きな膨張が発生したことによるものであった。最近の調査では、安山岩砕石中の火山ガラス、長石、粘土鉱物などからコンクリートにアルカリが多量に溶出し、このことがASRが長期にわたり継続した一因であることも明らかになってきた。能登半島のASR劣化構造物の調査では、橋梁やトンネルの劣化状況はほぼ把握されており、それらの発生地域と使用された骨材の岩石・鉱物学的特徴との関係がほぼ解明できた。その一方で、フーチングなどの地中部や河川中、海水中の構造物の調査はほとんど手が付けられていないのが実状である。フーチングの調査事例より、フーチングで一旦ASRが発生すると、地下水の影響で地上部よりも劣化がより激しいものになることが確認されている。また、能登半島の海岸部では塩害との複合劣化を受けたASR劣化構造物も確認されており、それらの補修・補強方法の検討も急務で

ある。一方、鉄筋破断は、鉄筋の破壊靱性値が低下したことによって、ASR膨張による引張応力の付加下で亀裂が進展したことによるものであることが解明できた。ASRによる鉄筋破断の特徴は、まず低鉄筋比または拘束の小さな箇所では鉄筋破断が発生し、ASR膨張がさらに大きくなると、それら以外の箇所へと進行していくことである。このような進行性の破壊形態は予測が困難であり、構造物の安全性を脅かすことにもなりかねないことから、細心の注意が調査・診断において必要である。

謝辞：破断鉄筋の調査でご指導いただいた、元金沢工業大学教授小川洋之氏に感謝いたします。能登地方の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。石川県道路公社の関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 鳥居和之, 笹谷輝彦, 久保善司, 杉谷真二：凍結防止剤の影響を受けた橋梁のASR損傷度調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.579-584, 2002.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 鳥居和之, 小川洋之, 樽井敏三：ASRにより破断した鉄筋の調査, ASRによる鉄筋破断のメカニズムと対策に関する特別講演会配布資料（金沢）, 2005.
- 5) 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～鉄筋破断と新たな対応～, コンクリートライブラリー, No.124, 2005.