

論文 ASR 損傷橋脚の補強に関する研究

石井浩司^{*1}・奥田由法^{*2}・森 拓也^{*3}・鳥居和之^{*4}

要旨: A S Rにより損傷を受けたコンクリート橋脚への補修・補強の一方法として、P C鋼材を補強材として用いる方法の適用性を、製作したコンクリート試験体を屋外暴露しコンクリートの膨張量測定や中心軸圧縮試験を行い検討した。その結果、P C鋼材を使用しコンクリートへプレストレス力を与えた場合、A S Rによるひび割れは拘束され、損傷を受けていないコンクリートと同様に大幅なじん性の改善が期待できることが確認された。

キーワード: A S R、橋脚、損傷、補強、P C鋼材、プレストレス力、拘束、じん性

1.はじめに

安山岩や流紋岩などの反応性骨材を使用したコンクリート構造物において、コンクリートの配合条件や構造物の置かれている環境条件などの組み合わせによりアルカリシリカ反応（A S R）によるひび割れなどの損傷が生じることが報告されている〔1〕。

A S Rにより損傷を受けた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布、ひび割れの注入、鋼板や炭素繊維シートの接着、および、鉄筋コンクリート巻き立て、などが挙げられている〔2〕。また、A S Rにより損傷を受けた構造物の力学特性に関して、鉄筋コンクリート梁や鉄筋コンクリート柱（R C柱）を用いて検討した結果、A S Rによる損傷は力学特性に大きな変化を与えないとする報告〔3〕や阪神大震災によるコンクリート構造物の被害にA S Rによる損傷が関与していたのではないかとの報告〔4〕などもある。

著者らはA S Rにより損傷を受けたR C橋脚に注目し、その補修・補強の一方法としてP C鋼材を補強材として使用する方法〔5〕の適用性を小型コンクリート試験体と大型コンクリート試験体を製作して検討している。P C鋼材を使用した補修・補強の方法には、①プレストレス力がひび割れを拘束し、A S Rによる膨張を抑制する、②単なるA S Rの補強ではなく耐震性能を向上させる、および、③プレストレス力が断面修復部やコンクリート巻き立て部などの新旧コンクリートの密着性を確保し、耐久性を向上させる、などの利点が期待できる。

そこで本研究はA S Rによる損傷を受けたR C橋脚の補修・補強の一方法としてP C鋼材を補強材として使用する方法の適用性を小型コンクリート試験体を用いてA S R抑制効果と耐震性能の向上から検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 コンクリート試験体の製作

使用したセメントは普通ポルトランドセメント（等価N a₂O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

* 1 (株) ピー・エス技術研究所研究員、工博（正会員）

* 2 (株) ピー・エス北陸支店工務部次長

* 3 (株) ピー・エス本社土木技術部主任研究員

* 4 金沢大学教授 工学部土木建設工学科、工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合

配合種類	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	非反応性粗骨材	反応性骨材
N配合	8±2	53	2±1	42	164	308	784	1125	—
A配合	8±2	53	2±1	42	164	308	784	562	563

として非反応性の砕石（富山県早月川産）と反応性鉱物として火山ガラス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、 $S_c = 609 \text{ mm} \cdot \text{mol}/\text{l}$ 、 $R_c = 223 \text{ mm} \cdot \text{mol}/\text{l}$ である。使用したコンクリートの配合は一般的なRC橋脚に使用されているものとし、それを表-1に示す。なお、A配合およびN配合ともに等価Na₂O量が8 kg/m³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RC柱であり、図-1にその概要を示す。軸方向鉄筋にはD10mmの異形鉄筋を、帯鉄筋にはφ6mmの丸鋼を使用した。使用した鉄筋の機械的性質を表-2、試験要因を表-3に示す。また、コンクリートの力学的特性を測定するために円柱試験体（φ100×200mm）を同時に製作した。なお、全ての試験体は、材令3日で脱枠した。

2.2 コンクリート試験体の暴露と補強

全てのコンクリート試験体は脱枠終了後、ASRを促進させるために材令1ヶ月まで蒸気養生に供した。その後、載荷試験を行うまでの間、屋外暴露に供した。なお、蒸気養生はプレストレストコンクリート部材を製作するに際して用いられる一般的な条件（最高温度：60°C）を行った。

蒸気養生によって発生したひび割れがその後の屋外暴露期間中に進展し、そのひびわれ幅が0.2mm程度になった時点で試

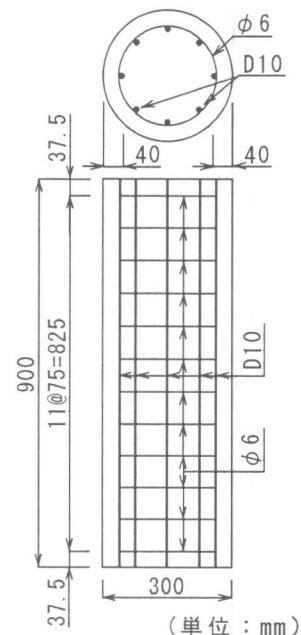


図-1 RC柱試験体の概要

表-3 試験の要因

試験体	N P	A P	N B	A R C	A P C
配合	N	A	N	A	A
帶鉄筋 体積比(%)	なし 0.0	なし 0.0	φ6 ctc75 0.5	φ6 ctc75 0.5	φ6 ctc75 0.5
補強材 体積比(%)	なし 0.0	なし 0.0	なし 0.0	帯鋼板 ctc75 0.23	SWPR2N ctc75 0.23
換算体積比(%) ^{注1)}	0.0	0.0	0.0	0.23	1.37
横拘束筋 ^{注2)} 合計体積比(%)	0.0	0.0	0.5	0.73	0.73
合計換算体積比(%)	0.0	0.0	0.5	0.73	1.87

注1) 降伏点強度を考慮し、普通丸鋼に対する補強材の降伏点強度を体積比に乗じたもの。

注2) 横拘束筋=帶鉄筋+補強材

試験体A R Cと試験体A P Cに補強を行った。

試験体A R CではS R 2 3 5相当の機械的性質を有した帶鋼板（幅：11mm、厚さ：2mm）を、試験体A P Cでは表-2に機械的性質を示すφ2.9mm 2本より線（S W P R 2 N）のP C鋼線を7.5mmの間隔で試験体表面に配置した。使用した補強材料の種類から、それぞれの補強の方法を帶鋼板巻き補強、P C鋼材巻き補強とする。帶鋼板はゆるみのないような状態で溶接によって閉合した。P C鋼材は平均プレストレスが降伏強度の20%程度になるように初期緊張力を与えた。両試験体の補強材の材質は異なるが、体積比は全く同じである。なお、補強した試験体は試験体表面を一切被覆せずに、再度、屋外暴露に供した。

2.3 膨張量の測定と載荷試験

蒸気養生終了後、試験体表面の円周方向に4箇所（側面が位置する方向で東、西、南、および、北方向面とした）、軸方向に3箇所（上、中央、および、下部とした）の合計12箇所にひび割れをまたぎコンタクトゲージを取り付け、コンクリートの膨張量を測定した。また、ASRによる損傷程度を把握するために、超音波伝播速度を測定した。測定は南北方向面と東西方向面の帶鉄筋間で行った。

屋外暴露終了後、1000ton耐圧試験機を使用して中心軸圧縮試験を行った。載荷板の変位量を測定し、試験体高さで変位量を除することで軸方向ひずみを算出し、各試験体の軸方向応力とひずみの関係より力学的挙動を検討した。なお、最大応力度以降、その70%まで応力が低下しても破壊しない場合には、その時点で試験を中止した。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリートの力学特性

蒸気養生終了後（材令1ヶ月）、各配合のコンクリートの圧縮強度と静弾性係数を測定し、その結果を表-4に示す。なお、A配合を使用した強度測定用試験体の表面には、ASRによるひび割れが発生していた。圧縮強度はA配合のコンクリートがN配合のそれと比較し10%程度大きく、弾性係数は40%程度小さい傾向にあった。コンクリートへのNaOHの添加は、圧縮強度を低下させるが静弾性係数には影響を及ぼさないと報告〔6〕がある。A配合と比較してN配合のコンクリート圧縮強度の低下は、コンクリート打設時に混入したNaOHが、A配合では反応性骨材のASRにより消費されるのに対しB配合では消費されず、圧縮強度に及ぼすNaOH量に相違が生じたことが、ASRが及ぼす圧縮強度への影響より大きかったものと推定される。弾性係数に関する傾向はASRによる影響を受けたものと考えられる。

3.2 コンクリートのひび割れ発生状況

A配合を使用したRC柱試験体に関して、試験体A P（無筋試験体）と試験体A P C（配筋試験体）に発生したひび割れの展開図を図-2に示す。蒸気養生終了後、試験体A Pと試験体A P Cには試験体全体に幅0.05mm程度、長さ5~10cm程度のひびわれが認められた。その後の屋外暴露において、いずれの試験体においても蒸気養生の期間中に発生したひびわれがつながり、暴露10週で幅が0.1~0.2mmにまで発達した。

3.3 コンクリートの膨張量

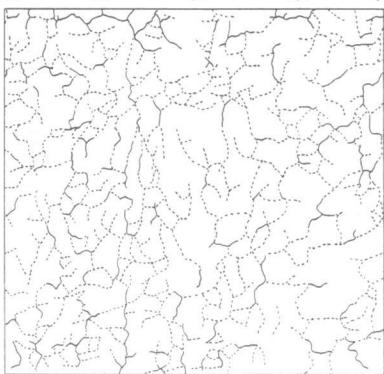
（1）配筋の影響

試験体A P、試験体A R C、および、試験体A P Cのコンクリートの膨張量の測定結果の一例

表-4 コンクリートの力学的特性

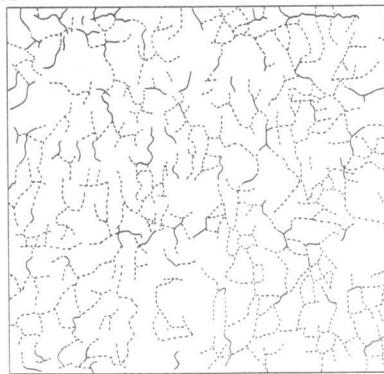
配合種類	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (MPa)
N	16.3	1.40×10^4
A	18.3	0.85×10^4

北 西 南 東 北



試験体A P

北 西 南 東 北



試験体A PC

：蒸気養生中
ひび割れ

：屋外暴露中
ひび割れ

図-2 ひび割れ発生状況

を図-3に示す。なお、測定結果は蒸気養生終了直後に測定した基長に基づいており、南方向面のものを示している。屋外暴露開始時期が夏期にあたるために、いずれの試験体も屋外暴露開始から活発に膨張する傾向が認められた。上部、中央部、および、下部の膨張量の平均値で代表させ検討すると、無筋である試験体A Pは暴露4週で0.1%程度の膨張量を示し、それ以降膨張する傾向は認められなかった。しかし、同暴露期間において配筋した試験体A R Cと試験体A P Cの膨張量は0.08%程度であり、試験体A Pと比較して小さい傾向にあった。

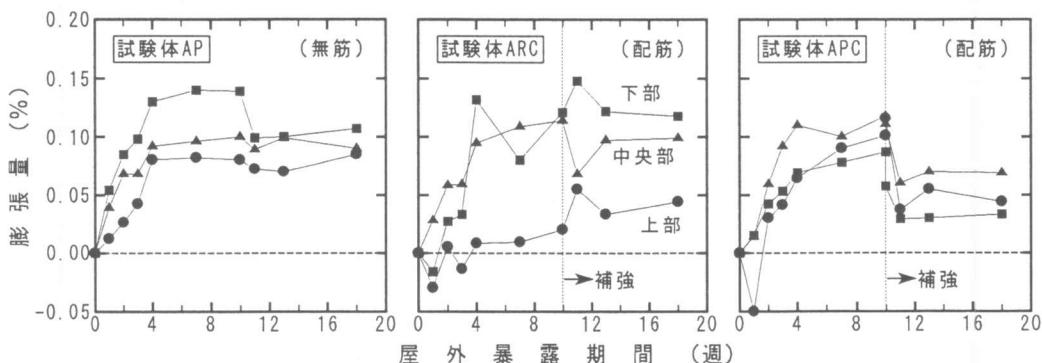


図-3 コンクリートの膨張測定結果

(2) 補強による拘束効果

2.2および3.2に示したように屋外暴露10週でひび割れ幅が0.2mmに達したので補強を行った。図-3に示すように帶鋼板巻き補強を行った試験体A R Cについて、補強終了後も測定する場所によっては若干の膨張が認められた。一方、P C鋼材巻き補強を行った試験体A P Cでは補強直後に0.03%程度膨張量が減少し、補強終了後1週までにさらに減少し補強前と比較して0.06%程度減少する傾向が認められた。また、補強終了後に膨張する傾向は認められなかった。これは、P C鋼材によるプレストレス力が補強以前に発生していたひびわれ幅を減少させ、さらに、ASRによる膨張を抑制した結果と考えられる。また、プレストレス力の影響

がそれを与えた直後と1週間後にも認められたことから、プレストレス力の影響は徐々に現れるものと推定される。

3.4 超音波伝播速度

A S Rにより損傷を受けたコンクリートの超音波伝播速度は損傷を受けないものと比較し減少すると報告されており[7]、超音波伝播速度の測定によりA S Rによる損傷程度に及ぼす鉄筋配置の影響や補強の効果が推定できるものと考えられる。屋外暴露10週(試験体A P Cに関しては補強前後)に行った超音波伝播速度の測定結果を図-4に示す。試験体A Pの超音波伝播速度は、試験体A R Cと試験体A P Cのそれと比較すると小さく損傷

程度が大きいと推定される。また、試験体A P Cについて、補強の前後で変化が認められた。すなわち、補強後の超音波伝播速度が補強前のそれより大きくなる傾向を示していた。この結果は3.4(2)と同様にプレストレス力によるひび割れの拘束効果によるものと推定される。

3.5 載荷試験

得られたコンクリートの軸方向応力度と軸方向ひずみの関係を図-5に示す。鉄筋を配置していない試験体N Pと試験体A Pは、軸方向応力度が最大圧縮応力度に達した後急激に破壊した。試験体N Pと比較し、試験体A Pの最大圧縮応力度が高くなっている。これは3.1に示した結果と同様にA S Rの進行によるN a O Hの消費によるものと考えられる。

帯鋼板巻き補強を行った試験体A R Cでは、試験体A Pと比較して最大応力度が増加し最大応力度以降の二次勾配も緩やかになる傾向が認められた。試験体A R Cは鋼板接着工法や鉄筋コンクリート巻き立て工法による補強の方法に使用する鋼材とほぼ同様な補強材料を使用しており、A S Rにより損傷を受けたコンクリートに対してもこれらの補強の方法によって、コンクリートの強度やじん性を改善できることが確認された。

一方、P C鋼材巻き補強を行った試験体A P Cは、最大圧縮応力度までは試験体A R Cとほとんど同様な軸方向応力度とひずみの関係を示していたが、それ以降の二次勾配領域では大きく相違する傾向にあった。すなわち、試験体A P Cと試験体A R Cの横拘束筋合計体積比が同じであるのに関わらず、試験体A P Cの二次勾配は下降せずに緩やかな上昇を示していた。これは、二次勾配領域においてはP C鋼材の高降伏点応力度に

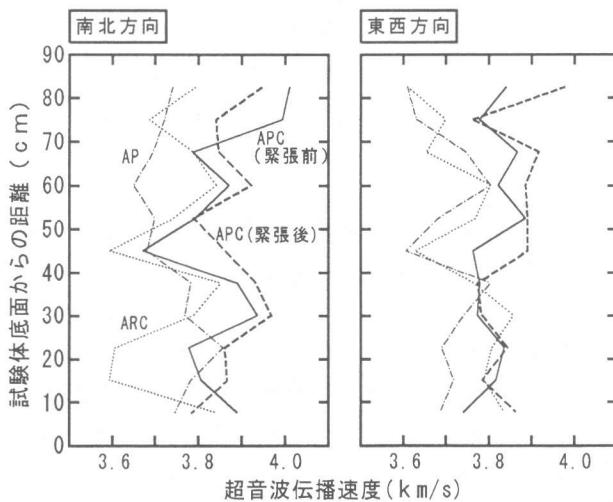


図-4 超音波伝播速度の測定結果

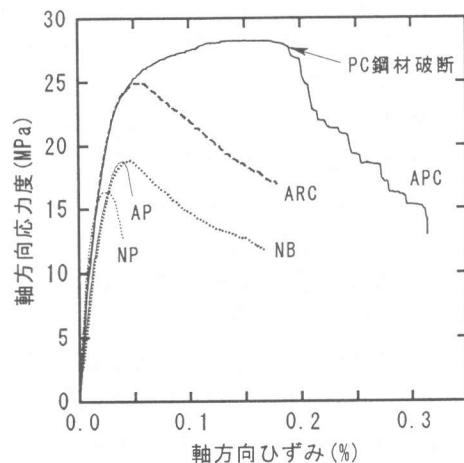


図-5 軸方向応力度とひずみの関係

よって大きな横拘束効果が得られることを示す結果であり、普通コンクリートを用いた同様の実験結果〔5〕と一致する。また、多量のPC鋼材を使用した鉛直載荷試験結果〔8〕において横拘束筋合計換算体積比が2%程度になると、本実験結果と同様に二次勾配が上昇することが報告されている。このことからASRにより損傷を受けたコンクリートについても受けていない健全なコンクリートと同様に大幅なじん性の改善が期待できるものと考えられる。

4. まとめ

ASRによる損傷を受けた橋脚の補強の一方法として、PC鋼材を補強材に使用する方法に注目し、その適用性をRC柱試験体を製作し、コンクリートの膨張挙動や中心軸圧縮試験結果から検討した。その結果、PC鋼材を用いたコンクリートにプレストレス力を与えると、ASRにより発生したひび割れが拘束されることが確認できた。また、PC鋼材がコンクリートの軸方向応力と軸方向ひずみの関係に与える影響は、ASRにより損傷を受けたコンクリートに対しても損傷を受けていない健全なコンクリートと同様であり、補強材料としてPC鋼材を用いることにより大幅なじん性の改善が期待できるものと考えられた。

現在、屋外に暴露した大型コンクリート試験体を用いてPC鋼材を補強材に使用した場合のASRの拘束効果についても検討中である。

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、御助力頂いた（株）ピー・エス 張 建東氏、佐藤 健一氏、東洋建設（株） 堀 隆治氏に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Kawamura, M., et al. : Expansion and Cracking due to Alkali-silica Reaction in Concretes under the Two Different Environments, Proc. of the 9th Inter. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, pp. 519-528, 1992
- [2] コンクリート構造物の補修工法研究委員会：コンクリート構造物の補修事例集、日本コンクリート工学協会、pp. 7、1994. 10
- [3] 棚橋和夫ほか：ASRによって劣化したRCはりおよび柱の力学挙動について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18、No. 1、pp. 843-848、1996. 6
- [4] 小林一輔：阪神大震災によって破壊されたコンクリート構造物における施工不良と早期劣化、第23回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集、pp. 1-8、1996. 10
- [5] 張 建東ほか：PC鋼材を帶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、1997. 6
- [6] 阿部道彦：アルカリ骨材反応試験における添加アルカリの種類に関する検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 10、No. 2、pp. 739-744、1988. 6
- [7] 岡田 清ほか：大型コンクリートモデルによるASRひびわれの再現、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 9、No. 1、pp. 567-572、1987. 6
- [8] 吉岡民夫ほか：帶筋に細径異形PC鋼棒を用いたコンファインドコンクリートの特性、土木学会第51回年次学術講演会概要集、pp. 1024-1025、1996. 9