

報告 高強度コンクリートのアルカリシリカ反応性試験方法に関する実験検討

糸内 完太*1・鈴木 澄江*2

要旨：高強度コンクリートに使用される高性能 AE 減水剤と、JASS 5N T-603 のコンクリートバー法で使用される水酸化ナトリウムは相性が悪く、練混ぜ直後にスランプの著しい低下が起こる。本研究では NaOH の代替として NaCl を使用した際のフレッシュ性状および膨張率に及ぼす影響について確認した。また、モルタルバー法においても NaCl を使用した場合の膨張率の測定を行い、両者の関係を調べた。NaCl を用いた場合のフレッシュ性状は良好で、モルタルバー法で判定基準を上回る場合でもコンクリートバー法で判定基準を下回る膨張率を示す場合のあることが分かった。

キーワード：アルカリシリカ反応, 高強度コンクリート, コンクリートバー法, モルタルバー法

1. はじめに

コンクリートのアルカリシリカ反応（以下、ASR）については JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）の附属書 B に 3 つの抑制対策が規定されている。高強度コンクリートでは JIS A 1145（骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法））（以下、化学法）または JIS A 1146（骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（モルタルバー法））（以下、モルタルバー法）で「無害」と判定された骨材を使用することが前提となっている。しかし、使用する骨材の試験結果の判定と実調合のコンクリートバー法の判定の相関性が必ずしも明らかになっておらず、判定基準の確立が今後の課題であると指摘されている¹⁾。

JASS 5N T-603（コンクリートの反応性試験方法）のコンクリートバー法で作製する供試体には、水酸化ナトリウム（NaOH）を酸化ナトリウム（Na₂O）当量で最大 2.4kg/m³使用する。W/C35%程度の高強度コンクリートの調合には、高性能 AE 減水剤が使用されるが NaOH との相性が悪く、コンクリートの流動性が著しく低下する。

本実験では、コンクリートの練混ぜ時に起こる流動性の低下を解決するため反応性骨材 3 種類を使用して添加するアルカリを NaOH から膨張性が類似していると報告²⁾されている塩化ナトリウム（NaCl）に変更した場合のコンクリートのフレッシュ性状、力学特性および膨張特性を確認した。また、JASS 5N T-603 に規定されているアルカリ添加量の最大値を超えるアルカリを後添加した供試体も作製し、アルカリ添加量の違いが膨張率に及ぼす影響についても確認した。

なお、コンクリートバー法と同様に JIS A 1146 においても添加するアルカリ量を NaCl に変更した場合の膨張特性を確認した。

表-1 コンクリートバー法の実験の要因と水準

要因	水準
粗骨材	硬質砂岩,チャート,安山岩 花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物
細骨材	陸砂, 花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物
添加アルカリ (Na ₂ Oeq)	NaCl を酸化ナトリウム (Na ₂ O) 当量で 2.4kg/m ³ ,3.6kg/m ³

表-2 コンクリートバー法の使用材料

材料	種類	記号	品質
セメント	普通ポルトランドセメント		3 社混合 密度 3.16 g/cm ³ , Na ₂ Oeq 0.52%（平均）
練混ぜ水	上水道水		茨城県つくば市
細骨材	掛川産陸砂	K	表乾密度 2.58g/cm ³ 吸水率 1.65 %
	花崗岩 ^{*1} 砕砂 (反応性骨材)	G	表乾密度 2.61g/cm ³ 吸水率 1.76%
粗骨材	青梅産 硬質砂岩	H	表乾密度 2.64g/cm ³ 吸水率 0.69%
	花崗岩 ^{*1} (反応性骨材)	G	表乾密度 2.66g/cm ³ 吸水率 1.35%
	チャート (反応性骨材)	C	表乾密度 2.64g/cm ³ 吸水率 1.41%
	安山岩 (反応性骨材)	A	表乾密度 2.69g/cm ³ 吸水率 1.89%
化学混和剤	高性能 AE 減水剤		ポリカルボン酸系化合物
	AE 助剤		樹脂酸系界面活性剤
	消泡剤		ノニオン系界面活性剤

※1 花崗岩と表記の骨材は、花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物を使用した。

2. コンクリートバー法の実験概要

2.1. コンクリートバー法の実験の要因

コンクリートバー法の実験の要因と水準を表-1 に示す。粗骨材には化学法において ASR が「無害」と判定された硬質砂岩と「無害でない」と判定された花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物、チャートおよび安山岩を

*1 工学院大学大学院 工学研究科 建築学専攻（学生会員）

*2 工学院大学 建築学部建築学科 教授・博士（工学）（正会員）

使用した。細骨材には化学法において ASR が「無害」と判定された陸砂と「無害でない」と判定された花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物の砕砂を使用した。添加するアルカリは NaCl を使用し、酸化ナトリウム (Na₂O) 当量で 2.4kg/m³および 3.6kg/m³とした。

なお、花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物のみ Na₂O 当量で 2.4kg/m³の水準とした。

2.2 コンクリートバー法の使用材料

コンクリートバー法の使用材料を表-2 に示す。使用した骨材の化学法の試験結果を表-3 に示す。使用した NaCl は JIS K 8150 (塩化ナトリウム (試薬)) に適合する濃度 99.5%以上のものとした。

2.3 コンクリートバー法の調査

コンクリートバー法の組合せを表-4 に、コンクリートの計画調査を表-5 に示す。H-2.4 および H-3.6 は比較用として ASR が化学法で「無害」と判定された掛川産陸砂および青梅産砕石を使用した。その他の調査では細骨材に花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物の砕砂を使用し、粗骨材に花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物、チャートおよび安山岩の砕石を使用した。

2.4 練混ぜ、供試体の作製および試験方法

コンクリートの練混ぜおよび供試体作製はフローリック・コンクリート研究所で行った。コンクリートは、容量 50L の強制 2 軸ミキサーを使用し、1 バッチ 40L を練り混ぜた。材料の準備および計量は JIS A 1138 に従い実施した。アルカリ (NaCl) は練混ぜ水に溶解して添加した。練り上がったコンクリートはフレッシュコンクリートの試験を行い、目標スランブ (21±2.0 cm) および目標空気量 (2±1.0%) を満足したことを確認してコンクリートバー法の供試体を 1 調査につき 3 体採取した。

H-3.6、C-3.6 および A-3.6 は添加アルカリ (Na₂O) を 2.4kg/m³ で作製したコンクリートのフレッシュ性状試験を行い目標スランブおよび空気量を満足したことを確認して供試体を作製した後、アルカリを合計 3.6kg/m³ になるように粒状の NaCl を添加して十分にコンクリートを切り返した後、供試体を 1 調査につき 1 体採取した。

なお、力学特性試験用供試体もアルカリ量ごとに 3 体ずつ採取した。

供試体は材齢 24 時間で脱型し、基長を測定した後、材齢 7 日まで作製した場所で所定の養生をした後に大学に

表-3 使用した骨材の化学法の試験結果

記号	化学法			
	Sc (mmol/L)	Re (mmol/L)	Sc/Re	判定
K	56	100	0.56	無害
G	393	54	7.23	無害でない
C	201	55	3.65	無害でない
A	334	83	4.02	無害でない

記号) K:陸砂, G:花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物, C:チャート, A:安山岩

表-4 コンクリートバー法の組合せ

調査番号	調査記号	使用粗骨材	NaCl ^{※1} (kg/m ³)	使用細骨材
1	H-2.4	硬質砂岩	2.4	陸砂
2	H-3.6		3.6	
3	G-2.4	花崗岩 ^{※2}	2.4	花崗岩(砕砂) ^{※2}
4	C-2.4	チャート	2.4	
5	C-3.6		3.6	
6	A-2.4	安山岩	2.4	
7	A-3.6		3.6	

※1: 添加アルカリ量 (Na₂O 当量)
※2: 花崗岩と表記の骨材は、花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物を使用した。

表-6 コンクリートの試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101(同時にスランブフローも測定)
空気量	JIS A 1128 (無注水法による)
コンクリートの温度	JIS A 1156 (抵抗温度計による)
圧縮強度	JIS A 1108
動弾性係数	JIS A 1127 (縦振動による)
静弾性係数	JIS A 1149 (コンプレッションメータによる)

表-7 モルタルバー法の実験の要因と水準

要因	水準
総アルカリ量	セメント質量の 1.2%、 反応性骨材質量の 1.2%
反応性骨材の混合率	0,30,50,100(%)
反応性骨材の岩種	花崗岩質岩体・ホルンフェルスの 混合物,チャート,安山岩

表-8 モルタルバー法の使用材料

材料	種類	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	3 社混合,密度 3.16g/cm ³ Na ₂ Oeq : 0.52% (平均)
練混ぜ水	上水道水	東京都八王子市
細骨材	標準砂	絶乾比重 2.64, 吸水率 0.42%, 実積率 66.7%
	花崗岩 ^{※1}	表乾密度 2.61g/cm ³ , 吸水率 1.76%
	チャート	表乾密度 2.64g/cm ³ 吸水率 1.41%
	安山岩	表乾密度 2.69g/cm ³ 吸水率 1.89%

※1: 花崗岩と表記の骨材は、花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物を使用した。

表-5 コンクリートバー法の計画調査

調査番号	W/C (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				添加アルカリ NaCl 換算 (kg/m ³)
						W	C	S	G	
1・2	35.0	21	2.0	0.55	49.8	175	500	832	856	H-2.4, G-2.4, C-2.4, A-2.4 : 4.53
3							500	841	865	
4・5							500	806	892	H-3.6, C-3.6, A-3.6 : 6.79
6・7							500	825	890	

搬入し、試験材齢まで JASS 5N T-603 に規定されている養生を行い、所定の材齢で膨張率を測定した。

コンクリートの試験項目および試験方法を表-6 に示す。力学特性試験は、G-2.4 は材齢 28 日のみ、H-3.6, C-3.6 および A-3.6 は材齢 91 日のみ、H-2.4, C-2.4 および A-2.4 は材齢 28 日および材齢 91 日で試験を実施した。G-2.4 の力学特性用の供試体は温度 20℃の条件で試験材齢まで封かん養生した。その他の調合の力学特性試験用の供試体は長さ変化用の供試体と同様に温度 40℃の条件で試験材齢まで封かん養生した。

3. モルタルバー法の実験概要

3.1 モルタルバー法の実験の要因と水準

モルタルバー法の実験の要因と水準を表-7 に示す。

細骨材には、コンクリートバー法で使用した 3 種類の反応性骨材を使用した。反応性骨材の混合率は 0, 30, 50 および 100% の 4 水準とした。反応性骨材に混合する細骨材は JIS R 5201 (セメントの物理試験方法) に規定されている標準砂とした。アルカリの添加は NaCl によって行い、アルカリ量は JIS に規定されているセメント質量に対して 1.2% のほか、反応性骨材の質量に対して 1.2% の 2 水準とし、アルカリ添加量の違いが膨張率に及ぼす影響について検討した。

3.2 モルタルバー法の使用材料

モルタルバー法の使用材料を表-8 に示す。使用した反応性骨材はコンクリートバー法で使用した粗骨材を破碎し JIS A 1146 に規定する粒度に調整したものである。セメントおよび添加するアルカリ NaCl はコンクリートバー法で使用したものと同一のものを使用した。

3.3 モルタルバー法の調合

モルタルバー法の組合せを表-9 に示す。調合は JIS A 1146 に準拠し、水+NaCl 溶液を 300ml、セメントを 600g、粒度調整した骨材 (表乾状態) を 1350g とした。

3.4 練混ぜ、供試体の作製および試験方法

練混ぜおよび供試体の作製方法は JIS A 1146 に準拠した。長さ変化の試験は JIS A 1129-3 (モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法 (ダイヤルゲージ法)) により行った。

4. 実験結果および考察

4.1 コンクリートバー法

(1) フレッシュ性状および力学特性

フレッシュ性状の試験結果を表-10 に示す。

すべての調合で目標スランプおよび目標空気量を満足する結果となった。NaOH を添加した場合には、スランプの著しい低下などが認められる場合があるが、NaCl を添加した場合には著しいこわばりなどは認められなかつ

表-9 モルタルバー法の組合せ

調合 番号	調合記号	アルカリ 添加 方法※1	岩種	反応性 細骨材 混合率 (%)
1	C1.2-0	C	標準砂※2	0
2	C1.2-G30		花崗岩※3	30
3	C1.2-G50			50
4	C1.2-G100			100
5	CS1.2-G30	30		
6	CS1.2-G50	50		
7	CS1.2-G100	100		
8	C1.2-C50	C	チャート	50
9	C1.2-C100	CS		100
10	CS1.2-C50			50
11	CS1.2-C100		100	
12	C1.2-C50	C	安山岩	50
13	C1.2-C100	CS		100
14	CS1.2-C50			50
15	CS1.2-C100			100

※1 : 記号 C は、セメント質量に対して 1.2%、記号 CS は反応性骨材の質量に対して 1.2% の添加率とした。

※2 : 調合 1 は比較用として骨材に標準砂を使用した。

※3 : 花崗岩と表記の骨材は、花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物を使用した。

表-10 フレッシュ性状の試験結果

調合番号	スランプ (cm)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	コンクリートの温度 (℃)
1	20.5	343×337	1.7	20
3	23.0	485×482	1.6	23
4	20.5	335×321	2.2	20
6	21.0	367×335	2.0	20

表-11 力学特性の試験結果

調合番号	圧縮強度 (N/mm ²)		動弾性係数 (kN/mm ²)		静弾性係数 (kN/mm ²)	
	F28	F91	F28	F91	F28	F91
1	83.5	90.6	43.8	44.6	38.1	39.8
2	—	98.0	—	44.2	—	38.6
3	75.4	—	41.2	—	32.0	—
4 ^{※1}	79.2	80.6	40.1	36.1	33.1	30.4
5 ^{※1}	—	52.2	—	24.5	—	11.0
6	87.4	91.2	42.7	42.7	35.7	37.3
7 ^{※1}	—	79.5	—	39.1	—	32.2

※1 調合番号 4,5,7 はコンクリート供試体にひび割れが発生したため、材齢 91 日の強度、弾性係数が低い値となっている。

った。材齢 28 日および 91 日の力学特性の試験結果を表-11 に示す。材齢 28 日と 91 日の双方で試験を行った調合では強度の差がほとんど認められなかった。これは温度 40℃で封かん養生したため、早期に強度が発現したものと推測される。力学特性の試験結果 (材齢 91 日) の反応性骨材を使用した調合 4、追加で NaCl を後添加した調



写真-1 コンクリートバー供試体の外観の一例
(C-2.4 および C-3.6 の供試体上面)

合 5 および調合 7 では、力学特性試験時に供試体に目視で確認できるひび割れが発生していたため、圧縮強度および弾性係数が低下したものと推察される。特に、調合 5 ではひび割れ本数が多く、強度および弾性係数の著しい低下につながったものと考えられる。NaOH を用いた場合には、添加量の増大に伴い圧縮強度が低下^{3), 4)}することが指摘されていたが、本研究の範囲では NaCl を用いた場合、調合間で多少ばらつきはあるもののひび割れが生じた供試体以外では力学特性の著しい低下は認められなかった。

(2) 膨張率

コンクリートバー法の材齢と膨張率の関係を図-1 に、材齢と質量変化率の関係を図-2 に示す。また、写真-1 にコンクリートバー供試体の材齢 6 ヶ月の外観の一例を示す。

粗骨材および細骨材のどちらにも無害な骨材を使用した H-2.4 および H-3.6 では、追加でアルカリを後添加した場合でもほとんど膨張は生じなかった。

また、粗骨材および細骨材に反応性骨材を使用した調合においてもアルカリ添加量が 2.4kg/m^3 では、いずれの岩種においても JASS 5N T-603 の判定基準である「0.1% 未満」となった。材齢 6 ヶ月の膨張率は、花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物が 0.04% 程度、チャートが 0.07% 程度、安山岩が 0.01% 程度となった。チャートを用いた供試体は材齢 5 ヶ月ごろから供試体作製時を基準に供試体の上面および側面を中心に 3 本程度のひび割れが発生し始めたものの、膨張率としては JASS 5N T-603 の判定基準を超えることはなかった。

アルカリ添加量が 2.4kg/m^3 のフレッシュコンクリートに更にアルカリを後添加し、アルカリ添加量を 3.6kg/m^3 にした場合の調合では、岩種がチャートおよび安山岩の調合で、膨張率が 0.1% を上回る結果を示した。チャートの調合では、材齢 3 ヶ月で判定基準の 0.1% を超え、最終的に材齢 6 ヶ月で 0.27% 程度の膨張率を示した。安山岩の調合では、材齢 5 ヶ月で判定基準の 0.1% に到達し、材

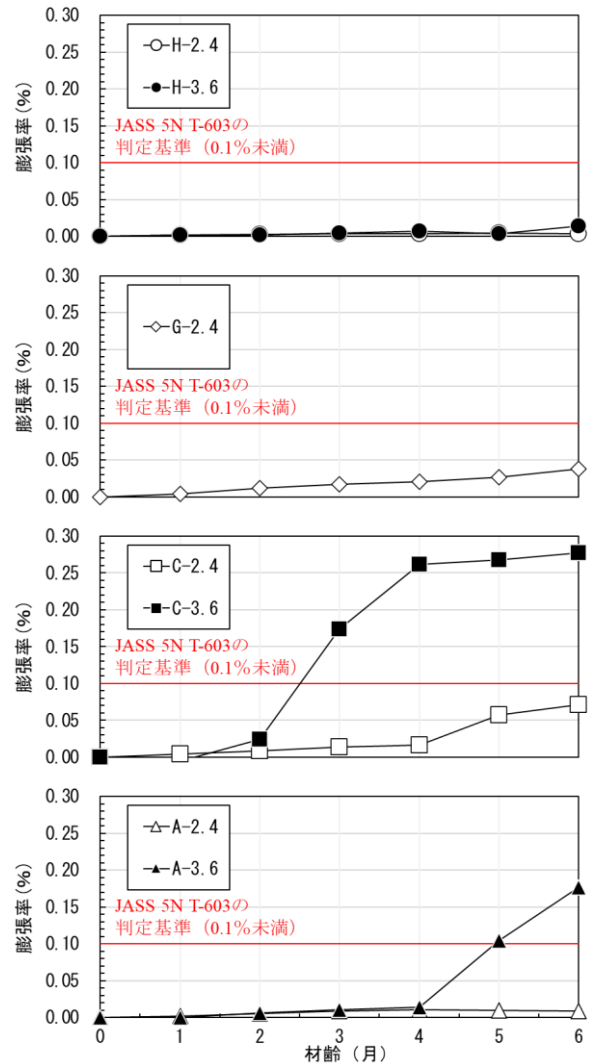


図-1 コンクリートバー法の材齢と膨張率の関係

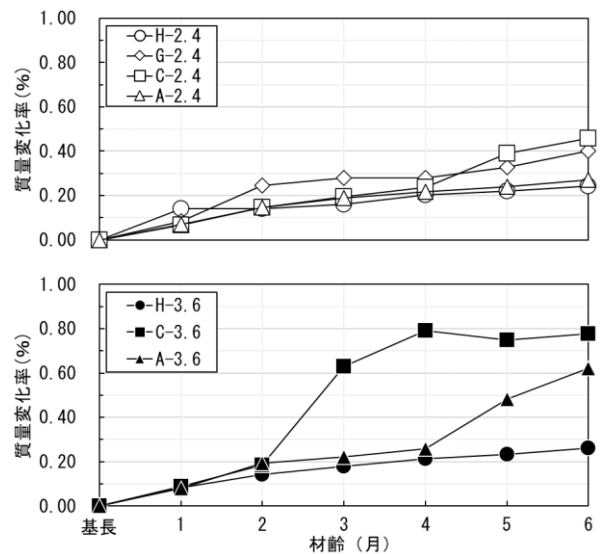
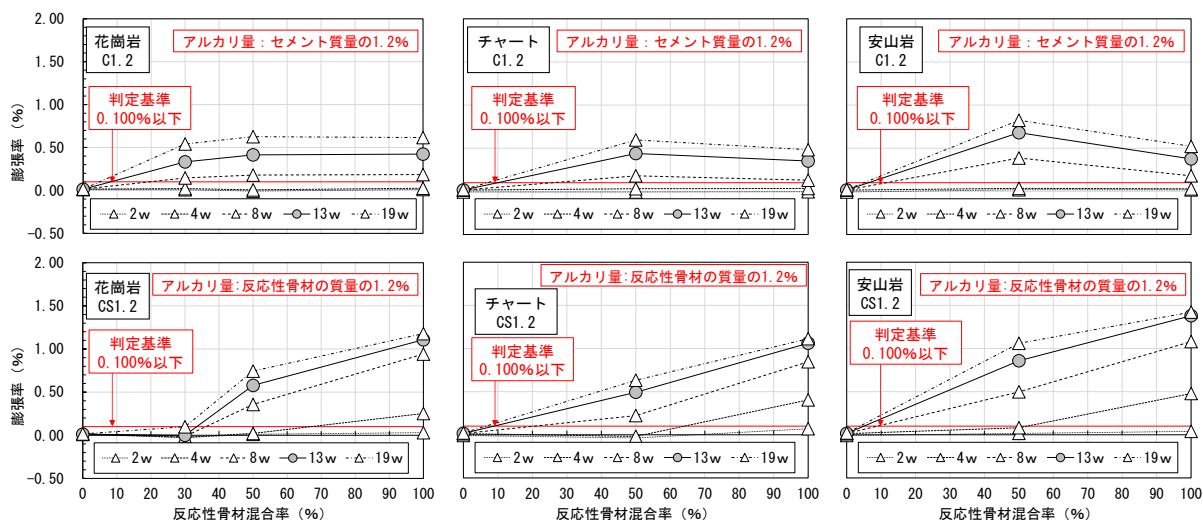


図-2 コンクリートバー法の材齢と質量変化率の関係

齢 6 ヶ月では 0.18% 程度の膨張率を示した。チャートを用いた調合の供試体では、膨張率が著しく大きくなった材齢 3 ヶ月ごろから、安山岩を用いた調合の供試体では



※：花崗岩と表記がされている骨材は花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物を使用した。

図－3 モルタルバー法における反応性骨材の混合率と膨張率の関係

材齢 5 ヶ月ごろから、いずれもひび割れの発生が確認され始める結果となった。チャートを用いた調査の供試体では、著しい膨張が材齢 2 ヶ月から 4 ヶ月ごろまで続き、その後、膨張率が横ばいとなった。

一方、アルカリ添加量 2.4kg/m^3 と 3.6kg/m^3 の質量変化率をみると、アルカリ添加量 2.4kg/m^3 の場合は岩種によらず、材齢とともに質量変化率が大きくなっていくことがわかる。チャートおよび安山岩のアルカリ添加量 3.6kg/m^3 の場合は、膨張率が著しく大きくなった 3 ヶ月または 5 ヶ月ごろから膨張率の増大と同様に質量変化率も増大する傾向を示した。

4.2 モルタルバー法

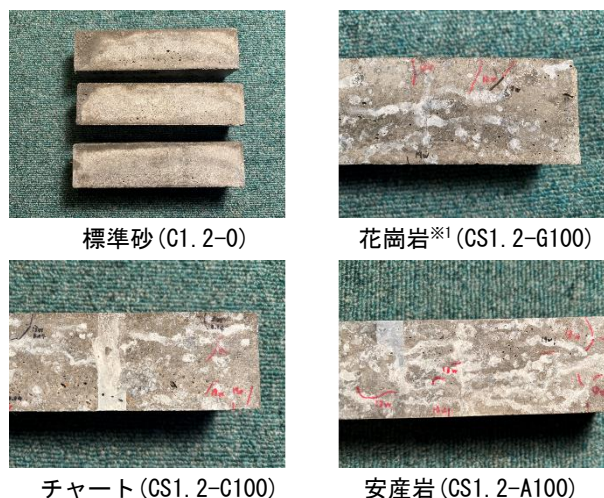
モルタルバー法による反応性骨材の混合率と膨張率の関係を図－3 に示す。写真－2 にモルタルバー法の供試体の一例を示す。標準砂 (C1.2-0) は反応性骨材混合率が 0% であり、材齢 26 週の膨張率が 0.02% 程度と JIS A 1146 の判定基準である 0.100% 以下を下回る結果となった。JIS A 1146 と同様のアルカリ量であるセメント質量に対して 1.2% の場合ではいずれの反応性骨材および混合率においても材齢 8 週において判定基準を上回っており、材齢 19 週においては判定基準を大きく上回る結果となった。材齢 13 週で既に 0.050% を上回っていたため、JIS A 1146 の判定基準によれば、その時点で「無害でない」と判定される結果となった。材齢 19 週では、いずれの岩種においても混合率 50% において最も膨張率が大きくなる傾向が認められた。材齢 19 週における各岩種の違いによる膨張率は、花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物混合率 50% の調査) では 0.54% 程度、チャート (混合率 50% の調査) では 0.60% 程度、安山岩 (混合率 50% の調査) では 0.82% 程度を示した。

一方、反応性骨材の質量に対して 1.2% のアルカリ量と

した場合は、すべての岩種において混合率が増えるほど膨張率も増大する傾向を示した。混合率 100% の調査では材齢 13 週で膨張率が 1.000% を超える結果を示した。材齢 19 週における各岩種の違いによる膨張率は、花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物 (混合率 100% の調査) では 1.18% 程度、チャート (混合率 100% の調査) では 1.11% 程度、安山岩 (混合率 100% の調査) では 1.42% 程度を示した。材齢 8 週ごろまでに判定基準の 0.100% を超えており、材齢 13 週を超えると膨張率がほとんど横ばいになることから NaCl の添加量が増えると早期に膨張が促進される傾向が認められた。

4.3 モルタルバー法とコンクリートバー法の比較

図－4 にモルタルバー法の膨張率とコンクリートバー法の膨張率の関係を示す。このグラフではモルタルバー法の材齢 4, 8, 13, 19 週の膨張率とコンクリートバー法の材齢 1, 2, 3, 6 ヶ月の膨張率を示しており、二つの試



※1：花崗岩と表記がされている骨材は花崗岩質岩体・ホルンフェルスの混合物を使用した。

写真－2 モルタルバーの供試体の一例 (供試体上面)

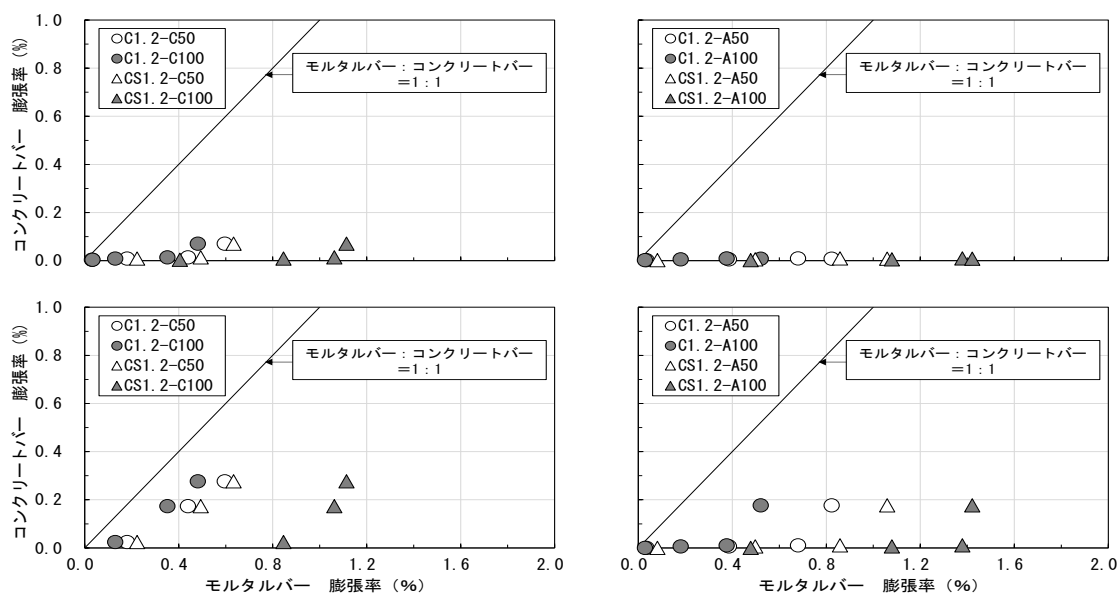


図-4 モルタルバーとコンクリートバーの膨張率の関係

験方法で材齢が概ね同程度の時期の値を比較した NaOH に代替して NaCl を添加した場合において JASS 5N T-603 および JIS A 1146 と同様のアルカリの添加量の調合ではモルタルバー法では判定基準を大きく超える膨張率を示したが、コンクリートバー法では JASS 5N T-603 の判定基準 (0.1%未満) までの膨張には至らなかった。

このことから高強度コンクリートの供試体を作製する際に、モルタルバー法において無害でないと判定された骨材を使用した場合でも、NaCl を添加して膨張率の測定を行うと NaCl の添加量が Na₂O 当量で 2.4kg/m³ であれば、コンクリートに著しい膨張を示さない可能性があることが確認された。

5 まとめ

本報告では以下のことが明らかとなった。

- 1) アルカリの添加方法として NaCl を用いたコンクリートのフレッシュ性状は良好で、すべての調合において目標スランプ (21±2cm) を満足する結果が得られた。本実験において NaOH の代替で NaCl を添加した場合はスランプの著しい低下は認められなかった。
- 2) 温度 40℃ で封かん養生したためコンクリートの力学特性試験では、供試体に膨張に伴うひび割れが発生し力学特性の低下が認められたが、それ以外の供試体では著しい低下は認められなかった。
- 3) NaCl を添加したコンクリートバー法においては、JASS 5N T-603 と同様のアルカリ添加量 (2.4kg/m³) においては判定基準を下回る膨張率 (0.1%未満) を示した。一方、NaCl を 3.6kg/m³ 添加した調合では、判定基準を上回る膨張率を示した。
- 4) JIS A1146 に準拠してアルカリ (NaCl) をセメント質

量に対して 1.2% となるように添加した調合では、いずれの岩種においても反応性骨材の混合率 50% が最も大きい膨張率を示した。また、アルカリを反応性骨材の質量に対して 1.2% となるように添加した調合では、反応性骨材の混合率およびアルカリの添加量の増大に伴い膨張量も増大する傾向を示した。

- 5) コンクリートバー法とモルタルバー法の膨張率の関係では、モルタルバー法において判定基準を上回る膨張率を示した場合でもコンクリートバー法においては膨張率が判定基準を下回る結果となる場合のあることを示した。

謝辞

本研究の実施に際し、工学院大学阿部道彦名誉教授にご助言を賜りました。また、実験には(株)フローリック・コンクリート研究所の皆様および建築研究所鹿毛忠継博士にご協力を頂きました。関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 鳥居和之：骨材のアルカリシリカ反応性の品質保証，コンクリート工学，Vol.39, No.5, pp.68-72, 2001.5
- 2) 中野錦一，小林茂弘，長岡誠一，有本義晴：反応性骨材の膨張に及ぼすアルカリ化合物の影響，セメント・コンクリート，No.446, pp.24-30, 1984.4
- 3) 阿部道彦，友沢史紀，田村公一，真野孝次：アルカリ骨材反応試験における添加アルカリの種類に関する検討，コンクリート工学年次論文報告集 10-2, pp.739-744, 1988
- 4) 小林一輔，宇野祐一：塩化ナトリウムの混入がコンクリートの諸性状に及ぼす影響，生産研究，42 巻，2 号，pp.38-40, 1990.2