# 論文 湿潤環境下におけるASR劣化コンクリートのクリープ挙動

鳥居和之<sup>\*1</sup>,稲垣崇秀<sup>\*2</sup>,脇田康介<sup>\*3</sup>,参納千夏男<sup>\*4</sup>

要旨:本研究では,ASR 劣化構造物より採取したコアを用いて,偏光顕微鏡によるコア内部の微視的構造の 観察などの各種 ASR 試験を行うとともに,湿潤状態における ASR 劣化コアのクリープ試験を実施した。そ の結果,健全なコンクリートのクリープ挙動は,時間の経過に伴い,クリープひずみが収縮側に推移するが, 湿潤状態にある ASR 劣化コンクリートでは載荷直後より膨張挙動が発生した。また,除荷後の残留ひずみは ほぼゼロとなり,コンクリートが弾性的な挙動を示すことが判明した。

キーワード:ASR,クリープ挙動,残存膨張性,偏光顕微鏡観察,微視的構造

## 1. はじめに

ASR 劣化が生じた構造物の維持管理が重要な課題に なっている。とくに、ダムや水門などの水利構造物では、 ASR の促進要因となる水が常時河川から供給されるた めに、一旦 ASR が発生するとコンクリートの膨張が長期 にわたり、構造物に大きな劣化が発生することが懸念さ れる。近年、ASR により劣化した構造物では、ひび割れ 注入と表面被覆材による補修だけでなく、補強や打替え などが検討されている<sup>1)</sup>。この補強工法の開発に関連し て、ASR による構造物の膨張や変形を PC 鋼材により拘 束する工法が能登有料道路の ASR 対策において検討さ れてきた<sup>2)</sup>。

一方, ASR 劣化コンクリートにおけるプレストレスの 導入工法としては,橋脚のはり部における鋼板接着での 鋼板を介した水平方向の締付けと橋脚の柱部における プレキャストパネルによる円周方向からの締付けが実 施されてきた経緯がある<sup>3)</sup>。この際に,ASR による膨張 や変形を拘束するのに必要となる,最適な PC 鋼材の緊 張力を求めるには,プレストレスによる持続応力下での ASR 劣化コンクリートのクリープ変形挙動を正確に把 握する必要がある。しかし,ASR 劣化コンクリートに対 する最適なプレストレスの導入量に関しては不明であ り<sup>4)</sup>,金沢大学にて実施した大型円柱試験体の長期暴露 の測定結果より,PC 鋼材の降伏点強さの 30%で円周方 向に締め付けた場合の中心に向かう拘束応力が 0.2~0.3N/mm<sup>2</sup> となり,この程度のわずかな応力でも長期に わたり ASR による膨張を拘束できたという報告がされ ている程度である<sup>2)</sup>。とくに,ASR 劣化コンクリートの 時間依存型クリープ変形の特徴的な挙動としては,コン クリートの環境条件,すなわち湿潤状態または乾燥状態 によりコンクリートのクリープ変形が大きく相違する ことが判明している<sup>5)</sup>。このことは骨材界面やひび割れ に存在する ASR ゲルの粘弾性的性質とその水分依存性 に起因することが想定されている。

そこで本研究では, ASR による劣化が発生したコンク リート構造物よりコアを採取し, コアの内部組織の特徴 と力学的性質との関係を薄片研磨試料による偏光顕微 鏡観察により詳細に調べるとともに,湿潤状態で完全に 密封したコア試験体のクリープ試験を実施し, ASR 劣化 コンクリートの湿潤環境下における時間依存型クリー プ変形挙動を検討した。

#### 2. 試験概要

#### 2.1 構造物の概要とコンクリートの配合

構造物のコンクリートの配合を表 - 1 に示す。コアを 採取した構造物は鉄骨・鉄筋コンクリート造であり,構 築後約30年が経過しており,コンクリートが乾燥・湿潤 を繰り返しているのが特徴である。本研究で使用したコ

表 - 1 コアを採取した構造物のコンクリートの配合 単位量(kg/m<sup>3</sup>)

スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					化学识知刻
				W	С	S	G		$10 - \frac{1}{2} \frac{1}{10} \frac{1}{1$
							5 ~ 25mm	25 ~ 40mm	(00/111)
9 ± 1	5 ± 1	56.1	42.5	157	280	766	584	480	42

理工研究域 環境デザイン学系教授 工博(正会員)

自然科学研究科 社会基盤工学専攻(正会員)

\*1 金沢大学

\*2 金沢大学大学院

\*3 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻

\*4 北陸電力(株) 土木部 土木技術チーム 博(工)(正会員)

アは構造物の中心部より採取したものである。コンクリ ートの設計基準強度は24N/mm<sup>2</sup>であり,セメントは早強 ポルトランドセメントが使用されていた。コンクリート 用骨材は構造物の近くの河川からの川砂と川砂利が使 用されており,骨材の最大寸法は40mmであった。

## 2.2 コアを使用した各種試験の概要

## (1) 骨材の岩石・鉱物学的検討とコアの内部組織

コンクリートに使用された骨材の特徴と ASR による 内部組織の変状を調べることを目的として,構造物中心 部より採取したコアより,25mm×40mm,厚さ約 20µm の研磨薄片を作製し,偏光顕微鏡観察を行った。また, ASR ゲルの生成状況を酢酸ウラニル蛍光法により観察 した。偏光顕微鏡観察に関しては,クリープ試験終了後 のコアからも研磨薄片を作製して微視的構造を観察し た。

#### (2) コアの力学的性質

コアの力学的性能を把握する目的で,採取したコアは 直径 95mm,長さ 190mm に整形し,超音波伝播速度を測 定した後に,JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験方 法」,JISA 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」 に準拠し,圧縮強度及び静弾性係数を測定した。

#### (3) コアの残存膨張性

コアの残存膨張性を確認するため,促進養生試験を行った。試験方法は JCI DD2 法(温度 40 ,湿度 100%の恒温恒湿槽にて養生)である。

#### (4) コアの乾燥収縮及び湿潤膨張試験

本試験で使用したコアの寸法は直径 95mm,長さ 300mmである。コアは湿潤状態で保管後,さらにコア内 の含水状態を一定にするために,温度40 ,湿度100% の湿気槽に約2週間保存した。その後,内部の水分が逸 散しない状態で,クロロプレン合成ゴム系接着剤に塗装 したもの(シーリング有)と塗装しない裸試験体(シー リング無)を恒温恒湿室内(温度20 ,湿度60%)に 放置し,試験体表面のひずみを自動計測した。測定結果 は長さ方向の4ヵ所に取り付けられたひずみゲージ(ゲ ージ長:30mm)の平均値である。

#### (5) コアのクリープ試験

クリープ試験で使用したコアは2.2(4)と同様のコア であり,湿潤養生後,クロロプレン合成ゴム系接着剤に より完全に塗装したものを使用した。これはコンクリー トが常に湿潤状態にあると想定されることによるもの である。なお,養生前に超音波伝播速度を計測している。 持続荷重下におけるコアの変形挙動は,写真-1に示す 載荷装置を使用し,恒温恒湿室内(温度20 ,湿度60%) で実施した。圧縮力導入の際には油圧ジャッキを用い目 標応力の10%毎に載荷した。また,目標応力を0.25N/mm<sup>2</sup> (200kg),0.5N/mm<sup>2</sup>(400kg),5.0N/mm<sup>2</sup>(4000kg)及び



写真-1 クリープ試験装置の外観

10.0N/mm<sup>2</sup>(8000kg)の4 レベルに設定し,異なる荷重 レベルにおけるクリープ変形挙動を調べることにした。 載荷期間は3ヶ月と設定し,期間中はロードセルにて計 測している荷重が目標荷重の±10%を越えた段階で,油 圧ジャッキにて随時圧縮力を導入した。さらに,試験終 了後に除荷し,除荷後のひずみが一定になるまで計測を 続けた。

#### 3. 試験結果及び考察

#### 3.1 偏光顕微鏡によるコアの内部組織の観察結果

コアの外観観察の結果より,骨材の岩種構成率は近辺 で採取される川砂及び川砂利にほぼ類似しており,花崗 岩,閃緑岩などの深成岩,安山岩,流紋岩などの火山岩, 溶結疑灰岩などが混在して含有されていた。これらの岩 種の中で,骨材からのひび割れの発生や反応環の形成な どの ASR の痕跡が明確に観察されるものは川砂及び川 砂利ともに安山岩粒子であった。安山岩には,ガラス質 のものと多孔質のものとがあり,多孔質な安山岩の空隙 中は再結晶しており,クリストバライトやトリディマイ トが確認された。これらの骨材には,ひび割れが発生し ており,反応性鉱物であるクリストバライトやトリディ マイト,火山ガラスが反応していることが考えられた (写真-2及び写真-3,直交ニコル,鋭敏色検板使用)。

写真 - 4 に湿潤環境に保存中のコアの外観を示す。コ アは採取直後より数ヶ月間湿潤状態で保管されていた。 その際にひび割れからの ASR ゲルの滲出やポップアウ トの発生が観察された。この現象は 30 年経過したコン クリートでも内部に膨張圧があることを示唆している。 また,コア側面の観察により,セメントペースト部には, 骨材周囲を埋めるように白色生成物が観察された。これ らのことより,コア内部には,多量のASR ゲルが生成さ れていることが推察された。

写真 - 5(直交ニコル, 鋭敏色検板使用)に採取した コアから作製した薄片の偏光顕微鏡の観察結果を示す。 観察結果より,川砂利中の安山岩粒子の内部には100µm 程度のひび割れが生じており,そのひび割れは骨材粒子 からセメントペーストへ進展しているのが観察される。 ひび割れはすべて ASR ゲルにより充填されているのが 特徴的である。さらに,ASR ゲルはセメントペースト中 の空隙も充填していた。

写真 - 6に酢酸ウラニル蛍光法による ASR ゲルの発色 状況を示す。この結果より,安山岩粒子に発生している ASR の反応の程度は川砂の方が川砂利よりも顕著であ ることが判明した。また,隣り合う同じ安山岩粒子であ っても,比較的寸法の小さな粒子にひび割れが多く見ら れた。これは粗骨材の最大寸法が 40mm と大きいことも あり,川砂中の安山岩粒子が選択的により反応したもの と推察された。また,川砂では 1mm~2mm 程度の安山 岩粒子がもっとも反応していた。これ以外にも溶結凝灰 岩粒子や流紋岩粒子にも ASR 反応の痕跡が認められた が, ASR によるひび割れの生成には至っておらず, 軽微 な ASR であると判断された。以上より,本構造物中心部 では常に湿潤環境下で,主に川砂の中の,安山岩粒子の 反応により ASR ゲルが生成され, ASR ゲルは微細なひ び割れやセメントペースト内の空隙を充填しているこ とがわかった。

## 3.2 コアの力学的性質

#### (1) コアの圧縮強度と静弾性係数の関係

図 - 1 にコアの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。 コアの圧縮強度と静弾性係数の関係は,小林ら<sup>の</sup>が提案 する健全なコンクリートを示す曲線より下回っており, 採取コアの圧縮強度に関しては、設計基準強度 (24N/mm<sup>2</sup>)を満足していたものの,静弾性係数に関し ては,健全なコンクリートの値と比較して30%低下して いた。しかし,同地方に存在するASR劣化構造物(川砂 及び川砂利を使用)より採取されたコア(ASR 劣化コン クリート)の試験結果<sup>7)</sup>と比較すると, ASR による劣化 が進むにつれて両者の関係は原点の方向に移動するこ とから 本研究で使用したコアの ASR による劣化度は比 較的軽微なものであったと考えられる。この理由として は,コアの内部組織の観察結果から明らかなように,細 骨材に比べて粗骨材の反応の程度が少なかったことに より,コンクリート全体としては,組織がしっかりして いたことが考えられる。

## (2) コアの超音波伝播速度

図 - 2 にコアの超音波伝播速度の測定結果を示す。測 定結果は,本研究において対象とする構造物の各部位よ リ採取されたものである。コアの超音波伝播速度は, 3500m/sec以下の値を示すものをASRの判定基準とする 場合があるが,その結果はコンクリートの配合や反応性 骨材の種類によっても相違することが知られている。本



写真-2反応性鉱物の同定(クリストバライト)



写真-3反応性鉱物の同定(トリディマイト)



写真 - 4 採取コア表面にできた ASR ゲルの滲出



写真 - 5 ASR ゲルにより充填された安山岩粒子 内部のひび割れ

研究の測定結果は,4000m/sec 以上となった。この理由 としては,コアのASR 劣化度は比較的軽微なものであり, コアの偏光顕微鏡による観察結果からも明らかなよう に,細骨材中の安山岩粒子が主に反応していることと, ASR ゲルによってひび割れが充填されていることが考 えられる。

## 3.3 コアの残存膨張性

図 - 3 にコアの残存膨張性試験の結果を示す。測定結 果は,部位別に採取したコアの測定値の平均値である。 いずれのコアに関しても,測定開始より3ヶ月の時点に おいて0.01%以下となり,判定基準である0.05%を大き く下回る結果となり,判定基準からは「残存膨張性なし」 と判断できた。本構造物は,構築後30年近く経過して おり,長期にわたり水分の影響を受けている。このこと からもASR はかなり進行しており,コンクリートの膨張 はほぼ収束時期にあったものと考えられる。

## 3.4 乾燥及び湿潤条件下でのコアのひずみ挙動

図-4 に乾燥及び湿潤条件下でのコア(無載荷状態) のひずみの経時変化を示す。シーリングの有無に係らず, コアは試験開始より 10 日目まではいずれもほぼ同様な 膨張挙動が認められたが,その後のひずみの挙動はシー リングの有無により大きく相違した。すなわち,コア内 部からの水分の逸散のないシーリング有(湿潤状態)で は,最大 50µ程度まで膨張した後に,ひずみはほぼ一定 値に収束した。それに対して、シーリング無(乾燥状態) は試験開始から 20 日以後に膨張から収縮側に変化し, それ以後は乾燥が進行するとともにほぼ直線的に収縮 ひずみが増大した。このように ASR が発生したコンクリ ートでは,乾燥による水分の逸散が始まってから少し遅 れて収縮が始まるのが特徴である。この原因としては, コア中のひび割れが高い含水状態の ASR ゲルによって 充填されており,ひび割れからの水分の逸散が生じにく いことや、ある乾燥状態に達した段階でASR ゲル自身か らの水分の離脱が同時に生じることによるものと考え られる。

#### 3.5 持続荷重下におけるコアの変形挙動

## (1) コアのクリープ変形挙動

図 - 5 に持続荷重下におけるコアのひずみの経時変化 を示す。0.5N/mm<sup>2</sup>(400kg),5.0N/mm<sup>2</sup>(4000kg)及び 10.0N/mm<sup>2</sup>(8000kg)の初期載荷時においては,図-5 に示すように,設定した荷重レベルの範囲での応力-ひ ずみ関係はほぼ直線的であり,それぞれ設定した応力レ ベルに比例して圧縮側のひずみが生じている。しかし, その材齢の経過とともにコアのひずみが徐々に減少し, 引張側(膨張側)に移行している。この現象は,圧縮側 にひずみが徐々に増加する健全なコンクリートのクリ ープ現象と大きく異なる点である。ASR 劣化コンクリー







トの微細組織は,反応性骨材の粒子内およびその周囲に 微細なひび割れが多数発生していることが特徴である。 持続的な載荷重に対してひび割れ内のASRゲルがその 粘弾性的性質と流動性を保つことにより,一種の応力緩 和が生じていることが推測される。すなわち,クリープ ひずみの発生が緩和されたと考えられる。実際, 5.0N/mm<sup>2</sup>(4000kg)及び10.0N/mm<sup>2</sup>(8000kg)では,載 荷後の2,3週まではほぼ1週で応力が10%程度低下す る現象が生じていた。一方,設定応力レベルが最も小さ い0.25N/mm<sup>2</sup>(200kg)では,圧縮側のひずみが初期から ほぼ生じておらず,材齢の経過にともない若干の膨張が 認められた。それぞれの設定応力レベルにおける載荷時 から除荷時までのひずみの変化量は,それぞれ-30µ (0.25N/mm<sup>2</sup>,膨張側),-20µ(0.5N/mm<sup>2</sup>,膨張側),-70µ (5.0N/mm<sup>2</sup>,膨張側),-140µ(10.0N/mm<sup>2</sup>,膨張側)と なり,設定応力レベルが大きいものほど持続荷重下にお けるひずみの変化量が顕著になっている。昨年度に実施 した安山岩砕石を使用したコンクリートのクリープ試 験でも,湿潤状態のコアのクリープひずみは膨張側に移 行する現象が確認されている<sup>5)</sup>。また,ASR ゲルの拘束 条件下における膨張圧の発生に関して,Kawamura<sup>8)</sup>の実 験より,拘束のない場合と比較して拘束条件下の方が ASR による膨張圧の発生メカニズムは ASR ゲルの吸 水・膨潤によるものであることを考慮すると,コアのク リープ変形挙動が乾燥状態と湿潤状態とで相違した結 果も理解することができる。

## (2) 除荷後のコアの変形挙動

図 - 6 に除荷後のコアの変形挙動を示す。除荷は経過 日数 91 日の時点で実施した。載荷応力レベルがもっと も小さい 0.25N/mm<sup>2</sup> (200kg)試験体に関しては,除荷前 後でひずみの変化は認められなかった。それ以外の 5.0N/mm<sup>2</sup> (4000kg)及び 10.0N/mm<sup>2</sup> (8000kg)試験体で は,除荷直後に発生した残留ひずみが除荷後徐々に減少 し,約1週間でほぼゼロとなった。すなわち,除荷後の コアには残留ひずみが発生せず,塑性的な変形挙動が認 められなかった。この結果は非常に興味深いものであり, 湿潤状態に保持された ASR ゲルは粘弾性的な性質が卓 越することを示唆するものである。

一般に,コンクリートにおけるクリープ変形挙動は, セメントペースト内に存在する自由水の移動,さらには コンクリート内部の微細な空隙やひび割れが押し潰さ れたりすることで微視構造が変化し,非回復性クリープ (残留ひずみ)になると考えられている。骨材の周囲や ひび割れに存在する ASR ゲルは,湿潤状態において大き な流動性と応力緩和の能力があるものと推察できる。し たがって,この現象は,載荷時の応力による変形をセメ ントペースト相全体でなく骨材周囲の ASR ゲル自身が 受け持ったことによるものと考えられた。以上の考察は あくまでも仮説の段階であり,現在さらなる検証のため の試験を始めている。

## 3.6 クリープ試験後のコアの内部組織の観察

写真 - 7 及び写真-8(直交ニコル, 鋭敏色検板使用) にそれぞれ無載荷状態のコアより作製した薄片および 10.0N/mm<sup>2</sup>(8000kg)載荷によるクリープ試験後のコア より作製した薄片の偏光顕微鏡観察の結果を示す。観察 の結果より,クリープ試験後のコア内部ではクリープ前 と比較して,大きなひび割れが生じており,空隙内に充 填した ASR ゲルがひび割れに押し出されている様子が 観察される。さらに,セメントペースト内の近傍の空隙





図-6 残留ひずみの経時変化(除荷後)

が連結していることが確認できた。すなわち,ASRゲル によって局所的に高い膨張圧を受けたセメントペース ト部分が破壊し,空隙が連結したものと考えられる。ク リープ試験前の内部では,空隙に充填したASR ゲルの傍 を通るひび割れが存在するが,ASR ゲル同士を繋いでい るようなひび割れは顕著ではなかった。しかし,クリー プ試験後の内部では,ASR ゲル同士を繋ぐようにひび割 れが形成されているのが観察される。これは,クリープ 試験時に圧縮応力を受けたことによるものであり,クリ ープ試験による圧縮応力はひび割れや空隙を充填した ASR ゲルが受け持ったことを示唆するものである。

#### 4. 結論

本研究では,ASR 劣化が生じた構造物より採取したコ アを使用して,各種試験を実施したところ,以下の事が 判明した。

- (1) コア内部では,安山岩粒子が反応しており,川砂利 よりも川砂に含まれる安山岩粒子の反応が顕著で あった。骨材やセメントペースト内には,ASRによ るひび割れが生じており,ひび割れ内及びコンクリ ート内部の空隙を ASR ゲルが充填しているのが確 認された。
- (2) ASR ゲルの有無により乾燥開始時間が異なることが判明した。すなわち,ASR ゲル自体が,ある乾燥状態になるまで水分の離脱が生じないため,ASR ゲルが存在する場合は乾燥開始が遅くなる。また,ASR ゲルがひび割れを充填している場合,水分が外部へ逸散する際の妨げとなり,乾燥開始が遅れた。
- (3) 持続荷重下における湿潤状態の ASR 劣化コアは 膨張傾向を示すことが判明した。また,除荷後,コアにおいて残留ひずみは確認されずに,ほぼ原型まで回復したことから塑性的な変形は見られず,ASR ゲルにより弾性的な挙動を示した。
- (4) コンクリート中の空隙は持続荷重下で変形するが, ASR ゲルが充填していると,潰れるのではなく,ひ び割れや破壊したセメントペースト部分に ASR ゲ ルが押し出されると推測された。

謝辞:本研究の実施にあたり薄片観察のご指導をいただいた,メイジテクノ株式会社北川元紀顧問並びにクリープ試験の実施にあたりご援助いただいた(株)ピーエス三菱奥山和俊氏に深く感謝いたします。

## 参考文献

 久保善司,鳥居和之:アルカリ骨材反応によるコン クリート劣化損傷事例と最新の補修・補強技術,コ ンクリート工学, Vol.40, No.6, pp.3-8, 2002



写真 - 7 無載荷コアの偏光顕微鏡観察結果



写真-8 クリープ試験後の偏光顕微鏡観察結果

- 石井浩司,奥田由法,谷川伸,鳥居和之:ASR によ り劣化したコンクリート橋脚の補修・補強工法によ る抑制効果,コンクリート工学,Vol.43,No.7, pp.42-50,2005
- 奥田由法,石井浩司,鳥居和之,松田康孝:ASR損 傷コンクリート橋脚の補修・補強に関する研究,コ ンクリート工学年次論文報告集,Vol.20,No.1, pp.371-376,1998
- Manuuel , F.H. , et al. : Experimental evaluation of expansive behavior of an old-aged ASR-affected dam concrete : methodology and application , Materials and structures , Vol.41 , No.1 , 2008
- 5) 奥山和俊,尾花祥隆,稲垣崇秀,鳥居和之:実構造 物から採取したASR 劣化コアのクリープ性状,コン クリート工学年次論文集,Vol.31,No1,pp.1231-1236, 2009
- 小林和輔,森弥広,野村謙二:圧縮載荷試験による アルカリ骨材反応の診断方法,土木学会論文集, No.460,pp.151-154,1993
- 7) 鳥居和之,野村昌弘,本田貴子:北陸地方の反応性 骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応 性試験の適合性,土木学会論文集,No.767, pp.185-197,2004
- Kawamura, M. : Estimation of critical free expansions related to surface cracking in ASR-affected concretes, Cement & Concrete Composites, No.29, pp.324-329, 2007