

能登産の安山岩碎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[†]

奥山和俊* 鳥居和之**

Alkali-Silica Reactivity of Andesite in Noto Peninsula and Monitoring of Expansion Behavior of Concrete Bridge Piers

by

Kazutoshi OKUYAMA* and Kazuyuki TORII**

A large number of bridge piers in Japan, which were mostly constructed in the 1970s or 1980s, are suffering from serious damages caused by alkali-silica reaction (ASR). The concrete using reactive andesite successively expanded for more than 30 years, leading to the serious damage of structural elements of bridge pier. In the case study of Kashima Bridge in Ishikawa Prefecture, the degree of deterioration of bridge pier due to ASR was investigated by both visual inspection of cracking and non-destructive testing. Furthermore, the mechanical properties of concrete and the degree of fracture of steel bars were examined for the purpose of strengthening design of bridge pier. Based on the classification of ASR deterioration level of each element, the steel plate bonding was adopted for the column, after the pillow beam had been totally reconstructed. This paper describes the mineralogical properties of reactive andesite used in concrete and the mechanical properties of concrete cores taken from bridge pier. Furthermore, monitoring and strengthening methods applied for Kashima Bridge pier are introduced together with non-destructive testing by means of ultrasonic wave inspection. In the maintenance of this bridge, a monitoring using crack sensors has been successfully applied in order to ensure the daily safety of bridge.

Key words : Alkali-silica reaction, Reactive aggregate, Andesite, Mineralogical property, Monitoring

1 緒 言

現在、わが国では、1970年代から1980年代にかけて施工された橋梁において、アルカリシリカ反応（以下、ASR）に起因する重大な劣化を生じている事例が数多く確認されている。ASR劣化による損傷事例としては、コンクリートのかぶり部分におけるはく離またはコンクリートの圧縮強度やヤング係数の低下などが挙げられる。そしてさらに深刻な損傷形態として、スターラップや折り曲げ鉄筋の降伏または破断に至る事例も報告されている。¹⁾

1990年代当初、これらの橋梁の橋脚に対して様々なASR補修が実施された。一般的な補修方法は、コンクリート表面のひび割れへのエポキシ樹脂注入工法やレジンモルタルまたはポリマーセメントモルタルを使用した表面保護工法であった。しかし、このような補修方法によるアプローチは、ASRによるコンクリートの膨張を抑制するのに効果的ではなく、補修後5年以内に表面塗装自身はく離する事例が多く報告されている。

また、最近の調査によれば、ASRによるコンクリートの過大な膨張によりスターラップまたは折り曲げ鉄筋の曲げ加工部での鉄筋破断が確認されている。この破断の形式はぜい性破壊であり、橋脚の枕梁またはフーチングに主として発生しており、コンクリート構造物の耐荷性能が大きく損なわれる可能性があることが判明している。^{2),3)}

一方、橋脚の耐震補強に関しては、RC巻立てや鋼板

巻立て、炭素繊維シート巻立て工法が主に採用されてきた経緯がある。しかしながら、これらの補強方法がASR劣化橋脚の膨張抑制に対して適しているかどうかは明確になっていないのが現状である。この理由として、劣化因子である外部からの水分供給を遮断しても、多くの場合、コンクリート内部ではASRが持続し、高い残存膨張能力を有していることが原因である。^{4),5)}

そこで本研究では、まず能登地方のASR劣化構造物である鹿島橋の橋脚に使用された安山岩碎石のアルカリシリカ反応性や岩石・鉱物学的性質、およびコンクリートコアの工学的性質について調べている。さらに、本橋脚に適用されたASR膨張のモニタリングおよび補強方法、超音波伝ば速度測定による非破壊試験の有効性について検討している。

2 鹿島橋の概要および反応性骨材の特徴

鹿島橋は1978年に施工された橋梁で上部工は2径間単純鋼合成I桁橋、下部工は張出式鉄筋コンクリート橋脚であり、橋脚高さは約42mである。Fig. 1に鹿島橋の全景、Fig. 2に能登有料道路の本橋の位置を示す。

2004年の調査によって、石川県能登半島の北部にある合計620橋のうち、約40%となる230橋は、ASR劣化が発生していることが明らかになった。とくに、能登有料道路における18橋は、ASRにより深刻な損傷を受けている橋梁であった。その中の一つである鹿島橋は、柳田

[†] 原稿受理 平成20年2月6日 Received Feb. 6, 2008 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 (株)ビーエス三菱 〒530-6027 大阪市北区天満橋, P. S. Mitsubishi Construction Co., Ltd., Kita-ku, Osaka, 530-6027

** 正 会 員 金沢大学自然科学研究科 〒920-1192 金沢市角間町, Graduate School of Natural Sci. & Tech. Kanazawa Univ., Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192



Fig. 1 Over-view of Kashima Bridge before strengthening.

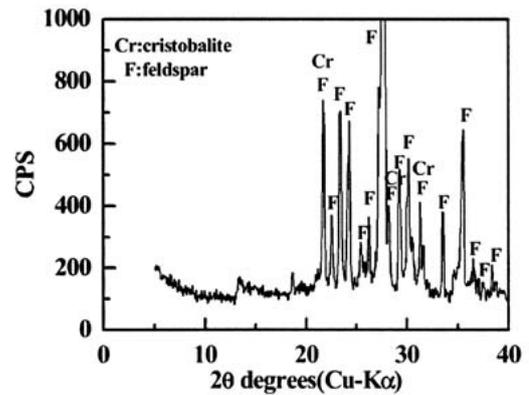


Fig. 3 XRD pattern of andesite used.

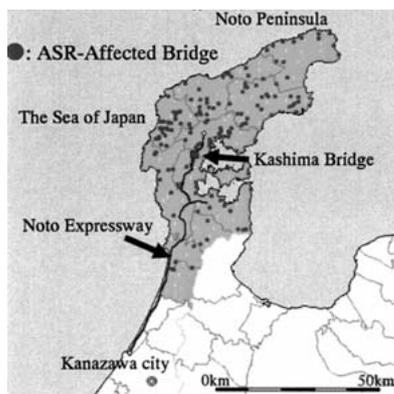


Fig. 2 Location of Kashima Bridge in Noto expressway.

から穴水までの能登有料道路の山岳部ほぼ中央に位置している。この区間では冬季の間、塩化ナトリウムを主成分とする凍結防止剤が道路表面に散布されている。凍結防止剤の使用により、ASRと塩害および凍結融解作用が組み合わさり、複合的なコンクリートの劣化が促進されると言われている。⁷⁾

鹿島橋のコンクリートには、非反応性の川砂と反応性の安山岩砕石が使用されていた。能登半島で採取される安山岩砕石は、わが国の代表的な反応性骨材の一つである。⁸⁾ Fig. 3に鹿島橋に使用された安山岩砕石のX線回折図を示す。この安山岩は反応性鉱物として反応性のシリカ鉱物であるクリストバライトとガラス相である火山ガラスを含んでいた。この図より反応性のシリカ鉱物とし

てクリストバライトの顕著なピークが存在するが、もう一方の代表的な反応性鉱物であるトリディマイトのピークは確認されなかった。また、この骨材から薄片を作成し、偏光顕微鏡観察を行った。Fig. 4に偏光顕微鏡写真を示す。火山ガラスの同定はX線回折試験におけるブロードなピークの存在(20度から30度)と偏光顕微鏡におけるクロスニコルでの観察(ガラスは黒色を呈する)によって行った。この写真から本骨材は斜長石、角閃石、輝石などが含有していたことが判明した。また、モンモリロナイトなどの粘土鉱物は確認されなかった。

次に、この安山岩砕石のアルカリシリカ反応性試験の結果をTable 1に示す。ASR試験の種類は、現行の化学法(JIS A 1145)およびモルタルバー法(JIS A 1146)、促進モルタルバー法(ASTM C 1260)の3種類である。ASR試験の判定基準は化学法の場合、溶解シリカ量Scが10mmol/l以上でアルカリ濃度減少量Rcが700mmol/l未満のとき、ScがRc以上($Sc/Rc > 1$)となる場合を「無害でない」とする。モルタルバー法の場合は3ヶ月材齢で0.05%以上または6ヶ月材齢で0.10%以上の膨張量を「無害でない」と規定している。また、促進モルタルバー法においては14日材齢にて0.1%未満の場合を「無害」、0.1~0.2%の場合を「不明」、0.2%以上を「有害」と規定している。この判定基準に従うと安山岩砕石は全ての試験において「無害でない」または「有害」と判定された。したがって、本骨材は非常に高いアルカリシリカ反応性を有していると言える。

一方、38℃の飽和水酸化カルシウム溶液に安山岩砕石

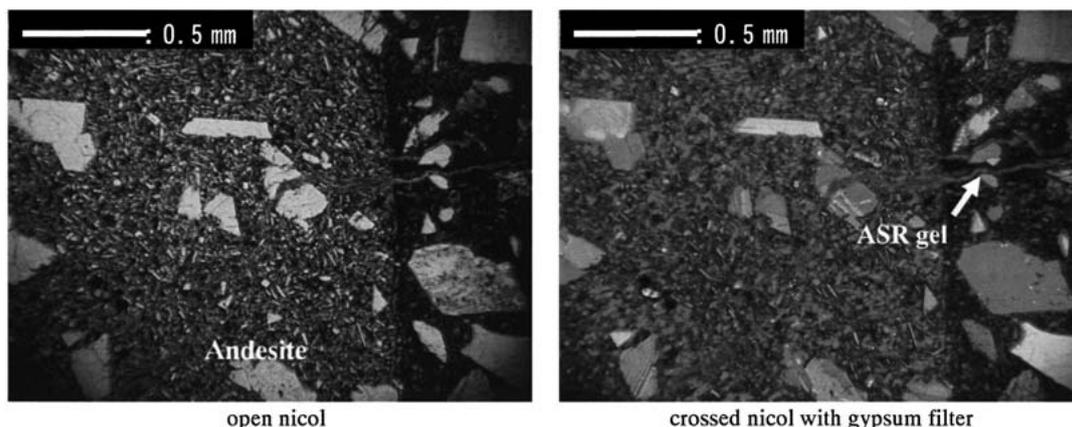


Fig. 4 Polarization microscope photograph of andesite used in Kashima Bridge.

Table 1 Results of alkali-silica reactivity of andesite used.

Chemical method (JIS A 1145)		Sc(mmol/l)	289
		Rc(mmol/l)	109
		Sc/Rc	2.65
		Evaluation	Deleterious
Mortar bar method	JIS A 1146	Expansion(%)	0.20
		Evaluation	Deleterious
	ASTM C 1260	Expansion(%)	0.55
		Evaluation	Deleterious

の5mm以下の破碎粒子を浸せし、アルカリ成分を測定した結果、安山岩砕石に含まれる火山ガラスや長石が溶解する過程において、アルカリ成分であるナトリウムイオンやカリウムイオンが多量に溶出することが明らかとなった。⁹⁾このような骨材からのアルカリ成分の溶出は、ASRゲルの形成とコンクリートの持続的なASR膨張の双方に重大な影響を与えることとなる。

3 コンクリートコアの工学的性質

鹿島橋における橋脚の柱部および枕梁から採取したコンクリートコアの工学的性質を Table 2 に示す。枕梁の圧縮強度は、柱部と比較して非常に小さく、設計基準強度である24N/mm²も下回っていた。このことは、柱部に比較して枕梁の拘束鉄筋比が低いことに起因する。また、コンクリートコアにおけるヤング係数の低下率は圧縮強度の低下率より顕著であり、ASR劣化はヤング係数に対する影響の方がより大きいと言える。したがって、ヤング係数と圧縮強度の比 (Ec/fc) が低いほど、ASRによる劣化度は高いと判断できる。

一方、コンクリートコアを用いて促進養生（温度40℃、相対湿度100%）による残存膨張性試験を実施した。その結果を Fig. 5 に示す。この試験から、枕梁の脚頭部である中心部分から採取されたコアの膨張率は片持ち梁の端部のコアよりも高い値を示しており、脚頭部のASR劣化が今後も進行することが予想できる。

4 橋脚のひび割れ状況および超音波伝ば速度

Fig. 6 および Fig. 7 に枕梁のひび割れ状況を示す。約5～8mm幅の大きな水平ひび割れが上部工における支承の真下に位置する枕梁脚頭部の側面に発生していた。また、コンクリートが Fig. 8 に示すように片持ち部分の端部において、部分的にはく離している状況も観察された。全橋脚の部位の中では枕梁におけるひび割れが最も激しかった。柱部には1～2mm幅の数本の垂直ひび割れが発生しており、フーチングには網目状のひび割れがコンクリート表面に生じていた。枕梁の内部の状態を評価するために、超音波伝ば速度試験を2.5m幅の枕梁側面に対して適用した。この試験は枕梁の一方の側面から反対側へ超音波を通過させ、この超音波の通過時間から表面のひび割れの進展状況を推測するものである。Fig. 9に

Table 2 Results of mechanical properties of cores taken from RC pier.

Element	Compressive strength (N/mm ²)	Elastic modulus (kN/mm ²)	Ec/fc	Pulse velocity (m/sec)
Column*	29.0	12.7	438	4150
Pillow beam**	19.5	6.1	313	3980

* Cores takes from column near ground.

** Cores takes from center of pillow beam.

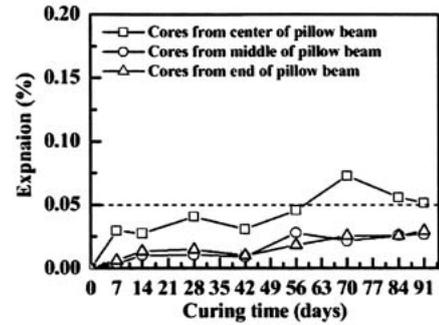


Fig. 5 Expansion behaviors of cores stored in fog room.



Fig. 6 Large horizontal cracks in center of pillow beam.

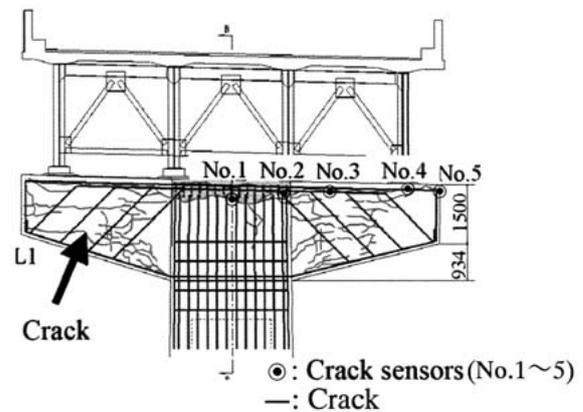


Fig. 7 Schematic diagram of cracking of pillow beam.



Fig. 8 Cracks and Peeling off of concrete at end of cantilever.

超音波伝ば速度試験の測定位置、Fig. 10に調査結果、Fig. 11に調査結果の概要をそれぞれ示す。超音波伝ば速度は、3000m/s～4000m/sの範囲にあった。超音波伝ばエネルギーから計算される周波数の中央値は、ASRの劣化にともない低い値にシフトすることが知られてい

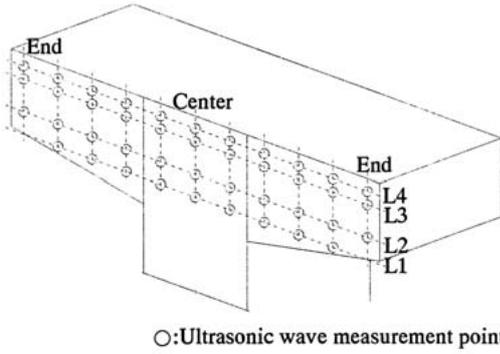


Fig. 9 Ultrasonic wave measurement points of pillow beam.

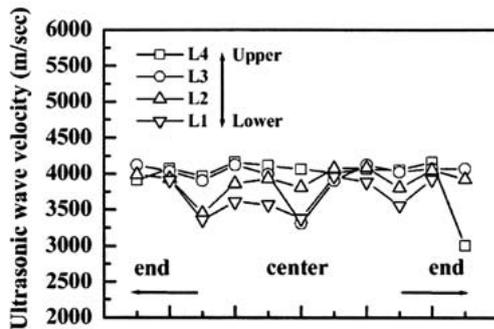


Fig. 10 Changes in ultrasonic wave velocity of pillow beam.

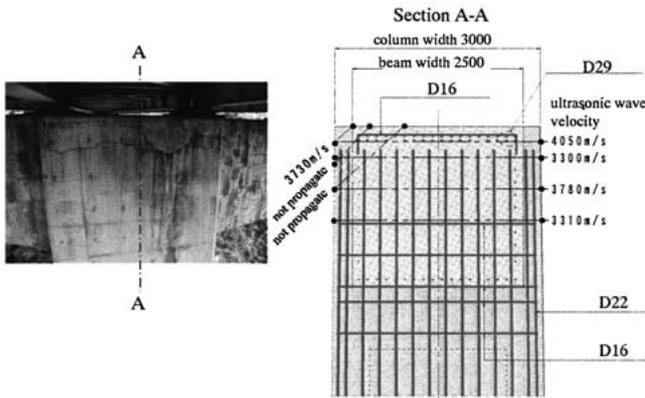


Fig. 11 Result of measurement by ultrasonic wave method.

る。すなわち、この値はコンクリート表面の損傷が激しい場合、伝ば速度が低い値となり、これは測定位置毎のコンクリートのASR劣化度に良く対応していた。とくに、コンクリートのかぶり部分が部分的にはく離れた片持ち梁の端部では、超音波が全く伝ばしない結果となった。この試験結果から、印荷電圧を1.2kVに改良した超音波伝ば試験装置は、2.5m以上の幅を有するRC梁の試験にも適用が可能であることが判明した。

一方、ひび割れ幅の進展を調査し、鹿島橋の健全度を確認するために、数カ所に亀裂変位計を設置した。¹⁰⁾この

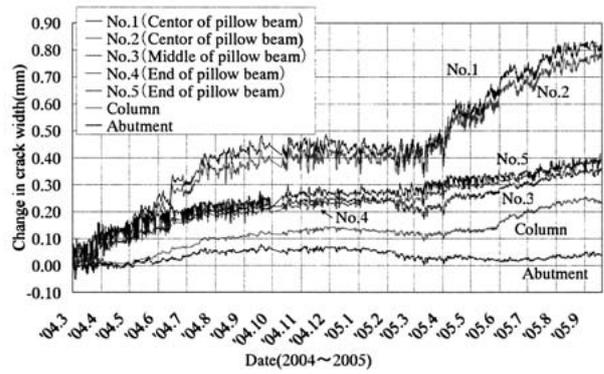


Fig. 12 Variations in crack width of RC pier and abutment.

亀裂変位計は、感度が1/1000mmであり、容量は±5mmである。亀裂変位計を設置するために代表的なひび割れを選定し、このひび割れを跨ぐ形で設置した。全てのモニタリング作業は、亀裂変位計とそれを接続したデータロガーを使用して、1日に2回、自動計測により行った。Fig. 12に約2年間にわたり計測した橋脚および橋台に設置した各位置におけるひび割れ幅の変化を示す。ここで温度変化による補正については自動的に実施されている。モニタリング結果から、枕梁におけるひび割れ幅の増加がもっとも大きく、とくに脚頭部の中心部分においては年間当たり10%の非常に高い割合で増加していた。これに対し、橋脚の柱部および橋台のひび割れ幅の変化はごくわずかであった。また、ひび割れ幅の変化は、春から夏にかけて大幅に増加し、冬の間はほとんど停止していることが示された。これは季節変化による温度に対応している。これらのモニタリング結果から、鹿島橋における橋脚の枕梁に対しては打替えなどの抜本的な対策が必要であることが判明した。

5 鉄筋破断とそのメカニズム

鹿島橋の枕梁において、スターラップ (D19mm) の約50%は、鉄筋が伸びることなく、上側の曲げ加工部でぜい性的に破断していた。このため、ASRが今後も持続すると鉄筋によるコンクリートの拘束力が消失しているの、内部コンクリートの圧縮強度が低下することも予測された。鉄筋の破断面は非常に平滑であり、これは鉄筋の典型的なぜい性破壊を示すものである。この鉄筋破断は応力腐食によるひび割れまたは水素ぜい性破壊を伴う現象と関係しているとの意見もあるが、十分には解明されていないのが現状である。Table 3に能登有料道路で使用された鉄筋の化学成分を示す。この鉄筋は一般的なSD295A (D19またはD22mmの電炉鉄筋)であり、その化学成分および機械的性質はJIS規格を十分に満足していた。

Fig. 13に鹿島橋における鉄筋の破断状況を示す。また、Fig. 14に鉄筋破断面のSEM画像からの亀裂の進展過程図を示す。鉄筋破断の現象は、まず鉄筋の曲げ加工

Table 3 Chemical compositions of steel bar with fracture. (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al	N
0.28	0.18	0.73	0.018	0.026	0.18	0.01	0.10	0.45	0.002	0.0103

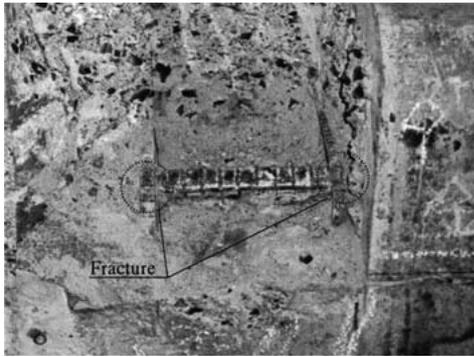


Fig. 13 Fracture of steel bars in Kashima bridge.

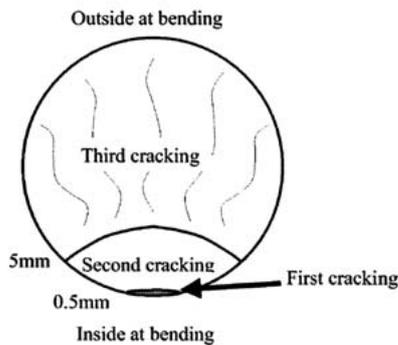


Fig. 14 Schematic diagram of fractured cross section of steel bar.

によりリップの根元近くに応力集中が生じ 0.5mm より小さい微小な亀裂が 1 次亀裂として発生することによる。そして 1 次亀裂を起点にそれが進展して、約 5mm の 2 次亀裂が生じる。2 次亀裂は、曲げ加工硬化とひずみ時効硬化による硬さの増加に起因して鉄筋の破壊じん性値が低下し、曲げ加工後の残留応力および ASR の膨張による引張応力が鉄筋内部に作用したことが要因であると考えられた。その後時間の経過とともに、2 次亀裂がさらに進展し、ASR によるコンクリートの膨張により鉄筋に高い引張応力が作用し、この状態において亀裂が鉄筋の全断面にわたり急速に伝ばする。これは 3 次亀裂として示されており、部材の鉄筋に破断が伝ばすることにより最終的に鉄筋全体の破断（進行性破壊）につながる亀裂である。¹¹⁾

Fig. 15 に鉄筋のリップ根元付近の 1 次および 2 次亀裂の走査電子顕微鏡 (SEM) 写真を示す。また、それらを

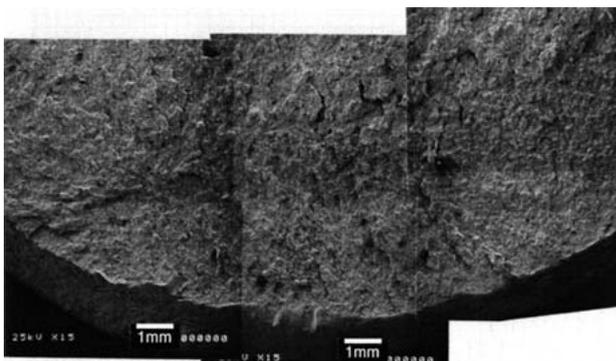


Fig. 15 SEM photograph of first and second cracking area.

拡大した SEM 写真 (Fig. 16 参照) から 1 次亀裂面はせん断破壊が生じたことを示す延性破壊 (粒子内破壊)、2 次亀裂はへき開破壊が生じたことを示すぜい性破壊 (粒子間破壊) であることが明らかとなった。わが国では、コンクリート構造物に使用される鉄筋の約 95% は、鉄製品の廃棄物から作られる電炉鉄筋である。電炉鉄筋は高炉鉄筋と比較してひずみ時効硬化が高いことはよく知られている。

この理由としては、電炉鉄筋は鉄筋組織に多くの窒素やアルミニウムを含有するからである。一方、Fig. 17 に曲げ加工後の鉄筋内部の残留応力および破壊じん性値の分布を示す。これより鉄筋の曲げ加工部内側には元来引張残留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部内側に付加された結果、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同時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ことが SEM の画像から観察された。最後に 3 次亀裂は典型的なへき開破壊 (ぜい性破壊) 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至ったものと推察された。鉄筋破断は、コンクリート構造物において比較的低い拘束鉄筋比を持つ部材で特徴的な損傷形態であると言える。能登有料道路の橋梁では、最も損傷が著しい場合、枕梁またはフーチングの部材の全てのスターラップが破断することも確認されている。

6 枕梁および柱部の補強

鹿島橋においては事前の各種試験とモニタリング結果により枕梁の打替えが決定された。この際、能登有料道路はこの地域における主要な輸送手段であるために、枕

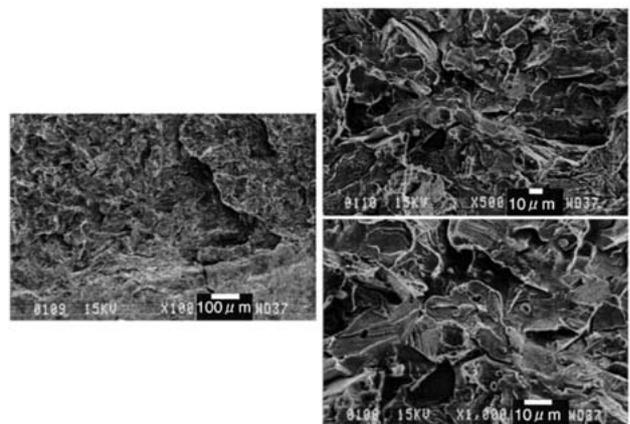


Fig. 16 SEM photograph of second cracking area.

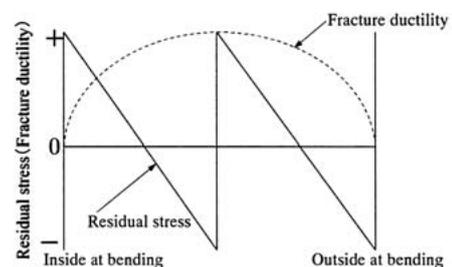


Fig. 17 Changes in residual stress and fracture ductility.

梁の打替えを行う際には上部工の交通を維持しながら行う必要があった。2005年の秋に、橋脚フーチングの表面まで土砂掘削を完了した段階で上部工をすべて鋼製支保工で支持し、さらに補強を行う前に、支保工の安全性を確認するため実橋載荷試験も実施した。Fig. 18に示すように、枕梁のコンクリートをブレーカーによって解体した後、鉄筋を再配置し、新コンクリートを打設した。柱部における既設断面は4m × 4mの矩形形状であるがこの橋脚に対して、補強厚9mmの鋼板巻立て補強を耐震補強とASRによる膨張抑制ために実施した。また、補強後における橋脚の周方向膨張量を測定するため、橋脚基部に亀裂変位計を設置した。このモニタリング結果をFig. 19に示す。季節変動、日変動の影響により増加と減少を繰り返しているが温度変化の影響が少ない土中では変動幅が少なく推移している。本補強に対するASR膨張の抑制効果については現時点においてひび割れ幅の大きな変化は無く経過しており抑制効果が認められるが、今後さらにモニタリングを継続する必要がある。

7 結 言

本研究ではASR劣化を生じた橋脚として鹿島橋を1つのケーススタディとして紹介し、この鹿島橋に用いられた安山岩砕石は非常に高いASR反応性を有していることを示した。また、本橋に適用した亀裂変位計を用いたモニタリングはASRによる劣化進行の情報を取得するとともに、補強の効果を確認する重要な手法となった。現在、ASR劣化による橋脚の鉄筋破断が深刻な問題となっており、この劣化現象は橋梁自体の耐荷性能に影響を与える重大な問題と認識されている。そのため、鉄筋破断を生じたASR劣化橋脚のより適切な診断および補強方法を開

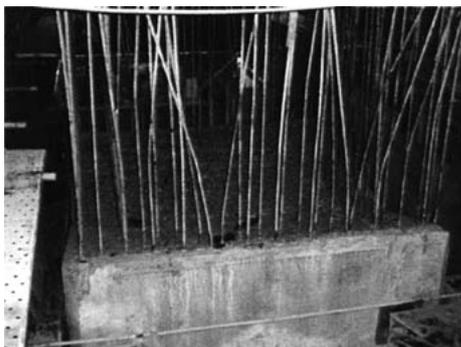


Fig. 18 Demolishing all old concrete of pillow beam.

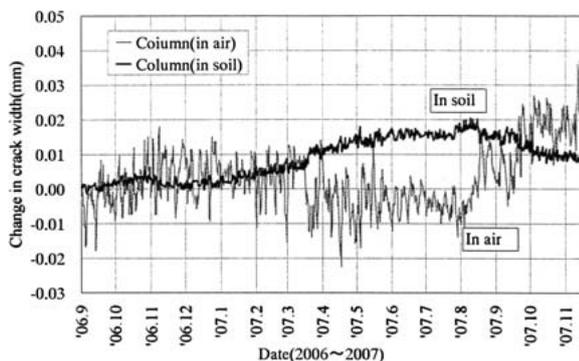


Fig. 19 Crack width of column after strengthening.

発することが急務である。ASR橋脚の診断技術の一つである超音波伝ば速度試験は実橋脚レベルでも十分に適用可能であることを示した。さらに、ASR劣化橋脚の保守点検において、モニタリングにより橋梁の状態を把握することが有効であることが明らかとなった。

本研究を実施するに当たりご協力いただいた、愛知工業大学森野奎二教授、新日本製鐵(株)樽井敏三氏、(株)国際建設技術研究所葛目和宏氏並びに(株)国土開発センター笹谷輝彦氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Japan Society of Civil Engineers, "State-of-the-Art Report on the countermeasures for the damage due to alkali-silica reaction", pp.I-26-I-65 (2005).
- 2) Y. Kubo, O. Ikemoto, T. Nakamura and K. Torii, "Experimental study of fracture of reinforced steel bar in concrete structures due to alkali-silica expansion", Proceedings of 6th CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, pp.637-652 (2003).
- 3) K. Kuzume, S. Matsumoto, T. Minami and T. Miyagawa, "Experimental study on breaking down of steel bars in concrete structures affected by alkali-silica reaction", Proceedings of 12th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol.2, pp.1283-1288 (2004).
- 4) K. Torii, "Strengthening and repair methods of RC piers deteriorated by alkali-silica reaction", Proceedings of Int. Seminar on Road Construction Materials, pp.43-53 (2003).
- 5) K. Torii, C. Sannoh, Y. Kubo and Y. Ohasi, "Serious damages of ASR affected RC bridge piers and their strengthening techniques", Proceedings of 12th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Vol.2, pp.1283-1288 (2004).
- 6) K. Torii, K. Okuyama, K. Kuzume and T. Sasatani, "Monitoring and strengthening methods of bridge pier seriously damaged by alkali-silica reaction", proceedings of CONSEC'07, Vol.1, pp.787-794 (2007).
- 7) K. Torii, "Deterioration of concrete structures due to de-icing saits and rehabilitation techniques", cement & concrete, No.635, pp.40-46 (2000).
- 8) K. Torii, M. Nomura and A. Honda, "Petrographic features of alkali-silica reactive aggregates in Hokuriku district and compatibility between various test methods determining alkali-silica reactivity of aggregate", Journals of Japan Society of Civil Engineers, No.767/V-64, pp.185-197 (2004).
- 9) E. Poulsen, T. S. Hansen and H. E. Sorensen, "Release of alkalis from felder in concrete and mortar", Proceedings of 5th CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of Concrete, Vol.2, pp.807-824 (2000).
- 10) K. Ishii, Y. Okuda, S. Tanigawa and K. Torii, "ASR mitigation-effect of repair and retrofitting methods against ASR damaged reinforced concrete columns", Concrete Journal, Vol.43, No.7, pp.42-50 (2005).
- 11) K. Torii, T. Tarui, T. Daidai and T. Hirano, "A study on ASR affected concrete structures in Noto peninsula", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.28, No.1, pp.779-784 (2006).