

令和5年度 弘前大学大学院 地域共創科学研究科 修士論文

産業廃棄物溶融スラグを混入させた
コンクリートの強度特性と社会実装

地域リノベーション専攻

22GC113 三上真希

目次

1. 序論.....	1
2. スラグの概要	3
3. 水分補正の有無によるモルタルの性状の比較	10
3.1. 実験概要.....	10
3.2.実験結果および考察	16
4.縮小模型によるモルタルの曲げ強度.....	21
4.1 実験概要.....	21
4.2.実験結果および考察	25
5.各種配合によるモルタルの性状の比較	27
5.1.実験概要.....	27
5.2.実験結果および考察	31
6.コンクリートの強度特性	41
6.1.実験概要.....	41
6.2.実験結果および考察	46
7.現場施工による検証.....	48
8.結論	52
参考文献.....	53
謝辞	54

1. 序論

わが国の廃棄物の排出量は高度経済成長期に急増し、それ以降も増加し続けている。回収された廃棄物は焼却処理により減量化され、一般にその焼却灰は最終処分として埋立てられている。近年、この最終埋立処分場のひっ迫が喫緊の課題となっており、ごみの減量化や再生利用を促進する動きが強まっている。このような状況のなかで、ごみを 1200°C 以上の高温で熔融処理する技術が開発された。熔融処理された廃棄物を気中や水中で冷却固化してできる生成物を「ごみ熔融スラグ」という。熔融処理することにより焼却処理よりもごみの容積が減少し、最終埋立処分場の延命化が期待できる。また、ダイオキシン類は高温処理することにより分解されるため、熔融処理によって有害物質の発生の心配をする必要もない。

一方で、わが国では、1960 年代頃まではコンクリート用骨材として主に川砂・川砂利が使用されていた。しかし、高度経済成長に伴いコンクリートの使用量が急増し、加えて河川管理の面から川砂・川砂利の採取が規制されるようになった。そのことから、コンクリート用骨材の供給が間に合わなくなるという問題が生じた。そこで、川砂・川砂利に代わり陸砂・陸砂利、海砂といった天然骨材や砕砂・砕石や高炉スラグ骨材といった人工骨材が用いられるようになった。現在では環境保全のために瀬戸内海地域で海砂の採取が禁止される¹など、今後も天然骨材の採取の制限が厳しくなることが予想される。このような状況から良質な骨材の確保が一層難しくなっており、安定して大量の供給が望める骨材資源の確保が急務となっている。

このような背景から、一般廃棄物から生成されるごみ熔融スラグはコンクリート用骨材として積極的に利用されている。2006 年には一般廃棄物および下水汚泥熔融スラグのコンクリート用骨材としての JIS 規格が制定された²。対して、産業廃棄物には重金属といった有害物質が含まれている可能性があることから、産業廃棄物由来の熔融スラグは JIS 規格の対象になっておらず、研究データもいまだ少ない状況である。

そこで、本研究では産業廃棄物由来の溶融スラグをコンクリート用骨材として用いることを目的として、産業廃棄物由来の溶融スラグを細骨材として用いたモルタルおよびコンクリートのフレッシュ特性、強度特性の検討を行った。さらに、スラグ細骨材の社会実装を本研究の最終目標とし、株式会社青南商事の敷地内にてスラグ細骨材を用いたコンクリートを使用して構造物の施工を行った。

なお、一般に骨材資源は原材料の単価が低いため、全体の価格のうち輸送コストの占める割合が大きい。そのため、輸送距離を可能な限り短縮し輸送コストを抑えることが望ましい。つまり、骨材は地域産業である³。したがって、本研究では青森県内のごみ処理施設で生産された溶融スラグをコンクリート用骨材として県内で消費することを想定し、青森県リサイクル製品認定制度認定基準を指標として試験を実施した。

2. スラグの概要

スラグは廃棄物の焼却灰を 1200°C以上で溶融し、水中で急冷固化することで生成される。本研究で使用する産業廃棄物由来の溶融スラグ(以下、スラグと略記)は、株式会社青南 RERにて製造されたものである。溶融方式はガス化溶融方式である。

スラグの外観を写真 1 に示す。スラグは黒色または赤褐色のガラス質の物質であり、表面に光沢がある。粒子形状は不規則で角張りや凹凸が多く、針状物も含まれる。また、目視ではあるが本研究で細骨材として使用する砂よりも粒径の大きい粒子が散見される。

スラグは急冷固化により破碎されることから、スラグ中には気泡や亀裂があり、脆性的である(写真 2)。そのため、スラグを細骨材として全量使用することは困難であり、砂などの一部を置換して用いることが望ましい。

実験で使用するスラグと砂は、写真 3 のようにプラスチックコンテナで密閉し保管している。

青森県リサイクル製品認定制度認定基準における産廃スラグ骨材を使用したコンクリート製品の認定基準では、産廃スラグの品質および環境安全性を確保するため、使用するスラグが JIS A 5031 の「5.品質」の規定を満たすことを定めている。表 1 に 3 章で使用するスラグの有害物質の含有量を示す。サンプルの一部で鉛の含有量が JIS 規格の基準値を上回っている。しかし、実際の施工でスラグをコンクリート用骨材として使用する場合は、一部のスラグで有害物質の含有量が基準値を上回っていても、基準値を下回るスラグと混合して使用する。そのため、総合的に見て問題のない範囲であると判断した。鉛以外の有害物質は全てのサンプルで基準値を下回っている。表 2 より、JIS A 5031 で検査項目となっている化学成分に関しても、全ての項目で基準値を下回っている。



写真 1 スラグの外観

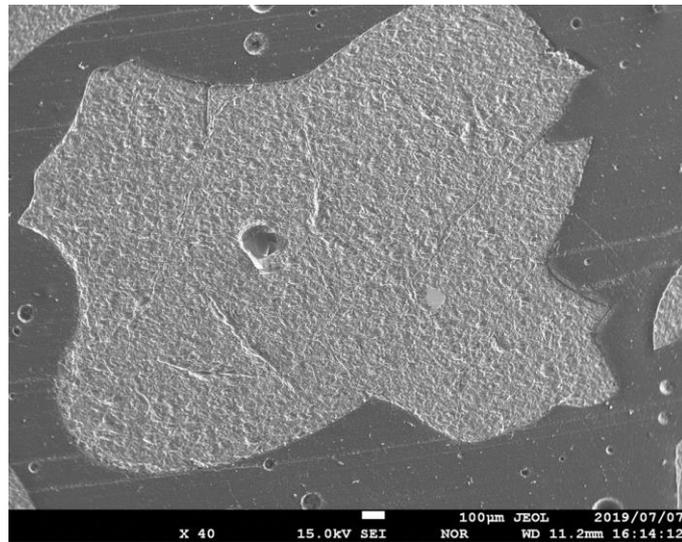


写真 2 スラグの拡大写真



写真 3 砂およびスラグの保管方法

表 1 スラグの有害物質含有量

サンプリング日	含有量[mg/kg]						
	カドミウム	鉛	六価クロム	ひ素	総水銀	セレン	ふっ素
JIS規格基準	≦150	≦150	≦250	≦150	≦15	≦150	≦4000
2021/7/6	<4	100	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/7/7	<4	150	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/7/8	<4	100	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/7/9	<4	120	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/7/10	<4	170	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/9/24	<4	65	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/9/25	<4	38	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/9/26	<4	44	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/9/27	<4	100	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/9/28	<4	47	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/10/23	<4	71	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/10/24	<4	49	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/10/25	<4	40	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/10/26	<4	46	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/10/27	<4	39	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/11/17	<4	54	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/11/18	<4	43	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/11/19	<4	38	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/11/20	<4	58	<10	<10	<0.5	<10	<100
2021/11/21	<4	60	<10	<10	<0.5	<10	<100

表 2 スラグの化学成分

サンプリング日	含有量[%]			
	酸化カルシウム	全硫黄	三酸化硫黄	金属鉄
JIS規格基準	≦45.0	≦0.5	≦2.0	≦1.0
2021/7/6	13.45	0.05	0.12	-
2021/7/7	13.75	0.06	0.16	-
2021/7/8	13.04	0.05	0.12	-
2021/7/9	13.75	0.05	0.13	-
2021/7/10	11.60	0.06	0.15	-
2021/9/24	14.25	0.03	0.08	-
2021/9/25	14.20	0.04	0.11	-
2021/9/26	13.87	0.03	0.08	-
2021/9/27	15.02	0.04	0.10	-
2021/9/28	16.02	0.03	0.07	-
2021/10/23	13.16	0.04	0.10	-
2021/10/24	12.46	0.04	0.10	-
2021/10/25	12.45	0.03	0.07	-
2021/10/26	12.59	0.05	0.13	-
2021/10/27	13.12	0.04	0.09	-
2021/11/17	11.45	0.04	0.09	-
2021/11/18	11.71	0.04	0.10	-
2021/11/19	11.66	0.04	0.09	-
2021/11/20	12.29	0.06	0.14	-
2021/11/21	12.55	0.04	0.09	-

スラグは急冷固化により生成されるガラス質の物質である。そのため、スラグはその内部に結晶化エネルギーを保持し、潜在水硬性を有する可能性がある⁴。潜在水硬性を有しているならば、スラグを細骨材としてだけでなく、破碎処理を行うことにより混和材料として、セメントの代替品にもなり得ることを意味する。JIS A 6206 では、コンクリートまたはモルタルに混和材料として用いられる高炉スラグ微粉末は式(1)によって示される塩基度が 1.60 以上であることが定められている。

$$b = \frac{CaO+MgO+Al_2O_3}{SiO_2} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 b : 塩基度

CaO : スラグ中の酸化カルシウムの含有量[%]

MgO : スラグ中の酸化マグネシウムの含有量[%]

Al_2O_3 : スラグ中の酸化アルミニウムの含有量[%]

SiO_2 : スラグ中の二酸化ケイ素の含有量[%]

3章で使用するスラグの塩基度を表 3 に示す。いずれのサンプルも塩基度が 1.60 を大きく下回っている。したがって、本研究で使用するスラグは潜在水硬性を有さないと考えられる。

表 3 塩基度

スラグ	含有量[%]				塩基度
サンプリング日	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	b
2021/7/6	41.21	12.97	13.45	2.38	0.70
2021/7/7	39.58	15.35	13.75	2.29	0.79
2021/7/8	37.30	16.42	13.04	2.07	0.85
2021/7/9	36.86	14.26	13.75	2.19	0.82
2021/7/10	34.44	14.77	11.60	1.88	0.82
2021/9/24	38.06	15.75	14.25	1.95	0.84
2021/9/25	36.38	16.07	14.20	1.90	0.88
2021/9/26	37.96	13.44	13.87	2.08	0.77
2021/9/27	38.71	13.90	15.02	2.44	0.81
2021/9/28	39.05	16.60	16.02	2.17	0.89
2021/10/23	32.65	12.87	13.16	1.62	0.85
2021/10/24	37.46	13.06	12.46	1.78	0.73
2021/10/25	37.20	13.76	12.45	1.94	0.76
2021/10/26	35.70	14.30	12.59	2.00	0.81
2021/10/27	36.76	12.82	13.12	2.00	0.76
2021/11/17	37.95	12.51	11.45	1.92	0.68
2021/11/18	37.90	13.45	11.71	1.86	0.71
2021/11/19	36.05	13.90	11.66	1.74	0.76
2021/11/20	34.83	13.30	12.29	1.62	0.78
2021/11/21	37.20	12.73	12.55	1.90	0.73

3. 水分補正の有無によるモルタルの性状の比較

3.1. 実験概要

細骨材として使用する砂とスラグは表面に水分が付着しており、供試体を作製する際もこれらを湿潤状態で使用する。舟根(2021)の研究では、細骨材の表面水の補正を行わずに実験を行っている⁵。すなわち、練り混ぜ水が配合で示されている分量よりも過剰に添加されていたということであり、この水セメント比の増加が実験結果に影響を及ぼしていると思われる。

そこで、本研究ではまず細骨材として使用する砂およびスラグの水分補正を行った供試体で実験を行い、補正を行っていない舟根の実験結果との比較を行う。さらに、スラグの置換率がモルタルの性状に及ぼす影響についても併せて検討する。

(1) 使用材料および配合

セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。スラグは潜在水硬性を有さないと判断し、スラグによる長期強度の増進は望めないため、養生期間を短縮することを優先した。

細骨材には青森県つがる市で採取された砂を使用した。水は水道水、混和材はポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤を用いた。

モルタルの示方配合を表 4 に示す。スラグは細骨材である砂の重量の 20%、30%を置換して用いることとした。また、比較のためにスラグ無使用のものも用意した。これを基準配合とする。砂およびスラグの含水率は赤外線水分器で測定した(写真 4)。算出した含水量を表 4 の水の重量から差し引くことで補正を行った。この場合、細骨材の含水率が高いほど実際に投入する細骨材の分量が少ないことになるが、モルタルの性状を大きく左右するのはペースト、すなわち今の場合では水セメント比であり、ここでの検証において骨材体積比の変動の重要性は比較的低い。そのため、今回は全ての供試体で水セメント比を 55%で一定にすることを優先して水分補正を行った。実際に作製したモルタルの現場配合を表 5 に示す。なお、厳密に言うならば補正すべきは細骨材の含水量ではなく表面水量である。しかし、スラグはガラス質であるため吸水率は高くなく、砂も細かな粒子であるため、細骨材の吸水率がモルタルの性状に及ぼす影響は微小であると判断し、簡便のため含水率を表面水率として水分補正を行っている。

表 4 モルタルの示方配合

スラグの 置換率 [%]	水セメント比 [%]	単位量[kg/m ³]				
		水	セメント	砂	スラグ	混和剤
	W/C	W	C	S1	S2	SP
0	55	65	118	376	0	0.83
20				301	75	
30				263	113	

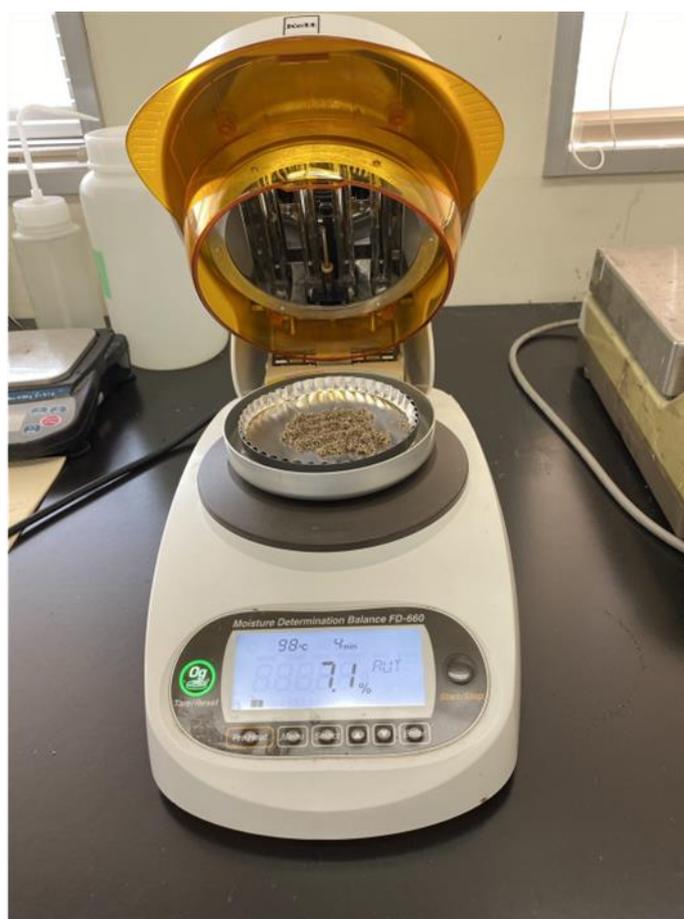


写真 4 赤外線水分器

表 5 モルタルの現場配合

記号	スラグの サンプリング日	スラグの 置換率 [%]	含水率[%]		水セメント比 [%] W/C	単位量[kg/m ³]						
			S1	S2		水 W	セメント C	砂 S1	スラグ S2	混和剤 SP		
N		0	5.7									
Sg1	2021/7/6	20	5.7	5.7	55	44	118	376	0	0.83		
		30	5.7			44		301	75			
Sg2	2021/7/7	20	7.2	2.6		41		301	75			
		30	7.2			43		263	113			
Sg3	2021/7/8	20	7.2	2.5		42		301	75			
		30	7.2			43		263	113			
Sg4	2021/7/9	20	7.2	2.1		42		301	75			
		30	7.2			44		263	113			
Sg5	2021/7/10	20	7.2	1.9		42		301	75			
		30	7.2			44		263	113			
Sg6	2021/9/24	20	7.2	4.8		40		118	301		75	0.83
		30	7.2			41			263		113	
Sg7	2021/9/25	20	7.6	3.4		40			301		75	
		30	7.6			41			263		113	
Sg8	2021/9/26	20	8.1	2.5		39			301		75	
		30	8.1			41			263		113	
Sg9	2021/9/27	20	8.1	4.2		38			301		75	
		30	8.1			39			263		113	
Sg10	2021/9/28	20	8.1	1.4		40			301		75	
		30	8.1			42			263		113	
Sg11	2021/10/23	20	4.8	1.8	49	118	301		75	0.83		
		30	4.8		50		263		113			
Sg12	2021/10/24	20	4.8	1.7	49		301		75			
		30	4.8		50		263		113			
Sg13	2021/10/25	20	4.8	2.4	49		301		75			
		30	4.8		50		263		113			
Sg14	2021/10/26	20	4.9	1.7	49		301		75			
		30	4.9		50		263		113			
Sg15	2021/10/27	20	4.9	2.0	49		301		75			
		30	4.9		50		263		113			
Sg16	2021/11/17	20	4.5	3.0	49		118	301	75		0.83	
		30	4.5		50			263	113			
Sg17	2021/11/18	20	4.5	4.3	48			301	75			
		30	4.5		48			263	113			
Sg18	2021/11/19	20	4.5	2.9	49			301	75			
		30	4.5		50			263	113			
Sg19	2021/11/20	20	4.5	9.4	44			301	75			
		30	4.5		43			263	113			
Sg20	2021/11/21	20	5.4	2.6	47			301	75			
		30	5.4		48			263	113			

(2) 作製方法

圧縮強度試験のためにφ50×100 mmの円柱供試体を作製した(図 1)。

練り混ぜ手順を

図 2 に示す。練り混ぜ後モルタルフロー試験を実施した。打設はテーブル型振動機を用いて行った。打設の1日後に脱型し、5日間水中養生を行った。その後、供試体を水から取り出し乾燥させてから材齢7日で圧縮強度試験を実施した。

(3) 実験方法

圧縮強度試験の概要および試験の様子を図 3、写真 5 に示す。破壊された供試体の破片の飛散を防ぐため、供試体が降伏したところで加重を止め、その降伏値を荷重の最大値とした。3本の供試体で試験を行い、その平均値を各バッチの最大荷重として式(2)で圧縮強度を算出した。

$$f_c' = \frac{P}{\pi\left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 f_c' : 圧縮強度[N/mm²]

P : 最大荷重[N]

d : 供試体の直径[mm]

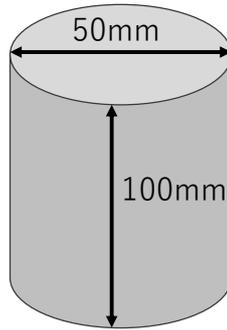


図 1 円柱供試体の寸法

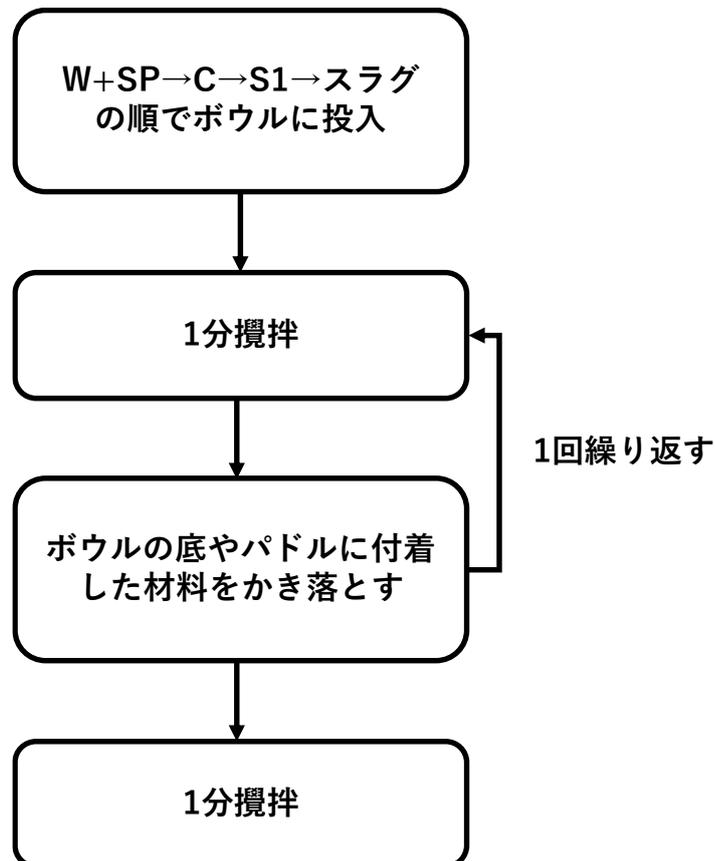


図 2 練り混ぜ手順

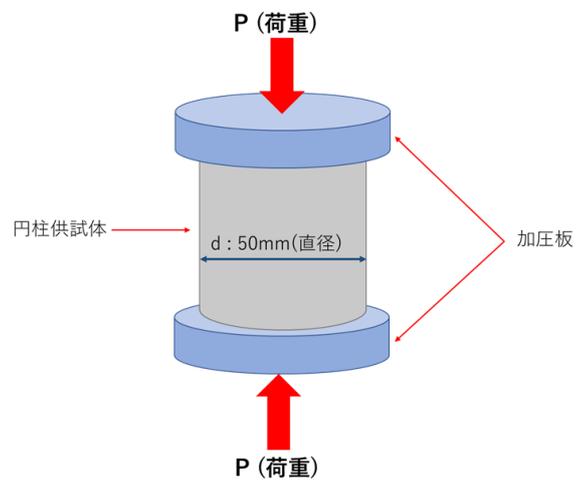


図 3 圧縮強度試験の試験方法



写真 5 圧縮強度試験の様子

3.2.実験結果および考察

(1) モルタルフロー試験結果

モルタルフロー試験の結果を表 6、図 4 に示す。スラグを使用したモルタルはスラグ無使用のものよりもモルタルフロー値が高い。また、スラグ置換率 20%よりも 30%の方でモルタルフロー値が高くなった。これは、スラグがガラス質で表面が滑らかであるため、砂よりもペーストとの付着が弱いことによるものと考えられる。バッチごとの流動性の変動には、後述するスラグの粒度と粒子形状が関係しているものと思われる。

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を表 6、図 5 に示す。なお、Sg16 から Sg19 は新型コロナウイルスの影響により、材齢 13 日で試験を行っている。同図より、スラグを使用したものは砂のみのものよりも強度が大きくなる傾向にある。スラグの粒子形状は不規則で凹凸も見られる。この不規則な粒形が荷重作用による変形に抵抗しているものと思われる⁶。また、スラグ置換率 20%よりも 30%の方において強度が低下する傾向にある。参考に、スラグ置換率 30%において圧縮強度が最大値、中央値、最小値となったスラグを細骨材として全量用いた供試体の圧縮強度を図 6 に示す。スラグはガラス質のため親水性が低く、また急冷水砕されるため脆弱部を有する。これらのことから、置換率 20%まではスラグの粒形によるずれ変形への抵抗性がモルタルの強度に対して有意に働き、置換率が大きくなるにつれスラグの脆弱性や材料分離しやすい性質が卓越するものと推察される。なお、Sg10 から Sg15 は標準配合と同等かそれを下回る結果となっている。これらのバッチに使用したスラグは 10 月に製造されており、この時期はスラグを製造する溶融炉のメンテナンスを行っている。メンテナンス直後は溶融炉内の温度が低下する等の理由から、スラグの品質が通常時と比べ大きく変動することがある⁷。⁸。Sg10 から Sg15 の強度低減の要因は明確ではないが、溶融炉の再稼働直後によるスラグの品質の変動やスラグの由来物によるスラグの脆弱性の増加が考えられる。

表 6 試験結果

記号	スラグの サンプリング日	スラグの 置換率 [%]	フロー値 [mm]	最大荷重 [kN]	圧縮強度 [N/mm ²]
N		0	146	83.1	42.3
Sg1	2021/7/6	20	162	87.0	44.3
		30	167	90.4	46.0
Sg2	2021/7/7	20	154	95.6	48.7
		30	167	96.4	49.1
Sg3	2021/7/8	20	172	95.7	48.7
		30	185	95.9	48.8
Sg4	2021/7/9	20	154	95.3	48.6
		30	171	93.8	47.8
Sg5	2021/7/10	20	測定不能	95.0	48.4
		30	166*	92.1	46.9
Sg6	2021/9/24	20	169	92.9	47.3
		30	179	91.5	46.6
Sg7	2021/9/25	20	159	94.9	48.3
		30	176	88.6	45.1
Sg8	2021/9/26	20	156	96.5	49.2
		30	171	96.0	48.9
Sg9	2021/9/27	20	152	100	51.0
		30	測定不能	96.0	48.9
Sg10	2021/9/28	20	測定不能	84.8	43.2
		30	190	83.3	42.4
Sg11	2021/10/23	20	173	78.9	40.2
		30	188	82.4	42.0
Sg12	2021/10/24	20	164*	79.2	40.3
		30	174	83.5	42.5
Sg13	2021/10/25	20	167	85.0	43.3
		30	188	77.6	39.5
Sg14	2021/10/26	20	186	79.5	40.5
		30	179	84.8	43.2
Sg15	2021/10/27	20	173	79.4	40.4
		30	184	79.0	40.2
Sg16	2021/11/17	20	162	109	55.3
		30	180	108	54.8
Sg17	2021/11/18	20	172	103	52.5
		30	198	97.8	49.8
Sg18	2021/11/19	20	179*	110	56.2
		30	203	97.6	49.7
Sg19	2021/11/20	20	165*	102	52.2
		30	179	107	54.4
Sg20	2021/11/21	20	155	95.5	48.7
		30	194	86.6	44.1

*モルタルフローコーンに一部モルタル付着

**Sg16~19 は材齢 13 日で圧縮強度試験を実施

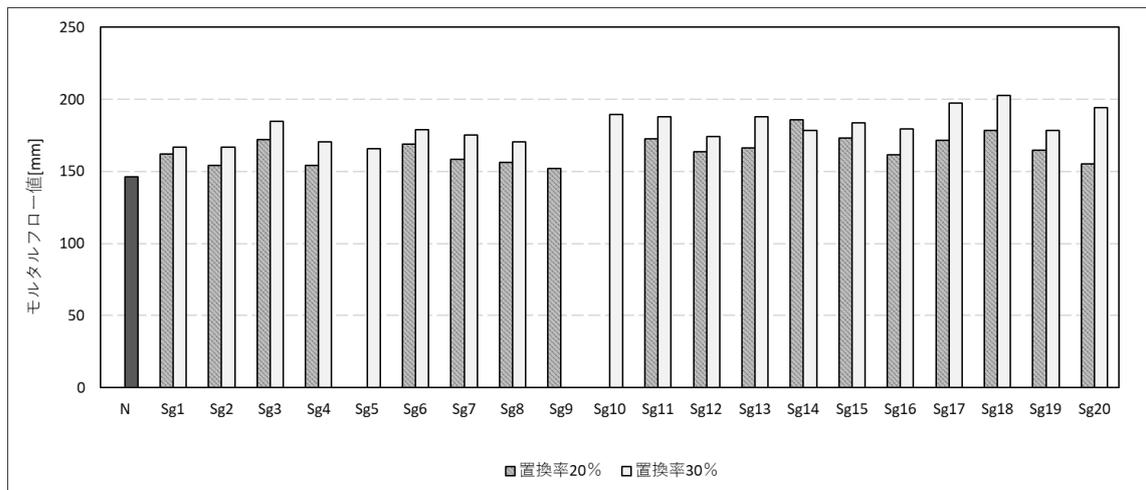


図 4 モルタルフロー試験結果

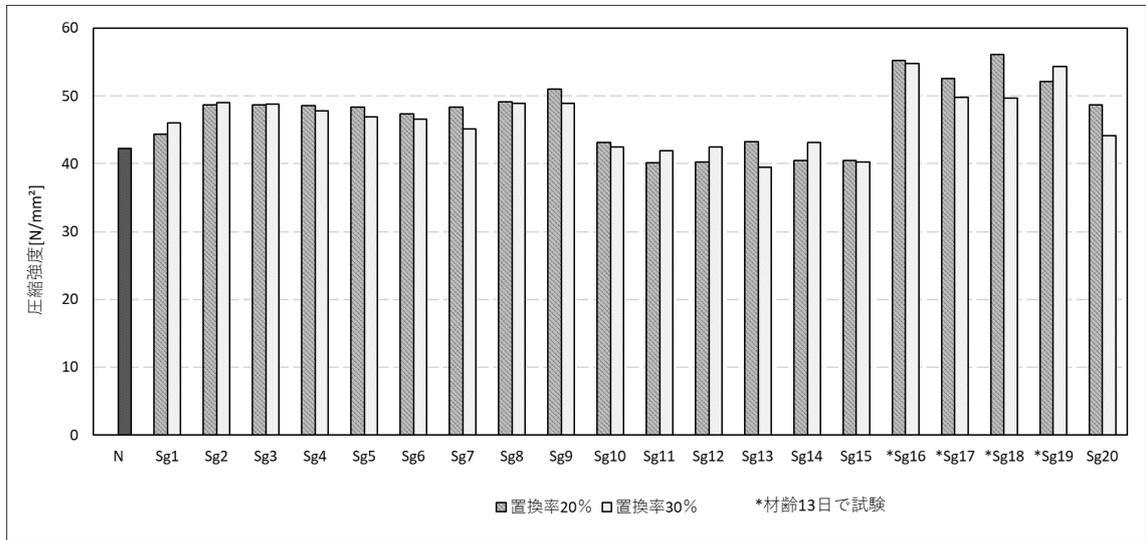


図 5 圧縮強度試験結果

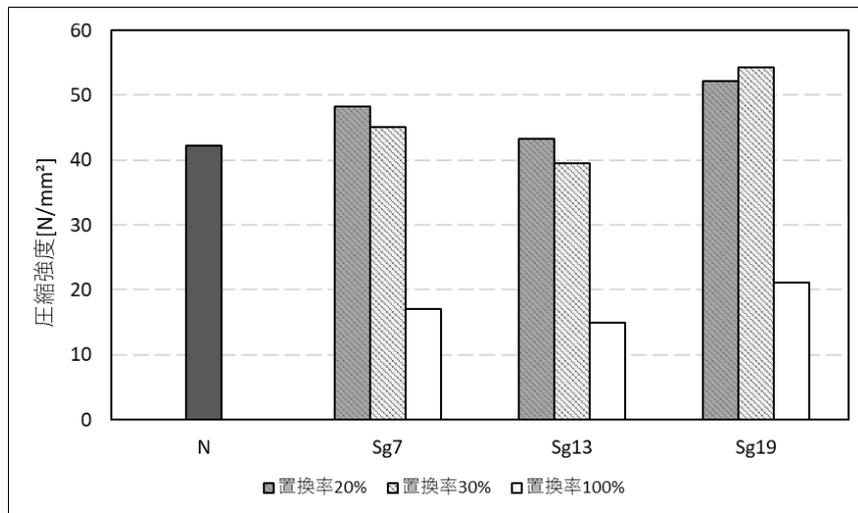


図 6 スラグ置換率による圧縮強度の比較

水分補正をした今回の実験結果と補正をしていない舟根の結果を図 7 に示す。舟根はスラグの置換率を 30%としていたため、今回の実験も置換率 30%の結果のみを表示している。水分補正を行った供試体の圧縮強度は、水分補正を行っていないものより著しく増加している。すなわち、細骨材の表面水がモルタルの強度に及ぼす影響は大きく、設定したモルタルの性状を満たすためには水分補正を行うことが肝要である。

この結果を踏まえて、これ以降の実験では砂とスラグの水分量補正を行うことを前提としてモルタルおよびコンクリート供試体を作製することとする。

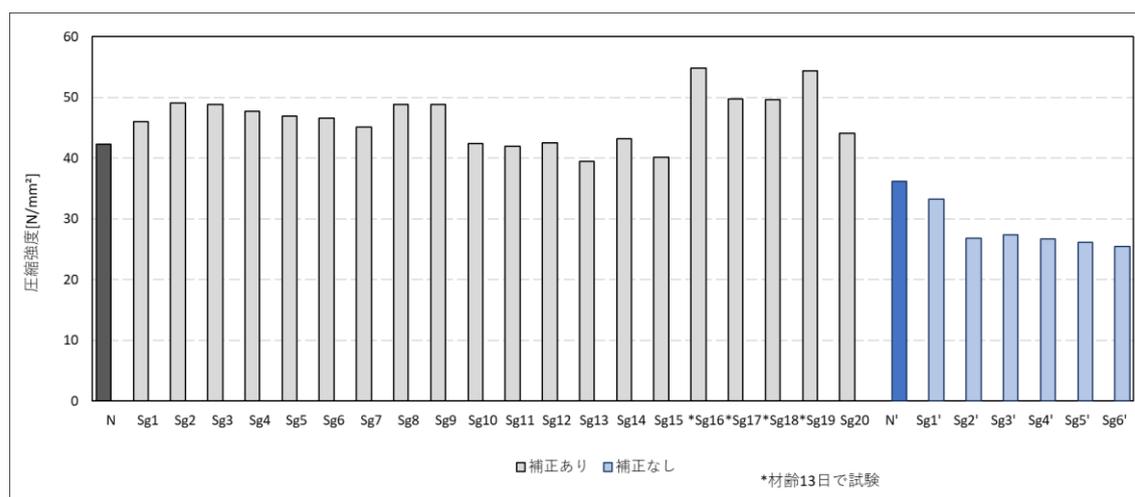


図 7 水分補正の有無による圧縮強度の比較

4.縮小模型によるモルタルの曲げ強度

4.1 実験概要

次に、スラグを使用したモルタルの曲げ強度を検討することを目的として、梁部材の縮小模型を作製し、曲げ強度試験を行った。

(1) 使用材料および配合

配合を表 7 に示す。使用した水、セメント、砂、スラグ、混和剤は 3 章と同様のものである。今回作製する供試体は断面積が小さいため、鉄筋は使用しないこととした。部材の早期の破壊を防ぐため、モルタルにビニロン短繊維を用いた。これは、モルタルおよびコンクリートのひび割れ後に架橋効果によって部材のひび割れの進展を抑制するもので、モルタルおよびコンクリートの引張抵抗力の向上が期待できる⁹⁾。今回はモルタルに対して用いるので、短繊維の繊維長は 12 mm とした。

(2) 作製方法

供試体の寸法を図 8 に示す。型枠はスチレンボードを用いて作製した。

練り混ぜの流れを図 9 に示す。練り混ぜ後、モルタルを型枠に少量流し込み、型枠の片端を軽く持ち上げ落下衝撃を与えることを繰り返して打設を行った。

打設の 2 日後に脱型し、養生は気中養生とした。その後材齢 9 日で曲げ強度試験を実施した。

表 7 縮小模型の配合

記号	スラグの サンプリング日	スラグの 置換率 [%]	含水率 [%]		水セメント比 [%] W/C	単位量[kg/m ³]				
			S1	S2		水 W	セメント C	砂 S1	スラグ S2	繊維 F
N-R		0	4.8		45	436	1012	405	0	20
Sg-R1	2022/10/13	20	4.8	1.5		439		324	81	
		30	4.8			428		283	121	
Sg-R2	2022/10/14	20	4.8	1.3		439		324	81	
		30	4.8			440		283	121	
Sg-R3	2022/10/15	20	4.8	2.3		438		324	81	
		30	4.8			439		283	121	
Sg-R4	2022/10/16	20	5.5	2.5		436		324	81	
		30	5.5			436		283	121	
Sg-R5	2022/10/17	20	5.5	3.4		435		324	81	
		30	5.5			436		283	121	

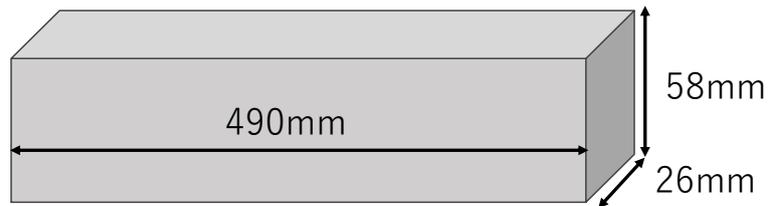


図 8 縮小模型の寸法

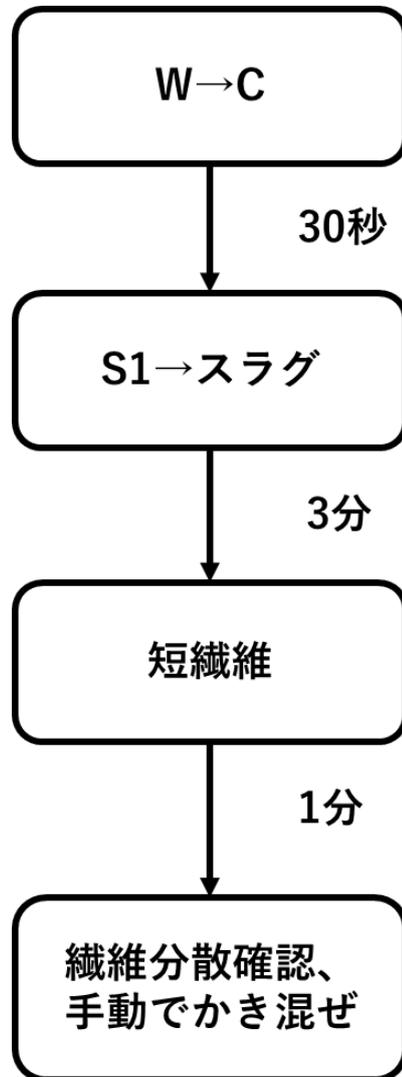


図 9 練り混ぜ手順

(3) 実験方法

曲げ強度試験の荷点および支点を図 10 に示す。荷点は対称 2 点集中荷点とした。モルタルの降伏荷重を最大荷重として記録し、式(3)で曲げ強度を算出した。

$$f_b = \frac{3P(l-l')}{2bh^2} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 f_b : 曲げ強度[N/mm²]

P : 最大荷重[N]

l : スパン[mm]

l' : 荷点距離[mm]

b : 破壊断面の幅[mm]

h : 破壊断面の高さ[mm]

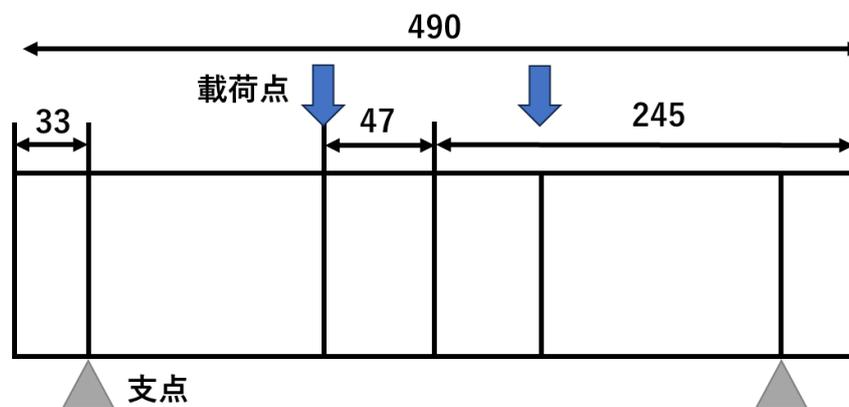


図 10 曲げ強度試験の概要

4.2.実験結果および考察

縮小模型によるモルタルの曲げ強度試験の結果を表 8、図 11 に示す。なお、Sg-R4、Sg-R5 は機械の故障により材齢 29 日で試験を実施している。スラグ置換率 20%では基準配合の N-R よりも曲げ強度が高くなり、置換率 30%では基準配合よりも強度が低くなる傾向にある。これは、圧縮強度と同様に、スラグの置換率が小さいとスラグの粒子形状によるずれ変形への抵抗が強度に対して有利に働き、置換率が大きくなるにつれスラグの脆弱性や材料分離抵抗性の低下の影響が大きくなるものと思われる。また、縮小模型の型枠は手作業で作製したため、供試体は精密な矩形断面梁とはならず、ゆがみが生じている。Sg-R1、Sg-R3 の置換率 30%で特に低強度となっているが、これは供試体のゆがみが特に顕著であり、荷重が均等に伝わらず梁の一部に負担が集中したためと考えられる(写真 6)。

表 8 曲げ強度試験結果

記号	スラグの サンプリング日	スラグの 置換率 [%]	最大荷重 [kN]	曲げ強度 [N/mm ²]
N-R		0	1.42	8.04
Sg-R1	2022/10/13	20	1.52	8.60
		30	1.01	5.72
Sg-R2	2022/10/14	20	1.52	8.60
		30	1.30	7.36
Sg-R3	2022/10/15	20	1.55	8.77
		30	1.08	6.11
Sg-R4	2022/10/16	20	1.68	9.51
		30	1.43	8.09
Sg-R5	2022/10/17	20	1.52	8.60
		30	1.31	7.41

*Sg-R4、Sg-R5 は材齢 29 日で試験を実施

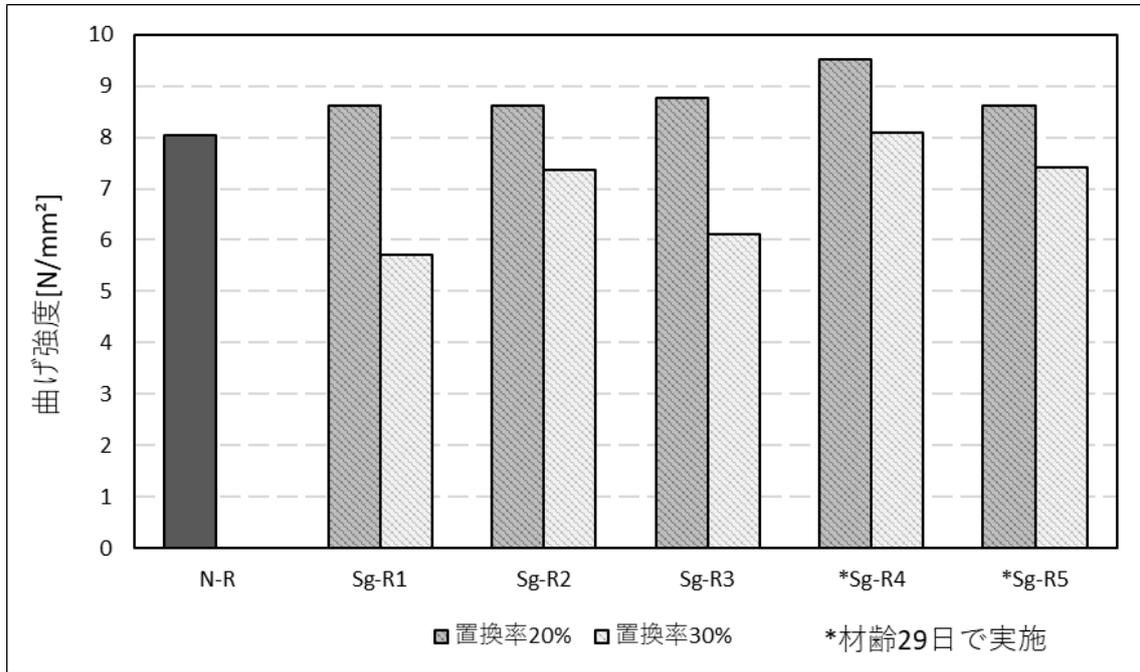
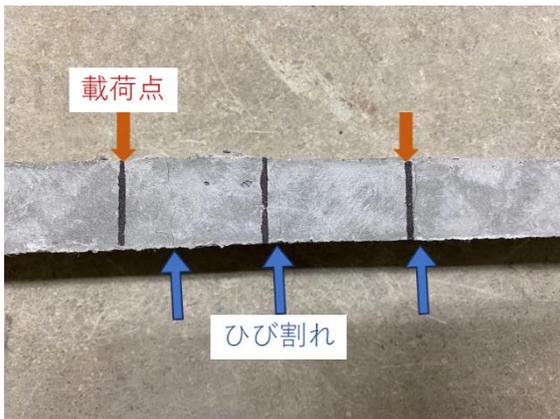
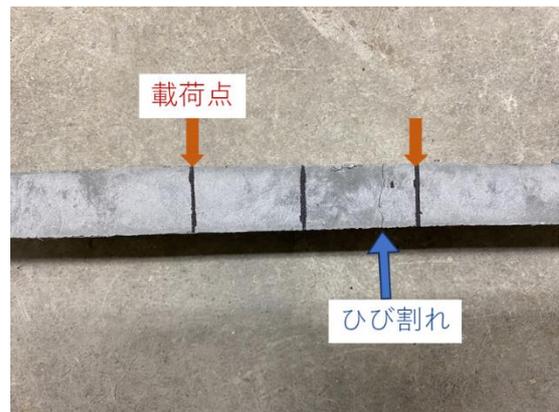


図 11 曲げ強度試験結果



置換率 20%



置換率 30%

写真 6 ひび割れの様子(例(Sg-R3))

5.各種配合によるモルタルの性状の比較

産業廃棄物由来の溶融スラグを用いた実験データはいまだ少なく、また、溶融スラグは溶融方式等によりその特性が異なる^{4,10}ことから、さらなるデータの蓄積が望まれる。そこで、本研究ではスラグの性質を考慮した異なる配合のモルタル供試体を作製し、ワーカビリティおよび強度の観点から比較を行う。

5.1.実験概要

用意する水準は以下の4種類とする。

- Sg-S：基準配合(3章と同様の配合)
- Sg-A：混和剤を増量(Cに対して0.7%→1.0%)
- Sg-V：増粘剤を使用
- Sg-D：スラグを乾燥させて使用

Sg-Aは、スラグを用いた場合に所定のワーカビリティを得るために必要な単位水量が砂のみを用いた場合よりも多くなる¹¹という仮定に基づくものである。Sg-Vは、スラグのガラス質で親水性が低い性質から引き起こされる材料分離による強度や耐久性の低下を抑制することを目的としている。増粘剤を使用すると、材料の移動が可能な硬化前の段階で、増粘剤の吸水効果によって自由水が減少する。すると、自由水が上部へ移動するための間隙、すなわち骨材の粒子間距離が小さくなり、ブリージングを抑制することが期待できる。Sg-Dは、骨材の表面水の有無がモルタルの流動性や強度に及ぼす影響を検討するためのものである。細骨材を湿潤状態で用いる場合の配合設計における水分補正の必要性は3章で示した通りである。現場での配合を決定する上で、修正しなければならない条件が多いほど誤差が生まれるリスクが高まる。したがって、Sg-Dでは配合決定における不安要素を取り除くため、さらにはスラグの表面が乾燥していることによってペーストとの付着性能が変動するか検討することを目的として、スラグを乾燥させ表面水の補正をせずに実験を行った。なお、砂は乾燥させず他の水準と同様に水分補正を行うこととした。これは、実際の施工において砂を乾燥させて用いることは困難であると判断したためである。

(1) 配合および作製方法

配合表を表 9 に示す。主な使用材料は 3 章と同様である。増粘剤には高吸水性ポリマーを用いた。

練り混ぜ手順を

図 12 に示す。スラグの乾燥にはホットプレートを用いた。スラグをバットに入れホットプレートに乗せ 55°C で数分間熱し、スラグの表面が乾いたところで加熱を止めた。スラグが室温程度に冷めるまで静置し、その後すぐに使用もしくはファスナー付きの保存袋に入れて保管した。袋に入れて保管したものも、翌日までには供試体の作製に使用した。すなわち、供試体作製時のスラグの状態は気乾状態である。

供試体の寸法は 3 章と同様で、 $\phi 50 \times 100$ mm の円柱供試体を作製した。

(2) 実験項目

フレッシュ性状としてモルタルフロー試験、硬化性状として圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験は脱型後 5 日間水中養生し、材齢 7 日で試験を実施した。各バッチ 3 本ずつ試験を行い、3 本の降伏値の平均を最大荷重とし式(2)で圧縮強度を算出した。

表 9 配合

記号	スラグの サンプリング日	スラグの 置換率 [%]	含水率 [%]		水セメント比 [W/C]	単位量[kg/m ³]					
			S1	S2		水 W	セメント C	砂 S1	スラグ S2	混和剤 SP	増粘剤 V
Sg-S1	2022/10/13	20	4.4	1.2	55	51	118	301	75	0.83	0
		30	4.4			52		263	113		
Sg-S2	2022/10/14	20	4.4	1.0		51		301	75		
		30	4.4			52		263	113		
Sg-S3	2022/10/15	20	4.4	1.8		50		301	75		
		30	4.4			51		263	113		
Sg-S4	2022/10/16	20	5.5	1.8		47		301	75		
		30	5.5			49		263	113		
Sg-S5	2022/10/17	20	5.5	2.3		47		301	75		
		30	5.5			48		263	113		
N-A		0	5.8		43		264	0			
Sg-A1	2022/10/13	20	6.0	1.7	55	46	118	301	75	1.25	0
		30	6.0			47		263	113		
Sg-A2	2022/10/14	20	6.0	1.9		46		301	75		
		30	6.0			47		263	113		
Sg-A3	2022/10/15	20	6.0	2.0		46		301	75		
		30	6.0			47		263	113		
Sg-A4	2022/10/16	20	5.8	1.4		47		301	75		
		30	5.8			48		263	113		
Sg-A5	2022/10/17	20	5.8	2.0		46		301	75		
		30	5.8			48		263	113		
N-V		0	3.7		51		376	0			
Sg-V1	2022/10/13	20	5.6	1.6	55	47	118	301	75	0.83	0.5
		30	5.6			48		263	113		
Sg-V2	2022/10/14	20	5.6	1.8		47		301	75		
		30	5.6			48		263	113		
Sg-V3	2022/10/15	20	5.3	1.5		48		301	75		
		30	5.3			49		263	113		
Sg-V4	2022/10/16	20	5.5	1.8		47		301	75		
		30	5.5			49		263	113		
Sg-V5	2022/10/17	20	5.5	2.0		47		301	75		
		30	5.5			48		263	113		
Sg-D1	2022/10/13	20	5.2		55	49	118	301	75	0.83	0
		30	5.2			51		263	113		
Sg-D2	2022/10/14	20	5.2			49		301	75		
		30	5.2			51		263	113		
Sg-D3	2022/10/15	20	5.2			49		301	75		
		30	5.2			51		263	113		
Sg-D4	2022/10/16	20	5.2			49		301	75		
		30	5.2			51		263	113		
Sg-D5	2022/10/17	20	5.2			49		301	75		
		30	5.2			51		263	113		

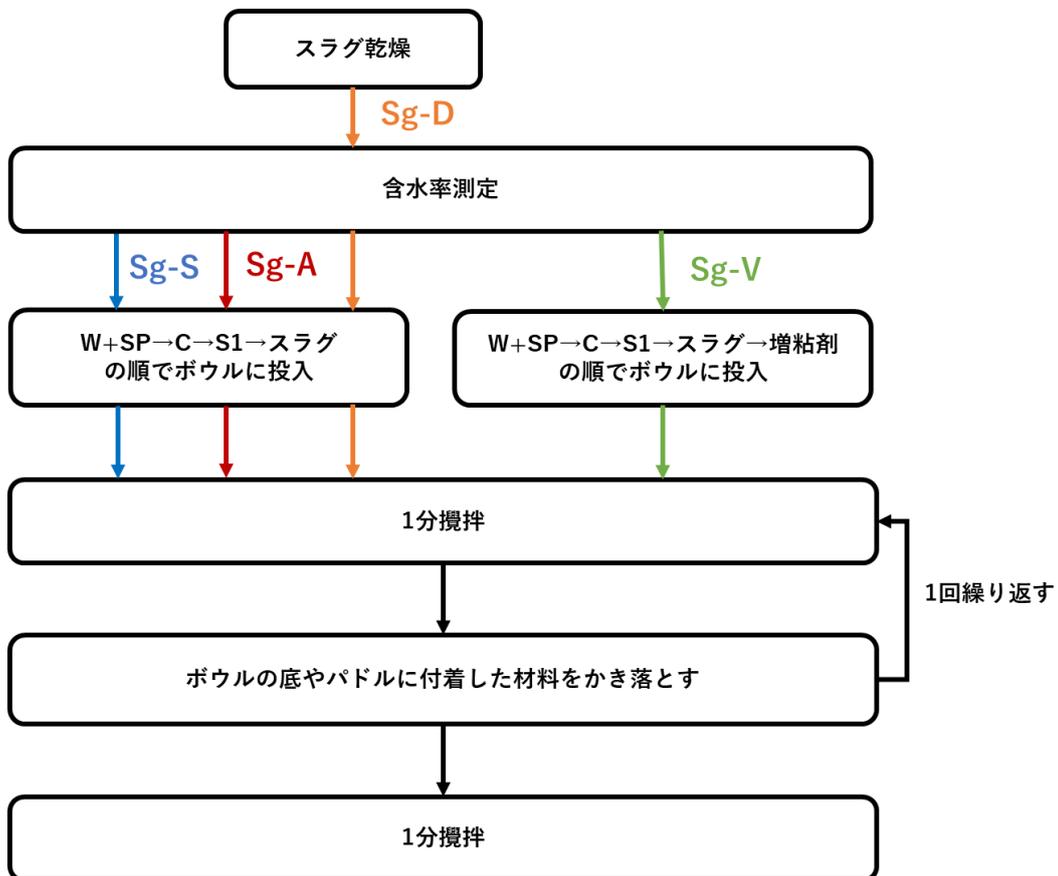


図 12 練り混ぜ手順

5.2.実験結果および考察

(1) モルタルフロー試験結果

モルタルフロー試験の結果を表 10、図 13 に示す。混和剤を増量した Sg-A シリーズは、フローコーンを外した瞬間に形が崩れ、落下衝撃を与えるとモルタルの広がりフローテーブルを超えるおそれがあったため測定不能とした。Sg-S1、Sg-S2 の置換率 30% も同様の理由で測定不能とした。Sg-S1、Sg-S5 の置換率 20% はモルタルの粘度が高く、フローコーンにモルタルを流しこんだ後、フローコーンを取り外すことが不可能であると判断し測定不能とした。

モルタルフロー値はスラグを使用したものの方がスラグ無使用のものよりも大きくなり、その程度はスラグの混入量が増加すると大きくなる。つまり、スラグを用いた場合は所要のコンシステンシーを得るために必要な単位水量が少なくなることを意味する。これは、スラグのガラス質で親水性が低い性質と、スラグの粒径が砂よりも大きく、骨材の総表面積が小さくなることによって骨材が拘束できる水量が減少することに起因するものと考えられる。この結果から、スラグを粒度調整せずに使用する場合は、所要の流動性を得るために必要な単位水量が減少することを考慮して配合設計する必要がある。

増粘剤を使用した Sg-V はいずれもモルタルフロー値が低下しており、増粘剤の吸水の影響が現れている。スラグを使用した一部のモルタルやスラグ無使用のモルタルで流動性が著しく低下している。これらは、モルタルを型枠内の隅々にまで充填させるために必要な流動性まで損なわれており、増粘剤の吸水が過剰であったと思われる。

表 10 試験結果

記号	スラグの サンプリング日	スラグの 置換率 [%]	フロー値 [mm]	最大荷重 [kN]	圧縮強度 [N/mm ²]
Sg-S1	2022/10/13	20	173	99.8	50.8
		30	測定不能	94.7	48.2
Sg-S2	2022/10/14	20	測定不能	98.9	50.4
		30	測定不能	87.6	44.6
Sg-S3	2022/10/15	20	187	91.4	46.5
		30	測定不能	79.2	40.3
Sg-S4	2022/10/16	20	163	108	54.8
		30	202	101	51.3
Sg-S5	2022/10/17	20	測定不能	110	56.0
		30	195	103	52.5
N-A		0	147	104	52.8
Sg-A1	2022/10/13	20	測定不能	73.6	37.5
		30	測定不能	84.8	43.2
Sg-A2	2022/10/14	20	測定不能	65.4	33.3
		30	測定不能	78.7	40.1
Sg-A3	2022/10/15	20	測定不能	60.5	30.8
		30	測定不能	74.2	37.8
Sg-A4	2022/10/16	20	測定不能	81.5	41.5
		30	測定不能	82.6	42.1
Sg-A5	2022/10/17	20	測定不能	85.1	43.4
		30	測定不能	82.6	42.1
N-V		0	106	73.8	37.6
Sg-V1	2022/10/13	20	144	75.3	38.4
		30	175	86.0	43.8
Sg-V2	2022/10/14	20	149	87.6	44.6
		30	168	83.6	42.6
Sg-V3	2022/10/15	20	160	87.3	44.5
		30	176	88.2	44.9
Sg-V4	2022/10/16	20	133	83.7	42.6
		30	161	88.6	45.1
Sg-V5	2022/10/17	20	115	62.9	32.0
		30	153	91.3	46.5
Sg-D1	2022/10/13	20	184	103	52.4
		30	235	91.3	46.5
Sg-D2	2022/10/14	20	180	105	53.5
		30	239	87.5	44.5
Sg-D3	2022/10/15	20	208	101	51.5
		30	241	86.8	44.2
Sg-D4	2022/10/16	20	226	92.7	47.2
		30	249	79.7	40.6
Sg-D5	2022/10/17	20	241	83.7	42.6
		30	234	75.2	38.3

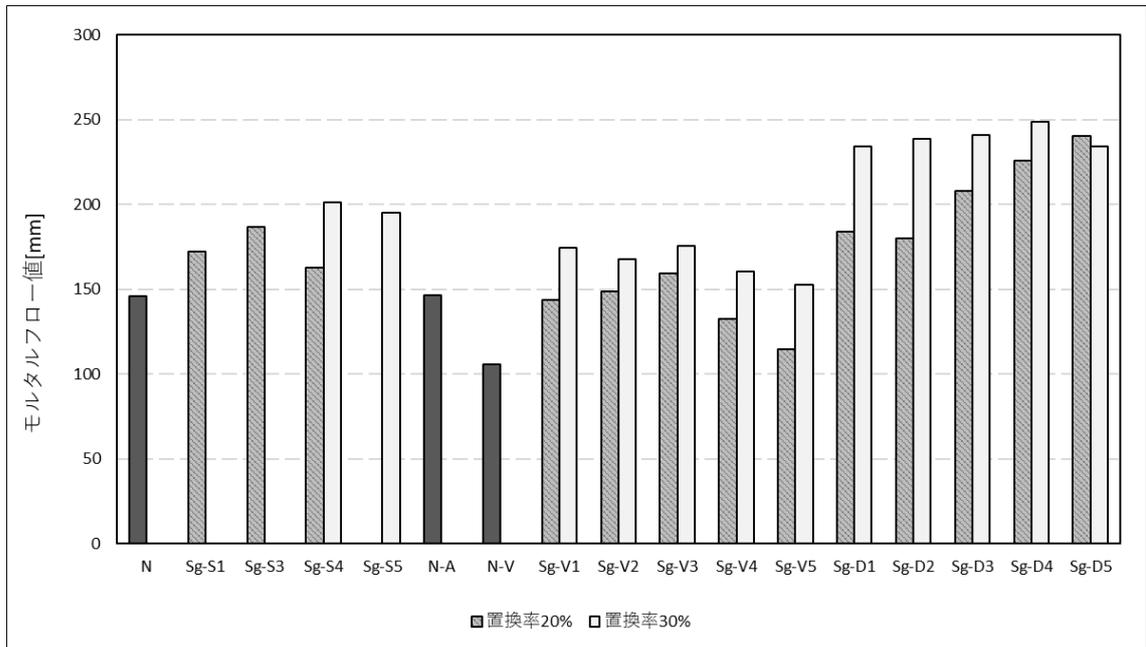


図 13 モルタルフロー試験結果

(2) 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験の結果を表 10、図 14 に示す。なお、基準配合の Sg-S2 の置換率 30%と Sg-S4、Sg-S5、混和剤増量の Sg-A とスラグ乾燥の Sg-D シリーズはブリージングが生じていたため、試験前にレイタンスを除去してから強度試験を実施している。Sg-S と他 3 水準の強度比較を図 15 に示す。

Sg-A と Sg-V シリーズは Sg-S よりも低強度となった。混和剤を増量させた Sg-A は砂のみの供試体以外で厚さ 10 mm 程度のレイタンスが発生しており、自由水が増加したことによる材料分離抵抗性の低下が強度低下の要因と考えられる。砂のみの供試体は基準配合時より強度が高くなっているため、この配合は砂のみを用いた場合には有効である。しかし、スラグを混入させた場合には自由水が過剰となり、強度の面では望ましくない結果となった。

増粘剤を使用した Sg-V も、基準配合よりも強度が低下する傾向にある。今回使用した増粘剤は長時間の保水効果が期待できて、緩やかな水和反応により発熱の抑制や収縮低減に寄与する。この効果によって強度の増進が遅れるために、基準配合と比較して強度が低下しているものと考えられる。また、Sg-V シリーズでは、練り混ぜの時点でペーストが硬く、ミキサーでの攪拌の合間で手動でのかき混ぜを入念に行う必要があった。これは砂のみを使用した N-V で顕著であった。材料の練り混ぜは異なる物性を持つ物質を一体化させるための重要な過程である。攪拌が十分でなかった場合、供試体の中で材料の偏りが発生し、局所的に強度が低い部分ができたり、骨材とセメントペーストの付着強度が低下したりするといった問題が発生する。加えて、一般にモルタルの流動性と強度はトレードオフの関係にある。しかし、Sg-V シリーズにおいては、同水準の中でモルタルフロー値が最も低いスラグ無使用の供試体が低強度であり、フロー値の高いスラグ置換率 30%の供試体が比較的高強度となっている。これらのことから、増粘剤の添加量が過剰であったため、ある程度の流動性を確保するために必要な練り混ぜ水まで吸水してしまったことが窺える。すなわち、材料の分散が不十分であったことが強度低下の要因と考えられる。スラグ置換率 30%の供試体がスラグ無使用や置換率 20%よりも高強度となっているのは、スラグを多量に投入することでモルタルフロー値が高くなるのが攪拌のしやすきの面で有利に働いたためと思われる。この結果を踏まえ、増粘剤の投入量については今後の課題として検討する必要がある。

スラグを乾燥させた Sg-D シリーズは基準配合と同程度の強度であったが、基準配合より高強度のものもあれば低強度のものもあり、明確な相関は見られなかった。水分補正は水セメント比を一定にすることを優先しており、細骨材の含水量を練り混ぜ水から差し引くことで補正を行っている。これにより、実際に投入した細骨材の重量は含水量の分だけ少なくなっていることになる。Sg-S4 と Sg-S5 はスラグも水分補正したことで Sg-D4、Sg-D5 よりも骨材体積比が小さくなっている。一方で、Sg-S1、Sg-S2、Sg-S3 は使用した砂の含水率が比較的良かったため、スラグを乾燥させた Sg-D1、Sg-D2、Sg-D3 のほうがむしろ骨材体積比が大きくなっている。しかし、いずれにしても骨材の減少量は全体の重量の 0.8~1.1%程度であり、モルタルの流動性や強度に大きな影響を及ぼすことはないと思われる。したがって、スラグを乾燥させた水準とさせていない水準のモルタルの性状の違いは、作製方法の違いに起因するものというよりは、スラグの粒度や粒形、脆弱分の有無といったスラグそのものの性状の違いが卓越していると思われる。

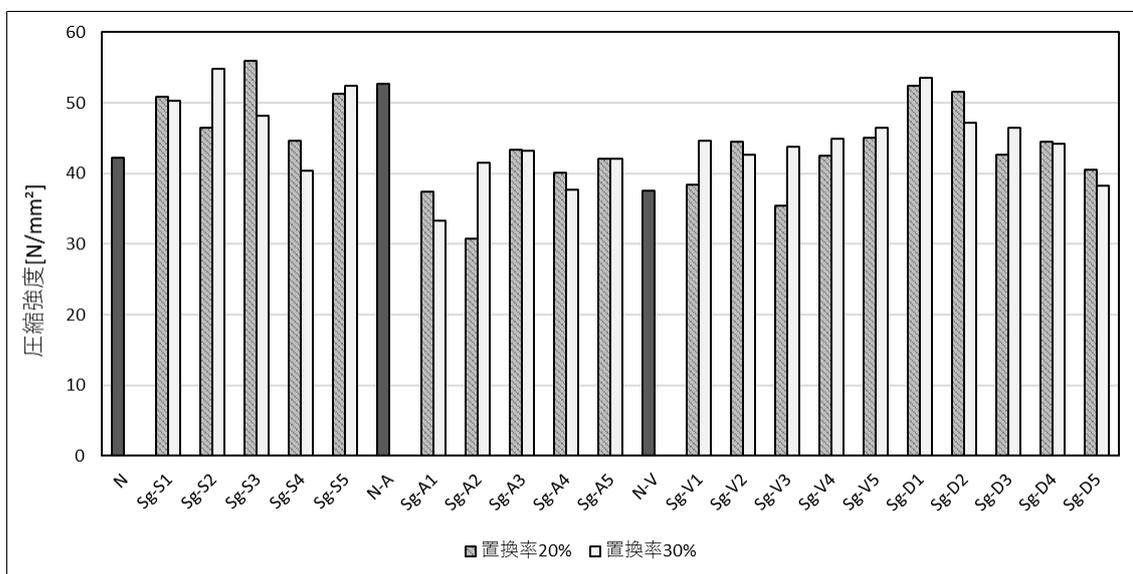


図 14 圧縮強度試験結果

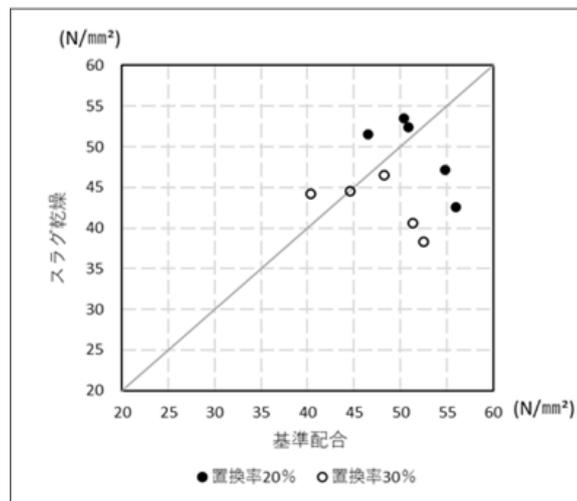
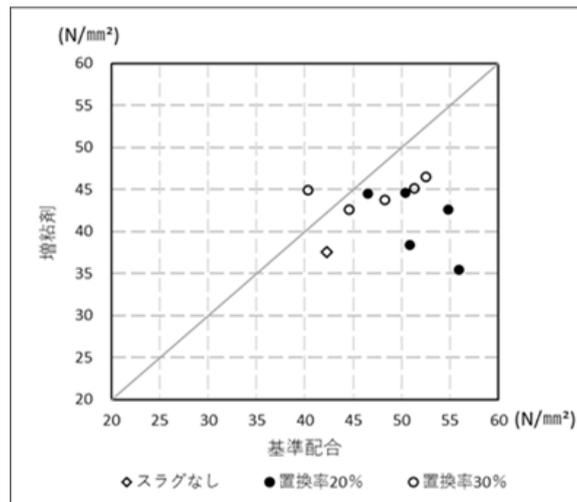
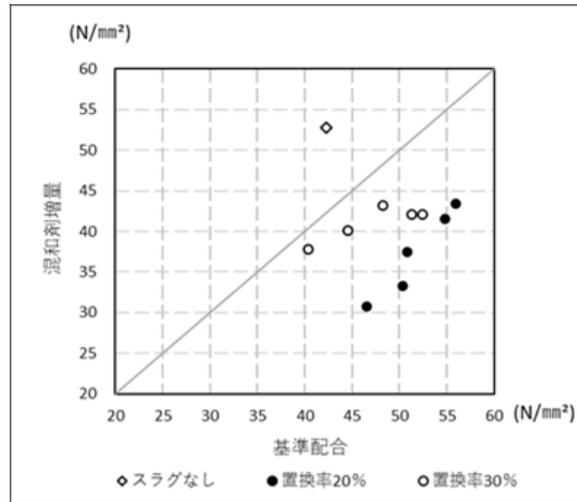


図 15 圧縮強度の比較

写真 7 に各水準の供試体の断面を示す。これらの供試体でも基準配合、混和剤増量、スラグ乾燥の水準ではレイタンスが発生していた。画像はレイタンスを除去した状態である。画像より、増粘剤を使用したもの以外はスラグが底部へ沈降しており、材料分離が引き起こされていることがわかる。沈降の程度は混和剤増量が最も顕著であり、その次が基準配合、スラグ乾燥の順となっている。このことから、混和剤を増量させたものは自由水が過剰であったことがわかる。スラグを乾燥させたものより基準において材料分離が顕著であるのは、基準の方でスラグ粒子がペースト内を移動する際にスラグの表面水が摩擦を低減させたためと考えられる。モルタルが均質でないと、ブリーディングを引き起こし供試体上部に脆弱層が生成される。そのことに加えて、底部のセメントペーストの層が薄い部分でひび割れが発生しやすくなり、強度や耐久性の低下の要因となる。したがって、スラグを使用するにあたり、増粘剤を用いることは材料分離を抑制する上で有効な手段であるといえる。矢野(2023)の凍結融解試験の結果より、耐久性の面でも増粘剤の使用は有効であると思われる¹²。本実験において、増粘剤を使用したモルタルの圧縮強度は増粘剤を使用していないものより低下している。この要因は、前述した通り、増粘剤の投入量が過剰であったためモルタルがある程度流動するために必要な水まで吸水してしまったことや、増粘剤の保水効果により強度の増進が遅延していることが考えられる。したがって、増粘剤の投入量や練り混ぜ時間、モルタルの長期的な強度の増進が今後の課題となる。



写真 7 供試体の断面

(3) スラグの性質とモルタルの性状の比較

骨材の粒形はモルタルの流動性および強度特性に影響を及ぼす⁶。そこで、5章で使用するスラグを対象として、各サンプリング日のスラグの粒子形状とモルタルフロー値および圧縮強度の関係性を検討する。スラグはサンプル毎に粒子を無作為に数個選び、デジタルカメラで接写した。その写真から画像解析のフリーソフトを用いてアスペクト比および円形度を計測した。各サンプルで3個ずつ計測し、その平均値をサンプルのアスペクト比および円形度とした。なお、円形度は式(4)によって算出している¹³。

$$C = \frac{4\pi F}{L^2} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 C ：円形度

F ：投影面積[mm²]

L ：投影周囲長[mm]

モルタルフロー値および圧縮強度の値はスラグ乾燥の水準のものを使用した。これは、基準配合はモルタルフロー試験において測定不能のものが多数あることと、細骨材の水分補正をするとバッチごとにスラグの置換率が変動するため、スラグを乾燥させた水準のほうが、よりスラグそのものの特性が実験結果に反映されていると判断したためである。

スラグのサンプル毎のアスペクト比および円形度とそのスラグを用いたモルタルフロー値および圧縮強度の関係を図 16 に示す。

モルタルフロー値と圧縮強度ともにアスペクト比との相関は見られなかった。よって、スラグの全体としての形状はモルタルの流動性および圧縮強度に大きな影響を及ぼさないと思われる。

スラグの円形度とモルタルフロー値および圧縮強度の間にはそれぞれ負の相関と正の相関が見られた。流動性に関して、骨材の粒形が球に近いほど実積率は大きくなり、骨材の間隙を埋めるために必要なペースト量が減少し、流動性は向上するはずである。しかし、図 16 の結果を見ると、円形度が大きいほど、つまり粒形が円に近づくほど流動性が低下している。また、骨材の凹凸が荷重作用によるずれ変形に抵抗することによってモルタルの圧縮強度が向上す

るならば、スラグの円形度が小さいほど圧縮強度は大きくなるはずである。しかし、図 16 ではスラグの円形度が小さくなるにつれ強度が低下している。

モルタルの流動性に影響を及ぼすスラグの主な特性は粒子形状および粒度である¹³。モルタルの流動性に影響を与える骨材の粒度の特性は、モルタル中の骨材の粒子間距離に言い換えることができる¹⁴。粒子形状に関しても、不規則な形状によって骨材どうしが接触する確率が高まることで流動性に負の影響を及ぼす¹⁵ため、粒子形状によって骨材粒子間距離が変化し、それが起因してモルタルの流動性が変動するといえる。モルタルの流動性に支配的なスラグの特性を実験結果から明言することはできないが、モルタルフロー値はスラグの粒子形状だけでなく、粒度の影響も受けており、それらの特性によって変動するモルタル中の骨材粒子間距離によってモルタルの流動性が決定するものと推測される。

また、モルタルの強度はフレッシュ性状に影響を受ける。硬化前のモルタルにおいて材料分離が生じていると、硬化後も均質性が保たれず強度の低下に繋がる。モルタルのブリージングは骨材の粒度に大きな影響を受け、骨材の最大径を小さくするとブリージングを抑制できる¹³。スラグを乾燥させた水準では、全ての供試体でブリージングが発生している。スラグの種類は同一であり、水セメント比も一定であることから、本研究において、同一水準でのブリージング量の変動はスラグの粒度に密接な関わりがあるといえる。各供試体のレイタンス厚さと圧縮強度を比較すると、レイタンスが厚いものほど圧縮強度が低下している(表 11)。したがって、同一配合でのスラグのサンプリング日によるモルタルの圧縮強度の変動は、スラグの粒度の違いに起因する材料分離抵抗性の変動が支配的になっていると推察される。

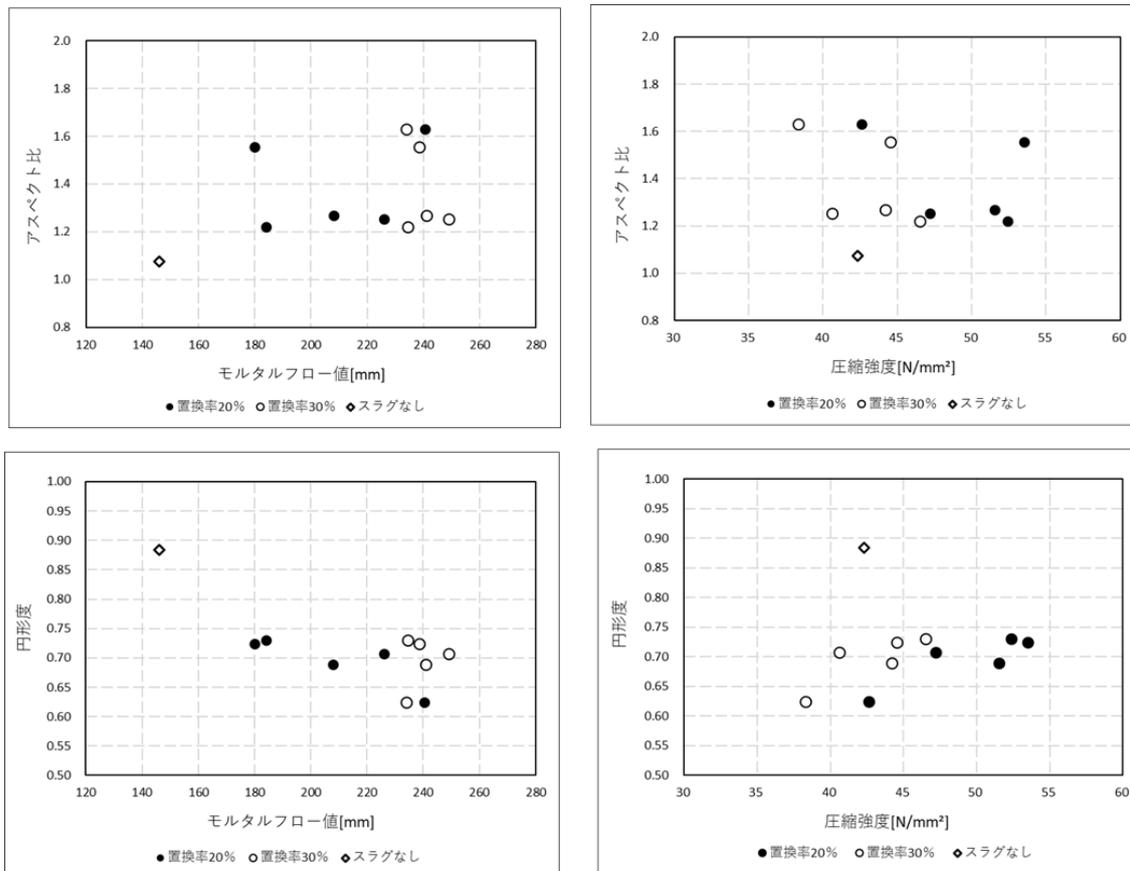


図 16 スラグの粒子形状とモルタルの性状の比較

表 11 レイタンス厚さと圧縮強度の比較

記号	スラグ置換率 [%]	レイタンス厚さ [mm]	圧縮強度 [N/mm ²]
Sg-D1	20	2.3	52.4
Sg-D1	30	6.3	46.5
Sg-D2	20	3.3	53.5
Sg-D2	30	7.0	44.5
Sg-D3	20	5.0	51.5
Sg-D3	30	6.7	44.2
Sg-D4	20	5.0	47.2
Sg-D4	30	6.7	40.6
Sg-D5	20	8.3	42.6
Sg-D5	30	9.0	38.3

6.コンクリートの強度特性

6.1.実験概要

モルタルでの実験結果を踏まえ、コンクリートへの適用性を検討することを目的として、スラグを細骨材として使用したコンクリート供試体を作製し、圧縮強度試験および曲げ強度試験を実施した。細骨材にスラグを使用することがコンクリートの性状に及ぼす影響を検討するにあたって、コンクリート自体の強度比較を行うため、曲げ強度試験用の供試体は無筋コンクリートとした。鉄筋コンクリートがその機能を十分に発揮するためには、コンクリートと鉄筋の付着強度が肝要となる。付着強度の支配要因となるのは、主に鉄筋の種類、コンクリート中における鉄筋の配置、コンクリートの品質である¹⁶。スラグの有無が鉄筋コンクリートの付着性状に及ぼす影響は未知数ではあるが、コンクリートの品質が鉄筋コンクリートの付着強度にも影響を及ぼすことから、本実験の範囲では、スラグの有無によるコンクリートの品質の変動を検討することとする。

用意する水準は以下の3種類とする。

- No.1：標準配合
- No.2：スラグ混合練り混ぜ
- No.3：スラグ後添加

No.1 は比較のために用意したスラグ無使用の基準となる水準である。No.2 と No.3 において、この2水準の比較は実際の施工の状況を考慮したものである。練り混ぜによるスラグの分散やコンクリートの均一化、スラグの表面にセメントペーストを満遍なくコーティングすることを考慮すると、砂とスラグを同時に投入し練り混ぜを行うほうが望ましい。しかし、スラグの入手経路や輸送の事情等から、実際の施工ではコンクリート製造工場ですラグ以外の材料を練り混ぜ、現場に輸送されたレディーミクストコンクリートにスラグを後から投入することが想定される。このことから、スラグを後添加した場合と砂と混合練り混ぜした場合とで比較を行い、コンクリートの品質がどの程度変動するかを検討する。

(1) 使用材料および配合

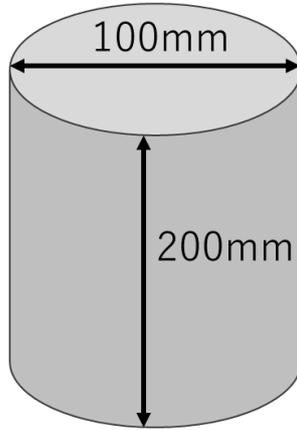
これまでの試験結果より、スラグの置換率は20%にとどめるのが望ましい。よって、今回の実験では置換率30%の水準は用意せず、置換率20%のみで試験を行うこととした。配合を表12に示す。今回は細骨材に山砂と砕砂の2種類を使用しているため、細骨材容積の20%をスラグに置換している。目標空気量は $5\pm 1.0\%$ 、目標スランプは 20 ± 2.0 cmである。No.2はスラグと山砂(S1)をそれぞれ計量した後にスラグを山砂のバケツに移し、それをミキサーに投入した。すなわち、砂とスラグのみでの練り混ぜは行っていない。

(2) 作製方法

供試体の寸法を図17に示す。圧縮強度試験のため $\phi 100\times 200$ mmの円柱供試体、曲げ強度試験のために $100\times 100\times 400$ mmの無筋コンクリート梁を各水準で3本ずつ作製した。供試体の作製は弘岩生コン株式会社の試験室で行った。各水準の練り混ぜ手順を図18に示す。練り上がり後、フレッシュ試験としてスランプ試験と空気量試験を実施した。打設は、円柱供試体と梁部材のどちらも突固めにより締固めを行った。供試体を作製した翌日に脱型し、円柱供試体と梁供試体ともに気中養生を行った。

表 12 コンクリートの配合

スラグ置換率 [%]	水セメント比 [%]	細骨材率 [%]	単位量[kg/m ³]							
			W	C	S1	S2	スラグ	G	AD	AE
0	47.2	46.4	176	373	556	248	0	963	3.73	0.37
20	47.2	40.9	174	373	447	197	79	963	3.73	0.37



圧縮強度試験用円柱供試体



曲げ強度試験用無筋コンクリート梁

図 17 コンクリート試験用供試体の寸法

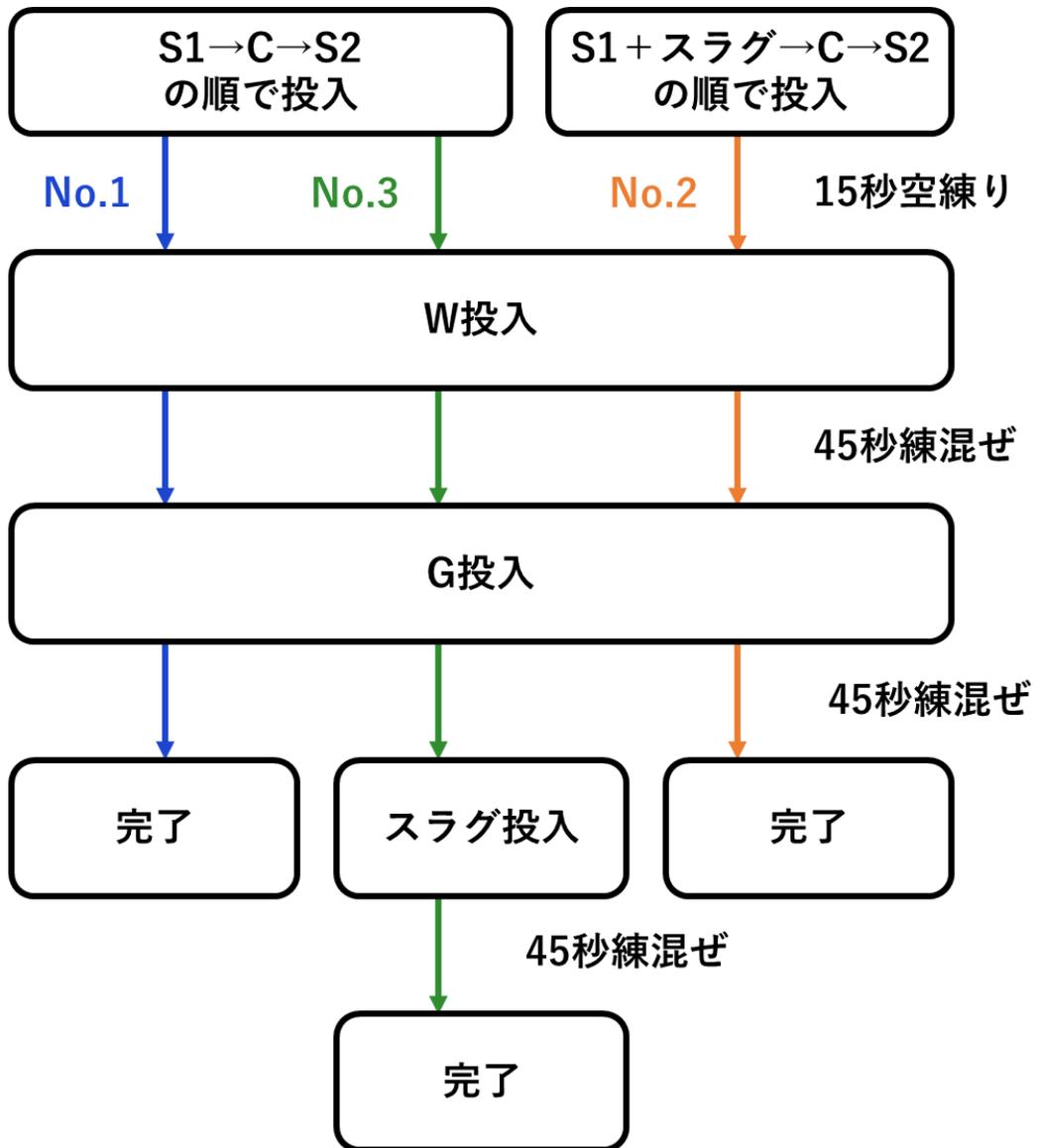


図 18 練り混ぜ手順

(3) 実験項目

圧縮強度試験は弘岩生コン株式会社で実施された。圧縮強度試験時の材齢は7日とした。各供試体の最大荷重から式(2)で圧縮強度を算出し、各水準の供試体の平均値をその水準の圧縮強度とした。

曲げ強度試験は材齢14日で実施し、載荷は中央点載荷法¹⁷とした。供試体の載荷点および支点位置を図19に示す。各水準の最大荷重から式(5)で曲げ強度を算出し、3本の供試体の曲げ強度の平均値をその水準の曲げ強度とした。

$$f_b = \frac{3Pl}{2bh^2} \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 f_b : 曲げ強度[N/mm²]

P : 最大荷重[N]

l : スパン[mm]

b : 破壊断面の幅[mm]

h : 破壊断面の高さ[mm]

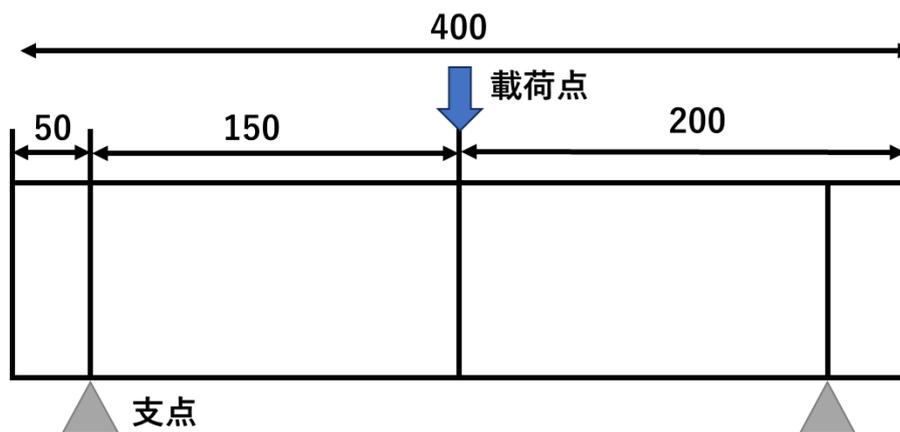


図19 曲げ強度試験の概要

6.2.実験結果および考察

フレッシュ試験の結果を表 13、圧縮強度試験および曲げ強度試験の結果を表 14、表 15 に示す。

表 14 から、配合設計において呼び強度は 30N/mm^2 であり、すべての水準でこれを満たしている。スラグを使用したものが標準配合と比べ低強度となる傾向にあり、No.3 でそれが顕著となっている。しかし、No.3 の 3 本の供試体の圧縮強度はそれぞれ 34.8 、 31.4 、 30.0N/mm^2 であり、他の水準と比較しても同水準の中で強度にばらつきがある。そのため、この強度低下の要因は粗骨材の粒径の偏りや細骨材率の偏り等も考えられ、スラグや作製方法の影響であるとは一概に言えない。いずれにしても、すべての水準で呼び強度は満足しており、スラグを使用したことによるコンクリートの強度低下の程度も支障のない範囲と判断できる。

曲げ強度は No.3、No.1、No.2 の順に強度が高い結果となった。曲げ強度に関しても、スラグの特性や作製方法と強度との関連性は検証の数が少ないため明確ではない。しかし、いずれの供試体も標準配合と同程度の曲げ強度が得られることがわかった。

No.3 はコンクリートの均一化やスラグとペーストの付着機構に懸念があるだけでなく、スラグを投入した後に追加で攪拌を行うため、他の水準よりも練り混ぜ時間が長くなっている。練り混ぜ時間はコンクリートの空気量や流動性に影響を及ぼし、それに伴って空気量や流動性に影響を受ける圧縮強度にまで影響が及ぶことが想定される。しかし、No.2 と No.3 の空気量は同程度であり、スランプは No.3 のほうが若干大きい。圧縮強度は No.3 のほうが低く曲げ強度は No.3 のほうが高い値となっている。これらのことから、スラグ後添加による練り混ぜ時間の延長がコンクリートの品質に及ぼす影響は小さいと考えられる。

表 13 フレッシュ試験結果

記号	スランプ [cm]	空気量 [%]
No.1	20.0	4.6
No.2	19.5	4.3
No.3	20.5	4.3

表 14 圧縮強度試験結果

記号	最大荷重[kN]			圧縮強度[N/mm ²]			平均[N/mm ²]
No.1	278	278	282	35.4	35.4	35.9	35.6
No.2	276	270	259	35.1	34.4	33.0	34.2
No.3	273	247	236	34.8	31.4	30.0	32.1

表 15 曲げ強度試験結果

記号	最大荷重[kN]			曲げ強度[N/mm ²]			平均[N/mm ²]
No.1	13.0	12.5	11.7	5.83	5.61	5.25	5.56
No.2	9.49	11.0	10.7	4.27	4.93	4.82	4.67
No.3	12.6	12.4	12.5	5.65	5.57	5.61	5.61

7.現場施工による検証

株式会社青南商事の敷地内の改修工事にスラグを細骨材として用いたコンクリートを使用した構造物を作製して、現場での施工性の検討を行った。

今回行うのは水路横の護岸の復旧工事である。コンクリートの示方配合は6章のスラグ置換率20%のものと同様である。示方配合を表16に示す。

スラグの製造をしている株式会社青南商事の社内で実施される工事であるため、スラグをコンクリート製造工場で他の材料とともに練り混ぜるのではなく、施工現場にてスラグのみ後から投入する方法が輸送コストの面から見て合理的である。そのため、スラグは現場で後添加することとし、スラグを投入した後にミキサトラックで再攪拌を行った。すなわち、6章のNo.3の水準と同様の手順である。写真8のように、ミキサトラックにローリング足場を設置して現場でスラグを投入した。

表 16 コンクリートの示方配合

スラグ置換率 [%]	W/C [%]	s/a [%]	単位量[kg/m ³]						
			W	C	S1	S2	スラグ	G	AD
20	47.2	40.9	174	373	447	197	77	963	3.73



写真 8 スラグ投入の様子

写真 9 は練上がり後のコンクリートの状態である。後添加されたスラグの偏りは見られず、材料が十分に分散されていることが確認できた。練上がり直後の空気量とスランプはそれぞれ 6.2%、19cm で、練上がり温度は 13°Cであった。現場でスラグを投入し再攪拌を行ったため、コンクリートが製造されてから施工現場に運搬されるまでの過程での空気量低下がなく、むしろ空気量は比較的高い値となった。

写真 10 はコンクリートを打ち込む前の鉄筋を組み立てた状態である。打設の様子を写真 11 に示す。打ち込みや締固めも問題なく行われ、材料分離も確認されなかった。

材齢 10 日で実施された圧縮強度試験の結果を表 17 に示す。標準養生の全ての供試体で呼び強度の 30N/mm²を満足する結果となった。

脱型後の構造物を写真 12 に示す。土間は打設の 29 日後であり、擁壁は打設 9 日後である。コンクリート表面の剥離は確認されなかった。このことから、所要のワーカビリティおよび出来形を確保できたといえる。



写真 9 練上がり後のフレッシュコンクリート



写真 10 打設前



打込み、締固め



均し後

写真 11 打設の様子

表 17 圧縮強度試験結果

		質量[kg]	最大荷重[kN]	圧縮強度[N/mm ²]
標準養生	1	3.660	307	39.1
	2	3.635	301	38.3
	3	3.640	300	38.2
	平均			38.5
現場養生	1	3.565	199	25.3
	2	3.525	200	25.5
	3	3.565	190	24.2
	平均			25.0



写真 12 作製した構造物

8.結論

本研究では、産業廃棄物由来の溶融スラグをコンクリート用骨材として用いることを目的として、スラグを細骨材の一部に置換したモルタルおよびコンクリートの強度特性についての検討を行った。はじめに、モルタル供試体を作製し、骨材の水分補正の必要性、スラグ置換率によるモルタルの流動性および強度の変動、スラグの性質を考慮した各種配合の比較について検討した。次に、コンクリート供試体を作製しスラグのコンクリートへの適用性を確認した。そして、実際に構造物を作製し現場での製造・施工性の検討を行った。

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1)スラグを用いたモルタルの流動性は、スラグが無混入のものよりも高くなる。これは、スラグの粒度が大きいこととガラス質で表面が滑らかな性質によるものと考えられる。
- (2)スラグを砂の重量に対し内割 20%置換して用いたモルタルは、スラグ無使用のものよりも強度が高くなる傾向にある。一方で、スラグを内割 30%置換したものはスラグ無使用のものよりも強度が低下する傾向にある。このことから、スラグ置換率 20%まではスラグの不規則な粒形が強度向上に対して有意に働き、置換率が増加するにつれスラグの脆性的かつ材料分離しやすい性質が卓越するものと推察される。
- (3)スラグは砂よりも粒度が大きいことから、一定の流動性を得るために必要な単位水量はスラグ無使用の場合より少なくなる。また、粒度が大きいことによりモルタル内で材料分離が引き起こされ、モルタルの強度に負の影響を及ぼすと考えられる。
- (4)増粘剤の使用はスラグを投入したモルタルの材料分離抵抗性を向上させる手段として有効である。増粘剤を使用する際の配合や練り混ぜ時間、長期の強度増進が今後検討すべき課題である。
- (5)スラグを使用したコンクリートのフレッシュ性状と強度は、スラグ無使用と比較して多少の変動がある。しかし、いずれも実用化の上で問題にならない範囲であり、全ての水準で目標の性状を満足する結果となった。
- (6)スラグのみを現場で後添加する方法でコンクリートの製造・施工を行った。所要のワーカビリティおよび出来形品質を確保でき、現場施工での実用性を確認できた。

参考文献

- 1) 環境省. “瀬戸内海における海砂利採取状況調査”. 2023-07-10
https://www.env.go.jp/press/press_01889.html, (参照 2024-01-28)
- 2) JIS A 5031 : 2016, 一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用溶融スラグ骨材
- 3) 片平博, 渡辺博志 : 天然骨材資源の低品質化の現状と課題, コンクリート工学, Vol.46, No.5, pp.20-23, 2008.
- 4) 北辻政文, 藤居宏一 : ごみ溶融スラグを細骨材として用いたコンクリートの性質, 農業土木学会論文集, No.200, pp.59-67, 1999.
- 5) 舟根熙 : 卒業論文「産業廃棄物由来の溶融スラグを混入させたモルタルの強度特性に関する研究」
- 6) 友沢史紀 : 骨材について(2), コンクリート工学, Vol.16, No.9, pp.115-123, 1978.
- 7) 中田喜久, 齊藤丈士, 伊能泰夫, 大塚秀三 : ごみ溶融スラグ細骨材の品質変動とこれと混合する細骨材に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vo.27, No.1, pp.115-120, 2005.
- 8) 辻幸和, 依田彰彦, 川上勝弥, 鈴木康範 : 溶融スラグ骨材の利用と JIS 化, コンクリート工学, Vol.45, No.4, pp.4-9, 2007.
- 9) 岸徳光, 田口史雄, 三上浩, 栗橋祐介 : ビニロン短繊維混入 RC 梁の耐荷性状に及ぼす短繊維混入率の影響, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.1337-1348, 2004.
- 10) 松家武樹, 堺孝司, 錦織和紀郎, 横山卓哉, 西本祐三, 小野寺誠司 : 各種溶融スラグのコンクリートへの適用における磨砕の効果に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.62, No.1, pp.174-185, 2006.
- 11) 齊藤和秀, 木之下光男, 伊原俊樹, 吉澤千秋 : 高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.139-144, 2009.
- 12) 矢野美咲 : 卒業論文「産業廃棄物由来の溶融スラグを混入させたモルタル小片の凍害耐久性に関する研究」
- 13) 上野敦, 國府勝郎, 宇治公隆 : スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質向上に関する研究, 土木学会論文集, Vol.62, No.2, pp.462-476, 2006.
- 14) 寺西浩司, 谷川恭雄 : 骨材の粒度分布の変動がフレッシュコンクリートの性質に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, No.614, pp.9-15, 2007.
- 15) 枝松良展, 山口昇三, 岡村甫 : モルタルフローにおける粉体と細骨材の役割と境界, 土木学会論文集, No.571, pp.131-147, 1997.
- 16) 中嶋清美・角田忍・菅原隆(2003)『建設材料』コロナ社
- 17) JIS A 1106 : 2016 コンクリートの曲げ試験方法, 附属書 JA : 中央点載荷法によるコンクリートの曲げ強度試験方法

謝辞

本研究に際して、指導教官である上原子晶久准教授には多大なご指導とご協力を賜りました。実験を進めるにあたり、研究室外の方との連絡や材料等の準備、強度試験の対応などで度々助力を頂きました。さらには、疑問点や不明な点について熱心にご教示いただいたことで、理解を深めながら研究を進めることができました。この場を借りて深くお礼申し上げます。

また、スラグの提供をしていただいた株式会社青南 RER の皆様、現場施工にてご協力いただきました株式会社青南商事の皆様に深く感謝いたします。弘岩生コン株式会社の皆様にはコンクリート供試体の作製および圧縮強度試験、現場施工にて多大なご助力を頂きました。深謝申し上げます。

さらに、同期の久保田さんとは3年間共同で研究を行い、多くの刺激と示唆を頂きました。学部生の吉田君、藤山君をはじめ、実験を手伝ってくださった玉手君ならびに西村君、同研究室の皆様にも大変お世話になりました。本当にありがとうございました。