

# 論文 石膏転化プロセスにより製造した人工炭酸カルシウムをセメントの少量混合成分に用いたコンクリートの強度・収縮特性

齋藤 尚\*1・本田 和也\*1・國米 敦\*2・安本 礼持\*3

**要旨:** 本研究では、廃石膏ボード粉と炭酸ナトリウムの化学反応により製造した人工炭酸カルシウム (ACC) をセメントの少量混合成分に用いたコンクリートの性状を把握することを目的に、W/C=27%~55%のコンクリートを対象に、少量混合成分に ACC または石灰石微粉末 (LSP) を用いた場合の強度特性、収縮特性を検討した。その結果、圧縮強度は ACC と LSP で同等の強度発現性を示し、簡易断熱養生による構造体強度補正値も同等であることが確認された。また、乾燥収縮ひずみ、自己収縮ひずみについても、ACC と LSP で同等の性状であることが確認された。

**キーワード:** 人工炭酸カルシウム, 廃石膏ボード, 少量混合成分, 圧縮強度, 乾燥収縮, 自己収縮

## 1. はじめに

2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、各産業において温室効果ガスの排出を実質ゼロにするための技術開発が行われている。セメントは、コンクリートの構成材料の中でCO<sub>2</sub>排出量が最も多い材料であるため、セメント産業におけるCO<sub>2</sub>排出量の削減は重要な課題となっている。

セメント製造時のCO<sub>2</sub>排出量を削減するための方策として、クリンカ比率の低減や省エネルギーの推進、焼成温度の低減などが挙げられる<sup>1)</sup>。ここで、クリンカ比率の低減に着目すると、JIS R 5210:2019 (ポルトランドセメント) では、普通、早強および超早強ポルトランドセメントに含まれる少量混合成分の含量を5%以下と規定している。既往の研究として、将来的な少量混合成分の増量を想定し、セメントの組成や粉末度、少量混合成分の種類を変化させ、セメントの品質やコンクリートの物性を評価した事例が報告されている<sup>2)~4)</sup>。

一方、筆者らは、セメント工場の排ガスなどに含まれるCO<sub>2</sub>を分離回収し、廃石膏ボードや廃コンクリートといったカルシウムを含む廃棄物と反応させ、人工炭酸カルシウムを製造し、セメントやコンクリートの利用に向けた技術開発に取り組んでいる<sup>5)</sup>。人工炭酸カルシウムはCO<sub>2</sub>を吸収・固定した材料であるため、セメントやコンクリートに適用した場合、CO<sub>2</sub>排出量の削減に寄与する材料になると期待される。しかしながら、人工炭酸カルシウムがコンクリートの品質に及ぼす影響について検討した事例<sup>6)</sup>は少ない。また、JIS R 5210:2019では、少量混合成分の石灰石に関する規定は炭酸カルシウムの含有率が90%以上、酸化アルミニウムの含有量が1.0%以下の品質をもつ石灰石としており、人工炭酸カルシウムの

使用は規定されていない。今後、人工炭酸カルシウムの利用を拡大していくためには、セメントの少量混合成分での活用も含めコンクリートに用いた場合のデータを蓄積していくことが課題である。

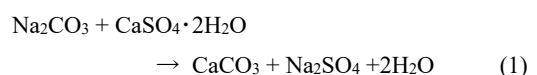
そこで、本研究では、石膏転化プロセスにより製造した人工炭酸カルシウムをセメントの少量混合成分に用いたコンクリートの各種性状を把握することを目的に、強度特性および収縮特性を検討した。実験では、石灰石微粉末をセメントの少量混合成分に用いたコンクリートの各種性状についても比較検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 人工炭酸カルシウムの製造方法

本研究で用いた人工炭酸カルシウムは、石膏転化プロセスにより製造した<sup>7)</sup>。本プロセスは、式(1)に示す廃石膏ボードを原料とする石膏と炭酸ナトリウムの化学反応により、炭酸カルシウムが生成されることを利用したものである。炭酸ナトリウムにはバイポーラ膜電気透析法により得られた水酸化ナトリウムに二酸化炭素ガスを通気して得られたものを用いた。

人工炭酸カルシウムは、炭酸ナトリウム水溶液中に石膏を混合して炭酸カルシウムのスラリーを製造した後、フィルタープレスによる固液分離工程、固形分の乾燥工程を経て製造した。



### 2.2 コンクリートの使用材料

セメントには、少量混合成分を含まない普通ポルトラ

\*1 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 博(工) (正会員)

\*2 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 修(工)

\*3 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 修(工) (正会員)

表-1 セメント，少量混合成分の化学成分

略号	化学成分 (%)											
	ig.loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
OPC	0.68	21.55	5.44	3.20	64.16	0.93	1.80	0.25	0.30	0.35	0.20	0.15
ACC	43.59	0.75	0.33	0.30	53.27	0.18	0.30	0.53	0.03	0.09	0.04	0.01
LSP	43.33	0.69	0.16	0.11	54.86	0.49	0.00	0.02	0.00	0.00	0.10	0.01

表-2 コンクリートの配合

配合名*	少量混合成分		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )								
	種類	置換率 (%)			W	C			S1	S2	G		
						OPC	ACC	LSP					
27-A5	ACC	5	27	46	170	598	31	0	504	218	846		
27-A10		10			170	567	63	0	503	217	843		
27-L5	LSP	5			170	598	0	31	505	218	847		
27-L10		10			170	567	0	63	503	217	844		
36-A5	ACC	5			36	47	170	449	24	0	559	241	900
36-A10		10					170	425	47	0	558	241	898
36-L5	LSP	5					170	449	0	24	559	242	901
36-L10		10					170	425	0	47	558	241	899
45-A5	ACC	5	45	48			175	369	19	0	577	249	893
45-A10		10					175	350	39	0	576	249	891
45-L5	LSP	5					175	369	0	19	577	249	893
45-L10		10					175	350	0	39	576	249	892
55-A5	ACC	5			55	49	175	302	16	0	609	263	906
55-A10		10					175	286	32	0	608	263	904
55-L5	LSP	5					175	302	0	16	609	263	906
55-L10		10					175	286	0	32	609	263	905

\* 配合名：(W/C)-(少量混合成分の種類・置換率)

ンドセメント (OPC：密度 3.15g/cm<sup>3</sup>，ブレン比表面積 3140cm<sup>2</sup>/g) を用いた。少量混合成分には，人工炭酸カルシウム (ACC：密度 2.58g/cm<sup>3</sup>，ブレン比表面積 6620cm<sup>2</sup>/g) を用い，比較として石灰石微粉末 (LSP：密度 2.70g/cm<sup>3</sup>，ブレン比表面積 4280cm<sup>2</sup>/g) を用いた。表-1 にセメントおよび少量混合成分の化学成分を示す。本研究で用いた ACC および LSP の品質は，JIS R 5210 の少量混合成分の規定値である炭酸カルシウムの含有率が 90%以上，酸化アルミニウムの含有量が 1.0%以下を満足するものであった。また，ACC はカルサイト結晶であるが，結晶の形状や粒度の影響で LSP よりも密度が小さくなったと考えられる。

細骨材には，岐阜県揖斐川産の川砂 (S1：表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>，粗粒率 2.85)，大阪府茨木産の砕砂 (S2：表乾密度 2.64g/cm<sup>3</sup>，粗粒率 3.15) を用い，S1 と S2 の容積比は 7：3 とした。粗骨材には，兵庫県西島産の碎石 2005 (G：表乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>，粗粒率 6.52) を用いた。

混和剤には，後述する水セメント比に応じて，AE 減水剤 (AD：高機能タイプ)，高性能 AE 減水剤 (SP1, SP2：ポリカルボン酸エーテル系)，AE 剤 (AE：変性ロジン酸化合物系) を用いた。なお，SP2 は SP1 よりも低水セメント比の領域で用いられる混和剤である。

### 2.3 コンクリートの配合

表-2 にコンクリートの配合を示す。配合は，水セメ

表-3 フレッシュコンクリートの目標値

W/C (%)	目標値*			使用した混和剤		
	SL (cm)	SLF (cm)	Air (%)	AD	SP	AE
27	-	60±10	3.0±1.0	-	SP2	○
36	-	55±5	3.0±1.0	-	SP1	○
45	18±2.5	-	4.5±1.5	○	-	○
55	18±2.5	-	4.5±1.5	○	-	○

\* SL：スランブ，SLF：スランブフロー，Air：空気量

ント比 (W/C) を 27%，36%，45%，55% の 4 水準，少量混合成分の種類を LSP，ACC の 2 水準，少量混合成分の置換率を 5%，10% の 2 水準変化させた計 16 ケースとした。

表-3 にフレッシュコンクリートの目標値を示す。なお，表には各配合で使用した混和剤についても併せて示す。フレッシュコンクリートの性状は，表-3 に示す範囲となるように，各混和剤の添加量により調整した。

コンクリートの練り混ぜは 20℃ の恒温室で強制二軸練りミキサを用いて行い，1 バッチあたりの練混ぜ量は 40L とした。コンクリートの練混ぜ方法は，粉体および骨材を 15 秒間練り混ぜた後，混和剤を含む水を投入し，W/C=45%，55% では 90 秒間，W/C=27%，36% では 180 秒間練り混ぜ，排出した。

### 2.4 試験項目

表-4 に試験項目を示す。フレッシュ性状では，すべての配合を対象に，スランブ (スランブフロー)，空気量

表-4 試験項目

区分	試験項目	試験方法	実施配合			
			27%	36%	45%	55%
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101	-	-	○	○
	スランプフロー	JIS A 1150	○	○	-	-
	空気量	JIS A 1128	○	○	○	○
	コンクリート温度	JIS A 1156	○	○	○	○
強度特性	圧縮強度 (標準養生)	JIS A 1108	○	○	○	○
	圧縮強度 (簡易断熱養生)	JASS 5 T-606	○	○	○	○
	簡易断熱養生によるコンクリートの温度履歴	T型熱電対で測定	○	○	○	○
	ヤング係数 (標準養生)	JIS A 1149	○	○	○	○
収縮特性	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-2	-	○	-	○
	自己収縮ひずみ	JCI 委員会の方法 <sup>8)</sup>	-	○	-	○

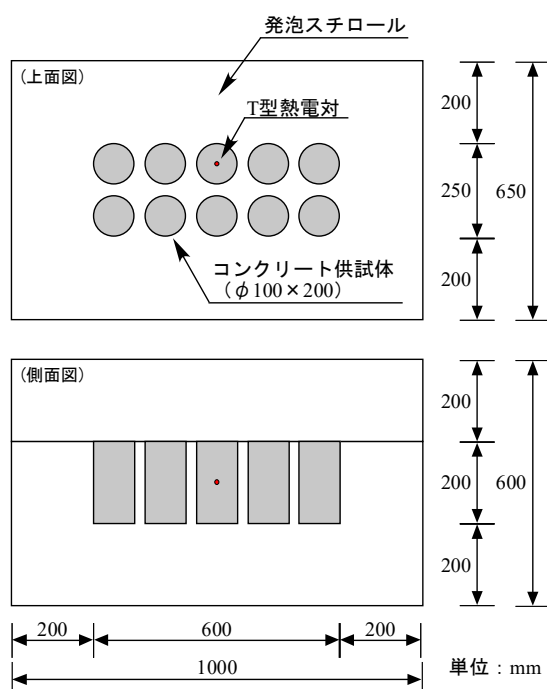


図-1 簡易断熱養生に用いた容器

およびコンクリート温度を測定した。なお、いずれも練上り直後に測定した。

強度特性では、すべての配合を対象に、圧縮強度、簡易断熱によるコンクリートの温度履歴およびヤング係数を測定した。圧縮強度の測定は、φ100×200mmの円柱供試体を用いて行った。養生方法は、標準養生および簡易断熱養生の2種類とした。標準養生の供試体は、JIS A 1108に準拠し、材齢3日、7日、28日に圧縮強度試験を行った。簡易断熱養生の供試体は、JASS 5 T-606に準拠し、図-1に示す発泡スチロール製の容器内に10体の供試体を設置し、材齢14日まで容器内で封かん養生、その後は20±2°Cの恒温室内で封かん養生を行い、材齢28日、91日に圧縮強度試験を行った。容器内に設置した供試体10本のうち、6本は圧縮強度試験用、1本はコンクリートの温度履歴用、3本はダミー用とした。簡易断熱養生によるコンクリートの温度履歴は、φ100×200mmの円柱供試体の中心部にT型熱電対を設置し、打込みから材

表-5 フレッシュ性状の結果

配合名	混和剤 (C×%)		フレッシュ性状			
	AD SP1,2*	AE	SL (cm)	SLF (cm)	Air (%)	C.T. (°C)
27-A5	2.0	0.010	-	63.0	2.3	24
27-A10	2.0	0.008	-	53.0	2.0	25
27-L5	1.6	0.010	-	54.0	2.8	24
27-L10	1.7	0.010	-	65.0	2.3	24
36-A5	1.6	0.008	-	50.0	2.6	23
36-A10	1.6	0.004	-	57.0	3.1	23
36-L5	1.6	0.008	-	57.0	2.2	24
36-L10	1.5	0.006	-	55.5	3.3	22
45-A5	2.0	0.005	18.5	-	3.4	21
45-A10	2.0	0.005	17.5	-	3.1	22
45-L5	2.0	0.005	18.0	-	4.3	21
45-L10	2.0	0.005	18.5	-	3.5	21
55-A5	1.5	0.002	19.5	-	3.3	19
55-A10	1.5	0.002	18.5	-	5.0	19
55-L5	1.5	0.002	18.5	-	3.7	19
55-L10	1.5	0.002	18.5	-	3.5	19

\* AD : W/C=45, 55%, SP1 : W/C=36%, SP2 : W/C=27%

齢14日まで30分間隔で測定した。ヤング係数は、JIS A 1149に準拠し、標準養生を行った材齢28日の供試体を対象に測定した。

収縮特性では、W/C=36%および55%の配合を対象に、乾燥収縮ひずみおよび自己収縮ひずみを測定した。乾燥収縮ひずみの測定は、JIS A 1129-2に準拠し、100×100×400mmの角柱供試体を用いて行った。供試体は、材齢1日で脱型した後、材齢7日まで標準養生を行い、その後20±2°C、60±5%R.H.の環境下に静置した。乾燥収縮ひずみは、材齢7日に基長(0日)を測定し、乾燥期間7日、28日、56日、91日、182日にそれぞれ測定した。自己収縮ひずみの測定は、JCI「超流動コンクリート研究委員会報告書」<sup>8)</sup>に準拠し、100×100×400mmの角柱供試体の中心部に埋込み型ひずみ計(見掛けの弾性係数40N/mm<sup>2</sup>)を設置して行った。自己収縮ひずみは、コンクリートの線膨張係数は10×10<sup>-6</sup>/°Cと仮定し、供試体の全ひずみから温度ひずみを差し引いて求めた。なお、自己収縮ひずみの起点は、凝結の始発時間とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 フレッシュ性状

表-5 にフレッシュ性状の結果を示す。まず、W/C=36%, 45%および 55%の配合では、少量混合成分の種類や置換率によらず、ほぼ同一の AD または SP 添加量で同等のスランブ（スランブフロー）が得られた。次に、W/C=27%の配合では、その他の配合とは異なる傾向を示した。具体的には、ACC を用いた場合では置換率の増加に伴って、スランブフローが小さくなる一方、LSP を用いた場合では置換率の増加に伴って、スランブフローが大きくなる傾向を示した。また、ACC と LSP を比較すると、同一のスランブフローを得るための SP 添加量は、ACC の方が増加する傾向が確認された。ACC を用いた場合に SP 添加量が増加した要因としては、LSP よりもブレン比表面積が高いなど、ACC と LSP の粉体特性、すなわち BET 比表面積や粒度分布などの性状が異なっていたことが影響したと考えられる。ACC の粉体特性と流動性との関係性については十分に把握できていないため、今後の検討課題としたい。

#### 3.2 強度特性

##### (1) 圧縮強度

図-2 に標準養生を行った圧縮強度の結果の一例として、W/C=55%の結果を示す。各配合の強度発現性は概ね同等の推移であった。また、材齢 28 日の圧縮強度を比較すると、55-A5 で 39.7N/mm<sup>2</sup>、55-A10 で 38.3N/mm<sup>2</sup>、55-L5 で 40.5N/mm<sup>2</sup>、55-L10 で 37.7N/mm<sup>2</sup> となり、少量混合成分の種類による差は小さく、置換率の増加に伴い圧縮強度が若干低下する傾向であった。この傾向は既往の文献<sup>3)</sup>と同様であった。

図-3 に W/C=27%~55%における ACC と LSP の圧縮強度を比較した結果を示す。ACC の圧縮強度は、いずれの条件および材齢においても LSP の圧縮強度と同等であり、ACC を用いた場合においても LSP と強度発現性に大きな差がないことが確認された。

ACC と LSP の圧縮強度に関して、統計上の有意差を検証するために、JIS Z 9401-2 書式 K' (2つの対応のある測定の平均値の比較)に基づき、有意差検定を行った。表-6 に有意差検定の条件を示す。有意差検定は、少量混合成分の置換率 5%および 10%、材齢 3 日、7 日および 28 日の標準養生の圧縮強度を対象に、有意水準 1%、5%について行った。有意差検定の結果、ACC と LSP の圧縮強度には有意水準 1%、5%のいずれにおいても有意な差は検出されなかった。

##### (2) 簡易断熱養生による構造体強度補正值 $_{28}S'_{91}$

図-4 に材齢 91 日における簡易断熱養生の圧縮強度と簡易断熱養生による構造体強度補正值  $_{28}S'_{91}$  との関係を示す。なお、図中には、建設省告示第 1102 号 (改正：

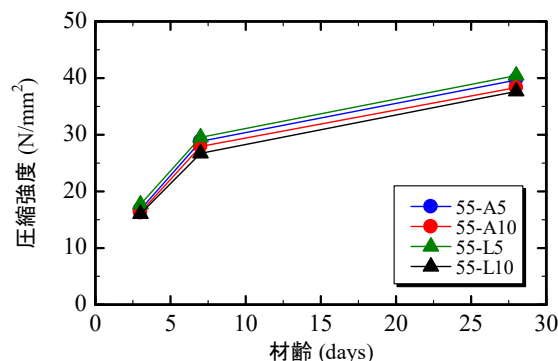


図-2 圧縮強度 (W/C=55%, 標準養生)

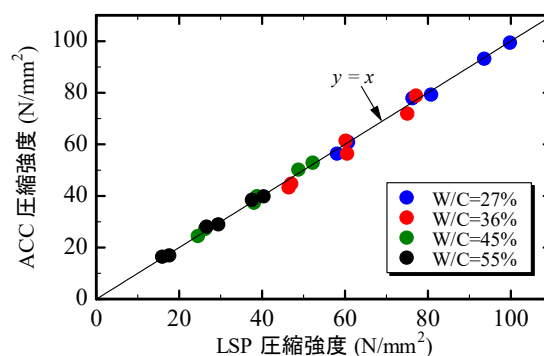


図-3 圧縮強度の比較

表-6 有意差検定の条件

区分	項目	条件
対象	少量混合成分の置換率	5%, 10%
	標準養生の圧縮強度	3 日, 7 日, 28 日
条件	検定のタイプ	両側検定
	有意水準 $\alpha$	1%, 5%
	データ数 $n$	4
	自由度 $\nu (= n-1)$	3
	$t_{\nu, 1-\alpha/2}(\nu)$	$\alpha=1\% : 5.841$ $\alpha=5\% : 3.182$

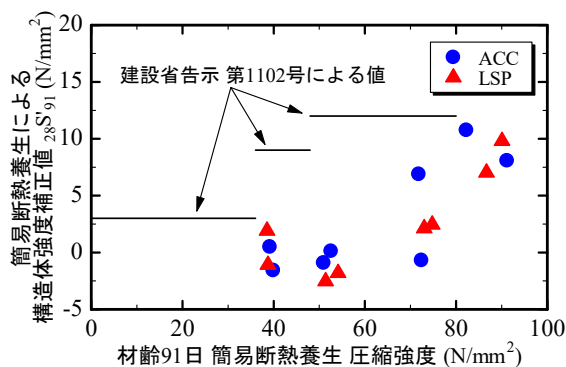
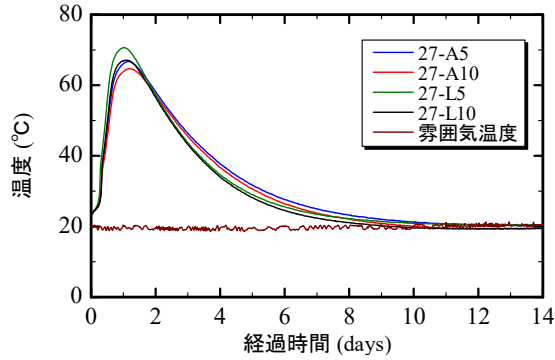
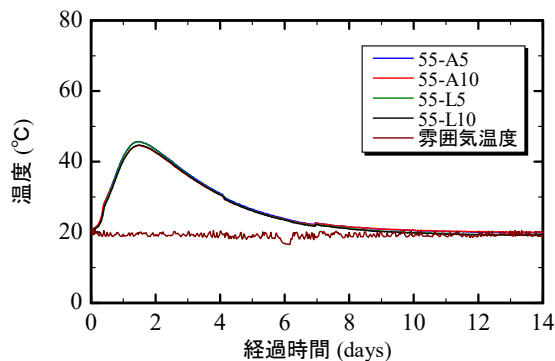


図-4 簡易断熱養生による構造体強度補正值

国土交通省告示第 502 号) に示されている設計基準強度と構造体強度補正值との関係も併せて示す。ACC と LSP の簡易断熱養生による構造体強度補正值を比較すると、70N/mm<sup>2</sup> 付近のデータにおいて若干異なる傾向を示しているものの、概ね同等の値であることが確認された。また、本研究で得られた簡易断熱養生による構造体強度補



(a) W/C=27%



(b) W/C=55%

図-5 コンクリートの温度履歴

正值は、建設省告示第1102号で示される構造体強度補正值に対して小さい値を示しており、安全側に評価される結果となった。

### (3) 簡易断熱養生によるコンクリートの温度履歴

図-5にコンクリートの温度履歴の一例として、W/C=27%および55%の結果を示す。W/C=27%に関しては、最高温度に到達する時間を比較すると、ACCとLSPでは同程度であった。最高温度を比較すると、ACCの方がLSPよりも3°C程度小さくなった。一方、W/C=55%に関しては、最高温度に到達する時間と最高温度は少量混合成分の種類や置換率によらず、同程度であった。

図-6に単位セメント量と簡易断熱温度上昇量との関係を示す。なお、簡易断熱温度上昇量は、コンクリートの最高温度と練上り温度の差とした。簡易断熱温度上昇量は、単位セメント量が318kg/m<sup>3</sup> (W/C=55%) および388kg/m<sup>3</sup> (W/C=45%) では少量混合成分の種類や置換率によらず、概ね同程度であった。一方、単位セメント量が473kg/m<sup>3</sup> (W/C=36%) より大きくなると、簡易断熱温度上昇量はACCの方がLSPよりも若干低くなる傾向を示した。鈴木らは、人工炭酸カルシウムまたは石灰石微粉末を5%~20%置換したW/C=50%のセメントペーストの水和発熱速度を測定し、人工炭酸カルシウムと石灰石微粉末を用いた場合の水和発熱速度は同等であることを報告している<sup>7)</sup>。単位セメント量が473kg/m<sup>3</sup>より大きい場合、ACCの簡易断熱温度上昇量がLSPよりも若

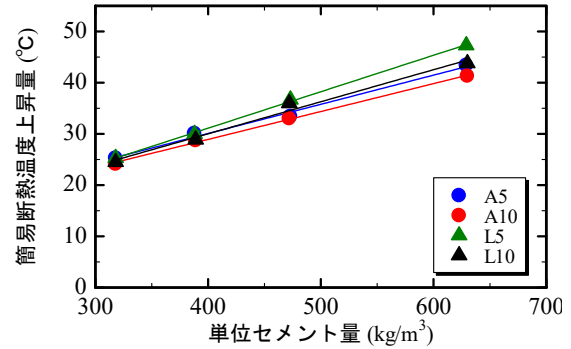


図-6 単位セメント量と簡易断熱温度上昇量の関係

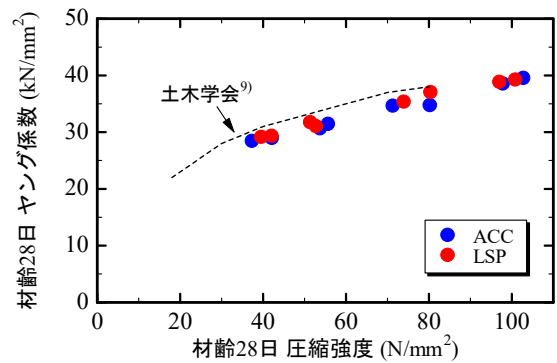


図-7 材齢28日の圧縮強度とヤング係数の関係

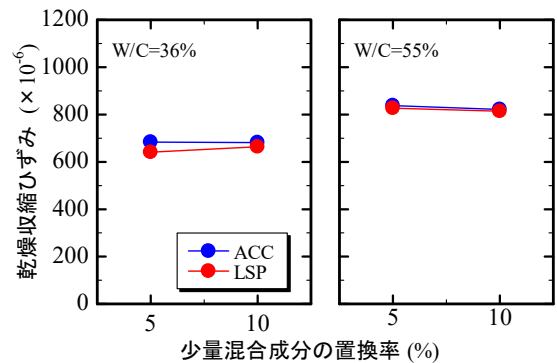


図-8 乾燥収縮ひずみ (乾燥期間182日)

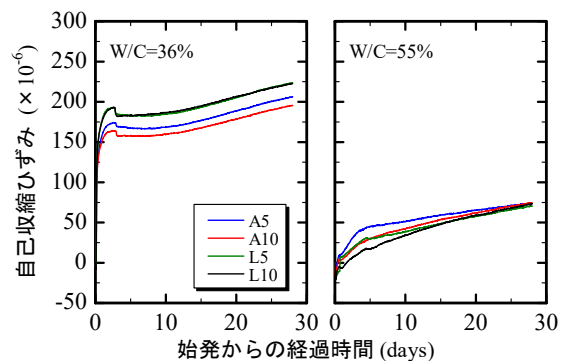


図-9 自己収縮ひずみの経時変化

干低くなった要因については現時点では不明であるため、今後断熱温度上昇量試験を行い、配合や少量混合成分と発熱特性の関係性を把握したいと考える。

### (4) 圧縮強度とヤング係数の関係

図-7に材齢28日における圧縮強度とヤング係数の

関係を示す。なお、図中には土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に示される関係<sup>9)</sup>も併せて示す。ACC、LSPともに、土木学会の関係よりも若干小さくなる傾向にあるものの、少量混合成分の種類による差は小さく、ACCとLSPを用いた場合の性状は同程度と判断される。

### 3.3 収縮特性

図-8に乾燥期間182日における乾燥収縮ひずみの結果を示す。乾燥収縮ひずみは、W/C=36%で $641\sim 684\times 10^{-6}$ 、W/C=55%で $814\sim 834\times 10^{-6}$ の範囲にあり、少量混合成分の種類や置換率の影響は比較的小さいものと判断される。

図-9に自己収縮ひずみの経時変化を示す。自己収縮ひずみは、W/C=36%で $195\sim 224\times 10^{-6}$ 、W/C=55%で $70\sim 74\times 10^{-6}$ の範囲にあり、乾燥収縮と同様に、少量混合成分の種類や置換率の影響は小さかった。また、ACCのSO<sub>3</sub>量がLSPよりも高いため、硬化初期の膨張量が僅かに高くなると想定されたが、ACCとLSPの初期膨張量はW/C=36%で $9\times 10^{-6}$ 、W/C=55%で $15\sim 20\times 10^{-6}$ にあり、同程度であることが確認された。

## 4. まとめ

本研究は、石膏転化プロセスにより製造した人工炭酸カルシウムをセメントの少量混合成分に用いたコンクリートの各種性状を把握することを目的に、少量混合成分に人工炭酸カルシウム(ACC)または石灰石微粉末(LSP)を用いたコンクリートの強度特性および収縮特性を検討した。以下に、本実験の範囲で得られた知見を示す。

- (1) フレッシュ性状については、W/C=36%、45%および55%の配合では、目標スランプまたはスランプフローを得るためのAE減水剤または高性能AE減水剤の添加量は少量混合成分の種類や置換率によらず、概ね同等であった。一方、W/C=27%の配合では、目標スランプフローを得るための高性能AE減水剤の添加量はACCの方がLSPよりも増加する傾向を示した。
- (2) 圧縮強度については、いずれの配合においてもACCとLSPは同等の強度発現性を示し、有意差検定の結果からも有意な差は検出されなかった。また、実験で得られた簡易断熱養生による構造体強度補正值は、建設省告示第1102号で示される構造体強度補正值に対して小さい値を示し、安全側に評価される結果となった。
- (3) 簡易断熱養生によるコンクリートの温度履歴については、W/C=45%および55%の配合では、ACCとLSPで概ね同程度であった。一方、W/C=27%および36%の配合では、ACCの方がLSPよりも若干低

くなる傾向を示した。

- (4) 乾燥収縮ひずみおよび自己収縮ひずみについては、いずれの配合もACCとLSPで同等であった。

今後は、人工炭酸カルシウムを少量混合成分に用いたコンクリートの耐久性を検討するとともに、人工炭酸カルシウムの利用拡大に向けて、人工炭酸カルシウムの置換率を増やした場合のデータについても蓄積していきたいと考える。

## 謝辞

本成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業(JPNP21023)の結果から得られたものである。

## 参考文献

- 1) カーボンニュートラルを目指すセメント産業の長期ビジョン：[https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/22-0324\\_01.pdf](https://www.jcassoc.or.jp/cement/4pdf/22-0324_01.pdf) (閲覧日：2024年12月16日)
- 2) 中口歩香, 黒川大亮, 平尾宙, 上野直樹：少量混合成分を増量したセメントの品質評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.72, pp.389-395, 2018
- 3) 寺内貴史, 田原和司, 飯田達郎, 盛岡実：少量混合成分を用いたコンクリートの基礎物性, セメント・コンクリート論文集, Vol.72, pp.412-417, 2018
- 4) 安田瑛紀, 桐野裕介, 細川佳史, 石田征男：少量混合成分の量を10%とした普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの室内ならびに暴露環境における物性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.25-30, 2024
- 5) 大野晃：セメント製造プロセスから排出される二酸化炭素を利用した炭酸塩製造および利用技術の開発, セラミックス, Vol.58, No.4, pp.228-231, 2023
- 6) 梅津真見子, 宮原茂禎, 畑明仁, 小西正芳：廃石膏ボードを原料とした合成炭酸カルシウムを添加したコンクリートの基本的品質, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.91-96, 2024
- 7) 鈴木怜和, 森川卓子, 菊池定人, 水田懐：石膏転化プロセスによる人工石灰石を用いた試製セメントの水和評価, 第78回セメント技術大会講演要旨, pp.6-7, 2024
- 8) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II), pp.209-210, 1994
- 9) 土木学会：2022年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, p.45, 2023