

## 湿潤養生期間が膨張材を用いたコンクリートの膨張・収縮特性に及ぼす影響

藤下 大知      飯田 康介  
塚本 康誉      塩田 博之<sup>\*1</sup>

### 概 要

本研究では、膨張材を用いたコンクリートの膨張・収縮特性に及ぼす湿潤養生期間の影響を明らかにするため、湿潤養生期間を1, 3, 5, 7日と変化させコンクリートの強度および耐久性を検討した。その結果、養生期間1日の圧縮強度は、膨張材の有無に関わらず、3日以上のもので比較して著しく強度低下が生じ、標準養生に対して19～37%低下した。また、膨張材を用いたコンクリートの乾燥期間26週における長さ変化率（乾燥収縮率）は、湿潤養生期間による差は見られなかった。湿潤養生期間7日とした膨張材を用いたコンクリートの乾燥収縮率は、膨張材を用いないものと比べ12%程度低減し、これに拘束膨張率を合成した長さ変化率は、40%程度低減した。

### Influence of Moist Curing Period on Expansion and Shrinkage Properties of Concrete Using Expansive Additive

#### Abstract

In this study, to clarify the effect of the moist curing period on the expansion and shrinkage properties of concrete with an expansive additive, the strength and durability of concrete were evaluated by varying the moist curing period to 1, 3, 5, and 7 days.

The results showed that the compressive strength of concrete cured for only 1 day, regardless of whether an expansive additive was used, was significantly lower than that cured for 3 days or longer, showing a 19 to 37% reduction compared to standard curing. The length change (drying shrinkage) of concrete with the expansive additive after a 26-week drying period showed no notable differences based on the moist curing period. For concrete subjected to a 7-day moist curing period, the drying shrinkage was reduced by approximately 12% compared to concrete without the expansive additive, and the length change, incorporating the restrained expansion rate, was reduced by about 40%.

キーワード：膨張材、湿潤養生期間、拘束膨張率、乾燥収縮率、圧縮強度

<sup>\*1</sup> 建築本部建築統括部

## §1. はじめに

### 1.1 背景

コンクリートに生じるひび割れは、その程度により構造物の耐久性や安全性および美観性の低下に大きな影響を及ぼすため、コンクリート打設前の材料設計や養生計画が重要となる。乾燥収縮ひび割れは、長年に渡り数々の研究が行われてきたが未だ解決されていない課題の1つであり、有害なひび割れの抑制は建物の高寿命化や不具合事象の減少および維持管理コスト低減等の観点から非常に有効であるといえる。

コンクリート材料面の対策として石灰石碎石(以下、石灰石という。)や膨張材、収縮低減剤等を使用しコンクリートに生じる収縮や拘束応力を低減させる方法がある。他方、施工面の対策としてはコンクリートの硬化初期において適切に養生を行うことで、収縮ひび割れの抑制に効果があるとされる。

膨張材を使用したコンクリート(以下、膨張材コンクリートという。)は、材齢初期における養生方法により、その効果が左右されるため、日本建築学会「建築工事標準仕様書JASS 5 鉄筋コンクリート工事」<sup>1)</sup>において、膨張材コンクリートの湿潤養生期間(以下、本論文の文中において養生期間という。)は、普通ポルトランドセメントを用いた場合、建築物の計画供用期間の級が短期(おおよそ30年)および標準(同65年)で5日以上、長期(同100年)および超長期(100年超)で7日以上と規定されている。一方で、工期短縮を求められる建設現場において、コンクリートの所要品質を確保したうえで養生期間を短縮することは、生産性向上やコスト削減等の観点から非常に有効である。しかし、膨張材の種類や使用量がコンクリートの収縮特性に及ぼす影響に関する研究は多くあるものの、養生期間が膨張材コンクリートに与える影響に関する研究は少ない。保利ら<sup>2)</sup>は養生期間を変えて拘束膨張・乾燥収縮試験を行っており、貴重なデータが得られている。しかしながら、測定期間が短いことや拘束条件下での結果であることから、さらなる検討の余地があると思われる。

そこで本研究では、膨張材コンクリートを対象に養生期間がコンクリートの膨張・収縮特性に及ぼす影響を明らかにするため、試験室での実験的検討を行った。養生期間を1, 3, 5, 7日の4水準に変化させ、コンクリートの強度特性および耐久性について調べ、その傾向を示すとともに、これらの結果から膨張材を用いた場合の適切な養生期間について検討した。

## §2. 実験概要

実験の要因と水準を表1に、コンクリートの使用材料を表2に示す。膨張材の種類は、石灰系(L)とエトリンガイト・石灰複合系(CSA)の2種類(いずれも20型)とし、膨張材の使用量は0kg(N)、標準使用量の20kg(EX-L-20、EX-CSA-20)および標準使用量より多い23kg(EX-L-23、EX-CSA-23)の3水準とした。粗骨材の種類は、硬質砂岩碎石および石灰石(EX-L-20(LS))の2水準とし、計6調合のコンクリートについて検討した。養生期間は、Nのみ1, 3, 7日の3水準とし、膨張材コンクリートは1, 3, 5, 7日の4水準とした。試験項目を表3に示す。供試体の養生方法は、コンクリート打込み後、型枠上面にポリ塩化ビニリデン製フィルムと濡れウエスを掛け乾燥を防止し、 $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温室に静置し、材齢 $24 \pm 1$ 時間で脱型した。その後、それぞれ所定の養生期間が終了次第乾燥を開始した。なお、本検討では湿潤養生は標準養生(水中)である。拘束膨張率試験の測定方法は、JIS A 6202附属書BのB法に準拠した。ただし、乾燥収縮の評価は本検討では長さ変化率(乾燥収縮率)を用いることとし、測長材齢は打込み前(基長)、脱型時、材齢2, 3, 5, 7, 14日とし、全期間湿潤養生として

表1 実験の要因と水準

調合	粗骨材	膨張材		乾燥開始材齢 (湿潤養生期間)
		種類	添加量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	
N	硬質砂岩 碎石	—	0	1, 3, 7日
EX-L-20		石灰系	20	中性化 試験以外： 1, 3, 5, 7日
EX-L-23			23	
EX-CSA-20		エトリンガイト・ 石灰複合系	20	
EX-CSA-23			23	
EX-L-20 (LS)	石灰石 碎石	石灰系	20	中性化試験： 1, 3, 7日

表2 コンクリートの使用材料

セメント	C : 普通ポルトランドセメント 密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$
細骨材	S : 硬質砂岩砕砂 表乾密度 $2.69\text{g}/\text{cm}^3$
粗骨材	G1 : 硬質砂岩碎石 表乾密度 $2.68\text{g}/\text{cm}^3$
	G2 : 石灰石碎石 表乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$
水	W : 神奈川県厚木市上水道水
混和剤	Ad : AE 減水剤 (リグニンスルホン酸化合物・ ポリカルボン酸エーテル複合体)
混和材	Ex1 : 膨張材 (石灰系)
	Ex2 : 膨張材 (エトリンガイト・石灰複合系)

表 3 試験項目

試験項目		試験方法	備考
フレッシュコンクリート	スランブ	JIS A 1101	—
	空気量	JIS A 1128	—
	コンクリート温度	JIS A 1156	—
硬化コンクリート	拘束膨張率	JIS A 6202 附属書 B、B 法	測長材齢：1（脱型時）、2, 3, 5, 7, 14 日
	長さ変化率	JIS A 1129-3	—
	圧縮強度	JIS A 1108	試験材齢：7, 28, 56, 91, 105 ※日 ※膨張材コンクリートのみ材齢 91 日経過後、 14 日間湿潤養生を行い試験した
	中性化深さ	JIS A 1153	促進中性化期間 1, 4, 8, 13, 26 週 EX-L-20 と EX-L-20(LS) のみ実施

表 4 コンクリートの調合

記号		目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							フレッシュコンクリートの試験 結果			
						B			W	S	G1	G2	Ad (B × %)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)
						C	Ex1	Ex2								
N		15.0	4.5	48.0	50.0	365	－	－	175	894	890	－	1.00	16.0	4.2	22
EX-L-20	1 <sup>※1</sup>	15.0	4.5	48.0	50.0	345	20	－	175	894	890	－	0.90	14.5	5.1	24
	2 <sup>※2</sup>	15.0	4.5	48.0	50.0	345	20	－	175	894	890	－	0.95	14.0	4.3	21
EX-L-23		15.0	4.5	48.0	50.0	342	23	－	175	894	890	－	0.95	16.0	4.6	21
EX-CSA-20		15.0	4.5	48.0	50.0	345	－	20	175	894	890	－	0.95	16.0	4.5	21
EX-CSA-23		15.0	4.5	48.0	50.0	342	－	23	175	894	890	－	0.70	15.5	5.0	21
EX-L-20(LS)		15.0	4.5	48.0	50.0	345	20	－	175	894	－	884	0.50	14.5	4.0	21

※ 1：長さ変化率試験（湿潤養生期間 5 日）以外の試験に供した、※ 2：長さ変化率試験（湿潤養生期間 5 日）に供した

膨張のみを測定した。また、遅れ膨張による劣化を確認するため、膨張材コンクリートのみ材齢 91 日の気中養生後、再度 14 日間湿潤養生を行い、材齢 105 日で圧縮強度試験を実施した。コンクリートの調合およびフレッシュコンクリートの試験結果を表 4 に示す。いずれの調合も、目標スランブは 15cm、目標空気量は 4.5% とした。

### § 3. 実験結果

#### 3.1 圧縮強度

圧縮強度試験結果を図 1 に示す。圧縮強度は、いずれの調合においても、材齢 105 日を除き概ね養生期間が長いほど大きくなる傾向を示した。また、材齢 7 日における養生期間 1 日とその他の養生期間の圧縮強度の差は平均して 9.3N/mm<sup>2</sup> であったのに対し、材齢の増加と共にその差は大きくなり、材齢 91 日では平均して 15.8N/mm<sup>2</sup> の差となった。標準養生と各養生期間の圧縮強度の差は、養生期間 3, 5, 7 日では差があまり見られないが、養生期間 1 日の場合、標準養生に比べ

て強度低下が著しく、最大 18N/mm<sup>2</sup> 小さくなった。

遅れ膨張による劣化確認のために行った材齢 105 日の強度試験用供試体は、気中養生中や再度湿潤養生を実施後もひび割れなどは生じなかった。養生期間 1 日の圧縮強度は、再養生後に増進する傾向がみられた。この要因は養生期間 1 日の場合、強度発現に必要な水分が十分でなく、再度水中に浸漬したことで水和反応が促進されたためと考えられる。一方、養生期間 3, 5, 7 日では、ほとんどの供試体において強度低下が生じた。これは試験時の供試体が湿潤状態であったためと推察される。

標準養生を基準とした各湿潤養生期間の圧縮強度の比を図 2 に示す。なお、いずれの調合も材齢 28 日を対象としている。標準養生を基準とした各養生期間の圧縮強度は、すべての調合において養生期間 3 日以降で 90% 以上であった。また、養生期間 7 日の場合、いずれの調合において標準養生を上回る傾向を示した。一方で、養生期間 1 日では 63～81% となり、養生期間不足により強度低下が生じた。

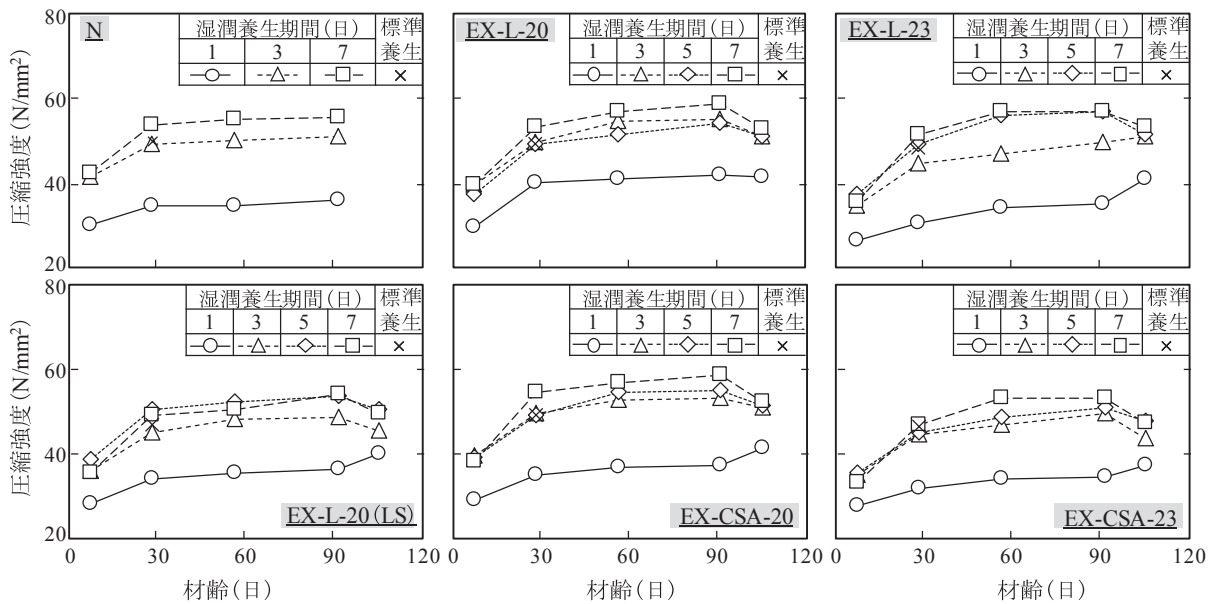


図1 圧縮強度試験結果

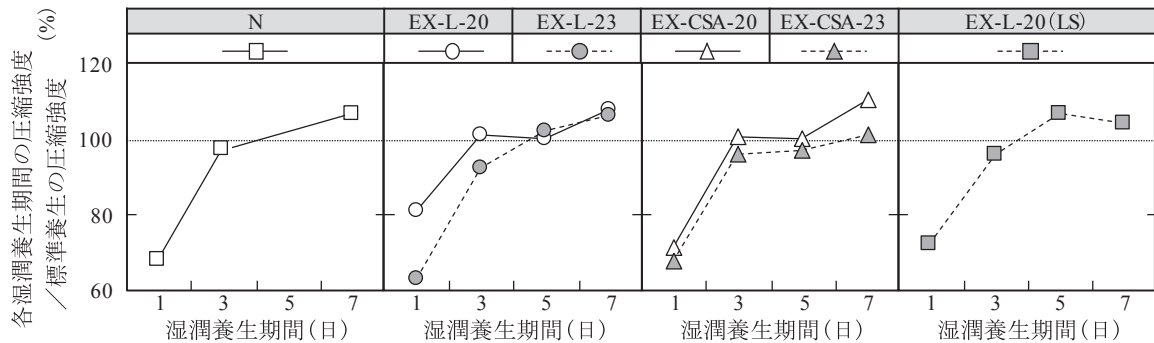


図2 標準養生を基準とした各湿潤養生期間の圧縮強度の比

### 3.2 拘束膨張率

拘束膨張率試験結果を図3に示す。膨張材を20kg/m<sup>3</sup>使用した調合の拘束膨張率は、材齢7日以降、膨張材および粗骨材の種類に関わらず $200 \times 10^{-6}$ 程度であった。なお、材齢1日におけるEX-L20の拘束膨張率が他よりも大きい数値を示している要因は、他の水準と比べコンクリートの練上がり温度が若干高く、膨張材の反応が早期に進んだためと考えられる。

膨張材を23kg/m<sup>3</sup>使用した調合の拘束膨張率は、材齢7日で $260 \times 10^{-6}$ 程度、材齢14日で $300 \times 10^{-6}$ 程度であった。また、材齢3日から14日にかけてEX-L23とEX-CSA-23の差が僅かに縮まる傾向を示した。これは、エトリンガイト・石灰複合系の方が石灰系膨張材に比べ膨張効果が持続したためと考える。

膨張材の使用量が拘束膨張率に及ぼす影響は、材齢1日時点では20kg/m<sup>3</sup>使用した調合の方が僅かに大きい、23kg/m<sup>3</sup>使用した調合は材齢1日以降も伸びる傾向であり、材齢14日では平均して $87 \times 10^{-6}$ の差と

なった。

粗骨材の種類の違いが拘束膨張率に及ぼす影響については、明確な差は見られなかった。

材齢7日を基準とした各材齢の拘束膨張率の比を図4に示す。材齢7日を基準とした各材齢の拘束膨張率は、全ての調合において材齢3日以降で90%以上であった。また、膨張材を23kg/m<sup>3</sup>使用した調合において、材齢1日の拘束膨張率の比は、20kg/m<sup>3</sup>使用の調合に比べ小さいが、材齢2日以降の膨張量の伸びが大きくなり、膨張材の種類に関わらず材齢7日以降に11～15%ほど膨張する傾向を示した。

### 3.3 長さ変化率

長さ変化率（乾燥収縮率）試験結果を図5に示す。

Nの長さ変化率は、乾燥期間初期において、養生期間7日が他の養生期間に比べ小さい傾向であるが、乾燥期間26週になると養生期間による差は小さくなり、全ての養生期間で $-800 \times 10^{-6}$ 程度に収束する傾



向を示した。

EX-L-20の長さ変化率は、乾燥期間初期において養生期間の違いによる差は見られない。乾燥期間26週における長さ変化率は、養生期間が短いほどわずかに小さくなる傾向を示し、養生期間1日で $-600 \times 10^{-6}$

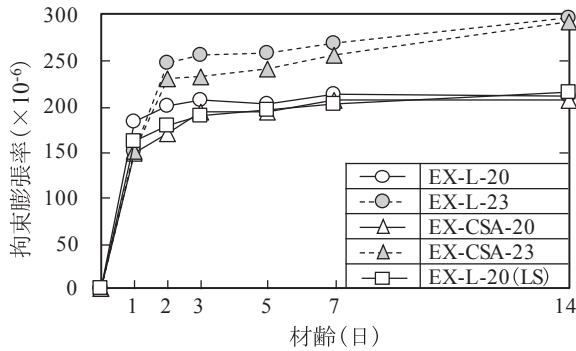


図3 拘束膨張率試験結果

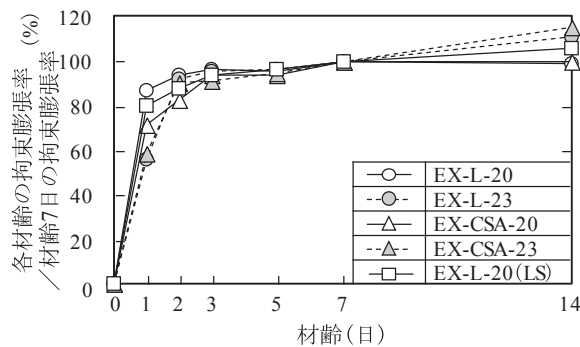


図4 材齢7日を基準とした各材齢の拘束膨張率の比

程度、その他の養生期間で $-670 \sim -640 \times 10^{-6}$ 程度であった。

EX-L-23の長さ変化率は、いずれの乾燥期間においても養生期間1日が最も小さく、続いて養生期間7日であり、3日と5日では同程度であった。乾燥期間26週における長さ変化率は、養生期間1日で $-520 \times 10^{-6}$ 程度、その他の養生期間で $-650 \sim -600 \times 10^{-6}$ 程度であった。

EX-CSA-20の長さ変化率は、EX-L-20と同様の傾向であり、乾燥期間26週において養生期間1日で $-600 \times 10^{-6}$ 程度、その他の養生期間で $-680 \times 10^{-6}$ 程度であった。

EX-CSA-23の長さ変化率は、いずれの乾燥期間においても養生期間が短いほど小さくなる傾向を示した。乾燥期間26週における長さ変化率は、養生期間1日で $-570 \times 10^{-6}$ 程度、その他の養生期間で $-720 \sim -680 \times 10^{-6}$ 程度であった。

EX-L-20 (LS) の長さ変化率は、いずれの乾燥期間においても養生期間1日が最も小さい結果であり、3, 5, 7日では同程度の傾向を示した。また、乾燥期間26週における長さ変化率は、養生期間1日で $-460 \times 10^{-6}$ 程度、その他の養生期間で $-550 \times 10^{-6}$ 程度となり、他の調合と比べて最も小さかった。

#### (1) 膨張材の使用による影響

膨張材が長さ変化率に及ぼす影響は、Nに比べEX-L-20およびEX-CSA-20の乾燥期間26週の結果は、養生期間によって差があるものの $120 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度小

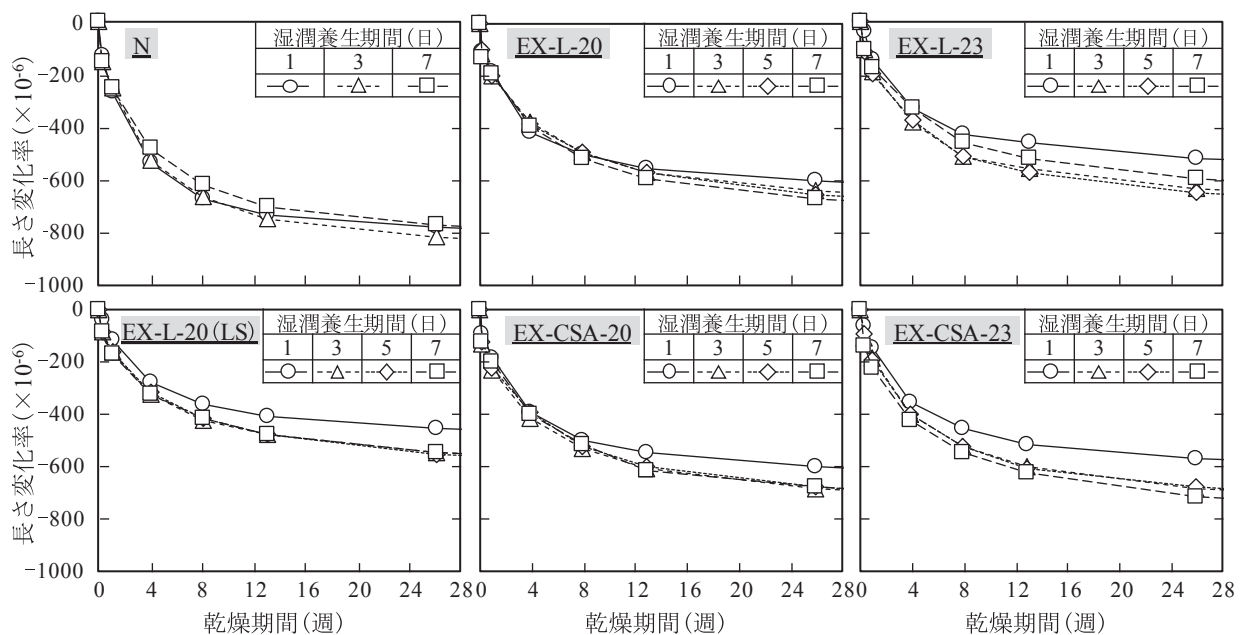


図5 長さ変化率試験結果

さく、既往の研究<sup>3)</sup> 同様、膨張材の使用による乾燥収縮低減効果が確認された。

## (2) 膨張材の種類とその使用量による影響

膨張材の種類の違いが長さ変化率に及ぼす影響について、EX-L-20とEX-CSA-20を比較すると、養生期間1日を除きEX-L-20の方が小さい結果であるが、その差は小さく最大で $40 \times 10^{-6}$ 程度であった。一方で、膨張材を $23\text{kg/m}^3$ 使用した調合においては、いずれの養生期間においてもEX-L-23の方が小さい結果であり、その差は乾燥期間26週で $120 \times 10^{-6}$ 程度であった。

膨張材の使用量が長さ変化率に及ぼす影響は、EX-L-20とEX-L-23を比較するといずれの養生期間においてもEX-L-23の方が小さく、その差は乾燥期間26週で $70 \times 10^{-6}$ 程度であった。EX-CSA-20とEX-CSA-23では大差はなかった。

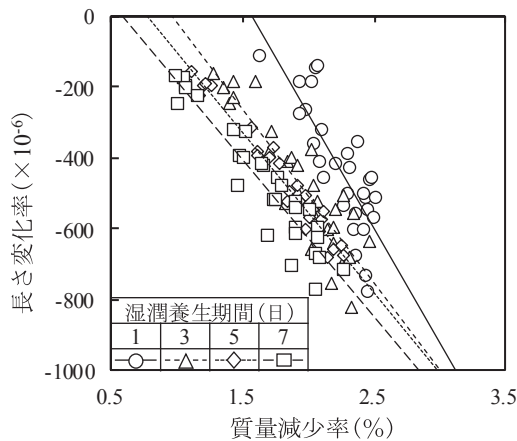


図6 質量減少率と長さ変化率の関係

## (3) 粗骨材の種類による影響

粗骨材の種類の違いが長さ変化率に及ぼす影響は、EX-L-20とEX-L-20 (LS) を比較すると、いずれの養生期間においてもEX-L-20(LS)の方が小さい結果であり、乾燥期間26週で $150 \times 10^{-6}$ 程度の差であった。

## (4) 質量減少率と長さ変化率

質量減少率と長さ変化率の関係を図6に示す。なお、使用したデータは乾燥期間7日以降のデータである。長さ変化率は、いずれの養生期間においても質量減少率が大きくなるほど大きくなり、線形の関係性が認められた。また、養生期間1日は3日以上に比べ、単位質量減少率当たりの長さ変化率が $200 \times 10^{-6}$ 程度小さくなった。

## (5) 拘束膨張率と乾燥収縮率を合成した長さ変化率

膨張の養生期間による影響を考慮し、その収縮補償効果を簡易的に評価するため、各養生期間（1, 3, 5, 7日）までの拘束膨張率と乾燥収縮率を足し合わせて評価<sup>3)</sup>を試みた。拘束膨張率と乾燥収縮率を合成した長さ変化率を図7に示す。長さ変化率は、膨張材を $20\text{kg/m}^3$ 使用した調合において、平均して $-477 \sim -444 \times 10^{-6}$ であり、膨張材を $23\text{kg/m}^3$ 使用した調合において、 $-443 \sim -367 \times 10^{-6}$ であった。また、石灰石を使用した場合、 $-341 \times 10^{-6}$ となりNとの差は $450 \times 10^{-6}$ であった。圧縮強度と異なり養生期間による差はみられなかった。

## (6) 膨張材の使用による乾燥収縮率の低減効果

上記の結果を用いて、膨張材の乾燥収縮低減効果を検討した。検討にあたり、乾燥期間26週の養生期間

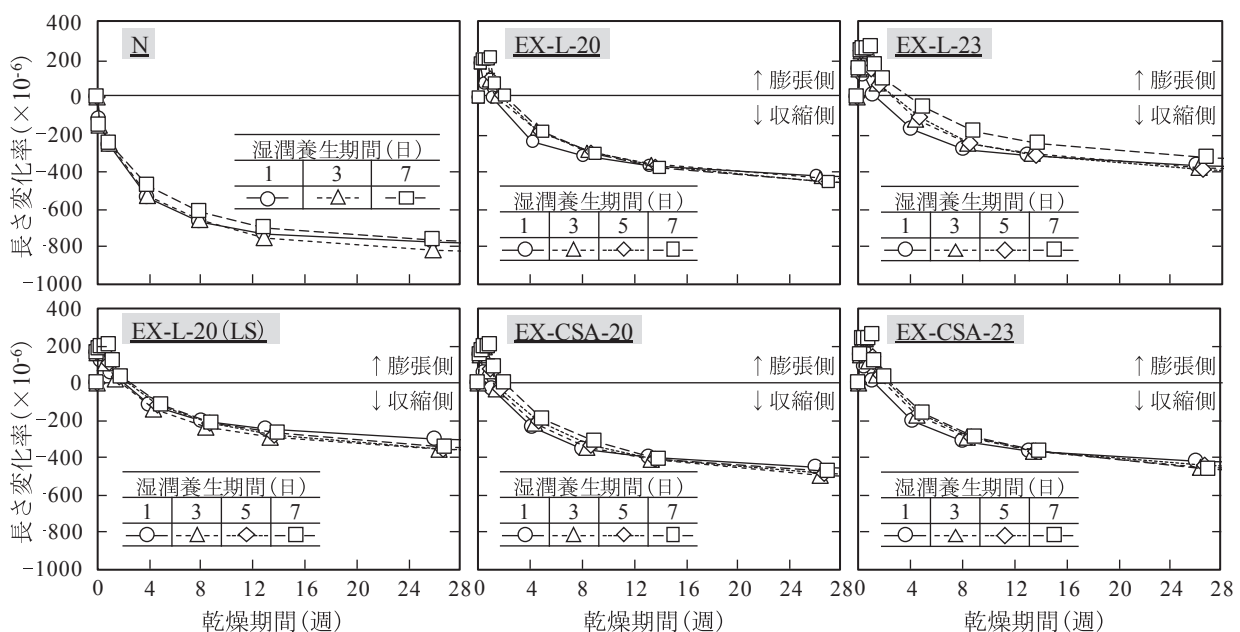


図7 拘束膨張率と乾燥収縮率を合成した長さ変化率

7日におけるEX-L-20、EX-CSA-20およびEX-L-20 (LS)の乾燥期間26週の長さ変化率とNの長さ変化率の差を乾燥収縮率の低減量とした。養生期間1日から5日については、長さ変化測定期間中も膨張材の反応が継続している可能性があるため、また、膨張材を23kg/m<sup>3</sup>使用した調合においても材齢7日以降、膨張が確認されたため除外した。Nを基準とした各調合の長さ変化率の低減率を表5に示す。乾燥収縮率は、膨張材を20kg/m<sup>3</sup>使用することで、Nに比べ平均して12%程度、石灰石と膨張材を併用すると約30%低減した。また、拘束膨張率を合成した長さ変化率は膨張材

表5 Nを基準とした各調合の長さ変化率の低減率

調合種類	乾燥収縮率※ <sup>1</sup>			長さ変化率※ <sup>2</sup>		
	( $\times 10^{-6}$ )	低減率 (%)	平均	( $\times 10^{-6}$ )	低減率 (%)	平均
N	-770	0.0	—	-770	0.0	—
EX-L-20	-672	12.7	12.1	-444	42.3	40.2
EX-CSA-20	-682	11.5		-477	38.1	
EX-L-20 (LS)	-549	28.7	—	-341	55.7	—

※1：湿潤養生期間7日における乾燥期間26週の乾燥収縮率の実験結果

※2：湿潤養生期間7日における乾燥期間26週の拘束膨張率+乾燥収縮率の実験結果

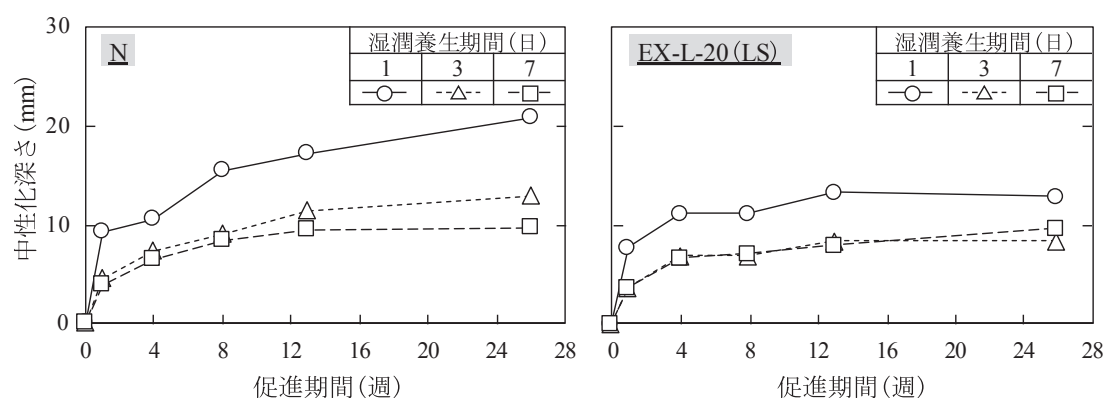


図8 中性化深さ試験結果

表6 湿潤養生期間7日を基準とした各湿潤養生期間の物性値の比

湿潤養生期間 (日)	N			EX-L-20			EX-L-23			EX-CSA-20			EX-CSA-23			EX-L-20 (LS)		
	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5
物性																		
圧縮強度	0.65	0.92		0.72	0.94	0.92	0.61	0.87	1.00	0.64	0.91	0.94	0.65	0.93	0.96	0.67	0.90	0.99
拘束膨張率	—	—		0.87	0.97	0.96	0.56	0.95	0.96	0.72	0.94	0.94	0.59	0.91	0.94	0.80	0.94	0.97
乾燥収縮率	0.99	0.94		1.11	1.05	1.02	1.16	0.94	0.92	1.13	1.00	1.00	1.25	1.05	1.06	1.20	1.00	0.99

圧縮強度（材齢13週を対象）および拘束膨張率：■ 0.80以上0.90未満，■ 0.70以上0.80未満，■ 0.70未満

乾燥収縮率（乾燥期間26週を対象）：■ 1.10以上1.20未満，■ 1.20以上

単体で40%程度、石灰石の併用で55%程度低減した。このことから、膨張材を用いることで材齢初期の膨張による長さ変化率の低減だけでなく、乾燥収縮率の低減効果もあることが示唆された。

### 3.4 中性化深さ

中性化深さを図8に示す。養生期間1日におけるEX-L-20 (LS)の中性化深さは、EX-L-20と比べいずれの促進期間において小さい傾向を示し、26週における差は8.0mmであった。養生期間が3, 7日では両者の差は小さくなり、養生期間7日では0.2mmの差となった。

### 3.5 湿潤養生期間が各物性値に与える影響

湿潤養生期間7日を基準とした各湿潤養生期間の物性値の比を表6に示す。圧縮強度および拘束膨張率の数値は1.00を下回るほど、乾燥収縮率は1.00を上回るほど湿潤養生期間7日の物性に比べ性能が劣ることを表す。いずれの調合および物性において、養生期間1日の場合、養生期間3日以降と比較して著しく低下した。

#### §4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 圧縮強度は膨張材の有無に関わらず、養生期間が1日の場合3日以降と比較して低下が著しく、標準養生に対する28日強度は63%~81%であった。また、養生期間1日であっても遅れ膨張は生じなかった。
- (2) 材齢14日における拘束膨張率は、膨張材20kg/m<sup>3</sup>使用の場合 $200 \times 10^{-6}$ 程度、23kg/m<sup>3</sup>使用の場合 $300 \times 10^{-6}$ 程度であった。また、いずれの調査においても材齢3日で材齢7日の拘束膨張率の90%以上を発現した。
- (3) 膨張材コンクリートの長さ変化率（乾燥収縮率）は、養生期間1日の場合、小さくなる傾向を示したが、養生期間3日以降であれば差はほとんど生じなかった。この傾向は、膨張材を多く使用したコンクリートの方がより顕著であった。
- (4) 膨張材を20kg/m<sup>3</sup>使用した場合、乾燥収縮率は膨張材を使用しない場合に比べて乾燥期間26週で12%程度低減し、これに拘束膨張率を合成した長さ変化率は、40%程度低減した。

#### 謝辞

本実験および論文をまとめるにあたり、フジタ OB 横須賀誠一氏に多大なるご協力をいただきました。ここに深い感謝の念を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、pp.744、2022
- 2) 保利彰宏、平井吉彦、佐久間隆司、塩永亮介、高橋和男：養生期間および養生方法が膨張ひずみに与える影響に関する実験的検討、日本コンクリート工学協会膨張コンクリートによる構造物の高性能化／高耐久化に関するシンポジウム論文集投稿、2003.9.19
- 3) 郭度連、佐竹紳也：膨張材および収縮低減剤を用いたコンクリートの収縮低減効果、コンクリート工学年次論文集、Vol.29、No.1、2007

#### ひとこと

コンクリートとひび割れは、切っても切れない関係である。得られたデータを基に、現場において適切な湿潤養生（期間）を徹底し、不具合の防止に努めていきたい。



藤下 大知