

報告 ASR を生じた PC 梁の膨張挙動について

浅井 洋^{*1}・森下 宣明^{*2}・前野 裕文^{*3}・梅原 秀哲^{*4}

要旨：名古屋高速道路公社では、橋脚 PC 張出し梁にアルカリ骨材反応が生じた場合の検討を行っている。プレストレスがコンクリートの物性に及ぼす影響やプレストレス量の増減等、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化に不明な点が多い。そこで、反応性骨材を用いた PC 梁のプレストレス量および帯鉄筋量を変えて促進養生を行い、軸方向および軸直角方向のひずみ変化を測定している。本報告では、約 450 日間促進暴露試験を行った試験体の膨張挙動について述べる。

キーワード：アルカリ骨材反応，プレストレスコンクリート，膨張率

1. はじめに

中部地方においては、従前よりアルカリ骨材反応（以下、ASR）によるコンクリート構造物の損傷は少ないとされてきた。¹⁾しかし、最近の報告では、愛知県およびその近隣の地域で使用されている堆積岩のチャート質山砂利を反応性骨材とする ASR が顕在化してきている。

名古屋高速道路のコンクリート橋脚梁部においても、ASR とみられるひび割れが確認された。現状で確認されたものは数脚で、外部からの水の供給を遮断する補修対策を実施している。将来、ASR の進行により橋脚梁部の耐荷力が低下した場合を想定して、効果的な補修補強方法の策定に取り組んでいる。なかでも、T 型橋脚の PC 張出し梁が ASR で損傷した場合の補修補強計画を立案するにあたって、プレストレスなどで拘束されたコンクリートの劣化特性を把握しておく必要がある。これまで一般に補修補強計画に使用されるコンクリート物性は、PC 張出し梁の軸に直交する方向（以下、軸直角方向）からコアを採取して調査した圧縮強度や静弾性係数が用いられている。しかし、プレストレスによって拘束されている場合、プレストレス作用

方向とその直角方向で強度低下や静弾性係数の低下に差が生じると考えられる¹⁾。コンクリート強度や静弾性係数は、使用時の部材応力度や変形に影響を及ぼす。PC 鋼材の張力損失は、PC 張出し梁のように鋼材が多段配置されている場合には、破壊耐力が低下する場合があります、これらの物性を把握することは重要である。しかし、ASR が生じたプレストレスコンクリートに関する既往の研究は少ない。そこで、PC 梁に ASR が生じたときの膨張挙動と ASR がコンクリートの圧縮強度や静弾性係数に及ぼす影響について検討するため、反応性骨材を使用した試験体を製作し、促進試験を行った。本報告では、促進養生の途中経過について述べる。

2. 実験方法

2.1 使用材料

セメントには、早強ポルトランドセメント（密度 3.13g/cm³，比表面積 4640cm²/g，全アルカリ 0.49%）を使用した。細骨材は、鬼怒川産川砂（表乾密度 2.58g/cm³，粗粒率 2.47）で、JIS A1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験（化学法）」（以下、化学法と称す）によって「無害」と判

*1 三井住友建設（株） 技術研究所 主任研究員（正会員）

*2 名古屋高速道路公社 保全施設部主査

*3 名古屋高速道路公社 保全施設部課長補佐 工博（正会員）

*4 名古屋工業大学教授 大学院工学研究科 都市循環システム工学専攻 Ph.D.（正会員）

定されたものを使用した。粗骨材は、養老産砕石(最大粗骨材寸法 20mm ,表乾密度 2.62g/cm³ ,粗粒率 6.33 ,アルカリ濃度減少量 69mmol/l ,溶解シリカ量 503mmol/l)で、化学法によって「無害でない」と判定されたものを使用した。スランプを 8cm とし、空気量は 4.5%とした。混和剤には、リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体からなる AE 減水剤を用いた。既往の研究²⁾では、コンクリート中のアルカリ量 (Na₂O 等量) が 6kg/m³ 以上で膨張を示すことから、本試験では、水酸化ナトリウム(NaOH)で 6kg/m³ に調整した。NaOH の使用は、コンクリートの圧縮強度を低下させる恐れがあるため、試験練りによって材齢 7 日の圧縮強度 40N/mm² が得られる配合を選定した³⁾。配合を表 - 1 に示す。

2.2 試験体

梁試験体は、図に示す矩形断面であり、表 - 2 に示すプレストレス量と帯鉄筋量を変えた 4 試験体とした。プレストレスは、断面内に配置した 2 本の PC 鋼棒(32mm)によって与えた。養生中の張力変化が測定できるように、PC 鋼棒はアンボンドとした。ポリエチレンシースを使用し、端部定着プレートは試験体断面と同寸法 (t=40mm)とした。軸方向鉄筋は D13 を断面 4 隅に配置し、帯鉄筋は D10 または D13 を使用した。促進養生中のコンクリートの膨張率、圧縮強度、静弾性係数および引張強度の変化を把握するため、角柱供試体(10×10×40cm)と円柱供試体(10×20cm)、割裂引張供試体(15×20cm)を製作した。

試験体はコンクリート打設後、約 2 週間常温で湿布養生を行い、所定のプレストレスを導入

表 - 1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
45	43	175	389	728	980	1.362

表 - 2 試験体一覧

No.		プレストレスによる圧縮応力度 (N/mm ²)	帯鉄筋量鉄筋比 (%)	帯鉄筋	Na ₂ O等価アルカリ量 (kg/m ³)
RC	RC試験体	0	0.24	D10 ctc150	6
PC-1	プレストレス1/2	4.8			
PC-2	PC試験体	9.5	0.50	D13 ctc125	
PC-3	帯筋増PC試験体				

した。その後、約 2 週間放置してプレストレスの再調整を行った。

2.3 促進養生及び測定項目

促進養生は、プレストレスの再調整直後に開始した(材齢 26~40 日)。促進養生方法は、JCI - DD2 法に準じ、目標設定温度 40 とした。養生槽は、コンクリート製品用蒸気養生槽を使用し、各試験体に配置した熱電対で温度を確認した。1 日のサイクルは、20 /h の速度で蒸気を送り、目標温度を 4 時間保持し、供給を停止した。蒸気の供給を継続すると、試験体表面のアルカリ量の流出が著しくなると考えられたためであり、養生槽には保温シートを設置し、極力温度低下が生じないように配慮した。促進養生を開始して約 200 日養生した頃から膨張率が頭打ちとなり、収束する傾向が認められたため、304 日からデンマーク法に養生方法を切り替えた。養生方法は、飽和 NaCl 溶液を含浸した敷布で試験体を覆い、その外周をポリエチレンシ-

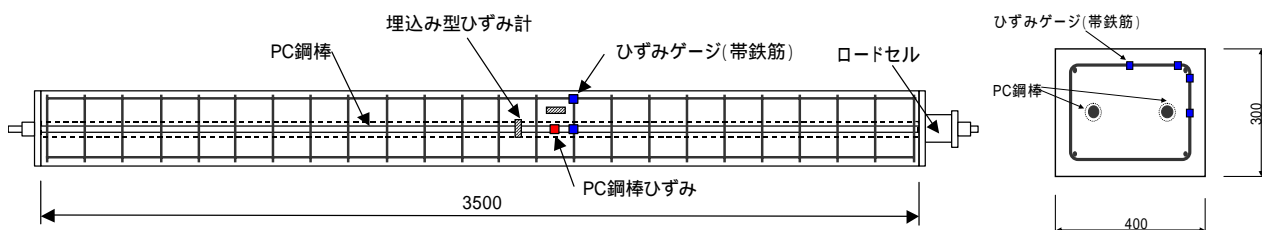


図 - 1 試験体寸法

トで密閉した。養生中，敷布が乾燥しないよう NaCl 溶液を供給した。温度管理は，それまでと同様に蒸気養生により，目標温度を 50 に設定した。

促進養生中，コンクリートおよび鋼材のひずみを測定した。また，PC 鋼棒の張力変化も測定した。コンクリートひずみは，梁試験体のプレストレス導入方向（以下，軸方向），および軸直角方向（以下，軸直角方向）に測長 100mm のコンクリート埋込み型ひずみ計を設置した。鉄筋ひずみは，帯鉄筋の 4 箇所とした。PC 鋼棒の張力変化は端部に配置したロードセルによって測定し，鋼棒表面にもひずみゲージを配置した。角柱供試体の膨張率は，供試体中央に配置した埋込み型ひずみ計で測定した。

3. 実験結果

3.1 膨張率

角柱供試体（無筋）の膨張率の変化を図 - 2 に示す。JCI-DD2 による促進養生期間では，膨張の進行は緩やかであり，約 200 日後には膨張が収束する傾向を示した。304 日後に養生条件をデンマーク法に変化させると，約 2 ヶ月後から顕著な膨張を示した。50～200 日の膨張速度は，0.024%/月であり，380～480 日の膨張速度は 0.136%/月で，約 5.7 倍の膨張速度を示した。これは，一般の環境下の構造物では ASR が顕在化しない場合でも，凍結防止剤を散布する環境では ASR による損傷を引き起こす恐れがあることを示唆している。

次に，RC および PC 試験体のコンクリートひずみの経時変化を図 - 3 および図 - 4 に示す。RC 試験体の膨張率が徐々に増加するのに対して，PC 試験体は，初期の収縮が大きく，その後の収縮はわずかである。PC 試験体の収縮ひずみは，クリープひずみ計算値⁴⁾と概ね一致しており，劣化に伴う収縮増加は認められない。コンクリートひずみは，測長 100mm の測定器で測定した結果であるが，PC 試験体の PC 鋼棒のひずみ変化とほぼ一致しており，試験体全体の変化

を測定できていると考えられる。また，この収縮量は，PC 鋼棒の張力減少量に相当する。また，角柱供試体は，養生方法を変更することで顕著な膨張を示したが，梁試験体では養生方法の変更による顕著な差は認められない。

軸直角方向ひずみは，いずれの試験体も膨張

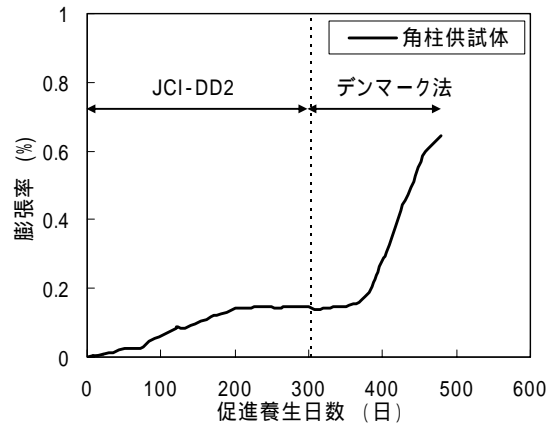


図 - 2 角柱供試体の膨張率

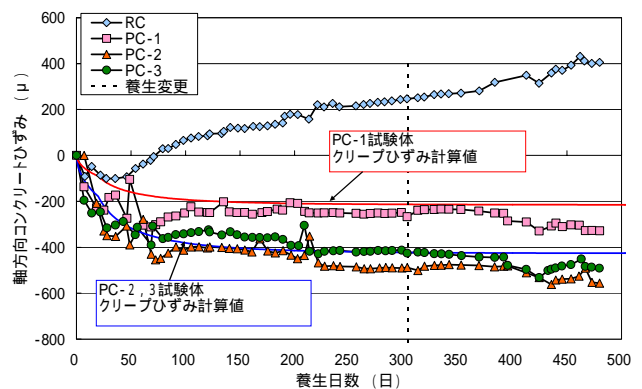


図 - 3 軸方向コンクリートひずみ

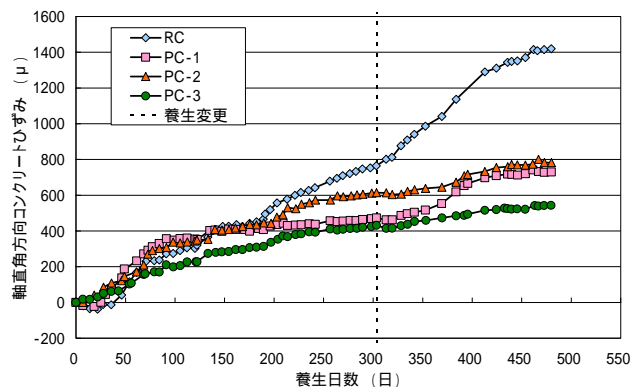


図 - 4 軸直角方向コンクリートひずみ

を示しており、特に、RC 試験体の養生日数 190 日以降の膨張ひずみが大きい。プレストレスを付与した試験体では、帯鉄筋量が多い PC-3 試験体が若干小さい値を示しているが、顕著な差は認められなかった。

梁試験体の膨張は、養生条件を変えることで再度膨張の進行が認められるが、角柱供試体で見られたような顕著な増加は認められなかった。梁試験体は、角柱供試体に比べて断面が大きく、NaCl 溶液が試験体内部まで浸透し、試験体全体が膨張するに至っていないことが原因と考えられる。

3.2 物性の経時変化

円柱供試体の圧縮強度と静弾性係数の経時変化を図 - 5 に示す。膨張率は同一養生を行った角柱供試体の測定値である。膨張率約 0.02% で、円柱供試体の表面にひび割れが認められた。ひび割れの発生状況は、全面に生じた供試体や局部的に生じた供試体等様々で、膨張率が大きくなるにつれて圧縮強度および静弾性係数のばらつきが大きくなる。圧縮強度は膨張率 0.3% 程度で低下する供試体が認められたが、静弾性係数および割裂引張強度は 0.1% 程度から低下を示した。個々の供試体の静弾性係数と圧縮強度との比で整理したものが図 - 6 である⁵⁾。圧縮強度が低下しても静弾性係数と圧縮強度との比は顕著な低下を示さず、ほぼ同程度の比を示している。

3.3 プレストレスの変化

ロードセルで測定したプレストレス損失量を定着荷重で除した値をプレストレス低下率として図 - 7 に示す。また、図中の計算値はクリープ変形による損失率である。PC-2 および PC-3 は概ね計算値と一致しているが、PC-1 は約 4% 小さい傾向を示した。各試験体は、促進養生 60 日後に張力の回復が認められ、PC-1 はその後、顕著な増減は認められない。この張力増加は、角柱供試体の膨張率や RC 試験体の軸方向ひずみの膨脹開始時期に生じており、コンクリートの膨脹力が原因の一つと考えられる。

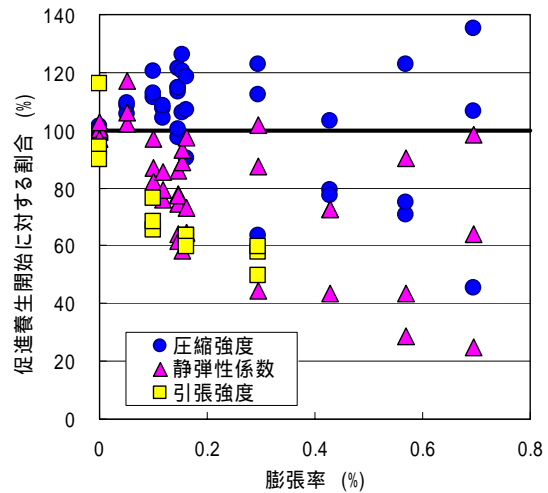


図 - 5 膨張率と静弾性係数の関係

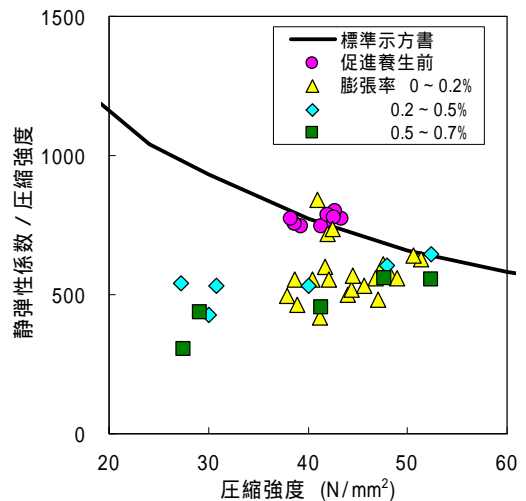


図 - 6 圧縮強度と静弾性係数の関係

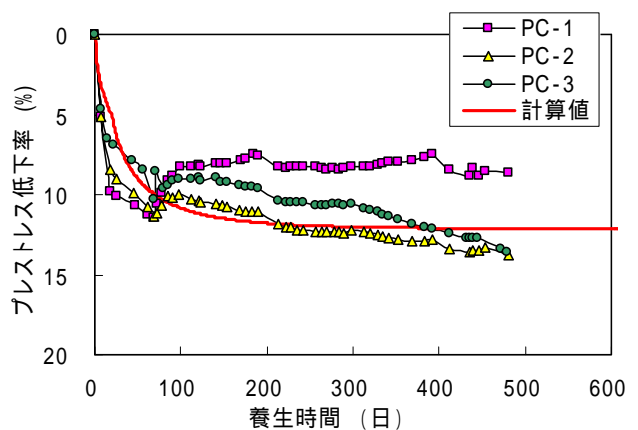


図 - 7 プレストレスの経時変化

3.4 鉄筋ひずみの変化

促進養生約 450 日における平均ひずみを図 - 8 に示す。平均ひずみとは、鉄筋のかぶり側と内側のひずみを平均したものである。測定位置

t1 および t4 は、帯鉄筋直線部の中央に位置し、t2 および t3 は、曲げ加工が終わった位置である。試験体間のひずみを比較すると、帯鉄筋量を 2 倍とした PC-3 試験体の鉄筋ひずみは、他の試験体より小さいが、鉄筋量に反比例した傾向は認められない。すなわち、膨張力は一定ではなく、鉄筋量が増加すると膨張力も増加することを示している。一方、RC 試験体と PC 試験体で差が認められず、プレストレス量を変えた PC-1 と PC-2 とを比較しても明確な差は認められない。コンクリート表面には、ひび割れが生じており、測定位置とひび割れ位置とを比較したが、ひび割れの有無による差は認められず、現状ではひび割れの影響は小さいと考えられる。帯鉄筋位置で比較すると t1 で若干大きいが、他の位置では顕著な差は認められない。次に、帯鉄筋の外側と内側のひずみ差を図 - 9 に示す。ひずみ差とは、鉄筋のかぶり側のひずみから内側のひずみを差し引いた値である。t2 および t3 の位置では内側のひずみ増加が大きく、負の値を示している。これは、曲げ加工部を支点として鉄筋を押し広げる方向に変形していることを示してい

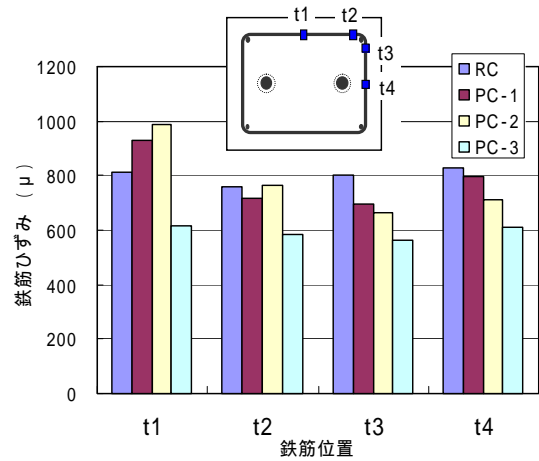


図 - 8 帯鉄筋平均ひずみ

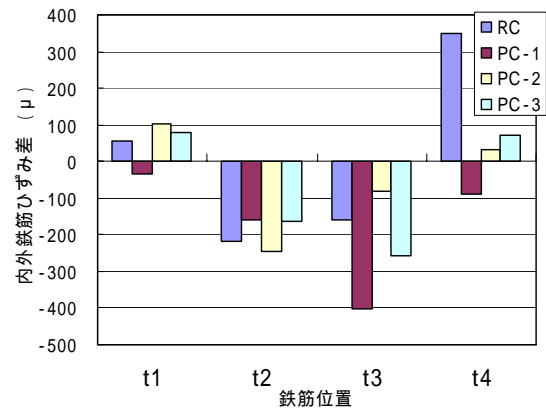


図 - 9 帯鉄筋ひずみ差

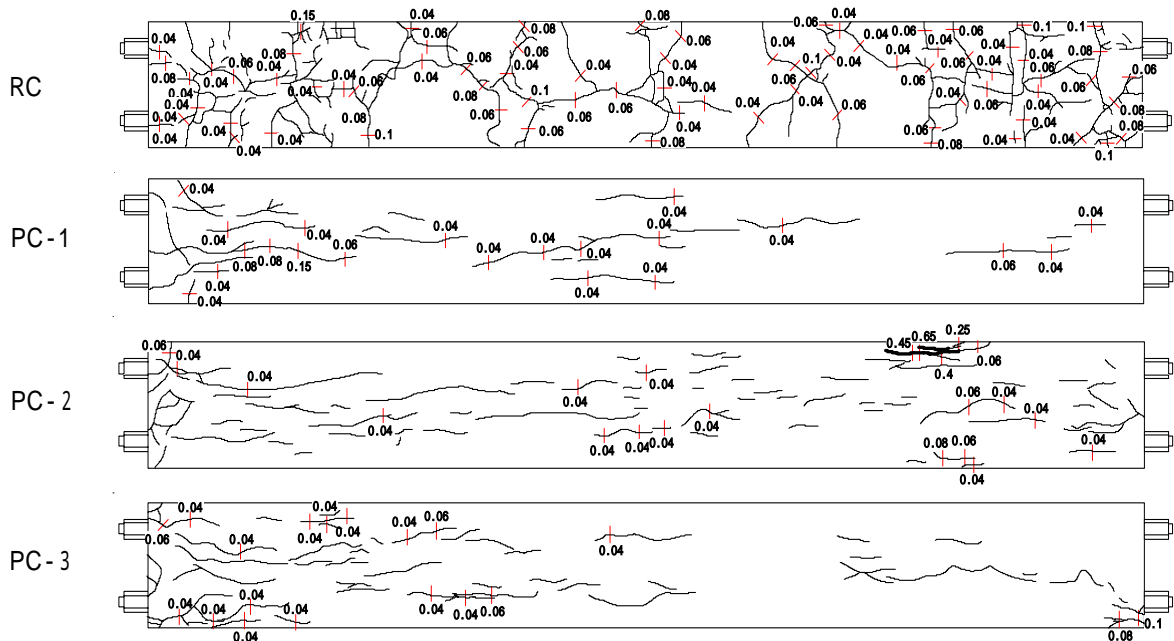


図 - 10 ひび割れ図

る。帯鉄筋のひずみを比較した限りでは、プレストレスで軸方向の膨張を拘束したことで軸直角方向の膨張量が増加する傾向は認められない。

3.5 ひび割れ発生状況

養生約 450 日のひび割れ状況（試験体上面）を図 - 10 に示す。RC 試験体には、方向性のないひび割れが発生し、PC 試験体には、軸方向にひび割れが発生した。ひび割れ幅は、いずれの試験体も 95%以上が 0.1mm 未満である。各試験体のひび割れ密度^{7,8)}を表 - 3 に示す。ひび割れ密度は、試験体上面と側面に生じたひび割れの総延長を測定し、(1)式で算出した。

$$M = \frac{L_{cr}}{A_c} \quad (1)$$

ここに、M：ひび割れ密度(m/m²)、L_{cr}：総ひび割れ延長(m)、A_c：試験体表面積(m²)

PC 試験体では、プレストレス量により、ひび割れ密度に差は認められないが、RC 試験体では大きく増加しており、プレストレスの効果によるものと考えられる。

4. まとめ

反応性骨材としてチャートを用いた梁の促進養生実験より、以下の結果が得られた。

- (1) 円柱供試体の静弾性係数および割裂引張強度の低下は、圧縮強度の低下より早期に生じ、静弾性係数と圧縮強度の比が大幅に低下する。
- (2) プレストレスの変化は、コンクリートのクリープ変形相当の低下にとどまり、ASR が生じたことによる著しい低下は認められない。
- (3) 帯鉄筋ひずみは、鉄筋量の影響を受けるが、プレストレスによる軸方向の拘束が軸直角方向の膨張に与える影響は認められない。
- (4) ひび割れ密度は、RC 試験体に比べて PC 試験体は小さく、プレストレスによってひび割れ密度は低減される。

表 - 3 ひび割れ密度

	総延長 (m)	ひび割れ密度 (m/m ²)	比 (%)	ひび割れ幅 0.1mm未満 の割合 (%)
RC	47.64	13.61	100	98.2
PC-1	11.29	3.23	24	96.1
PC-2	20.97	5.99	44	97.3
PC-3	14.31	4.09	30	98.8

本実験は、名古屋高速道路の維持管理に関する調査研究委員会（委員長：田辺忠顕名誉教授）において実施したものである。今後、試験体の軸方向および軸直角方向からコアを採取し、圧縮強度および静弾性係数の違い等について調査する。

参考文献

- 1) 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，pp293-294，1998
- 2) アルカリ骨材反応調査研究委員会報告書，（社）日本コンクリート工学協会アルカリ骨材反応調査研究委員会，pp.122-125，1988.7
- 3) 宇治公隆，北沢宏和，國府勝郎，山田恒太：アルカリ骨材を生じた PC 桁の炭素繊維シートによる膨張抑制効果，土木学会第 56 回年次学術講演会，pp.608-609，2001.10
- 4) 山本智志，松本省吾，小柳治：アルカリ種別とコンクリートの物性について，土木学会第 45 回年次学術講演会 V，pp514-515，1990
- 5) コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，土木学会，2002
- 6) 小林一輔，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 / -18，pp151-154，1993.2
- 7) アルカリ骨材反応に関する調査研究，阪神高速道路公団，阪神高速道路管理技術センター，p266，1986.9
- 8) 杉江功，児島孝之，杉山功，村山康雄：アルカリ骨材反応による RC 床版の損傷，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，1994