

## 論文 ASR 損傷コンクリート橋脚の補修・補強に関する研究

奥田由法\*<sup>1</sup>・石井浩司\*<sup>2</sup>・鳥居和之\*<sup>3</sup>・松田康孝\*<sup>4</sup>

要旨：ASR 損傷構造物の補修・補強の方法として樹脂塗装工法，鋼板接着工法，PC 鋼材巻立て工法に注目し，大型コンクリート試験体を屋外暴露することでそれらのASR 抑制効果を検討した。その結果，樹脂塗装工法はコンクリート内部の水分のみで十分に膨張が生じASR 抑制効果が期待できないこと，また，鋼板接着工法とPC 鋼材巻立て工法はASR による膨張の進行を抑制するが，鋼板接着工法はPC 鋼材巻立て工法と異なりASR による膨張の異方性に注意する必要があることが明らかになった。

キーワード：ASR，橋脚，損傷，補修・補強，PC 鋼材，プレストレス力，抑制，拘束

### 1. はじめに

アルカリ骨材反応 (ASR) が原因で損傷を受けたコンクリート構造物の補修や補強の方法としてコンクリート表面の樹脂塗装，鋼板の接着および鉄筋コンクリートの巻立て，などが挙げられる。しかし，実構造物にこれら補修や補強の方法を適用した場合のASR 抑制効果に関する報告は少なく，十分に明らかになっていないのが現状である。

著者らはASR が原因で劣化したコンクリート橋脚に注目し，その補修・補強の一方法としてPC 鋼材を補強材として使用する方法 (PC 鋼材巻立て工法) の適用性をコンクリート試験体を製作し暴露試験と中心軸圧縮試験を行い検討しており<sup>1)</sup>，実橋脚への施工も行っている<sup>2)</sup>。しかし，ASR の進行状況を考慮した最適なプレストレス力の決定やプレストレス力によるひび割れ拘束の持続性など，明らかでない点も残されている。

本研究は反応性骨材を使用した大型コンクリート試験体を製作しASR によるひび割れを

生させた後，代表的な補修・補強の方法である樹脂塗装工法，鋼板接着工法，および，PC 鋼材巻立て工法を適用し，それらのASR 抑制効果を屋外暴露試験を行い検討することを目的としている。本論文は暴露2年までの結果を示すものである。

### 2. 実験概要

#### 2. 1 試験体の製作

使用したセメントは普通ポルトランドセメント (等価  $\text{Na}_2\text{O}$  量 : 0.68%) である。コンクリートに使用した骨材は，細骨材として非反応性の川砂 (富山県早月川産) を使用し，粗骨材として非反応性の碎石 (富山県早月川産) と反応性鉱物として火山ガラスおよびクリストバライトを含有する両輝石安山岩 (石川県能登半島産) を使用した。両輝石安山岩のアルカリシリカ反応性試験 (化学法) の結果は， $S_c=609\text{mmol/l}$ ， $R_c=223\text{mmol/l}$  である。使用したコンクリートの配合は一般的な橋脚に使用されているものとし，それを表-1に示す。ASR を促進させるため

\* 1 (株) ピー・エス北陸支店工務部次長 (正会員)

\* 2 (株) ピー・エス技術研究所研究員 工博 (正会員)

\* 3 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

\* 4 神戸市役所 工修

表-1 コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
				水	セメント	細骨材	非反応性骨材	反応性骨材
8±2	2±1	53	42	164	308	784	562	563

に等価 Na<sub>2</sub>O 量が 8kg/m<sup>3</sup> になるよう練混ぜ水に NaOH を添加しアルカリ量を調節した。

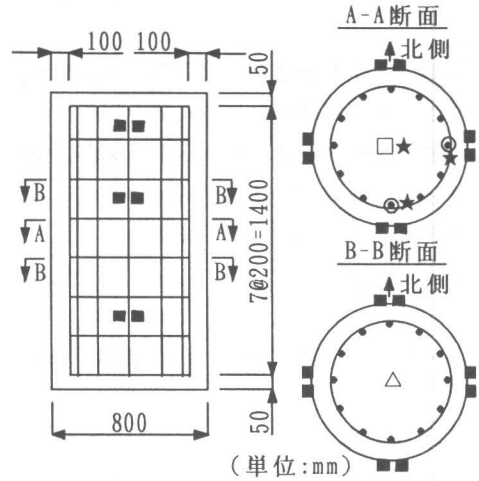
製作した試験体は鉄筋コンクリート柱であり、図-1 にその概要を示す。軸方向鉄筋と帯鉄筋には、それぞれ D22mm と D16mm の異形鉄筋を使用した。また、コンクリートの膨張量と温度を測定するために図-1 に示すように埋込型ひずみ計、ひずみゲージ、コンタクトゲージ用チップおよび熱電対を設置した。

2.2 試験体の暴露と補修・補強工法

試験体は脱枠終了後、ASR を促進させるために材令 1ヶ月まで蒸気養生（最高温度：60℃）に供した。その後、屋外暴露試験に供し、材令 1年で補修・補強を行った。

PC 鋼材巻立て工法（試験体 PC）は表-2 に機械的性質を示す φ 2.9mm 2 本より線（SWPR2N）の PC 鋼線を 50mm の間隔で試験体表面に配置し、一本毎に緊張を行った。なお、PC 鋼材の定着はそれぞれ 90° ずつずらしている。また、プレストレス力は、補強後の橋脚のじん性向上が期待できるプレストレス力に範囲があるとする報告<sup>3)</sup> を参考にし PC 鋼線への導入プレストレスが平均で降伏強度の 1/3 程度になるように決定し、初期緊張力を与えた。その後、ASR による膨張の影響を把握するために PC 鋼線にひずみゲージを貼り付け、試験体側面の全面に無収縮モルタルを使用して 50mm の増し厚を行った。

鋼板接着工法（試験体 RC）は、試験体周方向に 4 分割した鋼板（SS400、t=9mm）を事前に溶接により閉合し、コンクリートアンカーを使用して試験体に設置した。試験体表面と鋼板との隙間（4mm）にはエポキシ樹脂を注入し、鋼板表面には樹脂塗装を行った。また、試験体 PC と同様に鋼板表面にはひずみゲージを貼付けた。



記号	測定項目
□	軸方向コンクリートひずみ
△	半径方向コンクリートひずみ
■	コンクリート表面ひずみ
○	軸筋、帯筋ひずみ
★	温度

図-1 試験体概要と測定位置

表-2 PC 鋼線の機械的性質

引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	破断伸び (%)	弾性係数 (MPa)
1962	1776	8.7	2.00×10 <sup>5</sup>

表-3 試験の要因

試験体 No.	補修・補強 の方法	体積比(%)	
		帯筋	補強材 横拘束筋
D	-	-	0.64
P	樹脂塗装	0.64	0.64
RC	鋼板接着(t=9)	4.5	5.14
PC	PC 鋼材巻立て (SWPR2N)	0.13 (0.76)	0.77 (1.40)

( ): 降伏強度を考慮した換算体積比  
横拘束筋: 帯鉄筋+補強材

樹脂塗装工法（試験体 P）は、アクリルゴム系塗装材料を使用して試験体底面を除き全て塗装を行った。

各補修・補強工法の ASR 抑制効果を把握す

るために補修・補強を施さない試験体（試験体D）も製作した。

表-3に試験の要因を示す。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 コンクリートのひび割れ発生状況

試験体Dに発生したひび割れ発生状況を図-2に示す。図中の太線は比較的ひび割れ幅の大きな（約0.5mm~1.0mm）ものを示している。

ひび割れはコンクリート試験体の中央部から上部にかけて多く存在し、特にひび割れ幅の大きなものは上部に集中していた。また、雨水など、水が試験体表面上を流れるような箇所にはひび割れが集中する傾向にあった。

このことよりひび割れの発生や発達、コンクリート内部へ水分の供給が容易な箇所（本試験においては試験体上部など）において活発となり、その周辺にASRによるひび割れが進展するものと推定される。

#### 3.2 コンクリートの膨張挙動

図-3に補修・補強を施していない試験体Dのコンクリートひずみと鉄筋ひずみの経時変化を示す。なお、測定結果は埋込型ひずみ計とひずみゲージの温度補正を行って示している。

試験体中心部分のコンクリートひずみは、暴露開始が夏期のために試験体半径方向と軸方向のいずれも暴露開始と同時に活発な膨張を示している。膨張は暴露150日まで継続し、その後300日まで停滞した後に再び膨張する傾向を示

し、特に半径方向の膨張は軸方向のそれと比較して著しく暴露2年目で $4000 \times 10^{-6}$ にも達していた。これら著しい膨張を示す期間はいずれも夏期であり、冬期に膨張が停滞している。この傾向はASRによる膨張は季節変動による階段状の膨張挙動を示すとする報告<sup>4)</sup>と一致するものである。

一方、軸筋ひずみ、帯筋ひずみはコンクリートの軸方向ひずみ、半径方向ひずみと比較してそれぞれ1/2程度、1/10程度の膨張量を示していた。また、南側の帯鉄筋ひずみは東側のそれと比較して大きくなる傾向を示しており、さらに、暴露300日以降減少し圧縮側に移行する傾向にあった。

コンクリート表面の膨張は、試験体上部のそれが最も大きく、続いて中央部、下部の順であった。この傾向は3.1のひび割れ発生状況と一致するものである。暴露2年目の膨張量は0.25%~0.35%程度であり試験体中央部の半径方



図-2 ひび割れ発生状況

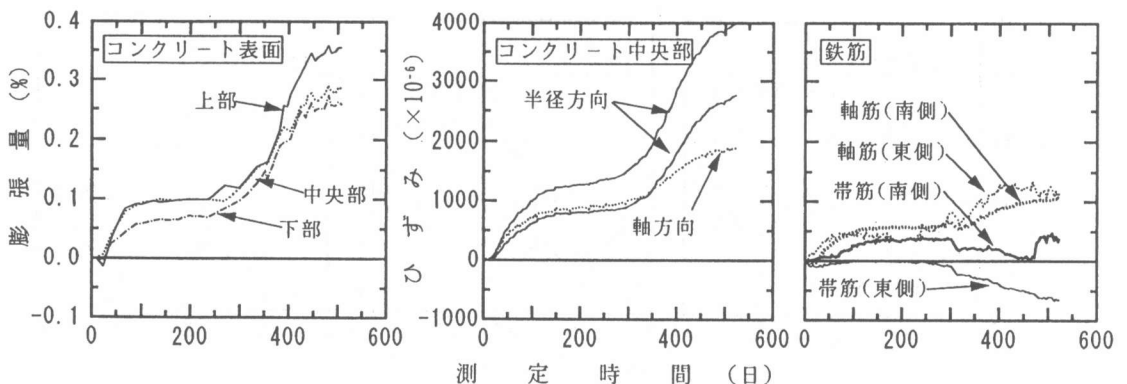


図-3 コンクリートと鉄筋のひずみの経時変化（試験体D）

向ひずみとほぼ同じ膨張量を示している。

試験体の各位置や各方向の膨張量を考慮すると、試験体中央部のコンクリートにも無数の微細なひび割れが発生しているものと推定される。

### 3.3 補修・補強のASRの抑制効果

#### (1) プレストレスの導入効果

試験体PCにプレストレスを導入した時の半径方向のコンクリートひずみと帯筋のひずみを測定し、その結果を図-4に示す。測定結果は埋込型ひずみ計とひずみゲージの温度補正を行い示している。

いずれのひずみも緊張作業中、 $10 \times 10^{-6}$ 程度の変動を繰り返して大きな変化は認められなかった。しかし、緊張終了後1時間毎に測定したところ徐々に圧縮ひずみが発生する傾向にあった。この結果は導入したプレストレス力が徐々に現れることを示すものであり、プレストレスの導入効果が1週間後にも認められたとした報告<sup>1)</sup>と一致するものである。

#### (2) コンクリート温度への影響

ASRによる膨張は温度の影響を受けることが知られており、補修・補強に使用する材料の熱伝導率や厚さを考慮すると、適用する補修・補強の方法によってはコンクリート温度が補修・補強以前より高くなり、ASRを促進する可能性が考えられる。

図-5は夏期にコンクリート温度を48時間連続して測定した結果を示したものである。各試験体の帯筋位置、試験体中心部の最高温度を

比較すると $2^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ の相違が認められ、試験体D、試験体RC、試験体PCの順に小さくなる傾向が認められた。また、試験体PCではモルタルを用いて増し厚を行ったために試験体中央部と帯筋位置や暴露方向(東側と南側)での温度差が無くなる傾向にあったが、その他の試験体では帯筋位置の温度が中心部のそれと比較し高くなり、南側帯筋位置の温度が東側帯筋位置のそれと比較し高くなる傾向が認められた。南側と北側とではさらにコンクリートの温度差が大きくなるものと予測される。

これらの結果は、補修・補強の方法や暴露方向の相違によりコンクリートの内部位置におけるコンクリート温度の上昇傾向が相違し、ASRによる膨張挙動が異なる可能性があることを示すものである。また、3.2で示した暴露方向による帯筋ひずみの相違は、コンクリート温

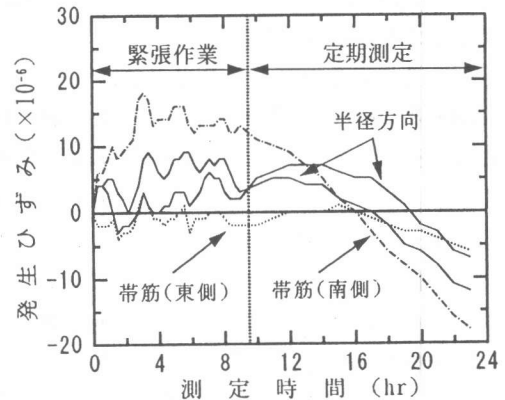


図-4 プレストレス力の導入効果

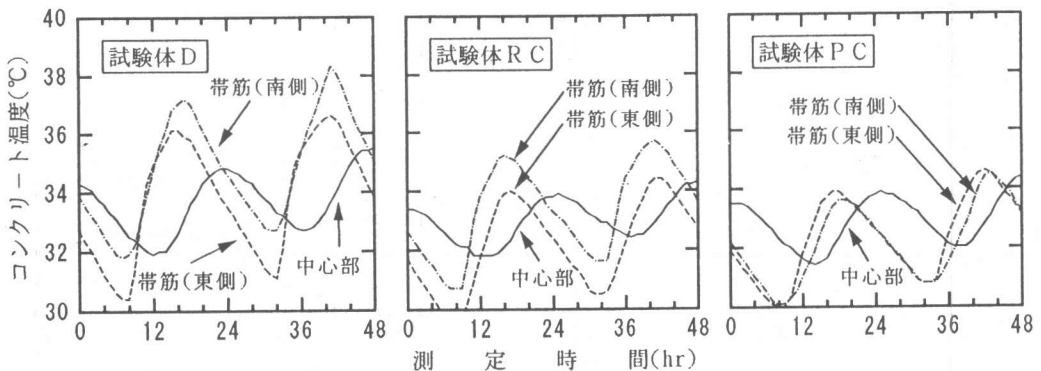


図-5 コンクリート温度の日変化

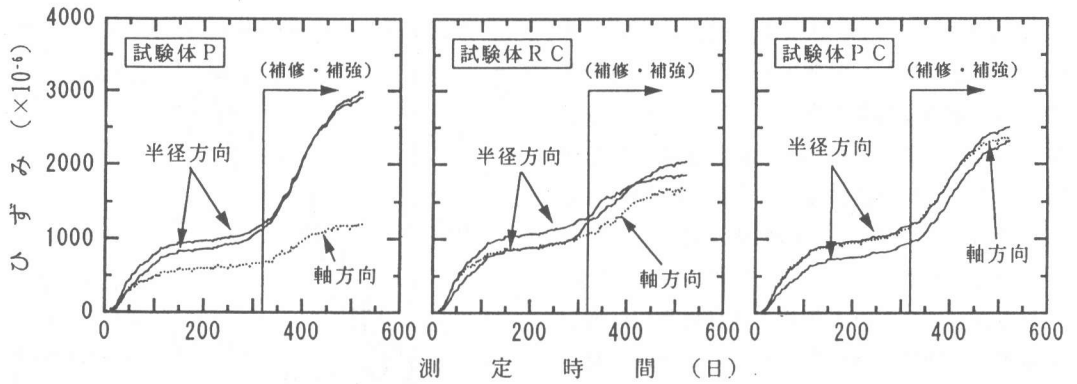


図-6 各補修・補強を施した試験体のコンクリートひずみの経時変化

度の相違が原因で生じるASRによる膨張挙動の相違が起因したものと考えられる。

### (3) 補修・補強のASRの抑制効果

図-6は補修・補強を施した試験体のコンクリートひずみの経時変化を示したものである。

試験体Pの試験体半径方向のコンクリート膨張量は暴露2年目で $3000 \times 10^{-6}$ 程度に達し、試験体Dのとはほぼ同様に補修後も著しい膨張挙動を示していた。これはコンクリート中に存在する水分のみでASRは進行することを示しており、小型試験体を用いた試験結果<sup>4)</sup>でも確認されている。しかし、現在までのところ塗膜にわれなどの変状は認められていない。

試験体RCの膨張は、試験体Pや試験体Dと比較して試験体半径方向と軸方向のひずみが小さくなる傾向を示していた。これは鋼板によりASRによる膨張が抑制された結果を示すものである。

試験体PCの膨張は、試験体Pや試験体Dと比較して試験体半径方向のコンクリートひずみが小さくなり、試験体RCと比較すると大きくなる傾向が認められた。この結果は、PC鋼材巻立て工法は樹脂塗装工法と比較してASRによる膨張の抑制効果が大きく、鋼板接着工法より小さいことを示すものである。しかし、試験体RCと試験体PCの補強の方法を比較すると、表-3に示すように試験体RCの体積比が試験体PCのそれより30倍程度(換算体積値で6倍程度)大きいこと、試験体RCが面で膨張を抑

制するのに対して試験体PCは線で抑制していること、など両補強工法に相違点があり、これら相違点が試験結果に影響したものと推定される。また、実構造物へPC巻立て工法を適用する場合には軸筋、帯筋およびPC鋼材を有するプレキャストコンクリート製パネルを設置して面による抑制を行うために、抑制効果は大きくなるものと予測される。

試験体PCの試験体軸方向のコンクリートひずみは他の試験体のそれと比較して若干大きくなる傾向が認められた。これは試験体半径方向にプレストレスを与えておりASRによる膨張力が試験体半径方向よりも軸方向に働いている結果と考えられる。これは本試験では試験体に軸方向応力を負荷させておらず実構造物の応力状態と相違する試験条件で試験を行ったためと考えられ、PC鋼材巻立て工法を実構造物へ適用した場合には、軸方向ひずみの増加は少ないものと予想される。

### (4) 補強材料の挙動

図-7はASRによる膨張が補強材料に与える影響を把握するために補強材料に発生する試験体周方向のひずみを検討したものである。図中のひずみは温度による補強材料の膨張などを補正して示している。

鋼板のひずみは夏期に増加し冬期に安定する傾向を示しており、ASRによる膨張が原因と考えられる。また、暴露方向により大きく相違し、南側のそれは $2000 \times 10^{-6}$ にも達していた。

(2)に示したように日射により南側のコンクリート温度が上昇し、北側のA S Rによる膨張と比較し南側のそれが大きくなったことによるものと考えられる。この結果は鋼板接着工法を適用した場合、日射による温度上昇が原因で生じる局所的なコンクリートの膨張が起因し、将来溶接部分に変状が発生する可能性を示している。

P C 鋼材のひずみも鋼板と同様に夏期に増加するが、冬期には減少する傾向にあった。発生したひずみは鋼板のそれと比較し1/3程度小さく、さらに、暴露方向に影響されておらず均一となる傾向を示していた。この結果は鋼板と比較して日射などによる局所的なA S Rによる膨張が及ぼすP C 鋼材への影響が少ないことを示している。しかし、同様の傾向でP C 鋼材のひずみが増加するとすれば、高降伏点強度を有するP C 鋼材もいずれは鋼板と同様に変状が生じる可能性が考えられ、引き続き検討する必要があるものと考えられる。

#### 4. まとめ

A S Rが原因で損傷を受けた構造物、特に、橋脚の補修・補強の代表的な方法として、樹脂塗装工法、鋼板接着工法およびP C 鋼材巻立て工法を取り上げ、大型コンクリート試験体を製作し長期屋外暴露試験に供してこれら各工法のA S R抑制効果を検討している。本試験条件は実構造物に対する補修・補強条件などと多少相違するものの、2年間の暴露の結果、樹脂塗装工法はコンクリート中の水分のみでA S Rによる膨張が生じ、A S R抑制効果があまり期待できない可能性が大きいと考えられた。また、鋼板接着工法のA S Rによる膨張の抑制効果は期待できるが、日射などにより鋼板内側のコンクリート温度が上昇する場合にはA S Rが促進され、将来的には鋼板溶接部分に変状が発生する可能性がある。一方、P C 鋼材巻立て工法のA S Rによる膨張の抑制効果は期待できるが、さらに長期に測定を行いその効果の継続性などを検討する必要があると考えられる。

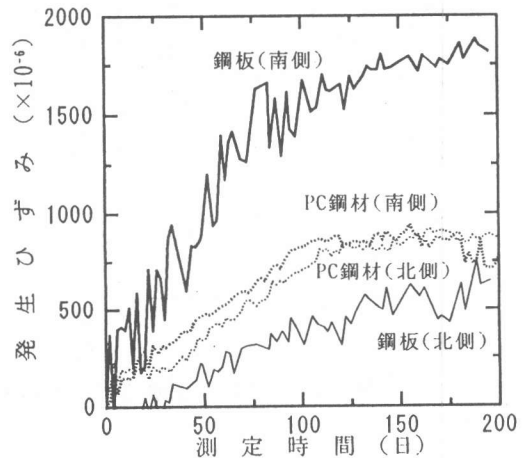


図-7 コンクリートの膨張が補強材料に与える影響

現在、P C 鋼材巻立て工法のA S Rによる膨張の抑制効果について現地計測を行い検討している。これについては、別の機会に報告したいと考えている。

#### 謝辞

本実験の遂行にあたり終始御指導頂いた金沢大学 川村満紀教授、また、ご協力頂いた(株)ピー・エス 鈴木義晃氏に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 石井浩司ほか：A S R 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, pp931-936, 1997
- 2) 奥田由法ほか：P C 巻立て工法によるA S R 劣化橋脚の補強，コンクリート工学，Vol. 35, No. 8, pp9-14, 1997. 8
- 3) 張建東ほか：P C 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, pp315-320, 1997
- 4) 竹内勝信ほか：自然環境に曝露したコンクリートのアルカリシリカ反応による膨張とひびわれ，コンクリート工学論文集，Vol. 6, No. 1, pp11-19, 1995