

論文 コンクリートの ASR 膨張に与える NaOH 溶液濃度と保存温度の影響

黒田 保^{*1}・井上 正一^{*2}・高井 伸一郎^{*3}・西林 新蔵^{*4}

要旨: 劣化度の異なるコンクリート供試体の ASR を NaOH 溶液中で促進して, ASR 膨張に与える NaOH 溶液濃度および保存温度の影響について検討し, 以下のことが明らかとなった。(1) 保存温度が比較的低い場合には, NaOH 溶液濃度の上昇とともに ASR 膨張は小さくなった。一方, 保存温度が高い場合には, NaOH 溶液濃度の上昇とともに ASR 膨張は大きくなった。(2) NaOH 溶液濃度が低い場合には, 保存温度を過剰に高くすると, ASR 膨張は小さくなった。一方, NaOH 溶液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。(3) 供試体の膨張率は, 保存温度と保存期間の関数で表すことができると考えられた。

キーワード: ASR, 促進養生, 膨張率, NaOH 溶液濃度, 保存温度

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) を生じたコンクリート構造物に対して, 今後の劣化進行を予測するためにコンクリートコアの残存膨張量が測定されている。その際, 一般的に, JCI-DD2¹⁾ に準じてコンクリートコアの残存膨張量が測定されている。最近では, 外部から海水や凍結防止剤などがコンクリート内部に浸透して ASR を助長する環境下におかれたコンクリート構造物に対して, コンクリートコアの残存膨張量を測定する際の促進養生条件として, ASTM C 1260²⁾ や Chatterji³⁾ が提案する飽和 NaCl 溶液浸せき法で採用されている促進養生条件を適用することが試みられている⁴⁾。これらの試験においては, コンクリートコアを NaOH 溶液や飽和 NaCl 溶液に浸せきし, それらを高温下で養生することにより ASR を促進している。このような促進試験を実施するには, 促進養生条件がコンクリートの ASR による膨張 (ASR 膨張) に与える影響について十分に明らかにしておく必要があると考える。

本研究では, コンクリートを NaOH 溶液に浸せきする方法を採用し, ASR による劣化 (膨張) を生じていない供試体と, 劣化 (膨張) を生じている供試体について, 供試体の ASR 膨張に与える NaOH 溶液濃度および保存温度の影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験で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/cm³, 全アルカリ量=0.62%) である。細骨材には, 化学法 (JIS A 1145) で「無害」と判定された安山岩砕砂と陸砂の混合砂を用いた。粗骨材には, 化学法およびモルタルバー

法 (JIS A 1146) で「無害でない」と判定された安山岩 (表乾密度=2.60 g/cm³, Rc=172mmol/l, Sc=732mmol/l) および「無害」と判定された安山岩 (表乾密度=2.73 g/cm³) を使用した。コンクリート中のアルカリ含有量の調整用に NaCl を使用した。

2.2 コンクリートの配合

本実験に使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。コンクリート中のアルカリ総量が 8kg/m³ となるように NaCl を添加して調整した。反応性 (「無害でない」) 粗骨材は, 全粗骨材に対する質量割合が 60%となるように, 非反応性 (「無害」) の粗骨材と混合して使用した (ペシマムに近い混合割合)。コンクリートの空気量は 4.5±1.5%となるように, 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。

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				NaCl 量 (kg)
		W	C	S	G	
45	41	180	400	702	101	10.43

2.3 実験条件

本実験では, 供試体として, φ75×150mm のコンクリート円柱供試体を使用した。ASR の促進養生条件として, 供試体を浸せきする NaOH 溶液の濃度を 0.5, 1 および 2mol/l の 3 水準, 保存温度を 40, 60 および 80℃の 3 水準選定した。また, 供試体を NaOH 溶液に浸せきし始める時点の劣化度 (膨張率で表し, この膨張率を初期膨張率と呼ぶ) として, 劣化していないもの (初期膨張率=0%) と劣化しているもの (初期膨張率=0.3%) の 2 水準選定した。

*1 鳥取大学大学院 工学研究科准教授 博 (工) (正会員)

*2 鳥取大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

*3 村本建設 (株) 営業統括部 工修 (正会員)

*4 鳥取大学名誉教授 工博 (正会員)

2.4 実験方法

コンクリートを練り混ぜた翌日に供試体を脱型し、その供試体に湿布を巻きつけて 20℃の恒温槽で 35 日間封緘養生を行なった(封緘養生中には ASR 膨張を生じていない)。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ゲージプラグの間隔が 100mm となるように供試体に取り付け、長さ変化の初期値を測定した。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。初期膨張率=0%の供試体については、直ちに所定の濃度 (0.5, 1 および 2mol/l) の NaOH 溶液に浸せきし、それを所定の温度に設定した恒温槽内 (40, 60 および 80℃) で保存した。また、初期膨張率=0.3%の供試体については、JCI-DD2 の試験環境下 (温度 40℃, 相対湿度 95%以上) で保存し、供試体の膨張率が 0.3%になった時点で、所定の濃度の NaOH 溶液に浸せきし、恒温槽内 (40, 60 および 80℃) で保存した。いずれの供試体についても、所定の期間経過後に、長さ変化を測定した。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 NaOH 溶液に浸せきしたままの状態を 20℃の恒温槽へ移動し、そこで 24 時間静置した。

また、JCI-DD2 に準じた試験も実施した。

3. 実験結果と考察

3.1 JCI-DD2 による結果

JCI-DD2 の促進環境下で供試体の膨張率の経時変化を測定した結果を図-2 に示す。本実験で使用した供試体を JCI-DD2 の促進環境下で保存した場合、膨張は 35 週で収束し、その値は 0.53%であった。また、保存期間 11 週で、供試体の膨張率が 0.3%となった。この結果より、以下の実験において、初期膨張率が 0.3%になってから NaOH 溶液に浸せきする供試体については、JCI-DD2 の環境下で 11 週間保存した後に NaOH 溶液への浸せきを開始した。なお、この場合の、各供試体の実際の初期膨張率は、0.28~0.33% (平均 0.30%) の範囲内にあった。

3.2 NaOH 溶液濃度の影響

図-3 および図-4 に、初期膨張率を 0%および 0.3%と

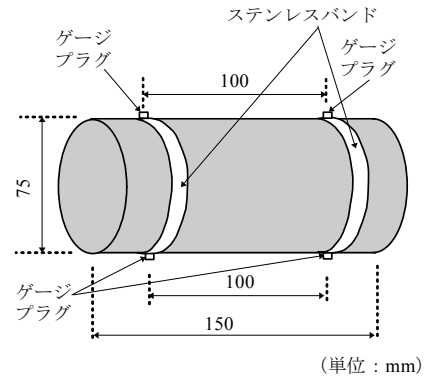


図-1 供試体の概略図

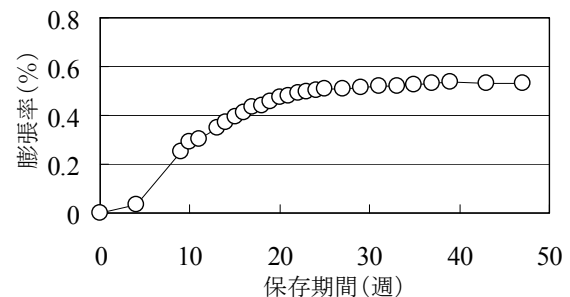


図-2 JCI-DD2 による結果

した供試体について、膨張率と NaOH 溶液濃度との関係を保存温度別に示す。なお、図に示す膨張率は、保存期間 4, 8, 24 および 36 週におけるものである。初期膨張率の違いにかかわらず、40℃で保存した場合には、供試体を浸せきする NaOH 溶液濃度が高いものほど膨張率は小さくなった。これは、高濃度の NaOH 溶液が供試体に浸透することにより、ASR によって生成されるアルカリシリカゲル (ASR ゲル) の化学組成のうち SiO_2 に対する Na_2O の比 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) が大きくなり、ASR ゲルが流動化したためと考えられる⁵⁾。

一方、60℃で保存した場合には、初期膨張率の違いにかかわらず、保存期間が短いときには、NaOH 溶液濃度が高いものほど供試体の膨張率は小さくなる傾向を示すが、NaOH 溶液への浸せき期間が長くなると、NaOH 溶液濃度が高いものほど膨張率は大きくなった。

80℃で保存した供試体については、初期膨張率の違いにかかわらず、NaOH 溶液濃度の上昇とともに膨張率は

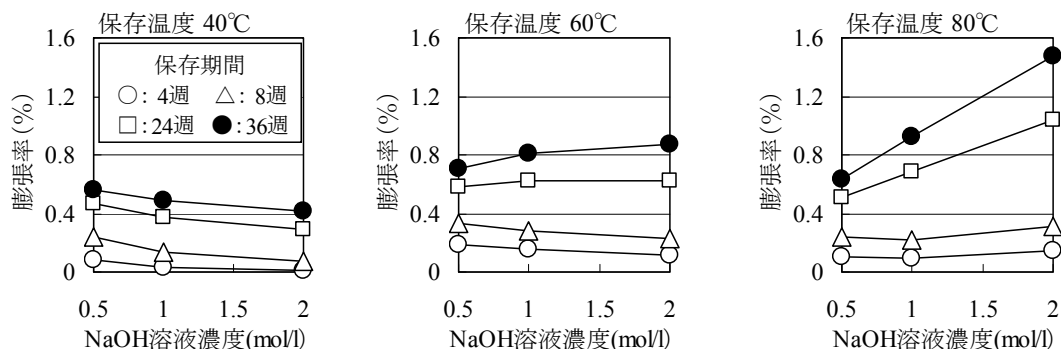


図-3 膨張率と保存温度との関係 (初期膨張率=0%)

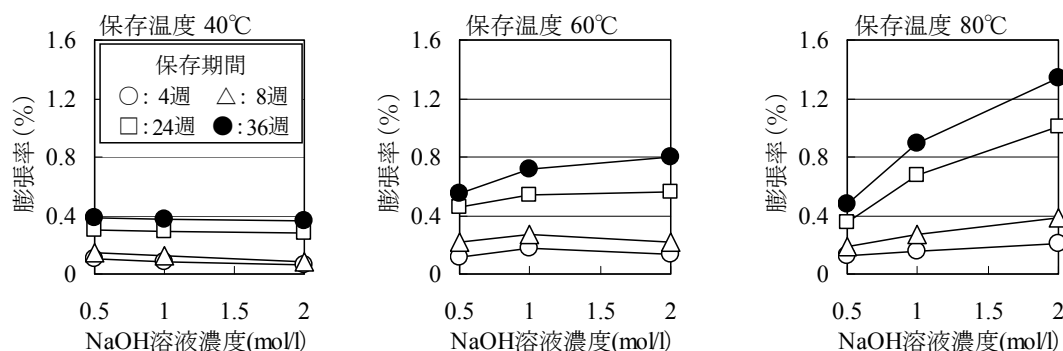


図-4 膨張率と保存温度との関係（初期膨張率=0.3%）

大きくなった。

供試体を保存する温度の相違によって、NaOH 溶液濃度が ASR 膨張に与える影響が異なった原因の一つとして、つぎのことが考えられる。保存温度が 40℃ の場合には、前述したように ASR ゲルの流動化の影響により、NaOH 溶液濃度が高くなるほど ASR 膨張は小さくなったと考えられる。一方、保存温度が高い場合には、温度の上昇により ASR の反応速度が速くなり、ASR ゲルの流動化よりも、ASR が促進されて多量の ASR ゲルが生成される影響の方が大きくなるため、NaOH 溶液濃度が高いものほど ASR 膨張が大きくなったと考えられる。

3.3 保存温度の影響

図-5～10 に、浸せきする NaOH 溶液の濃度が同じ供試体ごとに、保存温度と膨張率との関係を示す。これらの図より、初期膨張率が異なっても、ASR 膨張に与える

保存温度の影響は同様である。

0.5mol/l の NaOH 溶液に浸せきした供試体については、他の保存温度のものと比較して、60℃ で保存した供試体の膨張率が最も大きくなっており、温度を過剰に高く（80℃）すると ASR 膨張は小さくなる傾向を示した（図-5 および 6）。一方、1mol/l および 2mol/l の NaOH 溶液に浸せきした供試体については、保存温度が高いものほど ASR 膨張は大きくなる傾向を示した。このように、供試体を浸せきする NaOH 溶液濃度の相違によって、保存温度が ASR 膨張に与える影響が異なるのは、つぎのことが一因と考えられる。環境温度が高くなるほど ASR の反応速度が速くなるため、早期に多量の ASR ゲルが生成され、ASR 膨張は大きくなると考えられる。しかし、温度が過剰に高くなると、早期に ASR ゲル中にアルカリが取り込まれ、ゲルの流動化が生じると考えられる。NaOH

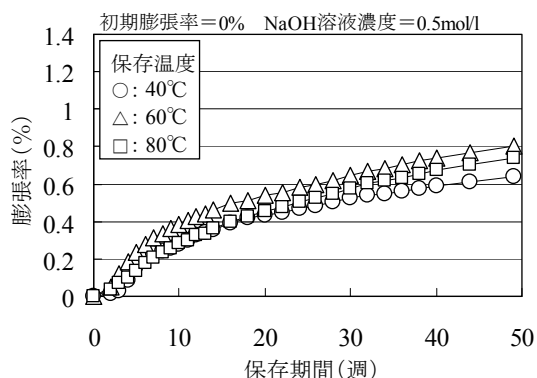


図-5 膨張率の経時変化（0.5mol/l）

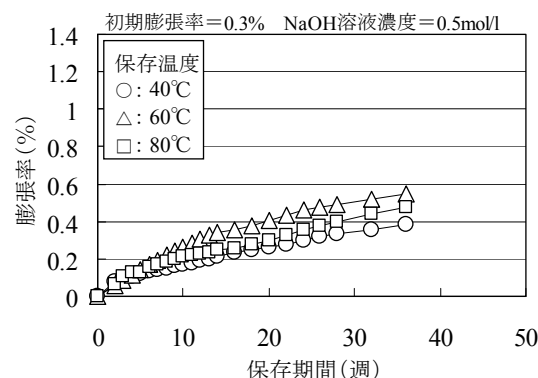


図-6 膨張率の経時変化（0.5mol/l）

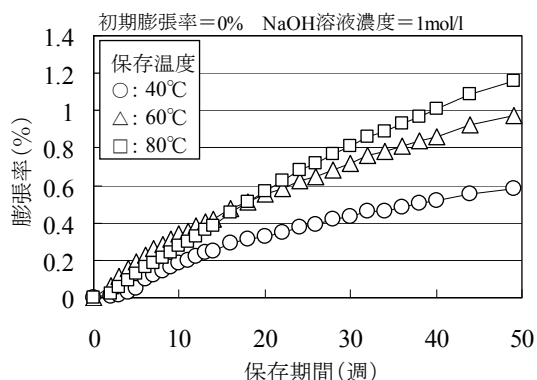


図-7 膨張率の経時変化（1mol/l）

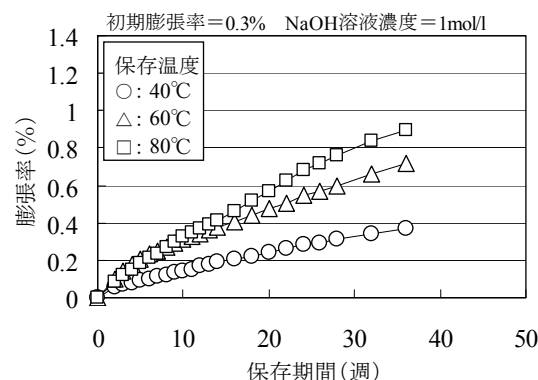


図-8 膨張率の経時変化（1mol/l）

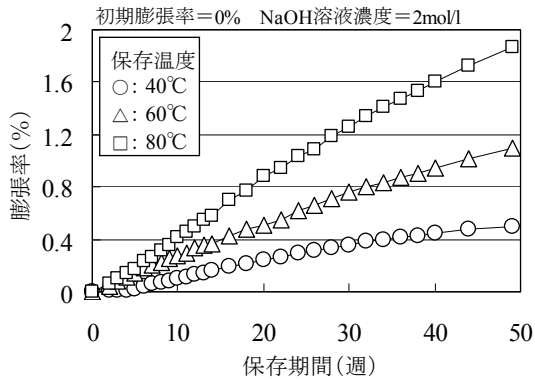


図-9 膨張率の経時変化 (2mol/l)

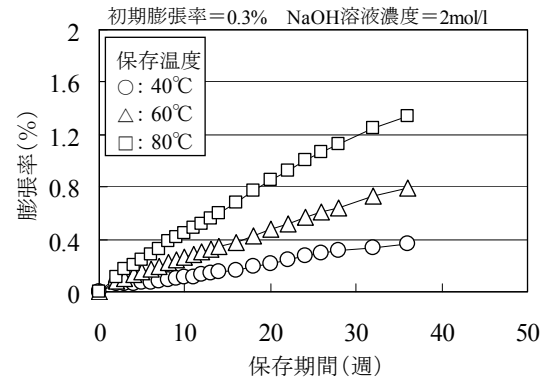


図-10 膨張率の経時変化 (2mol/l)

溶液濃度が比較的低い場合には、このゲルの流動化の影響を受け、0.5mol/l の NaOH 溶液に浸せきした供試体については、保存温度が過剰に高くなると ASR 膨張が小さくなったと考えられる。一方、NaOH 溶液の濃度が高い場合には、保存温度を上昇させて ASR ゲルの流動化が早期に生じたとしても、ASR を持続するために十分な量の NaOH が供試体内部に浸透するため、ASR ゲルが多量に生成され続ける。したがって、NaOH 溶液の濃度が高い場合には、保存温度を高くすることによる ASR ゲルの流動化の影響よりも、ASR ゲルが多量に生成され続ける影響の方を大きく受け、保存温度の上昇とともに ASR 膨張が大きくなったと考えられる。

3.4 ASR 膨張と保存温度との関係

図-5～10 に示す各種養生条件で保存したコンクリートの膨張率と保存期間の関係を、(1) 式で近似した。

$$Ex = \frac{t}{a + bt} \quad (1)$$

ここに、 Ex ：膨張率、 t ：保存期間、 a 、 b ：パラメータである。

近似式のパラメータ a と b および膨張率の計測値と近似値との相関係数 (r) を表-2 に示す。ここで、初期膨張率と NaOH 溶液濃度が同じ供試体ごとに、(1) 式の a および b と保存温度 (T) との関係を図-11～16 に示す。NaOH 溶液濃度が低いものほど、 a および b と T との相

表-2 a 、 b および相関係数

NaOH 溶液濃度 (mol/l)	初期膨張率 (%)	保存温度 (°C)	a	b	r
0.5	0	40	26.0	1.04	0.994
		60	17.7	0.93	0.997
		80	29.0	0.76	0.999
	0.3	40	40.2	1.63	0.992
		60	28.0	1.03	0.999
		80	36.3	1.25	0.989
1	0	40	48.4	0.70	0.996
		60	25.2	0.53	0.999
		80	32.6	0.17	0.999
	0.3	40	55.7	1.22	0.997
		60	24.4	0.80	0.995
		80	27.9	0.33	0.999
2	0	40	82.2	0.19	0.995
		60	34.1	0.21	1.000
		80	22.3	0.07	0.999
	0.3	40	84.9	0.30	0.993
		60	35.8	0.28	0.999
		80	20.2	0.17	0.999

関はやや低い、いずれの濃度の NaOH 溶液に浸せきした供試体についても累乗近似した (各近似式を図中に記す)。これらの式を (1) 式に代入すると、(2) 式が得られる。

$$Ex = \frac{t}{cT^d + eT^f t} \quad (2)$$

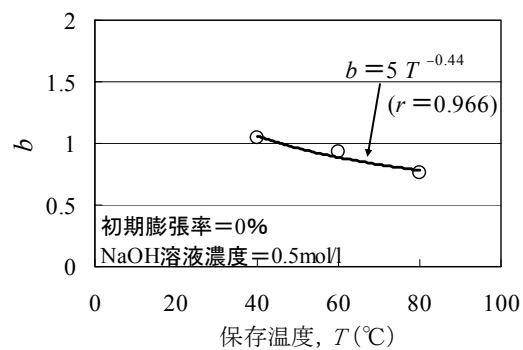
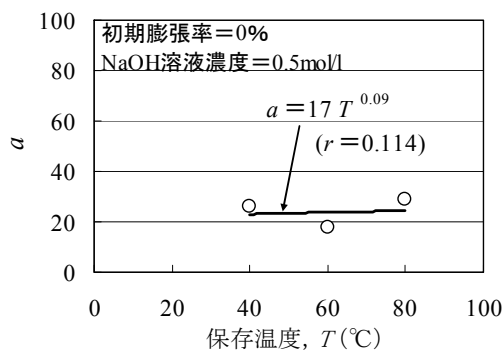


図-11 a および b と T との関係 (0.5mol/l)

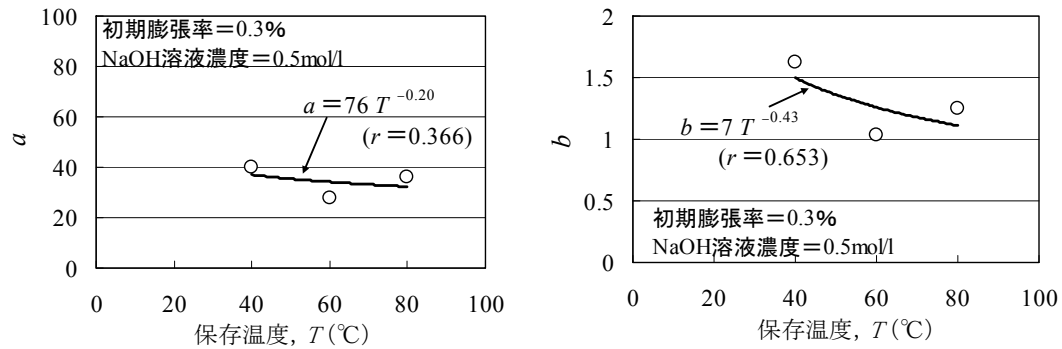


図-12 a および b と T との関係 (0.5mol/l)

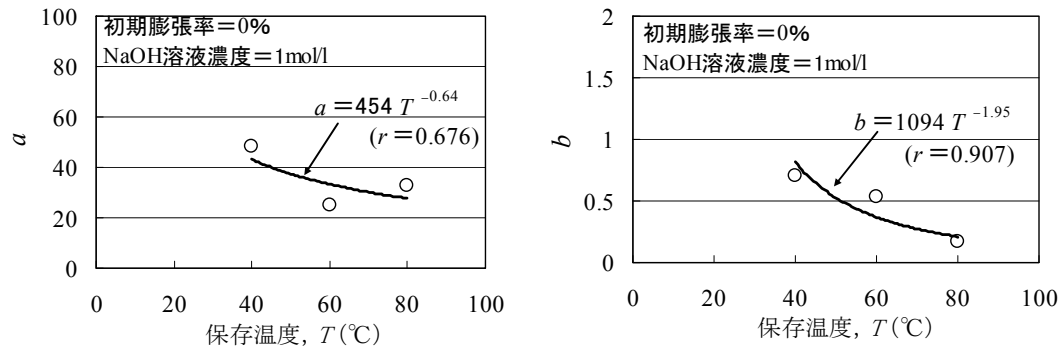


図-13 a および b と T との関係 (1mol/l)

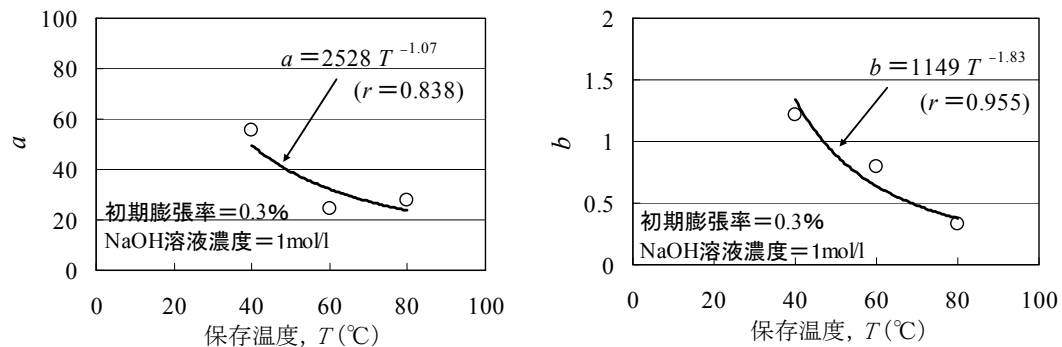


図-14 a および b と T との関係 (1mol/l)

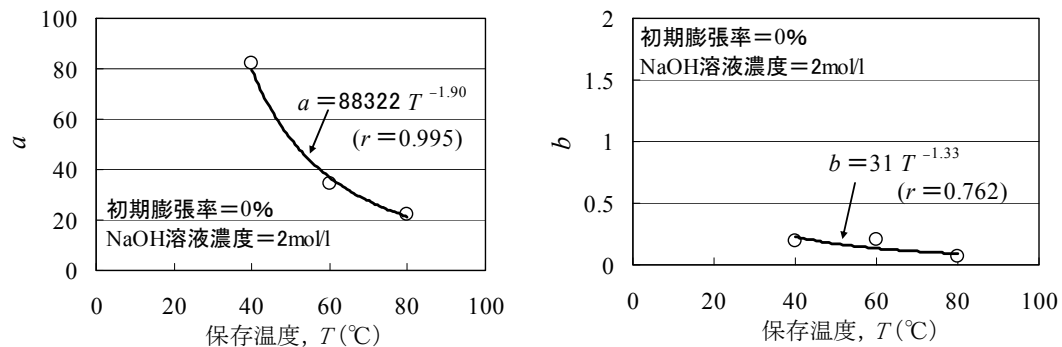


図-15 a および b と T との関係 (2mol/l)

ここに、 c 、 d 、 e および f は定数で、それぞれ、図-11～16 に示す式の定数である。

計測した供試体の膨張率と (2) 式で求めた膨張率 (計算値) との関係を図-17 に示す。これらの図より、2mol/l の NaOH 溶液に浸せきした供試体については、膨張率の計測値と計算値との相関がよい。1mol/l および 0.5mol/l

の NaOH 溶液に浸せきした供試体については、NaOH 溶液濃度が低いものほど相関がやや低くなった。

これらの結果より、NaOH 溶液に浸せきした供試体について、それらの膨張率を保存温度と保存期間の関数で表すことができると考えられる。

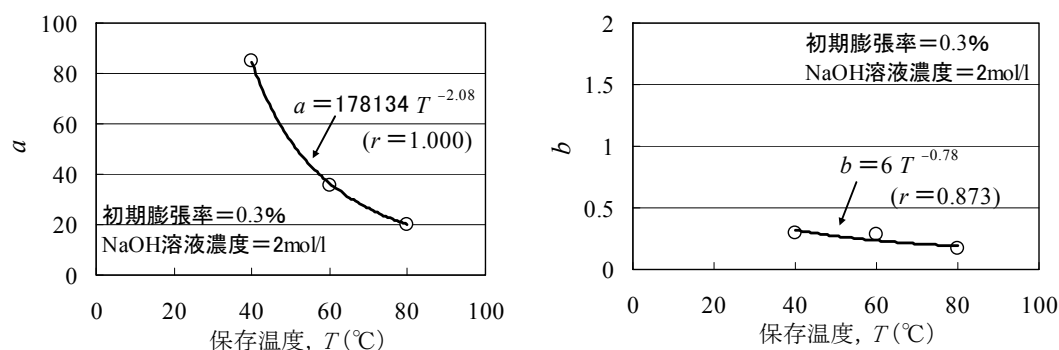


図-16 a および b と T との関係 (2mol/l)

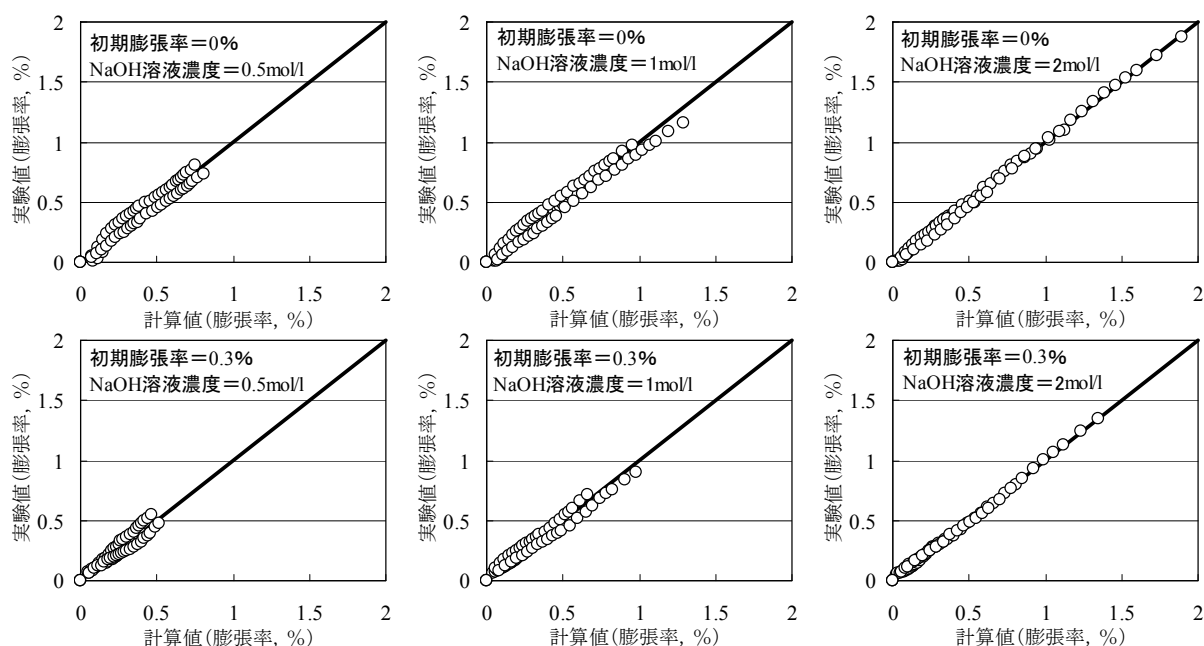


図-17 計算値と実験値との比較

4. まとめ

本研究では、劣化度の異なる供試体（初期膨張率が0%のもの、0.3%のもの）をNaOH溶液に浸せし、それらを40℃から80℃の保存槽内で促進養生した場合に、NaOH溶液濃度と保存温度がASR膨張に与える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る。

(1) 初期膨張率が0%の供試体と0.3%の供試体では、ASR膨張に与えるNaOH溶液濃度および保存温度の影響は同様の傾向を示した。

(2) 保存温度が比較的低い場合（40℃）には、NaOH溶液濃度の上昇とともにASR膨張は小さくなった。一方、保存温度が高い場合には、NaOH溶液濃度の上昇とともにASR膨張は大きくなった。

(3) NaOH溶液濃度が比較的低い（0.5mol/l）場合には、保存温度を過剰に高くすると、ASR膨張は小さくなった。一方、NaOH溶液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。

(4) 供試体の膨張率は、保存温度と保存期間の関数で表すことができると考えられた。

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），pp.152-156，2004
- 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) 野村昌弘ほか：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，榎場重正：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