

# 論文 膨張材を収縮低減剤によってスラリー化した混和材料の基本特性

辻埜 真人<sup>\*1</sup>・樋口 隆行<sup>\*2</sup>・盛岡 実<sup>\*3</sup>・橋田 浩<sup>\*4</sup>

**要旨:** 膨張材を収縮低減剤によってスラリー化した混和材料をアジテータ車に後添加する新しいひび割れ低減方法に関して検討した。スラリーを後添加する混練方法での拘束膨張量は膨張材のみを使用する場合に比べて大きく、スラリー化しても膨張材と収縮低減剤の併用効果があった。また、予めセメントや水に置換して膨張材や収縮低減剤を混練する従来法とスラリーを後添加する混練方法の違いが硬化特性に与える影響は小さかった。現場でのスラリーの添加を鑑みてアジテータ車で練り混ぜた結果、120秒間的高速攪拌でスラリーをベースコンクリートに均質に混ぜることができた。ただし、空気量の調整には更なる検討が必要である。

**キーワード:** 膨張材, 収縮低減剤, 拘束膨張試験, 乾燥収縮, ひび割れ, 混和材料

## 1. はじめに

コンクリートの収縮に起因するひび割れ問題に関して様々な検討がなされ、膨張材や収縮低減剤などの材料開発やひび割れ抑制効果の検証が進められている<sup>1)</sup>。材料の視点からの収縮ひび割れ対策としては、石灰岩骨材、膨張材および収縮低減剤の使用が一般的な対策として認知されている。しかし、石灰岩骨材については、地域性や遠方からの輸送に伴う環境負荷の増大などが課題として挙げられる。また、膨張材については、添加のタイミングによる練混ぜ不足から生じるポップアウトなどの危険性がある。収縮低減剤については、凍結融解抵抗性能が低下することや費用の観点などから使用実績がまだ少ない状況である。

そこで本論文では、地域性が少なく、比較的安価な膨張材の初期膨張効果を収縮低減剤によって向上させると同時に、膨張材を収縮低減剤によってスラリー化することで、練混ぜ不足の問題解決や膨張材を現場でも添加できる新しいひび割れ低減方法に関する検討を行う。

## 2. スラリーの基本特性

### 2.1 概要

膨張材を収縮低減剤によってスラリー化した混和材料の粘性や反応性について明らかにする。また、予めセメントや水に置換して膨張材や収縮低減剤を混練する従来方法（以下、従来法）とペーストにスラリーを後添加して混練する方法（以下、スラリー法）で作製した硬化セメントペーストの成分や微細構造を比較する。

### 2.2 実験概要

本研究では、エトリンガイト石灰複合型の低添加型膨張材：CSA（密度：3.05g/cm<sup>3</sup>、標準使用量：20kg/m<sup>3</sup>）を使用した。一方、既往の研究<sup>2)</sup>において、エトリンガイ

ト石灰複合型の膨張材（以下、膨張材）と様々な収縮低減剤を併用した場合に、初期の拘束膨張量が最も大きくなったポリオキシエチレンポリオキシプロピレングリコールおよびポリオキシプロピレンモノアルキルエーテルを主成分とする収縮低減剤：SRA（密度：1.00g/cm<sup>3</sup>、粘度：約 30mPa・S）を選定した。この収縮低減剤は、基本的には水分が含まれていない。スラリーは、膨張材に収縮低減剤を加えて、ホパートミキサで練り混ぜた。スラリーの粘度の測定には、B型粘度計を使用した。また、膨張材と収縮低減剤の反応性を確認するために、コンダクションカロリメーターで発熱量を測定した。一方、セメントペーストの分析試料は、表-1に示す作製概要に従って作製した。試料は材齢7日まで封かんで養生し、粉末X線回折（以下、XRD）による鉱物組成の同定と水銀圧入法による細孔構造の測定に供した。

### 2.3 結果および考察

スラリーの膨張材収縮低減剤比（CSA/SRA）と粘度の関係を図-1に示す。CSA/SRA=2.5（SRA/CSA=0.4）の場合に、流動性に優れ、材料分離がしにくかった。粉体質量に対する単位総発熱量の結果を図-2に示す。膨張材を収縮低減剤に添加した場合には、小さな発熱が認められた。セメントペーストのXRDパターンを図-3に示し、総細孔量を図-4に示す。従来法とスラリー法による明確な違いは確認されなかった。

以上の結果から、スラリー法は従来法と同等のセメント硬化体が得られると考えられる。

表-1 セメントペーストの作製概要

水準名	練混ぜ方法 およびスラリー添加時間	(W+SRA)/ (C+CSA)	W (g)	SRA (g)	C (g)	CSA (g)
従来法	JIS R 5201準拠	0.5	213.4	11.6	421.1	28.9
スラリー法	ペースト混練(JIS R 5201準拠) ⇒ 直後にスラリー*を添加					

\*スラリーは添加0.5h前に作製

\*1 清水建設（株） 技術研究所 構造・生産技術センター 博士(工学) (正会員)

\*2 電気化学工業（株） セメント・特混研究部 (正会員)

\*3 電気化学工業（株） セメント・特混研究部 博士(工学) (正会員)

\*4 清水建設（株） 技術研究所 企画部 博士(工学) (正会員)

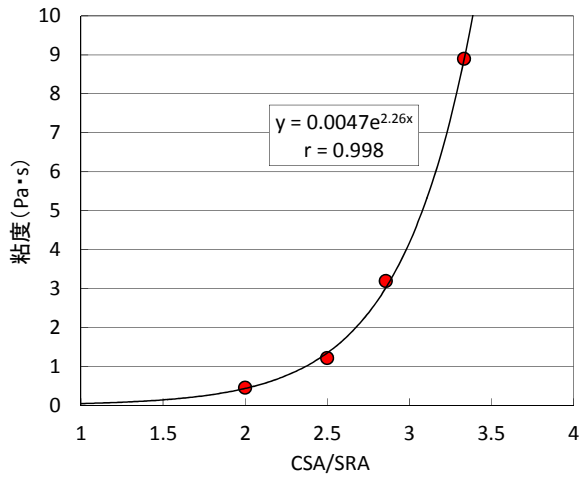


図-1 スラリーの粘度

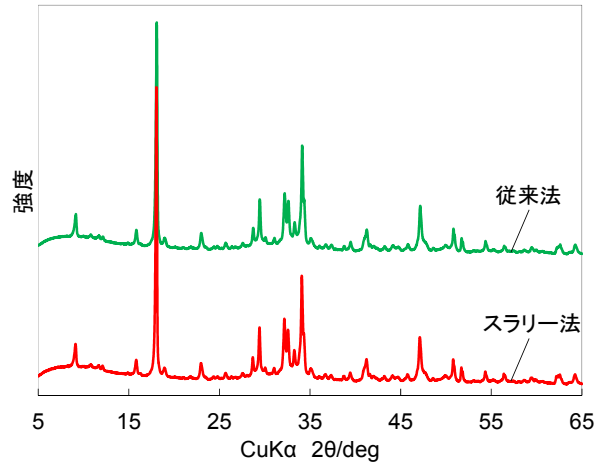


図-3 XRDパターン

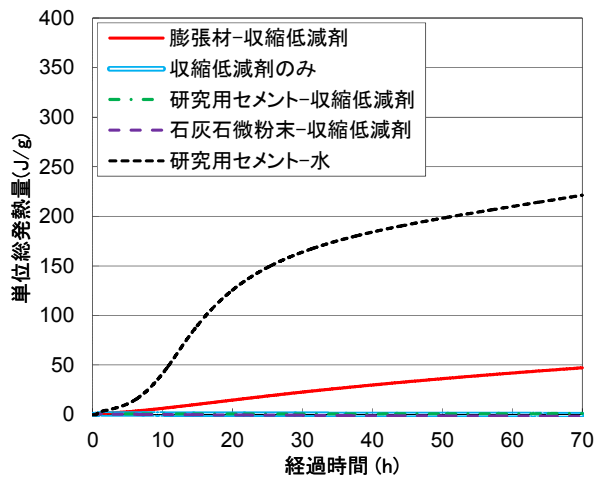


図-2 単位総発熱量

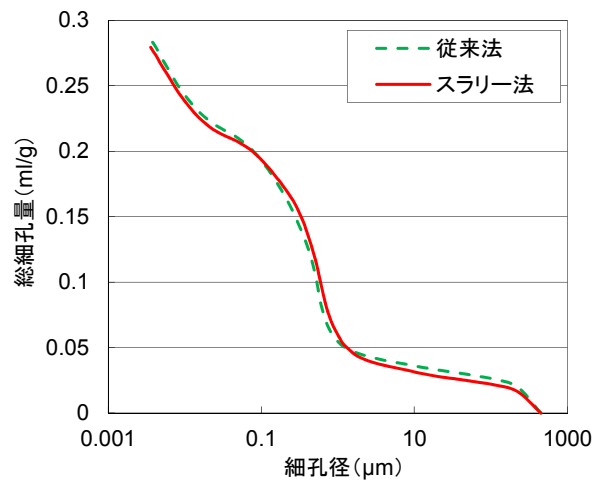


図-4 総細孔量

### 3. スラリーを後添加したモルタルの特性

#### 3.1 概要

従来法 (Plain) とベースモルタルにスラリーを後添加して練り混ぜる方法 (SL) におけるフレッシュ性状、圧縮強度および拘束膨張量を明らかにする。

#### 3.2 実験概要

実験水準およびモルタルの調合を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント:C (密度: 3.16 g/cm<sup>3</sup>) を使用し、細骨材は標準砂: S1 (絶乾密度: 2.64 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率: 0.42%) を使用した。膨張材と収縮低減剤は前章と同様の材料を用いて、SRA/CSA は流動性に優れていた 0.4 とした。実験では、スラリーの添加時間 (SL0.5h

は、ベースモルタルもしくはコンクリートの練上がり後、0.5 時間にスラリーを添加したことを表す) による影響も調査する。なお、スラリーはベースモルタルへ添加する 0.5 時間前に作製した。練混ぜにはホバートミキサーを使用した。SL の水準については、ベースモルタルが練り上がった各時間後にスラリーを添加し、高速攪拌を 60 秒間実施してから実験に供した。圧縮強度試験は、打込みから材齢 1 日で脱型し、材齢 29 日まで標準養生を行ってから実施した。また、拘束膨張試験は、JIS A 6202 の附属書 2 に準拠した。

#### 3.3 結果および考察

表-2 のフレッシュ性状の結果に着目すると、SL0h

表-2 実験水準、モルタルの調合およびフレッシュ性状

No.	水準名	練混ぜ方法およびスラリー添加時間	(W+SRA)/(C+CSA)	SRA/CSA	W (g)	SRA (g)	C (g)	CSA (g)	S1 (g)	15打フロー (mm)	空気量 (%)
1	Plain	JIS R 5201準拠	0.5	0.4	225	-	450	-	1350	210	3.6
2	CSA	JIS A 6202準拠	0.5	0.4	225	-	421.1	28.9	1350	218	3.3
3	SRA	SRAを水置換してJIS R 5201準拠	0.5	0.4	213.4	11.6	450	-	1350	199	3.1
4	CSA-SRA	SRAを水置換してJIS A 6202準拠	0.5	0.4	213.4	11.6	421.1	28.9	1350	211	3.7
5	SL0h	モルタル混練 (JIS R 5201準拠) ⇒ 直後	0.5	0.4	213.4	11.6	421.1	28.9	1350	195	2.5
6	SL0.5h	モルタル混練 (JIS R 5201準拠) ⇒ 0.5時間後	0.5	0.4	213.4	11.6	421.1	28.9	1350	184	2.9
7	SL1.0h	モルタル混練 (JIS R 5201準拠) ⇒ 1.0時間後	0.5	0.4	213.4	11.6	421.1	28.9	1350	188	3.1
8	SL1.5h	モルタル混練 (JIS R 5201準拠) ⇒ 1.5時間後	0.5	0.4	213.4	11.6	421.1	28.9	1350	185	3.1
9	SL2.0h	モルタル混練 (JIS R 5201準拠) ⇒ 2.0時間後	0.5	0.4	213.4	11.6	421.1	28.9	1350	180	2.4

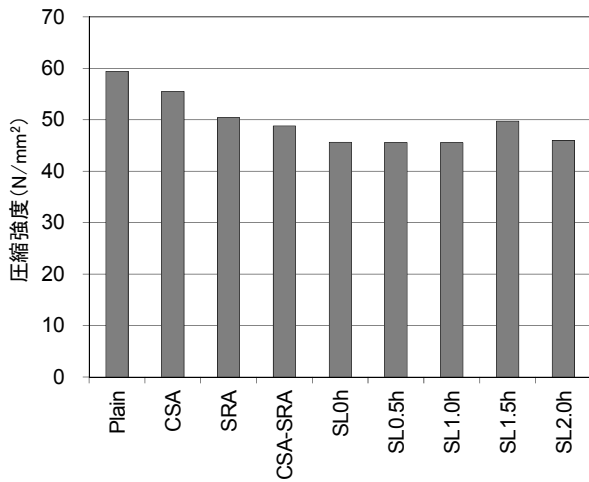


図-5 モルタルの圧縮強度試験の結果

の空気量は、Plain や CSA-SRA と比較して約 1%少なかった。スラリーを各経過時間で添加した場合も同様に空気量は少なくなった。一方、15 打フローについても、空気量の影響を受けたと考えられる低下が認められた。15 打フローは、添加時間の経過とともに低下が進んでいるが、ベースモルタルの流動性が低下したためと考えられる。圧縮強度の結果を図-5 に示す。Plain に比べて、膨張材や収縮低減剤を使用した場合には、強度の低下が認められた。また、SL1.5h は CSA-SRA と同等の強度であったが、スラリーを添加した他の水準については、CSA-SRA に比べて約 5%の強度低下を示した。空気量の影響を考慮した場合には、さらに強度の低下率は大きいものと推察される。拘束膨張試験の結果を図-6 に示す。材齢 7 日の膨張ひずみは、スラリーを添加した全ての水準で、CSA より大きくなった。スラリー化した場合でも膨張材と収縮低減剤の併用効果が得られるものと考えられる。添加時間では SL0.5h が最も大きく、CSA-SRA より約 10%大きくなったが、その他については反対に小さく、明確な傾向は捉えられなかった。

以上の結果から、スラリーの添加に伴い、モルタルの空気量および圧縮強度は低下するが、拘束膨張量は膨張材の単独使用に比べて大きくなり、スラリー化した場合も膨張材と収縮低減剤との併用効果が確認できた。

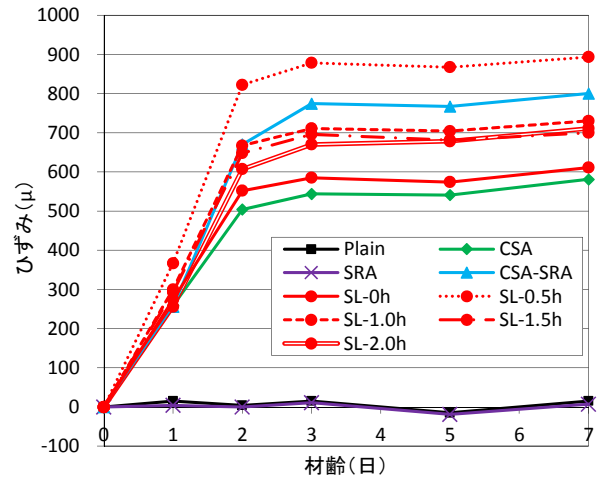


図-6 モルタルの拘束膨張試験の結果

#### 4. スラリーを後添加したコンクリートの特性

##### 4.1 概要

室内試験で、実施工における運搬時間や適用方法を考慮して、スラリーの添加時間やスラリーの作製経過時間がコンクリートに与える影響を明らかにする。

##### 4.2 実験概要

実験水準およびコンクリートの調合を表-3 に示す。また、使用材料を表-4 に示す。実験はスラリーの添加時間を変化させた検討1と、スラリーの作製後からの経過時間がコンクリートに与える影響を調査する検討2の2つである。各検討での膨張材の使用量は、標準使用量の1/2の10kg/m³とした。コンクリートの練混ぜの直前にスラリーを作製した水準には-0dと、2日前に作製した水準には-2dと略記した。ミキサは、強制パン型ミキサを使用した。ベースコンクリート(Plain)を練り混ぜて、

表-4 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント: 密度(3.16g/cm³)
細骨材	S2	山砂: 表乾密度(2.62g/cm³), 吸水率(1.68%)
粗骨材	G1	石灰岩碎石: 表乾密度(2.70g/cm³), 吸水率(0.26%)
混和材	CSA	複合型膨張材: 密度(3.05g/cm³), 標準使用量(20kg/m³)
	SRA	収縮低減剤: ポリオキシエチレンポリオキシプロピレングリコールおよびポリオキシプロピレンモノアルキルエーテル
化学混和剤	-	AE減水剤: リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	-	消泡剤: ポリアルキレングリコール誘導体

表-3 実験水準、コンクリートの調合およびフレッシュ性状の結果

検討	水準名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				外割 (kg/con m³)		化学混和剤	フレッシュ性状		
				W	C	S2	G1	CSA	SRA		スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
1	Plain	45	48.9	175	389	842	906	-	-	AE減水剤:C×0.5%	20.5	3.9	20.8
	CSA	45	48.9	175	389	842	906	-	4	AE減水剤:C×0.5%	20.0	3.7	21.2
	SRA	45	48.9	175	389	842	906	10	-	AE減水剤:C×0.5%	21.5	3.8	21.0
	CSA-SRA	45	48.9	175	389	842	906	10	4	AE減水剤:C×0.5%	20.5	4.5	21.2
	SL0.5h-0d	Plainに右記の混合比率のスラリーと						10	4	消泡剤:C×0.0045%	20.5 ⇒ 19.0	3.9 ⇒ 5.4	20.8 ⇒ 20.7
	SL1.0h-0d	消泡剤を外割でミキサに添加								消泡剤:C×0.008%	16.5 ⇒ 16.0	4.2 ⇒ 5.3	20.4 ⇒ 20.4
	SL1.5h-0d									消泡剤:C×0.008%	14.0 ⇒ 15.5	4.8 ⇒ 5.5	20.1 ⇒ 20.0
2	Plain	45	48.9	175	389	842	906	-	-	AE減水剤:C×0.5%	17.0	4.0	18.4
	CSA	45	48.9	175	389	842	906	-	4	AE減水剤:C×0.5%	19.5	3.8	19.1
	SRA	45	48.9	175	389	842	906	10	-	AE減水剤:C×0.5%	21.5	3.7	18.2
	CSA-SRA	45	48.9	175	389	842	906	10	4	AE減水剤:C×0.5%	21.0	3.6	19.2
	SL0.5h-0d	Plainに右記の混合比率のスラリーと						10	4	消泡剤:C×0.004%	20.0 ⇒ 18.0	3.7 ⇒ 3.2	18.3 ⇒ 18.7
	SL0.5h-2d	消泡剤を外割でミキサに添加								消泡剤:C×0.004%	19.0 ⇒ 17.5	4.0 ⇒ 3.4	18.3 ⇒ 18.7

\*矢印の左: ベースコン, 右: スラリー投入後の結果を表す

フレッシュ性状を確認した後に、ミキサにコンクリートを戻してスラリーを添加した。スラリーを加えて60秒間練り混ぜた後に排出し、フレッシュ試験および硬化特性の試験体采取了。なお、拘束膨張試験は、JCI 規準「円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法：JCI-S-009-2012」<sup>2,3)</sup>に準拠した。

### 4.3 結果および考察

スラリーを後添加したコンクリートは、モルタルと異なり、空気量が増加して6%を超えたことから、表-3に示すように、スラリーと同時に消泡剤を添加した。検討1と検討2では異なる傾向を示したが、目標空気量の3.0から6.0%の範囲に収めることが可能であった。一方、スランプは、スラリーの添加に伴い低下する傾向が認められたが、SL1.5h-0dのようにスランプが小さくなった場合には軟らかくなった。スラリーの粘性の影響を受けていると考えられる。所定の材齢まで鋼製の軽量円筒型枠内で封かん養生した3体の圧縮強度試験の平均結果を図-7および図-8に示す。検討1では、スラリーを添加した水準については、Plainに比べて約10%の強度低下が確認された。また、CSA-SRAと比べても4%の強度低下が確認されたが、空気量の影響と考えられ、スラリーの添

加時間の違いによる強度低下は認められなかった。一方、検討2では、スラリーを添加した水準については、PlainやCSA-SRAに比べて、明確に強度低下しなかった。検討1に比べて空気量が相対的に小さかったことに起因していると考えられる。最後に拘束膨張試験の結果を図-9および図-10に示す。検討1および検討2ともに、材齢7日の膨張量はCSAに比べてCSA-SRAやSLの方が大きくなり、モルタル試験の結果と同様であった。検討1の添加時間の違いでは、ベースコンの練混ぜ後の1時間で添加したSL1.0h-0dはCSA-SRAと同程度であったが、SL0.5h-0dやSL1.5h-0dは約15%小さくなった。一方の検討2では、CSA-SRAとSL0.5h-0dは同程度であった。また、SL0.5h-2dについても同程度の膨張量であったことからスラリーの作製経過時間による影響は小さく、2章で示した膨張材の反応による影響は小さいと考えられる。

以上の結果から、室内試験では、実施工における通常の運搬時間を考慮した1.5時間までにスラリーおよび消泡剤を添加すれば、空気量、圧縮強度や拘束膨張量へ与える影響は小さいと考えられる。また、スラリーの製作経過時間についても2日以内であれば影響は小さいと考えられる。

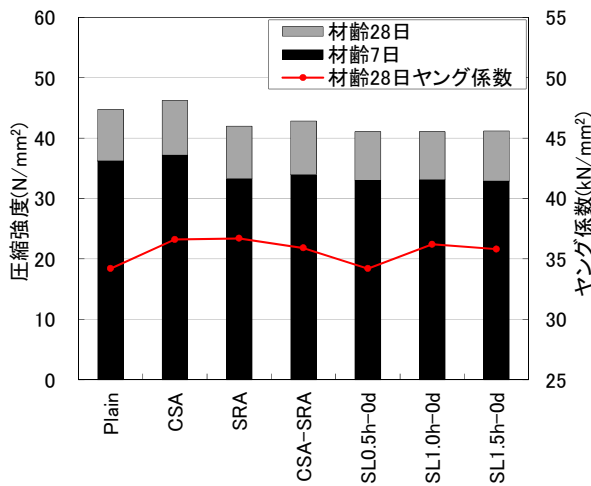


図-7 力学特性の結果（封かん養生）：検討1

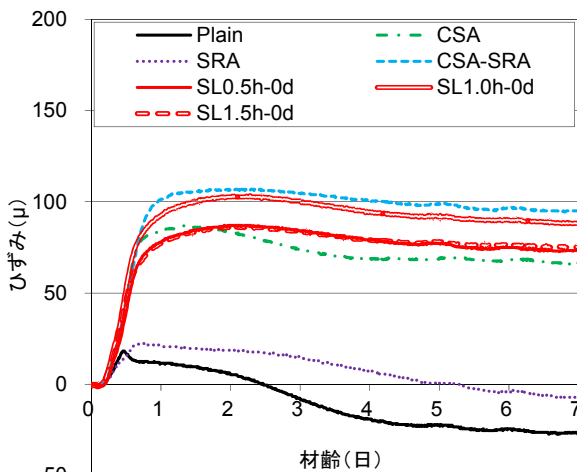


図-9 円筒型枠法による拘束膨張試験の結果：検討1

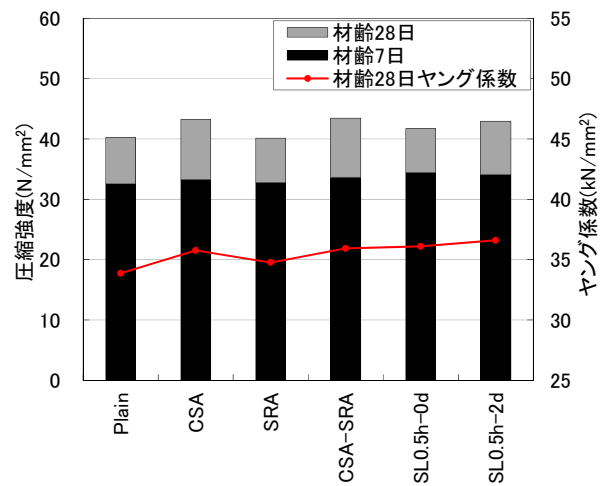


図-8 力学特性の結果（封かん養生）：検討2

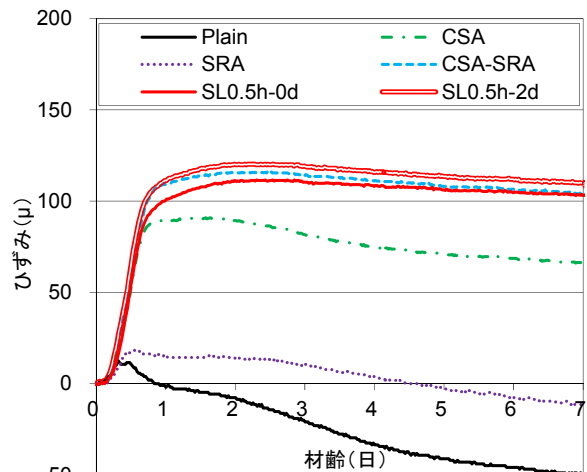


図-10 円筒型枠法による拘束膨張試験の結果：検討2

## 5. アジテータ車の攪拌時間による影響

### 5.1 概要

膨張材と収縮低減剤を従来のプラントで練り混ぜた場合とベースコンクリートが積まれたアジテータ車にスラリーを後添加し、高速攪拌した場合の攪拌時間がコンクリートの均質性に与える影響を明らかにする。

### 5.2 実験概要

実験水準およびコンクリートの調合を表-5に示す。また、使用材料を表-6に示す。さらに、試料採取方法を表-7に示す。実験水準は、従来方法のCSA-SRAと各Plainにスラリーを添加にして、60秒間と120秒間の高速攪拌を実施するSL0.5h-60sとSL0.5h-120sの3つとした。スラリーはコンクリートの練混ぜ直前に作製した。4m<sup>3</sup>のコンクリートを積んだアジテータ車からPlainの評価実験に必要な量(約100L)を採取し、残りをスラリー添加用に利用した。フレッシュ性状や硬化特性の試料は、アジテータ車内のコンクリートを概ね3等分するような部分から採取して、前半(e)、中盤(m)および後半(l)と名付けて区別した。なお、SL0.5h-120sについては、1度目の検討で、空気量が6%を超えたために、表-5に示した量の消泡剤をスラリーと同時に原液で添加した。圧縮強度は、前章と同様に封かん養生で評価した。また、拘束膨張試験については、バラツキの影響を確認するために、各水準につき5本とした。また、乾燥収縮率については、JIS A 1129の附属書Aに準拠した。

### 5.3 結果および考察

表-5のフレッシュ性状の結果に着目すると、アジテータ車の高速攪拌を60秒間実施したSL-0.5h-60sのスランプは同等であったが、空気量はPlainから約1%増加した。前述したように120秒間攪拌した場合には、空気量が6.2%(Plainは4.1%)と不合格になったことから消泡剤による調整が必要と考えられ、SL0.5h-120sについては、前章の結果を参考に消泡剤を添加したが、十分な低減効果が得られず、合格基準の上限値の6.0%であった。力学特性の結果を図-11に示す。Plainに比べて、SLを添加した場合には圧縮強度は約10%低下した。膨張材と収縮低減剤を併用したことによる影響は考えられるが、空気量が増えたことによる影響も大きいと考えられ、空気量

の調整方法を検討する必要がある。なお、採取タイミングによる違いは確認できなかった。拘束膨張試験の結果を図-12に示す。各採取タイミングでのバラつきは全ての水準で小さく、安定した結果が得られていると判断できる。一方で、平均した結果に着目すると、従来の練混ぜ方法であるCSA-SRAおよびSL0.5h-120sについては、ほぼ同程度の結果が得られたが、SL0.5h-60sについては差が認められ、攪拌時間の不足が示唆された。なお、CSA-SRAとSLの膨張量の差については、室内試験練り

表-6 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	普通ポルトランドセメント: 密度(3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S3	石灰岩砕砂: 表乾密度(2.67g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率(1.49%)
	S4	山砂: 表乾密度(2.60g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率(2.42%)
粗骨材	G2	石灰岩砕石: 表乾密度(2.70g/cm <sup>3</sup> ), 吸水率(0.93%)
混和材	CSA	複合型膨張材: 密度(3.05g/cm <sup>3</sup> ), 標準使用量(20kg/m <sup>3</sup> )
	SRA	収縮低減剤: ポリオキシエチレンポリオキシプロピレングリコールおよびポリオキシプロピレンモノアルキルエーテル
化学混和剤	-	AE減水剤: リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	-	消泡剤: ポリアルキレングリコール誘導体

表-7 試料採取方法

水準名	コンクリート種類	スラリーの添加時間	スラリー添加後の高速攪拌時間	採取タイミング
CSA-SRA-e	CSA-SRA	-	-	前半:e
CSA-SRA-m		-	-	中盤:m
CSA-SRA-l		-	-	後半:l
PlainA-e	PlainA	-	-	前半:e
SL0.5h-60s-e	PlainA + SL	PlainA 練り上がり 約0.5時間後	60秒	前半:e
SL0.5h-60s-m				中盤:m
SL0.5h-60s-l				後半:l
PlainB-e	PlainB	-	-	前半:e
SL0.5h-120s-e	PlainB + SL	PlainB 練り上がり 約0.5時間後	120秒	前半:e
SL0.5h-120s-m				中盤:m
SL0.5h-120s-l				後半:l

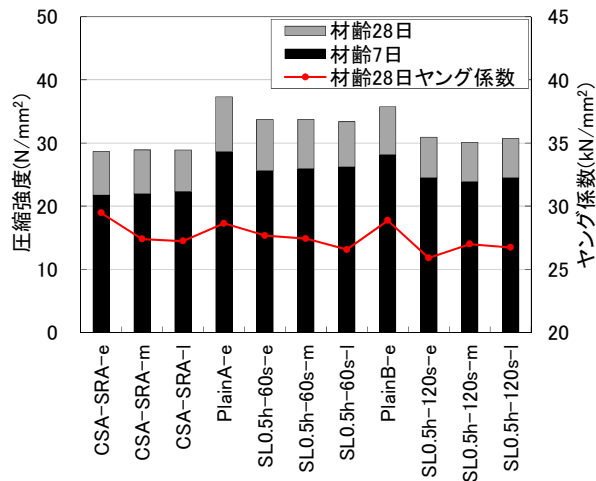


図-11 力学特性の結果(封かん養生)

表-5 各水準における拘束膨張試験の結果

水準名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					外割 (kg/con m <sup>3</sup> )		化学混和剤	フレッシュ性状		
			W	C	S3	S4	G2	CSA	SRA		スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
CSA-SRA	52.3	45.3	187	358	312	467	967	10	4	AE減水剤:C×1.05%	20.5(e)	5.0(e)	28.7(e)
PlainA	52.3	45.3	187	358	312	467	967	-	-	AE減水剤:C×1.05%	20.0(e)	4.9(e)	28.4(e)
SL0.5h-60s	PlainAに右記の混合比率のスラリーを外割でアジテータ車に添加に添加							10	4	-	20.5(e)	5.9(e) 5.8(m) 5.6(l)	29.1(e)
PlainB	52.3	45.3	187	358	312	467	967	-	-	AE減水剤:C×1.05%	19.5(e)	4.1(e)	28.0(e)
SL0.5h-120s	PlainBに右記の混合比率のスラリーと消泡剤を外割でアジテータ車に添加に添加							10	4	消泡剤 C×0.004%	20.0(e)	6.0(e) 6.0(m) 5.9(l)	28.7(e)

\*( )の記号は採取タイミングを表す

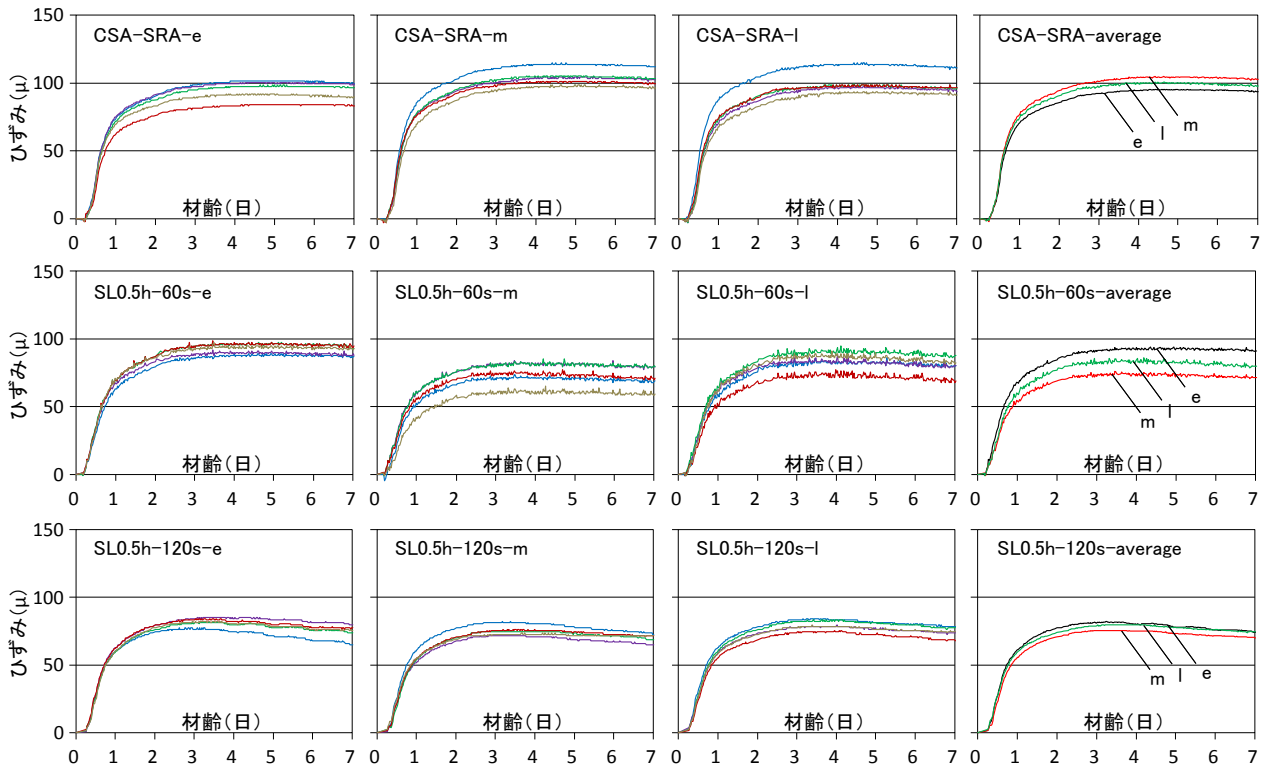


図-12 各水準における拘束膨張試験の結果

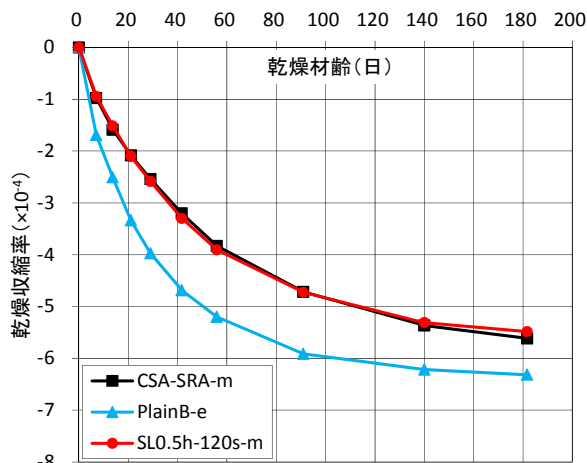


図-13 乾燥収縮率試験の結果

では同程度の結果もあったことから練混ぜバッチのロットによる影響が主に考えられる。最後に、乾燥収縮率試験の結果を図-13に示す。CSA-SRAとSL0.5h-120sの結果は同等であり、スラリー化による影響は確認されず、長期的に収縮低減剤による効果が確認できた。

以上の結果から、アジテータ車でスラリーを攪拌する場合には、120秒間の高速攪拌で均質性が確保でき、空気量の調整には、更なる検討が必要であると考えられる。

## 6. まとめ

膨張材を収縮低減剤によってスラリー化した混和材料をコンクリートへ添加する新しいひび割れ低減方法に関して検討した。得られた知見を以下に示す。

(1) 鉱物組成の同定と水銀圧入法による細孔構造の結果

から、スラリーの後添加は、従来の練混ぜ方法と同等のセメント硬化体が得られると考えられる。

- (2) 室内試験で、スラリーを添加したモルタルとコンクリートの拘束膨張量は、膨張材の単独使用に比べて大きくなり、スラリー化しても膨張材と収縮低減剤の併用効果があった。
- (3) スラリーは、ベースコンクリートの練混ぜ後1.5時間までに添加して練り混ぜれば、圧縮強度や拘束膨張量に与える影響は小さいと考えられる。
- (4) スラリーの製作経過時間は、2日以内であればコンクリートに与える影響は小さいと考えられる。
- (5) スラリーは、アジテータ車の120秒間の高速攪拌で、ベースコンクリートに均質に混ぜることができ、現場で膨張材の添加が可能であると考えられる。ただし、空気量の調整には検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状：日本建築学会，2013.7
- 2) 樋口隆行，吉野亮悦，盛岡実：膨張材を混和したモルタルの物性におよぼす収縮低減剤種の影響，セメント・コンクリート論文集，No.65，pp.196-202，2011
- 3) 辻埜真人，橋田浩，湯浅竜貴，高橋圭一：膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.437-442，2011
- 4) 円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法（JCI-S-009-2012）：日本コンクリート工学会