

# 鉄筋破断が発生したASR劣化橋脚の調査診断及び補強技術の実用化のための研究開発

著者	鳥居 和之
著者別表示	Torii Kazuyuki
雑誌名	平成18(2006)年度 科学研究費補助金 基盤研究(B) 研究成果報告書
巻	2004-2006
ページ	9p.
発行年	2007-03
URL	<a href="http://doi.org/10.24517/00049875">http://doi.org/10.24517/00049875</a>



# 鉄筋破断が発生した ASR 劣化橋脚の調査診断 及び補強技術の実用化のための研究開発

研究課題番号 16360218

平成 16 年度～平成 18 年度科学研究費補助金  
(基盤研究 (B) (2)) 研究成果報告書

平成 19 年 3 月

研究代表者 鳥居 和之  
(金沢大学大学院自然科学研究科 教授)

金沢大学附属図書館



0800-04423-1

**鉄筋破断が発生した ASR 劣化橋脚の調査診断  
及び補強技術の実用化のための研究開発**

**研究課題番号 16360218**

**平成16年度～平成18年度科学研究費補助金  
(基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書**

**平成19年3月**

**研究代表者 鳥居 和之  
(金沢大学大学院自然科学研究科 教授)**

1. 研究課題名：鉄筋破断が発生した ASR 劣化橋脚の調査診断及び補強技術の実用化のための研究開発
2. 期間および種別：平成 16 年度～平成 18 年度  
科学研究費補助金（基盤研究(B)(2)）
3. 課題番号：16360218
4. 研究組織：鳥居和之（金沢大学大学院自然科学研究科 教授）  
梶川康男（金沢大学大学院自然科学研究科 教授）  
榊谷 浩（金沢大学大学院自然科学研究科 教授）  
久保善司（金沢大学大学院自然科学研究科 助教授）  
奥田由法（アルスコンサルティング（株），平成 16 年度のみ）  
葛目和宏（（株）国際建設技術研究所，平成 16 年度のみ）  
笹谷輝彦（（株）国土開発センター，平成 16 年度のみ）
5. 研究経費：平成 16 年度 7,200,000 円  
平成 17 年度 5,500,000 円  
平成 18 年度 1,800,000 円  
合計 14,500,000 円

## 6. 学会発表：

### (1) 研究論文

- [1] Torii, K., Ohashi, Y., Cai, Y., Okuyama, K. : Repair and Strengthening Methods for ASR Affected Concrete Piers, Proc. of 4<sup>th</sup> Inter. Conf. on Concrete under Severe Conditions- Environment & Loading, Seoul, Vol.2, pp.1785-1792 (2004. 6).
- [2] Kubo, Y., Hira, T., Nomura, M., Torii, K. : Study on Profile of Relative Humidity in Concrete Structure Deteriorated by Alkali-silica Reaction, Proc. of 4<sup>th</sup> Inter. Conf. on Concrete under Severe Conditions- Environment & Loading, Seoul, Vol.2, pp.2018-2025 (2004. 6).
- [3] Habuchi, T., Miyasaka, N., Tsuji, H., Torii, K. : Evaluation of Combined Deterioration of Concrete Structures in Marine Environment due to Alkali-silica Reaction and Seawater Attack, Proc. of 4<sup>th</sup> Inter. Conf. on Concrete under Severe Conditions- Environment & Loading, Seoul, Vol.2, pp.2026-2033 (2004. 6).
- [4] 鳥居和之, 野村昌弘, 山戸博晃, 本田貴子: 促進養生試験による骨材のアルカリシリカ反応性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vo.26-1, pp.945-950 (2004. 7).
- [5] 羽瀧貴士, 辻 裕和, 鳥居和之: アルカリシリカ反応と塩分浸透の複合作用による鉄筋の腐食機構, コンクリート工学年次論文集, Vo.26-1, pp.945-950 (2004. 7).
- [6] 山戸博晃, 野口陽輔, 参納千夏男, 鳥居和之: 電気炉酸化スラグを使用したコンクリートの物理・化学的安定性, コンクリート工学年次論文集, Vo.26-1, pp.1691-1646 (2004. 7).
- [7] 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. 8).
- [8] Kubo, Y., Yamanashi, T., Torii, K., Yamada, T. : Study on Repair Method with FRP Sheet for Spalled Concrete Structure Caused by Alkali-silica Reaction, Proc. of 12<sup>th</sup> Inter. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, Beijing, Vol.2, pp.1254-1261 (2004.10).
- [9] Torii, K., Sannoh, C., Kubo, Y., Ohashi, Y. : Serious Damages on ASR Affected RC Bridges Piers and Their Strengthening, Proc. of 12<sup>th</sup> Inter. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, Beijing, Vol.2, pp.1283-1288 (2004.10).
- [10] 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 (2004.10).
- [11] 羽瀧貴士, 守分敦郎, 土屋武史, 鳥居和之: 海洋環境下においてASRを生じたコンクリート構造物の調査事例と新しい表面被覆工法の開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.4, pp.111-116 (2004.10).
- [12] 羽瀧貴士, 鳥居和之: アルカリシリカ反応と海水の複合的な作用によるコンクリートの劣化現象とその評価手法の提案, 土木学会論文集, No.784, pp.149-161 (2004.11).
- [13] 鳥居和之, 奥山和俊, 大橋勇氣, 蔡云峰: ASR劣化大型RC試験体による強度及び膨張性状の検討, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.353-358 (2005.2).
- [14] 参納千夏男, 鳥居和之, 山戸博晃, 野口陽輔: 北陸地方産のフライアッシュによるアルカリシリカ反応の抑制効果, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.233-239 (2005.2).
- [15] 蔡云峰, 鳥居和之, 横山博司, 古川柳太郎: 促進養生法による高炉スラグ微粉末のASR抑制効果の評価, コンクリート工学年次論文集, Vo.27-1, pp.763-768 (2005.7).

- [16] 羽瀧貴士, 濱田洋志, 鳥居和之, 網野貴彦: 海洋環境下における反応性骨材含有コンクリートの膨張挙動に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vo. 27-1, pp. 847-852 (2005. 7).
- [17] 杉山彰徳, 鳥居和之, 本田貴子, 石川雄康: 人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性, コンクリート工学年次論文集, Vo. 27-1, pp. 1381-1386 (2005. 7).
- [18] 山戸博晃, 鳥居和之, 岸田年弘, 吉田遼二: ガラス破碎砂の化学組成とアルカリシリカ反応性, コンクリート工学年次論文集, Vo. 27-1, pp. 1429-1434 (2005. 7).
- [19] 入田一, 谷川伸, 石井浩司, 鳥居和之: ASR 損傷コンクリート橋脚の補修・補強に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vo. 27-1, pp. 1627-1632 (2005. 7).
- [20] Nomura, M, Torii, K.: Proposal for Evaluation Method of Assessing Alkali-silica reactivity of Concrete by Accelerated Curing method, Proc. of CONMAT' 05, Vancouver, CD-R 10 pages (2005. 8).
- [21] 羽瀧貴士, 濱田洋志, 鳥居和之: 海洋環境下において ASR を生じたコンクリート中の鉄筋の腐食性状に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol. 5, pp. 45-50 (2005. 10).
- [22] 野村昌弘, 鳥居和之: 促進養生試験によるコアの ASR 残存膨張性中の評価, セメント・コンクリート論文集, No. 59, pp. 139-145 (2006. 2).
- [23] 参納千夏男, 鳥居和之, 斉藤匠, 友竹博一  
ポゾラン材料を使用したコンクリートのアルカリシリカ反応の評価, セメント・コンクリート論文集, No. 59, pp. 317-324 (2006. 2).
- [24] Hamada, H., Yamaji, T., Mohammed, T.U., Torii, K.: Unexpected Expansion of Concrete Made with Laumontite Containing Aggregates under Seawater Condition, Proc. of 7<sup>th</sup> Inter. Conf. on Durability of Concrete, ACI SP234, Montreal, pp. 571-587 (2006. 6).
- [25] 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, Vo. 28-1, pp. 779-784 (2006. 7).
- [26] 野村昌弘, 西谷直人, 清水隆司, 鳥居和之: 実構造物における骨材からのアルカリ溶出の検証, コンクリート工学年次論文集, Vo. 28-1, pp. 791-796 (2006. 7).
- [27] 松村将充, 簗田理希, 蔡云峰, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末を含有したプレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vo. 28-1, pp. 803-808 (2006. 7).
- [28] 簗田理希, 鳥居和之, 横山博司, 古川柳太郎: PC 梁部材の ASR 劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末の効果の確認を目的にした暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vo. 27-1, pp. 839-844 (2006. 7).
- [29] 斉藤匠, 参納千夏男, 芳賀堯, 鳥居和之: 塩害と ASR の複合劣化環境下でのフライアッシュ含有 RC 試験体の暴露性状, コンクリート工学年次論文集, Vo. 28-1, pp. 983-988 (2006. 7).
- [30] 参納千夏男, 杉森学, 斉藤匠, 鳥居和之: ASR と凍害による複合劣化を生じた電力土木施設の調査事例, コンクリート工学年次論文集, Vo. 28-1, pp. 989-994 (2006. 7).
- [31] 酒井賢太, 杉山彰徳, 石川雄康, 鳥居和之: 軽量骨材のアルカリシリカ反応性とその試験法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vo. 28-1, pp. 1499-1504 (2006. 7).
- [32] 杉山彰徳, 鳥居和之, 酒井賢太, 石川雄康  
コンクリートバー法による人工軽量骨材のアルカリシリカ反応性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vo. 28-1, pp. 1511-1516 (2006. 7).
- [33] Torii, K., Daidai, T.: Strengthening and Monitoring Techniques of ASR Affected Bridge Piers, Proc. of 22<sup>nd</sup> ARRB, Canberra, CD-R 10 pages (2006. 10).
- [34] Nomura, M., Torii, K.: Evaluation of Residual Expansion Capacity of Concrete

Using Cores from ASR Affected Structures, Proc. of 22<sup>nd</sup> ARRB, Canberra, CD-R 11 pages (2006.10).

- [35] 鳥居和之, 杉山彰徳, 山戸博晃, 酒井賢太: 廃棄ガラス起源リサイクル砂のアルカリシリカ反応性に関する研究, 材料, Vol. 55, No. 10, pp. 905-910 (2006. 10).

**(2) 総説, 解説など**

- [1] 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. 2).
- [2] 鳥居和之: アルカリシリカ反応 (ASR), 高圧ガス, Vol. 42, No. 4, pp. 27 (2005. 4).
- [3] 石井浩司, 奥田由法, 谷川伸, 鳥居和之: ASR により劣化したコンクリート橋脚の補修・補強工法による抑制効果, コンクリート工学, Vol. 43, No. 7, pp. 42-50 (2005. 7).
- [4] 鳥居和之, 奥山和俊, 参納千夏男, 山戸博晃: ASR 劣化橋脚の解体調査と鋼板による補強効果, セメント・コンクリート, No. 708, pp. 50-56 (2006. 2).
- [5] 鳥居和之, 野村昌弘: コンクリートコアによる ASR 残存膨張性の評価, セメント・コンクリート, No. 715, pp. 64-70 (2006. 9).
- [6] 鳥居和之: コンクリートの耐久性と最新の補修・補強技術ー北陸地方での劣化事例とその対策についてー, 第 297 回コンクリートセミナーテキスト, セメント協会, pp. 23-36 (2006. 11).

## 7. 研究成果：

### 7. 1 研究の背景および目的

アルカリシリカ反応 (ASR) により発生したコンクリートのひび割れは、表面のかぶりまでであり、鉄筋の内部へはひび割れが進展しておらず、コンクリート中に鉄筋が適切に配置されている場合には、ASR がコンクリート構造物の耐荷力に与える影響は比較的小さいとされてきた。しかし、近年、ASR により過大な膨張がコンクリート構造物に発生した場合には、コンクリートの強度低下、鉄筋とかぶりとの付着力の低下、曲げ加工部や圧接部での鉄筋破断などの大きな損傷が発生した事例が報告されている。申請者らの調査では、安山岩や流紋岩などの火山岩系の碎石を使用したコンクリートでは、ASR による膨張が 20 ～ 30 年の長期にわたり持続し、常に水や凍結防止剤の影響を受けた構造物では過大な膨張が発生することが明らかになってきた。

申請者らは、北陸地方の構造物の調査で、橋脚の梁部や基礎構造物 (フーチング)、橋台、トンネル坑口、擁壁などで、10 数例の鉄筋破断の事例を調査している。とくに、RC 橋脚の梁部の事例では、鉄筋比の小さい側面端部で、せん断補強鉄筋 (スタラップ筋及び折り曲げ鉄筋) が破断しており、拘束が無くなった破断箇所から大きな割れが構造体の内部に発生し、構造体の内部でコンクリートが激しく劣化しているのが観察されている。これまでの調査では、鉄筋破断は曲げ加工部または圧接部で発生しており、破断面にはしぼりの跡がなく、脆性的な破壊性状を呈しているのが判明している。また、鉄筋破断は、荷重によるせん断や曲げの影響を受けていないことから判断して、ASR によるコンクリートの膨張により発生した鉄筋の純粋な引張力によることも判明している。

RC 橋脚における脆性的な鉄筋破断の発生は橋梁全体の安全性を揺るがす重大な問題であり、早急な調査と対策が求められている。しかし、このような現象が明らかになったのはごく最近のことであり、ASR により発生するコンクリートの膨張力と鉄筋に発生する応力度との関係、曲げ加工部や圧接部で鉄筋破断のメカニズム、構造体の耐荷力と鉄筋破断との関係などが十分に分かっていない現状では、抜本的な対策は困難であり、鉄筋破断の可能性のある構造物の現況調査により、補強や打換えなどの対処療法的な処置に頼らざるを得ないのが実状である。さらに、鉄筋破断が発生している RC 橋脚の梁部やフーチング部では、橋脚の安全性の確保の点で、はつり点検により鉄筋の状況を直接に把握することがきわめて困難であり、非破壊検査による鉄筋破断及びコンクリートの内部劣化の推定が必要になっている。

本研究では、北陸地方を中心にして、鉄筋破断が発生している可能性がある、RC 橋脚の詳細調査を実施し、既に実施済みの調査結果と併せて、RC 橋脚の ASR 発生と鉄筋破断との関係のデータベースを作成し、RC 橋脚での ASR 損傷の実態を検証する。また、モデル試験体による鉄筋破断の再現及び構造体での鉄筋の応力解析により、ASR 膨張による RC 橋脚の鉄筋破断の機構を解明し、その結果より RC 橋脚の耐荷力に及ぼす鉄筋破断及びコンクリートの内部劣化の影響を明らかにする。さらに、弾性波診断法を ASR 損傷 RC 橋脚に適用することにより、鉄筋破断の有無及びコンクリートの内部劣化の推定を目的とした、新しい非破壊診断技術の確立を目指す。

### 7. 2 研究成果の概要

#### (1) 鉄筋破断による劣化事例

石川県内では、平成 18 年の時点で、せん断補強筋および帯鉄筋に関しては、橋脚の枕梁 6 基、柱部 2 基、フーチング 4 基で、橋台の本体 4 基、フーチング 4 基で、鉄筋破断が確認された。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) を確認した。橋脚以外では、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た。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った。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。

### (3) 鉄筋破断のメカニズム

破断した鉄筋は鉄筋の径がD16からD32の範囲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。鉄筋の曲げ加工部の破断面は、絞りがなく、脆性的であった。鉄筋破断面は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。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。一方、鉄筋の曲げ加工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<sup>8)</sup>。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。

### (4) ASR劣化橋梁のアセットマネジメント

橋梁のアセットマネジメントを開始するには、橋梁の劣化度、補修・補強の要否、費用の算定などが記載されたデータベースの作成が不可欠となる。石川県ではASR対策検討委員会を平成7年に立ち上げ、能登有料道路以外の、能登地方の橋梁(昭和61年以前のもを対象)のASR発生状況を調べた結果、奥能登では橋梁数347の内の166のもの(48%)、中能登では橋梁数263の内のもの(23%)、加賀では橋梁数417の内の64のもの(15%)に、ASRによる劣化の兆候があることが判明した。この中で、鉄筋破断を伴う、重大なASR損傷が発生したものはすべて奥能登の橋梁であり、これは能登半島の北部で産出する安山岩が昭和40年代半ばから50年代に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った。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、奥能登にASR劣化橋梁が多く存在しているのが分かった。一方、中能登地域の一部や金沢市に近接した地域でも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かった。

### (5) ASR劣化橋脚の補強およびモニタリングの技術開発

#### \* 橋脚のPC鋼材巻立て工法および鋼板接着工法

ASR劣化構造物の耐荷性能評価や補強技術が未成熟な現段階では、構造物の重要性や残存供用期間、維持管理費用などを総合的に判断して、補強以外にも、供用制限、

打替え、解体・撤去が適宜選択されているのが実状である。能登地方では、ASR 劣化橋脚の耐震補強および補強後の ASR 膨張の抑制を目的として、橋脚の柱部材の PC 鋼材による巻立て工法や橋脚のはり部材の鋼板接着と PC 鋼材による横締め工法が採用された。また、アラミド繊維や炭素繊維シートによる補強は、表面処理による ASR 抑制効果と耐荷性の向上の両者が期待できるとされているが、北陸地方では厳しい使用環境下（高湿度、降雪など）でのエポキシ系接着剤の耐久性（耐水性）が課題であると考えている。

#### **\*フーチングの PC 鋼材による膨張拘束工法**

北陸地方の橋脚のフーチングでは鉄筋破断をともなう著しい損傷が相次いで発見されている。土中にある基礎部は打替えが最も困難な箇所であるので、ASR 膨張の拘束効果と耐荷力の向上を目的とした、フーチングの PC 鋼材による補強が昨年度実施された。フーチングでは上部の鉄筋はすべて破断しており、躯体の内部にまで大きな割れが発生していた。このため、フーチングの構造的な安定性（一体性）を確保するために、PC 鋼棒による縦締めと PC 鋼より線による横締めによってプレストレスを導入する工法を試験的に採用した。正方形（または長方形）のフーチング躯体にプレストレスをいかに効率よく導入するか、PC 鋼棒や PC 鋼より線に導入するプレストレス量はどの程度が適当であるか、などの課題が残されている。

#### **\*橋脚の打替えと補強後のモニタリング**

反応性が高い安山岩砕石が使用された、能登半島の ASR 劣化橋脚では、30 年が経過した段階でも ASR が終了していないと判断できた。このため、今後の構造物の維持管理の容易さを優先して、鉄筋破断などの大きな損傷が発生した枕梁は、鋼製支保工で仮受けした後に、打替えることとした。枕梁の打替えでは、主筋の圧接部がある場合とない場合とで、枕梁全体を対象とするか、張り出し部のみを対象とするかを決定した。ASR 劣化橋脚の補強技術は未確立であるので、大規模な補強対策時には、モニタリングを同時に実施し、その計測結果を今後の補強設計に反映させることが重要であると考えている。能登有料道路では、打替えを実施した橋脚や補強したフーチング、供用中のトンネルなどで自動計測によるモニタリングを実施した。モニタリングによる計測結果の蓄積により、ASR 膨張に及ぼす環境作用の影響や構造物全体の ASR 膨張挙動、ASR 劣化に対する補強効果を正確に把握することができるようになるものと期待している。