

論文 NaOH 溶液に浸せきした安山岩あるいはチャート骨材使用コンクリートの ASR 膨張挙動

黒田 保^{*1}・井上 正一^{*2}・吉野 公^{*3}・西林 新蔵^{*4}

要旨: NaOH 溶液に浸せきした安山岩あるいはチャート骨材使用コンクリートについて, 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) NaOH 溶液濃度の上昇とともに膨張率はかならずしも大きくなるのではなく, 保存温度によっては, NaOH 溶液濃度を高くすると膨張率は小さくなった。(2) 保存温度の上昇とともにコンクリートの膨張率はかならずしも大きくなるのではなく, 保存温度を過剰に高く設定すると膨張率は小さくなる場合があった。(3) 本実験の範囲内では, 促進養生条件として, NaOH 溶液濃度を 1mol/l 以下とし, 保存温度を 60°C とするのがよいと考えられた。

キーワード: ASR, 膨張率, NaOH 溶液濃度, 保存温度, 安山岩, チャート

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, 補修・補強などの適切な対策を実施するためには, その構造物の劣化状況を把握し, 今後の劣化進行予測を正確に行うことが重要である。ASR を生じたコンクリート構造物が, 今後有害な膨張を生じるか否かを評価する試験法として, JCI-DD2¹⁾ に準じてコンクリートコアの残存膨張性を評価する試験が一般に広く実施されている。また, 最近では, 外部から海水や飛来塩分, 凍結防止剤などがコンクリート内部へ浸透して 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, 骨材のアルカリシリカ反応性試験法である 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, コンクリートコアの残存膨張性評価のための促進試験法に適用する試みが行われている⁴⁾。これらの促進試験法では, コンクリートコアを NaOH 溶液や飽和 NaCl 溶液に浸せきし, 高い温度で保存することにより ASR を促進している。このような ASR に対する促進試験を実施する際には, コンクリートの ASR による膨張 (ASR 膨張) に与える促進養生条件の影響について十分に明らかにした上で, できるだけ早期にしかも高い精度で ASR による残存膨張性を評価できる促進養生条件を設定することが重要であると考えられる。

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, 2 種類の安山岩と 1 種類のチャートをそれぞれ使用したコンクリートについて, コンクリートを浸せきする NaOH 溶液の濃度と保存温度がコンクリートの ASR 膨張に与える影響について検討を行った。また,

あわせて, JCI-DD2 および飽和 NaCl 溶液浸せき法も実施した。

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=0.55%) 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を混合して使用した (混合砂の表乾密度=2.64g/cm³)。粗骨材には, 化学法 (JIS A 1145) で「無害でない」と判定された 2 種類の安山岩 (以下, An1 および An2 と称す) とチャート (Ch と称す) を使用した。各粗骨材の表乾密度と化学法におけるアルカリ濃度減少量 (Rc) と溶解シリカ量 (Sc) はつぎのとおりである。An1: 表乾密度=2.60g/cm³, Rc = 172mmol/l, Sc = 732mmol/l, An2: 表乾密度=2.60g/cm³, Rc=101mmol/l, Sc=558mmol/l, Ch: 表乾密度=2.59g/cm³, Rc=175mmol/l, Sc=338mmol/l。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 実験条件およびコンクリートの配合

実験条件を表-1 に示す。コンクリートには, 反応性粗骨材として An1, An2, および Ch の 3 種類の骨材を用いた。コンクリートの水セメント比 (W/C) を 45% とし, コンクリート中のアルカリ含有量 (R₂O) が 8kg/m³ となるように NaCl を添加して調整した。ASR の促進養生条件として, コンクリートを浸せきする NaOH 溶液濃度を 0.5, 1 および 2mol/l の 3 水準, 保存温度を 40, 60 および 80°C の 3 水準選定した。供試体には, φ75×150mm のコンクリート円柱供試体を使用した。

*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 鳥取大学大学院 工学研究科准教授 工博 (正会員)

*4 鳥取大学名誉教授 工博 (正会員)

本実験に使用したコンクリートの示方配合を表-2に示す。コンクリートの空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ 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。

2.3 実験方法

実験方法を図-1に示す。コンクリートを練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°C の恒温室で35日間封緘養生を行った（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-2に示す。つぎに、供試体を所定の濃度（0.5, 1, 2mol/l）のNaOH溶液に浸せきして、それを所定の温度（40, 60, 80°C ）に設定した恒温槽に保存した。所定の期間経過後に供試体に取り付けたゲージプラグの長さを測定し、膨張率を算出した。なお、長さ変化測定時の供試体温度を 20°C 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°C の恒温室に移動し、そこで24時間静置した。

また、上記の実験とともに、 20°C の恒温室で35日間封緘養生を行った供試体に対して、JCI-DD2（ 40°C 、R.H.95%以上の環境下で供試体を保存）および飽和NaCl溶液浸せき法（ 50°C の飽和NaCl溶液中に供試体を保存）も実施した。これらの方法についても、測定日の前日に供試体を 20°C の恒温室に移動し、供試体温度が 20°C となってから長さ変化の測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 JCI-DD2 および飽和NaCl溶液浸せき法

図-3に、各骨材を使用したコンクリートについて、JCI-DD2による促進試験を実施した結果を示す。2種類の安山岩骨材（An1およびAn2）については、それらを使用したコンクリートはほぼ同様の膨張挙動を示し、保存期間14週で膨張率はいずれも 0.29% である。一方、チャート骨材（Ch）を使用したコンクリートは、安山岩骨材を使用したコンクリートよりも膨張率が小さく、保存期間14週における膨張率は 0.05% であった。

図-4に、各骨材を使用したコンクリートについて、飽和NaCl溶液浸せき法（供試体を 50°C の飽和NaCl溶液に浸せきして保存する促進試験）を実施した結果を示す。JCI-DD2と同様に、飽和NaCl溶液浸せき法についても、チャート骨材を使用したコンクリートよりも安山岩骨材を使用したコンクリートの方が膨張率は大きい。2種類の安山岩骨材については、それらの骨材を使用したコンクリートの膨張率は、JCI-DD2ではほぼ同じ値であったが、飽和NaCl溶液浸せき法では、An2よりもAn1を

表-1 実験条件

反応性粗骨材の種類	安山岩 (An1, An2) チャート (Ch)
W/C (%)	45
R ₂ O (kg/m ³)	8
NaOH 溶液濃度 (mol/l)	0.5, 1, 2
保存温度 (°C)	40, 60, 80

表-2 コンクリートの示方配合

骨材の種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
An1	45	41	180	400	702	993
An2	45	41	180	400	702	993
Ch	45	41	180	400	702	990

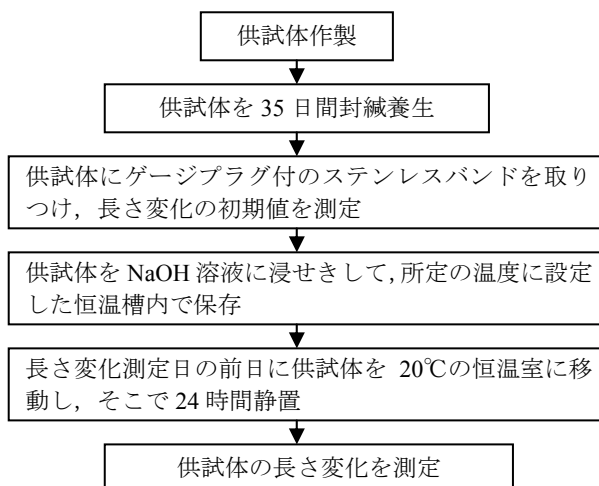


図-1 実験方法

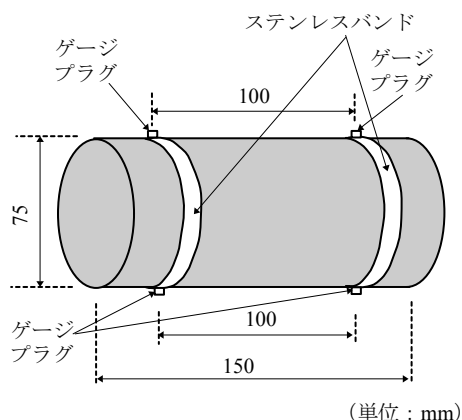


図-2 供試体の概略図

使用したコンクリートの膨張率の方がやや大きくなった。また、いずれの骨材を使用したコンクリートについても、JCI-DD2と比較して、飽和NaCl溶液浸せき法では膨張を生じ始める時期がやや遅い。これは、コンクリ

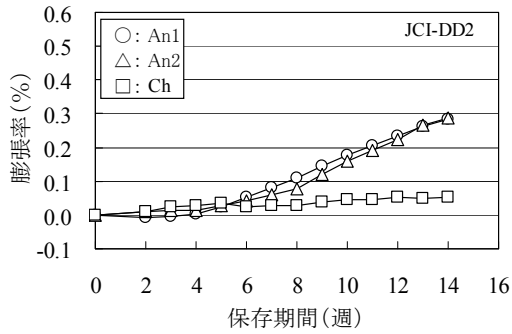


図-3 膨張率の経時変化 (JCI-DD2)

ート中のアルカリ含有量がもともと多く (8kg/m^3), JCI-DD2 の促進環境下で十分大きな膨張を示したことから、飽和 NaCl 溶液中でコンクリート内部から ASR を生じるために必要な OH^- が溶出した可能性があることが一因と考えられる。

3.2 NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートの膨張挙動に与える NaOH 溶液濃度の影響

図-5~7 に、 40°C の NaOH 溶液 (濃度 0.5, 1, 2mol/l) に浸せきしたコンクリートの膨張率の経時変化を示す。これらの図には、JCI-DD2 による結果もあわせて示す。

図-5 および 6 に示す安山岩骨材 An1 および An2 を使用したコンクリートについては、NaOH 溶液の濃度が高くなると膨張率が小さくなる傾向を示し、1 および 2mol/l の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートの膨張率は、JCI-DD2 (保存温度 40°C) により生じる膨張率よりも小さくなった。NaOH 溶液の濃度の上昇によりコンクリートの膨張率が小さくなった原因として、高濃度の NaOH 溶液の作用によるアルカリシリカゲル (ASR ゲル) の流動化が考えられる。NaOH 濃度が高い方が ASR は助長されるため、NaOH 濃度の上昇とともに ASR ゲルの生成量が多くなり、コンクリートの ASR 膨張は大きくなると考えられる。一方、NaOH 濃度が高くなると、ASR ゲル中の 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 ゲルの粘性が低下 (流動化) することによってコンクリート内部での ASR ゲルの膨張圧が緩和され、コンクリートの ASR 膨張は小さくなると考えられる⁵⁾。図-5 および 6 において、0.5mol/l よりも 1 および 2mol/l の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートの膨張率の方が小さくなったのは、この ASR ゲルの流動化の影響を大きく受けたためと考えられる。一方、図-7 に示す 40°C の NaOH 溶液に浸せきした Ch 骨材使用コンクリートについては、保存期間 14 週までの結果では、NaOH 溶液濃度の相違による膨張率の差はなかった。また、いずれの濃度の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートについても、それらの膨張率は JCI-DD2 で生じる膨張率とほぼ同じ値であった。

図-8~10 に 60°C の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリ

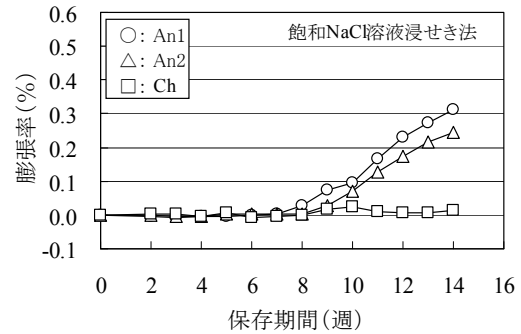


図-4 膨張率の経時変化 (飽和 NaCl 溶液浸せき法)

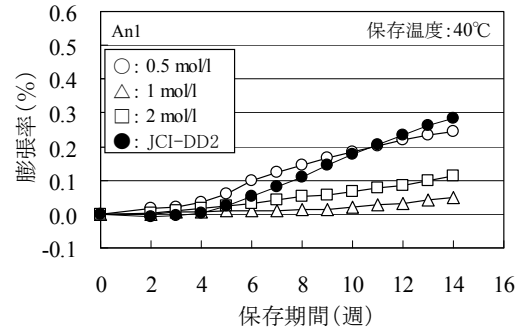


図-5 膨張率の経時変化 (An1, 保存温度 40°C)

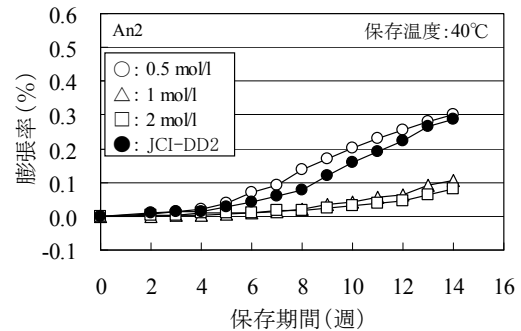


図-6 膨張率の経時変化 (An2, 保存温度 40°C)

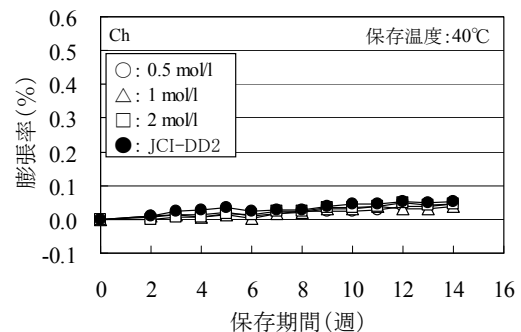


図-7 膨張率の経時変化 (Ch, 保存温度 40°C)

ートの膨張率の経時変化を骨材の種類別 (An1, An2, Ch) に示す。安山岩骨材 (An1, An2) を使用したコンクリートについては、 40°C で保存した場合と異なり、 60°C で保存した場合には、NaOH 溶液濃度の上昇とともにコンクリートの膨張率が小さくなるのではなく、An1 を使用したコンクリートについては 1mol/l, An2 を使用

したコンクリートでは 0.5 および 2mol/l の NaOH 溶液に浸せきした供試体の膨張率が最も大きくなった。また、Ch 骨材を使用したコンクリートについては、60℃で保存すると、NaOH 溶液濃度の相違により膨張率に差が生じ、1mol/l の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートの膨張率が最も大きくなった。さらに温度を高くして、80℃で保存したコンクリートについて、それらの膨張率の経時変化を図-11~13 に示す。安山岩骨材 An1 および An2 を使用したコンクリートの膨張率は NaOH 溶液濃度の上昇とともに大きくなった (図-11 および 12)。また、チャート骨材 Ch を使用したコンクリートについては、60℃で保存した場合と同様に、1mol/l の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートの膨張率が最も大きくなった (図-13)。このように、保存温度が高い場合に、NaOH 溶液濃度が高い方がコンクリートの膨張率が大きくなったのは、NaOH 濃度の上昇による ASR ゲルの流動化の影響よりも、ASR ゲルの生成量の増大による影響を大きく受けたた

めと考えられる。

以上のことから、安山岩およびチャート骨材を用いたいずれのコンクリートについても、それらを浸せきする NaOH 溶液の濃度の上昇とともに、かならずしも膨張率が大きくなるのではなく、保存温度によっては (比較的温度が低い場合)、NaOH 溶液濃度を高くすると ASR 膨張は小さくなる。したがって、NaOH 溶液濃度を過剰に高く設定すると、ASR 膨張を過小評価する可能性があるといえる。

3.3 NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートの膨張挙動に与える保存温度の影響

図-14 に、0.5mol/l の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートの膨張率と保存温度との関係を、使用した骨材別 (An1, An2, Ch) に示す。図に示した膨張率は、保存期間 4, 9 および 14 週におけるものである。An1 骨材を使用したコンクリートについては、膨張を生じてからしばらくは 60℃で保存したコンクリートの膨張率が最も

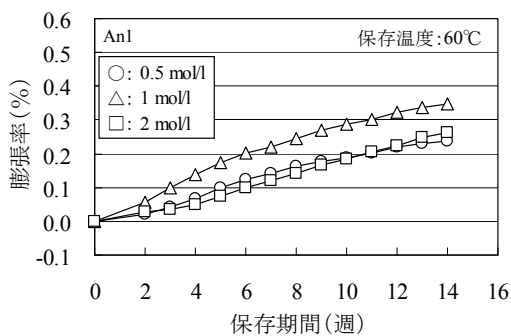


図-8 膨張率の経時変化 (An1, 保存温度 60℃)

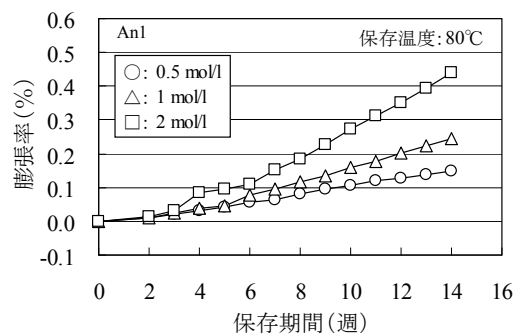


図-11 膨張率の経時変化 (An1, 保存温度 80℃)

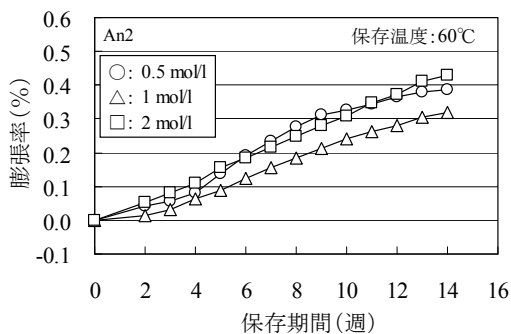


図-9 膨張率の経時変化 (An2, 保存温度 60℃)

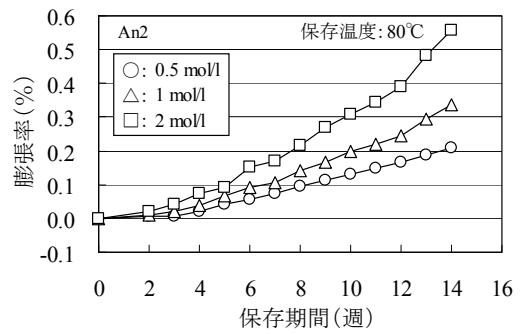


図-12 膨張率の経時変化 (An2, 保存温度 80℃)

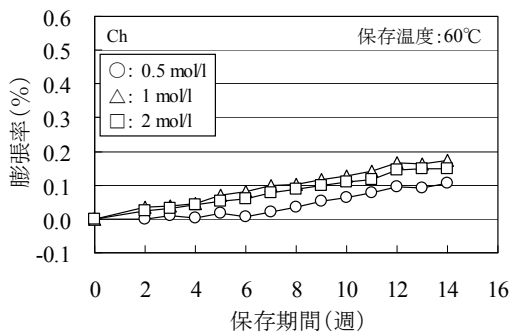


図-10 膨張率の経時変化 (Ch, 保存温度 60℃)

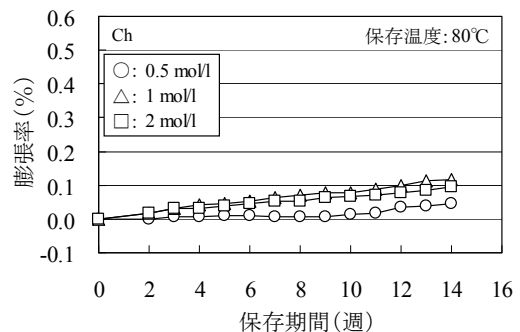


図-13 膨張率の経時変化 (Ch, 保存温度 80℃)

大きくなっており、その後、保存期間の経過とともに40℃で保存したコンクリートの膨張率が60℃で保存したものの膨張率と同程度の値となった。一方、An2およびCh骨材を使用したコンクリートについては、保存期間14週までの結果では、60℃で保存した供試体の膨張率が最も大きくなった。

図-15に、1mol/lのNaOH溶液に浸せきしたコンクリートの膨張率と保存温度との関係を、使用した骨材別に示す。An1骨材を使用したコンクリートについては、いずれの保存期間においても、60℃で保存したコンクリートの膨張率が最も大きく、40℃で保存したコンクリートの膨張率はきわめて小さかった。An2骨材を使用したコンクリートについては、膨張を生じてからしばらくは、

60℃で保存した場合に膨張率が最も大きくなったが、保存期間の経過とともに80℃で保存した供試体の膨張率が最大となった。Ch骨材を使用した供試体については、0.5mol/lのNaOH溶液に浸せきした場合と同様に、60℃で保存したコンクリートの膨張率が最も大きくなった。

図-16に2mol/lのNaOH溶液に浸せきしたコンクリートの膨張率と保存温度との関係を、使用した骨材別に示す。安山岩骨材An1およびAn2を使用したコンクリートについてはいずれも、保存温度の上昇とともに膨張率は大きくなった。一方、チャート骨材Chを使用したコンクリートについては、他の濃度のNaOH溶液に浸せきしたコンクリートと同様に、60℃で保存したときに膨張率は最大となった。

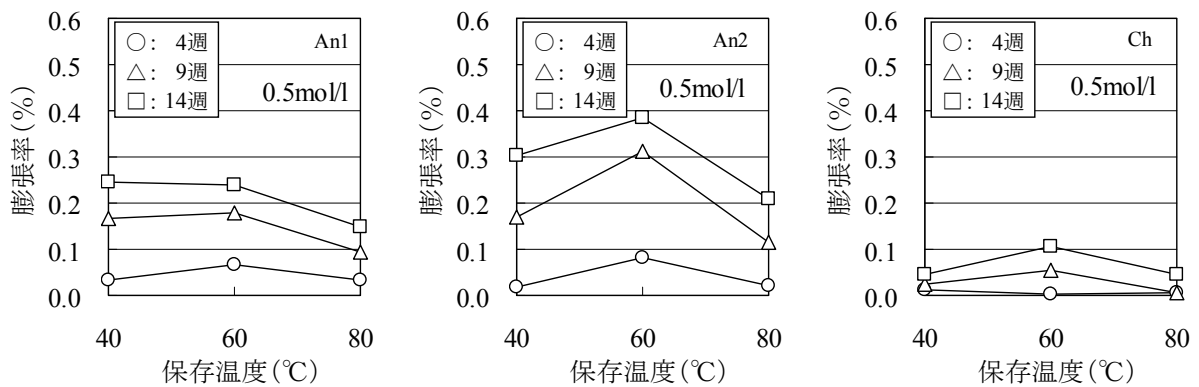


図-14 膨張率と保存温度との関係 (NaOH 溶液濃度 0.5mol/l)

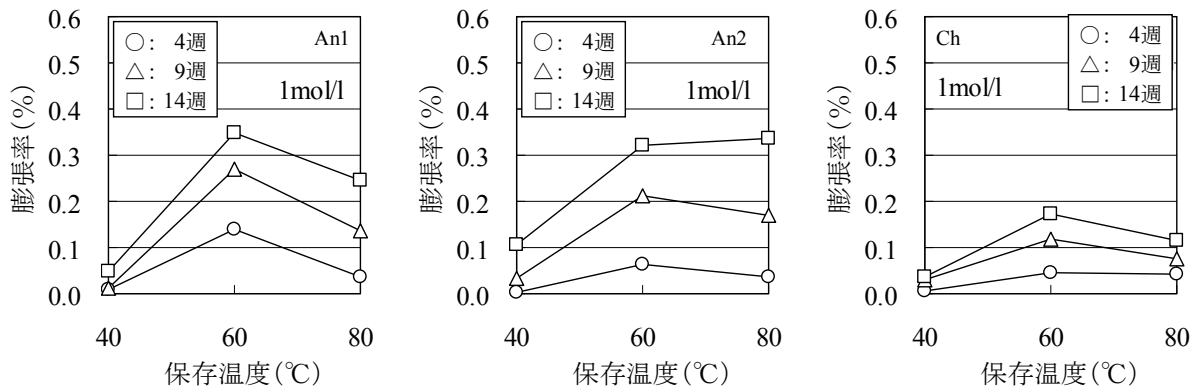


図-15 膨張率と保存温度との関係 (NaOH 溶液濃度 1mol/l)

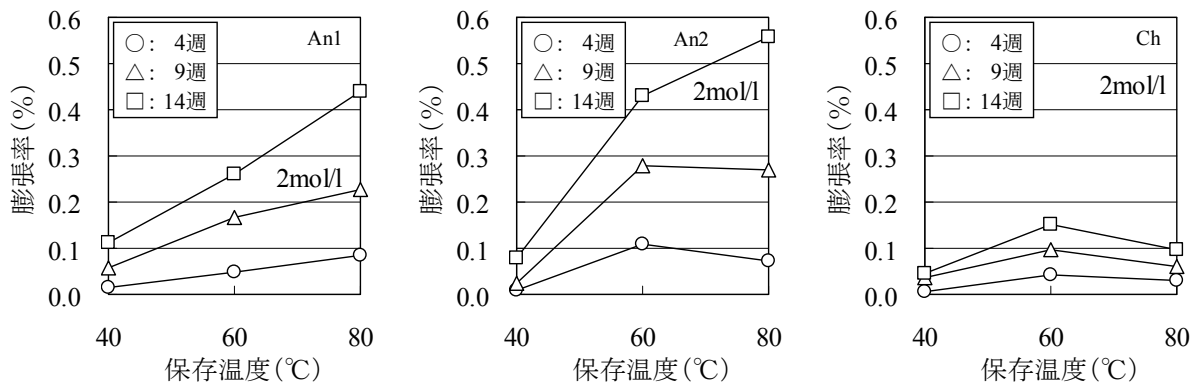


図-16 膨張率と保存温度との関係 (NaOH 溶液濃度 2mol/l)

以上の結果が示すように、チャート骨材 Ch を使用したコンクリートについては、NaOH 溶液濃度に関わらず、60°Cで保存した場合に最も膨張率が大きくなった。一方、安山岩骨材 An1 および An2 を使用したコンクリートについては、コンクリートを浸せきする NaOH 溶液の濃度の相違によって、ASR 膨張に与える保存温度の影響が異なった。安山岩骨材を用いた場合に、0.5mol/l および 1mol/l の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートについては、保存温度を過剰に高く (80°C) すると膨張率が小さくなり、2mol/l の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートについては、保存温度の上昇とともに膨張率が大きくなった原因としてつぎのことが考えられる。環境温度が高くなると ASR は促進され、多量の ASR ゲルが生成されるため、保存温度の上昇とともに ASR 膨張は大きくなると考えられる。一方、環境温度が高くなると、ASR ゲル中に Na⁺ が早期に取り込まれて、ASR ゲルの Na₂O/SiO₂ が大きくなり、ASR ゲルの流動化によって ASR 膨張が小さくなるとも考えられる。これらの相反する温度が与える影響のうち、0.5mol/l および 1mol/l の NaOH 溶液に浸せきした場合には、保存温度の上昇が ASR ゲルを流動化させる影響の方が大きく作用し、40°Cや 60°Cで保存したコンクリートと比較して、80°Cで保存したコンクリートの膨張率が小さくなったと考えられる。一方、2mol/l の NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートについては、Na⁺ が早期に取り込まれて ASR ゲルが流動化したとしても、ASR を生じるのに十分な量の NaOH がコンクリート内部へ供給されるため、保存温度の上昇が ASR ゲルを多量に生成させる影響の方が大きく作用して、保存温度の上昇とともに膨張率が大きくなったと考えられる。また、Ch 骨材を使用したコンクリートについては、その骨材の反応性が安山岩骨材 An1 および An2 よりも小さいため、2mol/l の NaOH 溶液に浸せきして保存温度を 80°Cとしたとしても、ASR ゲルを流動化させる影響を上回るほど十分な量の ASR ゲルが生成されなかったと考えられる。

以上のことから、安山岩およびチャート骨材を使用したコンクリートの膨張率は、必ずしも保存温度の上昇とともに大きくなるのではなく、保存温度を過剰に高く設定すると ASR 膨張を過小評価する可能性があると考えられる。コンクリートコアの残存膨張性を早期に評価することを考えると、本実験の範囲内では、NaOH 溶液の濃度を 1mol/l 以下とし、保存温度を 60°Cとするのがよいと考えられる。しかし、コンクリートコアの残存膨張性を評価するための促進養生条件を設定するためには、多種多様な骨材について、促進養生試験の結果と実構造物の劣化進行状況との関連性を検討する必要がある、これらのことについては今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、NaOH 溶液に浸せきした安山岩骨材あるいはチャート骨材使用コンクリートの膨張挙動に与える NaOH 溶液濃度と保存温度の影響について検討を行った。また、あわせて、それらの骨材を使用したコンクリートについて、JCI-DD2 および飽和 NaCl 溶液浸せき法も実施した。本研究の範囲内で得られた結果を以下に列挙する。

- (1) コンクリート中のアルカリ含有量を高く設定した本実験においては、安山岩骨材およびチャート骨材を使用したコンクリートはいずれも、JCI-DD2 よりも飽和 NaCl 溶液浸せき法を実施した方が膨張を生じる時期は遅かった。
- (2) 安山岩およびチャート骨材を用いたいずれのコンクリートについても、それらを浸せきする NaOH 溶液の濃度の上昇とともに、かならずしも膨張率が大きくなるのではなく、保存温度によっては (比較的溫度が低い場合)、NaOH 溶液濃度を高くすると ASR 膨張は小さくなった。
- (3) 安山岩およびチャート骨材を使用したコンクリートの膨張率は、必ずしも保存温度の上昇とともに大きくなるのではなく、保存温度を過剰に高く設定すると ASR 膨張を過小評価する可能性があると考えられた。
- (4) コンクリートコアの残存膨張性を早期に評価することを考えると、本実験の範囲内では、NaOH 溶液の濃度を 1mol/l 以下とし、保存温度を 60°Cとするのがよいと考えられた。

最後に、本研究に使用したチャート骨材の入手にあたり、愛知工業大学の岩月栄治先生にご協力いただいたことに対して謝意を表する。

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), 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