論文　NaCl 溶液に浸せきしたコンクリートの ASR 膨張特性

黒田　保[*1]・井上　正一[*2]・吉野　公[*3]・西林　新蔵[*4]

要旨：NaCl 溶液に浸せきしたコンクリートの ASR 膨張に与える保存温度および NaCl 溶液濃度の影響について検討した結果，以下のことが明らかとなった。（1）NaCl 溶液の濃度が低い場合には，保存温度が高くなると ASR 膨張は小さくなり，濃度が高い場合には，保存温度の上昇とともに ASR 膨張は大きくなる。（2）保存温度が低い場合には，NaCl 溶液濃度が高くなると ASR 膨張は小さくなる。一方，保存温度が高い場合には，NaCl 溶液濃度の上昇とともに ASR 膨張は大きくなる。（3）本実験の範囲内では，80℃の飽和 NaCl 溶液に浸せきしたコンクリートが最も大きな膨張を生じた。

キーワード：ASR，コンクリート，膨張率，促進試験，保存温度，NaCl 溶液濃度

1. はじめに

アルカリシリカ反応（ASR）により劣化したコンクリート構造物が，今後も有害な（大きな）膨張（残存膨張）を生じるか否かを判定する試験法として，現在，日本コンクリート工学協会の基準である JCI-DD2 [1)] による方法が一般的に実施されている。しかし，JCI-DD2 は，飛来塩分や海水，あるいは凍結防止剤がコンクリート内部に浸透して ASR を助長するような環境を考慮していない。そこで，最近では，外部からコンクリート内部にアルカリが供給される環境下にあるコンクリート構造物に対して，モルタルバーによる骨材のアルカリシリカ反応性試験法である ASTM C 1260 [2)]（80℃の 1mol/l・NaOH 溶液に供試体を浸せきする方法）や Chatterji が提案しているデンマーク法 [3)]（50℃の飽和 NaCl 溶液に浸せきする方法）の促進試験環境を構造物から採取したコンクリートコアの残存膨張量の測定法に適用する試みが行われている [4)]。これらの促進試験では，供試体を NaOH 溶液や NaCl 溶液に浸せきして供試体内部に NaOH や NaCl を供給し，さらに供試体を高温下で保存することにより ASR を促進している。このような ASR に対する促進試験法を実施する際には，コンクリートの ASR 膨張に与える促進試験条件の影響を十分に把握しておくことが重要であると考える。

そこで本研究では，NaCl 溶液に浸せきしたコンクリート供試体の ASR 膨張に与える保存温度および NaCl 溶液濃度の影響について検討を行った。ここで，NaOH 溶液ではなく NaCl 溶液を用いたのは，飛来塩分や海水，あるいは凍結防止剤の散布によりコンクリート構造物にアルカリが浸透する場合，NaOH ではなく NaCl が浸透するので，NaOH 溶液よりも NaCl 溶液に供試体を浸せきした方がより現実の ASR の発生機構に近いと考えたからである。

2. 実験概要

2.1　使用材料

本実験に使用したセメントはアルカリシリカ反応性試験用普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm^3，全アルカリ量：0.62%）である。細骨材には非反応性骨材（安山岩砕砂と陸砂を

*1 鳥取大学　工学部土木工学科准教授　博（工）（正会員）
*2 鳥取大学　工学部土木工学科教授　工博（正会員）
*3 鳥取大学　工学部土木工学科准教授　工博（正会員）
*4 （株）中研コンサルタント　顧問　工博（正会員）

質量比 9 : 1 で混合したもの）を使用した。粗骨材には反応性骨材（安山岩，表乾密度：2.60 g/cm^3，アルカリ濃度減少量（Rc）：172mmol/l，溶解シリカ量（Sc）：732mmol/l，モルタルバー法による材齢 6 ヶ月時の膨張率：0.38%）と非反応性骨材（安山岩，表乾密度：2.73 g/cm^3）を質量比で 6 : 4 となるように混合したものを使用した。コンクリート中のアルカリ含有量を調整するために塩化ナトリウム（NaCl）を使用した。

2.2 コンクリートの示方配合および実験条件

本実験で使用したコンクリートの示方配合を**表-1** に，実験条件を**表-2** に示す。コンクリートの水セメント比（W/C）を 45%，コンクリート中のアルカリ含有量を Na_2O 当量で 8kg/m^3 とした。なお，海水や凍結防止剤などがコンクリート中に浸透する環境を想定して，アルカリ含有量の調整には NaCl を使用した。コンクリートのアルカリ含有量は，セメントに含まれるアルカリ量（セメントの全アルカリ量×単位セメント量）と，コンクリート（1m^3）に混入する NaCl 量を Na_2O 当量に換算したものを足し合わせたものとした。コンクリートの空気量は 4.5±1.5%として，AE 剤（主成分：アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤）を使用して調整した。本実験では直径 75mm で高さ 150mm（φ75×150mm）の円柱供試体を使用した。ASR を促進させるために，供試体を 0.5，1，2mol/l の NaCl 溶液および飽和 NaCl 溶液に浸せきした。また，NaCl 溶液に浸せきした供試体を 40，50，60 および 80℃の各温度下に保存した。

2.3 実験方法

φ75×150mm のコンクリート円柱供試体を作製し，その供試体に湿布を巻きつけて 20℃の恒温室で 35 日間封緘養生を行った。封緘養生終了後，長さ変化測定用のゲージプラグを貼り付けたステンレスバンドを供試体に取り付け，長さ変化（ゲージプラグ間の長さ）の初期値を測定した。このとき，検長が 100mm となるようにステンレスバンドの間隔を調整した。ステンレスバンドを取り付けた供試体の概略図を**図-1** に示す。

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）			
		W	C	S	G
45	41	180	400	702	1012

表-2 実験条件

NaCl 溶液濃度（mol/l）	0.5，1，2 飽和溶液
保存温度（℃）	40，50，60，80
供試体寸法（mm）	φ75×150

長さ変化の初期値を測定した後，供試体を所定の濃度の NaCl 溶液に浸せきして，それを所定の温度に設定した恒温槽の中で保存した。所定の保存期間経過後に長さ変化を測定し，膨張率を算出した（各実験条件ごとに供試体を 2 本用意し，実験結果に示す膨張率はそれらの平均値とした）。なお，長さ変化測定時の供試体温度を 20℃とするために，測定日の前日に供試体を NaCl 溶液に浸せきしたまま恒温槽から取り出し，それを 20℃の恒温室で 24 時間静置した後に長さ変化の測定を行った。

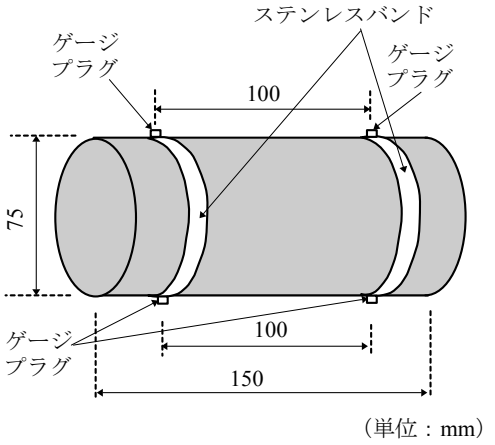

図-1 供試体の概略図

3. 実験結果と考察

3.1 ASR 膨張と保存温度との関係

図-2～5 に 0.5，1，2mol/l の NaCl 溶液および飽和 NaCl 溶液に浸せきした供試体の膨張率の経時変化を示す。なお，50℃の飽和 NaCl 溶液に供試体を浸せきする条件は，Chatterji が提案しているデンマーク法と同じ促進試験条件（保

存温度および NaCl 溶液濃度）である。

ASR は保存温度が高くなるほど反応速度が早くなり，保存温度の上昇とともに ASR によるコンクリートの膨張は大きくなると考えられる。しかし，**図-2** および **3** より 0.5 および 1mol/l の NaCl 溶液に浸せきした供試体については，40 および 60℃で保存した場合には膨張を生じているのに対して，本実験の範囲内で最も高い温度である 80℃で保存した場合にはほとんど膨張を生じていないことがわかる。一方， 2mol/l の NaCl 溶液および飽和 NaCl 溶液に浸せきした供試体（**図-4** および **5**）では，保存期間が長くなると 80℃で保存した供試体の膨張率が最も大きくなっていることがわかる。このように，供試体を浸せきする NaCl 溶液の濃度の相違により，保存温度がコンクリートの ASR による膨張（ASR 膨張）に与える影響が異なる。

0.5，1，2mol/l の NaCl 溶液および飽和 NaCl 溶液に浸せきした供試体の膨張率と保存温度との関係を**図-6～9** に示す。0.5mol/l の NaCl 溶液に浸せきした供試体（**図-6**）については，保存温度が高くなるほど膨張率は小さくなる傾向にある。また，1mol/l の NaCl 溶液に浸せきした供試体（**図-7**）については，60℃で保存した供試体の膨張率が最も大きくなり，80℃で保存した供試体の膨張率は 40℃で保存した供試体の膨張率よりも小さくなる。一方，2mol/l の NaCl 溶液および飽和 NaCl 溶液に浸せきした供試体（**図-8** および **9**）については，保存期間が長くなると保存温度の上昇とともに膨張率は大きくなる。すなわち，供試体を浸せきする NaCl 溶液濃度が低い場合には，保存温度が高くなると供試体の膨張率は小さくなり，逆に，供試体を浸せきする NaCl 溶液濃度が高い場合には，保存温度が高くなると供試体の膨張率は大きくなる傾向にある。このように，供試体を浸せきする NaCl 溶液濃度によってコンクリートの ASR 膨張に与える保存温度の影響が異なる原因については後述する。

3.2 ASR 膨張と NaCl 溶液濃度との関係

40, 60 および 80℃で保存した供試体の膨張率と NaCl 溶液濃度との関係を**図-10～12** に示す。40℃で保存した供試体（**図-10**）については，1mol/l の NaCl 溶液に浸せきした場合に膨張率が最も大きくなる。また，1mol/l よりも高い濃度とした場合には，供試体を浸せきする NaCl 溶液の濃度の上昇とともに膨張率は小さくなる傾向にある。一方，60 および 80℃で保存した供

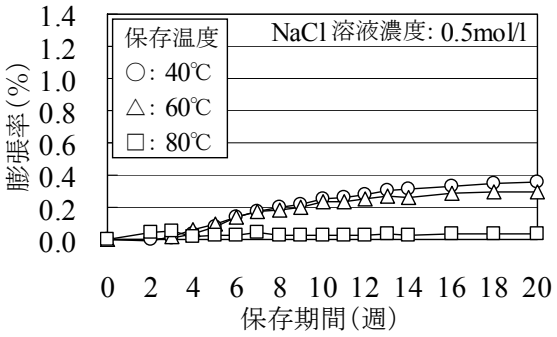

図-2　膨張率の経時変化

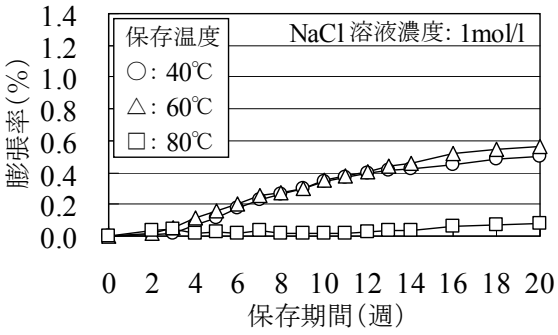

図-3　膨張率の経時変化

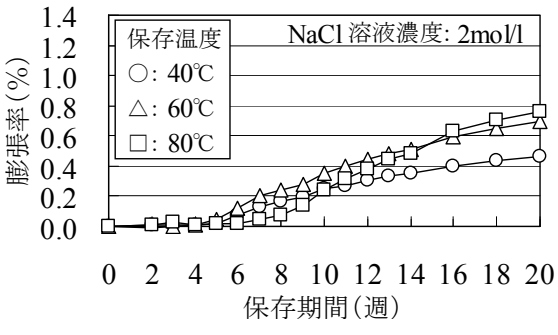

図-4　膨張率の経時変化

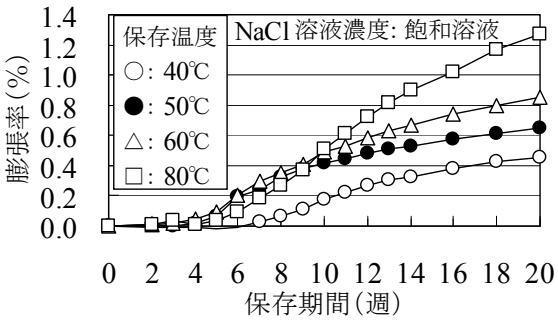

図-5　膨張率の経時変化

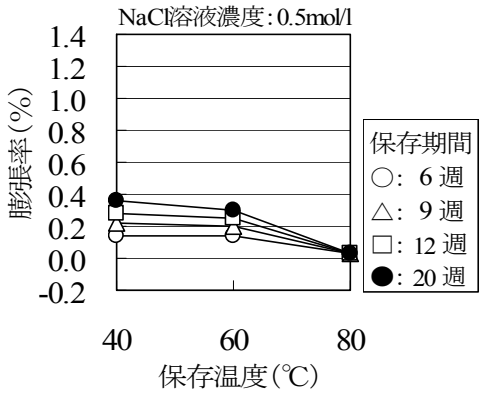

図-6　膨張率と保存温度との関係

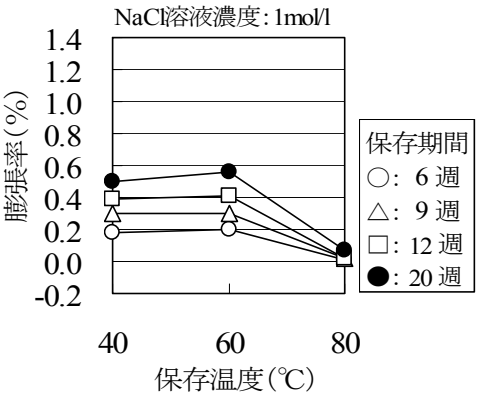

図-7　膨張率と保存温度との関係

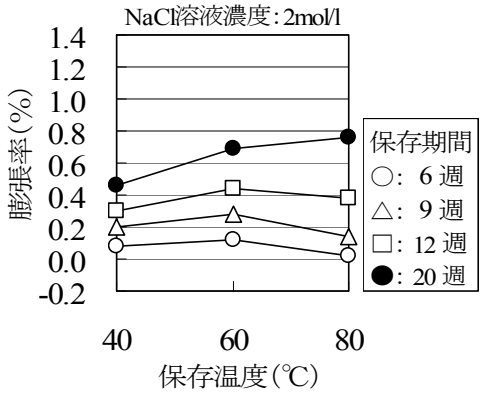

図-8　膨張率と保存温度との関係

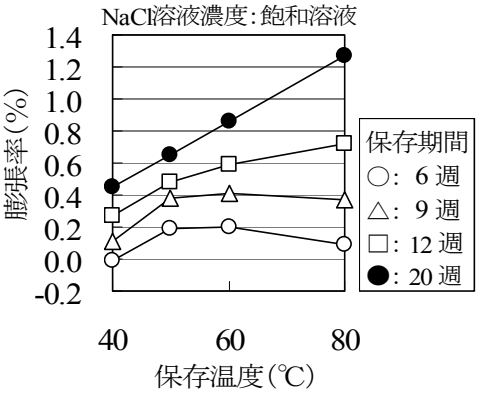

図-9　膨張率と保存温度との関係

試体（**図-11** および **12**）については，供試体を浸せきする NaCl 溶液の濃度が高いほど，供試体の膨張率は大きくなっており，飽和 NaCl 溶液に浸せきした供試体の膨張率が最も大きくなる。特に，80℃で保存した供試体については，NaCl 溶液濃度が低いものと高いものとの間で，膨張率の差が大きい。このように，供試体を保存する温度の相違により，コンクリートの ASR 膨張に与える NaCl 溶液濃度の影響は異なる。

3.3　ASR 膨張に与える保存温度および NaCl 溶液濃度の影響

3.1 および 3.2 節で示したように，供試体を保存する温度と NaCl 溶液濃度は ASR 膨張に複雑に影響を与える。これは，保存温度と NaCl 溶液濃度の相違により ASR によって生成される ASR ゲルの量や化学組成が異なるためであると考えられる。ASR によって生成される ASR ゲルの生成量が増加すると ASR 膨張は大きくなる。また，ASR 膨張は ASR ゲルの化学組成によっても影響を受ける。すなわち，ASR ゲル

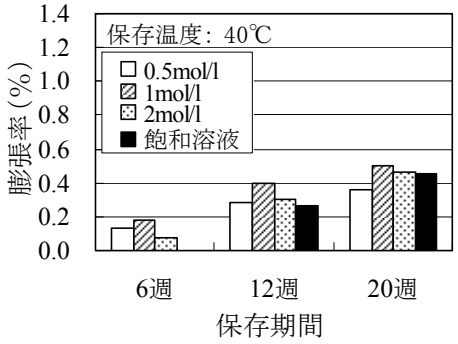

図-10　膨張率と NaCl 溶液濃度との関係

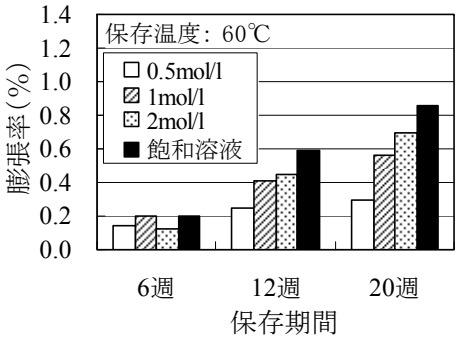

図-11　膨張率と NaCl 溶液濃度との関係

の Na_2O と SiO_2 の比（以下，Na_2O/SiO_2 と略記する）が過剰に大きくなると高アルカリ型のゲ

ルとなり，ASR ゲルの粘性が低下して，コンクリート内部での吸水膨張による ASR ゲルの膨張圧が緩和される[5]ために ASR 膨張は小さくなる。このように，ASR 膨張は ASR ゲルの生成量と Na_2O/SiO_2 の影響を相互に受けるものと考えられる。

同じ濃度の NaCl 溶液に浸せきした供試体に対しては，**図-13** に示すように，保存温度は ASR 膨張に対して相反する 2 つの影響を与える。すなわち，保存温度が高くなるほど ASR の反応速度は速くなり，ASR を生じるために十分な量のアルカリが存在すれば，早期に多量の ASR ゲルが生成されるため ASR 膨張は大きくなる（**図-13** の影響 1）。一方，保存温度が高くなると，ASR によって生成された ASR ゲル中に早期に Na^+が取り込まれて，Na_2O/SiO_2 が大きい粘性の低いゲルとなるため ASR 膨張は小さくなる（**図-13** の影響 2）と考えられる。したがって，低い濃度の NaCl 溶液に供試体を浸せきした場合（**図-6** および **7**）には，保存温度を高くすると ASR は急速に促進されて早期に ASR ゲルが生成されるが，ASR ゲル中に Na^+が急速に取り込まれて ASR ゲルの粘性が早期に低下し，また，ASR を持続するために必要な NaCl 量が不足するため，保存温度が高いほうが ASR 膨張が小さくなったと考えられる。一方，供試体を浸せきする NaCl 溶液濃度が高い場合（**図-8** および **9**）には，保存温度の上昇とともに早期に ASR ゲル中に Na^+が取り込まれてその粘性は低下するものの，ASR を持続して助長するために十分な量の NaCl が供試体内部に存在するため，保存温度が高いほど，早期に多量の ASR ゲルが生成され，また，それが持続するため，ASR 膨張が大きくなったと考えられる。

つぎに，同一温度で保存した供試体に対しては，**図-14** に示すように，供試体を浸せきする NaCl 溶液濃度が高いほど供試体内部の NaCl 濃度は高くなり，ASR が助長されて ASR ゲルの量が増加するために ASR 膨張は大きくなる（**図-14** の影響 3）。しかし，供試体内部の NaCl 濃度が過剰に高くなると，ASR ゲルは Na_2O/SiO_2

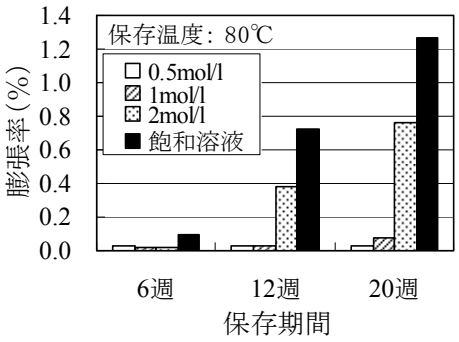

図-12　膨張率と NaCl 溶液濃度との関係

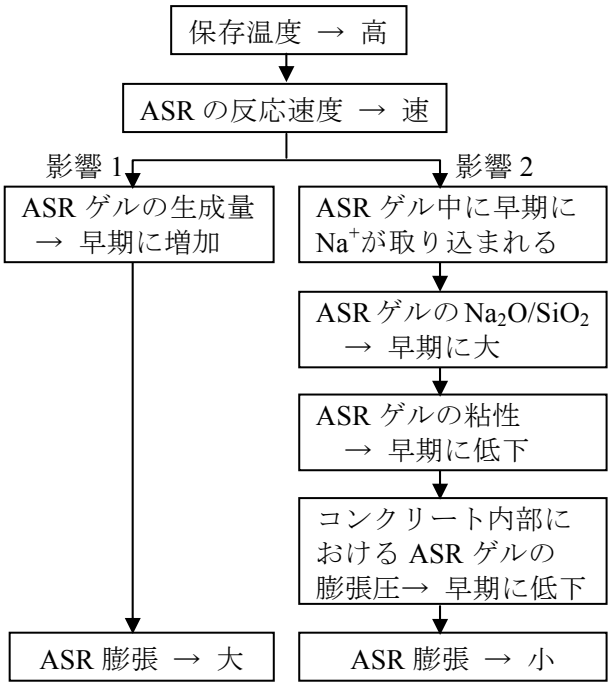

図-13　ASR 膨張に与える保存温度の影響

が大きい粘性の低いものとなるため ASR 膨張は小さくなる（**図-14** の影響 4）。これらの影響により，40℃で保存した場合（**図-10**）には，1mol/l の NaCl 溶液に浸せきした供試体よりも，2mol/l および飽和 NaCl 溶液に浸せきした供試体の方が ASR 膨張が小さくなったと考えられる。一方，保存温度が高い場合（**図-11** および **12**）には，濃度の高い NaCl 溶液に浸せきして ASR ゲルの粘性が低下したとしても，保存温度が高いことにより ASR が促進されて多量の ASR ゲルが生成され続けるために，高い濃度の NaCl 溶液に浸せきした供試体の方が ASR 膨張が大きくなったと考えられる。また，前述したように，保存温度が高く NaCl 溶液濃度が低い場合には，ASR が急速に生じて早期に ASR ゲ

ルに Na^+が取り込まれてその粘性が低下し，ASR を持続するために必要な NaCl 量が不足するために ASR 膨張は小さくなる。このため，本実験の範囲内で最も高い温度である 80℃で保存した供試体については，NaCl 溶液濃度が低いものと高いものとの間で，それらの膨張率の差が大きくなったと考えられる。

以上に述べたように，供試体を保存する温度と NaCl 溶液濃度は ASR 膨張に複雑に影響を与えていると考えられ，本実験の範囲内では，80℃の飽和 NaCl 溶液に浸せきする促進試験条件で最も大きな膨張を生じることが明らかとなった。今後は，実際のコンクリート構造物の ASR による劣化進行状況と促進試験による残存膨張量との関係を明らかにし，コンクリートコアの ASR による残存膨張量の測定法に最適な促進試験条件を設定する必要があると考える。

4. まとめ

本研究では，NaCl 溶液に浸せきしたコンクリートの ASR 膨張に与える保存温度および NaCl 溶液濃度の影響について検討を行った。本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめて示す。

(1) 供試体を浸せきする NaCl 溶液の濃度の相違により，保存温度が ASR 膨張に与える影響は異なり，NaCl 溶液の濃度が低い場合には，保存温度が高くなると ASR 膨張は小さくなった。一方，NaCl 溶液の濃度が高い場合には，保存温度の上昇とともに ASR 膨張は大きくなった。

(2) 供試体を保存する温度の相違により，NaCl 溶液濃度が ASR 膨張に与える影響は異なり，保存温度が低い場合には，供試体を浸せきする NaCl 溶液濃度が高くなると ASR 膨張は小さくなった。一方，保存温度が高い場合には，供試体を浸せきする NaCl 溶液濃度の上昇とともに ASR 膨張は大きくなった。

(3) 本研究で設定した促進試験条件の中で，80℃の飽和 NaCl 溶液に浸せきした供試体が最も大きな膨張を生じた。

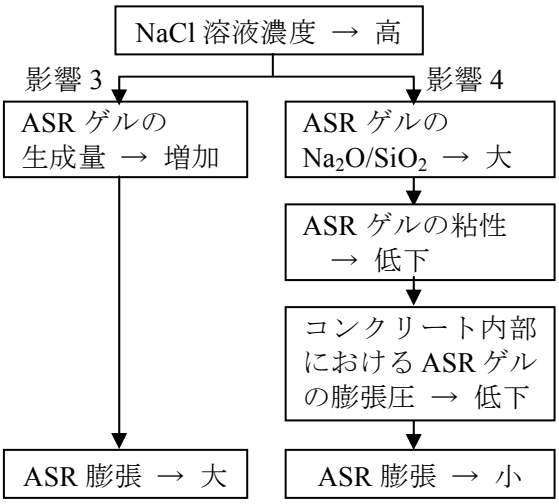

図-14　ASR 膨張に与える NaCl 溶液濃度の影響

謝辞

本研究は，平成 18 年度日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（C），課題番号：18560451）の助成を受けて実施したことを付記し，ここに謝意を表する。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会：JCI 基準集（1997～2002 年度），日本コンクリート工学協会，pp.152-156，2004. 4

2） ASTM C 1260: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method), Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Vol.04.02, pp.654-659, 1994

3）Chatterji, S.: AN ACCELERATED METHOD FOR THE DETECTION OF ALKALI-AGGREGATE REACTIVITY OF AGGREGATES, CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, Vol.8, No.5, pp.647-650, 1978

4）野村昌弘，平俊勝，鳥居和之：コアによるコンクリート構造物のアルカリシリカ反応の判定，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.1147-1152，2001

5）川村満紀，枷場重正：アルカリ・シリカ反応とその防止対策，土木学会論文集，No.348／V-1，pp.13-26，1984.8