

論文 NaOH 溶液に浸漬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: NaOH 溶液に浸漬したコンクリート供試体の ASR 膨張に与えるコンクリート中のアルカリ含有量, 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結果, 以下のことが明らかとなった。(1) アルカリ含有量が多いほど ASR 膨張は大きくなる。(2) アルカリ含有量が多いときには, 供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度が高くなると ASR 膨張が小さくなる場合がある。(3) 保存温度の上昇とともに ASR が促進されるために ASR 膨張は大きくなるが, コンクリート中のアルカリ含有量や供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度によっては 80℃よりも 60℃で保存した方が ASR 膨張は大きくなる場合がある。

キーワード: ASR, 膨張率, NaOH 溶液濃度, 保存温度, JCI-DD2, デンマーク法

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に対して補修・補強を実施する際には, その構造物を適切な方法で診断し, その劣化程度を把握することが極めて重要である。その劣化診断の中で, コンクリートが ASR によって将来どの程度膨張を生じるのか (残存膨張量), その残存膨張量を正確に判断しないと, 補修や補強方法によってはコンクリート構造物が再劣化を生じて, 再補修や再補強を実施しなければならないこともある。現在, ASR により劣化したコンクリートの残存膨張量の測定には, 日本コンクリート工学協会の JCI-DD2¹⁾ による試験が一般的に実施されている。しかし, この試験方法については, コンクリートコアの直径や長さが小さくなると, 試験期間中にコンクリートからアルカリが溶出し, その結果, コンクリートの残存膨張量を小さく見積もる場合があること²⁾が指摘されている。また, 海岸構造物などのように飛来塩分がコンクリート内部に浸入するような環境や, 寒冷地において凍結防止剤が散布され, それがコンクリート内部に

浸入するような環境にあるコンクリート構造物に対しては, 構造物の供用期間中にコンクリート内部のアルカリ量が増加し, それが ASR による膨張を助長する。したがって, このような環境下にあるコンクリート構造物に対しては, JCI-DD2 による試験では残存膨張量を小さく見積もる可能性がある。そこで, 上記の問題を考慮して, コンクリートコアの残存膨張量の測定法として, デンマーク法 (供試体を 50℃の飽和塩化ナトリウム溶液に浸漬)³⁾や ASTM C1260 (80℃の 1N・水酸化ナトリウム溶液に浸漬)⁴⁾などの促進試験法の適用が試みられている⁵⁾。これらの促進試験法は外部からアルカリが供給されて ASR が促進されるために, JCI-DD2 よりも短期間でコンクリートの残存膨張性を評価できると考えられる。このような ASR の促進試験を実施する際には, ASR によるコンクリートの膨張 (ASR 膨張) に与える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える。

そこで, 本研究では, コンクリートコアを NaOH 溶液に浸漬する ASR 促進試験法について検討した。すなわち, 実験室においてコンクリートコア

*1 鳥取大学 工学部土木工学科助手 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 工学部土木工学科助教授 工博 (正会員)

*4 (株) 中研コンサルタント 顧問 工博 (正会員)

を模擬した $\phi 75 \times 150 \text{ mm}$ のコンクリート円柱供試体を作製し、その供試体の ASR 膨張に与えるコンクリート中のアルカリ含有量、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。また、比較のために、同様の供試体に対して JCI-DD2 およびデンマーク法による促進試験も実施した。

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： 3.16 g/cm^3 、全アルカリ量：0.62%）である。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）： 172 mmol/l 、溶解シリカ量（Sc）： 732 mmol/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。細骨材には非反応性骨材（砕砂（安山岩）と河川砂を質量比 9：1 で混合したもの、表乾密度： 2.64 g/cm^3 ）を使用した。コンクリート中のアルカリ含有量の調整には塩化ナトリウム（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、また実験条件を表-2 に示す。コンクリートの水セメント比は 45% とした。スランプは $8 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ とし、空気量の調整には AE 剤（主成分：アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤）を使用した。コンクリート中のアルカリ含有量は Na_2O 当量で 5 および 8 kg/m^3 の 2 水準選定し、海水や凍結防止剤の影響によるコンクリート内部へのアルカリの浸入を想定して、アルカリ含有量の調整には NaCl を使用した。供試体は $\phi 75 \text{ mm}$ 、高さ 150 mm の円柱供試体とした。供試体を浸漬する水酸化ナトリウム（NaOH）溶液の濃度を 0.5、1 および 2 mol/l の 3 水準選定し、また供試体の保存温度を 40、60 および 80°C の 3 水準選定した。

2.3 実験方法

$\phi 75 \text{ mm}$ 、高さ 150 mm 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°C

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

アルカリ含有量 (kg/m^3)	5, 8
NaOH 溶液濃度 (mol/l)	0.5, 1, 2
保存温度 ($^\circ\text{C}$)	40, 60, 80
供試体寸法 (mm)	$\phi 75 \times 150$

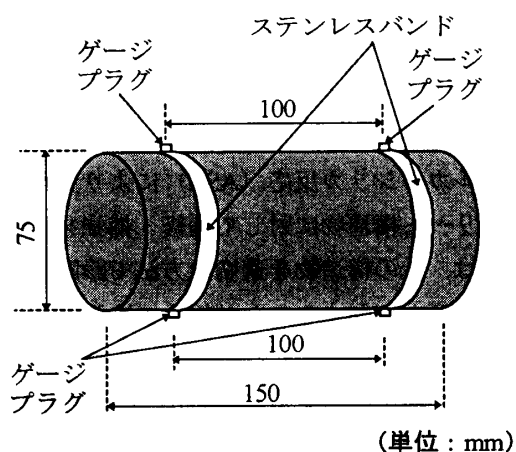


図-1 供試体の概略図

の恒温室で 35 日間封緘養生を行った。 20°C の恒温室での封緘養生終了後、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（ステンレスバンドは、1 供試体につき 2 個使用）、供試体長さの初期値を測定した。なお、検長が約 100 mm 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。続いて、ステンレス容器に入った所定の濃度の NaOH 溶液に供試体を浸漬し、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供試体の長さ変化を測定し、膨張率を算定した。なお、長さ変化の測定は、測定日の前日に供試体を NaOH 溶液に浸漬したまま恒温槽から取り出し、それを 20°C の恒温室に 24 時間静置した後に行った。また、同様の供試体に対して、 20°C の恒温室で 35 日間封緘養生を行った後に JCI-DD2（供試体

を温度 40℃、相対湿度 100%の保存層に保存), およびモルタルバーを用いた ASR の促進試験法であるデンマーク法の促進試験環境(供試体を温度 50℃の飽和 NaCl 溶液中に保存)をコンクリートコアに適用した促進試験(以下, この試験環境をコアに適用した促進試験についても本文中ではデンマーク法と称す)も実施し, それぞれの試験において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 およびデンマーク法

コンクリート中のアルカリ含有量 (R_2O) を 5 および 8kg/m³とした供試体に対して, JCI-DD2 およびデンマーク法を実施した結果を図-2 に示す。JCI-DD2 による結果をみると, R_2O を 5kg/m³とした供試体については保存期間 18 週までは膨張を生じていない。一方, R_2O を 8kg/m³とした供試体については保存期間 3 週から膨張を生じ始めて, 保存期間 5 週で膨張率が 0.1%以上となり, 保存期間 18 週で膨張率が 0.43%となっている。したがって, R_2O を 8kg/m³とした供試体は ASR により有害な膨張を生じると判定されるものである。

また, 供試体作製時のコンクリート中のアルカリ含有量が同じ供試体で比較すると, いずれのアルカリ含有量 ($R_2O=5\text{kg/m}^3$ および 8kg/m^3)とした供試体においても, デンマーク法で生じる膨張率は JCI-DD2 で生じる膨張率よりも大きい。これは, デンマーク法では外部からコンクリート中に NaCl が浸入するために, デンマーク法を実施した供試体のほうが JCI-DD2 を実施した供試体よりもコンクリート内部のアルカリ含有量が高くなるためである。現在, デンマーク法によるコンクリートコアの残存膨張量の判定基準は規格化されていないが, デンマーク法によるコアの残存膨張量について, 保存期間 13 週 (91 日) における膨張率が 0.1%以下のとき「残存膨張性無し」, 0.1~0.4%のとき「不明確」, 0.4%以上のとき「残存膨張性有り」と判定して残存膨張性の評価が行われている事例がある⁹⁾。この判定基準によると, デンマーク法を実施した供試体の膨張率から, R_2O を 5kg/m³とした供試体については, 保存期間 13 週

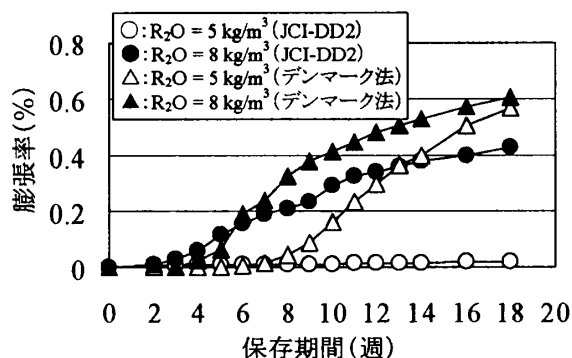


図-2 膨張率の経時変化

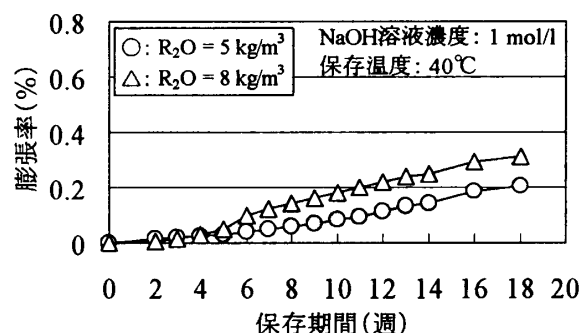


図-3 膨張率の経時変化

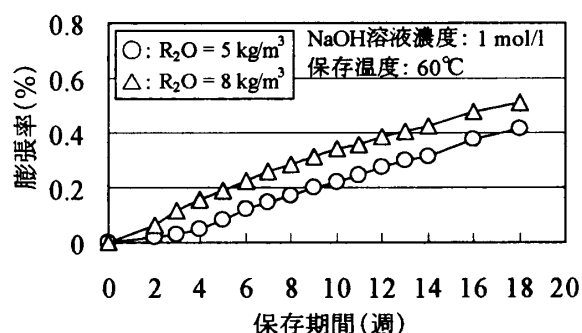


図-4 膨張率の経時変化

における膨張率は 0.37%となり, 「不明確」と判定されるものである。一方, R_2O を 8kg/m³とした供試体については, 保存期間 13 週における膨張率は 0.51%となり, 「残存膨張性有り」と判定されるものである。

3.2 アルカリ含有量の影響

R_2O を 5 および 8kg/m³とした供試体をそれぞれ 40, 60 および 80℃の NaOH 溶液 (濃度: 1mol/l) に浸漬した場合に生じる膨張率の経時変化を図-3 ~5 に示す。JCI-DD2 では保存期間 18 週まで膨張を生じていない R_2O を 5kg/m³とした供試体 (図-2) については, JCI-DD2 と同じ保存温度であっ

でも 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬することにより保存期間 4 週から膨張を生じ始め、保存期間 18 週では膨張率が 0.2% となっている。これは、供試体を 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬することにより NaOH 溶液が供試体内部に浸透し、早期に供試体内部のアルカリ濃度が ASR を生じるのに十分な濃度まで上昇したためであると考えられる。また、図-3～5 より、供試体を 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬した場合には、80℃の NaOH 溶液に浸漬した供試体でその差は極めて小さいものの、いずれの温度の NaOH 溶液に浸漬した供試体についても、保存期間 18 週までは、試験開始前のコンクリート中のアルカリ含有量が多いものほど膨張率は大きくなっていることがわかる。

3.3 NaOH 溶液濃度の影響

R_2O を 8kg/m^3 とした供試体を 0.5～2mol/l の各濃度の NaOH 溶液に浸漬し、それらをそれぞれ 40, 60 および 80℃で保存した場合の膨張率の経時変化を図-6～8 に示す。なお、図-6 には 40℃の NaOH 溶液に浸漬した供試体の結果とあわせて、同じアルカリ含有量の供試体に対する JCI-DD2 による結果も示す。図-6 より、0.5mol/l の NaOH 溶液に浸漬した場合には、保存期間 9 週までは JCI-DD2 を実施した供試体よりも NaOH 溶液に浸漬した供試体の方が膨張率は大きくなるが、それ以降の保存期間では両者の膨張率はほぼ同じ値となっている。一方、1 および 2mol/l の NaOH 溶液に浸漬した供試体の膨張率は、いずれの保存期間においても JCI-DD2 を実施した供試体の膨張率よりも小さくなっている。また、供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度が高いほど膨張率は小さくなっていることがわかる。これは、試験開始前の供試体のアルカリ含有量が 8kg/m^3 と多いため、外部からの NaOH 溶液の浸透により、供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度が高いほど早期に供試体内部の NaOH 濃度が上昇して ASR により生成されるアルカリシリカゲル (ASR ゲル) の Na_2O に対する SiO_2 のモル比 ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) が小さくなることにより ASR ゲルの粘性が低下して ASR ゲルが流動化するため⁷⁾と考えられる。

図-7 に示す 60℃の NaOH 溶液に浸漬した供試

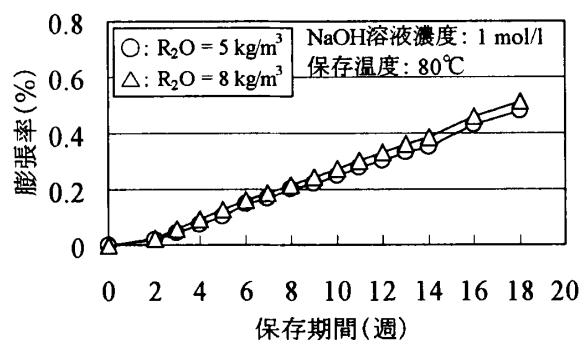


図-5 膨張率の経時変化

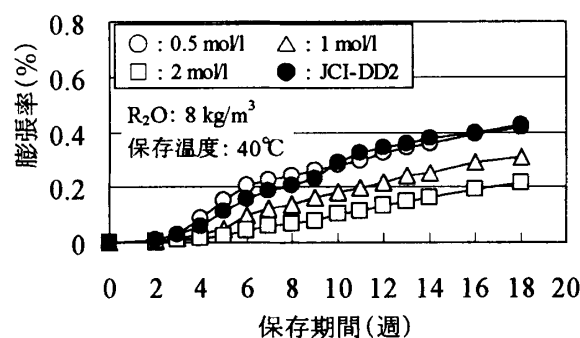


図-6 膨張率の経時変化

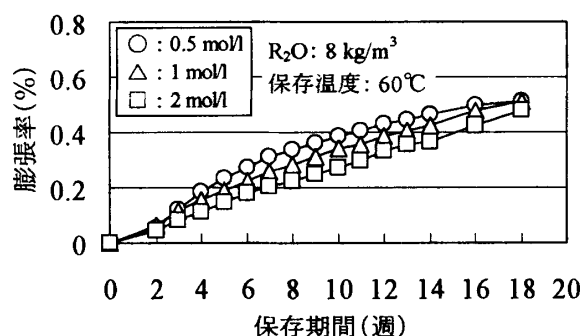


図-7 膨張率の経時変化

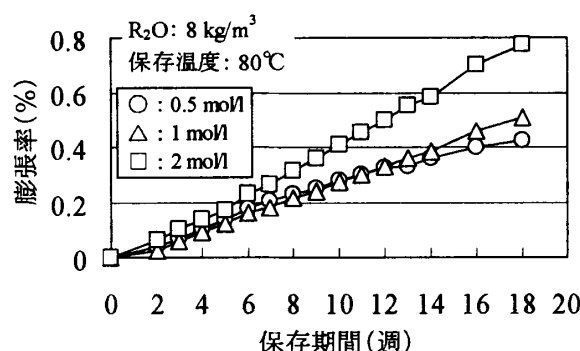


図-8 膨張率の経時変化

体についても供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度が高いほど膨張率は小さくなっているが、40℃の NaOH 溶液に浸漬した供試体と比較すると NaOH 溶液濃度の違いによる膨張率の差は小さい。また、

図-8 に示す 80℃の NaOH 溶液に浸漬した供試体については 40℃や 60℃の NaOH 溶液に浸漬した供試体と異なり、供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度が高いほど膨張率は大きくなる。したがって、試験開始前の供試体中のアルカリ含有量が多い場合には、供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度が高いほど ASR 膨張が小さくなる場合があり、また、ASR 膨張に与える NaOH 溶液濃度の影響は保存温度によって異なるといえる。

3.4 保存温度の影響

R_2O を 5kg/m^3 とした供試体を 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬し、それを 40, 60 および 80℃の NaOH 溶液に浸漬した場合の膨張率の経時変化を図-9 に示す。図より、保存温度の上昇とともに供試体の膨張率は大きくなり、40℃の NaOH 溶液に浸漬した供試体の膨張率と比較して、60 および 80℃の NaOH 溶液に浸漬した供試体の膨張率は 2 倍以上の膨張率となっている。これは、保存温度が高いほど ASR の反応速度が早くなり、早期から多量の ASR ゲルが生成されたためと考えられる。

図-10～12 に、 R_2O を 8kg/m^3 とした供試体を $0.5\sim 2\text{mol/l}$ の NaOH 溶液にそれぞれ浸漬し、それらを 40, 60 および 80℃で保存した場合の膨張率の経時変化を示す。図-10 に示す 0.5mol/l の NaOH 溶液に浸漬した供試体については、保存温度を 60℃とした場合に他の保存温度とした場合よりも膨張率が大きくなっている。また、80℃で保存した供試体と 40℃で保存した供試体とを比較すると、保存期間 4 週までは 80℃で保存した供試体の膨張率の方がやや大きい、それ以降の保存期間では両者の膨張率はほぼ同じ値となっている。図-11 に示す 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬した供試体についても 60℃で保存した供試体の膨張率が他の温度で保存した供試体の膨張率よりも大きくなっている。また、 0.5mol/l の NaOH 溶液に浸漬した供試体と異なり、 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬した供試体については、80℃で保存した供試体の膨張率は 60℃で保存した供試体の膨張率よりも小さいものの、40℃で保存した供試体の膨張率よりは大きい。一方、図-12 に示す 2mol/l の NaOH 溶液に浸漬した供試体については保存温度が高いも

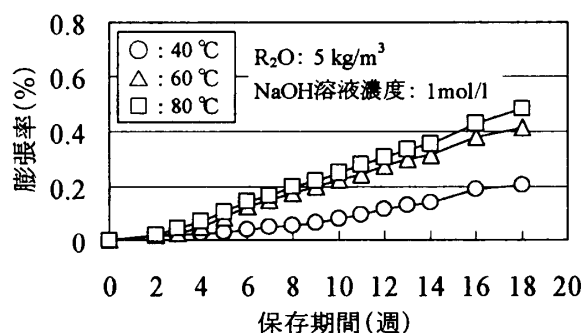


図-9 膨張率の経時変化

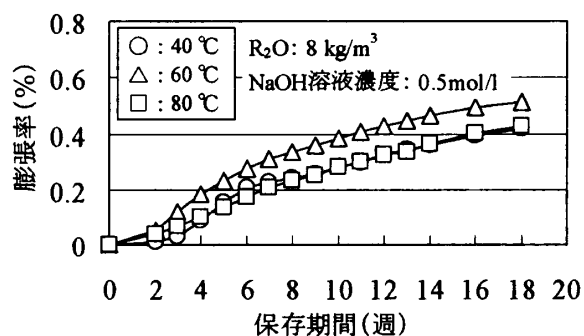


図-10 膨張率の経時変化

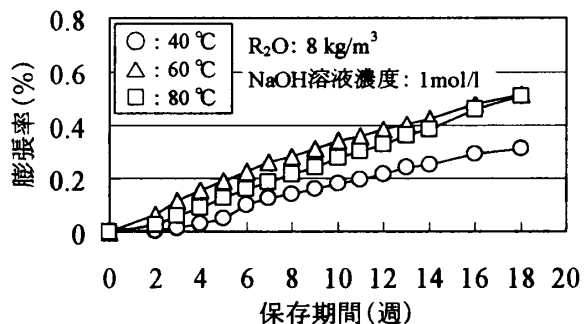


図-11 膨張率の経時変化

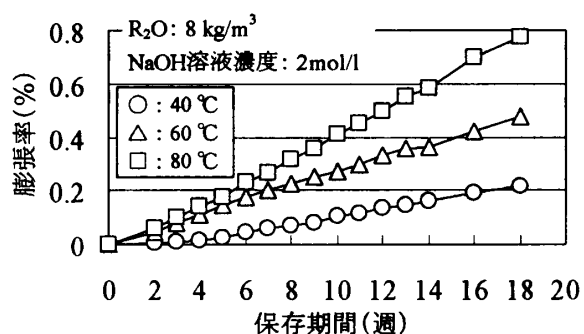


図-12 膨張率の経時変化

のほど膨張率は大きくなり、保存期間の経過とともに保存温度の違いによる膨張率の差は大きくなる。このように、 R_2O を 8kg/m^3 とした供試体に対して、 0.5 および 1mol/l の NaOH 溶液に浸漬した

場合に 60℃で保存した供試体よりも 80℃で保存した供試体の膨張率の方が小さくなった原因としては、前述した ASR ゲルの流動化の影響が考えられる。すなわち、保存温度が高いほど ASR が促進されるために生成される ASR ゲルの量は多くなるため、保存温度の上昇は ASR 膨張を大きくする要因となると考えられる。一方、保存温度が高いほど ASR ゲルが流動化する速度も速くなり⁹⁾、保存温度の上昇は ASR 膨張を小さくする要因となると考えられる。これらの ASR 膨張に与える保存温度の相反する影響により、供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度が比較的低い場合には、保存温度の上昇により ASR ゲルの生成量は増大するが、ASR ゲルが流動化する速度も速くなり、その流動化の影響の方が勝ったために 60℃よりも 80℃で保存した供試体の方が膨張率が小さくなったと考えられる。一方、濃度が高い 2mol/l の NaOH 溶液に浸漬した場合には、温度の上昇とともに ASR ゲルが流動化する速度は速くなるが、供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度が高いために ASR を持続するのに十分な量の NaOH が供試体内部に存在することになり、その結果、ASR ゲルの流動化による影響よりも ASR ゲルの量の増大による影響の方が勝り、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。

以上の結果から、試験開始前の供試体中のアルカリ含有量や供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度の相違により、ASR 膨張に与える保存温度の影響が異なるようである。また、いずれの濃度の NaOH 溶液に浸漬した場合にも、保存温度を 60℃あるいは 80℃とすることによりデンマーク法 (図-2) よりも早期に大きな膨張を生じる結果となった。

4. まとめ

本研究では NaOH 溶液に浸漬したコンクリート供試体の ASR 膨張に与えるコンクリート中のアルカリ含有量、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。本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- (1) コンクリート中のアルカリ含有量が多いほど ASR 膨張は大きくなった。

- (2) コンクリート中のアルカリ含有量が多い場合には、供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度が高くなるほど ASR 膨張が小さくなる場合があった。また、ASR 膨張に与える NaOH 溶液濃度の影響は保存温度によって異なった。
- (3) 保存温度を高くするほど ASR 膨張は大きくなるが、コンクリート中のアルカリ含有量が多い場合には、供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度によっては、80℃よりも 60℃で保存した供試体の方が膨張率が大きくなる場合があった。

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），日本コンクリート工学協会，pp.152-156，2004. 4
- 2) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，pp.150-152，2001
- 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) 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
- 5) 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, 2001
- 6) 鳥居和之：凍結防止剤によるコンクリート構造物の損傷と防止対策，セメント・コンクリート，No.635, pp.40-46, 2000.1
- 7) 中野錦一：アルカリ骨材反応の種類，メカニズムおよび特徴，コンクリート工学，Vol.24, No.11, pp.17-22, 1986.11
- 8) 川村満紀，柳場重正：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, 1984.8
- 9) 岸谷孝一ほか：コンクリート構造物の耐久性シリーズ アルカリ骨材反応，技報堂出版，pp.73-74, 1986.5