

論文 コンクリートの ASR 膨張に与える保存温度とアルカリ総量の影響

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

要旨: 本研究では、コンクリートの ASR 膨張に与える保存温度とアルカリ総量との関係について検討し、つぎの結果が得られた。アルカリ総量が同じ条件では、(1)保存温度が高いほど膨張を開始する時期は早く、保存期間の早い時期における膨張率は大きくなるが、長期的な膨張率は小さくなる傾向にあった。(2)ASR 膨張を保存温度の関数で表すことができた。保存温度が同じ条件では、(3)アルカリ総量が多いものの方が膨張を開始する時期が早く、膨張率は大きくなる傾向にあったが、40℃で保存した場合には、アルカリ総量を過剰に高くすると長期の膨張が小さくなる傾向を示した。(4) ASR 膨張をアルカリ総量の関数で表すことができた。

キーワード: アルカリシリカ反応, 膨張率, 促進試験, 保存温度, アルカリ総量

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (ASR) は長年月にわたってゆっくりと進行し、コンクリートにひび割れによる劣化を生じさせる。ASR が生じると、その進行を完全に停止させるのは難しく、補修後に再劣化が生じて再補修をしなければならないケースもある。したがって、コンクリートに使用する骨材については、それがコンクリートに対して ASR による有害な膨張を生じさせるか否か、あらかじめそのアルカリシリカ反応性を判定しておくことが重要である。アルカリシリカ反応性を短期間で判定するためには、アルカリシリカ反応がきわめてゆっくりと進行するため、適切な促進試験によって ASR を促進する必要がある。骨材のアルカリシリカ反応性は、一般に化学法 (JIS A1145) あるいはモルタルバー法 (JIS A 1146) で確認されている。しかし、実際に使用されるコンクリートが ASR による有害な膨張を生じるか否かを判定するには、実際に使用される配合のコンクリートでそのアルカリシリカ反応性を判定することが望ましいと考える。コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験法(案)として、日本コンクリート工学会の JCI-AAR3¹⁾ があるが、コンクリート供試体を使用したアルカリシリカ反応性試験には長期間を要する。一方、最近では、コンクリートのアルカリシリカ反応性を判定するための促進試験条件が検討されている²⁾。アルカリシリカ反応の促進試験における保存温度やコンクリートのアルカリ総量などの条件は ASR 膨張に大きな影響を与える要因であるため、保存温度やアルカリ総量がコンクリートの ASR 膨張に与える影響を明らかにすることが重要であると考えられる。

そこで本研究では、コンクリート供試体を保存する温度およびコンクリートのアルカリ総量を実験要因として

選定し、それらがコンクリートの ASR 膨張に与える影響について実験的に検討を行った。

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=3.14g/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の混合砂 (表乾密度=2.64 g/cm³) を使用した。粗骨材には、化学法 (JIS A 1145) 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砕石 (表乾密度=2.60g/cm³, Rc=172mmol/l, Sc=732mmol/l, モルタルバー法による材齢 26 週の膨張率=0.148%) および「無害」と判定された安山岩砕石 (表乾密度=2.75g/cm³) を使用した。コンクリートのアルカリ総量調整用に、試薬一級の水酸化ナトリウムを使用した。また、コンクリートの空気量調整用に 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。粗骨材には、アルカリシリカ反応性試験で「無害」と判定されたものと「無害でない」と判定されたものを、質量比で 6:4 となるように混合 (コンクリートのアルカリシリカ反応性試験 (JCI-AAR3) でペシマムとなる混合比付近) して使用した。また、コンクリート中のアルカリ

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	993

*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)

総量が 4.6, 7 および 10kg/m³ となるように、水酸化ナトリウムを添加して調整した。コンクリートの空気量は、AE 剤を添加して 4.5±1.5% とした。コンクリートのスランブについては、アルカリ総量 4.6kg/m³ のコンクリートに対して 8±1.5cm とした。単位水量を一定としているため、アルカリ総量 7 および 10kg/m³ のコンクリートについては、アルカリ総量の多いもの（添加する水酸化ナトリウムの量が多いもの）ほどスランブは小さくなった。

2.3 実験条件

本実験では、供試体として、75×75×400mm のコンクリート角柱供試体を使用した。アルカリシリカ反応の促進条件として、保存温度を 40, 60 および 80℃ の 3 水準、コンクリートのアルカリ総量を 4.6, 7 および 10kg/m³ の 3 水準選定した。なお、アルカリ総量 4.6kg/m³ のコンクリートには、水酸化ナトリウムを等価 Na₂O 量で 2.4kg/m³ 添加しており、これは、コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法（案）（JCI-AAR3¹⁾）における添加アルカリ量の条件と同じである。

2.4 実験方法

コンクリートを打設した 24 時間後に供試体を脱型し、供試体の初期長さを測定した。供試体の長さについては、供試体の長軸方向の両端部中央に埋め込んだゲージプラグ間の長さ（基長 400mm）をダイヤルゲージ（最小目盛り 0.001mm）で測定した。供試体の初期長さ測定後、供試体を保水性のよい布で包み、それをポリエチレン製の袋に入れて密封した。ポリエチレン製の袋に入れた供試体を、所定の温度に設定した恒温器の中で保存し、そこで所定の期間保存した後に供試体の長さ変化を測定した。供試体の長さ変化を測定する際には、測定時の供試体温度が 20℃ となるように、長さ変化測定日の前日に、恒温器から供試体をポリエチレン製の袋に入れたまま取り出し、それを 20℃ の恒温室へ移動して、そこで 24 時間供試体を静置した。

3. 実験結果と考察

3.1 コンクリートの ASR 膨張に与える保存温度の影響

図-1 にアルカリ総量を 4.6, 7 および 10kg/m³ とした供試体の膨張率と保存温度との関係を示す。アルカリ総量を 4.6kg/m³ とした供試体については、保存温度の相違による膨張率の差は小さいものの、保存温度が高いほど膨張率は大きくなる傾向にある。一方、アルカリ総量を 7kg/m³ とした供試体については、保存期間が 1 週以降の早い段階で、保存温度の相違による膨張率の差が大きくなっており、保存温度が高いほど膨張を開始する時期が早い。また、保存期間 4 週までは、保存温度が高いほど膨張率は大きい。保存期間 22 週以降では保存温度が高いほど膨張率は小さくなった。アルカリ総量 10kg/m³ の

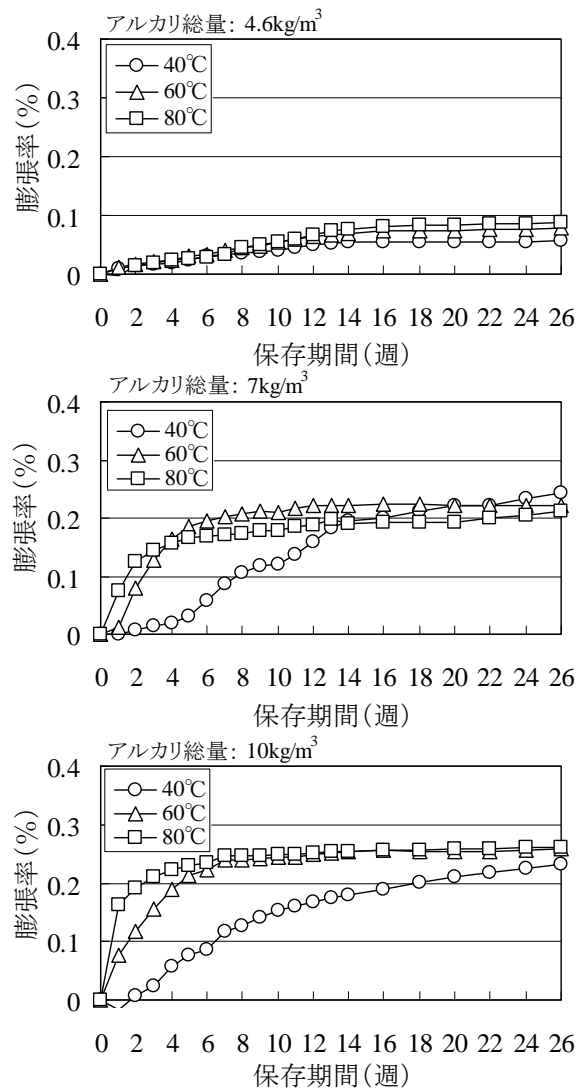


図-1 膨張率の経時変化

供試体についても、保存温度が高いほど膨張を開始する時期は早い。また、保存期間の早い時期における保存温度の相違による膨張率の差は、アルカリ総量 10kg/m³ の供試体の方がアルカリ総量 7kg/m³ の供試体よりも大きい。さらに、アルカリ総量 10kg/m³ の供試体について、保存期間 26 週までは、保存温度が高いほど膨張率は大きい。60 および 80℃ で保存した供試体の膨張率がほぼ収束しているのに対して、40℃ で保存した供試体の膨張率は保存期間 26 週以降も膨張率が増加する傾向にあり、最終の膨張率は、60 および 80℃ で保存した供試体よりも 40℃ で保存した供試体の方が大きくなると推察される。

以上に述べたように、保存温度が高いほど膨張を開始する時期は早く、また、保存期間の早い時期における膨張率は大きくなる。しかし、保存温度が低いものと比較して保存温度が高いものの方が、長期的な膨張率は小さくなる傾向にある。この理由として、つぎのことが考えられる。保存温度が高くなるほど ASR の反応速度が速くなり、保存温度が低いものと比較して、早い時期に多量

表-2 パラメータ a , b および相関係数 (r)

アルカリ総量 (kg/m ³)	保存温度 (°C)	a	b	r
4.6	40	0.0620	0.1158	0.9888
	60	0.0889	0.0943	0.9929
	80	0.1173	0.0626	0.9879
7	40	0.4737	0.0306	0.9808
	60	0.2269	0.2793	0.988
	80	0.1918	0.4367	0.9843
10	40	0.2847	0.0684	0.9888
	60	0.2556	0.3333	0.9987
	80	0.2501	0.7788	0.9845

のアルカリシリカゲル (以下, ASR ゲルと略述する) が生成される。このため, 保存温度が高いほど膨張を開始する時期が早くなると考えられる。一方, 保存温度が高いほどアルカリを消費する速度が速く, また, ASR ゲルにアルカリが早期に取り込まれて ASR ゲルの化学組成のうち SiO₂ に対する Na₂O のモル比が大きくなり, その粘性が早期に低下するため^{3), 4)}, 保存温度が低い供試体と比較して, 保存温度を高くした供試体の方が長期的な膨張率は小さくなる傾向を示したと考えられる。

つぎに, 図-1 に示した各供試体の膨張率と保存期間の関係を, アルカリ総量および保存温度別に, 最小二乗法により式 (1) で近似した。パラメータ a , b および相関係数 (r) の値を表-2 に示す。

$$Ex = a(1 - e^{-bt}) \quad (1)$$

ここに, Ex : 膨張率 (%), t : 保存期間 (週), a および b : パラメータ, である。

各供試体の膨張率と保存期間との関係を, 式 (1) により高い相関で近似できた。一例として, アルカリ総量 10kg/m³ とし, 保存温度を 40, 60 および 80°C とした供試体について, 式 (1) で示した近似曲線を実験値とあわせて図-2 に示す。

最小二乗法により求めたパラメータ a および b と保存温度との関係を図-3~5 に示す。図に示す曲線は, パラメータ a および b と保存温度との関係を, 最小二乗法により式 (2) および (3) に示す累乗式で近似したものであり, それぞれの式とその相関係数を図中に示す。

$$a = cT^d \quad (2)$$

$$b = fT^g \quad (3)$$

ここに, T : 保存温度 (°C), c , d , f および g : パラメータ, である。

a は最終膨張率を表すものであるが, 前述したように, アルカリ総量を 7 および 10kg/m³ とした供試体の最終膨張率は, 保存温度が高くなるほど小さくなることわ

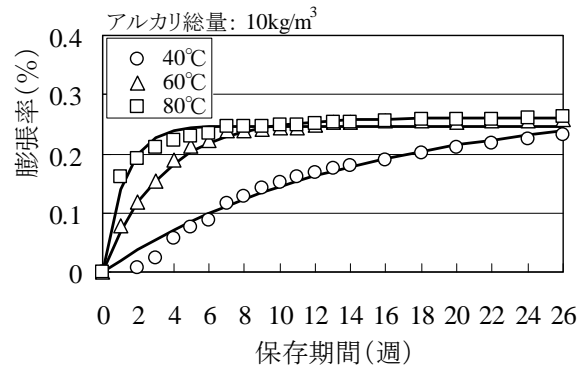


図-2 膨張率の測定値と近似曲線

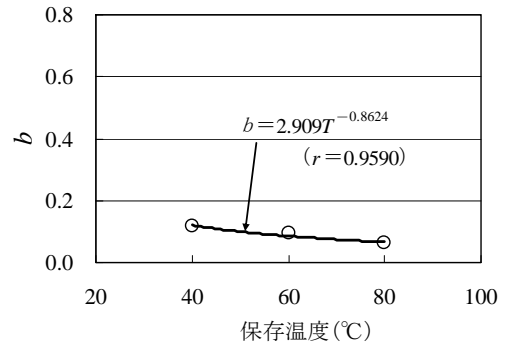
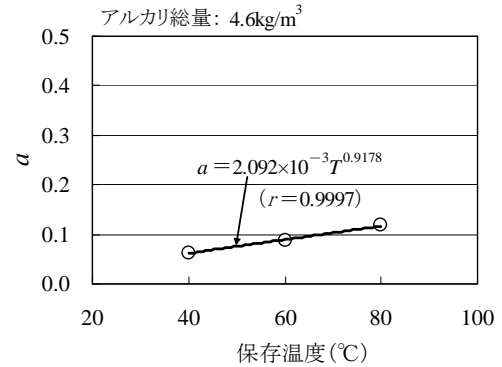


図-3 a および b と保存温度との関係

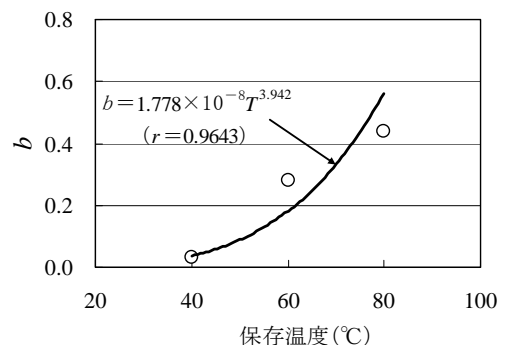
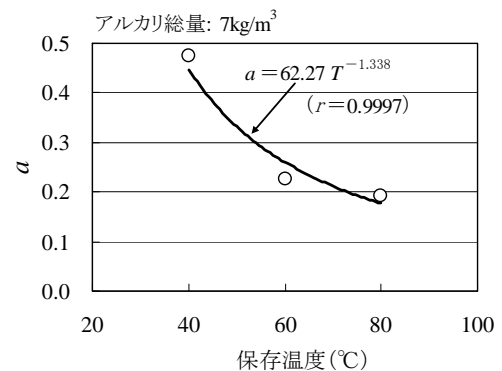


図-4 a および b と保存温度との関係

る。また、 b は保存期間の経過にともなう膨張率の曲線（膨張曲線）が収束するまでの速さを表すものであり、 b の値が大きいくほど膨張曲線は早く収束する。総アルカリ量 7 および 10kg/m^3 の供試体については、保存温度が高くなるほど b の値は大きくなっており、膨張曲線が収束するまでに要する期間は短くなるのがわかる。

式 (2) および (3) を式 (1) に代入して、式 (4) を得る。

$$Ex = cT^d \left(1 - e^{-fT^{g_i}} \right) \quad (4)$$

アルカリ総量が同じ供試体ごとに、膨張率の測定値と式 (4) から得られる膨張率の計算値の関係を図-6 に示す。図より、両者の値はよく一致していることがわかる。したがって、アルカリ総量が同じ条件のもとでは、供試体の膨張率を保存温度の関数で表すことができると考えられる。

3.2 コンクリートの ASR 膨張に与えるアルカリ総量の影響

図-7 に保存温度を 40, 60 および 80°C とした供試体の膨張率とアルカリ総量との関係を示す。図より、いずれの保存温度とした供試体についても、アルカリ総量が多いものの方が膨張を開始する時期が早いことがわかる。また、保存温度を 40°C とした場合には、アルカリ総量を 4.6kg/m^3 とした供試体の膨張率は保存期間 14 週以降で膨張が収束しているが、アルカリ総量を 7 および 10kg/m^3 とした供試体については、保存期間 26 週においても、膨張率はまだ増加する傾向にある。さらに、アルカリ総量を 7 と 10kg/m^3 とした供試体を比較すると、保存期間 12 週まではアルカリ総量 10kg/m^3 の供試体の膨張率のほうが大きい。保存期間 14 週以降では、アルカリ総量 10kg/m^3 の供試体よりも 7kg/m^3 の供試体の方が膨張率は大きくなる傾向にある。コンクリート内部のアルカリの量が多いほど多量の ASR ゲルが生成されるため、コンクリートのアルカリ総量が多いほど膨張は早く生じ、また膨張率は大きくなる。しかし、コンクリート内部のアルカリの量が過剰に多くなると、ASR ゲルの化学組成のう

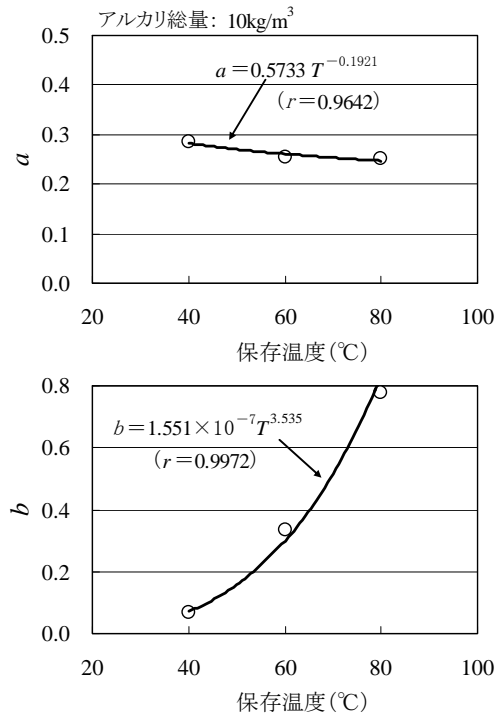


図-5 a および b と保存温度との関係

ち、 SiO_2 に対する Na_2O のモル比 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比) が大きくなり、ASR ゲルの粘性が小さくなるため、その膨張圧が緩和されて膨張率は小さくなると考えられる^{3), 4)}。このような ASR ゲルの粘性の低下の影響により、 40°C で保存した場合には、アルカリ総量 10kg/m^3 の供試体の方が 7kg/m^3 の供試体よりも、長期の膨張率が小さくなる傾向を示したと考えられる。一方、保存温度を 60 および 80°C とした場合には、保存期間 26 週までは、アルカリ総量の多いものの方が膨張率は大きい。また、保存温度が高い方がアルカリ総量の相違による膨張率の差が大きくなっていることがわかる。

つぎに、式 (1) のパラメータ a および b とアルカリ総量との関係について検討する。図-8~10 に、パラメータ a および b とアルカリ総量との関係を示す。図より、 40°C で保存した供試体については、アルカリ総量を 7kg/m^3 としたものの a の値が最も大きくなっている。すなわち、アルカリ総量を 7kg/m^3 とした供試体の最終膨張率より

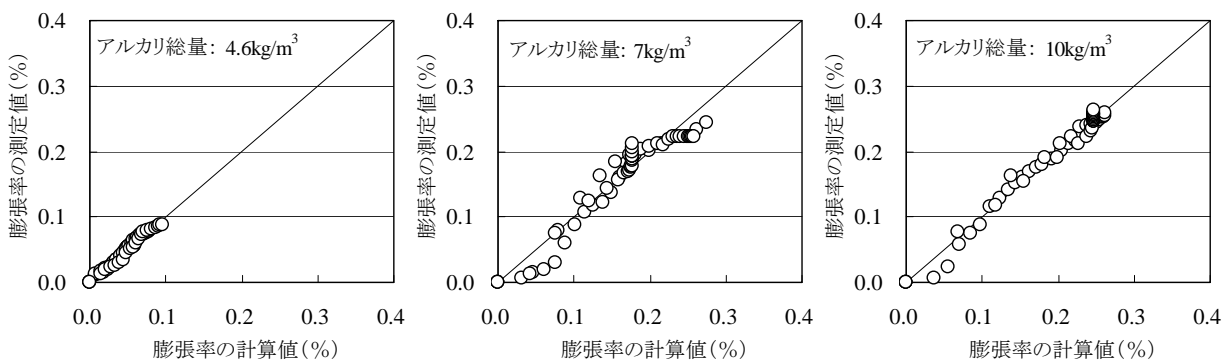


図-6 膨張率の測定値と計算値との比較

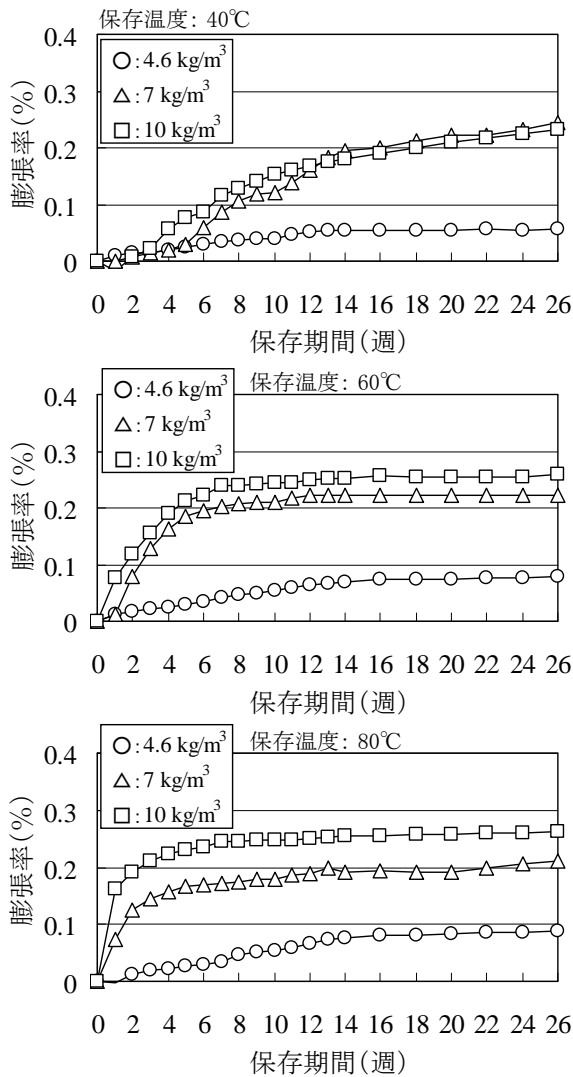


図-7 膨張率の経時変化

もアルカリ総量の多い 10kg/m^3 とした供試体のそれの方が小さくなっている。これは、前述したように、コンクリート内部のアルカリ量が多いほど多量の ASR ゲルが生成されるため、アルカリ総量が多いほど膨張は早く生じ、また膨張率は大きくなるが、長期的には、過剰なアルカリの供給により ASR ゲルの $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ 比が大きくなって、その粘性が低下したためと考えられる。一方、60 および 80°C で保存した場合には、アルカリ総量の増加とともに a の値は大きくなった。また、保存温度を 60 および 80°C とした場合には、アルカリ総量の増加とともに b の値が大きくなっており、アルカリ総量が多いものほど膨張が早く収束するといえる。

60 および 80°C で保存した供試体のパラメータ a および b とアルカリ総量との関係を、最小二乗法により式 (5) および (6) に示す対数式で近似した曲線を図-9 および 10 に示す。また、図にはそれらの式と相関係数 (r) も示す。なお、40°C で保存した供試体については、 a の値がアルカリ総量 7kg/m^3 で最大となっているため、ここで

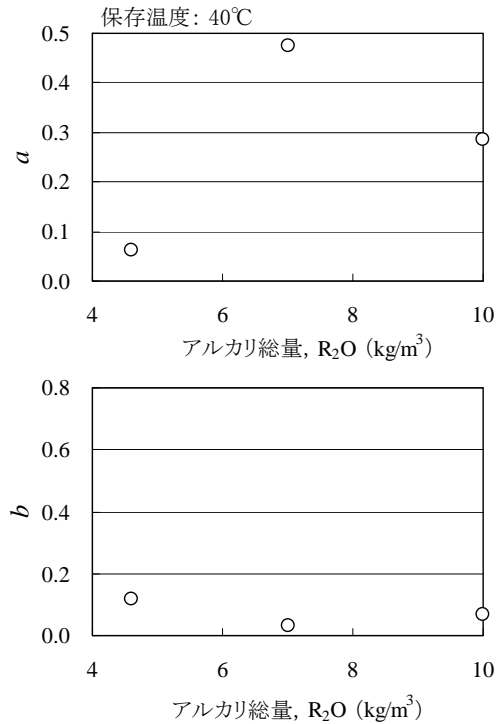


図-8 a および b とアルカリ総量との関係

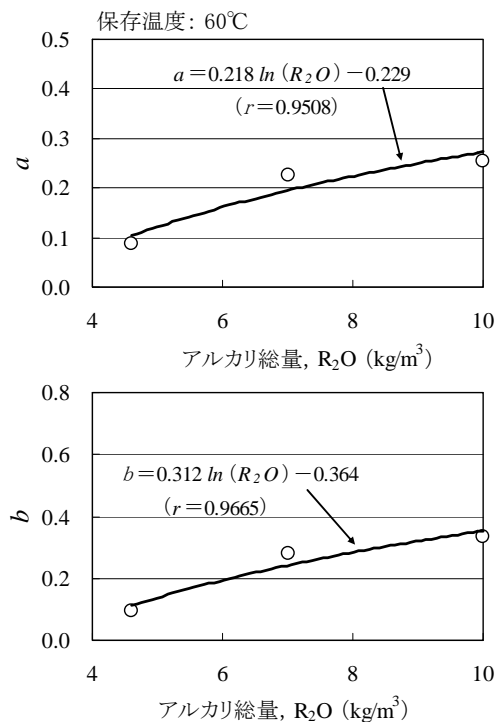


図-9 a および b とアルカリ総量との関係

は近似曲線を求めなかった。

$$a = h \ln(R_2O) + k \quad (5)$$

$$b = m \ln(R_2O) + n \quad (6)$$

ここに、 R_2O : アルカリ総量 (kg/m^3)、 h 、 k 、 m および n : パラメータ、である。

式 (5) および (6) を式 (1) に代入して、式 (7) が得られる。

$$Ex = (h \ln(R_2O) + k) \left(1 - e^{-(m \ln(R_2O) + n)t}\right) \quad (7)$$

保存温度が同じ供試体ごとに、膨張率の測定値と式(7)から得られる計算値との関係を図-11に示す。図より、保存温度を60℃とした場合に、計算値よりもやや大きな膨張率の測定値が得られているものもあるが、60および80℃で保存した場合のいずれの場合においても、計算値と測定値は概ね一致しており、保存温度が同じ条件のもとでは、膨張率はアルカリ総量の関数で表すことができると考えられる。したがって、実験から式(7)のような関係式を求めておけば、任意のアルカリ総量に対する膨張率を推定することができると考えられる。

4. まとめ

本研究では、コンクリートのASR膨張に与える保存温度とアルカリ総量との関係について実験的に検討した。得られた結果を以下に列挙し、まとめとする。

- (1) アルカリ総量が同じ条件のもとでは、保存温度が高いほど膨張を開始する時期は早く、また、保存期間の早い時期における膨張率は大きくなる。しかし、保存温度が低いものと比較して保存温度が高いものの方が、長期的な膨張率は小さくなる傾向にあった。
- (2) アルカリ総量が同じ条件のもとでは、コンクリートのASRによる膨張率を保存温度の関数で表すことができると考えられた。
- (3) 保存温度が同じ条件のもとでは、アルカリ総量が多いものの方が膨張を開始する時期が早かった。
- (4) 40℃で保存した場合には、アルカリ総量を過剰に高くすると長期の膨張が小さくなる傾向を示したが、保存温度を60および80℃とした場合には、保存期間にかかわらず、アルカリ総量の多いものの方が膨張率は大きくなった。
- (5) 保存温度が同じ条件のもとでは、コンクリートのASRによる膨張率をアルカリ総量の関数で表すことができると考えられた。

本研究では、1種類の反応性骨材を用いて検討を行った。反応性骨材の岩種や鉱物組成によって、ASRの反応速度や膨張挙動は異なると考えられる。したがって、その他、多種類の反応性骨材についても同様の検討を行い、ASR膨張と保存温度およびアルカリ総量との関係の定式化について検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会編：JCI基準集（1977～2002年度）、日本コンクリート工学会、pp.213-224、2004年4月
- 2) 佐々木亙、谷口秀明、斯波昭弘、樋口正典：コンクリートのASR促進膨張に及ぼす要因、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、

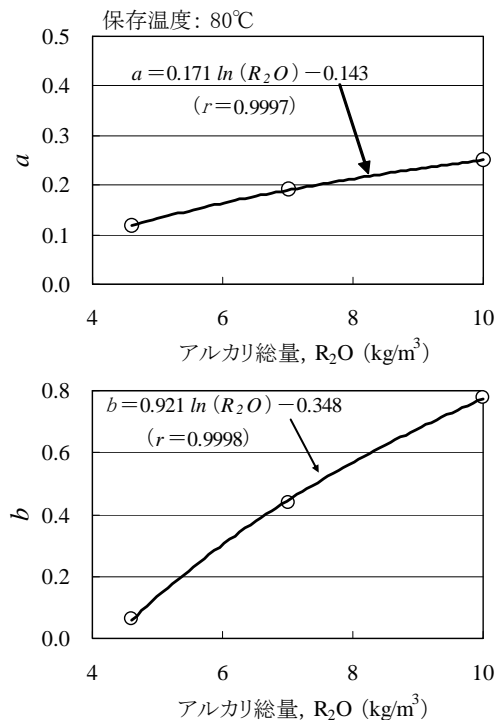


図-10 aおよびbとアルカリ総量との関係

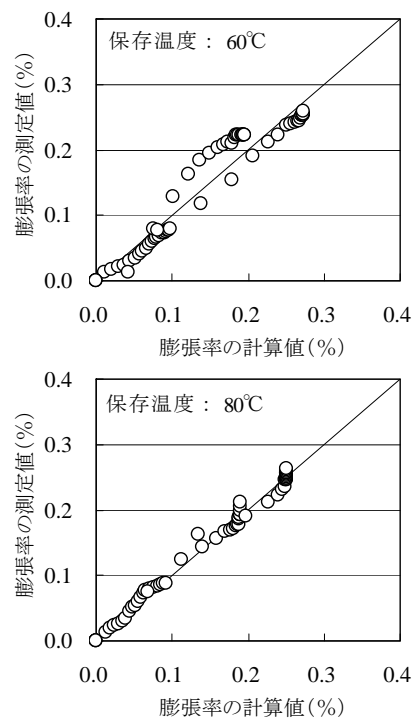


図-11 膨張率の測定値と計算値との比較

第10巻, pp.155-162, 2010年10月

- 3) 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年11月
- 4) 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, pp.13-26, 1984.8