

# 論文 生コンクリートのスラッジ微粉末の活用によるスラグ固化体の初期強度発現の改善

Jacxl K. CHAN\*1・細田 暁\*2・佐々木 庸志\*3

**要旨：**スラッジ微粉末を高炉スラグ微粉末の内割もしくは外割混合で使用したモルタルについて初期強度発現を調べ、練混ぜ温度と養生温度が初期強度に与える影響を検討した。スラッジ微粉末を内割混合で用いるより、10%もしくは20%の外割混合で用いた方が初期強度の発現に優れた。普通ポルトランドセメントを用いた配合に比べると、強度発現で劣るものの、スラッジ微粉末を外割置換することで、温度に対する過度な敏感感が改善されることが明らかになった。

**キーワード：**スラグ固化体, スラッジ微粉末, 練混ぜ温度, 養生温度, 内割混合, 外割混合

## 1. はじめに

鉄鋼スラグ水和固化体（以下、スラグ固化体）は、鉄鋼生産の製鋼工程で副産物として生成する製鋼スラグ、高炉スラグ微粉末および水を必須材料とし、これらを練混ぜ、水和反応により固化（硬化）させたものである<sup>1)</sup>。

近年、環境負荷低減や廃棄物の有効利用が世界的な課題となっている。コンクリートの分野では、産業副産物の再利用やセメントの使用量を減らすなどの様々な取り組みが行われている。産業副産物の再利用の一例として、コンクリートの一部を高炉スラグ微粉末と置換する利用法は大いに普及しており、高炉セメントの水和反応や特性などについては過去に多くの研究が報告されている。一方で、セメントを一切用いずにスラグ系結合材、骨材、粉体の刺激材のみで製造されるスラグ固化体（もしくはゼロセメントコンクリート）については研究事例<sup>2)3)</sup>が少ない。

また、全国の生コンクリート工場で年間数百万 m<sup>3</sup> も発生<sup>4)</sup>しているとされる戻りコンクリートや残コンクリートから発生するスラッジケーキの再利用方法や処分方法が困難で大きな課題となっている。本研究では、スラッジケーキを粉砕したスラッジ微粉末を、高炉スラグ微粉末の刺激材として活用することを考えた。

筆者らは、海水を用いたスラグ固化体による駐車場等の舗装の施工を試験的に実施してきた<sup>5)6)</sup>。現時点では、スラグ固化体の初期強度発現が施工現場により安定せず、極めて強度発現が遅い場合がある状況にある。同じ配合を用いた場合でも、練混ぜ時の材料の温度や、外気温が強度発現に大きな影響を及ぼしている状況にある。

そこで本研究では、スラグ固化体の初期強度発現を改善するため、スラッジ微粉末を結合材に対して内割もしくは外割で混合して製造したスラグ固化体の圧縮強度試

験を実施する。なお、本研究ではモルタルで実験を行うため、製鋼スラグは用いない。また、資源の有効利用の観点から、練混ぜ水に海水を用いるスラグ固化体を研究の対象とする。さらに、練混ぜ温度と養生温度がスラグ固化体の初期強度発現に与える影響を調べるために、練混ぜ温度と養生温度を 5℃、20℃、40℃、の 3 水準に設定して、スラッジ微粉末の置換率を変化させた条件で、圧縮強度試験を実施する。

## 2. スラッジ微粉末の置換方法および置換率が初期強度発現に与える影響

### 2.1 実験の概要

#### (1) 使用材料

本研究においては、スラッジ微粉末を高炉スラグ微粉末に対して内割もしくは外割で混合したモルタルを作製した。スラグ固化体の結合材として高炉スラグ微粉末とスラッジ微粉末、細骨材として高炉水砕スラグを用いた。また、流動性を確保するために AE 減水剤を用い、練混ぜ水として瀬戸内海で採取した海水を用いた。海水をコンクリートの練混ぜ水として使用すると、コンクリートの強度が増進されることが報告されている<sup>7)</sup>ので、スラグ固化体の初期強度発現を向上するために海水を用いた。また、3 章において比較用に普通ポルトランドセメントを用いたモルタルも作成し、その際の練混ぜには水道水を使用した。モルタルの製造に用いた材料を表-1 に示す。

本研究で使用したスラッジ微粉末は、岡山県の生コン工場で製造したものをを用いた。スラッジ微粉末の製造方法は、工場で発生するスラッジを沈殿物と水に分離し、沈殿物を脱水したスラッジケーキを乾燥させたものをインパクトクラッシャーで 3mm 以下の粉体に破砕した。さ

\*1 横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 都市地域社会専攻 都市地域社会コース (学生会員)

\*2 横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院 教授 博(工) (正会員)

\*3 奥村組土木興業(株) 環境開発本部 (正会員)

表-2 スラッジ微粉末を内割もしくは外割で用いたモルタルの配合表

配合	(SS+Z <sub>e</sub> )/B	W/B	W/P	Z/B	Z <sub>i</sub> /B	Z <sub>e</sub> /B	単位量 kg/m <sup>3</sup>					
	(% )						W	BFS	SS	Z <sub>i</sub>	Z <sub>e</sub>	AE
Z-00	200	50	50	0	0	0	319	638	1277	0	0	(6.38)
Z <sub>i</sub> -05				5	5		319	606	1276	32	0	(6.38)
Z <sub>i</sub> -10				10	10		318	573	1274	64	0	(6.37)
Z <sub>i</sub> -20				20	20		318	509	1272	127	0	(6.36)
Z <sub>i</sub> -40				40	40		317	380	1268	254	0	(6.34)
Z <sub>i</sub> -50				50	50		316	316	1266	316	0	(6.33)
Z <sub>i</sub> -60				60	60		316	253	1263	379	0	(6.32)
Z <sub>e</sub> -05			48	5	5	319	638	1243	0	32	(6.34)	
Z <sub>e</sub> -10			45	10	0	10	319	638	1210	0	64	(6.34)
Z <sub>e</sub> -20			42	20	20	319	638	1144	0	128	(6.34)	

粉体 P = BFS + Z<sub>i</sub> + Z<sub>e</sub> 結合材 B = BFS + Z<sub>i</sub> 細骨材 = SS + Z<sub>e</sub>

表-3 スラッジ微粉末の化学成分

化学成分 (%)	ig.loss	insol.	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 <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O
スラッジ微粉末	20.99	16.27	10.54	4.31	2.45	42.06	1.06	1.24	0.14	0.14

表-1 使用材料

使用材料	性質等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度：3.16 g/cm <sup>3</sup>
大井川水系陸砂 細骨材 (S)	表乾密度：2.59 g/cm <sup>3</sup> 吸水率：2.06% F.M：2.70
高炉水砕スラグ 細骨材 (SS)	表乾密度：2.78 g/cm <sup>3</sup> 吸水率：0.55% F.M：2.55
高炉スラグ微粉末 (BFS)	比表面積：4290 cm <sup>2</sup> /g 石こう添加：有 密度：2.88 g/cm <sup>3</sup>
スラッジ微粉末 (Z)	密度：2.67 g/cm <sup>3</sup> 含水率：40%
混和剤 (AE)	AE 減水剤 標準形 I 種 密度：1.04~1.12g/cm <sup>3</sup>
海水 (W)	瀬戸内海で採取した海水

らに、集塵機で破碎中のスラッジ微粉末を吸い込んで集めたものを加えた。この工場では、出荷したコンクリート(2023年4~9月)の30%程度が24N、17%程度が21N、19%程度が27Nの普通ポルトランドセメントを用いたものであり、7%程度が高炉セメントを用いたものであった。JIS R 5202「セメントの化学成分」により同じ工場で作成

されたスラッジ微粉末の化学成分(2020年6月の分析結果)を表-3に示す。

## (2) 内割・外割混合した配合

スラッジ微粉末を内割もしくは外割で混合したモルタルの配合を表-2に示す。スラッジ微粉末の単位量Zのうち内割量をZ<sub>i</sub>、外割量をZ<sub>e</sub>で示している。水結合比(W/B, B=BFS+Z<sub>i</sub>)は50%で一定としている。また、Wの中にAEを含める。Z<sub>e</sub>は結合材として考えないこととしたためW/Bの計算に含めていない。内割混合の配合ではスラッジ微粉末の置換率を0%、5%、10%、20%、40%、50%、60%に設定し、外割混合の配合では5%、10%、20%に設定し、合計10ケースの配合とした。なお、水粉体比(W/P, P=BFS+Z<sub>i</sub>+Z<sub>e</sub>)は表のようになっている。また、全ケースにおいてAE減水剤の添加量は結合材の単位量の1%と設定し、細骨材と結合材の比(SS+Z<sub>e</sub>/B)は表-2に示した通りである。

## 2.2 供試体の作製と試験方法

モルタルの供試体は、JSCE-F 506「モルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験用円柱供試体の作り方」に準拠して一つの配合につきφ50×100mmの円柱供試体を4本作製した。配合の数が多く、初期強度発現を複数の材齢で把握するため、1水準につき1つの供試体で圧縮強度試験を行うこととした。初期強度発現性に優れた配合を見出した後、3章においては1水準で3つの供試体で圧縮強度試験を実施する。モルタルミキサー(容量10L)で1水準につき1Lを練り混ぜた。材料は細骨材、高炉スラグ微粉末、スラッジ微粉末の順番で投入し、

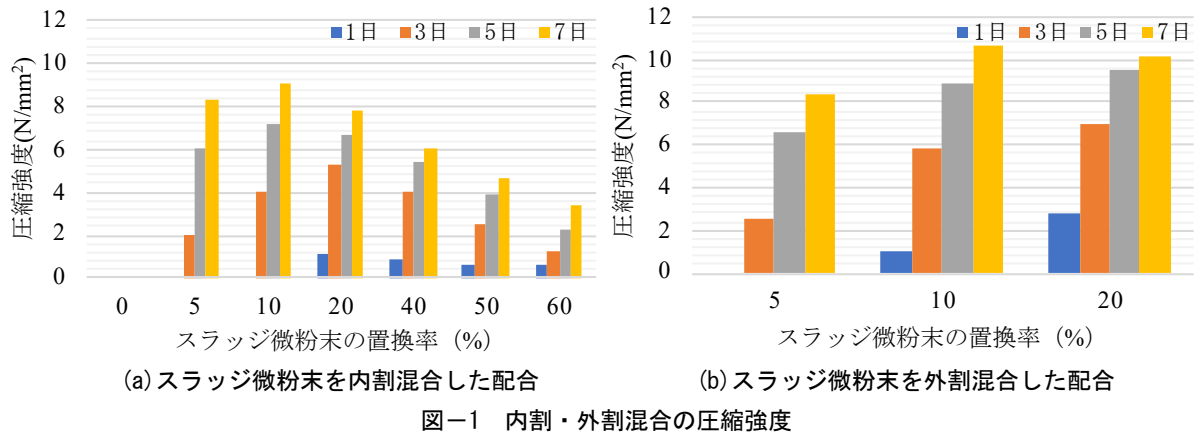


図-1 内割・外割混合の圧縮強度

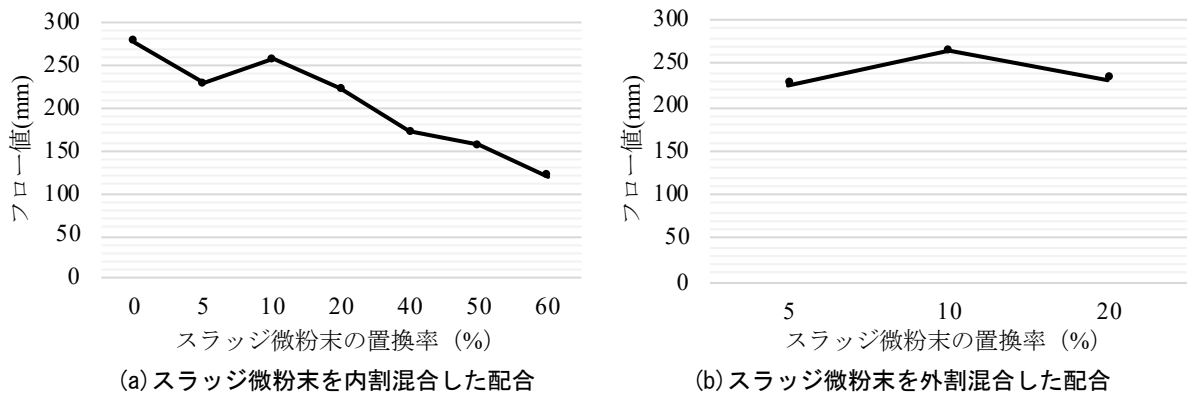


図-2 内割・外割混合のフロー値

60 秒空練りした。次に、水と AE を混ぜてから投入し、60 秒練り混ぜた。その後、固形分を掻き落とし、さらに 30 秒練り混ぜた。

モルタルの打設直後、温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 60%程度の恒温室内で材齢 7 日間の養生を行った。供試体はモールドに入れたままの封かん養生とした。圧縮強度試験は、JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し、材齢 1 日、3 日、5 日、7 日で強度を測定した。また、圧縮強度試験の直前に供試体を脱型し、供試体の端面を研磨機により研磨仕上げを行った。

モルタルフロー試験には、JIS R 5201「セメントの物理試験方法」を用いた。モルタルをフローコーンに 2 層に詰め、各層の全面にわたって各々 15 回突き、表面をなららした。直ちにフローコーンを垂直方向に取り去り、15 秒間に 15 回落下運動を与え、モルタルの最大直径と、これに直角な方向の直径を測定し、平均値をとった。

### 2.3 実験結果と考察

#### (1) 圧縮強度試験

図-1 に圧縮強度試験を示す。図-1 (a) にはスラッジ微粉末を内割混合した各種配合の圧縮強度、図-1 (b) にはスラッジ微粉末を外割混合した各種配合の圧縮強度の関係を示す。本研究で作製したモルタルでは、スラッジ微粉末を無混合の配合は 7 日後でもモルタルが固まら

ず強度が発現しなかった。

W/B と S/B を一定でスラッジ微粉末を内割混合した場合は、置換率が 5%および 10%の場合、1 日強度が測定できなかった。置換率が 20%以上になると材齢 5 日と 7 日での強度が低下することがわかる。ただし、置換率が 20%以上の場合には材齢 1 日でも強度が発現した。スラッジ微粉末を結合材の一部として使用する場合には、40%以上の置換率では材齢 3 日以降の圧縮強度の発現に悪影響を及ぼす結果となった。スラッジ微粉末は、高炉スラグ微粉末のアルカリ刺激剤として十分に活用できることが分かった。

W/B と S/B を一定にしてスラッジ微粉末を外割混合した場合は、20%までの範囲では、置換率が大きくなるほど初期強度の発現に優れていることが分かる。置換率が 5%の場合には、1 日では強度が発現しなかった。Z<sub>c</sub>-20 の 1 日強度が全ケースにおいて一番高く、7 日強度まで安定した強度発現が見られ、スラグ固化体の初期強度発現が改善されていることが分かる。

内割と外割を比較すると、外割配合の方が圧縮強度の発現で優れていることが分かった。

以上より、本研究の実験条件では、スラッジ微粉末を内割混合した場合、置換率 20%までが初期強度発現の改善には適した範囲となり、置換率 20%を超えると強度低

表-4 3章で用いるモルタルの配合表

配合	W/B (%)	Z <sub>e</sub> /B (%)	W/P (%)	練り上がり時の目標温度 (°C)	練り上がり時の実際温度 (°C)	練混ぜ水	単位量 kg/m <sup>3</sup>						
							W	BFS	C	S	SS	Z <sub>e</sub>	AE
Opc-05	50	0	50	5	8.5	水道水	315	0	629	1259	0	0	(6.29)
Z-00-05		0	50		5.3	海水	319	638	0	0	1277	0	(6.38)
Z <sub>e</sub> -10-05		10	45		5.9						1210	64	
Z <sub>e</sub> -20-05		20	42		6.5						1144	128	
Opc-20		0	50	20	17.9	水道水	315	0	629	1259	0	0	(6.29)
Z-00-20		0	50		17.5	海水	319	638	0	0	1277	0	(6.38)
Z <sub>e</sub> -10-20		10	45		15.3						1210	64	
Z <sub>e</sub> -20-20		20	42		19.8						1144	128	
Opc-40		0	50	40	43.8	水道水	315	0	629	1259	0	0	(6.29)
Z-00-40		0	50		36.0	海水	319	638	0	0	1277	0	(6.38)
Z <sub>e</sub> -10-40		10	45		38.5						1210	64	
Z <sub>e</sub> -20-40		20	42		38.0						1144	128	

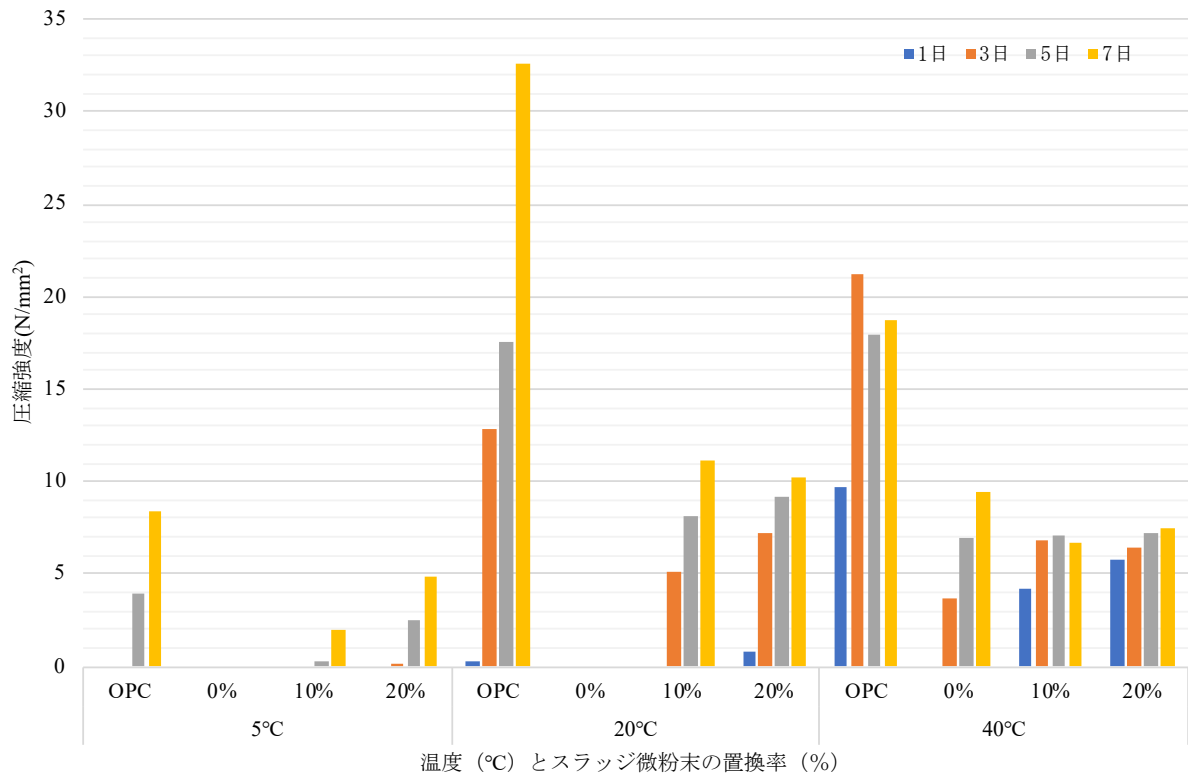


図-3 練混ぜ温度と養生温度による強度発現

下が見られた。外割混合した場合は、置換率が10%および20%の場合に、材齢7日までの強度発現が良好であることが分かった。

(2) モルタルフロー試験

図-2 にモルタルフロー試験の結果を示す。図-2 (a)

にはスラッジ微粉末を内割混合した配合、図-1 (b) にはスラッジ微粉末を外割混合した配合の結果を示した。W/B, W/P, S/B を一定でスラッジ微粉末を内割混合した場合はスラッジ微粉末置換率が大きくなるほど、流動性が悪くなり、フロー値が低下していることが分かる。こ

れは、主としてスラッジ微粉末が水を吸水することによって考えられる。スラッジ微粉末を外割混合した場合は、スラッジ微粉末の置換率が20%までの範囲では、流動性に著しい違いは見られなかった。

### 3. 練混ぜ温度と養生温度が初期強度発現に与える影響

#### 3.1 実験の概要

##### (1) 外割混合した配合

この章での検討に用いたスラッジ微粉末を外割混合したモルタルと普通モルタルの配合を表-4に示す。製造に用いた材料は表-1に示したものである。2章の検討結果により、スラッジ微粉末を外割混合で用いた方が圧縮強度発現が優れていることが分かったので、3章での置換方法は外割混合にした。全配合の水結合材率(W/B,  $B=BFS+C$ )は50%で一定としている。外割混合の場合は練混ぜ水として海水を用い、スラッジ微粉末を0%, 10%, 20%に設定した。比較対象の普通モルタルは普通ポルトランドセメントと水道水を用いた。なお、水粉体率(W/P,  $P=BFS+Z_1+Z_2$ )は表-4に示した通りである。また、全ケースにおいてAE減水剤率は結合材の単位量の1%と設定した。全ケースの細骨材( $S+SS+Z_2$ )と結合材( $BFS+C$ )の比を200%と設定した。

##### (2) 練混ぜ温度と養生温度の条件

日本における各季節での屋外での施工において安定的に強度発現が求められるため、温度がスラグ固化体の初期強度発現に与える影響を調べることとした。モルタルの練混ぜ温度の目標値と養生温度を5°C, 20°C, 40°Cに設定した。冬季を模擬するために温度を5°C, 夏季を模擬するために40°Cに設定し、標準の20°Cと比較する。各配合の練り上がり後のモルタルの温度が目標温度(5°C, 20°C, 40°C)になるようにし、その後、練混ぜと同じ温度で養生し、合計12ケースの配合とした。

##### (3) 使用材料の温度調整

使用材料と水を事前に計量し、練混ぜの目標温度が5°Cの場合、温度を2~4°Cに設定した冷蔵庫の中で、目標温度が20°Cの場合、温度を $20\pm 2$ °Cに設定した恒温室の中で保管した。目標温度が40°Cの場合は、材料と水を湯せんで温度を調整した。具体的には、60°Cのお湯を大きい容器に入れ、その中に小さい容器を入れ、小さい容器の中に材料と水を入れて間接的に温めた。

練混ぜ後の養生については、目標温度が5°Cの場合、5°Cに設定した冷蔵庫の中で、目標温度が20°Cの場合、温度を $20\pm 2$ °Cに設定した恒温室内で、目標温度が40°Cの場合、40°Cに設定した恒温層内で養生した。

#### 3.2 供試体の作製と試験方法

モルタルの作製方法と養生方法は2.2と同じであるが、一つの試験材齢につき3本を作製した。打設直後からフ

レッシュモルタルのpHを10分ごとに1時間記録した。また、試験材齢は1日, 3日, 5日, 7日強度に設定し、試験結果は測定本数3本の平均値を用いた。

#### 3.3 実験結果と考察

##### (1) 圧縮強度試験

図-3に圧縮強度試験の結果を示す。練混ぜ温度と養生温度が5°Cと20°Cの場合、スラッジ微粉末を無混合の配合は2章と同じ結果になり、7日後でもモルタルが固まらず圧縮強度が計測できない結果となった。しかし、練混ぜ温度と養生温度を40°Cに設定すると、材齢3日から圧縮強度が計測できた。高温による高炉スラグ微粉末の反応促進の影響がみられた。

練混ぜ温度と養生温度が5°Cで、スラッジ置換率の影響を見ると、外割の置換率が大きくなるほど圧縮強度が増加していることが分かる。置換率が最も大きい $Z_c-20-05$ では、材齢3日から強度が発現し、いずれの材齢においても他の置換率と比べて圧縮強度が高い結果となっている。 $Z_c-20-05$ の強度は、普通ポルトランドセメントと水道水を使用した $Opc-05$ よりは強度発現に劣るものの、材齢3日では $Opc-05$ よりも強度発現に優れており、スラッジ微粉末の外割混合により、スラグ固化体の初期強度発現が大きく改善されることが分かった。

練混ぜ温度と養生温度が20°Cの場合は、置換率が最も大きい $Z_c-20-20$ は材齢1日から強度が発現し、材齢5日まで他の配合よりも高い圧縮強度を示したが、材齢7日においては $Z_c-10-20$ よりわずかに小さい強度となった。 $Opc-20$ は材齢7日で $30N/mm^2$ を超える圧縮強度を示し、これに比べるとスラッジ微粉末を外割置換したスラグ固化体の圧縮強度は1/3程度となった。

練混ぜ温度と養生温度が40°Cの場合は、 $Z_c-20-40$ と $Z_c-10-40$ は材齢1日から強度が発現するが、材齢7日までの強度の増進が大きい結果となった。スラッジ微粉末無混合の $Z-00-40$ は材齢3日までは一番強度が低かったが、材齢5日ではスラッジ微粉末の外割混合した配合と同程度の強度が発現し、材齢7日では一番高い強度になっていることが分かった。材齢7日で $Opc-40$ に比較すると、スラッジ微粉末を外割置換したスラグ固化体の圧縮強度は1/2程度となった。

練混ぜ温度と養生温度ごとに比較すると、温度が5°Cの場合は、スラグ固化体の初期強度発現が全期間において、20°Cと40°Cよりも遅い結果になった。温度が20°Cの場合は、スラグ固化体は材齢1日から強度が発現し、材齢7日までは強度が徐々に伸びていることが分かる。温度が40°Cの場合は材齢1日の強度が他の温度よりも一番高く発現するが、材齢7日までの強度発現が停滞する結果となった。

表-5 20℃の条件でのモルタルの pH

		Opc-20	Z-00-20	Z <sub>e</sub> -10-20	Z <sub>e</sub> -20-20
pH	直後	12.47	10.14	11.42	11.86
	10分	12.22	10.21	11.86	12.02
	20分	12.30	10.05	11.78	11.95
	30分	12.24	10.09	11.74	11.86
	40分	12.09	9.95	11.74	11.80
	50分	12.04	9.85	11.63	11.75
	60分	11.98	9.80	11.56	11.64
	平均	12.19	10.01	11.68	11.84

普通ポルトランドセメントを用いた配合に比べると、強度発現で劣るものの、スラッジ微粉末を外割置換で用いることで、スラグ固化体の初期強度発現は改善され、練混ぜ温度と養生温度の影響を受けにくくなり、温度への過度な敏感さも改善されることが分かった。

20℃の条件で作製したモルタルについて、打設直後から pH を 10 分ごとに 1 時間記録した pH 値を表-5 に示す。フレッシュモルタルの pH はガラス電極法により測定した。スラッジ微粉末無混合の Z-00-20 の pH 平均値は 10.01 になり、他の配合よりも低い値になっていることが分かった。また、スラッジ微粉末を添加することにより、Z<sub>e</sub>-10-20 と Z<sub>e</sub>-20-20 の pH 平均値がそれぞれ 11.68 と 11.84 に上昇することが分かった。pH 平均値が高いほど、スラグ固化体の初期強度が高くなる傾向が見られる。セメントを使用した比較対象の Opc-20 の配合では、pH 平均値が 12.19 になり、一番高い値を示した。

#### 4. まとめ

本研究では、スラッジ微粉末を高炉スラグ微粉末の内割もしくは外割混合で用いたモルタルについて、初期強度発現を調べた。さらに、外割混合で用いたモルタルについて、練混ぜ温度と養生温度が初期強度発現に与える影響を検討し、以下の知見を得た。

- (1) 本研究の実験条件では、スラッジ微粉末を内割混合で用いるより、外割混合で用いた方が初期強度の発現に優れた。外割混合した場合は、置換率が 10% および 20% の場合に、材齢 7 日までの強度発現が良好であることが分かった。
- (2) 普通ポルトランドセメントを用いた配合に比べると、

強度発現で劣るものの、スラッジ微粉末を外割置換で用いることで、スラグ固化体の初期強度発現は改善され、練混ぜ温度と養生温度の影響を受けにくくなり、温度への過度な敏感さも改善されることが分かった。

- (3) スラッジ微粉末を外割置換で用いることで、モルタルの pH が増加することが分かった。普通ポルトランドセメントを用いたモルタルの pH が 12.2 程度であったのに対して、スラッジ微粉末を 20% 混合したものでは pH が 11.8 程度となった。

#### 謝辞

本研究で使用したスラッジ微粉末は、岡山県の白石建設から提供していただきました。謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 沿岸技術ライブラリー No.28 : 鉄鋼スラグ水和固化体技術マニュアル —製鋼スラグの有効利用技術— (改訂版), 財団法人沿岸技術研究センター, pp.1-4, 2008.2
- 2) 遠藤裕悦, 児玉和巳, 中川脩, 高田誠 : 高炉スラグ微粉末がコンクリートとの配合と強度に及ぼす影響について, 高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適応に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.73-80, 1987.3
- 3) スラグの有効利用に関する基礎研究部会 : 鉄鋼スラグの性質と再利用, 鉄と鋼, Vol.65, No.12, pp.1787-1811, 1979
- 4) 十河茂幸, 田中善久, 小山明男, 宮里心一 : 残コンクリートの削減と有効利用に向けて, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.83-86, 2010.9
- 5) 都市イノベーション学府 学生プロジェクト “granZ concrete” が完成 : <https://www.ynu.ac.jp/hus/urban/27756/detail.html> (閲覧日 : 2023 年 12 月 27 日)
- 6) 道の駅で「ゼロセメント・コンクリート技術 (CO2 ゼロコンクリート)」を使用した舗装の実証試験を開始～令和 5 年度から 5 年間で全国 5 か所の道の駅の駐車場で実施～ : <https://www.michi-no-eki.jp/pdf/20230329.pdf> (閲覧日 : 2023 年 12 月 27 日)
- 7) 竹田宣典, 大即信明 : 海水練りコンクリート, コンクリート工学, Vol.54, No.5, pp.525-530, 2016.5