コンクリートの ASR 膨張に及ぼす促進養生条件とアルカリ含有量の影響

鳥取大学大学院　学生会員　○山田 直紀　　鳥取大学　フェロー会員　井上 正一
鳥取大学　正会員　黒田 保　　鳥取大学　正会員　吉野 公
鳥取大学　正会員　林 昭富

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・補強などの対策を行う際には，コンクリートがどの程度劣化しているのか，さらには，今後どの程度膨張を生じるのかを知ることが重要である。現在，ASR を生じたコンクリート構造物に対して，今後どの程度膨張を生じるか評価する方法としてコンクリートコアの促進膨張試験が実施されている。我が国ではコアの促進膨張試験として JCI-DD2 が広く用いられている。JCI-DD2 は ASR の危険性を判定するのに長期間を要すること，試験中にコンクリート内部のアルカリ成分が外部に溶出する場合があること，海水や凍結防止剤など外部からアルカリが供給される環境に対応していないことなどの問題点がある。これらの問題点を考慮して，最近 ASTM C 1260 やデンマーク法などの骨材のアルカリシリカ反応性判定試験法で採用されている促進試験条件をコンクリートコアの促進膨張試験に適用する試みがなされている。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 膨張に与える促進養生条件の影響を明らかにしたうえで，促進養生条件を設定することが重要であると考える。そこで本研究では，コンクリートの ASR 膨張に及ぼす要因として供試体を浸漬させる NaOH 溶液の濃度，保存温度、アルカリ含有量を選定し，これらの要因がコンクリートの ASR 膨張に及ぼす影響について検討した。さらに，デンマーク法の試験結果と比較して，ASR の残存膨張性を早期に判定するための試験条件・判定基準について検討した。

2. 実験概要

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。粗骨材には反応性骨材(安山岩)と非反応性骨材(安山岩)を，全粗骨材に対する反応性骨材の質量比(反応性骨材混合割合)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の砕砂と陸砂を質量比 9:1 の割合で混合して使用した。コンクリートのアルカリ含有量(R_2O)は Na_2O 当量で 3，5，8kg/m³ とし，R_2O の調整には NaCl を使用した。コンクリートの配合を表 1 に，実験要因を表 2 に示す。実験には φ75×150mm のコンクリート円柱供試体を使用した。作製した供試体を湿布で包み，その上からラップフィルムとガムテープを巻きつけ密閉し，20℃の恒温室で 5 週間養生した。養生終了後，ゲージプラグを貼り付けたステンレスバンドを，基長 100mm となるように供試体に取り付け，初期長さを測定し，所定の濃度の NaOH 溶液に浸漬させて 40℃，60℃，80℃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

表 1 コンクリートの配合

W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m³)			
		W	C	S	G
45	41	180	400	702	1012
65	45	180	277	816	1002

表 2 実験要因(以下 mol/l を M と記す)

	NaOH溶液浸漬法	デンマーク法
保存温度(℃)	40, 60, 80	50
溶液濃度(mol/l)	0.5, 1, 2	飽和
アルカリ含有量(kg/m³)	3, 5, 8	3, 5, 8

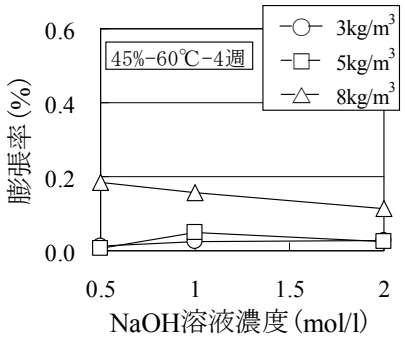

図 1 膨張率と NaOH 溶液濃度の関係

出した。なお，長さ変化の測定は，供試体を溶液に浸漬させたままの状態で, 各恒温槽から 20℃の恒温室へ移し 24 時間経過後に行った(以下, NaOH 溶液に浸漬させた試験法を NaOH 溶液浸漬法と記す)。また，比較用の試験としてデンマーク法(供試体を飽和 NaCl 溶液に浸漬させ 50℃で保存)を実施し供試体の長さ変化を測定した。

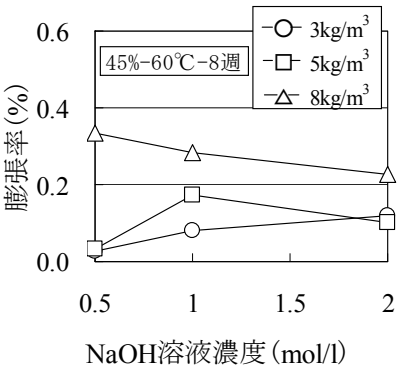

図 2　膨張率と NaOH 溶液濃度の関係

3. 実験結果と考察

3.1 供試体を浸漬させる NaOH 溶液濃度の影響

図 1，2 および 3 に W/C=45%とした供試体を 60℃の NaOH 溶液に浸漬して 4, 8 および 12 週間保存したときの膨張率と NaOH 溶液濃度との関係を示す。R_2O が 3 および 5kg/m^3 の供試体では，保存期間 4 週ではいずれの濃度の NaOH 溶液に浸漬させても膨張は生じていないが，保存期間 8 週および 12 週では 1M および 2M の NaOH 溶液に浸漬した供試体で膨張を生じた。R_2O が 3 kg/m^3 の供試体ではいずれの保存期間においても，NaOH 溶液濃度が高くなるにつれて膨張率が大きくなった。R_2O が 5 kg/m^3 の供試体では 1 M の NaOH 溶液に浸漬させると膨張率が最も大きくなった。R_2O が 8kg/m^3 の供試体では，いずれの保存期間においても，NaOH 溶液濃度が高くなるにつれて膨張率が小さくなっている。

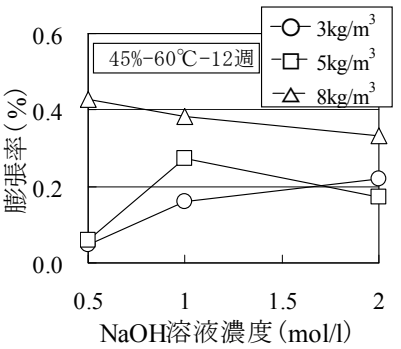

図 3　膨張率と NaOH 溶液濃度の関係

R_2O が 5 および 8kg/m^3 の供試体を 2M の NaOH 溶液に浸漬した場合に，1M の NaOH 溶液に浸漬したものよりも膨張率が小さくなった原因としては，NaOH 溶液の濃度が高くなるとアルカリシリカゲル(以下 ASR ゲルと略す)の化学組成の内 SiO_2 と Na_2O のモル比(以下 SiO_2/Na_2O と略記する)が小さくなり，ASR ゲルの粘性が低下し，ASR ゲルが流動化したことが考えられる [1)]。以上のことより供試体を浸漬させる NaOH 溶液濃度を高くしても，必ずしも膨張率は大きくならないことがわかる。

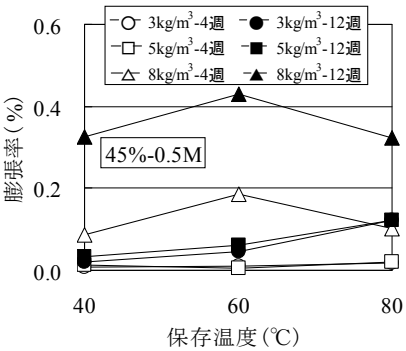

図 4　膨張率と保存温度の関係

3.2 保存温度の影響

図 4，5 および 6 に W/C=45%とした供試体を 0.5，1，2Mの NaOH 溶液に浸漬して 4 および 12 週間保存したときの膨張率と保存温度の関係を示す。R_2O=3 および 5kg/m^3 の供試体では，浸漬する NaOH 溶液濃度の違いにかかわらず，保存温度が高いほど膨張率は大きくなっている。R_2O=8kg/m^3 の供試体では，NaOH 溶液濃度が 2M のとき R_2O=3 および 5kg/m^3 の供試体と同様に，保存温度が高いほど膨張率は大きくなったが，0.5M の NaOH 溶液に浸漬した時は 60℃で最も大きな膨張率となり， 80℃では 40℃で保存した供試体とほぼ同じ膨張率となっている。また，1M の NaOH 溶液に浸漬させたときは 60℃で最も大きな膨張率となり，つぎに，80℃で保存した供試体の膨張率が大きく， 40℃で保存したときに最も小さな膨張率となった。

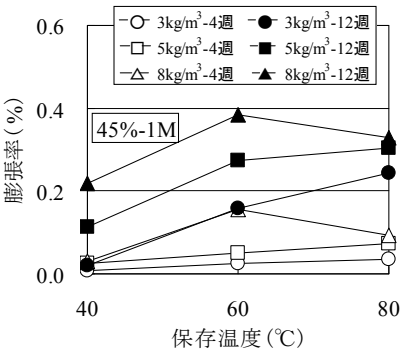

図 5　膨張率と保存温度の関係

このように，供試体を浸漬させる NaOH 溶液濃度によって保存温度が ASR 膨張に及ぼす影響が異なる。この原因として保存温度が ASR 膨張に及ぼす相反する影響が考えられる。つまり，保存温度が高いほど ASR が促進され ASR ゲルの生成量は多くなるため，保存温度の上昇は ASR 膨張を大きくする要因であると考え

られる。しかし，保存温度が高すぎるとASRゲルが流動化する速度が増し，ASR 膨張を小さくする要因となる場合もあると考えられる。ただし，2Mの NaOH 溶液に浸漬させた場合には十分な濃度の NaOH 溶液がコンクリート内部に浸透するため，保存温度の上昇とともに膨張率は大きくなったと考えられる。

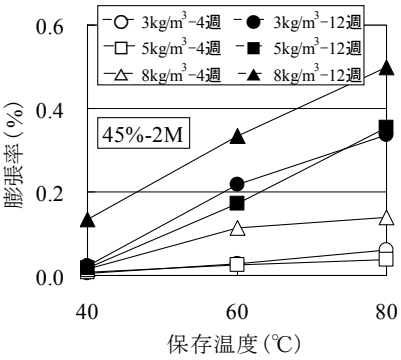

図 6　膨張率と保存温度の関係

3.3 アルカリ含有量の影響

図 7，8 および 9 に W/C=45%とした供試体を 0.5 および 2M の NaOH 溶液に浸漬させたときの膨張率の経時変化を示す。2Mの NaOH 溶液に浸漬して 60℃で保存した供試体ではやや異なるが，保存する温度や浸漬する NaOH 溶液濃度の値にかかわらず，R_2O の値が大きくなるほど膨張率は大きくなった。これは，NaOH 溶液が外部から供試体内部へ浸透するまでに時間がかかるため，外部から ASR を生じるのに十分な濃度の NaOH 溶液が浸透するまでは，内部にもともと十分な量のアルカリを含有する供試体のほうが膨張率が大きくなったと考えられる。また，供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度が高いほど R_2O の違いによる供試体の膨張率の差が小さくなっている。これは，R_2O=8kg/m³の供試体については高濃度の NaOH 溶液に浸漬することにより ASR ゲルの流動化を生じて膨張率が小さくなったためと考えられる。また，供試体の保存温度が 80℃のとき，いずれの濃度の NaOH 溶液に浸漬した供試体についてもかかわらず，R_2O の違いによる供試体の膨張率の差は他の温度で保存した供試体よりも小さくなっている。これは，保存温度が高いことによりコンクリート内部への NaOH 溶液の浸透速度が速くなり，その結果，R_2O=3kg/m³ の供試体については ASR が助長されて ASR ゲルの生成量が増大して膨張率が大きくなり，一方，8kg/m³ の供試体については ASR ゲルの流動化の影響を受けて膨張率が小さくなることにより，R_2O の相違による膨張率の差が他の温度で保存した供試体よりも小さくなったと考えられる。

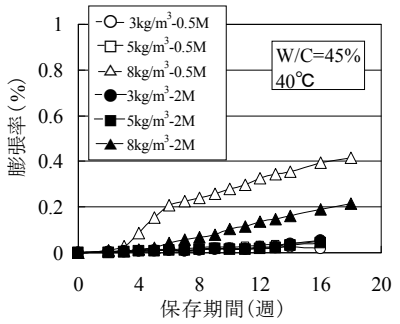

図 7 膨張率とアルカリ含有量の関係

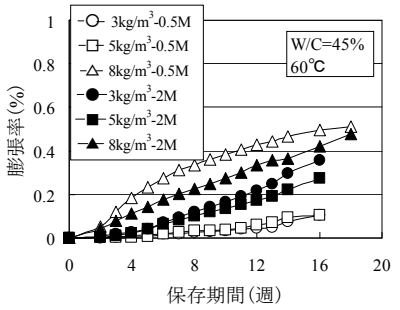

図 8 膨張率とアルカリ含有量の関係

以上のことから，保存温度が低い(40 および 60℃)場合には，供試体の膨張率は供試体の R_2O に影響を受け，R_2O が多い供試体の膨張率は大きくなる。一方，保存温度が高くなる(80℃)と， R_2O の相違による膨張率の差は小さくなる。

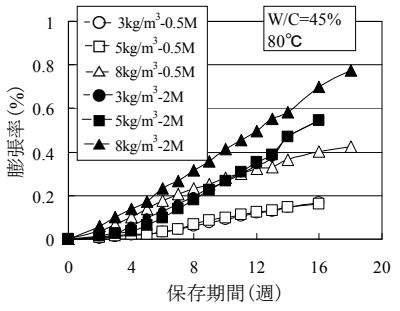

図 9 膨張率とアルカリ含有量の関係

3.3 デンマーク法と NaOH 溶液浸漬法の比較

近年，デンマーク法の促進養生条件をコンクリートコアの促進養生試験に適用し，保存期間 13 週でコンクリートコアが有害な残存膨張を生じるか否かを判定する試みが行われている。本研究では，デンマーク法よりも早期に残存膨張性を評価するため，図 10 に NaOH 溶液浸漬法の各促進条件で 5 週間保存したときの膨張率の比較を示す。なお，図には，早期に大きな膨張が生じにくい保存温度 40℃のもの，およびデンマーク法で材齢 13 週まで膨張が生じなかった W/C=65%，R_2O=3kg/m³ の供試体を除いている。図より，いずれの配合の供試体についても，供試体の保存温度と浸漬させる NaOH 溶液濃度が 60℃で 1M，80℃で 1M，80℃で 2M の条件が他の条件よりも早期に大きな膨張を生じている。そこで，NaOH 溶液浸漬法のこれらの条件で 5 週

間保存したときの膨張率とデンマーク法で13週間保存したときの膨張率の関係を図 11 に示す。図より，1M の NaOH 溶液に浸漬して 80℃で保存した供試体の保存期間 5 週における膨張率と，デンマーク法の保存期間 13 週における膨張率との間には高い相関関係があることがわかる。この結果から，NaOH 溶液浸漬法(供試体を 1M の NaOH 溶液に浸漬して 80℃で保存)によって保存期間 5 週でコアの残存膨張性を判定するための基準を設定することを試みる。

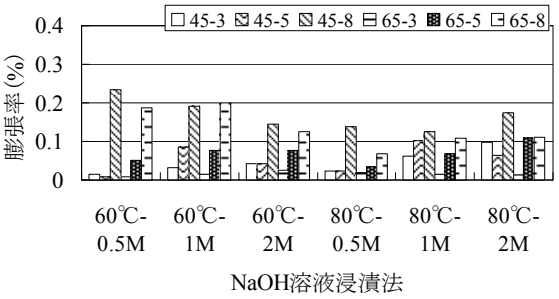

図 10　膨張率の比較

デンマーク法の判定基準は，保存期間 13 週における膨張率が 0.4%以上で「膨張性あり」，0.1～0.4%で「不明確」，0.1%未満で「膨張性無し」である。この基準値に基づき，NaOH 溶液浸漬法における判定基準値を設定する。式(1)は，1M の NaOH 溶液に浸漬して 80℃で保存した供試体の保存期間 5 週における膨張率とデンマーク法の保存期間 13 週における膨張率との関係を示す式である。

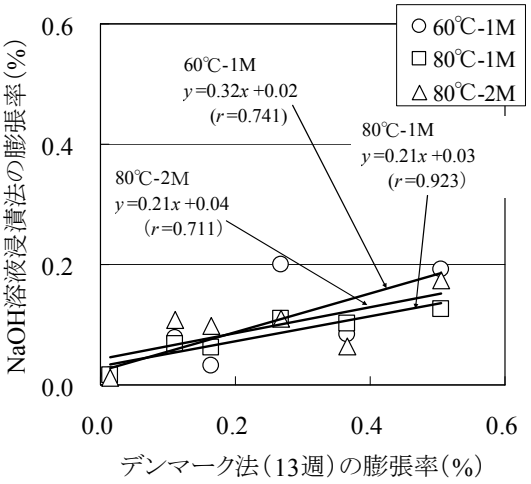

図 11　NaOH 浸漬法とデンマーク法との比較

$y=0.207x+0.03$　$(r=0.923)$　　（1）

y：1M の NaOH 溶液に浸漬して 80℃で保存した供試体の保存期間 5 週における膨張率（%）

x：デンマーク法の保存期間 13 週における膨張率（%）

r：相関係数

式(1)から，デンマーク法におけるコアの残存膨張性の判定基準値(保存期間 13 週)である「0.4%」と「0.1%」の膨張率に対応する NaOH 溶液浸漬法(供試体を 1M の NaOH 溶液に浸漬して 80℃で保存）の保存期間 5 週における膨張率(NaOH 溶液浸漬法における判定基準値)を算出すると，「0.11%」と「0.05%」となる。

4. まとめ

本研究では，供試体を浸漬させる NaOH 溶液の濃度およびアルカリ含有量がコンクリートの ASR 膨張に及ぼす影響について検討した。さらに，デンマーク法の試験結果と比較して ASR の残存膨張性を早期に判定するための試験条件･判定基準について検討した。本研究で得られた結果を以下に列挙する。

(1)供試体を浸漬する NaOH 溶液の濃度を高くしても，必ずしも膨張率は大きくならなかった。

(2)供試体を浸漬する NaOH 溶液濃度や R_2O の違いによって，保存温度を高くしても必ずしも膨張率は大きくならなかった。

(3)コンクリートコアの ASR による残存膨張性の判定法について，コンクリートコアを 1M の NaOH 溶液に浸漬して 80℃で保存し，保存期間 5 週における膨張率が 0.11%以上のとき「膨張性あり」，0.05～0.11%のとき「不明確」，0.05%未満のとき「膨張性無し」と判断でき，NaOH 溶液浸漬法はデンマーク法よりも残存膨張性の判定に要する期間を短くできる可能性があると考えられる。

参考文献

1)田村博他：コンクリートの耐久性シリーズ「アルカリ骨材反応」，技報堂出版，pp.66-68

2)田村博他：コンクリートの耐久性シリーズ「アルカリ骨材反応」，技報堂出版，pp.56-61