

# コンクリートのアルカリシリカ反応の促進方法に関する検討

## Examination of Accelerated Method for Alkali-Silica Reaction of Concrete

佐々木 亘 WATARU SASAKI  
 谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI  
 斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA  
 樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

本研究では、各地のレディーミクストコンクリート工場の骨材を使用したコンクリートに対して、前養生や養生温度、環境条件を変化させたコンクリートバー法による促進養生を実施し、コンクリートの ASR 膨張を促進させる方法についての検討を行った。実験の結果、①アルカリ総量を  $9.0\text{kg/m}^3$  としても、圧縮強度へ大きな影響を与えず膨張を促進できる。②養生温度が高いほど膨張を促進できる。③コンクリートのアルカリ量を  $9.0\text{kg/m}^3$  とし、 $50^\circ\text{C}$  の NaCl 水溶液へ浸漬することで、コンクリートのアルカリシリカ反応性を早期に判定できる可能性があることなどがわかった。

キーワード：アルカリシリカ反応，コンクリートバー法，前養生，生コンデータベース

This study describes the examination results on accelerated method for Alkali-Silica Reaction of concrete made of aggregates used by some ready mixed concrete plants. As a result, the followings were obtained; 1) Additional alkali is few effect on compressive strength as the amount of the alkali is adjusted to about  $9.0\text{kg/m}^3$ , 2) The expansion of specimen can be accelerated as the temperature of curing is high, 3) Alkali-silica reactivity of concrete can be evaluated promptly if the amount of the alkali included in concrete is adjusted to about  $9.0\text{kg/m}^3$  and if the concrete specimen soak in saturated NaCl solution of  $50^\circ\text{C}$ .

Keywords: Alkali-Silica Reaction, Concrete Bar Method, Pre Curing, Database of Ready Mixed Concrete

### 1. はじめに

コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、アルカリシリカ反応への対策として、①コンクリート中のアルカリ総量の抑制、②アルカリシリカ反応抑制効果を持つ混合セメント B 種の使用、③アルカリシリカ反応性試験で「無害」と判定される骨材の使用のうちいずれかを採ることとしており、設計基準強度  $60\sim 100\text{N/mm}^2$  の高強度コンクリートについては、単位セメント量が多く混合セメントによる抑制効果も明らかでないため、上記③の「無害」と判定される骨材を使用しなければならないことになっている。

PC 部材では、呼び強度 40 を超える比較的高い強度域のコンクリートが使用されるが、筆者らがやっている調査<sup>2)</sup>において、呼び強度 40 のレディーミクストコンクリートであっても、設計基準強度  $60\text{N/mm}^2$  程度のコンクリートに相当する水セメント比、もしくは単位セメント量

となるような配合が設定されている例が確認されている。このようなコンクリートに対するアルカリシリカ反応対策としては、高強度コンクリートと同様の対応とすることが必要であると考えられる。すなわち、高強度コンクリートおよびそれに準じる比較的高い強度域のコンクリートは、アルカリシリカ反応性に対するリスクが大きいとも言える。これまでには、高い反応性を示す骨材を用いて、コンクリートバー法によるアルカリシリカ反応の促進養生条件や、促進養生下での力学特性への影響、混和材による抑制効果などについて確認を行っている<sup>2),3)</sup>。この結果を元に、本稿では、まず、実際に用いられる骨材について、反応性をデータベース<sup>4)</sup>や試験で確認した。次いで、これらの骨材を用いたコンクリートバー法による促進試験で膨張を促進できる条件や適用性についての検討を行った。

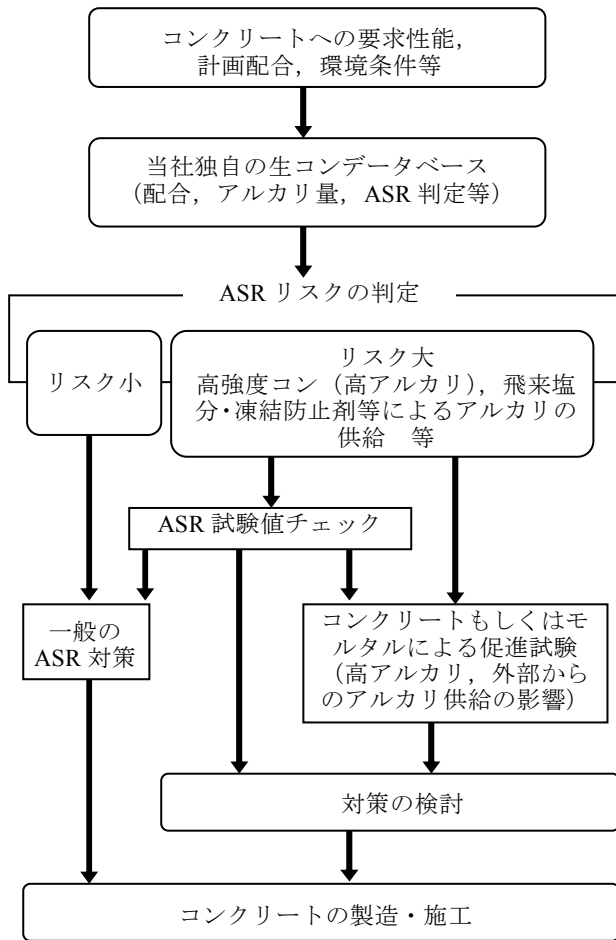


図-1 ASR 対策フローのイメージ

表-1 骨材の ASR 判定

試験方法	化学法	判定		計
		無害	無害でない	
	化学法	423	46	469
	モルタルバー法	203	11	214
	計	626	57	683

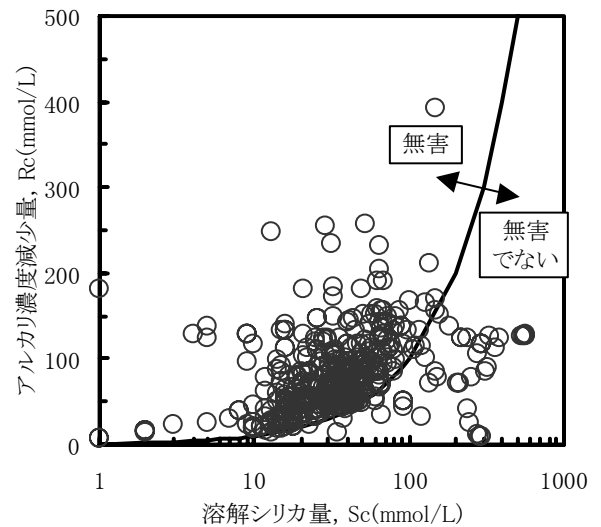


図-2 化学法試験結果

## 2. レディーミクストコンクリートに使用される骨材のアルカリシリカ反応性

### (1) データベースにおける骨材のアルカリシリカ反応性

筆者らは現場の協力の下、コンクリート工事で関わったレディーミクストコンクリートおよびその製造工場の調査を行い、データベースの構築を進めている。また、それらの工場で使用している材料（特に骨材）を集め、これを用いたコンクリートの品質を確認している<sup>4)</sup>。このデータベースには、各生コン工場が使用している骨材のアルカリシリカ反応性試験の結果も含まれる。このデータベースを用いて、図-1のようなASR対策フローについて検討を行っている。これは、対象のコンクリート構造物の条件と生コンデータベースからASRのリスクを判定し、リスクが高いと判断されたものについては、通常のJIS化学法、モルタルバー法に加え、他の促進試験などでコンクリートのアルカリシリカ反応性およびその対策について検討を行うというものである。

表-1 はデータベース中の骨材についてのアルカリシ

リカ反応性試験結果である。全体の約7割が化学法、約3割がモルタルバー法を採用しており、化学法を採用した骨材のうち約10%が「無害でない」判定となっている。

この化学法結果について、溶解シリカ量 (Sc) とアルカリ濃度減少量 (Rc) の関係を図-2に示す。図中の曲線が  $Sc=Rc$  となる判定ラインであるが、境界付近のデータが多く見受けられる。これらの骨材は、骨材採取場所の変化だけでなく、試験誤差などでも判定が変わる可能性が考えられる。

### (2) 骨材のアルカリシリカ反応性試験

入手した骨材のうち、化学法の試験値が判定境界付近にあるものを選び、化学法試験を実施した。使用した骨材の物性を表-2に、結果を表-3に示す。試験値が調査データと異なるものが多く、選定した骨材5試料中、2試料において、「無害」であった判定が、「無害でない」と判定された。このように「無害」判定であっても、その供給中に「無害でない」骨材が混入してくる可能性は否定できず、特に試験値が境界付近のものはその可能性が高いと考えられる。これらのことから、高強度コンクリ

表-3 骨材の化学法試験結果

骨材	データベースの値				化学法試験結果			
	アルカリ濃度減少量, Rc (mmol/L)	溶解シリカ量, Sc (mmol/L)	Sc/Rc	判定	アルカリ濃度減少量, Rc (mmol/L)	溶解シリカ量, Sc (mmol/L)	Sc/Rc	判定
α	114	111	0.97	無害	70	80	1.14	無害でない
β	49	45	0.92	無害	66	100	1.52	無害でない
γ	118	93	0.79	無害	164	62	0.38	無害
δ	50	14	0.28	無害	66	18	0.27	無害
ε	99	81	0.82	無害	63	53	0.84	無害

表-2 骨材の物性

記号	種類	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
α	陸砂利	2.66	1.12
β	砕石	2.65	1.64
γ	陸砂	2.55	2.57
δ	砕砂	2.60	1.33
ε	海砂	2.62	1.70

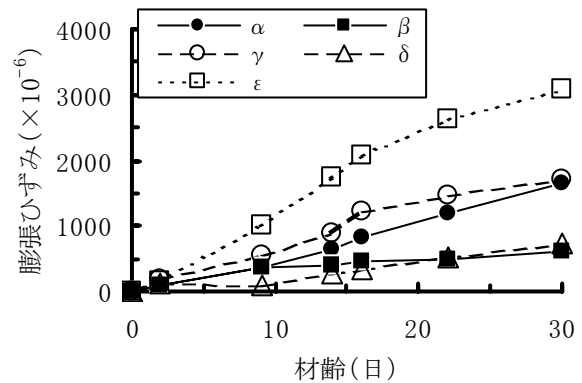


図-3 80°C1mol/L NaOH 水溶液に浸せきしたモルタルバーの膨張ひずみ

ートでは無害と判定された骨材を使用しても注意が必要である。

さらに、表-2 に示す 5 種の骨材を用いて、モルタルバー (40×40×160mm) を製作し、ASTM C 1260 法を参考に 80°C1mol/L の NaOH 水溶液に浸せきしたときの膨張ひずみを図-3 に示す。

膨張ひずみの大小関係に着目すると、骨材 ε > 骨材 α, γ > 骨材 β, δ となっている。これは表-2 に示す化学法による判定結果とは必ずしも対応しない。すなわち、通常の化学法により「無害」と判定された骨材であっても、外部からアルカリが供給されるなどといった環境条件によっては、アルカリシリカ反応性を示すものも存在することがわかる。

### 3. コンクリートバーによる実験

化学法やモルタルバー法といった、骨材のアルカリシリカ反応性試験では、対象の骨材以外の材料や骨材の組み合わせや配合などの条件が加味されず、実際に使用するコンクリートとしての反応性との関係は必ずしも明らかではない。そこで、コンクリートバーを用いてそのアルカリシリカ反応性を判定できる促進養生方法の検討を行った。

#### (1) コンクリートの条件

表-4 にコンクリートの配合とそれぞれに用いた骨材の物性を示す。以下、設計基準強度 40~50N/mm<sup>2</sup> 程度で PC 部材に用いられる配合を想定したものを「PC 配合」、設計基準強度 24~27N/mm<sup>2</sup> 程度で RC 構造物に用いられる配合を想定したものを「RC 配合」と呼ぶ。

シリーズ I : 配合 A~C は高い反応性が確認<sup>3)</sup>されている骨材 (以下、反応性骨材と呼ぶ) と、試験研究用に使用している無害骨材を組み合わせた配合であり、配合 A は筆者らがこれまでも PC 部材向けコンクリートの ASR による影響を確認<sup>3),4)</sup>する目的で使用してきた配合である。配合 A, B はそれぞれ PC 配合, RC 配合に対応し、粗骨材に反応性骨材を用いたもの、配合 C は細骨材に反応性骨材 (配合 A, B に用いた砕石と同一原石による砕砂) を用いた PC 配合である。

シリーズ II : 配合 1~4 は実際の工事で用いられている配合であり、生コン工場から取り寄せた骨材を使用したものである。配合 1~3 は PC 配合, 配合 4 は RC 配合に対応する。それぞれ、生コン工場の配合を参考にして定めた。

シリーズ I, II 共に、使用したセメントは、早強ポル

表-4 コンクリートの配合と骨材の物性

シリーズ	記号	セメントの種類	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S1	S2	G
I	A	H	40.0	40.6	175	438	334	343	1018
	B	N	55.0	44.0	175	318	386	393	1018
			S1=川砂(密度2.57g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.93%, 化学法「無害」) S2=砕砂(密度2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.48%, 化学法「無害」) G=砕石2005(密度2.68g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.95%, 化学法「無害でない」Sc=627mmol/L, Rc=128mmol/L)						
	C	H	40.0	40.6	175	438	686	—	1007
			S1=砕砂(密度2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.84%, 化学法「無害でない」Sc=427mmol/L, Rc=98mmol/L) G=砕石2005(密度2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.63%, 化学法「無害」)						
II	1	H	36.5	41.5	160	438	710	—	1049
			S1=川砂(密度2.61g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.86%, 化学法「無害」Sc=39mmol/L, Rc=63mmol/L) G=砕石2005(密度2.74g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.58%, 化学法「無害」Sc=18mmol/L, Rc=32mmol/L)						
	2	N	42.5	45.4	162	381	654	160	1018
			S1=砕砂(密度2.68g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.57%, モルタルバー法「無害」6ヶ月の膨張率0.009%) S2=海砂(密度2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.70%, 化学法「無害」Sc=81mmol/L, Rc=99mmol/L), (表-2 εと同じ) G=砕石2005(密度2.70g/cm <sup>3</sup> , 吸水率0.49%, モルタルバー法「無害」6ヶ月の膨張率0.009%)						
	3	H	34.6	42.5	158	457	715	—	991
			S1=川砂(密度2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.05%, 化学法「無害」Sc=30mmol/L, Rc=49mmol/L) G=川砂利(密度2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.45%, 化学法「無害でない」Sc=93mmol/L, Rc=50mmol/L)						
	4	N	55.0	46.0	165	300	163	660	1024
		S1=陸砂(密度2.55g/cm <sup>3</sup> , 吸水率2.57%, 化学法「無害」Sc=93mmol/L, Rc=118mmol/L), (表-2 γと同じ) S2=陸砂(密度2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率3.73%, 化学法「無害」Sc=69mmol/L, Rc=157mmol/L) G=砕石2505(密度2.73g/cm <sup>3</sup> , 吸水率1.95%, 化学法「無害」Sc=16mmol/L, Rc=134mmol/L)							

表-5 養生条件

記号	養生方法
J7D	材齢7日まで50℃湿潤封緘, 以後50℃飽和NaCl水溶液浸漬
W7D	材齢7日まで標準水中養生, 以後50℃飽和NaCl水溶液浸漬
J28D	材齢28日まで50℃湿潤封緘, 以後50℃飽和NaCl水溶液浸漬
J	50℃湿潤封緘
W	標準水中養生(※強度確認用)

トランドセメント(密度3.13g/cm<sup>3</sup>, 全アルカリ0.51%)および普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm<sup>3</sup>, 全アルカリ0.54%, 配合2のみ密度3.16g/cm<sup>3</sup>, 全アルカリ0.52%)である。

スランプの調整には高性能 AE 減水剤(標準形, ポリカルボン酸系), 空気量(4.5±1.0%)の調整には AE 剤(変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)を使用した。ASRによる膨張を促進するため, コンクリート中のアルカリ総量(Na<sub>2</sub>O当量)はNaOHにより調整し, 一律9.0kg/m<sup>3</sup>とした。一部の配合ではNaClも使用し, NaOHとの比較を行った。アルカリ総量を9.0kg/m<sup>3</sup>とすることで, 高い強度域のコンクリートであっても比較的早期に膨張を開始させることができることを確認している<sup>3)</sup>。

(2) 供試体寸法および測定項目

供試体は角柱供試体(100×100×400mm)および円柱供試体(φ100×200mm)とし, 角柱供試体を用いて長さ変化および動弾性係数を, 円柱供試体を用いて, 圧縮強度の測定を行った。長さ変化の測定はJIS A 1129-2(コンタクトゲージ法)により行い, ゲージプラグには埋込み型のものを使用した。また, いずれの試験も20℃の室内に24時間程度存置させ, 供試体温度が20℃に低下した時点で測定を実施した。

(3) 養生条件

各供試体は, 材齢1日で脱型し, 基長の測定後, 表-5に示す促進養生を実施した。養生J7D, W7DおよびJ28Dは外部からアルカリを供給するまでの前養生が異なり, 養生Jは外部からアルカリを供給しない方法である。また, 標準水中養生は圧縮強度の確認の目的で実施したものである。

4. コンクリートバーによる実験の結果および考察

(1) 圧縮強度

表-5に示す養生方法のうち, J7D, W7D, J28Dの各飽和NaCl水溶液浸せき法における溶液浸せき開始時点の

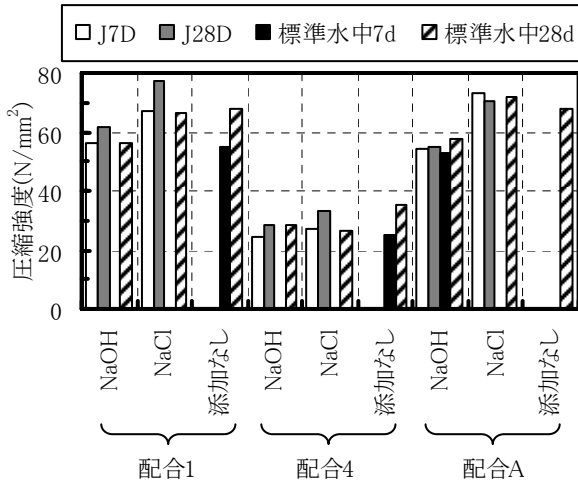


図-4 前養生後の圧縮強度の例

圧縮強度の例を図-4に示す。比較として、アルカリを添加しない供試体の標準水中養生での圧縮強度も併せて示す。各配合の養生 J7D と標準水中 28 日を比較すると、同程度の強度が得られている。養生 J7D の強度は材齢 7 日のものであるが、50℃で養生することにより、強度発現が促進されていると考えられる。次に、配合 1 や配合 A の標準水中養生について比較すると、NaOH を添加したものは添加なしに対して若干の強度低下がみられる。一般に、水セメント比が小さい配合に NaOH を多量に添加すると圧縮強度が低下すると言われている<sup>9)</sup>が、図-4からは 1 割程度の低下であり、問題となるような低下ではないと考えられる。一方、添加するアルカリとして NaCl を用いた場合は、圧縮強度に大きな変化はみられない。

以上のことより、材齢 7 日まで 50℃湿潤封緘養生とすれば、アルカリを 9.0kg/m<sup>3</sup>に調整しても、促進養生開始までに問題となるような大きな強度低下を起こすことはないものと考えられる。

## (2) 膨張ひずみ

### a) 養生方法の影響

配合 A については、既報<sup>3)</sup>で養生 J28D および養生 J の温度を 40℃とした場合の検討を行っている。今回の 50℃とした場合と併せて、図-5に供試体の材齢とひずみの関係を示す。この図からわかるように、どちらの養生条件でも、40℃よりも 50℃のほうが早期に膨張を開始している。同一温度条件であれば、飽和 NaCl 水溶液浸せき条件のほうが膨張ひずみが大きい、40℃飽和 NaCl 水溶液浸せき条件と 50℃湿潤封緘状態では膨張初期において 50℃湿潤封緘状態のほうが膨張ひずみが大きい期間が存在する。このため、コンクリートの ASR 反応性につ

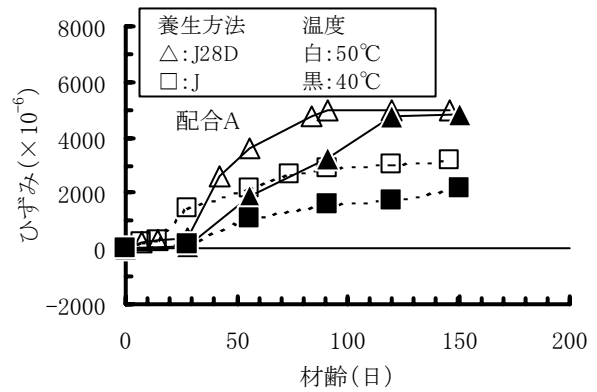


図-5 養生温度の影響

いて早期の判定を検討する場合においては、温度が高い条件のほうが有利であるといえる。

図-6 および図-7 に供試体製作からの材齢とひずみの関係を示す。図-6 がシリーズ I、図-7 がシリーズ II のものである。

シリーズ I では、飽和 NaCl 水溶液へ浸せきさせること、さらに、早期に浸せきさせることで、膨張ひずみは大きく、より早期から発生している。配合 A、B の比較からは水セメント比の影響はみられない。添加したアルカリと骨材が急速に反応することにより、水セメント比を小さくしても、ASR 膨張に伴うひび割れが発生し、外部からアルカリが浸透しやすくなっているものと考えられる。しかし、本実験の範囲内では、A~C いずれの配合においても、飽和 NaCl 水溶液に浸せきしたものは材齢 50~100 日で同程度のひずみとなっており、浸せき開始材齢の影響は、長期的には小さいといえる。また、細骨材に反応性骨材を用いた配合 C の膨張挙動からは、粗骨材に比べ比表面積の大きい細骨材のほうが、反応が急速に進むと考えられる。

一方、シリーズ II においては、通常の化学法、あるいはモルタルバー法で「無害」と判定された骨材を用いている配合 1 や、配合 2 であっても、大きな膨張が認められる。配合 4 については材齢 150 日付近で若干の膨張傾向が認められるが、それ以前の材齢では膨張ひずみは生じていない。

大きな膨張の生じた配合 1~3 について、飽和 NaCl 水溶液へ浸せきさせるまでの材齢を、7、28 日と変化させているが、図に示す材齢 150 日程度までの範囲内ではそのことが ASR 膨張へ及ぼす影響は見られない。配合 3 における養生 J を含めて、その膨張挙動はほぼ一致している。つまり、外部からのアルカリ供給の影響がみられない。これは配合 1~3 のような PC 部材に用いられる比較的小さい水セメント比では、初期には外部からのアルカリの



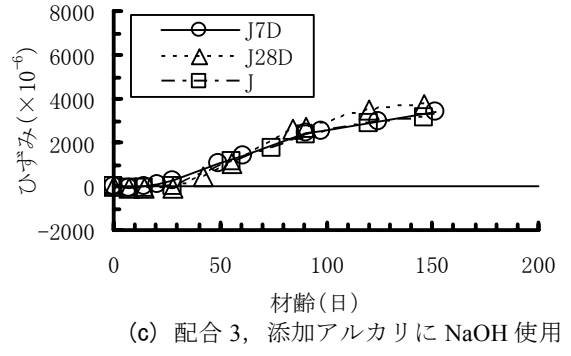
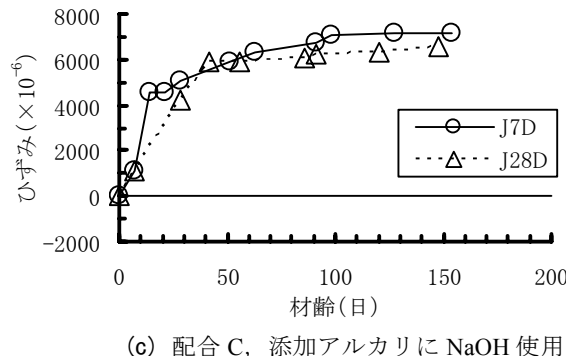
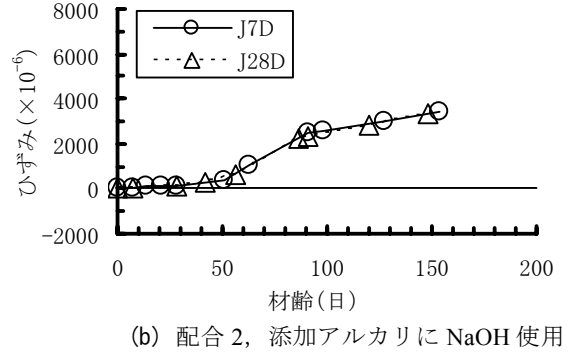
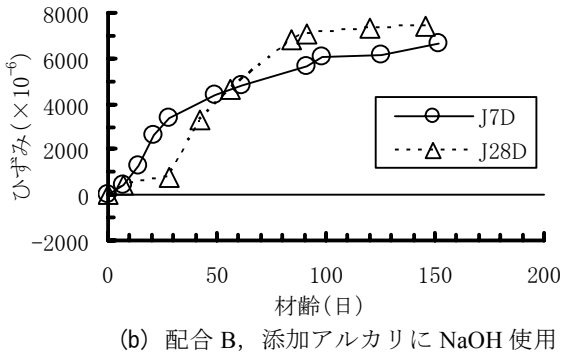
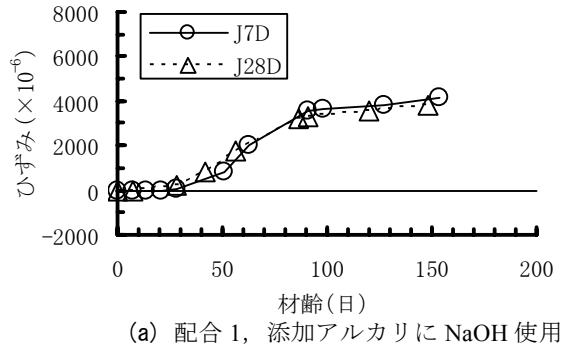
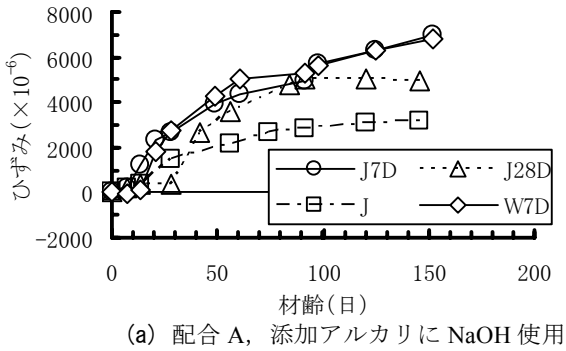


図-6 膨張ひずみの経時変化 (シリーズ I)

浸透量が抑えられていると考えられ、外部から浸透してくるアルカリと反応するに至っていないと考えられる。

**b) 添加アルカリ種の影響**

図-8 は配合 1 および配合 A において、練混ぜ時の添加アルカリとして NaOH を用いた場合と NaCl を用いた場合とを比較したものである。配合 1 では NaOH を添加したほうが膨張ひずみは大きい。配合 A では材齢 50 日程度までは添加アルカリの種類によらず膨張ひずみは同程度であるが、その後は NaCl を添加したほうが大きくなる傾向にある。コンクリート供試体の NaOH 溶液への浸せきと NaCl 溶液への浸せきを比較した実験で、OH<sup>-</sup>が直接作用する NaOH のほうが反応が早く、膨張を早期に発生させると報告されている<sup>9)</sup>。本実験のように添加アルカリで比較した場合も、配合 1 においては同様の影響が現れているものと考えられる。しかし、配合 A では骨材

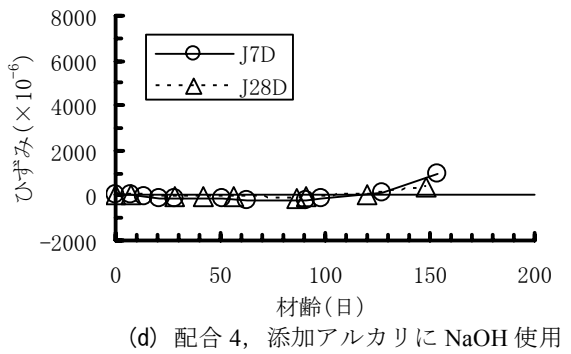


図-7 膨張ひずみの経時変化 (シリーズ II)

の反応性が高いためにその影響が明確に現れていないものと考えられる。このことから、今回の実験の範囲においては、NaOH を添加アルカリに使用するほうが、早期判定には有利であると思われる。一方で、NaOH を添加し、アルカリ総量を増加させると自己収縮ひずみが大きくなること確認されている<sup>3)</sup>。配合 A における長期材

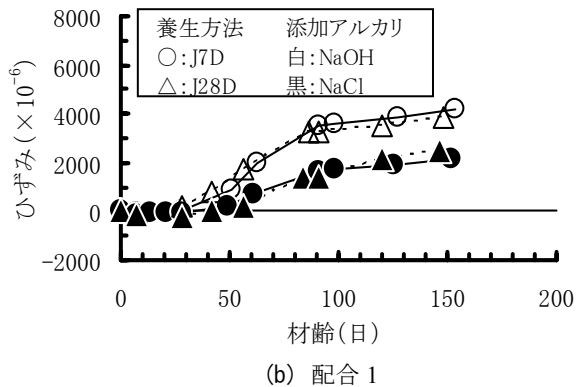
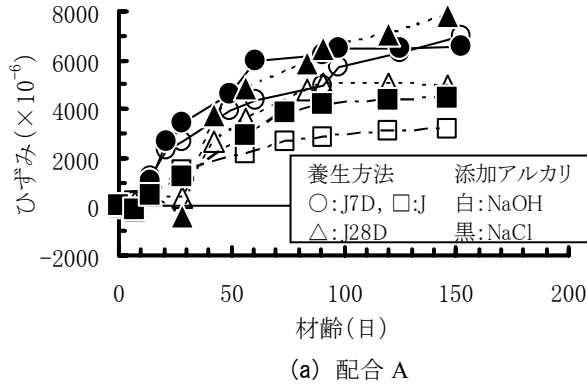


図-8 添加アルカリの種類の影響

齢でのひずみの差は、この自己収縮が影響している可能性も考えられる。このため、水セメント比が小さく強度域の高いコンクリートでは特に、膨張ひずみには自己収縮が含まれていることも考慮に入れる必要がある。

## 5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ① JIS 化学法で「無害」と判定された骨材であっても、特に判定値が境界付近である場合、試料採取位置・時期によっては、「無害でない」と判定される可能性がある。
- ② アルカリシリカ反応を促進する目的でコンクリートのアルカリ量を  $9.0\text{kg/m}^3$  まで高めても、圧縮強度への影響はそれほど大きくはない。

- ③ 促進養生時の環境温度  $40^\circ\text{C}$  と  $50^\circ\text{C}$  では、 $50^\circ\text{C}$  のほうが早期に膨張が開始した。
- ④ 飽和 NaCl 水溶液への浸せき時期を早めるほど膨張が早期に開始する。ただし、骨材の反応性やコンクリートの水セメント比によっては、内部へのアルカリ添加に比べると、その影響は小さい。
- ⑤ 練混ぜ時に添加するアルカリとして、NaOH と NaCl では NaOH のほうが膨張を早期に開始させることができた。ただし、測定されるひずみに自己収縮が与える影響も大きくなることも考慮する必要がある。
- ⑥ コンクリートのアルカリ量を  $9.0\text{kg/m}^3$  とし、 $50^\circ\text{C}$  の NaCl 水溶液へ浸漬することでコンクリートのアルカリシリカ反応性を比較的早期に判定できる可能性が見出された。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【施工編】，2008.3
- 2) 谷口秀明，浅井洋，三加崇，三上浩：高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性，第17回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.87-92，2008.11
- 3) 谷口秀明，樋口正典，佐々木亘，三上浩：アルカリシリカ反応を生じた高強度コンクリートの品質評価，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，第9巻，pp.171-178，2009.10
- 4) 谷口秀明，樋口正典，藤田学，河野広隆：施工者によるレディーミクストコンクリートの品質評価，コンクリート工学，Vol. 48，No. 2，pp. 15-23，2010. 2
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート法によるアルカリ骨材反応判定試験方法研究委員会報告書，1991.6
- 6) 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，アップグレードシンポジウム論文報告集，第7巻，pp.7-14，2007.11