

## 論文 石灰石微粉末を大量混和したセメント硬化体の強度発現性

青島 秀多\*1・大野 元寛\*2・栗原 遼大\*3・石田 哲也\*4

**要旨:** 石灰石微粉末 (LSP) を大量混和したセメント硬化体の強度発現を的確に予測することを目指し、本研究では、LSP の異なる混和量およびブレン値を有する供試体を作製し、圧縮強度試験、熱重量分析、X線回折法および空隙率測定による評価を行った。実験結果から、LSP が水和核として働きセメントの水和を促進する機構が、若材齢での強度発現に支配的な影響を与えることが分かった。一方、LSP 自身の反応によるカーボアルミネート相の生成は、強度発現に有意な影響を与えないことが示唆された。また、LSP 混和によるセメント硬化体の充填密度の向上や水和物の形態変化が、強度増進に寄与する可能性が示唆された。

**キーワード:** 石灰石微粉末, 大量混和, 強度発現性, TGA, XRD, 空隙率

## 1. はじめに

近年、建設業界では、使用されず廃棄されるコンクリート、いわゆる「残コン、戻りコン」が大量に発生しており、その年間発生量は約 250 万 m<sup>3</sup> から 410 万 m<sup>3</sup> に達する<sup>1)</sup>。これは、国内最大規模のダム建設に使用されるセメント量に匹敵する規模である<sup>1)</sup>。この課題に対応するため、業界全体でサーキュラーエコノミーの実現を目指し、コンクリートスラッジ内のカルシウムを炭素鉱物化し、炭酸カルシウム (以下、CaCO<sub>3</sub>) として再利用する方法が提案されている。その一つに、CaCO<sub>3</sub> を微粉末化し、コンクリートの混和材として活用する方法がある。この炭素鉱物化プロセスは、大気中の CO<sub>2</sub> を固定化するため、カーボンニュートラルの実現に直接貢献する点でも注目されている。

CaCO<sub>3</sub> を主成分とする石灰石微粉末 (以下、LSP) を混和したコンクリートの物性に関する研究はこれまで数多く実施されてきた<sup>2)</sup>。しかし、これらの研究の多くは、セメント量に対する LSP の置換率を数十%程度以下に設定したものであり、50%を超えるような大量混和時の物性や水和反応メカニズムを詳細に調べた例は限られている。この背景には、LSP の大量置換による希釈効果によって、圧縮強度が大幅に低下する<sup>2)</sup>ことが懸念されている点がある。ただし、すべての構造物に高い圧縮強度が求められているわけではなく、LSP を大量に混和したコンクリートには幅広い適用可能性があると考えられる。また、希釈効果により水セメント比が上昇することで、ペースト中の空隙量が増加し、炭酸化が促進されることが予想されるため、カーボンニュートラルの観点からもさらに貢献が期待される。

石灰石微粉末を大量に混和したコンクリートを普及さ

せるためには、基本的物性となる強度発現性を正確に評価することが必要不可欠である。このコンクリートではセメントのみを使用する場合と異なり、4 つの物理的・化学的効果が強度発現に影響を与えることが確認されている<sup>2)</sup>。1 つ目は希釈効果、2 つ目は微粉末が水和核となり、セメント鉱物の水和を促進する核添加効果、3 つ目は微粉末が空隙を充填して、セメント硬化体の密度を向上させる充填効果、4 つ目はセメント中のアルミネート相と LSP が反応して、カーボアルミネート化合物を生成する化学効果である。希釈効果に関して、セメント水比等に基づき、圧縮強度への影響を定量的に予測可能と考えられる。一方、他の 3 つの効果について、圧縮強度への影響を定量的に予測するための知見が限られている。

本研究では化学効果、核添加効果、充填効果に焦点を当て、大量混和時における各効果の圧縮強度への影響を定量的に評価することを目的とした。具体的には、異なる LSP 混和量およびブレン値を有する供試体を作製し、圧縮強度試験、熱重量分析 (以下、TGA)、X線回折法 (以下、XRD)、空隙率測定による評価を行い、種々の条件下における支配的な効果を解明することを試みた。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料および配合

使用材料には普通ポルトランドセメント (以下、OPC) およびブレン値の異なる 3 種類の LSP (以下、L3, L13, L20) を用いた。OPC の物理的性質および鉱物組成を表-1 に、LSP の物理的性質および化学組成を表-2 に示す。OPC の鉱物組成は XRD/Rietveld 解析で測定した。

実験における配 (調) 合条件と養生条件を表-3 に示す。ここで、W: 単位水量 (kg), C: 単位セメント量 (kg),

\*1 東京大学 工学部社会基盤学科 (学生会員)

\*2 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 特任講師 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

\*4 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 使用した普通ポルトランドセメントの物理的性質および鉱物組成

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ブレン値 (cm <sup>2</sup> /g)	Ig.loss (%)	鉱物組成(%)						
				C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	2 水石膏	半水石膏	CaCO <sub>3</sub>
OPC	3.15	3250	2.04	52.85	22.82	9.43	6.73	1.64	1.52	5.06

表-2 使用した石灰石微粉末の物理的性質および化学組成

LSP	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	ブレン値 (cm <sup>2</sup> /g)	Ig.loss (%)	CaCO <sub>3</sub> 純度(%)	主要成分(%)							
					SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Ne <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
L3	2.75	4020	42.70	98.6	0.66	0.14	0.04	55.25	0.76	0.02	0.03	0.07
L13	2.76	12430	43.12	98.6	0.18	0.10	0.02	55.24	0.73	0	0.01	0.02
L20	2.78	18550	43.20	98.4	0.09	0.10	0.02	55.16	0.72	0	0.01	0.01

表-3 検討した配(調)合条件および養生条件

シリーズ名	W/C	W/P	LSP/P	S/C	混和剤添加量 (セメント量比)	養生環境	養生期間 (日)
L3-60%	0.6	0.24	0.6	2.8	1.5%	20°C 封緘養生	1, 7, 28
L3-30%		0.42	0.3		0.4%		
L13-60%		0.24	0.6		1.5%		
L13-30%		0.42	0.3		0.1%		
L20-60%		0.24	0.6		1.5%		
L20-30%		0.42	0.3		0.1%		
N		0.6	0		0.0%		

LSP : 石灰石微粉末量 (kg), P : 粉体量 (単位セメント量と石灰石微粉末量の和) (kg), S : 細骨材量 (kg) である。本研究では、検討対象を先述の3つの効果(化学効果、核添加効果、充填効果)に絞るため、LSPは、骨材の一部として置換し、セメントに外割で添加する方法を採用した。単位セメント量および水セメント比をすべてのシリーズで統一し、希釈効果の影響を排除した。

## 2.2 供試体作製

各材料をモルタルミキサーで練り混ぜ、φ50mm×100mmのモルタル供試体を作製した。また、表-3の配(調)合から砂を除いたペーストをφ90.5mm×17.5mmのシャーレに打ち込み供試体を作製した。なお、OPCのみのシリーズ(N)ではブリーディングが観察されたため、ブリーディング水の発生が見られなくなるまで練返し、静置するプロセスを繰り返した。養生期間として1日、7日、28日を設定し、すべての供試体を所定の期間まで温度20°Cの環境で封緘養生した。モルタル供試体は圧縮試験および空隙率測定に使用し、ペースト供試体はTGAおよびXRDに使用した。

## 2.3 実験手法

### (1) 圧縮強度試験

所定の材齢に達した供試体を脱型し、端面研磨機を用いて表面を平滑に成形した。その後、JISA 1108:2018「コ

ンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して圧縮試験を実施した。各シリーズについて3体の供試体で試験を行い、その平均値を圧縮強度として採用した。ただし、L3-60%およびN(OPCのみ)のシリーズでは強度のばらつきが相対的に大きかったため、追加実験を実施し、5体の供試体から得られた平均値を圧縮強度として採用した。

### (2) XRD

TGAと同様の前処理を行い、粉体試料を作製した後、粉末試料0.9gに0.1gのコランダム(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を加え、均一に混合した。計3体のサンプルを作製し、XRDによって各シリーズの波形データを取得した。データ取得後、エトリンガイト(9.1° 2θ)およびモノカーボアルミネート(11.7° 2θ)のピーク位置近辺(7.5° ~12.5° 2θ)の波形を切り取り、材齢の進行に伴う各結晶のピークの変化を分析し、化学効果の発現を評価した。

### (3) TGA

作製したペースト供試体が所定の材齢に達した後、脱型した供試体を細かく砕き、前処理としてイソプロパノールに1週間浸漬させた後、さらに1週間真空乾燥を行った。乾燥後、すり鉢で試料を粉碎し、ふるいをかけて粉末試料を作製した。熱重量測定装置を用いて試料を約900°Cまで加熱し、重量減少量を基にOPC量に対する水酸化カルシウム(以下、CH)量の比、OPC量に対する結

含水量の比, および炭酸カルシウム (以下, CC) 減少量を算出した。各指標の算出には以下の式(1), (2)および式(3)を用いた。

$$\text{CH 量比(\%)} = \frac{w_{400} - w_{550}}{k \times w_{550}} \times \frac{74}{18} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{結合水量比(\%)} = \frac{w_0 - w_{550}}{k \times w_{550}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{CC 減量} = w_{550} \times p_{CaCO_3} - \frac{100}{44}(w_{550} - w_{870}) \quad (3)$$

ここで,  $W_x$ :  $x$  °Cにおける重量割合 (ただし  $W_0$ は加熱前のサンプルの重量を表しており,  $W_0=100\%$ ),  $k$ : OPC量で正規化するための係数 (LSP60%置換の場合  $k=0.4$ , 30%置換の場合  $k=0.7$ , OPC のみの場合  $k=1$ ),  $p_{CaCO_3}$ : 粉体に含まれる(CC割合 LSPのCC純度を考慮すると, 60%置換の場合  $p_{CaCO_3} = 0.6116$ , 30%置換の場合  $p_{CaCO_3} = 0.3308$ , OPC のみの場合  $p_{CaCO_3} = 0.05$ ) である。これらの指標を基に各ケースの水和進行具合や化学効果の影響を比較した。

#### (4) 空隙率測定

圧縮試験で破壊された供試体の破片から, 各シリーズにつき無作為に小片を3体採取し, アルキメデス法を用いて空隙率を測定した。1日養生の供試体では, 試験後すぐに水中質量および飽水質量を測定し, 105°Cで24時間乾燥させた後, 乾燥質量を測定した。一方, 7日および28日養生の供試体については, 測定に先立ちイソプロパノールに1週間浸漬させて, 水和を停止させながら空隙をイソプロパノールで飽和させた。その後, イソプロパノール中の質量および, イソプロパノール飽和質量を測定し, 1日養生の供試体と同様に乾燥質量を測定した。空隙率は式(4)によって算出した。

$$P(\%) = \frac{A-B}{A-C} \times 100 \quad (4)$$

ここで,  $P$ : 空隙率 (%),  $A$ : 飽水 (イソプロパノール) 質量 (g),  $B$ : 乾燥質量 (g),  $C$ : 水中 (イソプロパノール中) 質量 (g) である。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュ試験結果

各シリーズにおける, モルタルのフレッシュ性状を確認するために行ったモルタルフロー試験, 空気量試験の結果を表-4に示す。

#### 3.2 圧縮強度

各材齢における圧縮強度とブレン値の関係を図-1, 図-2, 図-3に示す。各養生期間において, Nのケースの圧縮強度を表す緑色の棒は, その養生期間内ですべて同一の試験結果を指す。図-1から, 材齢1日ではブレン値が大きいほど, また置換率が高いほど, 圧縮強度

表-4 モルタルフロー値と空気量

	モルタルフロー	空気量
L3-60%	153.8	1.50
L3-30%	185.5	1.20
L13-60%	239.0	2.25
L13-30%	182.6	1.90
L20-60%	156.2	2.25
L20-30%	167.6	2.20
N	242.2	1.50

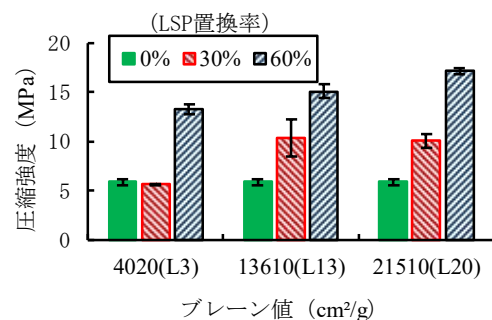


図-1 材齢1日の圧縮強度とブレン値の関係

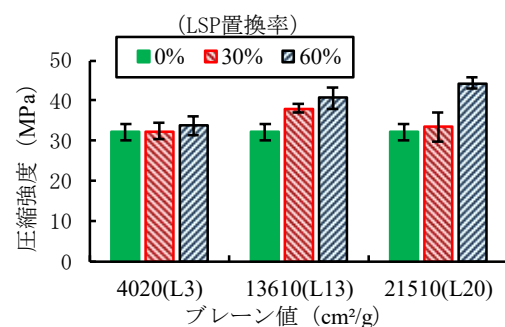


図-2 材齢7日の圧縮強度とブレン値の関係

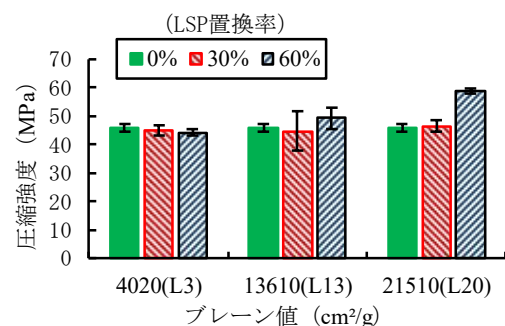


図-3 材齢28日の圧縮強度とブレン値の関係

が増加する傾向が確認できる。強度が最も大きく発現したL20-60%のケースでは, N (OPCのみ)と比較して, 2.9倍の強度増進がみられた。一方, 図-2,3から, 材齢の進行に伴いNとLSP混和シリーズとの強度差が縮小

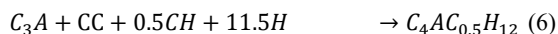
することが分かる。材齢 28 日では L20-60%のシリーズのみが有意な強度増進を示し、その他のシリーズは同等の強度であった。

LSP 混和による強度増進効果が材齢の経過に伴い縮小する傾向は、核添加効果が初期強度の増進に寄与するが、長期強度に与える影響は限定的である<sup>2)</sup>との既往の知見と一致する。したがって、本検討における圧縮強度試験のデータに基づけば、材齢 1 日では核添加効果が支配的な影響を及ぼしたと推察できる。化学効果については、De Weerd<sup>3)</sup>らの既往研究で、材齢 7 日以降からカーボアルミネート相の生成が確認できると報告されている。本検討では、L20-60%を除くすべてのシリーズで 28 日強度に有意な差が生じておらず、化学効果の影響は限定的であったと推察できる。以上の考察を、XRD、TGA および空隙率測定から検証する。

### 3.3 XRD

L13-30%および L13-60%のシリーズについて、7.5°~13.5° 付近における XRD の波形を図-4、図-5に示す。材齢の経過に伴い、モノカーボアルミネートのピークが顕著に現れることが確認できる。なお、他のブレン値のシリーズでも類似した傾向の波形が得られた。この結果は、上述の De Weerd<sup>3)</sup>らによる既往研究と同様の傾向である。したがって、28 日強度における化学効果の影響が限定的であるという考察が、XRD による分析からも裏付けられる。

本検討において化学効果の影響が限定的であった理由として、カーボアルミネート相の生成量が限定的であった可能性が考えられる。化学効果により生成されるモノカーボアルミネートおよびヘミカーボアルミネートの反応式を式(5)、(6)に示す。



ここで、H : H<sub>2</sub>O である。本検討では、式(5)、(6)における反応物であるアルミネート相 (C<sub>3</sub>A) は OPC 由来のものに限られる。これに対し、CC は LSP に由来する量のほか、OPC にも少量混合成分として 5%程度含まれていることが表-1 から確認できる。したがって、LSP 混和シリーズではアルミネート相の量が相対的に不足し、カーボアルミネート相の生成が抑えられた可能性がある。

以上の考察から、アルミネート相の量を増加すれば、化学効果による有意な強度増進効果が得られる可能性もある。De Weerd<sup>3)</sup>は、フライアッシュと LSP を混和した系と OPC 単体の系を比較し、化学効果によって 90 日強度が有意に増進することを報告している。今後、アルミネート相の量に着目したさらなる検討が必要である。

### 3.4 TGA

材齢 1, 7 および 28 日における OPC に対する CH の重

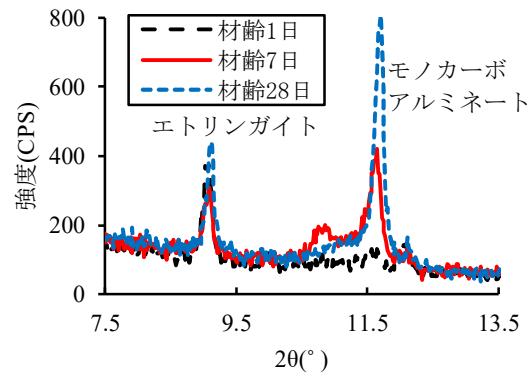


図-4 XRD 波形(L13-30%)

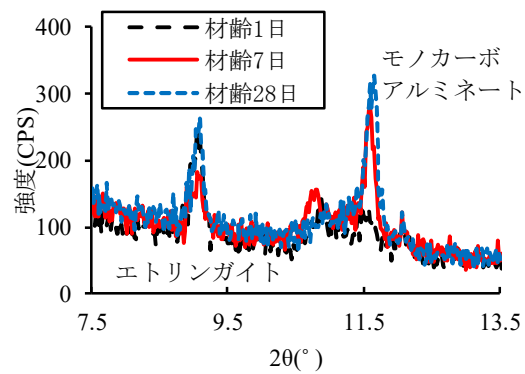


図-5 XRD 波形(L13-60%)

表-5 OPC に対する CH の重量比 (%)

	CH (1 日)	CH (7 日)	CH (28 日)
L3-60%	11.68	21.20	19.36
L3-30%	11.16	23.84	25.22
L13-60%	14.11	21.33	22.69
L13-30%	15.69	23.47	26.96
L20-60%	13.61	20.52	21.14
L20-30%	14.82	24.23	24.71
N	8.29	20.51	24.21

表-6 OPC に対する結合水の重量比 (%)

	結合水量 (1 日)	結合水量 (7 日)	結合水量 (28 日)
L3-60%	12.33	22.03	24.72
L3-30%	11.06	22.22	30.79
L13-60%	10.57	22.94	30.60
L13-30%	14.88	17.68	33.12
L20-60%	15.87	23.04	29.21
L20-30%	6.81	23.57	29.12
N	7.41	11.51	13.26

量比および結合水の重量比の比較結果を表-5, 表-6に示す。材齢1日では, CH量比および結合水量比ともに, LSP混和シリーズがN(OPCのみ)を上回っている。また, L20-30%のシリーズのみ, 結合水量比が明らかに低くなっている。したがって, 核添加効果が1日強度における支配的な効果であったという考察が, TGAの結果からも裏付けられる。L20-30%のケースのみ明らかに低くなったことについて, サンプル調整の段階で不純物等が含まれた可能性があるためであり, 再実験を行って正確なデータを取得しなおす必要がある。

材齢7日および28日では, LSP混和シリーズとNのCH量比の差が, 材齢1日に比べて縮小している。一方, 結合水量比は材齢1日と同様, LSP混和シリーズがNを有意に上回っている。したがって, 結合水量比に基づけば, 材齢7日および28日においてLSP混和シリーズの水和物の総量がNよりも有意に大きいと推察される。一方, 3.2節で述べた通り, L20-60%を除く全てのシリーズで28日強度が同程度であったため, 結合水量比の大小だけでは圧縮強度を評価できないことが示唆されている。

次に, LSP混和シリーズ内での差異に着目する。L20-30%のシリーズを除き, 全ての材齢においてCH量比および結合水量比の差が限定的である。したがって, 本検討においては, ブレーン値や置換率によって核添加効果や化学効果の影響が変化するという既往の知見<sup>2)</sup>は確認できなかった。この原因として, 本検討ではLSPの置換率および水セメント比が比較的高く, 単位セメント量が限られていたことが考えられる。核添加効果による水和促進効果の上限はセメントの絶対量に左右されると考えられるため, ある一定のブレーン値や置換率で核添加効果に頭打ちが生じる可能性があるという推察できる。今後, ブレーン値および置換率のパターンを増やして, さらなる検討を行う必要がある。

材齢1日では, LSP混和シリーズ内でCH量比および結合水量比の差が限定的である一方, 図-1に示した圧縮強度ではシリーズ間の有意な差が確認できる。ここから, CH量比や結合水量比から推測されるセメントの水和度以外に, 強度に有意な影響を与えているメカニズムがあることが示唆されている。

ここで, 材齢1日におけるLSP混和シリーズのCC減量と圧縮強度の関係を図-6に示す。グラフから, CC減量と圧縮強度に概ね正の相関があることが分かる。また, L3-30%を除くシリーズでCC減量は正の値を取っており, CCが消費されていることが推察できる。一方, 3.3節で述べた通り, 図-4,5に示したXRDの波形ではカーボアルミネート相のピークが確認できない。したがって, 材齢初期において, 化学効果によるカーボアルミネート相の生成以外に, CCが何らかの化学的反応により分解さ

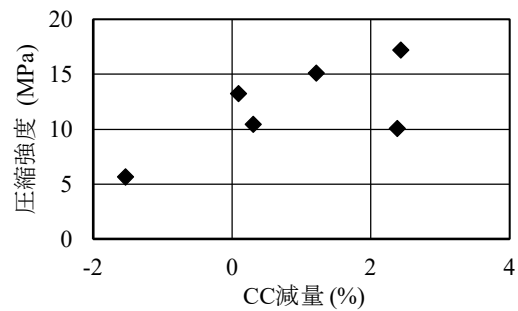


図-6 材齢1日におけるLSP混和シリーズの圧縮強度とCC減量の関係

表-7 アルキメデス法による空隙率 (%)

	空隙率(1日)	空隙率(7日)
L3-60%	31.88	21.08
L3-30%	29.11	20.80
L13-60%	28.87	20.53
L13-30%	32.17	21.10
L20-60%	29.30	19.83
L20-30%	27.87	19.31
N	40.62	22.43

れたことが示唆されている。

セメント硬化体中のCCが関連する化学反応について, Ramachandranら<sup>4)</sup>は, LSPの混和によりC-S-Hゲルのカルシウム・シリケート比(以下, Ca/Si)がわずかに変化することを報告し, C-S-Hゲル内にCCが取り込まれたためと考察している。Ca/Siの上昇はC-S-Hゲルの密度の向上および緻密化に繋がり, ペースト強度の増進に寄与する。この反応はLSPのブレーン値や置換率に影響を受けるものと考えられる。したがって, このメカニズムにより, 本検討におけるLSPシリーズ内での1日強度の有意な差が生じた可能性がある。今後, 若材齢時におけるLSP混和シリーズのCa/SiをSEM-EDX等を用いて測定し, さらなる検討を進める必要がある。

### 3.5 空隙率

各シリーズの材齢1日および7日における空隙率を表-7に示す。材齢1日では, LSP混和シリーズの空隙率がN(OPCのみ)よりも有意に小さい。また, LSP混和シリーズ内では差が相対的に小さく, LSPの置換率やブレーン値の違いによる有意な影響は確認できない。3.4節で述べた通り, 表-5, 表-6に示したCH量比および結合水量比はLSP混和シリーズがNを大きく上回っており, LSP混和シリーズ内における差は限定的である。CH量比および結合水量比は水和物の総量と関連していると考えられるため, 水和物の総量の差が空隙率の差に繋

っているものと説明できる。

3.4 節で述べた 1 日強度と CH 量比および結合水量比の関係と同様に、LSP 混和シリーズ内で 1 日強度に有意な差が生じている一方、空隙率の差は限定的である。この原因として、同程度の空隙率であっても、空隙径分布に有意な差が生じていた可能性が考えられる。Valcuende ら<sup>9)</sup>は LSP で外割置換した場合、空隙総量は変化しない一方、空隙径の分布は、LSP 混和量の増加に従って、より小径側に偏ると報告している。そのメカニズムとして、LSP がセメント硬化体の充填密度を向上し、粗大な空隙が減少する充填効果が働いたこと、また、LSP 表面に析出する CH の結晶がより細くなったことを挙げている。図-6 に示した CC 減量と 1 日強度の関係に関する議論と同様に、核添加効果だけでは説明できない LSP 混和シリーズ内での強度差が、これらの効果に起因している可能性がある。アルキメデス法では空隙の総量のみを測定しており、空隙径分布までは評価できないため、今後、水銀圧入法 (MIP) 等を用いた更なる検討が必要である。

材齢 7 日の空隙率については、N を含めた全シリーズにおいて、空隙率の差が限定的である。表-6 に示した材齢 7 日の結合水量比では、LSP 混和シリーズと N の間に有意な差があるため、結合水量比を直接的に空隙率に結び付けることができないことが示唆されている。これは、結合水量比の大小だけでは圧縮強度を評価できないという 3.4 節で述べた考察と整合する。今後、結合水量比と空隙率および圧縮強度に関する関係を定量的に評価する検討が必要である。

#### 4. 結論

本研究では、外割置換した LSP がセメント硬化体の強度発現性に与える影響とそのメカニズムについて、圧縮強度試験、TGA、XRD、空隙率測定を組み合わせで検討した。以下、得られた結果を列挙する。

- 1) LSP を粉体重量の 60%とした大量混和のケースでは、OPC のみのケースに比べて 1 日強度が有意に増進する。本検討においては、LSP が最大のブレン値を有するケースで 2.9 倍の強度増進が得られた。
- 2) LSP を 60%混和したケースに比べ、30%混和したケースでは 1 日強度の増進が抑えられる。OPC と同程度のブレン値を有する LSP を用いた場合、OPC のみのケースと同程度の強度だったが、ブレン値の上昇とともに、有意な強度増進がみられた。
- 3) 材齢 7 日および 28 日では化学効果によるカーボアルミネート相の生成が確認されたが、シリーズ間での強度に有意な差はなかった。したがって、LSP の混和による強度増進効果は材齢が経つにつれて小さくなり、1 日強度の増進の支配的な要因は核添加

効果であると考えられる。

- 4) LSP を混和したシリーズ間で、材齢 1 日における空隙率や結合水量に有意な差はなかった。したがって、LSP 混和ケース間での圧縮強度の差異は、核添加効果による水和促進だけでは説明できないと考えられる。
- 5) LSP 混和ケース間でのブレン値や混和量による 1 日強度の差は
  - ① LSP がセメント硬化体の充填密度を向上し、粗大な空隙の量を減少させた (充填効果)。
  - ② ブレン値の大きい LSP の周囲に細かい CH 結晶が生成され、空隙構造が緻密化した。
  - ③ LSP から析出したカルシウムイオンにより、C-S-H ゲルの Ca/Si が向上し、ペースト強度が増加したといった 3 つの可能性が考えられる。

今後、MIP 等による空隙径分布の測定や、SEM-EDX 等による元素分析を通して、メカニズムに関するさらなる検討を進める予定である。

#### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP24K2162660 の助成を受けたものです。また、本研究で使用した材料は太平洋セメント株式会社、住友大阪セメント株式会社、シーカ・ジャパン株式会社からご提供いただきました。

#### 参考文献

- 1) 株式会社セメント新聞社: 月間コンクリートテクノ, Vol.43, No.9, pp.18-24, 2024.
- 2) Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., & Ou, Z.: A Review on Use of Limestone Powder in Cement-Based Materials: Mechanism, Hydration and Microstructures, Construction and Building Materials, Vol.181, pp.659-672, Jun.2018.
- 3) De Weerd, K., Ben Haha, M., Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., & Lothenbach, B.: Hydration Mechanisms of Ternary Portland Cements Containing Limestone Powder and Fly Ash, Cement and Concrete Research, Vol.41, No.3, pp.279-291, Mar.2011.
- 4) Ramachandran, V. S., & Zhang, C. M.: Influence of CaCO<sub>3</sub> on Hydration and Microstructural Characteristics of Tricalcium Silicate, II Cemento, Vol.83, No.3, pp.129-152, Jul.-Sept.1986.
- 5) Valcuende, M., Parra, C., Marco, E., Garrido, A., Martínez, E., & Cánoves, J.: Influence of Limestone Filler and Viscosity-Modifying Admixture on the Porous Structure of Self-Compacting Concrete, Construction and Building Materials, Vol.28, pp.122-128, Jan.2012.