

論文 PC 鋼材巻立てにより補強したコンクリート橋脚の長期性状の追跡調査

佐藤健一 *1・奥田由法 *2・石井浩司 *3・鳥居和之 *4

要旨: アルカリシリカ反応(ASR)による損傷を受けた豊川橋橋脚の劣化度調査を実施し、調査結果より補強工法としてPC鋼材巻立て工法が採用された。補強工事完了後、プレストレスによるASRの膨張抑制効果を検証するために追跡調査を実施した。その結果、補強後約2年間半の期間においては補強前と比較してASR膨張は低減されており、ASRによるひび割れの拘束効果が発揮されていることが判明した。

キーワード: ASR, 残留膨張性, 耐震補強, PC鋼材巻立て工法, 現地計測

1. はじめに

北陸地方ではアルカリシリカ反応性を有する安山岩質および流紋岩質の砕石が長年にわたり使用されており、橋梁、トンネルなどのコンクリート構造物にASRによる損傷が数多く発見されている。一方、阪神大震災以後、ASR損傷コンクリート橋脚に対しての補修・補強が急務となり、この中で石川県能登地方山間部に位置する豊川橋橋脚では、耐震性能向上とASR膨張抑制効果を兼ね備えたPC鋼材巻立て工法が適用された。

本研究では、補強工法選定のためのASR損傷橋脚の劣化度調査および採用されたPC鋼材

巻立て工法による橋脚のASR膨張抑制効果の検証のために実施した追跡調査(補強後約2年半)について報告する。

2. 豊川橋橋脚の概要

豊川橋は1979年に建設された3径間連続鋼トラス橋(橋長:200m)であり、橋脚(高さ:約30m)は正方形断面のSRC柱2本をRC壁で結ぶラーメン構造である。供用後、1990年前後に橋脚コンクリートにASRによる損傷が発見され、その後実施された劣化度調査に基づいて、補強工法としてはPC鋼材巻立て工法が採用され、1997年に補強工事が完了した。



写真-1 豊川橋橋脚の全景(補強前)

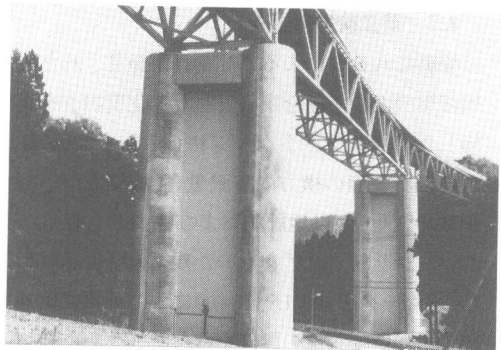


写真-2 豊川橋橋脚の全景(補強後)

*1 ㈱ピー・エス開発技術第一部 工修(正会員)

*2 ㈱ピー・エス北陸支店工務部技術担当部長 博(工)(正会員)

*3 ㈱ピー・エス開発技術第二部主任研究員 工博(正会員)

*4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博(正会員)

補強前の豊川橋橋脚の全景を写真-1に、補強後の全景を写真-2に示す。補強は2本のSRC柱に対して実施された。豊川橋の補強設計は「復旧仕様」に準拠して横拘束効果を考慮したコンクリートの応力-ひずみ曲線を用いて行い、地震時保有水平耐力法および3次元非線形動的解析により耐震性の検討を行った。この際、コンクリートの圧縮強度およびヤング係数はコンクリートコアによる試験結果の値を用いた。施工は、曲げ耐力補強用軸方向鉄筋(D32)をフーチングにエポキシ樹脂により定着し、写真-3に示すように、円形を4分割したプレキャストパネル(高さ:3.6m)を立て込み、既設橋脚との間に場所打ちコンクリートを打設した後に、スパイラル状に連続配置したPC鋼材を緊張することにより橋脚にプレストレスを導入した(図-1参照)。使用PC鋼材はシングルストランドφ15.2mmである。PC鋼材を帯鉄筋に用いた柱の鉛直載荷試験の結果¹⁾より、過大な緊張力を導入した場合はじん性改善効果が低下する傾向が確認されたことから、導入緊張力は効果が発揮されるための上限である降伏点荷重の1/3とした。一方、RC壁にはアクリルゴム系樹脂による防水ライニング処理が施された。

3. 調査概要

3.1 補強前劣化調査

橋脚にASRによるひび割れが発見された後、残留膨張性の予測を中心とした劣化度調査を実施した。コンタクトゲージ法(基長:100mm)による橋脚表面の横方向膨張量(橋脚軸方向ひび割れの変化)の現地計測および橋脚から採取したコンクリートコアを用いた残留膨張促進試験(デンマーク法およびJIS法)による判定により、橋脚の残留膨張性の評価を行った。また、補強設計のために橋脚の下段、中段および上段から採取した壁部材の貫通コンクリートコア(長さ:80cm)を用いて橋脚の各高さおよび表面からの各深さにおける圧縮強度およびヤング係数の測定を行い、さらに全塩分量(2NのHN03に

よる溶解)および中性化深さ(フェノールフタレイン法)の測定も実施した²⁾。

3.2 補強後の追跡調査

橋脚の補強工事完了後、PC鋼材巻立て工法により補強された橋脚におけるASRの長期性状を検証する目的で、温度履歴および場所打ちコンクリートのひずみ(地表から1.5mの位置)、既設橋脚のひび割れ幅(地表から5.4mの位置)について追跡調査を実施した。この際、既設橋脚の膨張挙動は場所打ちコンクリートに反映されるものと考え、各種計測機器は施工時に既設橋脚とプレキャストパネルとの間に埋設した。

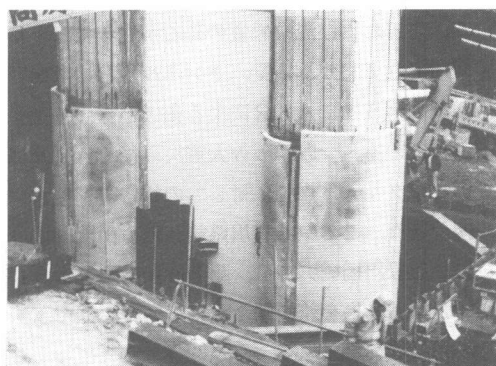


写真-3 プレキャストパネルの架設状況

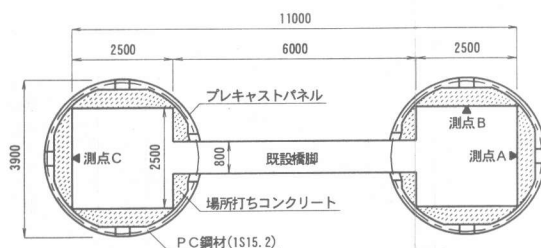


図-1 補強断面および測定位置

表-1 測定位置の要因区分

	日 射	プレストレス量
測点A	大	小
測点B	大	大
測点C	小	小

図-1にコンクリートひずみおよびひび割れ幅の測定位置を示す。また、表-1に測定位置の要因を示す。コンクリートのひずみは補強断面の半径方向および円周方向に埋設型ひずみ計を設置して測定し、同じひずみ計を納めた無応力容器を設けてひずみの値を補正した。また、既設橋脚のひび割れ幅は、ひび割れを跨ぐ形で亀裂変位計を設置して挙動を把握した。なお、各測定位置の場所打ちコンクリート内部およびプレキャストパネル表面付近に熱電対を設置し、橋脚の表面および内部の温度を測定した。データの測定間隔は昼夜毎を基本とし、1997年7月から自動計測を行っている。

4. 補強前の劣化度調査の結果

4.1 ひび割れの発生状況

写真-4に補強前におけるASRによるひび割れの発生状況を示す。柱部材では、下端から上端まで数mm幅のひび割れが軸方向に走り、さらに軸方向ひび割れを結ぶひび割れ網も確認された。採取したコンクリートコアの観察を行った結果、主たるひび割れは軸鉄筋位置(コンクリートのかぶり:8cm)まで到達し、ひび割れ面は中性化が進行していたが、鉄筋の腐食は認められなかった。これは、路面排水設備の完備により橋脚は融雪融氷剤の影響を直接受けず、コンクリートの塩分含有量が少なかった(内部塩分は存在)ことおよびアルカリシリカゲルが鉄筋を被覆した保護作用によるものと考えられた³⁾。一方、コンクリートの圧縮強度は地表からの高さおよび表面からの深さに関係なく設計基準強度(40N/mm²)をほぼ満足していたものの、ヤング係数の低下が顕著であり、9kN/mm²を下回るものもあり、ASRによるコンクリートの損傷はかなり進行しているものと考えられた。

4.2 残留膨張性の予測

図-2にコンタクトゲージ法による橋脚表面の膨張量の変化を示す。膨張は夏期に進行して冬期には停滞する傾向が認められた。いずれの

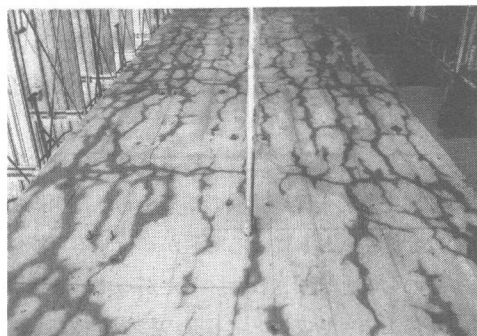


写真-4 橋脚柱部のASRによるひび割れの発生状況

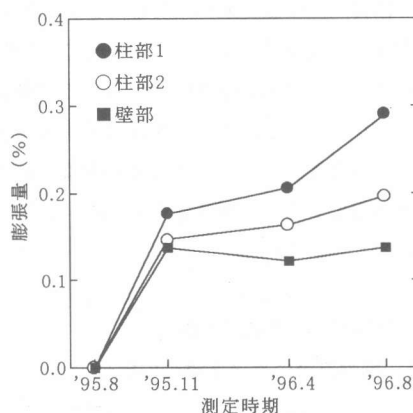


図-2 実橋脚の膨張量(補強前)

測定位置においても1年間で0.2%前後の膨張量(0.2mmのひび割れ幅の拡大に相当)が確認され、ASRによるひび割れの拡大は進行中であるものと判断された。また、柱部材における膨張量は壁部材と比較して大きいものとなった。

図-3に残留膨張促進試験の結果を示す。デンマーク法(50℃の飽和NaCl溶液に91日間浸漬)による結果では、コンクリートの残留膨張性は不明確(膨張率が0.1%~0.4%の領域)と判定された⁴⁾。しかし、試験期間内に膨張は収束しておらず、今後ともASRによる膨張は進行する可能性が高いものと判断された。一方、JIS法(38℃、相対湿度:100%の湿気槽での養生91日間)では、測定期間内に膨張傾向は認められなかった。橋脚表面の膨張量の現地計測の結果から判断して、今回実施した2種類の残留

膨張促進試験では、デンマーク法による残留膨張性の評価が妥当であり、ASRによるコンクリートの残留膨張性を的確に反映しているものと考えられた⁴⁾。

コンタクトゲージ法による実橋脚の現地計測および残留膨張促進試験の結果から、豊川橋橋脚は今後もASRによる膨張が進行する可能性が高いものと判断された。したがって、本橋脚の補強工法としては、ASRの膨張を抑制し、さらにひび割れの進展を拘束する効果を有する工法が適しているとの結論が得られた。したがって、橋脚内部の温度上昇によるASRの促進が懸念される鋼板巻立て工法やASRによる膨張に対する拘束効果が小さいRC巻立て工法よりも、プレキャストパネルで既設橋脚が保護され、導入されたプレストレスによる膨張の抑制効果が期待できるPC鋼材巻立て工法が適しているものと判断された。

5. 補強後の追跡調査の結果

5.1 補強直後における橋脚の挙動

図-4および図-5にプレストレス導入後から1週間における場所打ちコンクリートのひずみおよび既設橋脚のひび割れ幅の変化の一例(測点A)を示す。図-4に示すコンクリートのひずみの値には、無応力容器が設置されていないために乾燥収縮およびクリープの影響が含まれているが、半径方向、円周方向ともに補強完了後から徐々に圧縮側に増加する傾向が認められた。また、ひび割れ幅の変化もコンクリートひずみと同様の挙動を示し、測定期間中に0.02mm程度のひび割れ幅の縮小が確認された。以上の結果から、プレストレスの導入によりASRひび割れに対する拘束効果が得られているものと考えられた。また、プレストレスによる拘束効果は、導入直後に直ちに現れるのではなく、コンクリートのひずみおよびひび割れ幅の変化に見られるように、導入後に徐々に現れてくることが明らかとなった⁵⁾。

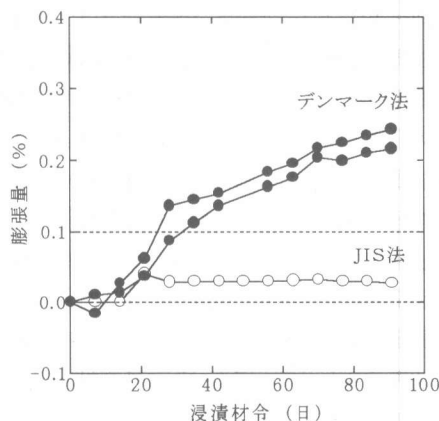


図-3 コンクリートコアの残留膨張促進試験の結果

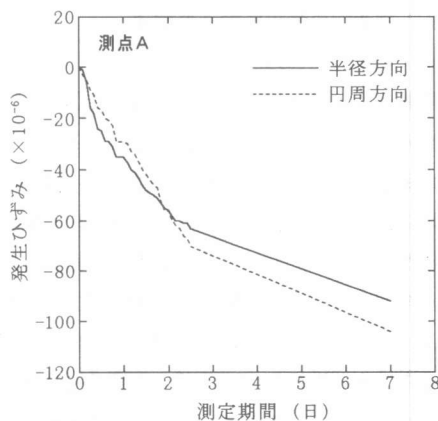


図-4 コンクリートのひずみの変化(補強直後)

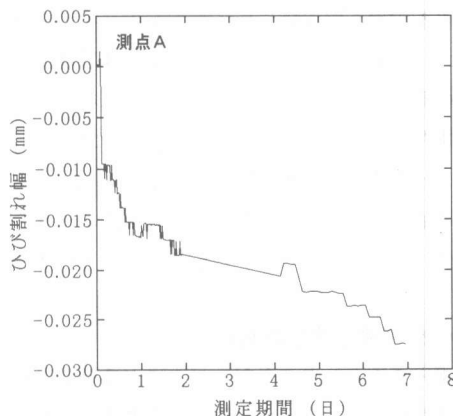
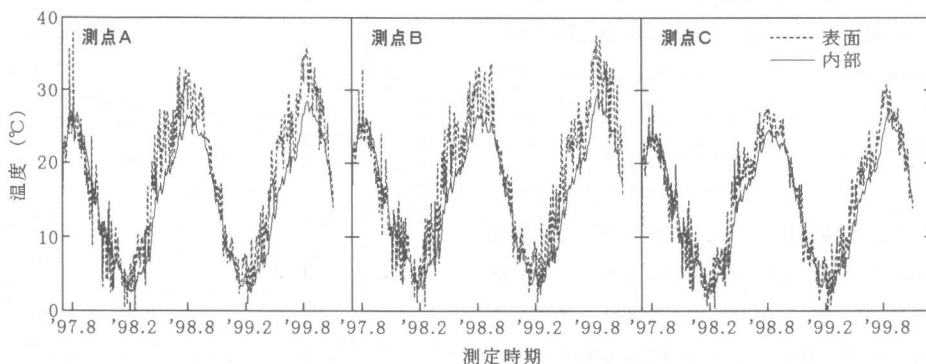
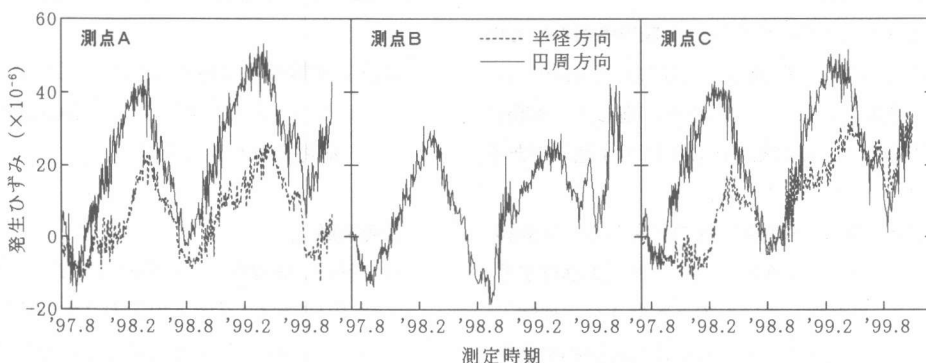


図-5 ひび割れ幅の変化(補強直後)



図－6 PC鋼材巻立て工法により補強された橋脚の温度履歴(補強後)



図－7 場所打ちコンクリートのひずみの変化(補強後)

5.2 長期的性状の追跡調査

(1) 温度履歴

図－6に橋脚の温度履歴を示す。温度履歴には季節変化が明確に現れていた。日射が大きい測点Aでは、夏期における表面温度は日射が小さい測点Cと比較して5℃程度高い値が測定されたが、両測点の内部温度の相違は非常に小さいものであった。橋脚の温度測定の結果から、既設橋脚をプレキャストパネルで覆うことにより内部温度の上昇が緩和されるとともに、通年変化も小さくなることが確認され、温度依存性が高いASRの進行が抑制されているものと推定できた。また、プレキャストパネルの設置により外部からの水分の侵入が遮断されることも期待できるようである。

(2) コンクリートのひずみの変化

図－7に補強後の場所打ちコンクリートのひずみの変化を示す。いずれの測点においてもひずみの値には季節変動の影響が顕著に現れていたが、膨張傾向は全く認められなかった。測点Aおよび測点B(日射：大)と測点C(日射：小)を比較すると、日射の影響はほとんど現れておらず、同様に測点A(プレストレス：小)と測点B(プレストレス：大)を比較してもプレストレス量の大小による相違は認められなかった。したがって、プレキャストパネルで覆われた本橋脚では、環境条件の影響を受けにくくなり、プレストレス量に関係なくASRによる膨張に対する十分な拘束効果が得られているものと判断された。

(3) ひび割れ幅の変化

図－8に既設橋脚のひび割れ幅の変化を示す。

補強前の調査では、前述した通り、1年間で約0.2mm程度のひび割れの拡大が確認されたが、補強後にはその値が0.08mm程度(測点B、測点C)となり、ひび割れの拡大はかなり低い水準に低減されていることが明らかとなった。ひび割れ幅の変化においてもプレストレスによる拘束効果が発揮されており、ASR膨張は効果的に抑制されているものと判断された。一方、測点Aについてはひび割れ幅が縮小する方向で季節変化を繰り返したが、その原因は不明である。

6. まとめ

ASRにより損傷を受けた豊川橋橋脚の劣化度調査およびPC鋼材巻立て工法適用後のASR膨張抑制効果の追跡調査を実施した。本調査で得られた主要な結果は以下に示す通りである。

- (1) 橋脚の劣化度調査の結果から、本橋脚は今後もASRによる膨張が進行する可能性が高いものと判断され、補強工法としてはASRによる膨張抑制効果が期待できるPC鋼材巻立て工法が採用された。
- (2) 補強後の橋脚では、プレキャストパネルによる内部温度上昇の緩和および水分の遮断効果が発揮され、ASR進行の抑制を期待できた。
- (3) 補強後の場所打ちコンクリートのひずみおよび既設橋脚のひび割れ幅の変化にはプレストレスによるひび割れの拘束効果が発揮され、ASR膨張は効果的に抑制されていた。
- (4) 補強後2年半の期間においては橋脚のASR膨張は抑制されていることが確認できたが、さらに長期間の検証が必要であり、現在も調査を継続中である。

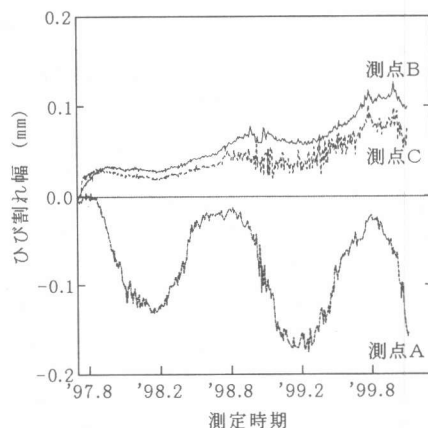


図-8 ひび割れ幅の変化(補強後)

謝辞：本調査の実施に当たり、ご指導いただいた金沢大学工学部川村満紀教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 森拓也, 張建東: PC鋼材を帯鉄筋に用いた円柱コンクリートの応力-ひずみ関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 315-320, 1997. 6
- 2) 鳥居和之, 奥田由法, 松田康孝, 川村満紀: ASRによる損傷を受けた鉄骨・鉄筋コンクリート橋脚の補強設計のための調査, 第24回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp. 155-160, 1997. 11
- 3) S. Diamond: Alkali-silica Reaction: Some Paradoxes, Proc. of the 10th Int. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, pp. 3-14, Aug. 1996
- 4) 竹内勝信, 川村満紀, 鳥居和之: アルカリシリカ反応によって劣化したコンクリートの組織と残留膨張性の予測, 材料, Vol. 43, No. 491, pp. 963-969, 1994. 8
- 5) 石井浩司, 奥田由法, 森拓也, 鳥居和之: ASR損傷橋脚の補強に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, pp. 931-936, 1997. 6