論文 実構造物から採取したASR劣化コアのクリープ性状

奥山 和俊*1・尾花 祥隆*2・稲垣 崇秀*3・鳥居 和之*4

要旨: ASR 劣化構造物の補修・補強工法として PC 鋼材巻き立て工法がある。本工法は柱やフーチングに高 強度の PC 鋼材を巻き立て,または挿入して,ASR 膨張を拘束することが特徴であるが,ASR 膨張の拘束に 必要な緊張力については明らかになっていない。そこで基礎的実験として ASR 劣化が生じた実構造物(フー チング)より採取したコアによるクリープ試験を実施した。その結果,ASR 劣化コアに持続荷重を作用させ た場合,コアのクリープ性状が乾燥および湿潤状態によって大きく相違することが確認された。 キーワード: ASR,クリープ性状,PC 鋼材巻き立て工法,最適プレストレス量

1. はじめに

近年,アルカリシリカ反応(ASR略)による構造物の 劣化が発生し,コンクリートの圧縮強度やヤング係数の 低下だけでなく,構造部材であるスターラップ筋等の破 断事例も報告¹⁾されている。そこで,ASRに対する補修・ 補強工法として各種の工法が提案,実施されている。こ のASRに対する補強工法の一つとしてPC鋼材巻き立て 工法がある。これは主に橋脚の柱部やフーチング部にお ける補強工法として実績のある工法である。本工法は柱 部においては柱周囲にプレキャストパネルを配置し,高 強度の PC 鋼材を巻き立て,緊張することにより,外部 からの水分供給の遮断並びに PC 鋼材の緊張による ASR 膨張の抑制効果が期待できる。また,フーチング部にお いては,フーチングの周囲並びに鉛直方向に PC 鋼材を 配置し,緊張することで ASR 膨張を拘束することが可能 となる²⁾。

本工法を適用した橋脚については補強後のモニタリ ング調査により ASR 膨張の拘束効果が確認されている が PC 鋼材の緊張力については耐震設計上の観点から決 定されており, ASR 膨張の拘束に必要な緊張力について は明確に検証されていないのが現状である。このような 問題に対して, ASR 劣化が生じたコンクリートにプレス トレスによる持続荷重が作用した場合のクリープ性状 の把握が必要であるが,これまでほとんど検討されてい ないのが実状である³⁾。

そこで、本研究においては ASR 劣化が生じた実構造物 (フーチング)より採取したコアによるクリープ試験を 実施することにより、PC 鋼材巻き立て工法に必要となる 最適プレストレス量を定量化するための基礎的データ を収集することを目的とする。 2. 対象橋梁の概要

今回,クリープ試験を実施するためのコアを採取した 橋梁の概要を述べる。

橋梁は石川県能登有料道路に位置する向田川橋であ る。橋梁形式は橋長 195.0m の3 径間連続上路式トラス 橋であり,上部構造は連続ワーレントラス構造,下部構 造は矩形柱張出式橋脚,基礎構造は直接基礎構造である。 竣工は 1982 年 12 月であり,供用開始後,約 26 年が経 過した橋梁である。

本橋では近年,P2橋脚およびA2橋台にASRが原因と 考えられる著しいひび割れが発見された。そこで,既設 コンクリートの調査に基づき補強設計,施工が実施され た。P2橋脚のおける主な補強工法は,梁部においては RC増厚,柱部はひび割れ注入およびRC巻き立てによる 耐震補強,フーチング部は劣化の著しい箇所を断面修復 した後に,上面増厚とRC巻き立てによる補強が実施さ れた。

写真 - 1 に橋梁全景を,図 - 1 に P2 橋脚の構造図を示 す。ここで,フーチング部下面に配置された PC 鋼材は プレストレスが導入されておらず,計算上は高強度鉄筋



写真 - 1 向田川橋の全景

- *1 (株)ピーエス三菱 西日本支社 開発部 工修 (正会員)
- *2 西日本旅客鉄道株式会社 工修 (正会員)
- *3 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻(正会員)
- *4 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系教授 工博 (正会員)



として設計されたものである。

既設コンクリートの各種性状やクリープ性状を把握 するための試験用コアは P2 橋脚フーチング部下面の底 版補強 PC 鋼線配置用の水平コアより採取した。コアの 採取長はフーチングー辺の長さである 12m とし,この 12m コアから各試験用コアを切り出して用いた。なお, コアの直径は 68mm である。

3. コアの ASR 劣化状況と力学的性質

3.1 コアの外観観察

写真 - 2 にフーチングより採取したコアの破断面を示 す。これよりコアには粗骨材の周囲に白色析出物(ASR ゲル)が析出し,コア断面は白色析出物で覆われていた。 したがって、湿潤環境下にてASR が長期にわたって進行 した結果,多量のASR ゲルがコンクリートのひび割れ部 分にも浸潤したものと考えられた。

また,写真-3および写真-4にP2橋脚フーチングの ASRによる劣化状況を示す。フーチング側面には亀甲状 にコンクリートの割れが生じており,フーチング上面に おいては鉄筋破断も確認された。この外観状況からも ASR劣化が顕著に進行しているものと判断された。 3.2 コアの圧縮強度および弾性係数

フーチングより採取したコアから3本の試験体を切り 出し,圧縮強度および弾性係数の測定を実施した。この コアから後述するクリープ試験の試験体も採取した。し たがって圧縮強度および弾性係数試験体とクリープ試 験の試験体は同一のものである。しかしながら,ASRが 発生し,約26年が経過したコンクリートであるので圧 縮強度および弾性係数ともにばらつきが大きいことが 予想される。コアの圧縮強度と弾性係数および弾性係数 /圧縮強度比の関係を表-1に示す。いずれのコアも圧



写真 - 2 コアの破断面と ASR ゲルの浸潤状況



写真-3 フーチング側面の割れ

写真 - 4 フーチング上面の鉄筋破断 (SD295A, D25mm)

表-1 コアの圧縮強度,弾性係数,超音波伝播速度

試験体	圧縮強度	弾性係数	弾性係数 /	超音波伝播速度
No.	(N/mm ²)	(kN/mm²)	圧縮強度	(m/s)
1	21.1	9.5	450	3800
2	25.1	12.8	510	4000
3	19.1	12.0	628	4000

縮強度は設計基準強度(21N/mm²)に近いが,弾性係数の低下が著しく,道路橋示方書に示されている数値の50%程度まで低下しており,ASR 劣化が顕著であることが示されていた。

3.3 コアの超音波伝播速度

ASR 劣化構造物の劣化度調査において,コンクリート のひび割れ等による劣化度を把握するために超音波伝 播速度による測定が用いられる。そこで,今回採取した コアについて超音波伝播速度を測定した。測定結果を表 - 1 に示す。この結果より超音波伝播速度は約 3800~ 4000m/S の値を示している。正常なコンクリートは 3500 ~ 4000m/S 以上の超音波伝播速度を示すため,3500m/S 以下を ASR 判定の目安とする⁴⁾が,今回の試験結果はこ の基準とは合致しなかった。この理由としてはひび割れ が ASR ゲルにより充填されていたために,超音波伝播速 度の低下が生じなかったものと考えられる。

3.4 コアの残存膨張量試験

フーチングコアの残存膨張性を確認する目的で促進 養生試験を実施した。試験方法は JCI-DD2 法(温度 40 , 湿度 100%の恒温恒湿槽にて養生)およびデンマーク法 (温度 50 の飽和 NaCI 溶液に浸漬)とし,養生ごとに それぞれ 4 本のコアを用いて行った。コアの残存膨張性 試験の結果を図 - 2 に示す。

JCI-DD2 はコアすべてが 3 ヶ月で 0.05%以上の膨張率 を示したが,21 日材齢以後には膨張率の変化が認められ なかった。一方,デンマーク法では,いずれのコアも 3 ヶ月で 0.1%以下となった。したがって,コアは「膨張 性無し」と判断される結果となった。これらの結果より 判断すると,本フーチングでは,常時地下水が供給され ていたために,ASR はすでにかなり進行しており,ASR による膨張はほぼ収束時期にあったものと推察された。 3.5 偏光顕微鏡観察および SEM-EDS 分析

コンクリートに使用された安山岩砕石における ASR の進行度を調べるために,採取したコアより薄片を作製 し,偏光顕微鏡観察を行った。写真 - 5 に観察結果を示 す。安山岩砕石は角閃石,輝石および斜長石を有してお り,ガラス質の両輝石安山岩であることが判明した。ま

(骨材粒子界面のASR ゲル)

(骨材粒子内部の ASR ゲル) 写真 - 5 コアの偏光顕微鏡観察結果

写真-6 コアの走査型電子顕微鏡(SEM)観察結果

た SEM-EDS 分析の結果を写真 - 6 および図 - 3 に示す。 写真に示すように ASR ゲルは 2 次的な生成物が少なく, 平滑な表面が観察されるのが特徴である.その平均的な 化学組成はアルカリ分(Na₂O + 0.658K₂O)が 7.2%,カルシ ウム分(CaO)が 28.6%,シリカ分が 64.2% であった。ASR ゲルの化学組成は比較的カルシウム分の少ないもので あり,ASR ゲル自身の吸水膨張性が残存しているととも に,剛性が小さく,流動性がある ASR ゲルが生成してい ると判断できる。

4. ASR 劣化コアのクリープ試験

4.1 クリープ試験体の種類と養生方法

試験体の種類はコアのクリープ試験載荷前の養生方 法別に選定した。試験体の種類を図 - 4 に示す。

シリーズ 試験は載荷前の環境条件をJCI-DD2法と同様の条件とした。初めにコアを温度40 ,湿度100%の 環境条件下に3ヶ月間暴露し,その後の1ヶ月間,ケース1においては温度20 ,湿度60%の乾燥環境下に暴露 した。これは乾燥収縮によってコアが収縮する影響を排除するためである。ケース2においては引き続き温度 40 ,湿度100%の環境下に暴露した。

シリーズ 実験は載荷前の環境条件をデンマーク法 と同様の条件とした。初めにコアを温度50 の飽和 NaCl 溶液に3ヶ月間浸漬し,その後の1ヶ月間,ケース3に おいては温度20 ,湿度60%の乾燥環境下に暴露した。 ケース4においては引き続き温度50 の飽和 NaCl 溶液 に浸漬した。

なお,各ケースとも試験体コアを2体用いて実験を行った。コアの大きさは直径68mm,長さ240mmである。 4.2 載荷方法

図 - 6 にクリーブ試験の載荷装置図を示す。載荷は JIS 原案⁵⁾を参考に実施した。クリープ載荷試験は温度 20 , 湿度 60%の恒温恒湿室内で実施した。試験装置 1 体につ き 1 つのコアを設置し,油圧ジャッキを用いて載荷を行 った。載荷荷重は前述の圧縮強度の 35%を載荷荷重とし て設定した。載荷中の暴露条件について,ケース 1,3 は 乾燥状態とするため気中養生とし,ケース 2,4 は湿潤状 態を想定し密封養生とするため,コアの表面にクロロプ レン合成ゴム系接着剤を塗布した。また,載荷期間は 60 日間と設定した。表-2 に載荷直後の弾性ひずみ値を示す。 4.3 クリープ試験の結果

(1) クリープひずみの経時変化(初期~7日間)

図 - 6 および図 - 7 に載荷 7 日までの初期における載 荷期間とクリープひずみの関係を示す。なお,クリープ ひずみには載荷直後の弾性ひずみは控除している。

シリーズ に関しては,載荷初期段階におけるクリー プひずみの増加が顕著であり,60日時点におけるひずみ

表 - 2 各試験体における載荷直後の弾性ひずみ

				単1⊻: μ
	シリ-	-ズ	シリーズ	
	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
1体目	822.9	895.9	570.8	581.3
2体目	797.0	621.1	485.2	651.7

量の約40%が載荷7日後までに生じていた。

一方,シリーズ に関しては,シリーズ と比較して ひずみの増加が顕著ではないが,ひずみ量の約30%が載 荷7日までに生じていた。また,ASR 試験体は載荷中の 荷重が時間の経過とともに抜けていく現象が顕著なた め,試験中,再載荷を行っており,グラフ中のひずみが 瞬間的に変化している点はこの影響である。さらにグラ フ中,引張側の挙動を示している状態があるが,これは 前述の荷重が抜けていく現象または測定の誤差範囲に 起因するものと考えられる。以上のことから本実験にお けるクリープひずみは初期に発生しており,その形状が 2次放物線にほぼ近似できるものと考えられた。

(2) クリープひずみの経時変化(初期~60日間)

図 - 8 および図 - 9 に載荷後 60 日材齢までの載荷日数 とクリープひずみの関係を示す。

シリーズ に関しては,乾燥状態であるケース1の方 が湿潤状態のケース2よりもクリープひずみが大きく増 加している結果となった。一般のコンクリートにおける クリープはセメントペースト中の細孔構造と水分の移 動や逸散に関係があり,乾燥状態の方が水分の移動や逸 散が生じやすいため,クリープひずみが大きくなるとさ れている。しかし,今回の試験においては事前に1ヶ月 程乾燥状態にしてからのクリープ載荷であることから コンクリート内に水分は逸散した状態と考えられる。し たがってケース1ではASRゲルに水分が無い状態であり, 初期状態としてゲル自体に微細な空隙が存在し、これが 載荷荷重によって空隙が潰され,またゲルが空隙部に移 動したことによりクリープひずみが生じたものと想定 される。また,ケース2ではASR ゲルが十分な水分を保 持しており,ゲル自身が粘・弾性的な性質を示したもの と推察できる。すなわち,通常のコンクリートにおける クリープはセメントペーストの荷重にともなう粘弾性 的な変形により時間とともにひずみが増大する現象で, 骨材はセメントペーストの変形を拘束する働きをする。 これに対し ASR が発生したコンクリートでは骨材内お よび骨材周囲にひび割れが存在し,これらのひび割れは ASR ゲルで満たされている状態である。この状態で荷重 がかかると相対的にもっとも弱い箇所(セメントペース ト全体よりも骨材の周囲、骨材周囲のリムと微細ひび割 れ)で変形が生じるとともに,ひび割れ内の ASR ゲルの 移動が生じる。従って,ある荷重以上,一定の時間が経 過しないとコンクリート全体としての変形が現れてこ ないことが特徴であると考えられる。この ASR ゲルが載 荷荷重に対して粘・弾性的な挙動を示した結果、クリー プひずみの発生が緩和されたものと考えられる。

一方,シリーズ に関しては,シリーズ とほぼ同様 の傾向であった。しかし,クリープひずみの値そのもの

1600

図 - 10 クリープ係数の経時変化(シリーズ -60日)

はシリーズ よりもかなり低い値となった。これは,ク リープ試験前の残存膨張量試験においてデンマーク法 の残存膨張量が小さい結果となっており,残存膨張量の 大きいものがひずみの発生も大きくなったと言える。

このように ASR ゲルの剛性が乾燥および湿潤状態に おいて非可逆的に変化するために,クリープ性状が乾燥 と湿潤で大きく相違したものと推察される。以上より, 構造物に ASR 劣化が生じ,乾燥状態にある環境条件にお いては,施工後数十年が経過した段階でも,その後持続 荷重を加えることにより,クリープひずみがさらに進行 する可能性のあることが判明した。

(3) クリープ係数の経時変化(初期~60日間)

図 - 10,図 - 11 に載荷期間とクリープ係数の関係を示 す。また,グラフにはクリープ係数の計算値も合わせて 記述した。クリープ係数の計算は以下の条件で行った。

平成14年道路橋示方書 共通編に準拠した計算値 載荷時の材齢 t0(日)=30日(乾燥養生期間1ヶ月を想定) クリ-プ係数計算時の材齢補正係数(0)=1.0

(普通ポルトランドセメント)

部材の仮想厚さ(mm)=51.2 (=3.0 相対湿度 70%) 回復歪に対する基本クリ - プ係数(d0)=0.40 フロ - 歪に対する基本クリ - プ係数(f0)=2.00 平均温度()=20.0

この図よりシリーズ 実験のケース1ではクリープ係 数が60日時点で1.5から2.0まで増加している。またケ ース2ではほとんどクリープひずみが生じていないため, クリープ係数も0.3程度にとどまっている。60日時点に おける計算値は0.957であり,ケース1のクリープ係数 はこの値を上回っている。これは骨材周囲のASRゲルの 存在により通常のコンクリートのクリープひずみより も大きなクリープひずみを生じたものと考えられる

また,シリーズ 実験においてはケース3で0.8,ケ ース4で0.4程度の数値であった。また,計算値と比較 するとケース3におけるクリープ係数の経時変化が最も 計算値と近似する結果となった。

シリーズ およびシリーズ におけるクリープ係数 の相違については前述のように ASR ゲルの乾燥と湿潤 状態における剛性及び流動性の相違によるものと考え られる。

5. 結論

ASR 劣化構造物より採取したコアを用いてクリープ 試験を実施することで以下の事項が判明した。

- (1) 施工後26年が経過したASR劣化コンクリート構造 物よりコアを採取し,持続荷重を載荷した結果,比 較的大きなクリープひずみが発生した。
- (2) クリープひずみは,コアの環境状態によって大きく

図 - 11 クリープ係数の経時変化(シリーズ -60日)

変化し,乾燥状態において最もクリープひずみが増加した。これはASRゲルに水分が無い状態であり, 骨材自身の微細な空隙やひび割れが載荷荷重によって潰されたことによりクリープひずみが増大したものと推察された。

(3) 今回の試験においては,コアの残存膨張量試験が小 さいものほど同一載荷荷重におけるクリープひず みが小さくなった。

現在 PC 鋼材巻き立て工法ではプレストレス力を降伏 荷重の 30%と定義している。これは橋脚の耐震性能向上 の観点から決定された基準値であるが,30%で緊張した 場合の ASR 劣化構造物への影響を把握する上で,本実験 は貴重なデータであると判断される。今後は ASR 劣化の 状態に応じた最適なプレストレス力を決定することが, より効果的な ASR 抑制工法の開発につながることとな るので,本実験データを今後の工法の改良に役立てたい と考えている。

謝辞:本研究を実施するに当たり,石川県道路公社の和 佐田真悟氏,(株)アルスコンサルタンツの奥田由法氏 にご協力を頂いた事を深く感謝します。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会:アルカリ骨材反応対 策小委員会報告書,コンクリートライブラリー No.124,2005
- 奥山和俊,石井浩司,奥田由法,鳥居和之:ASR が 発生したフーチングの補修・補強とモニタリング, コンクリート工学年次論文報告集,Vol.29,No.1, pp.1263-1268,2007
- 3) 川村満紀,竹本邦夫,枷場重正:アルカリ・シリカ 反応による劣化構造物の一調査,セメント技術年報, 39,pp.344-347,1985
- (財)土木研究センター:建設省総合技術開発プロジェクト,コンクリートの耐久性向上技術の開発, 1989
- 5) JIS 原案: コンクリートの圧縮クリープ試験方法(案), コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.55-56, 1985