

論文 PC 鋼材巻き立てにより補強した ASR 損傷コンクリート柱の 交番載荷試験

鳥居和之*1・奥田由法*2・石井浩司*3・佐藤健一*4

要旨:反応性骨材を含有する柱試験体を屋外に暴露し, ASRによるコンクリートのひび割れおよび鉄筋の歪みを測定するとともに, PC鋼材巻き立てによるASR損傷コンクリート柱の補強効果を確認する目的で, 無補強および補強試験体の交番載荷試験を実施した。その結果, ASR損傷試験体ではASRによるひび割れと鉄筋の引張り歪みの影響で, 基部の鉄筋の破断が発生しやすくなること, およびPC鋼材で巻き立てることにより柱試験体の耐力力および変形性能を改善できることが明らかになった。

キーワード:アルカリシリカ反応, ひび割れ, 耐震補強, PC鋼材巻き立て工法, 交番載荷試験

1. まえがき

アルカリシリカ反応 (ASR) により発生するコンクリート橋脚のひび割れは, 通常かぶりコンクリートまでで, 軸方向鉄筋の内部へのひび割れの進展およびコンクリートの内部損傷は少ないとされてきた¹⁾。また, 中心軸載荷を行ったASR損傷柱試験体では, ケミカルプレストレスの効果もあり, 耐力力および変形性能が大きく低下することがないとの報告がある²⁾。しかし, ASRによるひび割れが進展した段階では, かぶりコンクリートと鉄筋の付着が低下しており, コンクリート橋脚の耐震性の検討の際に, かぶりコンクリートの剥落の影響を考慮する必要があるとの指摘がある³⁾。さらに, ASR損傷橋脚の耐震補強においては, ASRの進行にともなって発生した軸方向鉄筋および帯鉄筋の歪みが正負交番載荷時の柱部材の力学的挙動にどの

ような影響を及ぼすかについての検討が必要であるが, これまで十分な検討はなされていない⁴⁾。

本研究は, 地震時のコンクリート橋脚の力学的挙動に及ぼすASR損傷の影響とPC鋼材巻き立てによる補強効果を確認する目的で, 屋外にて1年半暴露したASR損傷柱試験体の交番載荷試験を実施したものである。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合および試験体の作製

普通骨材および反応性骨材を使用した2種類のコンクリートの配合 (N配合およびA配合) を表-1に示す。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) および反応性を有する両輝石安山岩碎石 (石川県

表-1 コンクリートの配合

	最大粗骨材 寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	細骨材 率 (%)	水セメント 比 (%)	単位重量 (kg/m ³)				
						C	W	S	G1	G2
N配合	20	8±1.5	2±1	42.0	53.2	308	164	784	1125	0
A配合	20	8±1.5	2±1	42.0	53.2	308	164	784	563	562

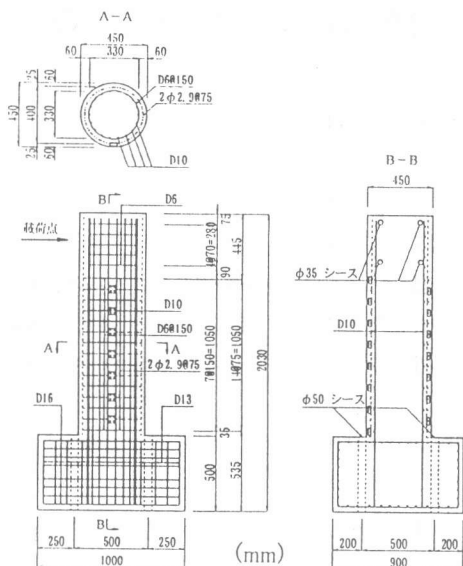
注) G1, G2はそれぞれ非反応性骨材および反応性骨材を示す。

*1 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 工博 (正会員)

*2 (株)ピー・エス北陸支店技術担当部長 (正会員)

*3 (株)ピー・エス開発技術部主任研究員 工博 (正会員)

*4 (株)ピー・エス開発技術部研究員 (正会員)



図一 試験体の概要

能登半島産，アルカリシリカ反応性（化学法）： $Sc=609 \text{ mol/l}$ ， $Rc=223 \text{ mol/l}$ ）を使用した。ASRを促進させる目的で，単位アルカリ量が 8 kg/m^3 となるように，練り混ぜ水にNaOHを添加した。試験体は交番載荷試験用の鉄筋コンクリート柱であり，図一に試験体の概要を示す。軸方向鉄筋と帯鉄筋には，それぞれ D10 mm および D6 mm の異形鉄筋（SD295A）を使用し，ASRの進行にともなう鉄筋の歪みが計測できるように，ひずみゲージを貼り付けた。試験体は脱型後，ASRを促進させるために，材令1ヵ月まで温度60℃で蒸気養生し，平成9年6月から1年半金沢大学工学部内で屋外暴露に供した。屋外暴露時の試験体の測定項目

は，コンクリートの膨張量（コンタクトゲージ法），鉄筋の歪み量および超音波パルス速度であり，1週間ごとに計測した。試験体の計測は，東西南北の方向，試験体の高さ方向でそれぞれ実施した。

2. 2 PC鋼材巻き立てによる補強と交番載荷試験

無補強および補強試験体の構造要因を表一2に示す。PC鋼材巻き立てによる補強は，PC鋼線（SWPR2N）を 75 mm 間隔で配置し， 6 N/mm^2 （降伏強度の 1/3 の緊張力）でPC鋼線を各段180度ずらしながら一本毎に緊張した。その後，試験体の側面に高流動コンクリートで増し厚を行った。交番載荷試験は，ASR損傷の影響（NBおよびAB試験体の比較）およびASR損傷試験体の補強効果（ABおよびAPC試験体の比較）を確認する目的で，試験体に鉛直応力が 1 N/mm^2 となるように荷重を負荷させながら，水平方向のアクチュエーターを使用して実施した。水平荷重の負荷方法は変位制御方法とし，初期降伏変位 δy_0 （計算上の降伏荷重を作用させた時の変位量が約 5 mm であったで，降伏変位 δy を正負ともに 5 mm にした）の整数倍毎に正負3回ずつ繰り返した⁵⁾。試験は水平荷重が最大荷重の60～70%まで低下した時点で終了した。なお，ASR損傷試験体では，暴露時の東西南北の方向でコンクリートの損傷度が異なり，試験体の載荷方向による異方性が存在するので，すべての試験体にて正負載荷方向を暴露時の南北方向と一致させることにした。

表一2 無補強および補強試験体の構造要因

	NB	AB	APC
コンクリート配合	N配合	A 配合	A 配合
既設部圧縮強度 (N/mm^2)	30.5	19.8	19.8
補強部圧縮強度 (N/mm^2)	—	—	54.9
断面直径 (cm)	40	40	45
載荷点高さ (cm)	134.5	134.5	134.5
既設部主鉄筋	D10×18 本	D10×18 本	D10×18 本
既設部帯鉄筋	D6 ctc150	D6 ctc150	D6 ctc150
補強部 PC 鋼材	—	—	2 φ 2.9 ctc75
軸力 (N/mm^2)	1.0	1.0	1.0

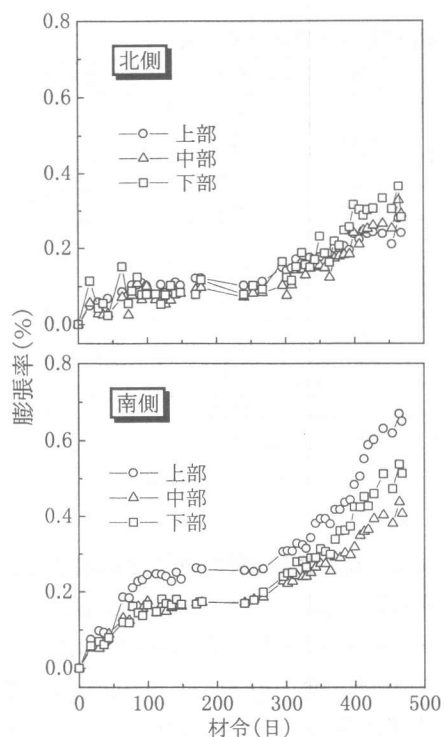


図-2 試験体ABにおける膨張率の経時変化

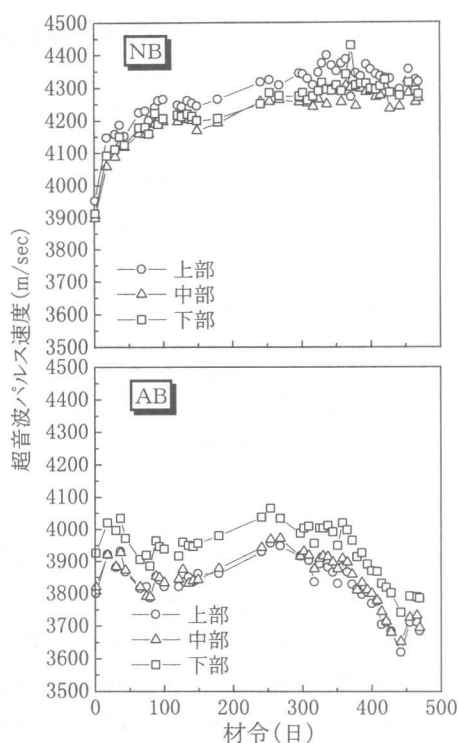


図-4 試験体NBおよびABの超音波パルス速度の経時変化

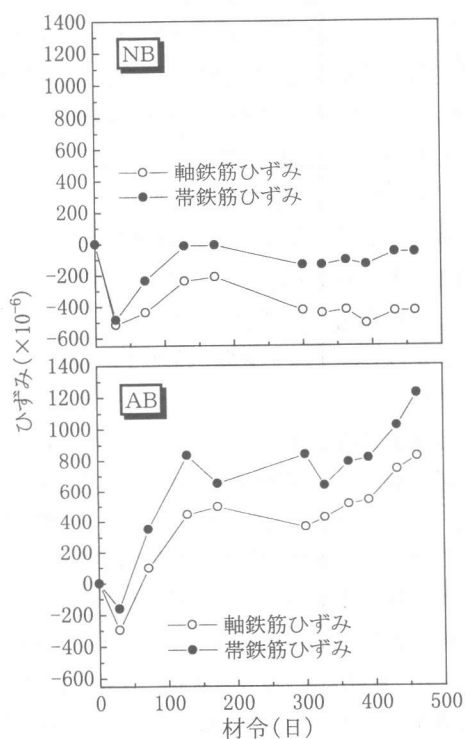


図-3 試験体NBおよびABに発生する鉄筋歪みの経時変化

3. 実験結果および考察

3.1 屋外暴露時のコンクリートの膨張挙動と鉄筋の歪み量

鉄筋コンクリート試験体(AB)の膨張率の経時変化を図-2に示す。暴露開始が平成9年6月のために屋外暴露開始と同時に膨張が始まり、冬季には膨張が停滞するが、翌年の夏季にはさらに大きな膨張を示した。図-2に示すように、日射の影響を受ける南面の膨張量は北面の2倍となり、降雨による水分の供給を受けやすい上部は中央部および下部よりも大きな膨張量となった。暴露1年半が経過した段階では、試験体にはASRによって軸方向鉄筋上のひび割れ(最大幅:0.8 mm, 平均幅:0.3 mm)と円周方向のひび割れ(最大幅:0.5 mm, 平均幅:0.2 mm)が発生した。

鉄筋コンクリート試験体(NBおよびAB)に発生する鉄筋の歪みの経時変化を図-3に示す。NB試験体では、暴露初期の夏季におけるコンクリートの乾燥収縮の影響で鉄筋に圧縮歪みが発生す

表－3 試験体の各損傷発生時の水平荷重および水平変位量

			ひび割れ発生	剥離開始	かぶり剥落	鉄筋破断
NB	＋載荷	P (tf)	+3.2	+6.7	+5.9	—
		δ (mm)	+1.2	+30.0	+35.0	—
	－載荷	P (tf)	-3.1	-7.4	-5.4	—
		δ (mm)	-1.1	-35.0	-40.0	—
AB	＋載荷	P (tf)	+4.1	+7.0	+6.1	+4.0
		δ (mm)	+2.4	+25.0	+35.0	+55.0
	－載荷	P (tf)	-4.9	-6.6	-5.9	-3.7
		δ (mm)	-3.2	-20.0	-30.0	-50.6
APC	＋載荷	P (tf)	+3.7	+8.6	+7.4	+6.0
		δ (mm)	+1.5	+30.0	+55.0	+54.0
	－載荷	P (tf)	-3.8	-8.6	-7.3	—
		δ (mm)	-1.5	-35.0	-55.0	—

るが、その後の暴露期間にともなう変化は小さい。一方、AB試験体では、ASRの進行によるコンクリートの膨張にともなう軸方向鉄筋および帯鉄筋には引張り歪みが発生し、それらの値は暴露期間とともに増大した。ASR膨張の拘束効果との関係で、帯鉄筋の引張り歪み量は軸方向鉄筋よりも大きくなり、1000 μ 以上の歪みが計測された(異形鉄筋 (SD295A) の降伏歪みは1810 μ (ミルシートより計算)であった。

鉄筋コンクリート試験体(NBおよびAB)の超音波パルス速度の経時変化を図－4に示す。NB試験体では、暴露期間とともに超音波パルス速度が増大しており、試験体の高さ方向での相違も小さかった。一方、AB試験体では、暴露期間とともに超音波パルス速度が減少しており、とくにASRによる膨張が顕著であった翌年の春季から夏季にかけて超音波パルス速度の大きな減少が見られた。超音波パルス速度は、コンクリートの含水状態の影響を受けるが、ASRの進行によるコンクリート内部の微細ひび割れの進展を良く捉えており、定期的に測定することにより、コンクリート橋脚のASR損傷度の評価に有用であると考えられた。また、AB試験体では試験体の高さ方向での超音波パルス速度の相違が見られた。これは、ASRによる損傷の相違だけでなく、練り混ぜ時にNaOHを添加したことによるブリーディングの増大による影響が表れているものと推測された。

3. 2 交番載荷試験の力学的挙動と破壊形態

交番載荷試験における試験体の各損傷発生時の水平荷重および水平変位量を表－3に示す。コンクリート試験体の損傷は、いずれの場合も正負の繰返し荷重により、まず曲げひび割れが基部の断面方向に貫通し、その後、基部のコンクリートの剥離・剥落により水平荷重が低下し、鉄筋の破断にいたる過程をたどった。ASR損傷が柱試験体の力学的挙動に及ぼす影響に関して、AB試験体では、コンクリートの剥離が－4 δ y(南面)にて発生しており、NB試験体の＋6 δ y(北面)と比較して、コンクリートの剥離の開始時期が早くなった。これは、3. 1で述べたように、ASR損傷試験体では南面の膨張量が北面よりも大きく、ASRによるひび割れの影響で鉄筋との付着力が低下している南面からコンクリートの剥離が発生することによるものである。

交番載荷時(±1 δ y)における軸方向鉄筋および帯鉄筋の歪みの履歴を図－5および図－6に示す。歪みの履歴が計測できたのは±1 δ y の範囲までであるが、NB試験体では水平荷重と歪みの関係が線形に保たれており、正負の繰返し荷重においてほぼ同様な履歴を示した。しかし、AB試験体では、ASRにより軸方向鉄筋に引張り歪みが既に発生しているので、1回目の載荷より歪みの履歴が大きく乱れていた。AB試験体では帯鉄筋でも同様な傾向が観察された。このため、AB試験体

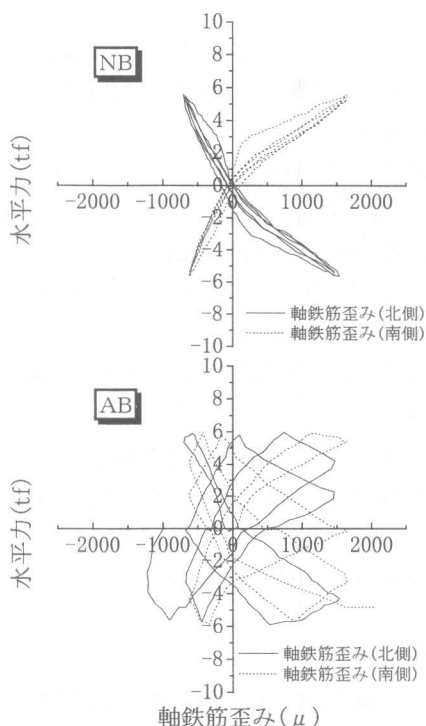


図-5 交番载荷時($\pm 1 \delta y$)における軸方向鉄筋の歪みの履歴

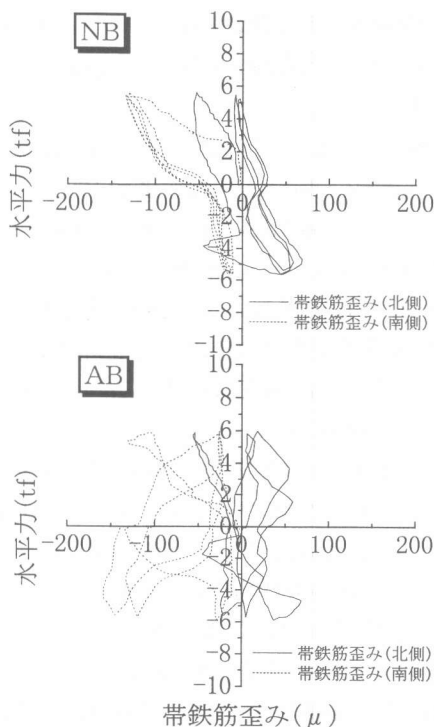


図-6 交番载荷時($\pm 1 \delta y$)における帯鉄筋の歪みの履歴

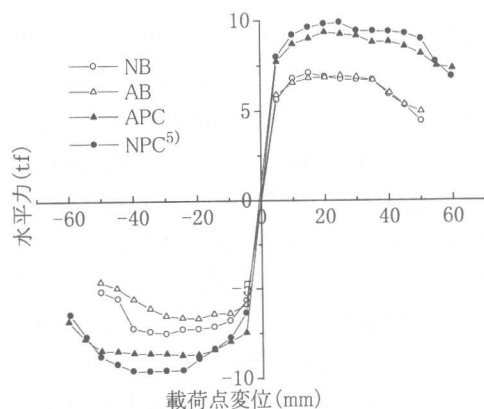


図-7 無補強および補強試験体の水平荷重水平変位の包絡線

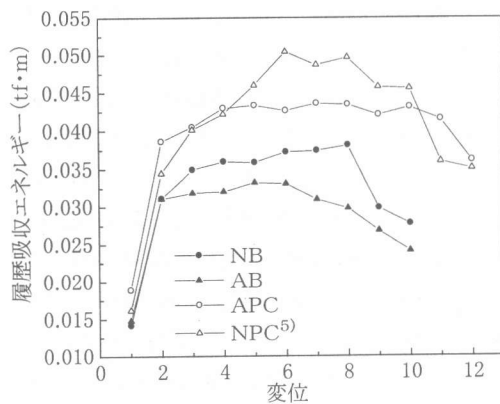


図-8 履歴吸収エネルギー($-n \delta y$)の比較

は、南面が圧縮側となる時にコンクリートの剥落とともに水平荷重が低下しており、最終的に $+11 \delta y$ にて南側の鉄筋が3本破断した。一方、APC試験体では、PC鋼材により導入された円周方向の緊張力により、ASRひび割れが拘束されるとともに、プレストレスによりかぶりコンクリートの剥離に対する抵抗力が増大するので、正負の繰返し载荷時における損傷の度合を軽減することができた。すなわち、APC試験体では、正負の繰返し载荷とともに基部の剥離が進展することがなく、最後まで試験体の一体性が保持されており、終局降伏変位がAB試験体と比較して増大した。

3.3 ASR損傷橋脚の耐震補強の留意点

無補強および補強試験体の水平荷重-水平変位の包絡線および履歴吸収エネルギー($-n \delta y$)の比較を図-7および図-8に示す。コンクリート

橋脚の耐震補強では、保有水平耐力と変形性能を確保することが重要となる。ASR損傷橋脚では、(1)かぶりコンクリートの剥離・剥落が早期に生じる、(2)局所的な環境条件でASRによる損傷度に異方性が存在する、(3)鉄筋の引張り力により軸方向鉄筋の破断や帯鉄筋のはずれが生じる、などの問題点が判明した。図-7および図-8に示すように、AB試験体では、NB試験体と比較して南面が圧縮側となる時に履歴吸収エネルギーが減少した。一方、PC鋼材により巻き立てた試験体(NPCおよびAPC試験体)では、ASRによる損傷の影響を受けず、ほぼ同じ履歴吸収エネルギーが確保された。交番載荷試験終了後、ABおよびAPC試験体よりコアを採取し、ASRによるひび割れの状況を調べた。その結果、今回の試験体では、暴露期間が1年半と短かったので、ASRによるひび割れは鉄筋位置で止まっており、内部へのひび割れの進展およびコンクリートの内部劣化は観察されなかった。このため、交番載荷時の試験体の破壊はいずれも基部のコンクリートの剥離と鉄筋の破断に限定されたものと考えられた。しかし、能登地域にて最近実施したコンクリート橋脚の調査⁶⁾では、かぶりコンクリートが脆弱化している事例や、橋脚内部のコンクリートの強度が設計基準強度を大きく下回っている事例、などが確認されている。このような場合には、ASR損傷によってコンクリート橋脚の耐震性が大きく低下していることも予測される。

4. まとめ

コンクリート柱試験体の交番載荷試験を実施し、ASRによる損傷の影響とPC鋼材巻き立てによる補強効果を実験的に検討した。

本研究で得られた主要な結果をまとめると次のようである。

- (1) ASRによるコンクリートの膨張は、局所的な環境条件の影響を大きく受け、試験体の東西南北の方向および高さ方向での異方性が存在する。
- (2) ASRの進行に伴い、柱試験体の軸方向および帯鉄筋に大きな引張り歪みが発生する。

- (3) 超音波パルス速度の定期的な計測により、コンクリート試験体のASRによる損傷度を適確に評価できる。

- (4) ASR損傷試験体では、かぶりコンクリートのひび割れと鉄筋の引張り歪みの影響で、試験体基部の鉄筋の破断が発生しやすくなる。

- (5) PC鋼材で巻き立てることにより、ASR損傷試験体の耐力および変形性能をASR損傷を受けていない試験体と同程度まで改善できる。

長期暴露用の試験体はさらに5体準備されており、現在も計測が継続されているとともに、ASRひび割れの幅が数 mm になった段階で、同様な交番載荷試験を実施する予定である。

<参考文献>

- 1) 土木学会:コンクリート構造物の維持管理指針(案),コンクリートライブラリー, No.81, pp.21-24, 1995.
- 2) 竹村和夫, 米倉亜州夫, 谷村 充:アルカリ骨材反応が生じた帯鉄筋柱の一軸圧縮特性, 第44回セメント技術大会講演集, pp.788-793, 1990.
- 3) The Institute of Structural Engineers : Structural Effects of Alkali-silica Reaction - Technical Guidance on the Appraisal of Existing Structures-, pp.15-18, 1992.
- 4) 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.
- 5) 張 建東, 鈴木義晃, 森 拓也, 久保欣也, 川島一彦:PC鋼材を帯鉄筋に用いた円柱橋脚の交番載荷試験, 第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム論文集, pp.147-150, 1998.
- 6) 鳥居和之, 川村満紀:ASR損傷コンクリート橋脚の外部・内部損傷の実態, 平成 10 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.567-568, 1999.