

# 論文 アルカリ骨材反応による膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響

久保 善司<sup>\*1</sup> 上田 隆雄<sup>\*2</sup> 黒田 保<sup>\*3</sup> 野村 倫一<sup>\*4</sup>

**要旨：**近年、アルカリ骨材反応 (ASR) を生じ、その膨張により著しく劣化した構造物が報告され、それらの構造物に対する補修・補強対策の確立が急務とされている。一方、これらの構造物に対する補強設計を実施するための、ASR 劣化コンクリートの基礎的な力学データの不足が問題視されている。そこで、ASR により生じた膨張量のレベルが異なる供試体の一軸圧縮試験を行い、詳細な検討を行った。その結果、コンクリートの強度レベルにかかわらず、膨張量 3000  $\mu$  程度においては、圧縮強度に大きな低下はないものの、変形特性に大きな影響を与えることが明らかとなった。

**キーワード：**アルカリ骨材反応、膨張量、水セメント比、強度特性、変形特性

## 1. はじめに

近年、過大なアルカリ骨材反応 (ASR) による膨張を生じて著しく劣化した構造物が報告されている。アルカリ骨材反応により劣化した構造物の耐荷性能については、内部に配置された鉄筋によって適切に拘束されている場合には、健全なものに比べて顕著な低下はないものとされてきたため、その対策として補修が行われる場合がほとんどであった。しかし、過大な膨張を生じて鉄筋破断を生じた構造物も報告されるようになり、補強対策の実施がされた構造物も報告されている<sup>1),2)</sup>。そのため、これらの構造物の耐荷性能評価の問題も含めて、ASR 劣化構造物に対する適切な維持管理対策の確立が急務とされている<sup>1),2)</sup>。

一方、アルカリ骨材反応による膨張によって、コンクリート強度が低下することがこれまでの実験結果<sup>3),4)</sup>や構造物から採取したコンクリートコアの圧縮試験<sup>1),2)</sup>より示されているものの、アルカリ骨材反応の補強設計に必要となる ASR 劣化コンクリートの力学的性能に関する数値

データがほとんどないのが現状である。ASR 膨張による劣化 (膨張量) とその力学的性能に関する検討については、海外では、膨張量と圧縮強度との関係についての実験結果に基づき、その下限値をカバーする形でその関係式が提案されている例がある<sup>5),6)</sup>。我が国においては、アルカリ量および配合が異なる安山岩およびチャートを用いて、膨張量が圧縮強度に与える影響の検討<sup>3)</sup>や、チャートのみを用いた検討<sup>4)</sup>などが報告されているものの、これらに関する検討はほんのわずかに過ぎない。そこで、ASR 膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響について、圧縮強度、弾性係数の他、荷重作用下の変形特性についても検討することとした。

## 2. 実験概要

実験は、膨張量による影響を詳細に検討するシリーズ 1 とコンクリート強度 (W/C) の影響を検討するシリーズ 2 に分けて実施した。

### 2.1 使用材料および配合

セメントには普通ポルトランドセメント (密

\*1 金沢大学 工学部土木建設工学科助手 工博 (正会員)

\*2 徳島大学 工学部建設工学科助教授 工博 (正会員)

\*3 鳥取大学 工学部土木工学科助手 工博 (正会員)

\*4 西日本旅客鉄道 (株) 鉄道本部施設部土木課 (正会員)

度：3.16g/cm<sup>3</sup>）を用いた。細骨材として非反応性骨材

表-1 示方配合（シリーズ1）

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
	W	C	S	Gr	G	AE 減水剤	AE 助剤
60	180	300	781	579	386	0.6	0.02

Gr：反応性粗骨材，G：非反応性骨材

表-2 示方配合（シリーズ2）

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	W	C	S	G
60	180	300	763	935
45	180	400	803	979

を用い、シリーズ1では徳島県産骨材（密度2.61g/cm<sup>3</sup>）を、シリーズ2では鳥取県産骨材（密度2.64g/cm<sup>3</sup>）をそれぞれ用いた。粗骨材には、反応性骨材として佐賀県産骨材（密度2.60g/cm<sup>2</sup>，Gmax：15mm）を用い、シリーズ1では非反応性粗骨材（徳島県産：密度2.60g/cm<sup>2</sup>，Gmax：15mm）も併用した。添加アルカリとしてNaClを用い、短期間に大きな膨張が得られるよう等価アルカリ量を8kg/m<sup>3</sup>とした。コンクリートの配合を表-1および表-2に示す。

## 2.2 実験要因

### (1) 劣化水準

膨張に伴う力学的性能の変化を詳細に検討するため、膨張量を0, 500, 1000, 2000, 3000, 5000 μ以上の6水準を用意した。一方、シリーズ2については強度レベルの違いを主に検討するため、0, 2000, 5000 μ以上の3水準とした。なお、本論文では、実験期間中の最大膨張量である3000 μ程度までを検討の対象とした。

### (2) コンクリート強度

ASR膨張がコンクリートの力学的性能に与える影響が強度レベルにより異なる可能性が考えられるため、RC構造物を想定した水セメント比60%と、PC構造物を想定した水セメント比45%の2種類の強度水準を用意した。

### (3) 環境条件

短期間に大きな膨張段階までの検討を可能とするため、シリーズ1では40℃、飽和NaCl溶液に浸漬し、ASR膨張を促進した。シリーズ2では、高温多湿条件として、40℃、100%R.H.の促進環境を用意した。

## 2.3 供試体

供試体は円柱供試体（寸法：Φ10×20cm）とし、打設1日後脱型し、2週間の密封養生を

行った。密封方法は、湿布で供試体を包み、ラップを巻き付けた上に、ガムテープを巻き付けて固定した。養生終了後、養生直後に荷重試験を実施するものを除き、各促進環境下に暴露した。暴露後の膨張量は、供試体側面にコンタクトチップを貼り付け、基長10cmとしコンタクトゲージを用いて測定した。所定の膨張量となった時点で、促進暴露を終了し、静的一方向圧縮荷重試験を実施した。

## 2.4 荷重試験

高剛性圧縮試験機を用いて、静的一方向圧縮荷重を行い、荷重時の荷重、変位およびひずみを測定し、圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および最大荷重時のひずみを求めた。荷重はロードセル（容量500kN）を用いて測定した。変位は高感度変位計（容量5mm, 10mm）を用い、圧盤間変位を2点測定した。圧縮方向（供試体長手方向）および横方向（供試体長手方向に対して直角方向）のひずみは、検長60mmのひずみゲージを貼付けて測定した。

## 3. 結果および考察

### 3.1 ASR膨張の影響 シリーズ1

#### (1) 圧縮強度

ASR膨張がコンクリートの圧縮強度に与える影響を図-1に示す。膨張量が大きいものほど若干圧縮強度は小さくなったものの、顕著な低下は認められなかった。ASR膨張によりコンクリートに生じたひび割れの大きさおよび方向は一樣でなく、巨視的なひび割れも見られるものの、今回の範囲においては、生じたひび割れが強度に影響を与えるほどの連結性（膨張に伴い生じた複数のひび割れが連結した状態）を示すものでなかったものと考えられる。今回の促進期間中での最大膨張量である3000 μ程度の範

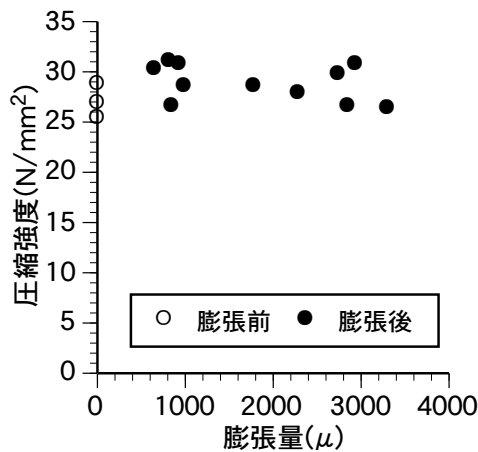


図-1 膨張が圧縮強度に与える影響

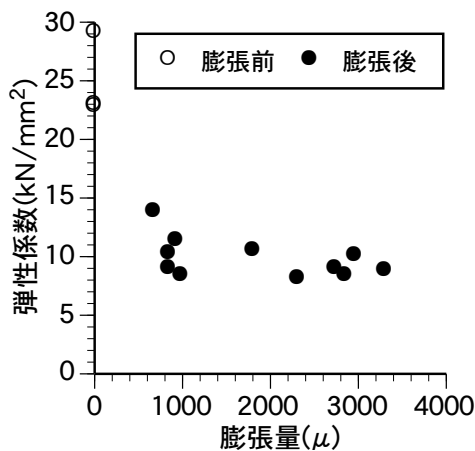


図-2 膨張が弾性係数に与える影響

図において、ASR 膨張が圧縮強度に与える影響は顕著でなかったものと考えられる。ただし、強度低下が小さくなった原因として、養生期間が2週間と比較的短かったため、促進暴露後の水和反応に伴う強度の増加の影響も若干はあるものと考えられる。

一方、海外における既往の研究においては、膨張量 5000  $\mu$  程度で約 60% 程度まで強度が低下するとの報告もある<sup>5),6)</sup>。我が国における既往の研究においても、膨張とともに緩やかな低下を示していた<sup>3)</sup>。今後より大きな膨張段階における検討が必要である。

## (2) 静弾性係数

応力-ひずみ曲線の弾性範囲と見なしうる部分の傾きを静弾性係数として求めた。ASR 膨張がコンクリートの静弾性係数に与える影響を図-2に示す。膨張量 1000  $\mu$  程度で約 60% 程度まで低下し、それ以降は緩やかに低下する傾

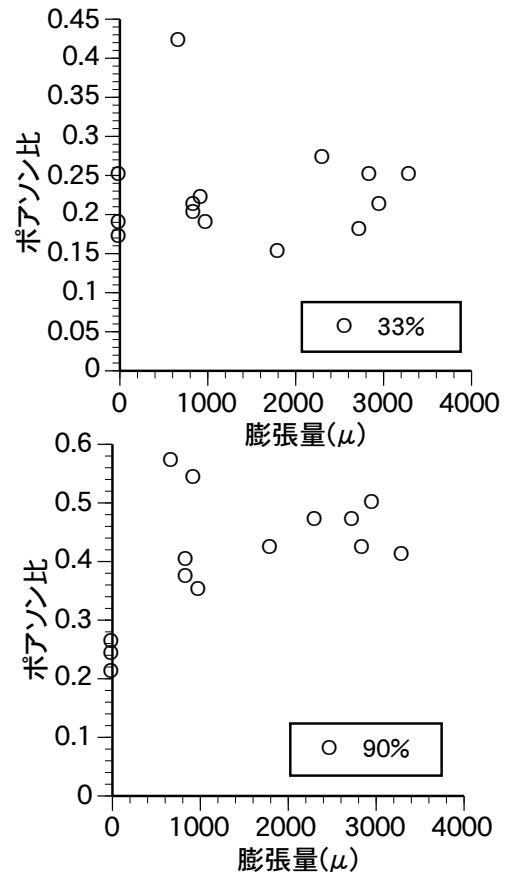


図-3 膨張がポアソン比に与える影響

向を示した。既往の研究においても、圧縮強度より弾性係数の低下が顕著であることが報告されている<sup>3),4)</sup>。また、海外における既往の研究においても、膨張初期において弾性係数が顕著に低下し、それ以降緩やかに低下の傾向を示すことが報告されており<sup>5),6)</sup>、実験結果は既往の研究との整合性が認められる。ASR 膨張が弾性係数に大きな影響を与えた理由として、ASR 膨張によりひび割れが生じると、ひび割れの大小にかかわらず、そこには空隙が生じたのと同様の状態が形成されるため、荷重に対する変形抵抗性は小さくなるために、膨張初期ほど弾性係数の低下が顕著となったものと考えられる。

## (3) ポアソン比

ASR 膨張がポアソン比に与える影響を図-3に示す。載荷時の荷重-変位曲線および弾性係数の結果から ASR 膨張を生じたコンクリートの変形特性は、膨張が生じたものと大きくことなることが予想されたため、コンクリートの変形性能を表す指標としてポアソン比を求める

こととした。通常、弾性域で求められるが、最大荷重付近の変形性能を把握するため、弾性域である最大応力の 33% 時と、最大応力に近い 90% 時においてポアソン比を求めた。

最大応力の 33% 時のポアソン比については、膨張量が多いものほど、ポアソン比がわずかに大きくなる傾向がある。これに対して、最大応力に近い 90% 時においては、膨張量が多いものほどポアソン比が大きくなった。この理由として、応力レベルの低い段階においては、圧縮载荷方向の変形が卓越するものの、横方向にはそれ以上の大きな変形を示さなかったのに対して、高い応力レベルにおいては、内部に存在した大小のひび割れの進展が開始し、これらが連結し、横方向の変形抵抗性を小さくしたものと考えられる。ただし、33% 時において、膨張したもののポアソン比が膨張を生じていないものと同程度としても、膨張に伴い弾性係数が小さくなっているため、応力レベルが小さい段階においても横方向の変形自体は膨張前よりも大きくなるものと考えられる。

#### (4) 最大応力時のひずみ

ASR 膨張が最大応力時の圧縮ひずみおよび横方向ひずみに与える影響を図-4 に示す。静弾性係数およびポアソン比の結果から、ASR 膨張によってコンクリートの変形抵抗性が大きく低下することが確認された。一方、コンクリートの応力-ひずみ関係の把握は、補強設計において不可欠な要素である。ここでは、ASR 劣化コンクリートの応力-ひずみ関係のモデル化に必要な情報を整理することを念頭におき、最大荷重時のひずみについて検討することとした。

ばらつきはあるものの、ASR 膨張が大きいものほど、圧縮ひずみおよび横方向ひずみは大きくなった。変形抵抗性のみならず、変形量自体も大きくなった。ASR 膨張によって生じたひび割れによって変形そのものが生じやすくなったものと考えられ、膨張が大きいものほどその傾向が顕著となったものと考えられる。

既往の研究において、膨張を生じたものの方

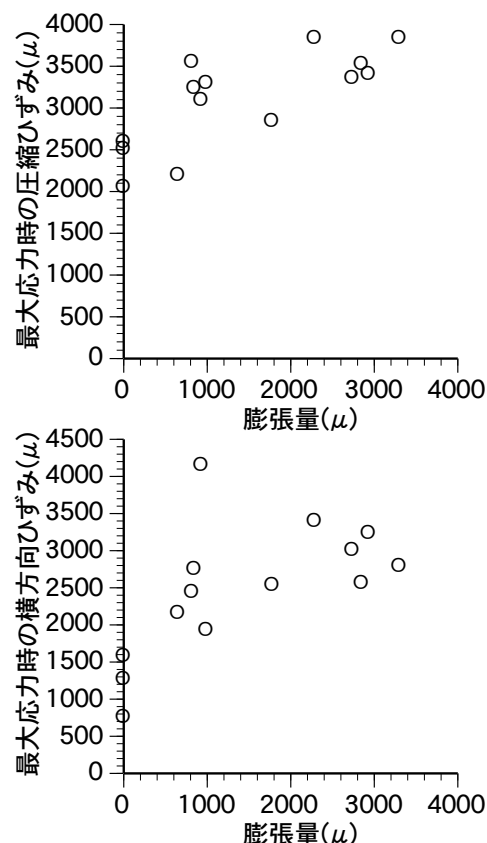


図-4 膨張が最大荷重時のひずみに与える影響

が FRP シートによる横拘束効果が得られやすいとの報告があり<sup>4)</sup>、本研究結果からもコンクリートそのものの変形が大きくなることが確認され、これがその効果に寄与しているものと考えられる。一方、梁および柱部の圧縮部においては、横方向に変形しやすくなることで、主筋の座屈が生じやすくなる可能性も想定される。したがって、ASR 劣化コンクリートの耐荷性能評価および補強設計においては、膨張が変性特性に与える影響を考慮する必要がある。

### 3.2 ASR 膨張が強度レベルの異なるコンクリートの力学的性能に与える影響 シリーズ 2

#### (1) 圧縮強度

ASR 膨張が強度レベルの異なるコンクリートの圧縮強度に与える影響を図-5 に示す。コンクリートの強度レベルにかかわらず、ASR 膨張に伴う圧縮強度の低下はわずかであった。膨張量が小さい範囲においては、強度レベルにかかわらず、膨張による強度低下への影響は顕著でないものと考えられる。シリーズ 1 と同様により大きな膨張量での検討が必要である。



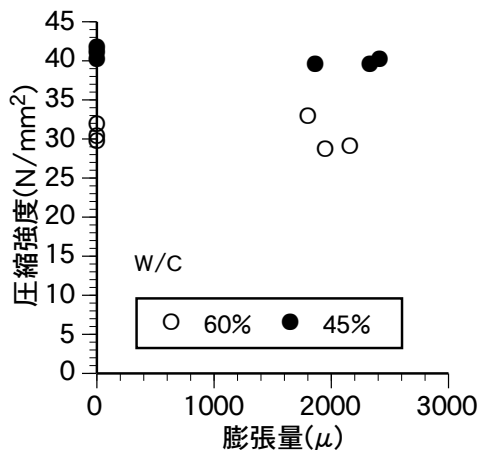


図-5 圧縮強度に与える影響 (W/Cの相違)

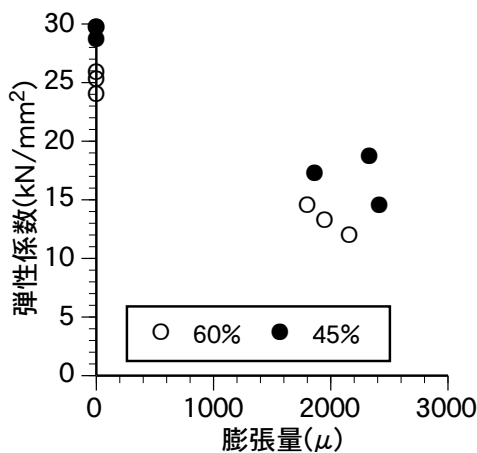


図-6 弾性係数に与える影響 (W/Cの相違)

## (2) 弾性係数

ASR 膨張が強度レベルの異なるコンクリートの弾性係数に与える影響を図-6に示す。いずれの強度レベルにおいても、弾性係数の低下量は同程度であった。一方、低下率では水セメント比 60% のものは約 50% の低下を示し、水セメント比 45% のものは約 45% の低下を示した。強度レベルが高いものの方が若干低下率は小さかった。強度レベルが高いものでは、本来のマトリックスの強度は大きく、同一の膨張量においてもひび割れの形態が異なり、巨視的なひび割れの割合が小さく抑えられ、弾性係数の低下率が軽減されたものと考えられる。しかし、データ数が少ないため、より大きな膨張量での検討とともに、微細組織の観察等による確認が必要であると考えられる。

## (3) ポアソン比

ASR 膨張が強度レベルの異なるコンクリート

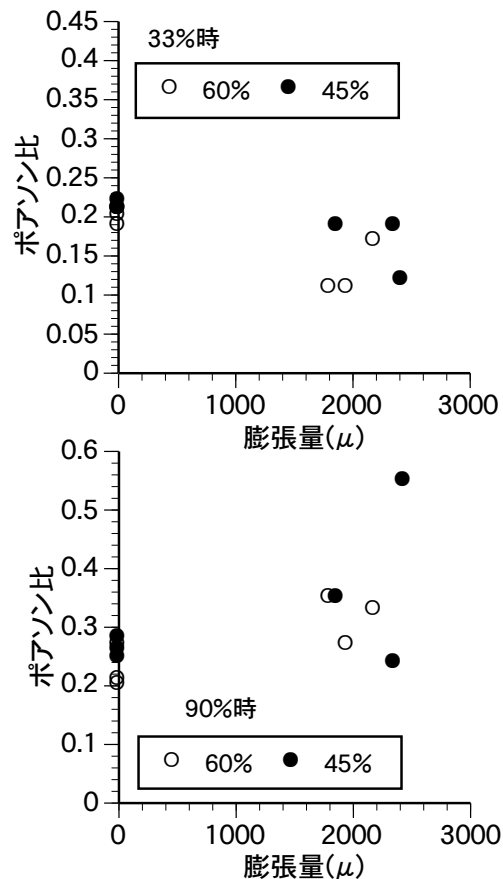


図-7 ポアソン比に与える影響 (W/Cの相違)

のポアソン比に与える影響を図-7に示す。水セメント比にかかわらず、最大応力の 33% 時では、膨張を生じたもののポアソン比は若干小さくなった。一方、90% 時においては、膨張を生じたもののポアソン比は大きくなった。また、強度レベルの高いものでは、ポアソン比の大きなものもあり、応力レベルの高い時点において横方向に大きな変形が生じる可能性が考えられる。これについても今後のデータの蓄積を図るとともに、より大きな膨張量についての今後の検討が必要である。

## (4) 最大荷重時のひずみ

ASR 膨張が強度レベルの異なるコンクリートの最大荷重時の圧縮ひずみおよび横方向ひずみに与える影響を図-8に示す。強度レベルにかかわらず、膨張を生じたものの、最大荷重時の圧縮ひずみおよび横方向ひずみは大きくなった。その増加程度については、圧縮ひずみでは、強度レベルにかかわらず同程度の増加を示した。一方、横方向ひずみでは、ばらつきはある

ものの、強度レベルの高いものの方が、膨張による増加は大きくなった。実際に作用している応力レベルの高いものの方が、膨張によって生じた組織の弛緩の影響が大きくなり、横方向の変形量が大きくなったものと考えられる。変形性能については、強度レベルの高いものの方が、横方向への変形量が大きい傾向にあるものと考えられる。強度レベルにかかわらず、ASR劣化コンクリートの耐荷性能評価および補強設計においては、膨張が変性特性に与える影響を考慮する必要があるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の範囲で得られた結果を以下に示す。

- (1) ASR膨張が強度に与える影響は顕著でなく、その影響の程度は強度レベルにはかかわらず同程度であった。
- (2) 弾性係数については、膨張初期における低下が大きく、1000  $\mu$  以降は緩やかに低下した。強度レベルが異なる場合にも、同定度の膨張量においては低下の程度に顕著な違いは認められなかった。
- (3) ASR膨張が変形特性に与える影響は顕著であり、最大荷重付近ではポアソン比が大きくなり、その増加も膨張量が大きいものほど大きい。また、膨張量が大きいものほど、最大荷重時の圧縮ひずみおよび横方向ひずみは大きい。
- (4) ASRにより劣化した構造物の耐荷性能評価および補強設計においては、膨張量が変形特性に与える影響を考慮する必要がある。

#### 謝辞

本研究は土木学会アルカリ骨材反応対策小委員会（宮川委員長）の依頼・協力を得て実施した。また、実験実施にご協力頂いた太平洋セメント（株）森寛晃氏に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005.8

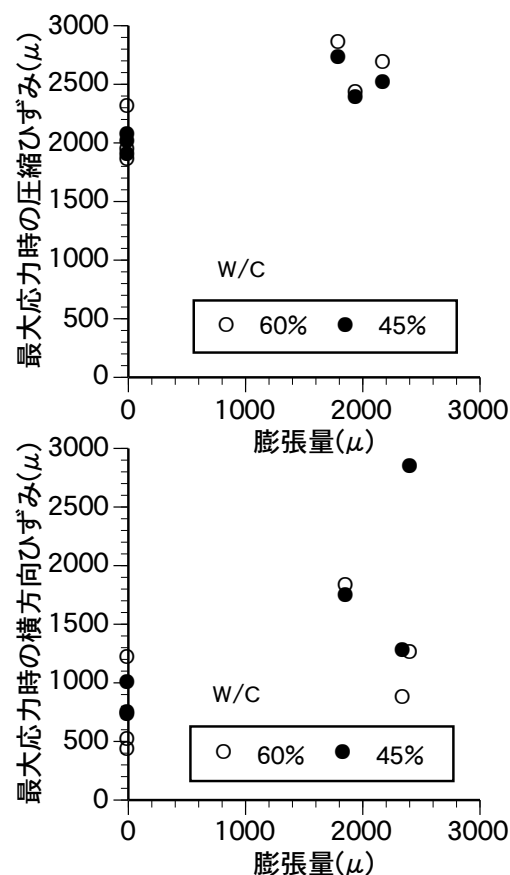


図-8 最大荷重時のひずみに与える影響  
(W/Cの相違)

- 2) 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.3-8，2002.6
- 3) 小林一輔，白木亮司，森弥広：ASRを生じたコンクリートの圧縮強度に関する2,3の考察，土木学会論文集，第426号/V-14，pp.91-100，1991.2
- 4) 久保善司，服部篤史，宮川豊章：ASRコンクリートの力学的特性と劣化度評価について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，pp.1799-1804，2003.7
- 5) The institute of Structural Engineering：Structural effect of alkali silica reaction，p12-14，1992.7
- 6) Clark L.A.：Structural aspect of alkali-silica reaction，Structural Engineering Review，Vol.2，No.2，pp.81-87，1990.6