

# 論文 炭酸カリウムを使用した水ガラス不使用ジオポリマーに関する研究

福本 直\*1・宮崎 泰樹\*2・前島 嵐\*3・横関 康祐\*4

**要旨：**ジオポリマーは、産業副産物の有効利用、建設分野における CO<sub>2</sub> 排出量低減の観点から注目を集めている。本研究では、ジオポリマー製造における更なる CO<sub>2</sub> 排出量の削減を目的として、水ガラスを使用しないことに加え、炭酸カリウムの使用により CO<sub>2</sub> を固定したジオポリマーを製作し、フロー試験、強度試験、CO<sub>2</sub> 固定量分析を行った。その結果、全アルカリ中の炭酸カリウムの割合を調整することにより、施工性を確保し、高温養生を実施しない場合でも高い強度を有するジオポリマーを作製できることを明らかにした。また、本研究で作製したジオポリマーモルタルの CO<sub>2</sub> 総収支はカーボンネガティブ化を達成した。

**キーワード：**ジオポリマー、炭酸カリウム、CO<sub>2</sub> 固定、産業副産物、圧縮強さ、曲げ強さ

## 1. はじめに

ジオポリマーとは、アルミナシリカ粉末とアルカリ溶液の反応により、非晶質ポリマーを形成して硬化したものである<sup>1)</sup>。アルミナシリカ粉末としては、フライアッシュの一部を高炉スラグ微粉末で置換したものをを用いることが一般的であり、産業副産物の有効利用先としても期待されている。また、原材料にセメントを使用しないことから、セメントコンクリートと比較して製造にかかる CO<sub>2</sub> 排出量が少なく、建設分野における CO<sub>2</sub> 排出量低減の観点からも注目を集めている。アルカリ溶液には、水ガラスに水酸化ナトリウム (NaOH) または水酸化カリウム (KOH) を混合した溶液を用いるのが一般的である。KOH は NaOH と比較して高価ではあるが、凝結が遅く、施工性に優れることが知られている<sup>2)</sup>。水ガラスは原料製造時の CO<sub>2</sub> 排出量が多く、ジオポリマー製造における CO<sub>2</sub> 排出量を高める要因となっている。ジオポリマーは初期材齢において高温養生することが一般的であり、高温養生時の加温に伴う CO<sub>2</sub> 排出量を加味する必要がある。

近年、CO<sub>2</sub> を資源として有効活用するカーボンリサイクル技術が注目を集めている。セメントコンクリートにおいては、製造段階でコンクリートに CO<sub>2</sub> を固定する技術が開発されている<sup>3)</sup>。ジオポリマーにおいても、CO<sub>2</sub> を固定した炭酸カルシウム (CaCO<sub>3</sub>) および炭酸ナトリウム (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) を材料として使用することで、CO<sub>2</sub> 排出量を削減できることが提案されている<sup>4)</sup>。ジオポリマーへの適用が可能な炭酸塩としては、炭酸カリウム (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) も考えられる。K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> は水への溶解度が高く、水に溶解すると高アルカリとなることから、ジオポリマーのアルカリ溶液に適している。また、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> は植物由来の燃焼灰や、DAC (直接空気回収技術) による CO<sub>2</sub> 回収プロセスで生じる中間物質に含まれており、産業副産物からの流用も期待できる。既往の研究<sup>5)</sup>では、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> を水ガラ

スおよび水酸化カルシウム (Ca(OH)<sub>2</sub>) と混合してアルカリ溶液として使用することが検討されているが、フレッシュ性状と強度の観点から、実用的なジオポリマーの開発には至っていない。また、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> と KOH の混合溶液をジオポリマーへ適用した検討事例は見当たらない。

本研究では、CO<sub>2</sub> 排出量の少ないジオポリマーの開発を目的として、水ガラスを使用せず、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> と KOH の混合溶液を使用したジオポリマーを、高温封緘養生、気中封緘養生の2つの養生条件で作製した。まず、ペースト試験で各配合とフレッシュ性状および強度特性の関係を明らかにし、硬化・CO<sub>2</sub> 固定の機構の検討を行った。次に、モルタル試験でフレッシュ性状と強度を満足する配合の検討および CO<sub>2</sub> 総収支の算出を実施した。

## 2. ペースト試験

### 2.1 実験概要

使用材料を表-1に示す。アルカリ溶液には、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> と KOH を水に溶解した混合溶液を使用し、水ガラスを使用しない配合とした。水粉体比 30%、BFS 置換率 40%で固定し、全アルカリ中の K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> のモル比 (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH)) を変化させた配合で試験を実施した。配合を表-2に示す。フロー試験と圧縮強度試験を実施し、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) がフレッシュ性状と強度に与

表-1 使用材料

材料	略号	物性
水	W	上水道水
炭酸カリウム	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	密度 2.29g/cm <sup>3</sup> 純度 99.5%以上
水酸化カリウム	KOH	密度 2.05g/cm <sup>3</sup> 純度 86.0%以上
フライアッシュ (II種適合品)	FA	密度 2.20g/cm <sup>3</sup> 比表面積 3690cm <sup>2</sup> /g
高炉スラグ微粉末 4000	BFS	密度 2.91g/cm <sup>3</sup> 比表面積 4000cm <sup>2</sup> /g

\*1 中国電力 (株) エネルギア総合研究所 土木グループ 副長 (正会員)

\*2 中国電力 (株) エネルギア総合研究所 土木グループ 修士 (工学) (正会員)

\*3 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科

\*4 東洋大学 理工学部 都市環境デザイン学科 教授 博士 (工学) (フェロー会員)

表-2 ジオポリマーペーストの配合

配合名	水粉体比 <sup>*1</sup> (%)	BFS 置換率 <sup>*2</sup> (%)	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +KOH)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	KOH	FA	BFS
No.1	30	40	1	351	398	0	694	462
No.2			0.9	355	362	16	702	468
No.3			0.75	360	306	42	711	474
No.4			0.65	364	268	59	720	479
No.5			0.5	369	209	85	730	487
No.6			0.25	378	108	130	747	499
No.7			0	388	0	179	767	511

※1: W/P 【W: 水の質量, P: 総粉体 (FA+BFS) の質量】 ※2: BFS/ (FA+BFS) 【総粉体質量に対する BFS 質量の割合】

える影響を検討した。また、原材料とジオポリマーを対象に XRD 分析を実施し、ジオポリマーの硬化反応機構について検討した。加えて、熱重量分析と無機炭素分析を実施し、ジオポリマーへの CO<sub>2</sub> 固定について検討した。

## 2.2 実験方法

### (1) 練混ぜ方法および養生

練混ぜには 20L ホバートミキサを使用した。フライアッシュ、高炉スラグ微粉末を投入して 30 秒間空練りした後、炭酸カリウムと水酸化カリウムを水に溶解したアルカリ溶液を投入して 60 秒間練混ぜを行い、かき落としを行った後、再度 30 秒間練混ぜを行った。養生方法は、高温封緘養生と気中封緘養生の 2 種類とした。高温封緘養生は、打設後 3 時間かけて室温から 60℃に昇温し、12 時間保温した後、6 時間かけて 20℃まで降温し、材齢 7 日まで室温 20℃で養生を行った。気中封緘養生は、室温 20℃の条件で 7 日間養生を行った。供試体寸法はφ50×100mm である。加温は型枠を取り付けたまま行い、脱型はいずれの養生方法も材齢 3 日で行った。

### (2) フロー試験

JIS R 5201 に準拠し、練混ぜ直後のフローを測定した。

### (3) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠し、材齢 7 日の圧縮強度試験を実施した。試験は各配合、養生方法につき 3 本ずつ行い、3 本の平均値を各々の圧縮強度とした。

### (4) 分析用試料作製

XRD 分析と CO<sub>2</sub> 固定量分析用の試料は供試体をハンマーで粗粉碎した後に、乳鉢によって粒子サイズが 0.15mm 以下になるようにすりつぶし作製した。

### (5) XRD 分析

試料の鉱物組成を分析するために、X線回折を行った。測定条件は、開始角度 3.0°、終了角度 90°、ステップ角 0.01°、スキャンスピードを 10°/min とした。測定試料には、内部標準物質として Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を内割で 10mass% 添加した。分析対象は No.3 の配合とした。また、使用材料であるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末についても分析を行った。

### (6) CO<sub>2</sub> 固定量分析

CO<sub>2</sub> 固定量分析は熱重量分析および無機炭素分析によ

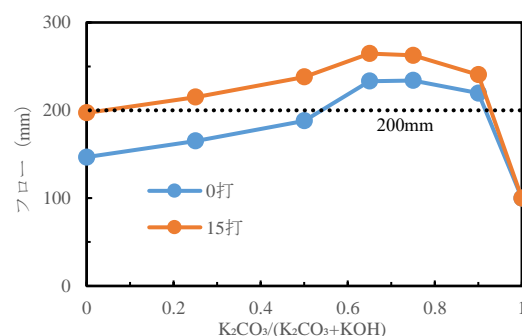


図-1 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) とフローの関係

り行った。熱重量分析には熱重量・示差熱同時測定装置を使用した。分析時の試料重量は 20±2mg、最高温度 1000℃、昇温速度は 10℃/min、窒素ガスの流量は 300ml/min とした。炭酸化合物からの脱炭酸は既往の研究<sup>9)</sup>を参考にし、DTG 曲線の減量ピークから判断した。脱炭酸の温度は 400~900℃とした。なお、CO<sub>2</sub> 固定量は脱炭酸時の重量変化に単位容積質量を乗じることによって算出した。無機炭素分析にはクーロメータを使用した。塩酸濃度は 30%、試料重量は 180±5mg とした。無機炭素分析は各 3 回行い、平均値を試験結果とした。

## 2.3 実験結果

### (1) フロー試験

K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) とフローの関係を図-1 に示す。0 打フロー、15 打フローともに、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) が 0.65 までは K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 量の増加に伴いフローが増加し、それ以上ではフローが減少する傾向が確認された。K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH)=0.25~0.9 で 15 打フローが 200mm 以上となっており、材料分離も確認されなかったため、良好なコンシステンシーを有していると考えられる。

### (2) 圧縮強度試験

K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) と圧縮強度の関係を図-2 に示す。K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) =1 の配合は流動性が低く型枠成形できなかったため、圧縮強度試験は実施しなかった。K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) =0.75 の配合を除き、高温封緘養生の圧縮強度が気中封緘養生と比較して高く、加温による初期強度の増加が確認された。高温封緘養生では K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) =0.5 で、気中封緘養生では K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) =0.75 で圧縮強度が最大となった。高温封緘養生では K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) =0.25~0.75、気中

封緘養生では  $K_2CO_3 / (K_2CO_3 + KOH) = 0.75$  で圧縮強度が  $30N/mm^2$  以上を確保できることを確認した。

### (3) XRD 分析

XRD 分析の結果を図-3 に示す。原材料においては、内部標準物質として添加したコランダム他、フライアッシュから石英、ムライト、ヘマタイトが、高炉スラグ微粉末からバテライト、酸化カルシウムが検出された。ジオポリマーペーストからは、原材料で確認された鉱物に加えて、C-S-H と炭酸化合物と思われるピークが確認された。この炭酸化合物はカリウムまたはカルシウム由来と考えられるが、具体的な化合物の特定には至っておらず、今後の課題としたい。ジオポリマーペーストにおいて、石英のピーク強度がフライアッシュと比較して小さくなっており、フライアッシュ中の Si が、K-S-H や C-S-H 等の非晶質の形成に消費されたと推察される。

### (4) CO<sub>2</sub> 固定量分析

CO<sub>2</sub> 固定量分析の結果を表-3 に示す。いずれの分析方法においても、原材料として投入した  $K_2CO_3$  に固定されている量以上の CO<sub>2</sub> 固定が確認された。熱分析による TG-DTG 曲線を図-4 に示す。400、600、680、780、900℃ 付近でピークが確認されており、炭酸カルシウムの脱炭酸反応の温度域 (550~850℃) よりも広い 400~900℃ の範囲で複数のピークが確認された。この温度域における質量減少率から算出した CO<sub>2</sub> 固定量が無機炭素分析で得られた CO<sub>2</sub> 固定量と概ね一致することからも、この温度帯の質量減少は脱炭酸反応によるものと推察される。以上の結果から、本研究で作製したジオポリマーペーストには、投入した  $K_2CO_3$  による CO<sub>2</sub> 固定以外に、複数の要因で CO<sub>2</sub> が固定されていると推察される。要因としては高炉スラグ微粉末に含まれる炭酸カルシウムや、練混ぜ時における大気中からの CO<sub>2</sub> 吸収が考えられるが、詳細なメカニズムの解明は今後の課題としたい。

## 3. モルタル試験

### 3.1 実験概要

ジオポリマーモルタルは、表-1 に示す材料に加えて、細骨材として川砂 (略号 S, 表乾密度  $2.60g/cm^3$ ) を使用し作製した。まずフロー試験を行い、フレッシュ性状の観点から水粉体比、S/P、BFS 置換率および  $K_2CO_3 / (K_2CO_3 + KOH)$  の適正範囲を検討した。フロー試験の結果を踏まえて選定した配合について圧縮、曲げ強度試験を実施し、設定する強度を満足する配合を検討した。また、CO<sub>2</sub> 固定量分析を実施し、原材料由来の CO<sub>2</sub> 排出量と CO<sub>2</sub> 固定量の差引きにより CO<sub>2</sub> の総収支を算出した。

### 3.2 実験方法

#### (1) 練混ぜ方法および養生

練混ぜ方法はペースト試験と同様であるが、フライア

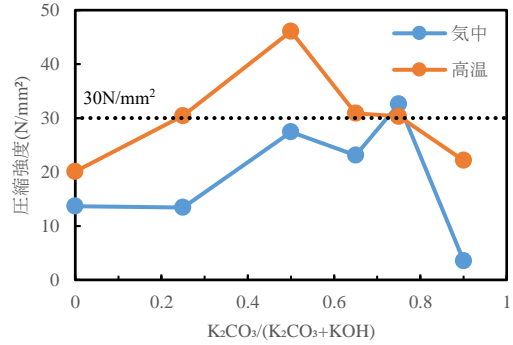


図-2  $K_2CO_3 / (K_2CO_3 + KOH)$  と圧縮強度の関係

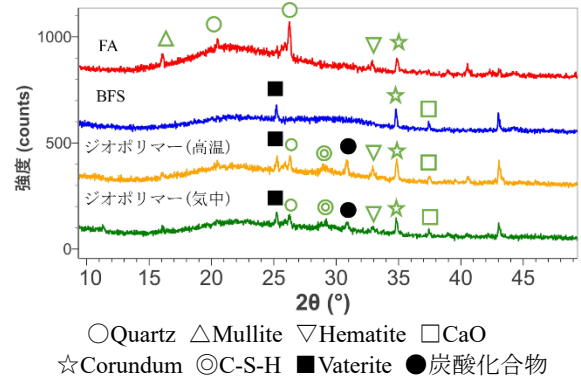


図-3 XRD チャート

表-3 CO<sub>2</sub> 固定量分析の結果 (kg/m<sup>3</sup>)

	熱重量分析	無機炭素分析	投入した $K_2CO_3$ による固定 <sup>※3</sup>
CO <sub>2</sub> 固定量	124	122	98

※3:  $K_2CO_3$  と CO<sub>2</sub> のモル質量から算出

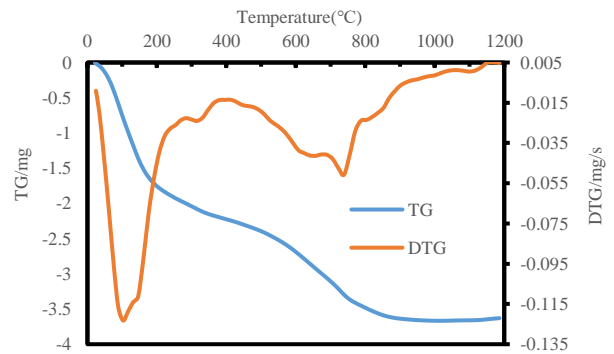


図-4 TG-DTG 曲線

ッシュ、高炉スラグ微粉末投入時に、同時に細骨材を投入した。養生方法は高温封緘養生と気中封緘養生の2種類とし、養生条件はペースト試験と同様とした。供試体寸法は  $40 \times 40 \times 160mm$  であり、脱型はいずれの養生方法も材齢3日で行った。

#### (2) フロー試験

フロー試験の配合を表-4 に示す。ペースト試験と同様 JIS R 5201 に準拠し、練混ぜ直後のフローを測定した。スランプ 5~15cm 程度のコンクリートの配合を指向し、経験的に 15 打フローの目標範囲を  $180 \pm 20mm$  とした。

表-4 フロー試験におけるジオポリマーモルタルの配合

配合	水粉体比 (%)	S/P <sup>※4</sup>	BFS 置換率 (%)	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +KOH)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					W	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	KOH	FA	BFS	S	
No.8	30	1.5	40	0.75	205	174	24	410	273	1025	
No.9					178	152	21	475	119	1187	
No.10		2.0	40		0.5	182	103	42	364	243	1213
No.11					0.65	181	133	29	362	241	1207
No.12					0.75	180	153	21	360	240	1200
No.13					0.8	180	163	17	360	240	1200
No.14					0.95	178	192	4	356	237	1187
No.15					183	155	21	244	366	1220	
No.16		2.5	40		0.75	161	161	18	322	215	1342
No.17		40				220	187	25	330	220	1100
No.18	50	255		217		29	306	204	1020		

※4 S : 細骨材の質量, P : 総粉体 (FA+BFS) の質量

表-5 強さ試験におけるジオポリマーモルタルの配合

配合	水粉体比 (%)	S/P	BFS 置換率 (%)	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> / (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> +KOH)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
					W	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	KOH	FA	BFS	S	
No.19	30	2.0	40	0.5	182	103	42	364	243	1213	
No.20				0.65	181	133	29	362	241	1207	
No.21				0.75	180	153	21	360	240	1200	
No.22				50	0.5	184	104	42	307	307	1227
No.23					0.65	182	134	29	303	303	1213
No.24					0.75	180	154	21	302	302	1207
No.25			60	0.5	185	105	42	247	370	1233	
No.26				0.65	184	135	30	245	368	1227	
No.27				0.75	183	155	21	244	366	1220	

(3) 圧縮強さ試験および曲げ強さ試験

圧縮強さ試験および曲げ強さ試験の配合を表-5 に示す。JIS R 5201 に準拠し、圧縮強さ試験および曲げ強さ試験を実施した。供試体数は各配合、養生方法につき、圧縮強さ試験用 6 体、曲げ強さ試験用 3 体ずつとした。試験材齢は 3, 7, 14, 28 日である。材齢 28 日での圧縮強さの目標値は、プレキャストコンクリート製品の一般的な圧縮強度 (30~40N/mm<sup>2</sup>) を考慮し、設計基準強度を 40N/mm<sup>2</sup> とした場合の配合強度 48N/mm<sup>2</sup> とした。

(4) CO<sub>2</sub> 固定量分析

CO<sub>2</sub> 固定量分析は無機炭素分析により行った。分析試料作製および分析の方法はペースト試験と同様である。

3.3 実験結果

(1) フロー試験

水粉体比とフローの関係を図-5 に示す。水粉体比 50%では 15 打フローがフローテーブルの直径以上となり計測できなかった。水粉体比 40, 50%のフローは目標値を大きく上回り、過剰な流動性による材料分離が懸念される。水粉体比 30%の 15 打フローは目標範囲内 (180 ±20mm) であり、適度な流動性を有することから、水粉体比の最適値は 30%といえる。

S/P とフローの関係を図-6 に示す。S/P の増加に伴い、フローが低下する傾向が確認された。S/P=1.5~2.0 の範囲では 15 打フローが目標範囲内 (180 ±20mm) となっており、S/P の最適値は 1.5~2.0 と考えられる。

BFS 置換率とフローの関係を図-7 に示す。BFS 置換率の増加に伴い、わずかにフローが低下する傾向が確認された。いずれの BFS 置換率においても 15 打フローが

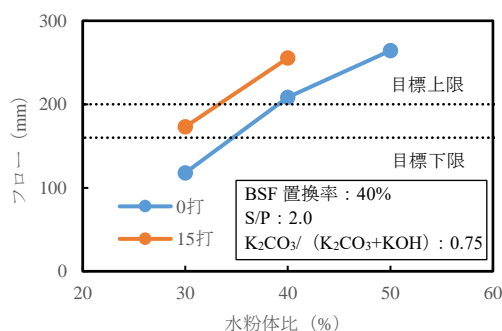


図-5 水粉体比とフローの関係

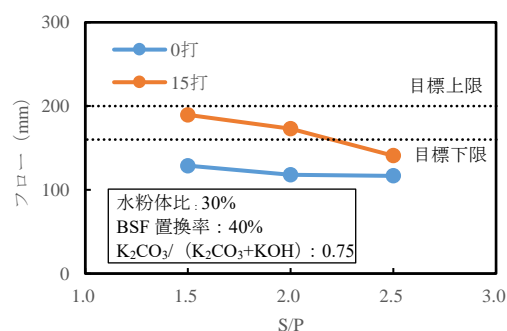


図-6 S/P とフローの関係

目標範囲内 (180 ±20mm) となっており、BFS 置換率 20 ~60%の範囲であれば良好なフレッシュ性状を確保できる。K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) とフローの関係を図-8 に示す。モルタル試験の配合では、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) によらず、フローは概ね一定の値を示した。いずれの K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) においても、15 打フローが目標範囲内 (180 ±20mm) であり、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> / (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+KOH) は 0.5~0.95 の範囲であれば流動性を確保できる。

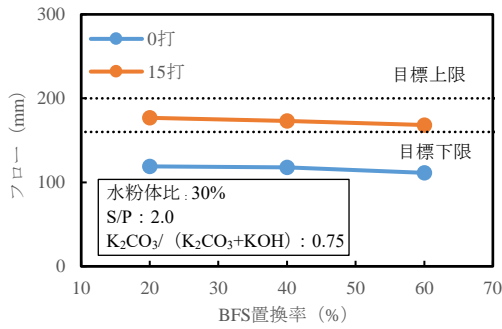


図-7 BFS 置換率とフローの関係

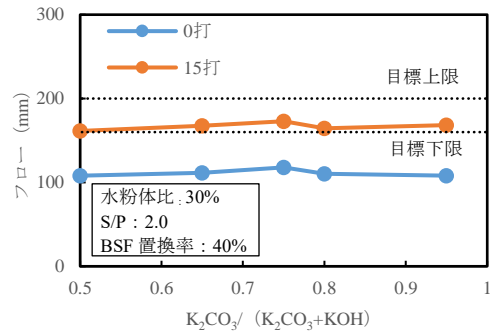


図-8  $K_2CO_3 / (K_2CO_3+KOH)$  とフローの関係

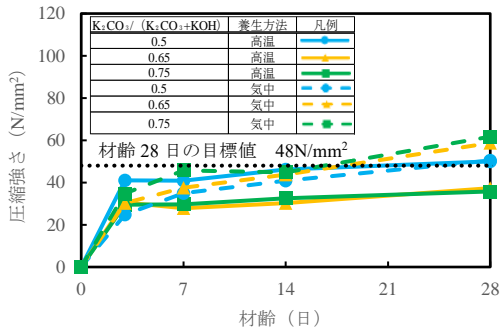


図-9 材齢と圧縮強さの関係 (BFS 置換率 50%)

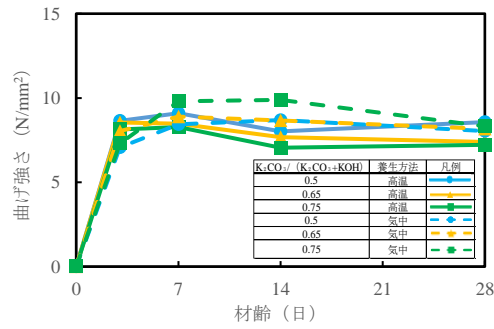


図-10 材齢と曲げ強さの関係 (BFS 置換率 50%)

## (2) 圧縮強さ試験および曲げ強さ試験

BFS 置換率 50%での材齢と圧縮強さの関係を図-9 に、曲げ強さの関係を図-10 に示す。材齢 28 日において、 $K_2CO_3 / (K_2CO_3+KOH) = 0.5$  の曲げ強さを除き、圧縮強さ、曲げ強さともに、気中封緘養生が高温封緘養生と比較して高くなった。気中封緘養生の圧縮強さは、材齢 28 日で 48N/mm<sup>2</sup> 以上、材齢 3 日で 28 日強度の 50%程度の強度発現が確認された。以上の結果から、本研究の配合においては、気中封緘養生により十分な強度が確保可能といえる。材齢 28 日の曲げ強さは圧縮強さの 1/8~1/3 であることを確認したが、材齢 7 日をピークに、以降はやや低下する傾向が確認された。原因として硬化時の収縮に伴う微細ひび割れ等が考えられ、今後検討が必要である。なお、材齢経過に伴う強度発現の傾向は BFS 置換率 40%、60%でも同様であった。

表-5 に示す全配合 (No.19~27) の材齢 28 日時点の圧縮強さ試験結果を図-11 に、曲げ強さ試験の結果を図-12 に示す。BFS 置換率が大きくなるほど圧縮強さが高くなる傾向が確認された。また、 $K_2CO_3 / (K_2CO_3+KOH)$  が大きくなるほど高温封緘養生では圧縮強さが低く、気中封緘養生では圧縮強さが高くなる傾向が確認された。これはペースト試験の結果からも分かるとおり、養生条件によって圧縮強さが最大となる  $K_2CO_3 / (K_2CO_3+KOH)$  の値が異なるためと考えられる。気中封緘養生の圧縮強さは、 $K_2CO_3 / (K_2CO_3+KOH)$  が 0.65~0.75 の場合 BFS 置換率の大小によらず目標値 (48N/mm<sup>2</sup>) 以上となった。

BFS 置換率および  $K_2CO_3 / (K_2CO_3+KOH)$  と曲げ強さの関係に一定の傾向は確認されなかった。既往の研究で

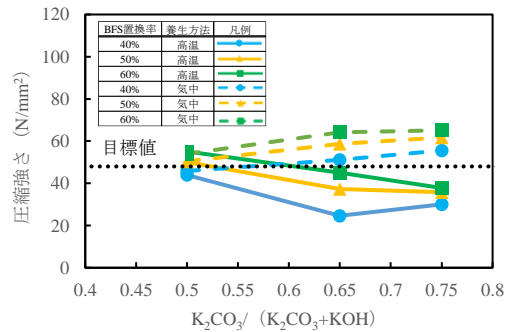


図-11 材齢 28 日における圧縮強さ試験の結果

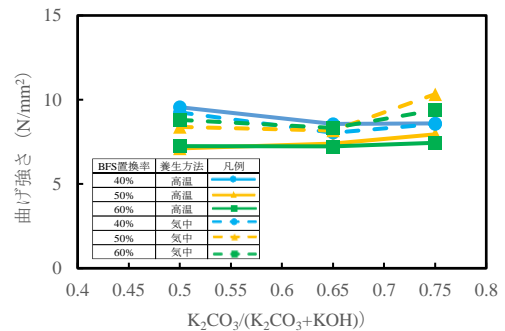


図-12 材齢 28 日における曲げ強さ試験の結果

は、ジオポリマーモルタルの曲げ強さがセメントモルタルと比較して低水準という報告<sup>7)</sup>もあるが、本研究では圧縮強さの 1/8~1/3 程度の高い曲げ強さが確認された。

## (3) CO<sub>2</sub> 固定量分析

BFS 置換率 40% (No.19~21), 気中封緘養生の供試体 (材齢 28 日) から分析用試料を採取した無機炭素分析による CO<sub>2</sub> 固定量を表-6 に示す。なお、原材料として使用した  $K_2CO_3$  に固定されている CO<sub>2</sub> 量の計算値を併記している。 $K_2CO_3$  の使用量が多いほど、多くの CO<sub>2</sub> が

固定されていることが確認された。また、ペースト試験と同様、無機炭素分析の結果が計算値を上回っており、 $K_2CO_3$  以外による  $CO_2$  固定も行われたと推察される。原材料由来の  $CO_2$  排出量と、無機炭素分析で求めた表-6の  $CO_2$  固定量の差し引きにより、 $CO_2$  の総収支を計算した。 $CO_2$  排出量の算出には、表-7 に示す排出原単位を使用した。なお、 $K_2CO_3$  の排出原単位は産業副産物の流用を想定し、0 とした。養生方法は気中封緘養生を想定し、養生時の加温に伴う  $CO_2$  排出は考慮しない。 $CO_2$  の総収支の算出結果を表-8 に示す。本研究のジオポリマーモルタルの  $CO_2$  総収支は一般的なセメントコンクリートの  $CO_2$  排出量<sup>10)</sup> ( $300kg/m^3$  程度) を大幅に下回り、 $K_2CO_3/(K_2CO_3+KOH)$  が 0.65~0.75 の配合では、カーボンネガティブとなった。

### 3.4 最適配合

本実験結果から得られた最適配合を表-9 に示す。水粉体比と S/P は、フロー試験の結果が目標範囲 ( $180 \pm 20mm$ ) を満足する配合から決定した。BFS 置換率は大きいほど高強度となるが、40~60%のいずれの配合も気中封緘養生(材齢 28 日)で  $48N/mm^2$  以上を確保可能なため、材料由来の  $CO_2$  排出量の少ない 40%とした。 $K_2CO_3/(K_2CO_3+KOH)$  は、0.65~0.75 で目標強度を達成したが、 $K_2CO_3$  の使用量が多いほど  $CO_2$  固定量が大きくなるため、0.75 とした。

### 4. まとめ

$CO_2$  排出量の少ないジオポリマー開発を目的として、水ガラスを使用せず、炭酸カリウムと水酸化カリウムの混合溶液を使用したジオポリマーを作製した。全アルカリ中の炭酸カリウムの配合量の調整等を行うことで、施工性の確保と十分な強度を有するジオポリマーを製造できることを明らかにした。また、加温を実施しない養生条件においても、高い強度発現を有することを確認した。本研究で作製したジオポリマーモルタルの  $CO_2$  総収支は、一般的なセメントコンクリートの  $CO_2$  排出量を下回り、気中封緘養生ではカーボンネガティブを達成した。

### 謝辞

本論文の執筆にあたり、分析にご協力いただいた東洋大学大学院理工学研究科 建築・都市デザイン専攻横川勇輝氏に深く感謝申し上げます。

### 参考文献：

- 1) Duxson P., Provis J. L., Lukey G.C., and Deventer J.S.J., : The role of inorganic polymer technology in the

表-6  $CO_2$  固定量分析の結果

$K_2CO_3/(K_2CO_3+KOH)$	無機炭素分析			$K_2CO_3$ による固定		
	0.5	0.65	0.75	0.5	0.65	0.75
$CO_2$ 固定量 ( $kg/m^3$ )	35	52	64	33	43	49

表-7 使用材料の排出原単位

$CO_2$ 排出原単位 ( $kg-CO_2/t$ )					
W	$K_2CO_3$	KOH <sup>8)</sup>	FA <sup>9)</sup>	BF <sup>9)</sup>	S <sup>9)</sup>
0	0	1101	19.6	26.5	3.7

表-8 気中封緘養生の  $CO_2$  総収支 ( $kg/m^3$ )

$K_2CO_3/(K_2CO_3+KOH)$	0.5	0.65	0.75
① 材料の $CO_2$ 排出量	64	50	41
② $CO_2$ 固定量	35	52	64
①-② $CO_2$ 総収支	29	-2	-23

表-9 最適配合

水粉体比 (%)	S/P	BFS 置換率 (%)	$K_2CO_3/(K_2CO_3+KOH)$
30	2.0	40	0.75

development of 'green concrete', Cement and Concrete Research, Vol.37, pp.1590-1597, 2007

- 2) 佐藤隆恒, 上原元樹, 南浩輔, 山崎淳司: ジオポリマー硬化体の種々の配合, 作製法における生成物と pH 等諸性質との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2325-2330, 2016
- 3) 松元淳一, 橋本理, 坂本淳, 丸屋剛: コンクリート製造時に二酸化炭素を固定させる技術, コンクリート工学, Vol.61, No.2, pp.138-144, 2012. 2
- 4) 久保雄暉, 石田剛郎, 高原幸之助: ジオポリマーへの炭酸塩の適用, セメント・コンクリート, No.925, pp.10-16, 2024. 4
- 5) Mahya Askarian, Zhong Tao, Bijan Samali, Georgius Adam, Richard Shuaib: Mix composition and characterization of one-part geopolymers with different activators, Construction and Building Materials, Vol.225, pp.526-537, November 2019
- 6) 梅津真見子, 黒川大亮, 森泰一郎, 坂井悦郎: セメント硬化体の  $CO_2$  吸収と生成物の変化, セメント・コンクリート論文集, Vol.75, pp.34-41, 2022
- 7) 一宮一夫: ジオポリマーの研究開発の現状, コンクリート工学, Vol.55, No.2, pp.131-137, 2017. 2
- 8) 味の素株式会社, 味の素グループ版「食品関連材料  $CO_2$  排出係数データベース」, 2010.10
- 9) 土木学会, コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), 2005.11
- 10) 原田耕司, 一宮一夫, 津郷俊二, 池田政: ジオポリマーの諸特性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.1894-1899, 2012