

報告 ASR を生じたコンクリート構造物の鉄筋ひずみとコアの残存膨張

野島 昭二*1・竈本 武弘*2・宮原 茂禎*3・丸屋 剛*4

要旨: アルカリシリカ反応 (ASR) を生じたコンクリート構造物において, ASR の進行により生じた鉄筋ひずみが耐荷性能や耐震性能を低下させる可能性は低いことが確認されている。本報告では全国的高速道路の橋梁を対象に, 実構造物で生じている鉄筋ひずみの実態を調査するとともに, 劣化予測への適用を目的としてコンクリートコアの残存膨張率を調査した。その結果, 鉄筋には 1500μ を超えるひずみが発生している場合があること, 残存膨張試験としてカナダ法は ASR による膨張速度の評価に適していることなどを示した。

キーワード: コンクリート構造物, アルカリシリカ反応 (ASR), 鉄筋ひずみ, 残存膨張, 促進試験

1. はじめに

近年, アルカリシリカ反応 (以下, ASR という) の生じたコンクリート構造物において鉄筋の曲げ加工部や圧接部が破断した事例が報告され¹⁾, これをきっかけとして土木学会ではアルカリ骨材反応対策小委員会を設立し, 鉄筋破断の原因や ASR で劣化した構造物の耐荷性能などについて緊急にとりまとめを行った²⁾。

耐荷性能に関しては, ASR を生じた橋脚の耐荷性能は大きく低下しないとの結論が得られている³⁾。また, 鉄筋のひずみが 950μ になるまで ASR を進行させた梁部材を用いて行われた正負交番載荷実験において, 曲げ耐荷性能の低下は認められず, 耐震性能も保持していることが確認されている⁴⁾。同様に, ASR による鉄筋ひずみを 850μ まで進行させた橋脚試験体における交番載荷実験においても耐震性は低下しないことが確認されている⁵⁾。このように, 鉄筋破断が生じない限り, ASR による劣化により鉄筋コンクリート構造物の耐荷性能や耐震性能が大きく低下することは考えにくい。しかし, 鉄筋の降伏余裕度と関連する実構造物中での劣化程度に応じた鉄筋ひずみに関しては十分な知見が得られているとはいえず, 更なるデータの蓄積が必要である。

一方, 維持管理に関しては, ASR は構造物の変状を確認しながらの事後維持管理でも対応が可能であると考えるのが一般的であり⁶⁾, ASR が顕在化した構造物は第三者被害の防止, ASR の進行抑制, 美観・景観などを総合的に勘案して, ある段階で補修や補強を行うことになる。効率的な維持管理を行うためには, 補修が必要となる劣化の程度を定量的な指標を用いて明確にすることが必要であり, そのためには, 簡便な手法による劣化状況の適切な把握と ASR による変状の進行を予測できる手法の構築が不可欠となる。

本報告では, 全国的高速道路の橋梁を対象として, ASR を生じたコンクリート構造物中の鉄筋ひずみを切断法⁷⁾により測定し, 実構造物で生じている鉄筋ひずみの実態を調査した。また, コンクリートコアの残存膨張を利用した ASR の劣化予測手法を構築するための第一歩として, 実構造物のコアを用いて促進試験により残存膨張率を測定し, その適用性を検討した。

2. 調査方法

2.1 調査対象

調査対象とした橋梁を表-1 に示す。全国的高速道路から ASR による変状が確認されている A~J の 10 橋梁を選定し (K 橋は ASR でないため除外), 5 基の橋脚と 7 基の橋台において調査を実施した。調査箇所はいずれも冬季の安全な交通確保のために凍結防止剤 (塩化ナトリウム) を散布している路線である。現状では錆汁は見られないがひび割れの幅および密度が大きくなっており, 外観上の劣化グレードは進展期後半から加速期⁶⁾に相当する構造物であった。K 橋は現状では ASR による変状は顕在化しておらず, 温度応力と乾燥収縮に起因すると考えられる鉛直方向のひび割れのみが確認された橋台である。ASR の特徴を把握するための比較用として調査を行った。

2.2 調査方法

(1) 調査箇所の選定と調査項目

ASR により変状した橋台の一例として J 橋におけるひび割れ発生状況を図-1 に示す。橋台端部や上部からの漏水がある部位でひび割れが多数発生しており, 同一の橋台の中でひび割れの少ない部分もある。そこで, 目視観察によるひび割れ幅や外観の状況から特に変状が著しい地点を劣化部, ひび割れが観察されない, もしくは

*1 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 主任研究員 (正会員)

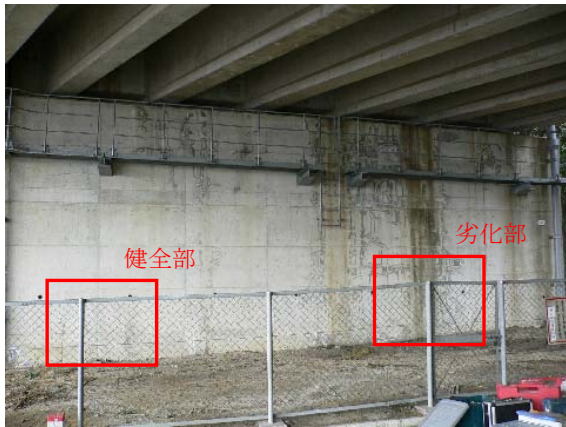
*2 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 橋梁研究室 研究員 (正会員)

*3 大成建設 (株) 土木技術研究所 土木構工法研究室 工修 (正会員)

*4 大成建設 (株) 土木技術研究所 土木構工法研究室 工博 (正会員)

表-1 調査箇所概要

橋梁名	調査箇所		所在地	供用期間 (年)	備考
A 橋	P2 橋脚 (上り線)	柱面	佐賀県	17	漏水あり
	P3 橋脚 (上り線)	柱面			
B 橋	P1 橋脚 (上り線)	柱面	広島県	14	漏水跡あり
C 橋	A2 橋台 (下り線)	壁面	富山県	24	漏水あり
D 高架橋	P3 橋脚 (上り線)	柱面	富山県	24	漏水跡あり
	P3 橋脚 (下り線)	柱面			漏水跡あり
E 橋	A2 橋台 (下り線)	壁面	鹿児島県	31	漏水跡あり
F 橋	A2 橋台 (上り線)	壁面	長野県	23	漏水あり
G 橋	A2 橋台 (下り線)	壁面	北海道	34	表面被覆による補修
H 高架橋	A1 橋台 (下り線)	壁面	富山県	32	漏水あり
I 橋	A1 橋台 (下り線)	壁面	富山県	32	漏水あり
J 橋	A1 橋台 (上り線)	壁面	広島県	15	漏水あり
K 橋	A2 橋台 (下り線)	壁面	広島県	26	温度ひび割れのみが確認される



a. 橋台の全景



b. 劣化部

(ひび割れをトレースして表示)

図-1 J 橋 A1 橋台 (上り線) の変状状況

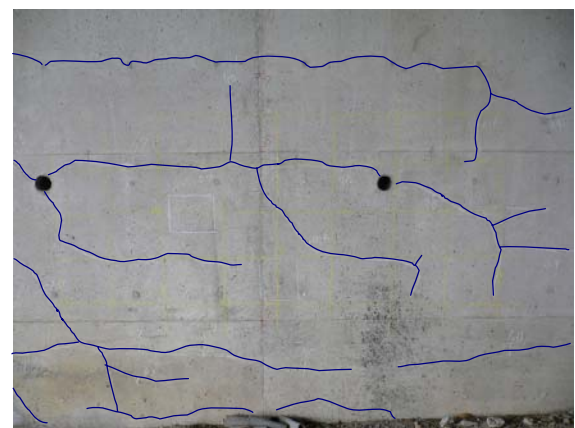
比較的少量である地点を健全部として調査箇所を選定した。G 橋を除く A~J 橋に関しては同様に健全部と劣化部を選定した。G 橋には表面被覆が施されていたが、被覆材を通して確認できる範囲のひび割れから判断して健全部と劣化部を選定した。また、K 橋は温度ひび割れの発生している箇所を劣化部とした。

選定した健全部および劣化部において、以下に示す鉄筋切断法による鉄筋ひずみの測定および、採取コアの促進試験による残存膨張率を測定した。

(2) 鉄筋ひずみの測定方法

実構造物における ASR によるコンクリートの膨張が鉄筋ひずみに与える影響を検討するために、切断による応力解放時のひずみを測定する鉄筋切断法⁷⁾による調査を行った。劣化部と健全部それぞれについて、主鉄筋と配力鉄筋のひずみを計測した。

鉄筋切断法の概要を図-2 に、現地での計測状況を図-3 に示す。1 本の鉄筋に対して、切断箇所を挟んで両側に各 3 枚、合計 6 枚のひずみゲージを貼り付けたうえで、グラインダーで鉄筋を切断した。切断前後のひずみ



c. 健全部

(ひび割れをトレースして表示)

の変化から鉄筋に発生していたひずみを測定した。切断時に鉄筋の温度が上昇するため、ひずみゲージとあわせて熱電対を設置し、温度補正を行った。なお、切断後の鉄筋は図-4 に示す専用の鉄筋接続治具を用いて修復を行った。

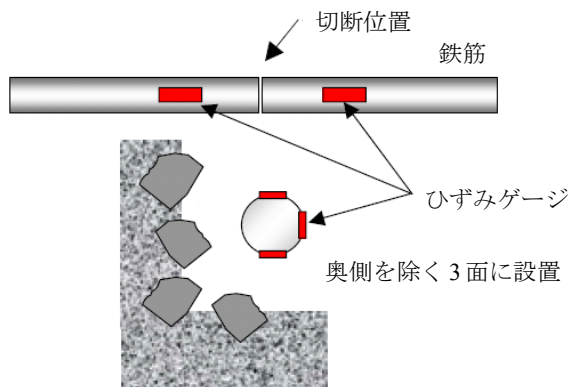


図-2 鉄筋ひずみの測定方法



図-4 鉄筋接統治具による修復状況



a. ひずみゲージの設置状況

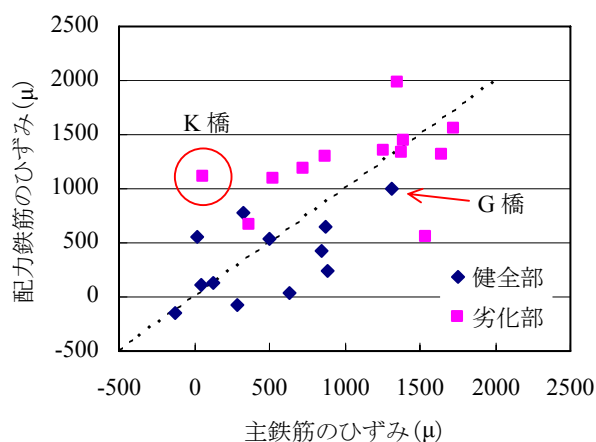


図-5 鉄筋ひずみの計測結果



b. 鉄筋の切断

図-3 鉄筋切断法による鉄筋ひずみ測定

(3) コアの残存膨張試験

健全部および劣化部の鉄筋ひずみ測定箇所の近傍からコンクリート用コアカッターを用いてコア試料を採取し、室内で促進膨張試験による残存膨張率を測定することとした。コアの直径は 50mm とし、採取後に長さ 150mm に切りそろえたうえで、標点を設置して基長を測定した。乾燥しないように梱包して室内に運搬し、20℃、相対湿度 95%以上の環境で 14 日間養生した。14 日間養生後の長さ変化を解放膨張とした。解放膨張測定を終了

後、溶液温度 80℃、1mol/l の水酸化ナトリウム溶液に浸漬する促進試験（以下、カナダ法という）、および、JIS A 1804 に示される 150kPa、127℃の環境下での促進試験（以下、JIS 迅速法という）を実施した。これらの促進試験による膨張率を残存膨張率とした。カナダ法、JIS 迅速法ともに試験には 1 箇所当り 3 本のコアを用いた。カナダ法は短期間で大きな膨張量を示すため促進試験として有効である⁸⁾。本来は浸漬 14 日の長さ変化で評価する試験であるが、本調査では反応の終了を確認するために 8 週まで延長して測定した。JIS 迅速法は 1 回の加圧・昇温による促進後の長さ変化を測定する方法であるが、本調査では膨張挙動を観察しながら最大 14 サイクルまで繰り返し、膨張率の推移を測定した。

3. 調査結果

3.1 鉄筋ひずみの測定結果

図-5 に鉄筋ひずみの計測結果を示す。図では切断後に鉄筋が縮んだ場合を符号の正に取っている。すなわち、切断前に鉄筋に生じていた引張による伸びのひずみを正として示している。劣化部では健全部よりも大きな鉄筋ひずみが生じていた。主鉄筋のひずみは大きいものは

健全部で 1000 μ 、劣化部では 1700 μ に達していた。配力鉄筋のひずみは劣化部で 2000 μ に達していたものもある。また、主鉄筋のひずみ量が大きい場合には配力鉄筋のひずみも大きくなる傾向を示した。図中丸で囲んだものは温度応力と乾燥収縮によるひび割れ（ひび割れ幅 6mm）が発生した K 橋における劣化部の測定値である。主鉄筋のひずみは小さく、ひび割れと直行する配力鉄筋のみのひずみが大きくなっていった。これと比較すると、ASR による鉄筋ひずみは主鉄筋と配力鉄筋の両者に生じている傾向が現れている。図中矢印で示した G 橋は表面被覆が施されていた橋台であり、健全部として選定した地点でも大きな鉄筋ひずみを示していた。

3.2 促進膨張試験の結果

(1) カナダ法による残存膨張試験結果

カナダ法による促進期間 8 週での残存膨張率を図-6 に、JIS 迅速法による残存膨張率を図-7 に示す。ここで、JIS 迅速法の促進回数は C 橋および D 橋が 3 回、F 橋が 5 回、その他は 14 回とした。

カナダ法は JIS 迅速法と比較して大きな残存膨張率を示すものが多く、大きなもので 0.6%以上となった。カナダ法および JIS 迅速法の両者ともに、調査箇所のもと

んどで健全部の残存膨張率が劣化部よりも大きくなった。これは、劣化部が供用期間中にすでに膨張を生じていたためと考えることができる。

K 橋は上述のとおり現状では ASR による変状を生じていなかった。どちらの試験方法を用いても残存膨張率は小さい値を示しており、将来的にも ASR 発生の可能性は低いと推定できる。

図-8 にカナダ法による残存膨張率が大きな値を示した C 橋および H 高架橋の膨張率の経時変化を示す。C 橋の健全部は促進試験の開始早期に膨張率が増加して 21 日から減速して収束していくのに対し、H 高架橋の健全部の膨張率は緩やかに増加し続ける傾向を示した。骨材の種類などに起因して、コンクリートごとに膨張速度が異なっていることがわかる。劣化部は健全部よりも緩やかに膨張率が増加して 56 日での膨張率も小さくなるが、C 橋の膨張速度が大きく H 高架橋の膨張率が緩やかに増加しつづける傾向は健全部と同様である。ASR を生じた状態のコアについてもカナダ法による膨張曲線から、以降の膨張速度をおおよそ評価することができる。

カナダ法による残存膨張率が小さくなった B 橋および J 橋の測定値の経時変化を図-9 に示す。C 橋や H 高架

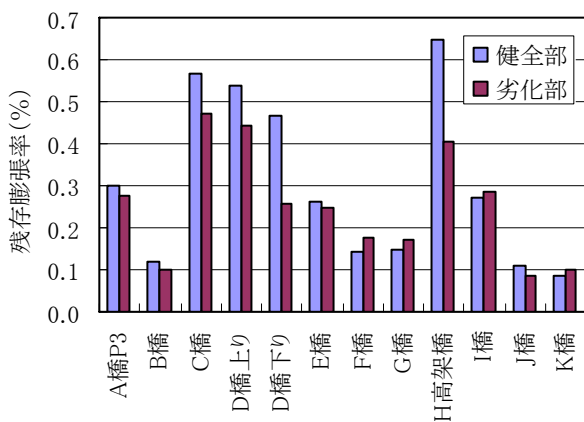


図-6 カナダ法による残存膨張率

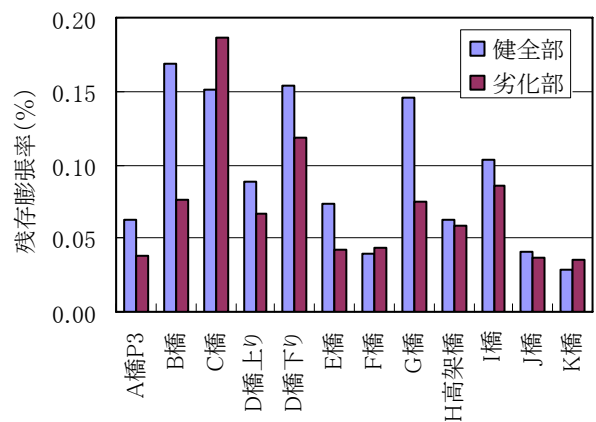


図-7 JIS 迅速法による残存膨張率

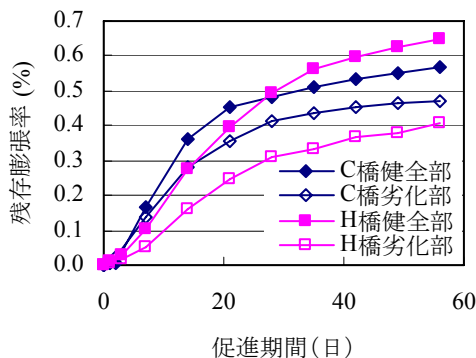


図-8 カナダ法による残存膨張率の経時変化 (C 橋, H 高架橋)

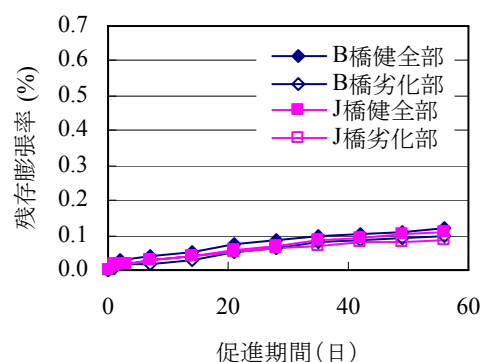


図-9 カナダ法による残存膨張率の経時変化 (B 橋下り線, J 橋)

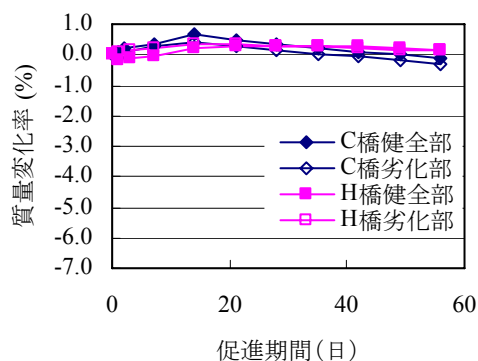


図-10 カナダ法による質量変化率の経時変化 (C橋, H高架橋)

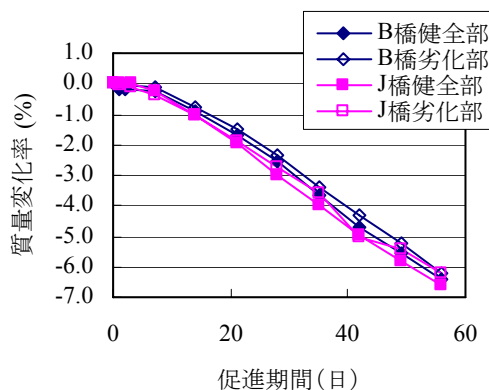


図-11 カナダ法による質量変化率の経時変化 (B橋, J高架橋)

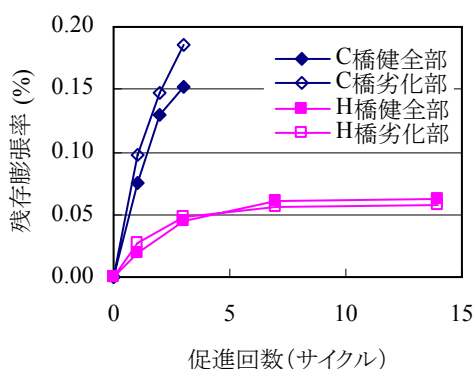


図-12 JIS 迅速法による残存膨張率の経時変化 (C橋, H高架橋)

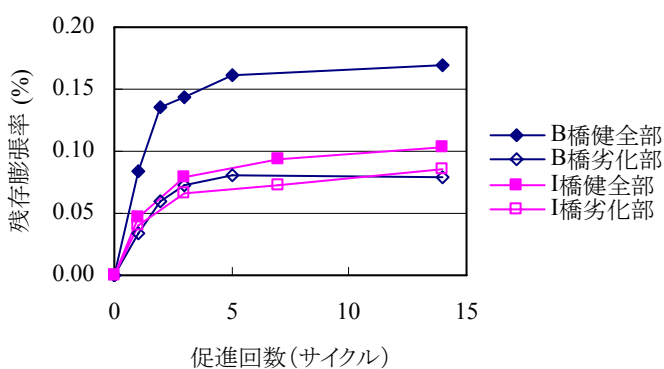


図-13 JIS 迅速法による残存膨張率の経時変化 (B橋, I高架橋)

橋で確認された膨張挙動の違いは認められない。図-10 および図-11 にカナダ法試験時の質量変化率を示す。これは長さ変化測定の際に質量もあわせて測定しておき、促進開始前の質量に対する質量変化率として計算したものである。大きな残存膨張を示したC橋, H高架橋では図-10 のように試験期間中の質量変化が小さいのに対し、B橋およびJ橋は時間の経過とともに大きな質量減少を示した(図-11)。すなわち、B橋およびJ橋の残存膨張率が小さくなったのは、カナダ法で用いる強アルカリに骨材が溶解したことを示す。質量の測定はカナダ法による残存膨張の測定において、膨張反応が終了しているためか、骨材の溶解のためなのかを判断するのに有効である。

(2) JIS 迅速法による残存膨張試験結果

カナダ法による残存膨張率が大きくなったC橋およびH橋のJIS迅速法による膨張率の経時変化を図-12に示す。C橋はJIS迅速法においても残存膨張率が大きくなったが、H橋では小さくなった。コンクリートにより膨張に適した促進条件が異なるため、両試験の結果が必ずしも一致するわけではなかった。C橋の膨張速度が大きく、H橋がそれよりもゆっくりと膨張する傾向はカナダ法と同様であるが、H橋の反応は3サイクル目以降収束

し、膨張が長期間継続する傾向は見られなかった。図-13にJIS迅速法による膨張率が大きくなったB橋およびI橋の膨張試験の結果を示す。JIS迅速法による膨張率は大きなものでも0.2%程度であった。図-12も含めていずれのケースにおいても、膨張は最初の5サイクル以内でほぼ収束し、それ以降の膨張率の増加はほとんど見られなかった。カナダ法とは異なり外部からアルカリを供給する方法ではないため、回数を重ねても膨張が継続しないものと考えられる。膨張反応が収束するまでの促進回数が少ないため、カナダ法と比較すると膨張速度を評価するには適さない。ただし、カナダ法では骨材が溶解して残存膨張を評価できない場合があるのに対し、JIS迅速法は適用範囲が広いのが利点であると考えられる。

4. まとめ

全国の高速度道路からASRによる変状を生じた10橋梁を選定し、5基の橋脚と7基の橋台において鉄筋切断法による鉄筋ひずみ、およびカナダ法とJIS迅速法の促進条件を用いた残存膨張率の測定を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) ASRによる鉄筋ひずみは健全全部で0~1000 μ 、劣化部では500~1700 μ の範囲にあり、大きなひずみが生

じていることが明らかになった。

- (2) カナダ法による促進試験は大きな膨張率が得られるとともに、膨張速度がコンクリートによって異なる傾向がみられ、実構造物のコアの促進試験として有効である。ただし、カナダ法ではアルカリにより骨材が溶解して残存膨張率が正確に測定できない場合がある。それを判断する方法として、質量測定を同時に行うことが有効である。
- (3) JIS 迅速法は少ない促進回数で残存膨張が収束するため、カナダ法と比較すると膨張速度の評価が難しい。ただし、骨材の溶解などは生じないため多くの構造物に適用できる。

今後、同一構造物で得られる鉄筋ひずみと残存膨張率を用いて ASR 劣化に関する健全度の評価と将来の劣化予測が行えるよう、データの解析手法を検討するとともに、データの蓄積を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 鳥居和之, 池富 修, 久保善司, 川村満紀, ASR 膨張によるコンクリート構造物の鉄筋破断の検証: コンクリート工学論文集, Vol. 23, No. 2, pp.595-600, 2001
- 2) 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, 2005.8
- 3) 小柳 洽, 六郷恵哲, 内田裕市, 長瀬道雄: 著しい ASR 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, Vol. 15, No. 1, pp.947-952, 1993
- 4) 長田光司, 小野聖久, 丸屋 剛, 池田尚治: アルカリ骨材反応で変状を起こしたコンクリート部材の耐震性能 —現地調査と載荷実験による評価—, コンクリート工学 テクニカルレポート, Vol. 44, No. 3, pp.34-42, 2006.3
- 5) 小野聖久, 広瀬 剛, 本間淳史, 三桶達夫: ASR で劣化した橋脚の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp.991-996, 2007
- 6) 土木学会: 2007 年度制定コンクリート標準示方書【維持管理編】, 2008
- 7) 横山和昭, 長田光司, 室井智文, 加藤卓也: 鉄筋切断法による実 PC 橋の残存プレストレス測定に関する検討, プレストレスコンクリート技術協会 第13回シンポジウム論文集, pp.501-504, 2004
- 8) 大脇 英司, 宮原 茂禎, 上東 泰, 野島 昭二: 促進膨張試験によるコンクリートコアのアルカリ骨材反応性の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第5部, Vol. 58, pp.137-138, 2003