論文　コンクリートの ASR 膨張に与える反応性骨材混入量および促進養生条件の影響

黒田　保[*1]・井上　正一[*2]・吉野　公[*3]・西林　新蔵[*4]

要旨：NaOH 溶液に浸せきして 60℃で保存した供試体の ASR 膨張に与える NaOH 溶液濃度と反応性骨材混合割合の影響について検討を行い，さらに，NaOH 溶液浸せき法とデンマーク法を実施した供試体の膨張率の比較・検討を行った結果，つぎのことが明らかとなった。(1) 供試体の反応性骨材混合割合および W/C が異なると，ASR 膨張と NaOH 溶液濃度との関係は異なった。(2) 供試体を浸せきする NaOH 溶液濃度および W/C の相違によって，ASR 膨張と反応性骨材混合割合との関係は異なった。(3) NaOH 溶液浸せき法によって比較的早期に生じる膨張とデンマーク法によって生じる膨張との間には相関関係があった。

キーワード：ASR，膨張率，促進養生，反応性骨材混入量，NaOH 溶液，デンマーク法

1. はじめに

アルカリシリカ反応（ASR）によって劣化した構造物に対して補修・補強などの適切な対策を実施する際には，その構造物の劣化状況を把握し，さらに，今後の劣化進行予測を正確に行うことが重要である。この判断を誤ると，補修・補強後に再劣化を生じる場合もある。ASR により劣化したコンクリート構造物が今後も有害な膨張（残存膨張）を生じるか否かを判定する試験法として，一般的に JCI-DD2[1)]に準じて試験が実施されている。また，最近では，外部から飛来塩分や海水，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，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・水酸化ナトリウム（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（50℃の飽和 NaCl 溶液に供試体を浸せきする方法）[3)]で採用されている促進養生条件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実施されている[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，さらに高温下で供試体を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。これまで，著者らはコンクリートの ASR 膨張に与える促進養生条件の影響について検討を行っている。その結果，NaOH 溶液と NaCl 溶液とを比較して，NaOH 溶液に浸せきした方が早期に大きな ASR 膨張を生じること，また，40℃～80℃の範囲内では，保存温度を高くするほど ASR 膨張は大きくなるのではなく，設定温度が高すぎる（80℃）と ASR 膨張を実際よりも小さく見積もる可能性があることを示している。また，これらの検討結果から，60℃の NaOH 溶液に浸せきする条件が，比較的早期に大きな ASR 膨張を生じる条件であることを明らかにしている[5)]。

本研究では，ASR 膨張に影響を与える要因のうちの一つであるコンクリート中の反応性骨材量（反応性骨材混合割合）に着目し，コンクリート供試体の ASR 膨張に与える反応性骨材混合割合および促進養生条件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/cm^3，全アルカリ量＝0.62%，JIS A 1146：2001 の規格を満足するもの）である。細骨材には非反応性骨材（安山岩砕砂と陸砂を質量比 9：1 で混合したもの，表乾密度＝2.64g/cm^3）を使用した。粗骨材には反応性骨材（安山岩，表乾密度＝2.60g/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（JIS A 1146）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＝2.73g/cm^3）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 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。著者らは，コンクリート供試体を保存する温度を高く設定しすぎると ASR による膨張を小さく見積もる可能性があり，60℃で供試体を保存することにより比較的早期に ASR による大きな膨張を生じるこ

*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)

とを報告している[5)]。そこで，本研究では，ASR の促進条件として保存温度を 60℃に設定した。促進養生条件の違いが反応性骨材量に関するペシマム現象に与える影響を検討するために，反応性骨材混合割合（全粗骨材質量に対する反応性粗骨材の質量比）を 30，60 および 100%の 3 水準選定した。また，供試体を浸せきする NaOH 溶液濃度は反応性骨材量に関するペシマム現象に影響を与えると考えられるため，その濃度を 0.5，1 および 2mol/l の 3 水準選定した。コンクリートの水セメント比を 45 および 65%とした。また，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にあり，コンクリート中にすでに NaCl が浸透している構造物を想定して，コンクリートの練混ぜ時に NaCl を混入した。なお，このとき，コンクリート中のアルカリ含有量が Na_2O 当量で 8kg/m^3 となるように NaCl の混入量を決定した。コンクリートの空気量は 4.5±1.5%とし，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。本実験で使用した供試体はφ75×150mm の円柱供試体である。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。なお，**表-2** は，反応性骨材混合割合を 100%としたコンクリートの配合を示しており，他の反応性骨材混合割合のコンクリートについては，粗骨材の表乾密度の違いにより単位粗骨材量（G）のみが異なる。すなわち，W/C＝45%で反応性骨材混合割合を 30 および 60%としたコンクリートの単位粗骨材量はそれぞれ G＝1028kg/m^3 および 1012 kg/m^3 であり，W/C＝65%で反応性骨材混合割合を 30 および 60%としたコンクリートの単位粗骨材量はそれぞれ G＝1017 kg/m^3 および 1002 kg/m^3 である。

また，JCI-DD2（40℃，R.H.95%以上で供試体を保存）およびデンマーク法（50℃の飽和 NaCl 溶液に供試体を浸せき）も実施した。

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（φ75×100mm）を脱型し，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（ゲージプラグ間の長さ）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 および 2mol/l）の NaOH 溶液に浸せきして，それを 60℃に設定した恒温槽内で保存した。所定の保存期間経過後に供試体に取り付けたゲージプラグ間の長さ変化を測定し，膨張率を算出した。なお，長さ変化側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 20℃の恒温室へ移動し，そこで 24 時間静置した後に長さ変化の測定を行った。以下では，この方法を NaOH 溶液浸せき法と呼ぶ。

また，上記の実験とともに，供試体作製後に 20℃の恒温室で 35 日間封緘養生を行った供試体について，JCI-DD2（40℃，R.H.95%以上の環境下で供試体を保存）およびデンマーク法（50℃の飽和 NaCl 溶液中に供試体を保存）による促進養生試験も実施した。

表-1　実験条件

W/C（%）	45，65
反応性骨材混合割合（%）	30，60，100
溶液の種類	NaOH 溶液
保存温度（℃）	60
溶液濃度（mol/l）	0.5，1，2
供試体寸法（mm）	φ75×150

表-2　コンクリートの示方配合

反応性骨材混合割合（%）	W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m^3）			
			W	C	S	G
100	45	41	180	400	702	993
100	65	45	180	277	816	983

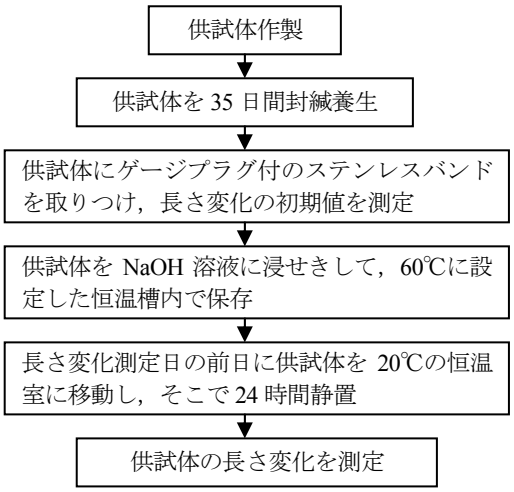

図-1　実験方法（NaOH 溶液浸せき法）

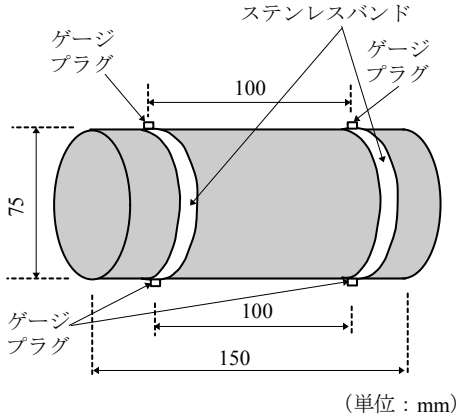

図-2　供試体外略図

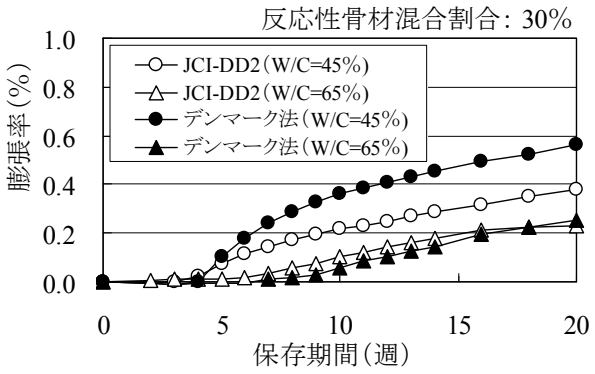

図-3　膨張率の経時変化

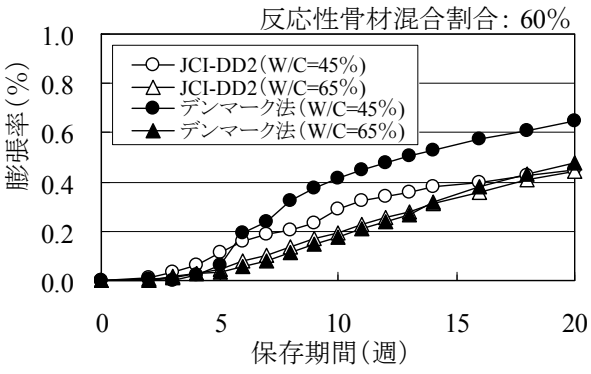

図-4　膨張率の経時変化

3. 実験結果および考察

3.1 JCI-DD2 およびデンマーク法による結果

反応性骨材混合割合を 30，60 および 100%とした W/C＝45%と 65%の供試体に対して，JCI-DD2 およびデンマーク法を実施した結果を図-3～5 に示す。反応性骨材混合割合が同じ供試体で比較すると，JCI-DD2 とデンマーク法のいずれの促進養生条件下においても，W/C＝45%の供試体よりも 65%の供試体のほうが膨張率は小さい。これは，W/C が大きいコンクリートのほうが内部の細孔径が大きく，また細孔量が多いため，生成されるアルカリシリカゲル（ASR ゲル）の量が同じ場合には，W/C が大きいコンクリートのほうが ASR の吸水膨張による膨張圧が緩和されるためと考えられる [6]。また，W/C＝45 %の供試体については，JCI-DD2 と比較してデンマーク法のほうが外部から NaCl が浸透してコンクリート内部のアルカリ含有量が多くなること，および保存温度が高いことから，デンマーク法を実施した供試体のほうが膨張率は大きくなった。一方，W/C＝65%の供試体については，JCI-DD2 とデンマーク法を実施した供試体の膨張率はほぼ同等の値となった。

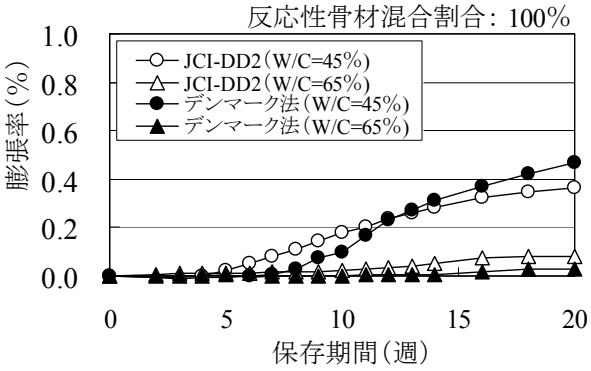

図-5　膨張率の経時変化

図-6 は，JCI-DD2 およびデンマーク法を実施した W/C＝45%のコンクリートに対して，保存期間 4，8，12 および 20 週における膨張率と反応性骨材混合割合との関係を示したものである。これより，JCI-DD2 およびデンマーク法を実施した供試体はいずれも，本実験で設定した反応性骨材混合割合においては，ペシマム現象 [7]により，反応性骨材混合割合を 60%とした供試体の膨張率が最も大きくなった。図-7 に示す W/C＝65%の供試体についても，JCI-DD2 およびデンマーク法のいずれの促進養生条件下においても，反応性骨材混合割合を 60%とした供試

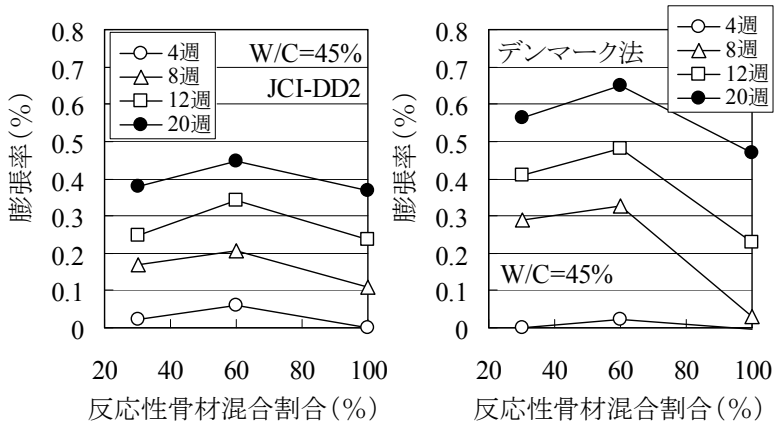

図-6　膨張率と反応性骨材混合割合との関係

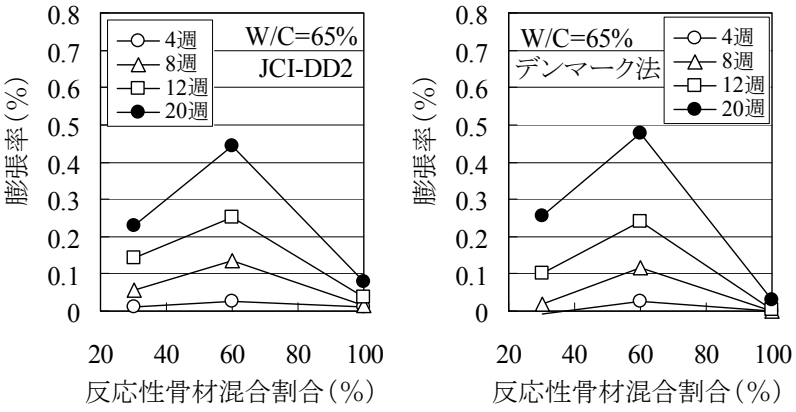

図-7　膨張率と反応性骨材混合割合との関係

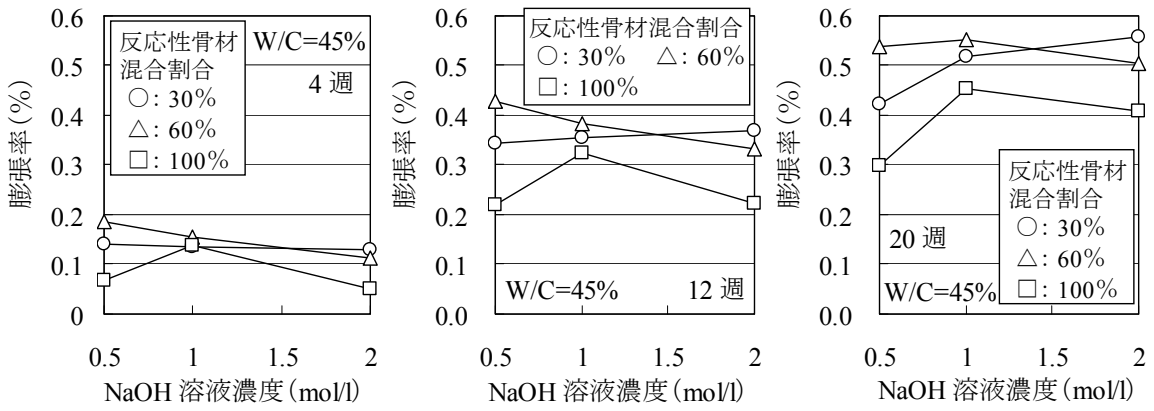

図-8　膨張率と NaOH 溶液濃度との関係

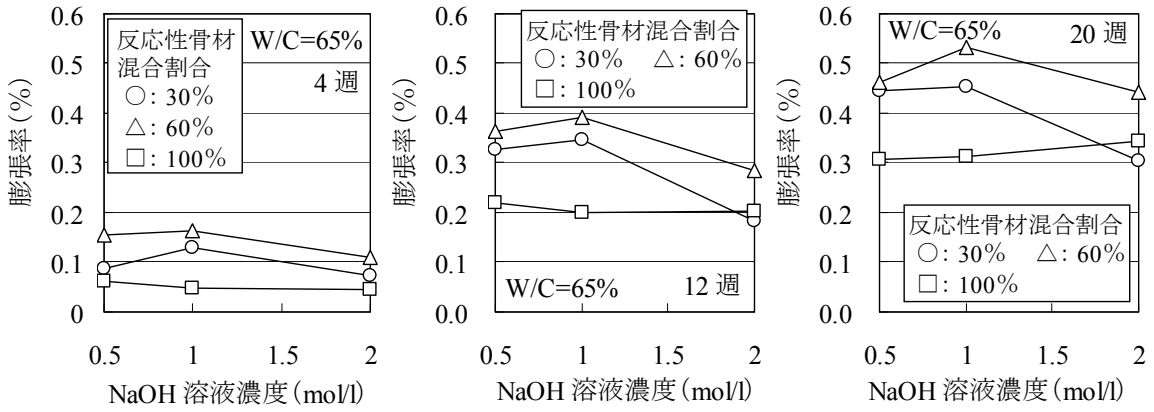

図-9　膨張率と NaOH 溶液濃度との関係

体の膨張率が最も大きくなった。また，いずれの促進養生条件下においても，W/C＝45%の供試体と比較して，W/C＝65%の供試体のほうが反応性骨材混合割合の相違による膨張率の差が大きい。これは，W/C が大きい供試体のほうが内部の細孔径が大きく，また，細孔量が多いため，ASR ゲルによる同じ大きさの膨張圧を発生させる場合，W/C が小さい供試体よりも多くの ASR ゲルを必要とするためと考えられる。すなわち，反応性骨材混合割合を 100%とした供試体で生成される ASR ゲルの量について，W/C＝45%の供試体では大きな膨張圧を発生するが，W/C＝65%の供試体では細孔径が大きく，かつ細孔量が多いため，供試体に大きな膨張を生じさせるために必要な膨張圧が発生しなかったと考えられる。また，反応性骨材混合割合が 30%の供試体に生成される ASR ゲル量でも，W/C＝65%の供試体に対して大きな膨張を生じさせるほどの膨張圧が発生しなかったと考えられる。すなわち，W/C＝45%の供試体と比較して W/C＝65%の供試体のほうが，ASR ゲルの生成量が少ない供試体（本実験では反応性骨材混合割合＝30%および 100%の供試体）で細孔径や細孔量の増大による ASR ゲルの膨張圧の緩和の影響を大きく受けるため，W/C が大きい供試体（65%）のほうが反応性骨材混合割合（ASR ゲル量）の相違による膨張率の差が大きくなったと考えられる。

3.2 NaOH 溶液に浸せきした供試体の ASR 膨張と NaOH 溶液濃度との関係

NaOH 溶液に浸せきして 60℃で 4，12 および 20 週間保存した W/C＝45%の供試体の膨張率と NaOH 溶液濃度との関係を**図-8** に示す。反応性骨材混合割合を 30%とした供試体について，保存期間 4 週ではいずれの濃度の NaOH 溶液に浸せきした供試体についても膨張率はほぼ同じ値となっているが，12 週，20 週と保存期間が経過すると NaOH 溶液濃度の上昇とともに膨張率は大きくなった。反応性骨材混合割合を 60%とした供試体については，いずれの保存期間においても NaOH 溶液濃度の上昇とともに膨張率が小さくなっているが，20 週では NaOH 溶液濃度の相違による膨張率の差は小さくなっている。一方，反応性骨材混合割合を 100%とした供試体については，いずれの保存期間においても 1mol/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。

図-9 に示す W/C＝65%の供試体については，反応性骨材混合割合を 30 および 60%とした供試体の膨張率は，1mol/l の NaOH 溶液に浸せきした場合にもっとも大きくなる傾向にある。一方，反応性骨材混合割合を 100%とした供試体については，NaOH 溶液濃度の相違による膨張率の差は小さく，保存期間 20 週で NaOH 溶液濃度の上昇とともに膨

張率がやや大きくなる傾向にある。

これらの結果から，供試体の反応性骨材混合割合やW/Cが異なると，ASR膨張とNaOH溶液濃度との関係が異なることがわかる。

3.3 NaOH溶液に浸せきした供試体のASR膨張と反応性骨材混合割合との関係

0.5, 1および2mol/lのNaOH溶液に浸せきして60℃で保存したW/C＝45%の供試体について，保存期間4，8，12および20週における膨張率と反応性骨材混合割合との関係を**図-10**に示す。0.5および1mol/lのNaOH溶液に浸せきした供試体については，JCI-DD2およびデンマーク法（**図-6**）の結果と同様に，反応性骨材混合割合を60%とした供試体の膨張率が最も大きくなった。また，0.5mol/lのNaOH溶液に浸せきした供試体と比較して，1mol/lのNaOH溶液に浸せきした供試体については，反応性骨材混合割合の相違による膨張率の差が小さい。一方，2mol/lのNaOH溶液に浸せきした供試体については，反応性骨材混合割合の増加とともに膨張率が小さくなった。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，ASR膨張と反応性骨材混合割合との関係が異なることがわかる。このことから，浸せきさせるNaOH溶液濃度の相違によって，反応性骨材混合割合に関するペシマム値が異なる可能性があると考えられる。

図-11に示すW/C＝65%の供試体については，いずれの濃度のNaOH溶液に浸せきした供試体についても反応性骨材混合割合を60%とした供試体の膨張率が最も大きくなった。W/C＝45%と65%の供試体を比較すると，2mol/lのNaOH溶液に浸せきしたものについて特に，W/Cの相違によってASR膨張と反応性骨材混合割合との関係が異なるようである。

3.4 NaOH溶液浸せき法とデンマーク法との比較

0.5, 1および2mol/lのNaOH溶液に浸せきして60℃で保存（NaOH溶液浸せき法）した供試体の保存期間4週における膨張率と，デンマーク法を実施した供試体の保存期間13週における膨張率との関係を**図-12～14**に示す。これらの結果から，いずれの濃度のNaOH溶液に浸せきした供試体についてもNaOH溶液浸せき法を実施した供試体の膨張率（4週）とデンマーク法を実施した供試体の膨張率（13週）との間には相関関係があることがわかる。NaOH溶液浸せき法とデンマーク法とを比較すると，実構造物において，海水や凍結防止剤がコンクリート内部に浸透してASRが発生あるいは助長されるメカニズム（外部から供給されるアルカリの影響）により近いのは，NaCl溶液に供試体を浸せきするデンマーク法のほうであると考えられる。しか

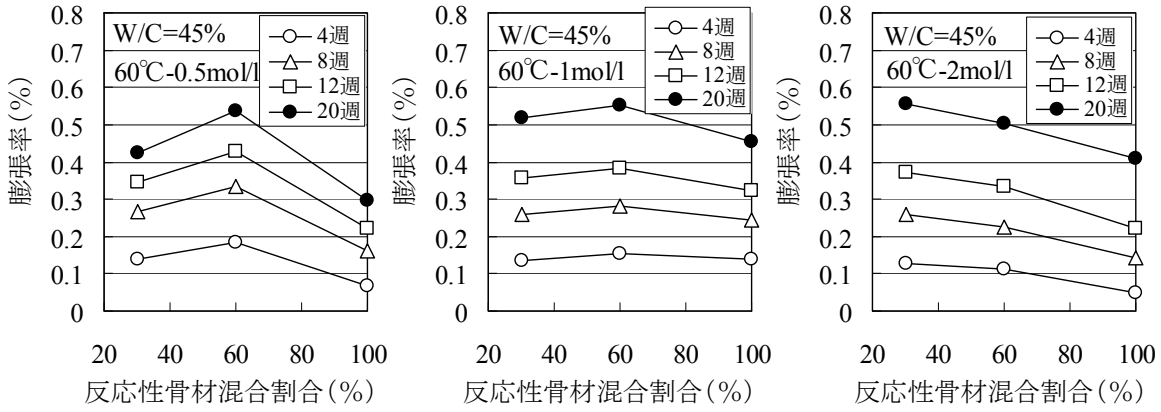

図-10　膨張率と反応性骨材混合割合との関係

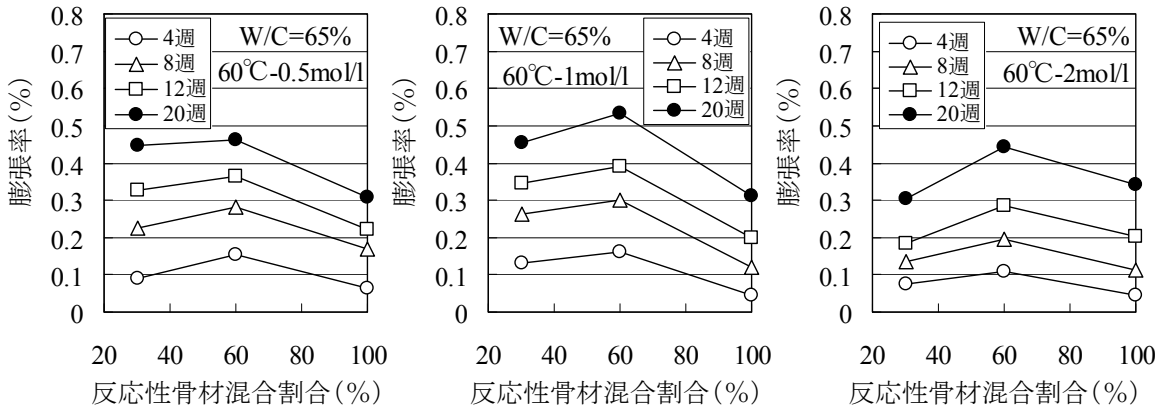

図-11　膨張率と反応性骨材混合割合との関係

し，NaOH 溶液浸せき法によって比較的早期に生じる膨張とデンマーク法によって生じる膨張との間に相関関係があること，また，デンマーク法より NaOH 溶液浸せき法のほうが早期に膨張を生じることから，本研究で実施した NaOH溶液浸せき法によってASRによるコンクリートの残存膨張性をデンマーク法よりも早期に判定することができると考えられる。本研究で設定した促進養生条件のうち，0.5 あるいは 1mol/l の NaOH 溶液に浸せきして 60℃で供試体を保存する条件で早期に大きな膨張を生じていることから，これらの条件が ASR によるコンクリートの残存膨張性を早期に判定するための促進養生条件として適している可能性があると考えられる。

4. まとめ

本研究では，NaOH 溶液に浸せきして 60℃で保存した供試体の ASR 膨張に与える NaOH 溶液濃度と反応性骨材混合割合の影響について検討を行った。さらに，NaOH 溶液浸せき法を実施した供試体とデンマーク法を実施した供試体の膨張率の比較・検討を行った。本研究で得られた結果を以下にまとめて示す。

(1) 供試体の反応性骨材混合割合や W/C が異なると，ASR 膨張と NaOH 溶液濃度との関係は異なった。

(2) 供試体を浸せきする NaOH 溶液濃度の相違によって，ASR 膨張と反応性骨材混合割合との関係は異なった。また，2mol/l の NaOH 溶液に浸せきした供試体については，W/C の相違によっても ASR 膨張と反応性骨材混合割合との関係が異なった。

(3) NaOH 溶液浸せき法によって比較的早期に生じる膨張とデンマーク法によって生じる膨張との間に相関関係があった。

(4) 0.5 あるいは 1mol/l の NaOH 溶液に浸せきして 60℃で供試体を保存する条件が，ASR によるコンクリートの残存膨張性を早期に判定するための促進養生条件として適している可能性があると考えられた。

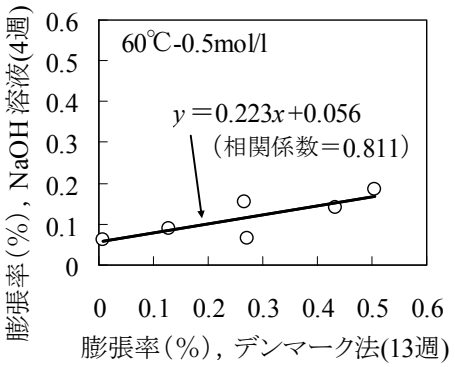

図-12 NaOH 溶液浸せき法（4 週）とデンマーク法との比較

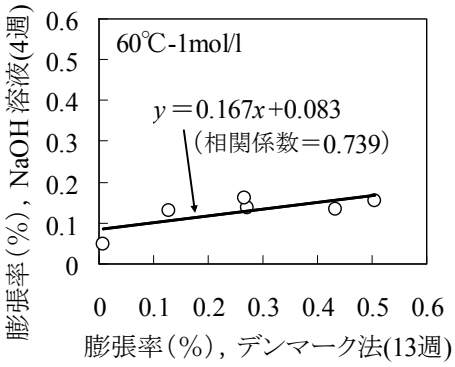

図-13 NaOH 溶液浸せき法（4 週）とデンマーク法との比較

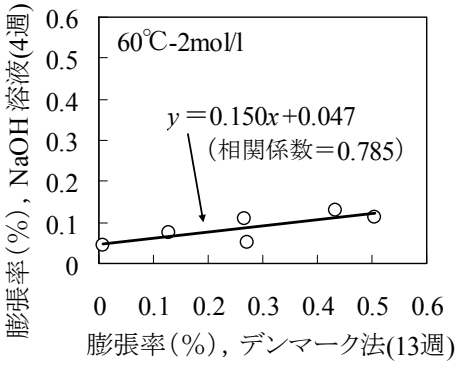

図-14 NaOH 溶液浸せき法（4 週）とデンマーク法との比較

謝辞

本研究は，平成 19 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

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) 黒田 保，井上正一，吉野 公，西林新蔵：NaCl 溶液および NaOH 溶液に浸せきしたコンクリートの ASR 膨張挙動，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 7 巻，pp.7-14，2007

6) 中部セメントコンクリート研究会編：コンクリート構造物のアルカリ骨材反応，p.25，理工学社，1990

7) 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，pp.56-61，技報堂出版，1986