

ASR により劣化した PC 試験体に関する実験報告(上)

— PC 建協 ASR 対策検討委員会報告 —

奥山 和俊*1・大久保 孝*2・井隼 俊也*3・廣井 幸夫*4

(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会では、ASR による劣化を受けた PC 部材における基礎的性状の確認および劣化対策について検討することを目的とし、「ASR 対策検討委員会」を設置して各種の実験を行っている。実験は大別すると、ASR 劣化による長期性状の変化を確認することを目的とした「シリーズⅠ実験」と、ASR により劣化した PC 部材のせん断補強効果を確認することを目的とした「シリーズⅡ実験」である。本稿は一連の実験のうち、実験の全体計画および「シリーズⅠ実験」について述べるものである。

「シリーズⅠ実験」は、実構造物レベルでの ASR 劣化による PC 部材の基礎的性状を把握することを目的としている。そのため、実構造物を模した大型 PC 梁試験体と、試験体寸法の差異の影響に着目するための小型 PC 梁試験体を製作し、長期屋外暴露実験を行い、その間、各種の計測を実施した。本稿はこれらの実験を通じて得られた ASR 劣化 PC 部材の性状に関する知見について報告する。

キーワード：ASR、残存プレストレス、長期劣化性状、体積効果、せん断耐力

1. はじめに

アルカリ骨材反応(以下、ASR と称す)によるコンクリートの劣化は 2003 年に NHK 報道等により大きくクローズアップされた。2003 年当時の状況としては、ASR によるコンクリートの膨張によって鉄筋コンクリート部材のスターラップが曲げ加工部等で破断している事例が報告されていた。一方、PC 部材については T 型橋脚の PC 梁部におけるスターラップの破断が報告されていたものの、PC 上部工においては、大きな問題とはなっていない情勢であった。しかし、PC 上部工においても、各地で ASR 劣化の事例が確認されており、ASR 劣化が PC 部材に及ぼす影響を明確にし、合理的な維持管理計画を立てるための基礎的データの収集が重要かつ急務であった。このような状況を受けて、(社)プレストレストコンクリート建設業協会(以下、PC 建協と称す)では関西支部を中心に学識経験者や構造物管理者の協力を得て ASR 対策検討委員会(委員長：京都大学大学院宮川豊章教授)を設置し、多くの試験体を作成して基礎的な計測データの収集や確認実験を実施した。委員会の委員構成を表-1 に示す。

実験は ASR により劣化した PC 部材の基礎的性状を把握し、その対処方法を検討することが目的である。したがって、実構造物レベルの大型 PC 梁試験体を製作し、長期の屋外暴露および計測を行うこととした。また、前述のスターラップ破断に対応するため、せん断試験用 PC 梁試験体を製作、屋外暴露し、ASR 劣化が顕在化した時点でせん断補強を行い、さらに補強後も ASR による残存膨張を作用させたうえで破壊実験を実施した。

本実験を進めるうえでは「残存プレストレス」、「長期劣化性状」、「体積効果」、「せん断耐力」といった4つのキーワードを選定し、それぞれのキーワードに対して各機関との調整を図りながら検討を行うことを基本方針とした。

また、2009 年 3 月に本委員会活動のまとめとして ASR 対策検討委員会報告書¹⁾を作成しており、本稿ではこの報告書の内容をとりまとめ、2 回に分けて報告する。

表-1 ASR 対策検討委員会 委員構成

委員長	宮川 豊章	(京都大学大学院)
幹事長	室田 敬	(三井住友建設(株))(H20.4～)
〃	真鍋 英規	(株)富士ピー・エス(～H20.3)
副幹事長	手塚 正道	(オリエンタル白石(株))
事務局	鈴木 義晃	(株)ピー・エス三菱
〃	廣井 幸夫	(ピーシー橋梁(株))
委員	鳥居 和之	(金沢大学)
〃	二羽 淳一郎	(東京工業大学)
〃	中谷 昌一	(独)土木研究所
〃	玉越 隆史	(国土技術政策総合研究所)
〃	渡辺 博志	(独)土木研究所
〃	室井 智文	(西日本高速エンジニアリング(株))
〃	佐々木 一則	(阪神高速道路(株))
〃	垣尾 徹	(西日本旅客鉄道(株))
〃	葛目 和宏	(株)国際建設技術研究所
〃	鈴木 宏信	(中研コンサルタント)
〃	小林 勤一	(PC 建協関西支部)
〃	真鍋 英規	(株)国際建設技術研究所

*1 Kazutoshi OKUYAMA : (株)ピーエス三菱 技術本部 技術部 開発メンテナングループ

*2 Takashi OKUBO : 川田建設(株) 大阪支店 事業推進部 技術課

*3 Toshiya IHAYA : オリエンタル白石(株) 大阪支店 施工技術部 技術チーム

*4 Yukio HIROI : ピーシー橋梁(株) 大阪支店 技術部

2. 全体計画^{2, 3)}

2.1 各課題の整理

PC 建協関西支部において ASR 対策を取り組み始めた時期は 2003 年からであるが、当時の PC 部材における ASR 劣化の現状と課題を前述のキーワードとした各項目について整理する。

2.1.1 残存プレストレス

ASR により劣化した PC 部材の耐荷性能を評価するうえで、残存プレストレスを適切に評価する必要があった。既往の知見では、ASR による膨張はプレストレス方向と直角方向に主として発生するため、ASR の影響によるプレストレスの変動は顕著でないと報告されていた。ただし、コンクリートの膨張に伴うプレストレスの変動、静弾性係数の低下に起因する部材短縮がプレストレスに与える影響等のメカニズムは解明されておらず、これらの変形が生じている部材に、導入されたプレストレスがどの程度残存しているかの検証は行われていないのが現状であった。

2.1.2 長期劣化性状

ASR により劣化した PC 部材において、耐荷性能および耐久性性能に影響を及ぼすおそれのある変状として、鉄筋の破断、鉄筋とコンクリートの付着力の低下、コンクリート強度の低下、静弾性係数の低下、コンクリートの有効断面の変化、プレストレスの損失等がある。これらの変状がどの時点で顕著となり、また PC 部材にどのような影響を及ぼすかは明確にされていない状況であった。したがって、残存プレストレスと併せ、ひび割れ性状、鉄筋ひずみ、コンクリート膨張量等を長期的に確認することにより、ASR による劣化が PC 部材に与える影響を確認することは重要であると考えた。

2.1.3 体積効果

既往の知見より ASR による劣化は部材断面（体積）に依存することが指摘されていた。小さな断面を有する部材は、大きな断面を有する部材と比較して ASR による劣化が生じにくく、また、その進行も緩やかであると報告されていた。しかし、これらの傾向が PC 部材でも同様なのか、また PC 部材においては特有な事象を示すのかは把握されていなかった。さらに、部材寸法がどの程度ひび割れ性状、残存プレストレスなどに影響を及ぼすかを検討することは、PC 部材における ASR による劣化の問題を解明するうえで、非常に重要であると考えた。

2.1.4 せん断耐力

スターラップの破断は、構造物のせん断耐力低下に繋がる可能性を秘めている。ASR 劣化によりスターラップが破断した場合、PC 部材のせん断耐力にどのような影響を及ぼすのか、またどの程度の補強が必要なのかを把握することは非常に重要である。さらに PC 部材において、ASR 特有の軸方向ひび割れが、せん断耐力に与える影響等について記された知見は少ない状況であった。そこで、これらの内容を解明することは、ASR 劣化した PC 部材をせん断補強するうえで非常に重要であると考えた。

2.2 全体計画概要

前述の課題をふまえ、本委員会で実施する実験を、以下の 2 つのシリーズに決定した。

シリーズ I 実験：PC 部材における ASR 劣化の長期性状把握を主体とした実験

シリーズ II 実験：ASR により劣化した PC 部材のせん断耐力の把握と提案する補強工法の効果の確認を主体とした実験

シリーズ I 実験は、反応性骨材を使用した ASR 劣化試験体と非反応骨材を用いた健全試験体を、それぞれ大小 2 種類製作し、屋外暴露の状態で行う長期計測を行う実験である。この実験により、「残存プレストレス」および「長期劣化性状」を検証した。また、大小試験体の比較により「体積効果」を検証した。さらに、ASR による劣化損傷が PC 部材の力学的性状に及ぼす影響の確認を目的とした載荷試験を実施した。

シリーズ II 実験は、ASR により劣化した PC 部材のせん断耐力を、スターラップの破断を想定した試験体によりせん断載荷試験により確認した。また、補強後の残存膨張を考慮したうえで、本報告で提案したせん断補強工法の効果を確認した。

本計画における実験概念図を図-1に示す。

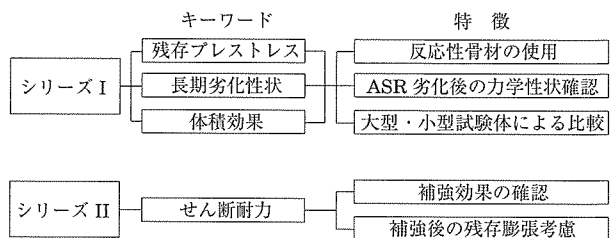


図-1 実験概念図

3. シリーズ I 実験^{4~10)}

3.1 実験目的

シリーズ I 実験では、ASR により劣化をうけた PC 上部構造物を念頭におき、試験体を製作した。

シリーズ I 実験における主目的は、「2. 全体計画」で述べた課題の内、プレストレス量の経時変化に着目した「残存プレストレス」の確認、ASR 劣化が PC 部材に及ぼす影響を長期的に確認する「長期劣化性状」の確認、部材寸法が ASR 劣化に及ぼす影響に着目した「体積効果」の 3 つの性状について検証することである。

また、シリーズ I 実験の特徴は、他の類をみない大型試験体を製作し試験体に反応性骨材を使用していること、その反応の影響を比較対照する目的で同条件での健全骨材（非反応骨材）を用いた試験体も製作していること、ASR 劣化が力学的性状に及ぼす影響を検証する目的で、ASR 反応および健全の両試験体で同一時期に載荷試験を行うこと、の 3 つがあげられる。

3.2 試験体概要

3.2.1 試験体の種類および形状寸法

シリーズ I 実験での試験体は、大型試験体 (I-1) および小型試験体 (I-2) の 2 種類とした。

大型試験体の断面寸法は、せん断耐力式における寸法効果の影響が少なくなるように、有効高 $d = 1.0$ 以上を確保するものとした。実寸法の設定については、PC 上部工での断面相当かつ運搬制約等の条件より定めた。

小型試験体の断面寸法については、大型試験体と同様に比較的多くの施工例がある PC 上部工の断面積に近似する断面形状とした。

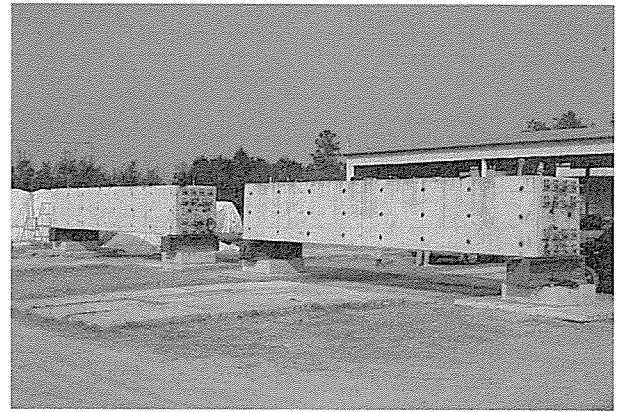


写真 - 1 試験体状況

表 - 2 シリーズ I 試験体種類

試験体サイズ	使用骨材	試験体 No	試験体名
大型 (I-1)	a) 反応性骨材	I-1-a	大型 ASR 試験体
	b) 非反応性骨材	I-1-b	大型健全試験体
小型 (I-2)	a) 反応性骨材	I-2-a	小型 ASR 試験体
	b) 非反応性骨材	I-2-b	小型健全試験体

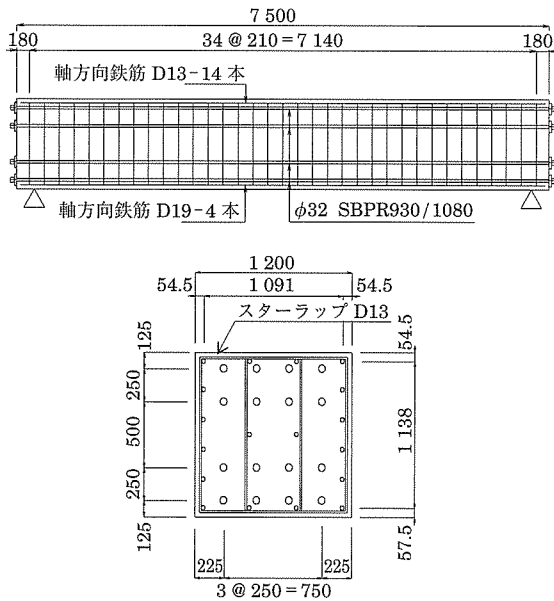


図 - 2 大型試験体概要図

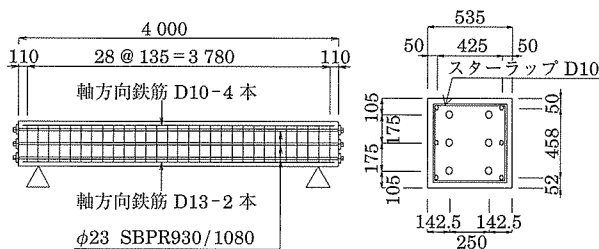


図 - 3 小型試験体概要図

表 - 2 にシリーズ I 実験での試験体種類、図 - 2, 3 に試験体概要図、写真 - 1 に試験体状況を示す。

3.2.2 試験体の配合

試験体に用いたコンクリートの配合は、ASR 劣化が報告されている橋脚 PC 梁での実構造物 (昭和 54 年施工) の配合を基本とした。表 - 3 に試験体に用いたコンクリート配合を示す。

ASR 試験体に用いた反応性骨材は、他機関での ASR 試験にも使用され、その反応性が確認されている北海道産の安山岩を用いた。反応性細骨材の配合比率については、ベシマム試験を実施し決定した。試験結果より、もっとも膨張が顕著となる配合比率は、反応：健全が 4：6 となる配合であったため、この配合比率を採択した。なお、反応性粗骨材の配合比率については、既往の実験¹¹⁾を参考として決定した。

3.3 実験スケジュール

シリーズ I 実験の実験スケジュールを表 - 4 に示す。2005 年 1 月に健全試験体、2 月に ASR 試験体のプレストレス導入を行い試験体の製作終了とし、その後、長期計測を開始した。また、試験体製作後およそ 2 年が経過した 2006 年 12 月に、ASR 劣化を受けた PC 梁の使用限界状態における性状把握を目的として、載荷試験を実施した。

表 - 4 シリーズ I 実験スケジュール

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
2005年	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2006年		○										○
2007年				○								
2008年												

●…試験体製作
○…計測
◎…載荷試験

表 - 3 シリーズ I 試験体のコンクリート配合

配合種別	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m ³)							
						水 W	セメント C	細骨材		粗骨材		混和剤 A	添加アルカリ NaCl
								反応性 Sr	非反応性 Sn	反応性 Gr	非反応性 Gn		
健全	20	8	45.1	4.5	43.1	172	381	0	768	0	1 039	3.81	0.00
ASR	20	8	45.1	4.5	43.1	172	381	308	460	514	525	3.81	11.94

計測項目	計測機器名	仕様	時期	設置供試体
膨張量計測	コンタクトゲージ	標点間距離 250 mm	長期	ALL
	鉄筋貼付ゲージ	溶接型ゲージ (AWC-8B-11-3LT)	長期 載荷試験時	ALL
	ひずみ計・鉄筋貼付ゲージ (コンクリート内部ひずみ計測用)	ひずみ計 (KM-100BT) 溶接型ゲージ (AWC-8B-11-3LT)	長期	ALL
	グラウト PC 鋼材貼付ゲージ	溶接型ゲージ (AWC-8B-11-3LT)	長期 載荷試験時	ALL
	アンボンド PC 鋼材ロードセル	BL-100TE	長期	ALL
	ひび割れ分布計測	目視	長期 載荷試験時	ALL
載荷試験時計測	高感度変位計	CDP-50	載荷試験時	ALL

図 - 4 計測項目一覧

3.4 計測計画

3.4.1 計測項目

シリーズ I 実験における計測項目を図 - 4 に示す。コンクリート内外に設置した計測ゲージとひび割れの目視観察 (ひび割れスケッチ) により、膨張の過程を長期にわたって計測した。

3.4.2 計測頻度

各計測項目の計測頻度を表 - 5 に示す。試験体製作後最初の夏を経験するまでは 1 ~ 2 ヶ月に 1 回の計測または目視観察を、それ以降は年 2 回程度を目安に計測を実施した。

3.5 長期暴露試験

長期暴露試験については表 - 5 に示した計測項目のうち、「ひび割れ計測」、「超音波伝播速度計測」、「ひずみ測定」、「プレストレス計測」について記述する。

表 - 5 計測頻度

材 齢	計測項目						
	圧縮強度試験	静弾性係数試験	割裂引張強度試験	超音波伝播速度計測	ひずみ測定	ひび割れ計測	外観目視
7 日	○	○	○				○
28 日	○	○	○	○	○	○	○
60 日	○	○		○	○	○	○
90 日	○	○		○	○	○	○
150 日	○	○		○	○	○	○
180 日							○
210 日							○
240 日	○	○		○	○	○	○
365 日 (12 ヶ月)	○	○	○	○	○	○	○
515 日 (17 ヶ月)				○	○	○	○
545 日 (18 ヶ月)	○	○					○
614 日 (20 ヶ月)				○	○	○	○
774 日 (25 ヶ月)	○	○	○	○	○	○	○
940 日 (31 ヶ月)				○	○	○	○
1279 日 (42 ヶ月)					○		○

3.5.1 ひび割れ計測

ASR に起因するひび割れは、材齢 90 日頃までは ASR 試験体において確認されなかったが、材齢 150 日にあたる 2005 年 7 月の計測では、大型 ASR 試験体に軸方向ひび割れが確認された。これは、ASR 劣化した PC 部材に特有のひび割れで、部材拘束のあるプレストレス導入方向に沿って発生したものであった。その後、暴露開始後最初の夏を越えた段階となる材齢 240 日の計測では、大型 ASR 試験体、小型 ASR 試験体とも、プレストレスを導入している部材軸方向のひび割れが顕著に表れた (写真 - 2)。あとに示すひび割れ密度の集計でも述べるが、梅雨時期や秋雨の十分な降雨と夏期の気温上昇により ASR 反応が急速に進んだものと推察された。

次に、ひび割れの進展を定量的に把握するため、ひび割れ密度を指標として集計した結果を示す。

本実験では、ひび割れ密度を 2 種類の算出式にて定義した。実験当初は、試験体の各表面に発生したひび割れ長さをパラメータとし、ひび割れ長さの総和を試験体の全表面積で除した値とする「方法 A」を用いた。しかし、ASR 劣化が進展し、ひび割れが試験体全体に広がると、新たなひ

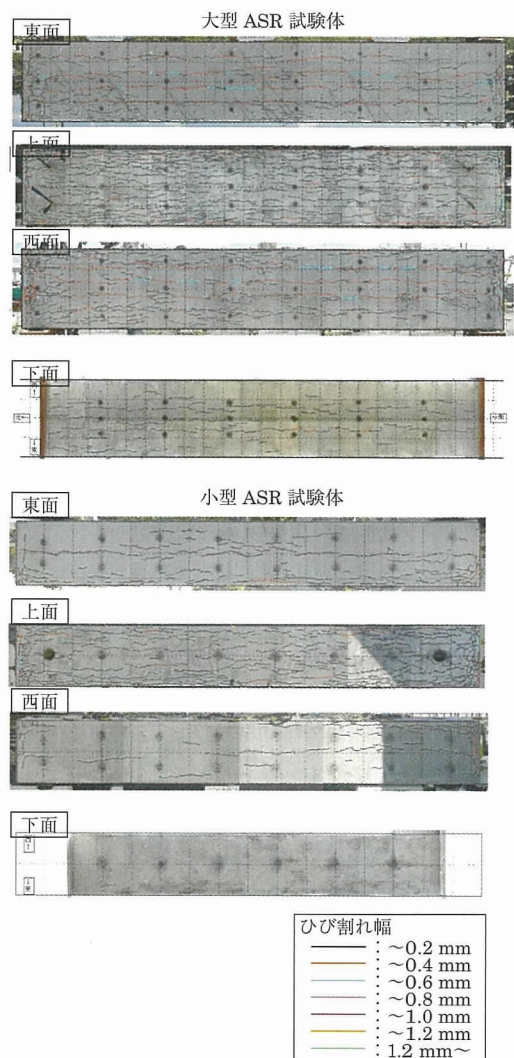


写真 - 2 材齢 240 日計測におけるひび割れ図

ひび割れ発生よりむしろ、すでに発生したひび割れ幅の増大が顕著となった。そこで、ひび割れ幅もパラメータとするひび割れ密度の算出を試みた。すなわち、ひび割れ長さにひび割れ幅を乗じたひび割れ面積の総和を試験体の全表面積で除した値とする方法であり、これを「方法 B」とした。

(1) 方法 A によるひび割れ密度

$$\text{ひび割れ密度 (m/m}^2\text{)} = \Sigma \text{ひび割れ長さ (m)} / \text{試験体表面積 (m}^2\text{)}$$

図 - 5 に方法 A によるひび割れ密度の経時変化を示す。

図より、材齢 20 カ月 (614 日) と材齢 25 カ月 (774 日) でひび割れ密度の逆転現象が見受けられる。ASR 劣化は依然進んでいるにもかかわらず、このような関係が得られたことから、ひび割れ長さだけでなくひび割れ幅の影響を考慮する必要があると判断した。

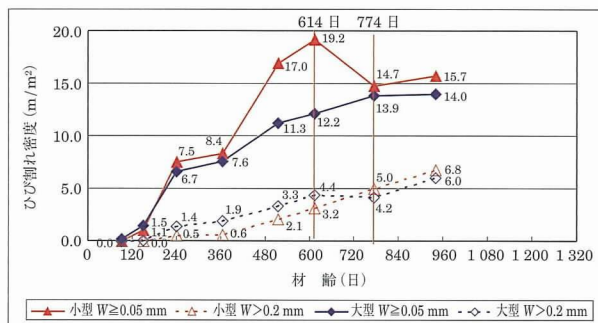


図 - 5 方法 A によるひび割れ密度の経時変化

(2) 方法 B によるひび割れ密度

$$\text{ひび割れ密度 (m} \cdot \text{mm/m}^2\text{)} = \Sigma (\text{ひび割れ長さ (m)} \times \text{ひび割れ幅 (mm)}) / \text{試験体表面積 (m}^2\text{)}$$

図 - 6 に方法 B によるひび割れ密度の経時変化を示す。

図より、材齢の進展に伴いひび割れ密度は増加する傾向が見られた。ひび割れ長さ自体は停滞しているが、ひび割れ幅が増加しているため、結果としてひび割れ密度の増加傾向が確認できる。このことから、ASR 劣化の程度を表す指標としてひび割れ密度を用いる場合は、「方法 A」のみでなく、ひび割れ幅も考慮する「方法 B」の算出式も併用した方が合理的であると考えられる。

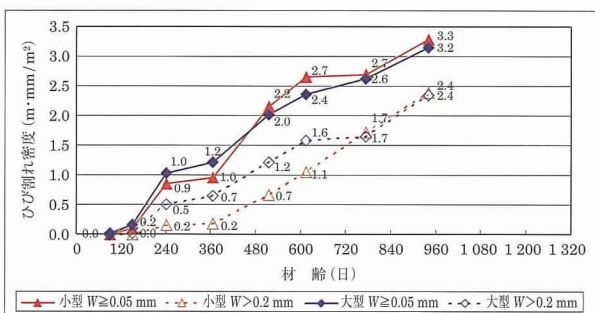


図 - 6 方法 B によるひび割れ密度の経時変化

また、図 - 7 は、気温・降水量とひび割れ密度の関係を示したグラフである。ASR は、一般的に高温かつ降水量が

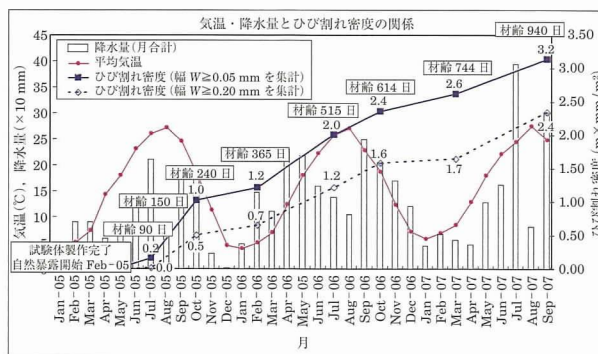


図 - 7 気温・降水量とひび割れ密度の経時変化 (大型試験体 方法 B)

多い夏期に著しく進行するとされており、本実験においても材齢 150 日 (2005 年 7 月) から材齢 240 日 (2005 年 10 月) の間で、ひび割れ密度が急激に増加していることから、夏期の反応が顕著であったことが確認できた。その後のひび割れ密度は、材齢 365 日に至るまで緩やかな変化を示し、夏期において再びひび割れ密度の傾きが大きくなる傾向が見て取れる。

以上のことから、ASR は気温や降水量などの環境条件の影響により進展に違いがあることが確認できた。

3.5.2 超音波伝播速度計測

大型試験体および小型試験体の超音波伝播速度の経時変化を図 - 8 に示す。グラフは、各点の計測値について、試験体側面部からの入射による伝播速度の平均値、試験体上下面部からの入射による伝播速度の平均値をプロットした。

材齢 90 日までは超音波伝播速度は 4 500 ~ 4 600 m/s の範囲にあり、大きな変化は見られなかったが、材齢 170 日頃から ASR 試験体で伝播速度の低下が見られた。暴露後最初の夏を経過した材齢 240 日の計測では、降雨と夏期の気温の影響を受け ASR 劣化が進行したため、伝播速度の低下も顕著に表れた。これは、最初の夏を経過した後、ひび割れ密度が大きく進展した傾向に類似する。図 - 8 で大型試験体の方が小型試験体に比べ伝播速度低下が著しい点は、試験体の大きさに起因する体積効果の現れであると推察された。

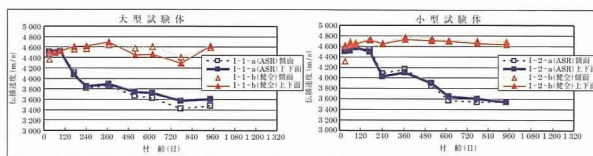


図 - 8 超音波伝播速度の経時変化

3.5.3 ひずみ測定

(1) コンクリート表面ひずみ

コンクリート表面ひずみは、コンタクトゲージを用いて測定した。図 - 9 に大型 ASR 試験体の表面ひずみの経時変化、図 - 10 に小型 ASR 試験体の表面ひずみの経時変化を示す。

図より、橋軸方向の表面ひずみは、材齢 365 日までは収

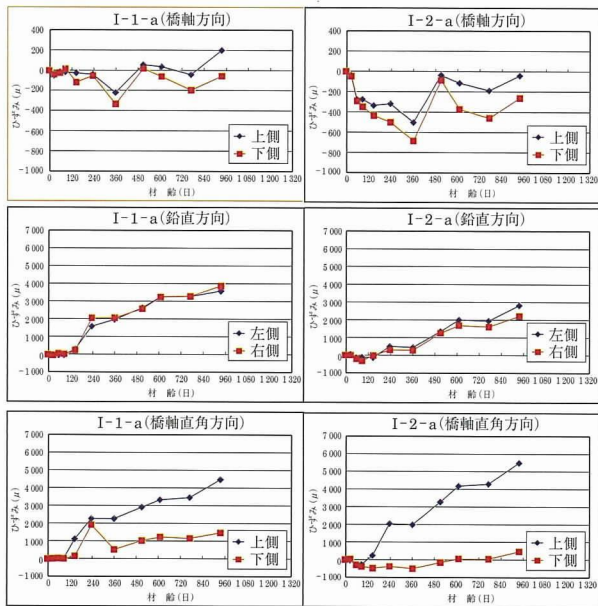


図-9 大型 ASR 試験体
コンクリート表面ひずみの経時変化

図-10 小型 ASR 試験体
コンクリート表面ひずみの経時変化

縮方向を示している。大型と小型では小型試験体の方が収縮度合いが大きいが、一般的に仮想部材厚の小さいものが乾燥収縮度が高いため、この傾向はそれを示すものであるといえる。しかし、材齢 515 日以降の計測結果では、大小 ASR 試験体で橋軸方向膨張の傾向が見受けられる。

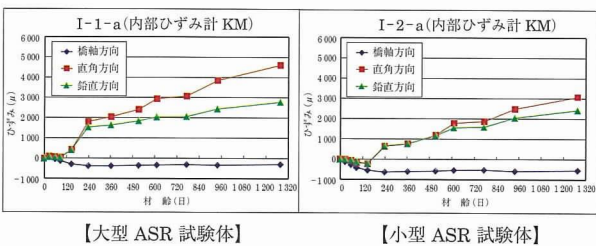
また、側面部における鉛直方向の表面ひずみと上下面部における橋軸直角方向の表面ひずみは、材齢 90 日までは目立った変化はないが、材齢 150 日から膨張傾向に転じ、暴露後最初の夏を経過した材齢 240 日以降は大きく膨張ひずみを示している。

膨張ひずみは、材齢 365 日までは大型試験体の方が小型よりも大きい値を示していたが、材齢 614 日以降では橋軸直角方向のひずみで、小型試験体の方が大型試験体を上回る結果となった。

(2) コンクリート内部ひずみ

コンクリート内部ひずみは、コンクリート内部ひずみ計 (KM) により計測を行った。図-11 にコンクリート内部ひずみの経時変化を示す。

図より、内部ひずみは、材齢 90 日までは各試験体とも目立った変化はなく、大型 ASR 試験体で材齢 150 日、小型試験体で材齢 240 日に、橋軸直角方向と鉛直方向に膨張ひずみの傾向が顕れた。



【大型 ASR 試験体】

【小型 ASR 試験体】

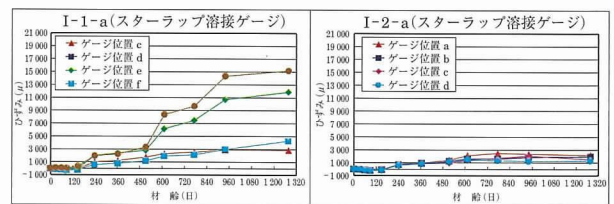
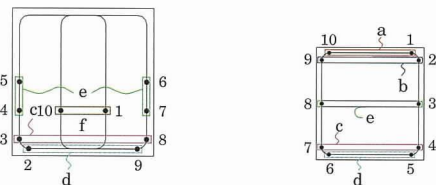
図-11 コンクリート内部ひずみの経時変化

大型試験体と小型試験体を比較した場合、大型試験体の方がより大きな膨張ひずみを生じていたが、経過とともに差が小さくなってきている。膨張挙動のスピードや大きさの差異は、体積効果の影響と推察した。

(3) スターラップひずみ

スターラップひずみは、鉄筋ゲージをスターラップの各部に貼り付け計測した。図-12 にスターラップひずみの経時変化を示す。

大型と小型を比較した場合、大型試験体の方がひずみ値は大きく、体積効果による膨張エネルギーの違いであると推察される。大型 ASR 試験体は、材齢 240 日以降はウェブ中側の断面中央部分において大きな引張ひずみを示すようになった。また、本稿に記載する 2008 年 8 月までの計測においては、スターラップの破断現象は確認できなかった。



【大型 ASR 試験体】

【小型 ASR 試験体】

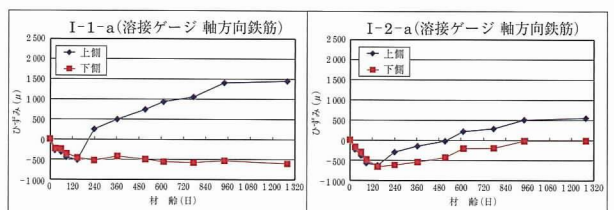
図-12 スターラップひずみの経時変化

(4) 軸方向鉄筋ひずみ

軸方向鉄筋ひずみは、試験体上下面の軸方向鉄筋に設置した鉄筋ゲージにて計測した。図-13 に軸方向鉄筋ひずみの経時変化を示す。

図より、大型 ASR 試験体は、材齢 150 日までは、クリープ・乾燥収縮に伴う 500 μ 程度の圧縮ひずみを示していたが、材齢 240 日以降、引張ひずみが確認された。しかも、上縁側に配置された軸方向鉄筋の引張ひずみが他の部位に比べ顕著な傾向を示していた。上縁側の膨張傾向は、コンクリート表面ひずみの軸方向でもその傾向が見受けられており、同様の挙動と思われる。しかし、上縁側が膨張した場合に発生する上向きたわみは生じていなかった。

また、小型 ASR 試験体は、大型同様に推移し材齢 150 日までは、クリープ・乾燥収縮に伴う 700 μ 程度の圧縮ひず



【大型 ASR 試験体】

【小型 ASR 試験体】

図-13 軸方向鉄筋ひずみの経時変化

みを示していたが、材齢 240 日以降、引張りずみを確認された。上縁側の挙動についても、大型試験体と同様であった。

3.5.4 プレストレス計測

プレストレス計測は、PC 鋼材にひずみゲージを貼り付けたひずみ値と、ロードセルにより直接緊張力を測定する 2 つの手法で計測した。

(1) PC 鋼材ひずみ

図 - 14、図 - 15 に PC 鋼材ひずみの経時変化を示す。

図 - 14 より、ひずみの推移は大型 ASR 試験体の方が大型健全試験体に比べ若干膨張傾向を示しているが、マクロ的に見れば残存プレストレスは健全と同程度であると判断された。この膨張傾向は、ケミカルプレストレスの影響であると考えられた。また、大型 ASR 試験体の高さ方向に着目してみると、上段・中段・下段位置の PC 鋼材ひずみ値は同等レベルであり、断面内のプレストレス分布は、ほぼ一様状態であると推察された。

図 - 15 より、小型試験体も大型試験体と同様に残存プレストレスは健全と同程度であると判断された。また、断面内のプレストレス分布も、ほぼ一様状態であると推察された。

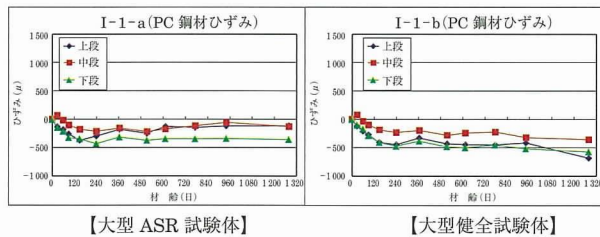


図 - 14 PC 鋼材ひずみの経時変化 (大型試験体)

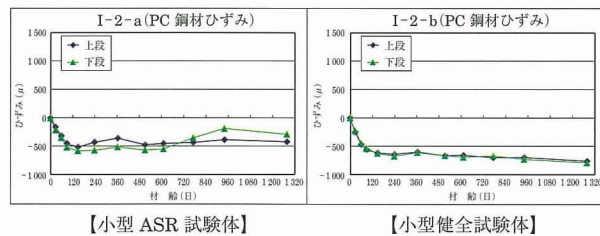


図 - 15 PC 鋼材ひずみの経時変化 (小型試験体)

(2) 緊張力 (ロードセル)

図 - 16、図 - 17 にロードセルによる緊張力の経時変化を示す。

ASR 試験体の劣化性状は、前述までに記載したひび割れ密度やコンクリートひずみ等から判断すると、かなりコンクリートの劣化が進行しているにもかかわらず、残存プレストレスは健全試験体と同様の傾向を示していた。

なお、PC 鋼材ひずみでも確認されたが、ASR 試験体の緊張力推移が若干増加傾向にあるのは、ケミカルプレストレスの影響と考えられた。

以上の計測結果から、現在までの約 4 年間にわたる計測では、残存プレストレスは健全試験体と同程度であること

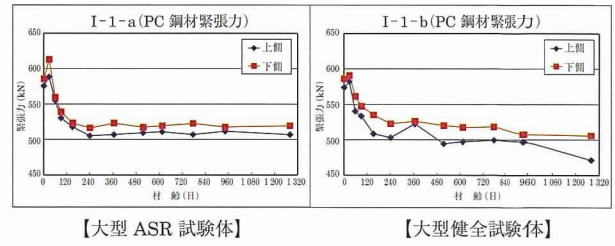


図 - 16 緊張力の経時変化 (大型試験体)

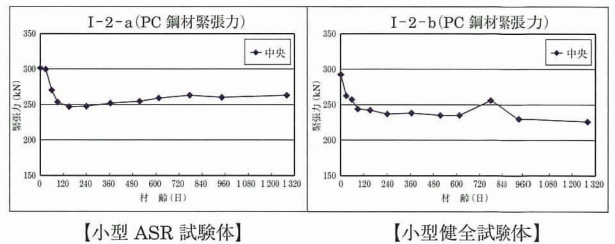


図 - 17 緊張力の経時変化 (小型試験体)

が確認できた。

3.6 載荷試験結果

3.6.1 目的

載荷試験は、長期暴露中の ASR 劣化が顕著となった材齢 22 ヶ月時点において、使用限界状態に相当する荷重を載荷し、その性状を計測・検証することを目的とした。なお、載荷は大型試験体の 2 体について実施した。載荷試験の主たる検証事項は、以下の 3 項目である。

(1) 水平ひび割れの平面保持性能に対する検証

材齢約 22 ヶ月の試験体は、写真 - 3 に示すように、PC 部材特有の軸方向水平ひび割れが顕著に発生している。この水平ひび割れの影響により、試験体が「重ね梁」的な挙動を示すことが懸念された。このため、断面高さ方向での平面保持性能に対する検証を目的の一項目とした。

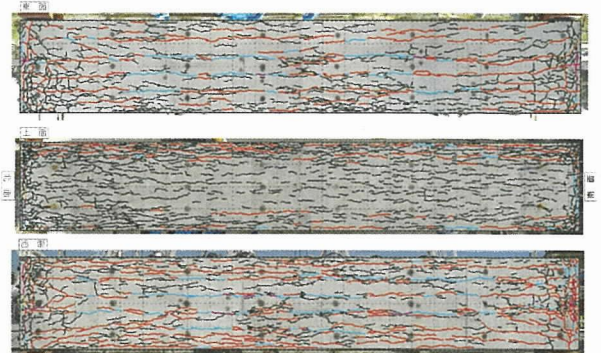


写真 - 3 ひび割れ発生状況 (材齢 22 ヶ月)

(2) 静弾性係数低下を受けた実構造物での挙動確認

シリンダーテストピースにおける静弾性係数については、図 - 18 に示すように、ASR/健全が 29% (約 71% の低下) であることが確認された。ASR 劣化部材の特徴として静弾性係数が低下することは一般的に知られている。しかし、

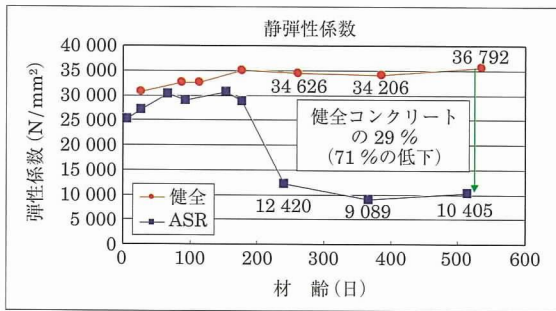


図 - 18 静弾性係数の経時変化

静弾性係数の低下を受けた実構造物の挙動について、報告されている事例は少なく、不明な点が多い。そこで、静弾性係数の低下を受けた実構造物の挙動確認を目的の一項目とした。

(3) ASR による劣化構造物の復元性能

ASR により劣化を受けた PC 部材は、水平方向（プレストレス導入方向）に顕著なひび割れが発生することが本実験においても確認された。しかし、ASR 劣化による水平ひび割れが、一般の供用状態において PC 部材が保有している復元性能にどのような影響を及ぼすかについては確認されていなかった。そこで、ASR 劣化構造物における復元性能に対する検証を目的の一項目とした。

3.6.2 載荷荷重計画

大型健全試験体における載荷荷重は、以降の長期計測に影響を及ぼすことが無いように、支間中央での合成応力度がコンクリートの引張強度相当 (-1.99 N/mm^2) となる荷重を目標値とした。載荷はひび割れ発生が確認できるまで、順次、載荷荷重を増加させた。一方、大型 ASR 試験体については、健全試験体のひび割れ発生荷重を目標とし、ひび割れが確認された時点の荷重を載荷最大荷重とした。また、載荷は同じ荷重に対し、3 ステップの繰り返し載荷を行った。

3.6.3 試験結果

(1) 計測結果総括

最大荷重時 (1 500 kN) における各項目の試験結果を表 - 6 に示す。

ここで、各試験結果の健全 / ASR を曲げ剛性低減率と定義した。鉛直変位の試験結果に基づく曲げ剛性低減率は 80.3 % に対して、各ひずみの計測結果による曲げ剛性低減率は、88.9 % ~ 71.5 % で推移している。また、この中で、コンクリート表面ひずみの低減率 (88.9 %, 85.2 %) が、他の内部鋼材のひずみ計測による低減率 (81.4 % ~ 71.5 %) に比べて高い傾向にあった。

また、後述する挙動の確認については、a) 荷重載荷サイクルにおいて直線性を保持していること、b) 荷重除荷後において原点回帰を示している (初回荷重時を除く) ことより、ASR 試験体においても弾性挙動であることが確認できた。

(2) 平面保持性能の検証

平面保持性能の検証を目的として、各計測項目を断面高さ方向に整理して、その直線性により検証した。

最大荷重時 (1 500 kN) における断面高さ方向でのひずみ分布 (コンクリート表面、内部鋼材) について、ASR 試

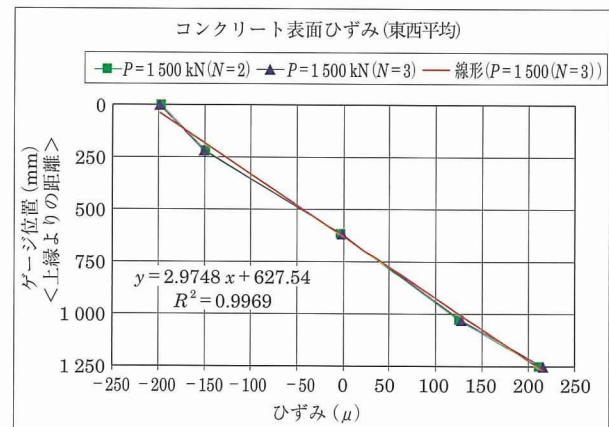
表 - 6 試験結果総括表

項目	単位	健全	ASR	曲げ剛性低減率 (%) (健全 / ASR)
鉛直変位	mm	1.47	1.83	80.3
コンクリート表面ひずみ	上面 μ	-177	-199	88.9
	下面 μ	184	216	85.2
コンクリート内部ひずみ	上面 μ	-167	-207	80.7
	下面 μ	168	224	75.0
軸方向筋ひずみ	上面 μ	-191	-240	79.6
	下面 μ	188	244	77.0
PC 鋼材ひずみ	上面 μ	-148	-207	71.5
	下面 μ	149	183	81.4
断面高さ方向でのひずみ勾配	コンクリート	3.507	2.975	117.9
	内部鋼材	3.133	2.436	128.6

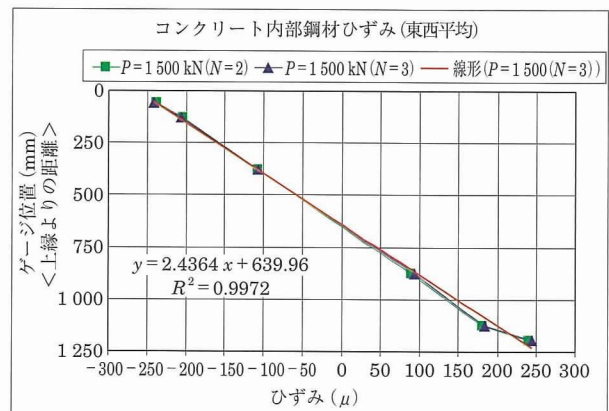
験体の結果を図 - 19 に示す。これが示すように、ASR 試験体は断面高さ方向でのひずみの直線性を確認することができる。

また、ひずみ勾配は、健全と比較して、ASR 試験体においてコンクリート表面ひずみで 84.8 %, 内部鋼材ひずみで 77.8 % (平均 81.3 %) に低下していることを確認した。これは、表 - 6 に示す鉛直変位の曲げ剛性低減率 80.3 % とおむね一致していた。

また、表 - 7 に示すコンクリート表面と内部鋼材のひず



【コンクリート表面ひずみ】



【内部鋼材ひずみ】

図 - 19 断面高さ方向のひずみ分布 (ASR 試験体)

表 - 7 断面高さ方向のひずみ勾配

	①	②	②/① (%)
	コンクリート表面	内部鋼材	
健全	3.507	3.133	89.3
ASR	2.975	2.436	81.9
ASR / 健全 (%)	84.8	77.8	—

み勾配の相関では、健全試験体での「コンクリート表面・内部鋼材」の比率が 89.3 % に対して、ASR ではその比率は、81.9 % であり、コンクリート表面と内部鋼材のひずみ差が大きいことが確認できた。この数値は本来、健全においても、同一箇所でのコンクリートと鋼材のひずみが一定であることより、100 % である。健全と比較して、ASR のひずみ差が大きくなった理由としては、「ASR による断面内の微小なひび割れにより、鋼材への応力依存が高まった」のではないかと推察された。

以上のことを考慮した結果、断面高さ方向でのひずみ分布の直線性が確認できたことから、断面が一体となった弾性挙動を示しており、平面保持の仮定は成立していると考えられた。

(3) 弾性挙動の確認および復元性能の検証

図 - 20 に各試験体の荷重と支間中央部鉛直変位の試験結果を示す。

健全および ASR 試験体とも鉛直変位は、荷重載荷サイクルにおいて直線性を保持し、かつ荷重除荷後において原点回帰を示した。

また、最大荷重時の鉛直変位が、健全 / ASR = 80.1 % であることより、曲げ剛性の低下を確認した。

さらに、ASR 試験体における、荷重除荷後の残留鉛直変位量は、最大荷重時の鉛直変位量に対して 8.7 % (健全では 4.2 %) であった。ただし、この残留ひずみは初回荷重時に発生しているものであり、2 回目以降の荷重ステップについては、健全および ASR ともに、殆ど残留変位は発生していなかった。

以上の結果から、初回荷重ステップにおける残留変位は確認されたものの、健全試験体と同様に、ASR 試験体においても原点回帰の傾向を示していることが確認できた。

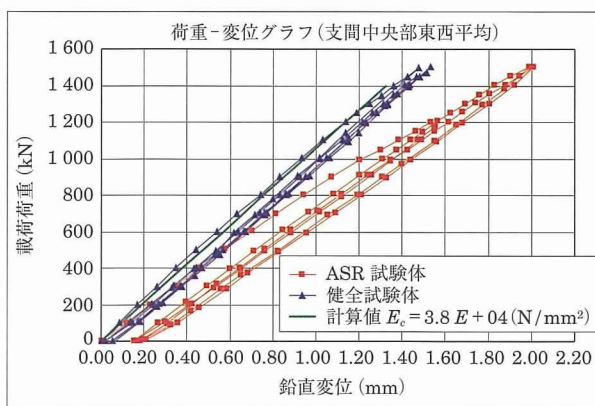


図 - 20 荷重—変位関係

4. シリーズ I 実験のまとめ

4.1 長期暴露試験のまとめ

ひび割れ計測より、ASR 劣化の程度を表す指標としてひび割れ密度を用いる場合は、方法 A のみでなく、ひび割れ幅も考慮する方法 B の算出式も併用した方が合理的であると考えられた。

超音波伝播速度計測から、大型試験体の方が伝播速度の低下が早期に生じる結果を得た。これは、体積効果の現れであると推察された。また、材齢 31 ヶ月での ASR 試験体の伝播速度は、大小試験体とも約 3 600 m/s 程度であった。

コンクリート表面ひずみ計測から、橋軸方向のひずみは材齢 365 日までは収縮ひずみを示したが材齢 515 日以降では膨張の傾向が見られた。また橋軸方向よりも鉛直方向と橋軸直角方向の表面ひずみが顕著な膨張ひずみを示した。この値は、材齢 365 日までは大型試験体の方が大きい値を示していたが、材齢 614 日以降では橋軸直角方向のひずみで小型試験体が大型試験体を上回る結果となった。

コンクリート内部ひずみ計測から、鉛直方向と橋軸直角方向に膨張ひずみの傾向が顕れた。これはコンクリート表面ひずみの傾向と類似する。また大型試験体の方がより大きな膨張ひずみを生じていたが、時間経過とともに差違が小さくなった。

スターラップひずみ計測から、大型試験体の方がひずみは大きい結果を得た。これは体積効果による膨張エネルギーの違いであると推察する。大型試験体は、断面中央部分のひずみが大きな値を示すようになった。これはマス (体積) の影響により表面部よりも内部が大きな膨張を示したと考えられた。

軸方向鉄筋ひずみ計測から、上縁側に配置された軸方向鉄筋の引張りひずみが顕著な傾向を示した。上縁側の膨張傾向は表面ひずみでもその傾向が見受けられており、同様の挙動と思われた。

4.2 プレストレス計測のまとめ

シリーズ I 実験では、ASR 劣化を受ける PC 部材の残存プレストレスの確認を主目的の一つとしている。ASR 試験体の劣化性状は、かなり劣化が進行しているにもかかわらず、残存プレストレスは、健全試験体と同様の傾向を示し

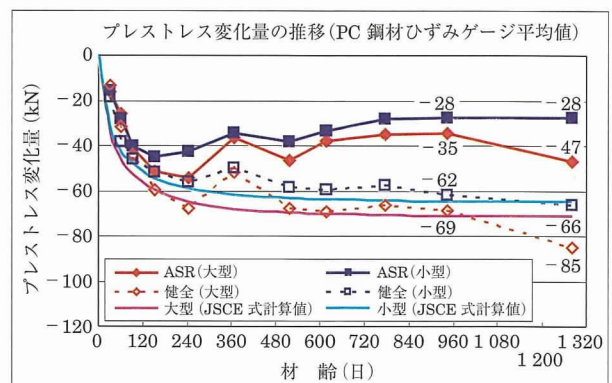


図 - 21 プレストレス変化量の経時変化

ている結果を得た。なお、既往の実験から ASR によるケミカルプレストレスが生じることが知られている。PC 鋼材ひずみの変化を緊張力に換算したものを図 - 21 に示す。健全試験体のプレストレスは、計算値（土木学会式）と近似した推移を示している。一方、ASR 試験体は、プレストレスの減少量が少なくなっていることが確認できる。この原因としては ASR 膨張に伴うケミカルプレストレスが PC 鋼材にケミカルプレストレスとして増加張力を生じているものと推察された。

4.3 載荷試験のまとめ

最大荷重時における断面高さ方向でのひずみ分布から、ASR 試験体はひずみの直線性を確認することができた。したがって、「重ね梁」としての挙動は認められないことから、部材断面が一体となって弾性挙動を示す平面保持性能が確認できた。

また、健全試験体に比較して ASR 試験体は、鉛直変位が大きく、かつ、各項目のひずみ勾配も緩やかであった。すなわち、ASR 試験体においては、曲げ剛性の低下が生じたものと推察された。

さらに、使用限界状態を想定した載荷試験での復元性能については、健全試験体と同様に、ASR 試験体においても原点復帰の傾向を示していることが確認できた。

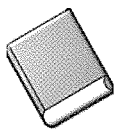
(以下、次号)

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：ASR 対策検討委員会報告書、2009

- 2) 大久保孝他：ASR による劣化を受ける PC 部材の長期性状評価に関する実験的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集第 5 巻，pp.179 - 184，2005
- 3) 上仁健一郎他：ASR による劣化を受ける PC 部材の長期性状評価に関する実験計画，プレレストレストコンクリートコンクリート技術協会 第 14 回シンポジウム論文集，pp.299 - 302，2005
- 4) 城代和行他：ASR による劣化を受ける PC 部材の長期性状評価に関する報告，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集第 6 巻，pp.117 - 122，2006
- 5) 中村健一他：ASR 劣化を受ける PC 部材の長期計測実験に関する中間報告，プレレストレストコンクリートコンクリート技術協会 第 15 回シンポジウム論文集，pp.93 - 96，2006
- 6) 武部行男他：ASR による劣化を受ける PC 部材の長期性状評価に関する実験，土木学会第 61 回年次学術講演会，pp.145 - 146，2006
- 7) 米川英繁他：ASR 劣化 PC 部材の長期性状計測および中間載荷試験に関する報告，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集第 7 巻，pp.105-112，2007
- 8) 堀川智司他：ASR 劣化を受ける PC 部材の長期計測実験および中間載荷試験に関する報告，プレレストレストコンクリートコンクリート技術協会 第 16 回シンポジウム論文集，pp.93 - 96，2007
- 9) 井俣俊也他：ASR による劣化を受けた PC 部材の長期性状評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，pp.1317 - 1322，2007
- 10) Yukio Hiroi, Hideki Manabe, Toshiya Ihaya, Takashi Ookubo, Toyooki Miyagawa : EXPERIMENTAL STUDY ON THE LONG-TERM PROPERTIES OF PRESTRESSED CONCRETE MEMBERS AFFECTED BY ALKALI-SIKICA REACTION (ASR), pp.754 - 763, 13th ICAAR 2008 Proceedings, 2008
- 11) 佐々木一則他：ASR により鉄筋破断が生じた PC 梁のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集第 6 巻，pp.147 - 152，2006

【2010 年 3 月 8 日受付】



刊行物案内

プレレストレストコンクリート技士試験 講習会資料

平成21年度 PC 技士試験講習会

資料のほか、過去 3 年間の試験問題、正解および解説が掲載されています。
現金書留または郵便普通為替にてお申込みください。

(平成 21 年改訂)

定 価 6,000 円 / 送料 500 円

会員特価 5,000 円 / 送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会