

アルカリ骨材反応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

EXPERIMENTAL STUDY ON THE LONG-TERM PROPERTIES OF PRESTRESSED CONCRETE MEMBERS
AFFECTED BY ALKALI-SILICA REACTION

真鍋英規*・廣井幸夫**・大久保 孝***・宮川豊章****

by Hideki MANABE, Yukio HIROI, Takashi OOKUBO and Toyoaki MIYAGAWA

1. はじめに

近年、アルカリ骨材反応（以下、ASRと略す）によるコンクリートの膨張によって、コンクリート中に配置された鉄筋の曲げ加工部や圧接継手箇所の一部で鋼材が破断している事例が複数確認された¹⁾。T型橋脚のPC梁においても、スターラップの曲げ加工部が梁上縁のコーナーで破断しており、構造物の安全性を含め重要な問題であると認識されている。ASRによりひび割れの生じた構造物で鉄筋破断が確認された事例は、これまでのところ阪神地区、北陸地区、中国地区などの約30の構造物で報告されているが、ASRによる損傷・劣化は、これらの地域のみに限らず日本各地での共通の問題と言える。

PC部材のスターラップは終局荷重時に対して配置されているため、設計荷重作用時に対する構造物の安全性は確保できているものの、このままASRの反応が進行すると耐久性、耐荷性に影響が及ぶことも考えられる。ASRにより劣化した構造物における鉄筋破断については、なぜ鉄筋が曲げ加工部で破断するのか、ASR反応の進行および鉄筋破断の程度によって構造物の安全性能にどの程度影響を及ぼすか等については、不明な点も多く、現在各機関にて検討が進められている。

PC部材に関しては今までのところ、T型橋脚PC梁部のスターラップ筋の破断が報告されているものの、PC上部工については大きな問題とはなっていない。しかし、この問題がクローズアップされて以来、PC上部工におけるASRによる損傷事例も数橋報告され始めており、PC部材全体の問題として捉える必要がある。

本研究では、ASRにより劣化するPC部材の基

礎的性状を把握し、またその対処方法を検討する目的から、実構造物を模した大型PC梁を製作し、長期計測を行うこととした。試験体は、2005年2月に製作完了しており、現在、屋外自然暴露条件下で長期計測中である。本稿は、長期実験計画の概要、各計測項目における現在までの計測結果およびASR劣化したPC部材の性状について詳述するものである。

2. 研究の背景および課題の抽出

わが国におけるASRにより劣化した構造物に関する研究は1980年代半ばより行われてきた。当初は、膨張抑制に主眼をおいた補修方法に関するものが多数を占めている。その後、RC部材を中心に耐荷力特性（曲げ破壊耐力²⁾、せん断破壊耐力³⁾、疲労特性⁴⁾等）に関する研究が数多く行われてきた。それらの報告によると、採取コアにより評価したコンクリートの物性値は低下するものの、ASR膨張が鉄筋に拘束されている場合は、部材断面に発生する「ケミカルプレストレス」の効果により、ASRが静的耐荷性能や疲労特性に与える影響は顕著ではないとされてきた。このため、鉄筋破断の事例が報告されるまで、ASRにより劣化を受けるPC部材に関する研究が積極的に行われていたとは言い難い。PC部材のASR劣化に関する研究の課題を以下に述べる。

ASRによる劣化を受けるPC部材に関する長期にわたる性状の把握を目的とした実験は少なく、実際にPC部材がどのような過程で劣化し、耐久性および耐荷性能にどの程度影響を及ぼすかは明確ではない。そのため、実際にASR劣化を受けたPC構造物の劣化予測を困難なものにしている。ASR劣化した実構造物の補修・補強設計をエキスパートによる経験と高度な工学的判断に頼らざるを得ない現状にあると言える。

PC構造物がASR劣化した場合、最も耐荷性能に影響を及ぼすのが、有効プレストレスの残存量である。有効プレストレスが設計計算どおりに残

*（株）富士ピー・エス関西支店技術部土木技術チーム（〒530-0012 大阪市北区芝田 2-2-1）、**ピーシー橋梁（株）大阪支店技術部、***川田建設（株）大阪支店技術部、****京都大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 教授

表1 ASR劣化するPC部材に関する研究課題

研究課題		特徴	実験分類
残存プレストレス	導入プレストレス量および断面内分布の時間的変化	反応性骨材の使用, 長期計測	シリーズⅠ
長期劣化性状	プレストレスが導入された部材の長期的な劣化性状の把握	反応性骨材を用いた大型試験体 長期自然暴露, PC部材の劣化曲線	
体積効果	部材体積の多寡がASR劣化に及ぼす影響	大型・小型試験体の比較	
せん断耐力	ASR劣化によりスターラップが破断したPC部材のせん断耐力	ASR劣化部材のせん断耐力 補強効果の確認	シリーズⅡ

存し, 平面保持の仮定が成立しているならば, PC構造としての耐荷性能はある程度保証できる。しかし, 残存プレストレスが大幅に減少しているならば, 緊急な対策を有することになる。日本においてASR劣化したPC部材の残存プレストレスに関する研究は皆無である。

ASRによる劣化が顕在化している事例は, 比較的大きな断面を有するコンクリート体積の大きな構造物に多い。PC部材に関しても, 体積の大きなPC橋脚梁において損傷・劣化事例が多く, 鉄筋破断も現在のところPC梁に限られている。体積の小さなPC部材にもASR劣化事例はあるものの, 損傷は比較的軽微である。これは, ASRによる劣化が部材体積に依存することを示唆している。研究室レベルでの実験では, 小型試験体を用いたものが多く, 実際の反応性骨材を用いた大型の実験は見当たらない。

スターラップの破断はせん断耐力の低下に直接繋がるものである。ASR劣化を受けスターラップが破断したPC部材の耐荷力評価に関する知見もほとんど無いのが現状である。

以上のことを踏まえて, ASRにより劣化したPC部材に対し, 早急な解明を要するものとして表1に示す4項目に着目し実験を立案した。ここで実験は, 研究課題の内, 長期計測を主体に行うものをシリーズⅠ, せん断耐力と補強効果の確認を主体とするシリーズⅡの2つに分類し計画した。本稿ではシリーズⅠについて詳述する。

3. 実験概要

PC部材のASR劣化性状を把握するため, 反応性骨材を用いた試験体と比較対象として健全骨材を用いた試験体を製作した(表2)。

3.1 試験体寸法

部材の断面寸法は, 大型試験体(I-1)については, せん断耐力式⁵⁾における寸法効果の影響が少なくなるよう, 有効高 $d=1.0\text{m}$ 以上を確保するものとし, PC上部工において一般的に用いられて

表2 シリーズⅠの試験体種類

試験体記号	試験体サイズ	使用骨材
I-1-a	大型 1200×1250×7500 W=276kN	反応性骨材
I-1-b		健全骨材
I-2-a	小型 536×560×4000 W=29kN	反応性骨材
I-2-b		健全骨材

いる構造形式の中で多くの施工実績があるPCポストテンション方式T桁断面積相当の矩形断面とし, 一般道で運搬が可能な重量以下とした(図1)。

体積効果を確認する小型試験体(I-2)については, (I-1)と同様, 多くの施工実績がある構造形式のうち, PCプレテンション方式T桁と同等の断面積を有する矩形断面を設定した。

3.2 コンクリートの配合

試験体に用いるコンクリートの配合は, 実際にASRによる劣化が報告されている橋脚PC梁のものを基本とした。表3に試験体の配合計画を示す。反応性骨材については北海道産安山岩を用いた。また実験に先立ち, 本試験体の配合に対する反応性確認試験(ペシマム試験)を表4の配合比率にて実施し, 膨張ひずみの経時変化(図2)を得た。これにより, 表4に■で示す配合をペシマム条件とし実験試験体で採用した。なお, 粗骨材の配合比率については既往の実験⁶⁾を参考とした。

3.3 計測計画

コンクリート物性値として, 圧縮強度, 引張強度および弾性係数に関して, コンクリート打設時に採取した円柱供試体($\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$)を用いて測定を行った。しかし, ASR劣化が進行すると, 円柱供試体から得られる物性値と実際の実験試験体との物性値と整合が取れなくなるため, コア採取および実験試験体に対して静的載荷することにより整合性を確認する予定である。

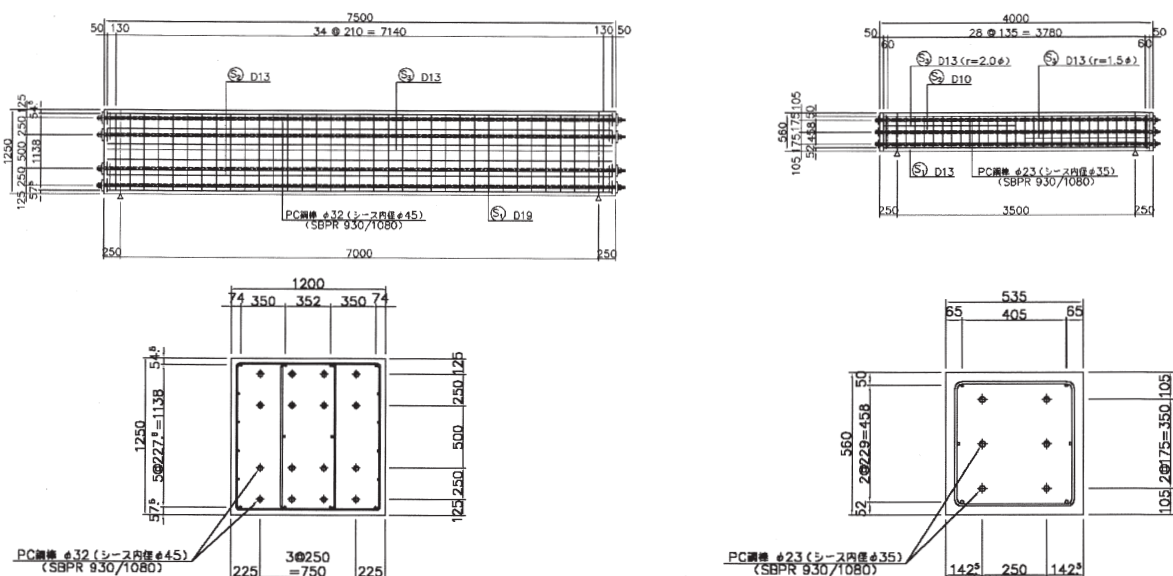


図1 大型および小型試験体

表3 試験体現場配合

粗骨材 最大寸法 (mm)	スラング (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)							
					水 W	セメント C	細骨材		粗骨材		混和剤 A	添加剤 NaCl
							反応性	非反応性	反応性	非反応性		
							Sr	Sn	Gr	Gn		
20	8	45.1	3.0	43.1	172	381	768(Sn+Sr)		1039(Gn+Gr)		3.81	11.94
配合比率はベシマム試験により決定する							514		525			

セメントの種類：早強ポルトランドセメント 混和剤：ポゾリス No. 70

表4 ベシマム試験配合条件<配合比率(%)>

配合No.	細骨材		粗骨材	
	反応	非反応	反応	非反応
I	50	50	50	50
II	60	40	50	50
III	40	60	50	50

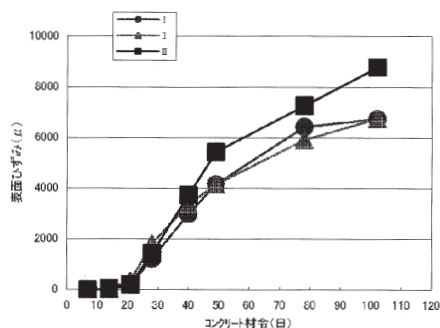


図2 ベシマム試験結果

ASR 膨張に伴うひび割れ等の表面劣化は、目視調査およびデジタル画像による記録を行った。併せて、超音波伝播速度を測定し、表面劣化性状

の経時変化との関係を把握することとした。ASR 膨張によるコンクリートの長さ変化はコンタクトストレインゲージ（標点間距離 300mm）を用いた。プレストレス量の変化は、定着部にロードセルを取り付ける方法および直接 PC 鋼棒に溶接型ひずみゲージ貼付し測定する方法の 2 種類で計測を行った。コンクリートの内部ひずみ、スタラップおよび部材軸方向に配置した鉄筋のひずみも併せて測定した。計測項目とコンクリート材令 60 ヶ月までの計画を表 5 に示す。

4. 実験結果

現在試験体は、三重県明和町にて屋外自然暴露している。ASR 劣化は、一般的に高温で水分が供給される夏季に進行が著しくなるとされている。図 3 に暴露地域における気温および降水量とひび割れ密度との関係を示す。夏場から急激に反応が進んでいることがわかる。試験体コンクリート打設後一夏を経過した材令 240 日までの各項目の計測結果を次に示す。

4. 1 圧縮強度および静弾性係数

円柱供試体による圧縮強度および静弾性係数の結果を図4および図5に示す。反応性骨材を用いた円柱供試体の圧縮強度および静弾性係数は、材令90日頃から低下の傾向にあり、特に静弾性係数は材令240日では著しく低下している。

反応性骨材を用いた円柱供試体では表面劣化進行状態にばらつきがあるため、比較的表面劣化が少ないテストピースを選択したグループ(図4、図5に「劣化小」と表示)と表面劣化が著しいテストピースを選択したグループ(図4、図5に「劣化大」と表示)の比較を行った。圧縮強度と静弾性係数とも劣化大の方が劣化小より若干低下していることがわかる。

静弾性係数の測定では、反応性骨材を用いた円柱供試体に生じているひび割れの影響を考慮し、ひずみゲージを貼り付ける方法(図5に「ゲージ」と表示)とコンプレッソメーターを用いる方法(図5に「コンプレ」と表示)を併用した。

現時点では実際の試験体との整合は取っていないものの、明らかに鉄筋拘束がある試験体の弾性係数値と無拘束で自由膨張している円柱供試体との計測値は異なると考えられる。これは、ASRによる劣化が生じるコンクリート物性値の測定において、無拘束の円柱供試体を用いて評価することに限界があることを示している。実際の評価には、コア採取したテストピースあるいは構造物への非破壊試験によるデータ測定が望ましいと言える。

4. 2 超音波伝播速度特性

超音波伝播速度の結果を図6に示す。材令90日までは、4500~4600m/secの範囲にあり、大きな変化は認められなかったが、材令170日頃(2005年8月初旬)に行った計測では、反応性骨材を用いた試験体で超音波伝播速度の低下が認められた。一夏を経過した材令240日では、大型試験体と小型試験体とも超音波伝播速度の低下が顕著になってきたことがわかる。

超音波伝播速度は、反応性骨材を用いた大型試験体において早期に低下が起こっており、ASRによる劣化の速度が体積に依存する傾向が見受けられる。また、反応性骨材を用いた大型試験体のひび割れの進展は早く、後述するコンクリートおよびスターラップひずみの増加が大きくなっていることから、ASR反応速度に関して体積効果の影響がうかがえる。

図7に反応性骨材を用いた大型試験体に関する超音波伝播速度の測定値を示す。桁高方向の位置を変えて超音波を側面入射したものであるが、高

表-5 計測頻度

材 令	計 測 項 目							計 測 日
	圧縮強度試験	静弾性試験	割裂引張強度試験	超音波透過試験	ひずみ測定	ひび割れ計測	外観目視	
$\sigma_{7日}$	○	○	○				○	2005/2/14
$\sigma_{28日}$	○	○	○	○	○	○	○	2005/3/7
$\sigma_{80日}$	○	○		○	○	○	○	2005/4/11~12
$\sigma_{90日}$	○	○		○	○	○	○	2005/5/10~11
$\sigma_{150日}$	○	○		○	○	○	○	2005/7/13~14
$\sigma_{180日}$							○	2005/8/5
$\sigma_{210日}$							○	2005/9/5
$\sigma_{240日}$	○	○		○	○	○	○	2005/10/6~7
$\sigma_{12ヶ月}$	○	○	○	○	○	○	○	2006/2/6~7
$\sigma_{17ヶ月}$				○	○	○	○	2006/7/6~7
$\sigma_{18ヶ月}$	○	○					○	2006/8/7~8
$\sigma_{20ヶ月}$				○	○	○	○	2006/10/5~6
$\sigma_{24ヶ月}$	○	○	○	○	○	○	○	2007/2/6~7
$\sigma_{30ヶ月}$				○	○	○	○	2007/8/6~7
$\sigma_{36ヶ月}$	○	○	○	○	○	○	○	2008/2/7~8
$\sigma_{48ヶ月}$	○	○		○	○	○	○	2009/2/5~6
$\sigma_{60ヶ月}$	○	○		○	○	○	○	2010/2/8~9

着色部は、既の実施した計測

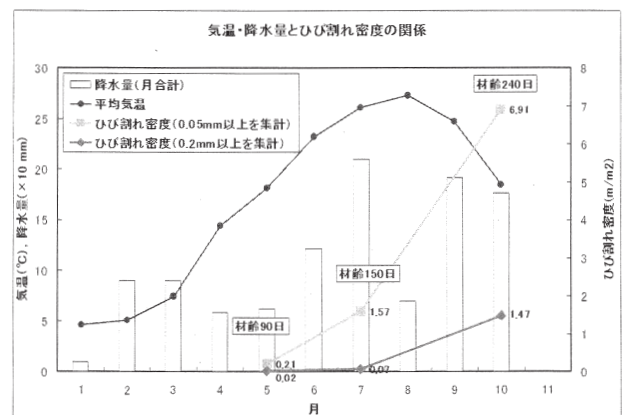
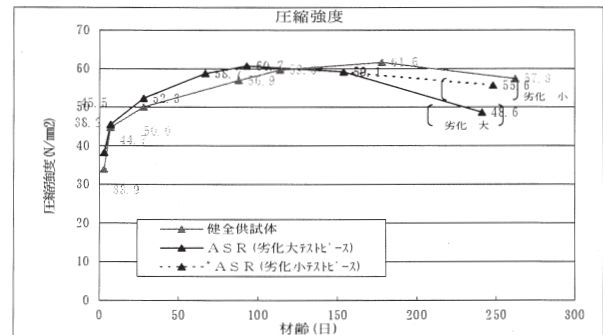


図3 暴露地域の気温・降水量とひび割れ密度の関係



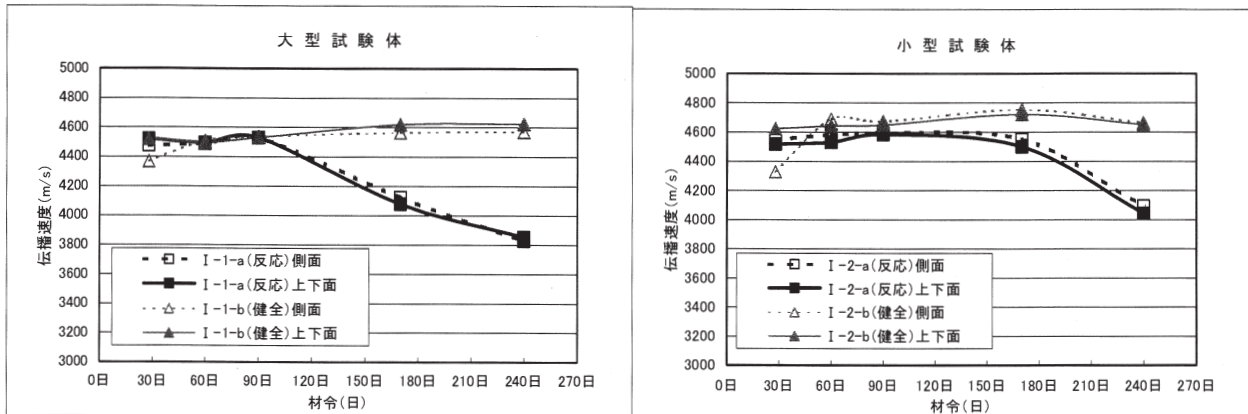


図6 超音波伝播速度の推移

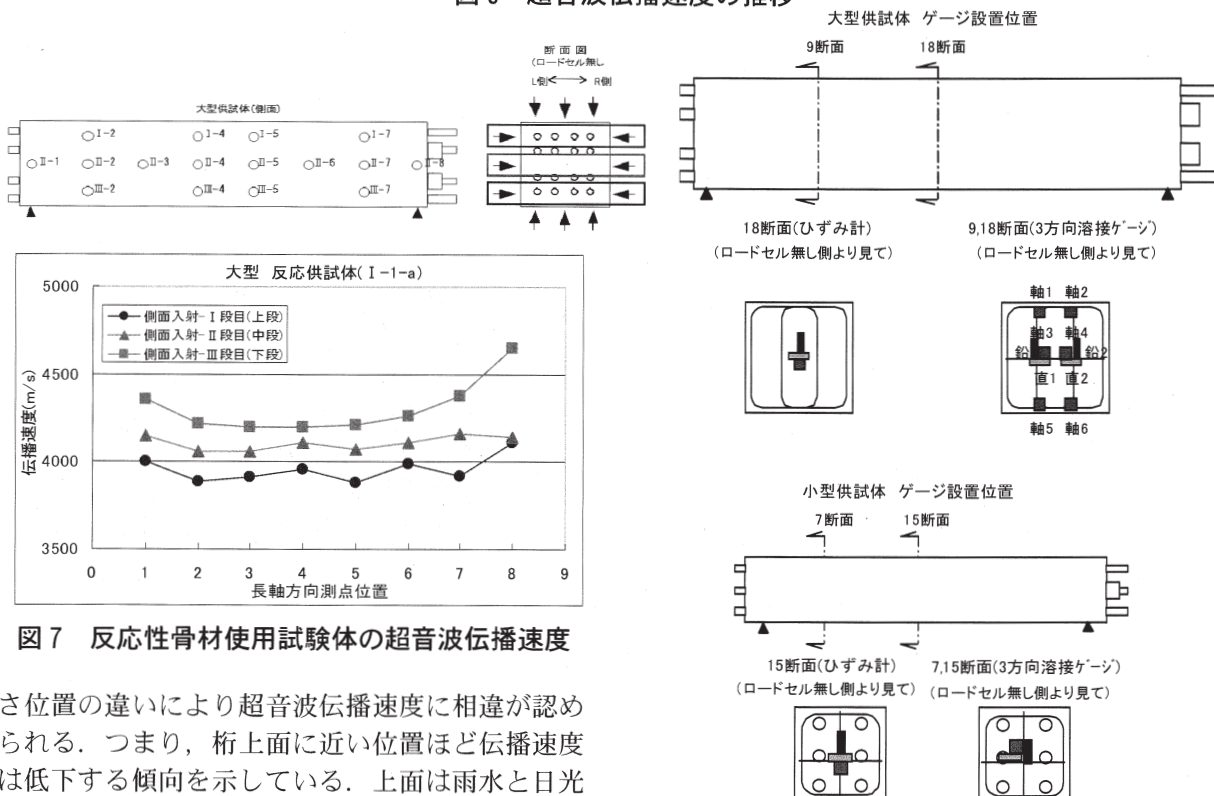


図7 反応性骨材使用試験体の超音波伝播速度

さ位置の違いにより超音波伝播速度に相違が認められる。つまり、桁上面に近い位置ほど伝播速度は低下する傾向を示している。上面は雨水と日光による乾湿の影響を直接受ける環境にあり、ASR反応によって条件が過酷である。また、目視観測において、上面のひび割れ密度が他の面より高く、最も劣化が進行していることが確認されている。高さ位置における表面劣化傾向と超音波伝播速度の低下傾向は一致している。

4.3 ひずみ特性

コンクリート内部ひずみ計によるひずみ測定的位置を図8に、健全骨材を用いた試験体(健全試験体)と反応性骨材を用いた試験体(反応性試験体)のコンクリート内部ひずみの比較として、大型試験体を図9に小型試験体を図10に示す。

コンクリートひずみは、材令90日の計測までは、各試験体とも目立った変化はなく、いわゆる乾燥収縮の様子を呈していたが、2005年の7月中旬に

図8 コンクリートひずみゲージ設置位置

実施した材令150日計測において、大型の反応性試験体で、直角方向と鉛直方向に膨張ひずみの傾向が確認できた。前項で示した、超音波伝播速度の低下からも判断できるように、ASR反応が顕在化してきたものと推察される。

反応性試験体の比較では、材令240日におけるコンクリート内部ひずみに関して、大型試験体と小型試験体と比較した場合、直角方向と鉛直方向の測定値は大型試験体の方が約3倍大きな値が計測されている。現時点での反応の進行は、大型試験体の方が早い。今後、ASR反応・劣化の進行と計測値を比較することにより、さらに体積効果に関する検証を続ける予定である。

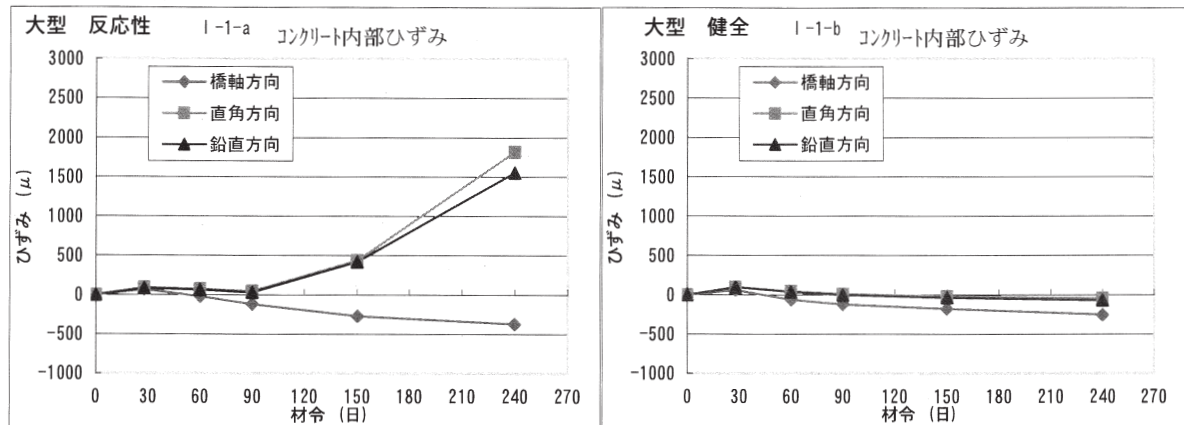


図9 大型試験体コンクリート内部ひずみの比較

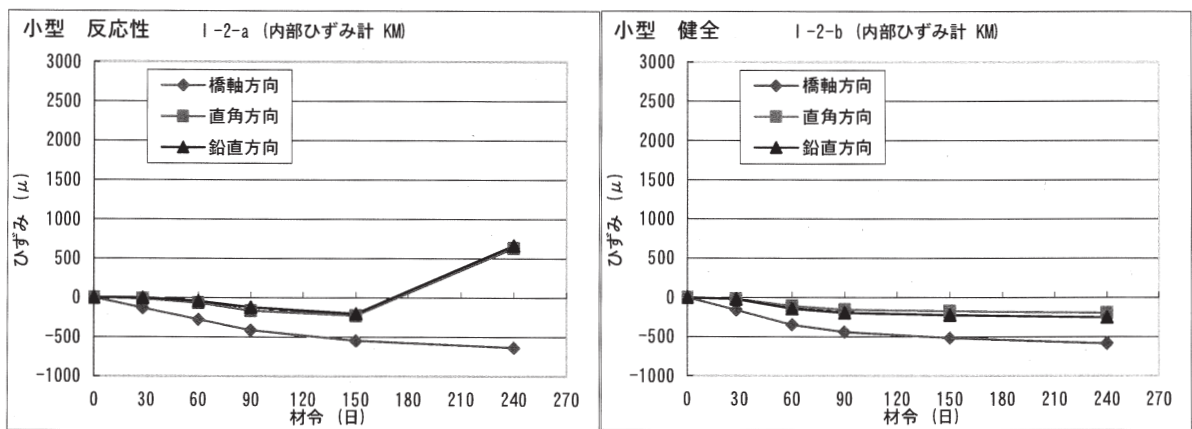


図10 小型試験体コンクリート内部ひずみの比較

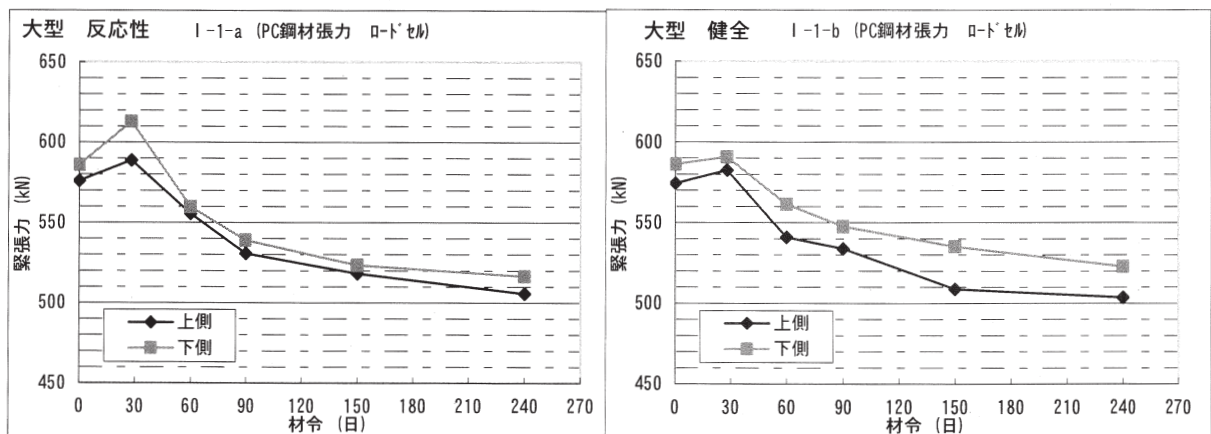


図11 大型試験体プレストレスの変化の比較

スターラップひずみに関しては、材令 240 日における最大測定値を比較すると、大型反応性試験体が 2217 μ であるのに対し、小型反応性試験体では 1665 μ であった。全体的に大型の反応性試験体の方が小型の反応性試験体より大きな値を示している。

4. 4 プレストレスの変化

図 11 に大型試験体におけるロードセルにより

測定したプレストレスの経時変化の比較を示す。材令 240 日までの経過では、反応性試験体と健全試験体との間では顕著な違いは認められていない。また、PC 鋼棒に配置した溶接ゲージによるひずみ変化もロードセル測定値と同様の傾向を示している。部材軸方向の長さは、表面のコンタクトゲージでも変化を示しておらず、全長の変化は僅かであった。これらの測定結果より、現時点では残存

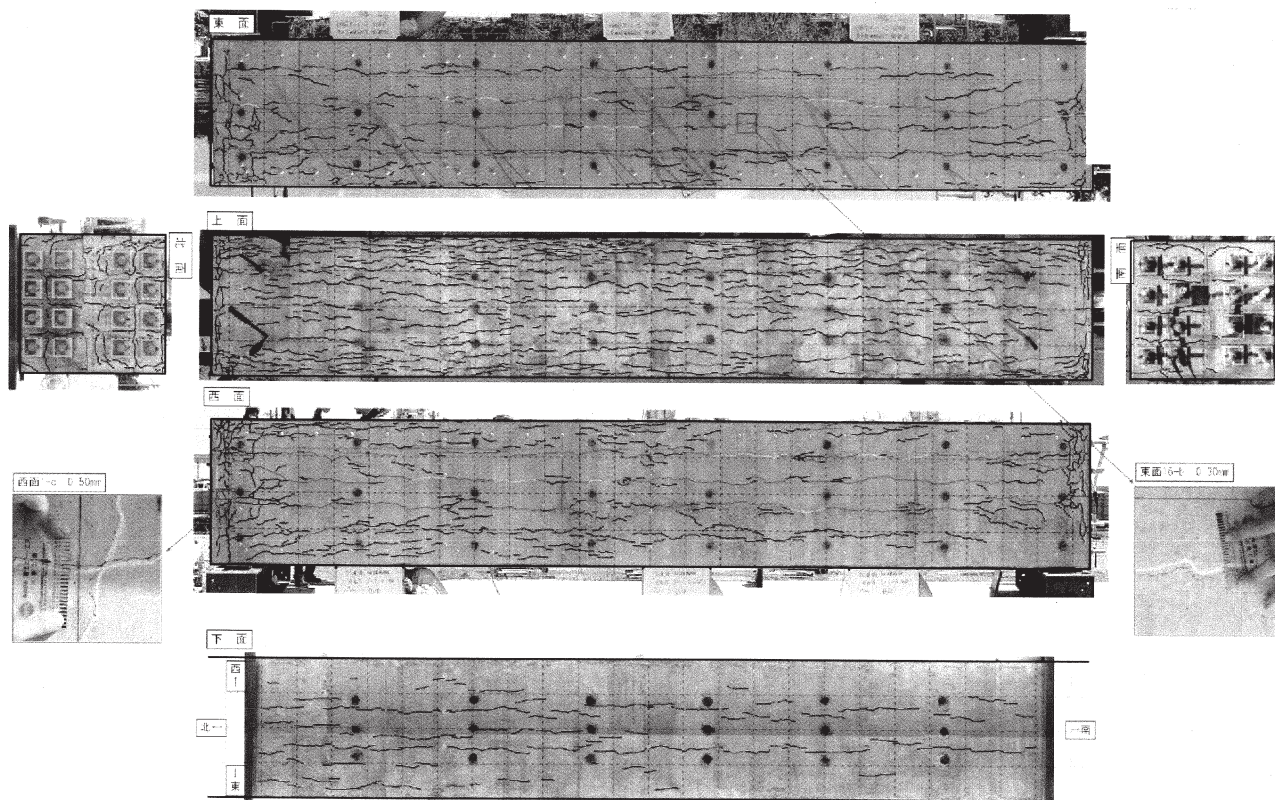


写真1 大型試験体 反応性骨材使用 (1-1-a) σ 240 ひび割れ状況

プレストレスは健全試験体と同等であると言える。今後の残存プレストレスを試験体の劣化と併せて引き続き注意深く観測を行う予定である。

4. 5 ひび割れ状況

写真1に材令240日における反応性試験体のひび割れ状況を示す。健全試験体では、目立ったひび割れの発生は無いが、大型の反応性試験体では、プレストレスが導入されている部材軸方向にひび割れ(幅0.05~0.70mm)が発生してきており、PC部材におけるASRひび割れが顕在化してきている。雨水や日射の影響を受けやすい上面部が特に顕著である。ASR劣化過程のグレーディング⁷⁾では進展期から加速期にあたると考えられる。

本実験では、従来通りのスケッチングによるひび割れ観測とデジタルカメラによる可視画像データとしての記録を併用している。これらのデータを用い、ひび割れの進展、ひび割れ密度の変化などの表面劣化の経時変化とプレストレスの変化、鉄筋およびコンクリートのひずみの変化、コンクリートの物性値などの計測データとの関係を明確にすることにより、今後のASR劣化したPC構造物の劣化グレーディングおよび維持管理手法の検討に役立てたい。

5. まとめ

ASRによる劣化が生じたPC部材の長期的性状を把握し、その補修・補強方法を検討する目的から、大型PC梁を製作し長期的な計測を行う実験を開始した。材令 σ 240日までのデータではあるが、現在までに確認できたことを以下にまとめる。

- 1) 試験体製作を2005年2月に完了した後、夏季に反応が進行し始め、一夏経過した2005年10月にはASRによる劣化が顕在化してきた。
- 2) 超音波伝播速度は材令90日までは、4500~4600m/secの範囲にあり、健全なコンクリートにおいて得られる値と同等であったが、材令170日頃(2005年8月初旬)に行った計測では、反応性試験体で超音波伝播速度の低下が認められた。一夏を経過した材令240日では、反応性骨材を用いた大型試験体と小型試験体とも超音波伝播速度の低下が顕著になった。
- 3) 圧縮強度については、健全試験体と反応性試験体において、材令240日の段階までは顕著な差異はない。一方、静弾性係数につ

いては、ASR 試験体の材齢 90 日より低下傾向があり、材齢 240 日において大きく低下してきた。ASR による劣化が生じるコンクリート物性値の測定には、無拘束の円柱試験体を用いることに限界がある。

- 4) 反応性骨材を用いた大型試験体と小型試験体を比較した場合、ASR による劣化の進行は、体積の大きい大型試験体の方が早い傾向を示した。これは、ひび割れ性状、超音波伝播速度、コンクリートひずみおよび鉄筋ひずみにおいて同様の傾向が認められている。
- 5) 残存プレストレスに関して、材令 240 日までの経過では、反応性試験体と健全試験体との間では顕著な違いは認められていない。

6. おわりに

本実験は長期的な視野を持って行うものであり、現時点のデータから得られる知見は必ずしも全て有効であるとは限らない。ASR に関する研究はまだまだデータの蓄積と分析が必要であり、多岐にわたる研究が必要と考える、今後、さらに計測を継続し ASR 劣化を受けた PC 部材の性状が解明され、補修・補強方法が確立されることを望むものである。

本研究は（社）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（委員長：京都大学大学院 教授 宮川豊章）において実施されているものであり、関係各位には多大なる協力を頂きました。ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー124, アルカリ骨材反応対策小委員会報告書－鉄筋破断と新たな対応－, (2005)
- 2) 小林和夫, 井上晋, 山崎鷹生, 中野錦一：アルカリ骨材反応を受けた PC はり部材の耐荷性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集 9-1, pp. 615-620, (1987)
- 3) 小柳治, 六郷恵哲, 内田裕市, 長瀬道雄：著しい AAR 損傷を生じた RC はりの挙動, コンクリート工学年次論文報告集 15-1, pp. 947-952, (1993)
- 4) 井上晋, 三方康弘, 小林和夫, 仁枝保：ASR 損傷を生じた RC はり部材の正負交番載荷下の曲げせん断特性, 材料, Vol. 50, No. 8, pp. 883-888, (2001)
- 5) 土木学会：2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料, pp. 22 (2002)
- 6) 阪神高速道路公団, 日本材料学会：アルカリ骨材反応橋脚の維持管理に関する調査研究業務報告書, (2004)
- 7) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編], (2002)

(2006年1月12日受付 2006年3月1日受理)