

論文 石灰石-高炉スラグ混合セメントの物性と CO₂ 削減効果

小林 和揮*1・扇 嘉史*2・細川 佳史*3・石田 征男*3

要旨: クリンカー比率が 30%~60%, 石灰石微粉末比率が 0~20%の石灰石-高炉スラグ混合セメントについて、モルタルによる評価を行った。JIS R 5201 による試験から、石灰石微粉末は材齢 7 日までの短期強さの向上に寄与すること、高炉スラグによる凝結遅延を緩和することが確認された。さらに、減水剤を添加したモルタルの流動性評価から、石灰石微粉末は流動性の向上に寄与することがわかった。石灰石微粉末を 20%混合した石灰石-高炉スラグ混合セメントについて、高炉セメント B 種と圧縮強度を同程度とした際、耐久性を維持しつつ、CO₂ 排出量が削減可能であった。

キーワード: セメント, 混合材, 石灰石微粉末, 高炉スラグ微粉末, CO₂ 排出量

1. はじめに

セメント産業は CO₂ 排出量の削減を様々な方向から進めており、その中の一つの方策に、クリンカー比率の低減がある¹⁾。クリンカー比率の低減について、海外では、様々な種類の混合材を二種類以上使用することができる混合セメントが規格化されているが、現行の日本産業規格 (JIS) は、使用できる混合材の種類が少なく、同時に混合できる混合材は一種類のみという規格の制限がある。こうした中、セメント協会は、今後の方向性として、石灰石微粉末 (LSP) の混合材や、二種類の混合材を同時に混合できる三分系混合セメント等が活用できるよう、セメント規格の改正や新設が必要と考えており²⁾、今後混合セメントに関するさらなる検討が望まれる。

高炉スラグ (BFS) と、国内に豊富な資源を有する石灰石微粉末を混合材に活用したセメントについては、既に種々の研究事例があり^{例え}³⁾、クリンカー比率が 60%程度のセメントにおいて LSP を 10%混合した場合に、高炉セメント B 種 (BB) と同等の性能が得られることが報告されている³⁾。ただし、コンクリートは強度を基準に設計されることが多く、例えば、圧縮強さの低いセメントを用いた場合、水セメント比を低減して圧縮強度を確保する必要があるため、水セメント比によって、コンクリートの圧縮強度を調整した条件において、混合セメントの粉体配合が耐久性へ及ぼす影響について検討することも必要である。西田ら⁴⁾は、BB に対し BFS 比率を一定とし、LSP を 15%および 25%混合したセメントについて、水セメント比を低減して圧縮強度を同等とした際に耐久性 (中性化、乾燥収縮、塩化物イオン浸透抵抗性、凍結融解抵抗性) が BB とほぼ同等であることを示している。

一方で、クリンカー比率が 40%程度の低い領域については知見が乏しく、特に JIS R 5201 で規定されているセ

メントの物理試験を行った事例は少ない。環境負荷を低減したセメントの設計において、混合セメントの粉体配合を最適化するには、より低いクリンカー比率における様々な側面からの知見の蓄積も求められる。

以上より、本研究では、普通ポルトランドセメント (N) の比率が 30~60%, LSP の比率が 0~20%の領域における混合セメントの物性評価を JIS R 5201 で規定される試験も含めて行った。また、既報⁴⁾よりもさらにクリンカー比率を下げたセメントについて、水セメント比の低減により圧縮強度を BB と同等としたモルタルに対して耐久性の評価を行った。

2. 試験方法

2.1 使用材料

本試験で使用した材料を表-1 に示す。

2.2 粉体配合の影響に関するモルタル試験

クリンカー比率が 30%~60%, LSP 比率が 0~20%の領域における石灰石-高炉スラグ混合セメントについて

表-1 使用材料

材料	記号	名称等
結合材	セメント	N 普通ポルトランドセメント 密度: 3.14g/cm ³ , SO ₃ =2.16% ブレン比表面積: 3,370cm ² /g
		B BFS 高炉スラグ微粉末 4000 密度: 2.90g/cm ³ , SO ₃ =2.17% ブレン比表面積: 4,510cm ² /g
	混合材	LSP 石灰石微粉末 密度: 2.72g/cm ³ ブレン比表面積: 6,620cm ² /g
水	W	上水道水
細骨材	S	S _{JIS} セメント協会 強さ試験用標準砂
		S _{sea} 海砂 表乾密度: 2.58
		S _{crv} 砕砂 表乾密度: 2.66
混和剤	SP1	高性能減水剤: ナフタリンスルホン酸系
	SP2	高性能 AE 減水剤: ポリカルボン酸エーテル系
	AD	AE 減水剤: リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合系
	D1	消泡剤: 非イオン界面活性剤系
	D2	消泡剤: ポリアルキレングリコール系

*1 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 (正会員)

*2 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 修士(理学) (正会員)

*3 太平洋セメント (株) 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 博士(工学) (正会員)

各種物性評価を行うため網羅的に 12 水準を設定した。具体的な粉体配合を表-2 に示す。本研究では基材の N に少量混合成分として石灰石微粉末が含まれたセメントを使用していたため、それを考慮して粉体配合を示した。なお、本研究ではセメントに含まれる石膏もクリンカーとみなしており、以降で記載する「クリンカー比率」とはクリンカーと石膏を足し合わせたものである。ここで、No.1 は JIS R 5211 で規定される BB 相当品である。

(1) 強さ、凝結、安定性およびフロー値 (JIS)

圧縮強さ試験、凝結試験、安定性試験およびフロー試験を JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」に準拠して実施した (以下、JIS R 5201 によるフロー値をフロー値 (JIS) とする。)。安定性試験はルシャテリエ法で行った。

(2) フロー値 (混和剤添加)

減水剤の効果は使用する材料と減水剤の成分との相性によって異なることが知られており⁹⁾粉体配合の違いによる減水効果への影響を、次の方法で確認した。まず、モルタル配合は W/B=0.35, S/B=2.0 とした。混和剤添加量は SP1 を B×1.2% または SP2 を B×0.65% とし、D1 を一律 B×0.1% 添加した。フロー値の測定は練り混ぜ直後と 30 分後に実施し、30 分後についてはフロー値の測定前に再度 1 分間練り混ぜた後に実施した。(以下、SP1 を添加して得た結果をフロー値 (SP1) とし、SP2 を添加して得た結果をフロー値 (SP2) とする。)

2.3 円柱モルタルの強度試験

JIS 配合のモルタルと比べてより実用的な配合として、コンクリートの粗骨材を除いた配合のモルタルを用いて圧縮強度試験を行った。対象は BB 相当品 (No.1) とそこに LSP が 20% まで混合された No.3, およびクリンカー比率が 40% 以下の No.7~12 とした。配合は表-3 に示すとおりで W/B を 2 パターン設定した。なお、基準としたコンクリート配合における単位水量は事前検討によりコンクリートのスランプが 12±2.5cm となるよう決定した。また、混和剤は SP2 を B×0.8%, D2 を B×0.02% 添加した。供試体寸法は Φ50mm×100mm とし、打ち込みから 24 時間後に脱型し、所定の材齢まで標準養生した。

表-2 粉体配合

No.	粉体配合 (%)		
	クリンカー	BFS	LSP
1	57.3	40.0	2.7
2	60.0	30.0	10.0
3	60.0	20.0	20.0
4	47.8	50.0	2.2
5	50.0	40.0	10.0
6	50.0	30.0	20.0
7	38.2	60.0	1.8
8	40.0	50.0	10.0
9	40.0	40.0	20.0
10	28.6	70.0	1.4
11	30.0	60.0	10.0
12	30.0	50.0	20.0

2.4 強度を同等としたモルタル試験

(1) モルタル配合の設計

強度を同等としたモルタルにて耐久性試験を実施した。その際、併せて細孔径分布の分析も行った。これらの試験は BB 相当品と耐久性が同等とされている西田らの粉体配合 (BFS44%, LSP15% および BFS44%, LSP25%)⁴⁾を参考に BFS44%, LSP20% とした粉体配合 (以下 No. [X] とする), さらにクリンカー比率を下げた No.12 を対象とした。モルタルの配合は材齢 28 日の圧縮強度が BB 相当品 (No.1) の W/B=50% と同等になるように、前節で測定した圧縮強度と B/W の関係から算出した W/B を用いた。なお、No. [X] の W/B の予測は次のように行った。まず、No.9 と No.12 の粉体配合は LSP20% と共通していることから、線形補間によって、BFS44%, LSP20% の W/B=40, 50% の圧縮強度を予測した。その後、圧縮強度と B/W の関係から、BB 相当品 (No.1) の W/B=50% の圧縮強度となる No. [X] の W/B を予測した。

以上より設計したモルタル配合を表-4 に示す。なお、モルタルの作製は前節と同様にした。表-4 からわかるとおり、No. [X] および No. [12] は BB と同等の強度を確保するには W/B を下げる必要があった。

(2) 細孔径分布

材齢 28 日のモルタルを 5mm 角の立方体に切断し、アセトンに浸漬させることで水和停止した後、3 日間真空デシケータ内で乾燥させた。その後、7 日間 D-dry 法による乾燥を行い、水銀圧入式ポロシメータ (Micromeritics 社製 AutoPore IV 9520) により細孔径分布を測定した。

(3) 促進中性化試験

JIS A 1152 「コンクリートの中性化深さの測定方法」お

表-3 モルタル配合

No.	W/B (%)	B(kg/m ³)			W (kg/m ³)	Ssea (kg/m ³)	Scru. (kg/m ³)	
		N	BFS	LSP				
1-40	40	432	288	0	288	552	695	
3-40		453	145	52	287	549	692	
7-40		291	437	0	291	540	681	
8-40		298	357	59	284	553	697	
9-40		300	286	129	286	549	692	
10-40		217	506	0	289	542	683	
11-40		224	429	62	286	549	691	
12-40		224	356	133	284	549	692	
1-55		55	310	207	0	284	634	799
3-55			324	103	90	284	632	797
7-55	207		310	0	284	630	794	
8-55	210		251	41	276	645	813	
9-55	214		203	91	279	638	805	
10-55	155		362	0	284	629	792	
11-55	160		307	43	281	635	800	
12-55	160		255	95	279	636	801	

表-4 モルタル配合 (強度調整)

No.	W/B (%)	B(kg/m ³)			W (kg/m ³)	Ssea (kg/m ³)	Scru. (kg/m ³)
		N	BFS	LSP			
[1]	50	341	227	0	284	614	774
[X]	39	281	327	136	287	535	674
[12]	37	246	391	145	286	520	655

よび JISA 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」を参考に一部変更を加えて実施した。本研究では、試験体寸法を 50mm×100mm×400mm とし、中性化深さの測定間隔を規定 (16mm) の 1/2 (8mm) にして実施した。なお、前養生と促進中性化の条件は上記の JIS に従い、中性化暴露面を 2 面とした。また、促進中性化期間は 1, 4, 8 週とした。促進中性化期間 4 週のもルタルについては、中性化深さを測定後、CO₂の浸透深さ方向に 2mm の間隔で研削して得た研削粉を試料とし、全炭素量を固体試料燃焼装置 (島津製作所社製 SSM-5000A) 付属の全有機体炭素計 (島津製作所社製 TOC-LCPH) にて測定した。その後、炭素は全て炭酸カルシウムとして存在していると仮定し、全炭素量から炭酸カルシウム量を求めた。

(4) 塩化物イオン浸透深さの測定

JSCE-G 572-2018「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見かけの拡散係数試験方法」を参考に硝酸銀溶液を噴霧することによって塩化物イオンの浸透深さを測定した。ただし、塩化ナトリウム水溶液中へ浸漬する前の切断は供試体両端面から約 10mm とした。

(5) 乾燥収縮試験

JISA 1129-2「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第 2 部:コンタクトゲージ方法」に準拠して実施した。なお、測定時の乾燥期間は 1, 4, 8, 13 週とした。

3. 結果と考察

3.1 粉体配合の影響に関するモルタル試験

(1) 圧縮強さ (JIS R 5201)

圧縮強さの測定結果を図-1 に示す。材齢 7 日は BFS に対して LSP を 10%置換することで強さが向上した (No.2, 5, 8, 11)。これは、同程度の BFS 比率で検討を行った既報²⁾と同じ傾向を示しており、LSP の微粉末効果によってセメントの初期水合が促進されたものと考えられた。一方で、LSP を 20%置換した場合 (No.3, 6, 9, 12) は、材齢 3 日は強さの低下はほぼないが、材齢 7 日では既報²⁾と同様に強さが低下した。材齢 7 日について、LSP 比率が高い配合では微粉末効果による強さ向上の影

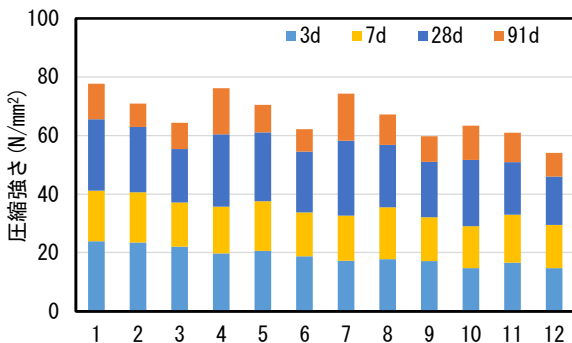


図-1 圧縮強さ

響よりも BFS 比率が低下したことによる強さ低下への影響が大きくなったためと考えられた。本研究では、広範囲の混合材比率で検討を行ったが、材齢 28 日および 91 日においては LSP の増加に伴い強さが低下する傾向みられた。BFS は長期強度の増進に寄与することから、本結果は BFS 比率の低下 (LSP による BFS の希釈効果) の影響が反映されたものと考えた。

(2) 凝結 (JIS R 5201)

凝結試験の結果を図-2 に示す。LSP 比率が一定の水準 (例えば No.2, 5, 8, 11) を比較すると BFS 比率が高いほど始発と終結が遅延し、既往の知見²⁾と一致した。また、BFS を LSP で置換することにより凝結が早まる傾向を示した。これは LSP の微粉末効果によるものと考えられ、BFS による凝結遅延を LSP によって緩和できる可能性が示唆された。

(3) 安定性 (JIS R 5201)

安定性試験の結果を表-5 に示す。BFS 比率や LSP 比率の増加による安定性への影響は認められず、本検討で実施された粉体配合の範囲においてはいずれの粉体配合においても JIS による規定値 (≦10mm) を満たした。

(4) フロー値

各フロー値をそれぞれ図-3, 図-4, 図-5 に示す。粉体配合の違いによるフロー値 (JIS) への影響はほとんど認められなかった。一方、フロー値 (SP1) およびフロー値 (SP2) においては、LSP 比率一定の配合 (例えば No.3 と No.12) を比較すると BFS 比率が高いほど増加する傾向が確認され、また、BFS 比率一定の配合 (例えば

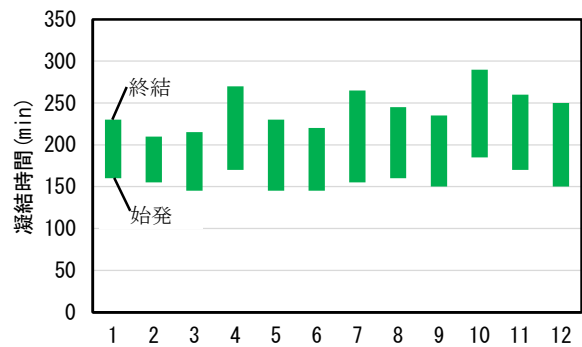


図-2 凝結時間

表-5 安定性

No.	安定性(mm)
1	1.5
2	1.0
3	2.0
4	1.0
5	1.0
6	1.0
7	1.0
8	1.0
9	2.0
10	1.0
11	1.0
12	1.0

No.4 と No.12) を比較すると LSP 比率が高いほど増加する傾向が確認された。LSP の影響は大きく、練り混ぜ直後のフロー値に対する練り混ぜ 30 分後のフロー値、すなわち流動性の保持能力も向上した。これは、LSP がセメントと異なる混和剤吸着特性を有することを示唆している。減水剤の効果はセメントの初期水和の影響や硫酸アルカリの影響を受けることが指摘されており⁶⁾、本結果は、LSP による初期水和への影響やセメントに由来する硫酸アルカリの減少等が作用して生じたと考えられた。

3.2 円柱モルタルの圧縮強度

円柱モルタルの圧縮強度を図-6 に示す。クリンカー比率の低下と LSP 比率の増加による強度低下が確認された。強度の低下は特に LSP 比率が 20% の配合で顕著であり、セメントの圧縮強さと同様の傾向を示した。

3.3 圧縮強度を同等としたモルタル試験

(1) 細孔径分布

細孔径分布を図-7 に示す。強度を同等とした場合に

においても細孔径分布が異なり、BFS 比率が高いほど毛細管空隙が微細化する傾向がみられた。

(2) 促進中性化

促進中性化試験の結果を図-8 に示す。クリンカー比率の低下に伴って中性化深さがわずかに増加した。中性化は硬化体表面からの二酸化炭素の拡散と、拡散した二酸化炭素が細孔溶液に溶解し、水酸化カルシウムが反応して炭酸カルシウムが生成することによって硬化体表面から徐々に水酸化カルシウムが消失していく現象であることから、二酸化炭素の拡散・消費がその速度に影響を与える⁷⁾。気体の拡散は細孔径分布の影響を受けることが知られており、鄭らは直径 150~15000nm の細孔量と中性化速度に相関があること示した⁸⁾。上記の細孔径における細孔量は No. [1], No. [X], No. [12] でそれぞれ 1.4%, 0.82%, 0.93% であり、前述の相関は認められなかった。一方、消費について、No. [1], No. [X], No. [12] の順でクリンカー比率が高い、すなわち生成した水酸化カルシウ

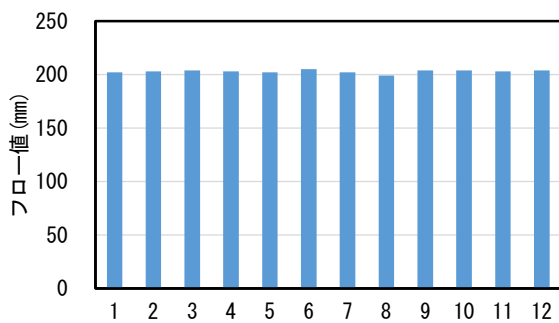


図-3 フロー値 (JIS)

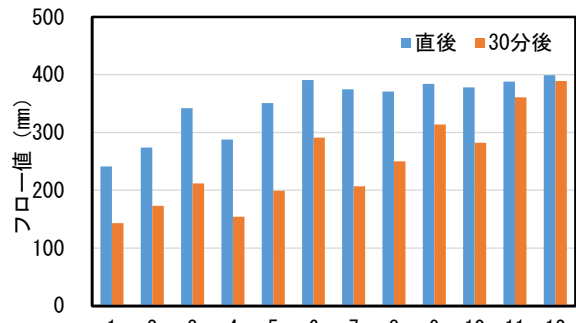


図-4 フロー値 (SP1)

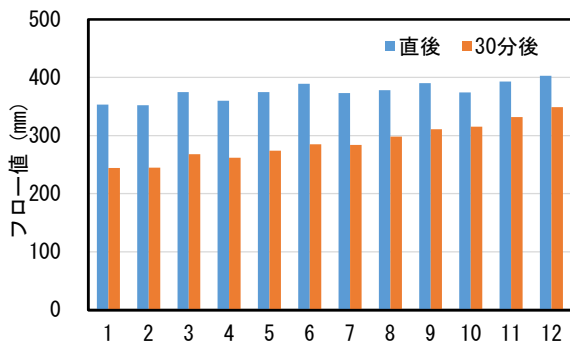


図-5 フロー値 (SP2)

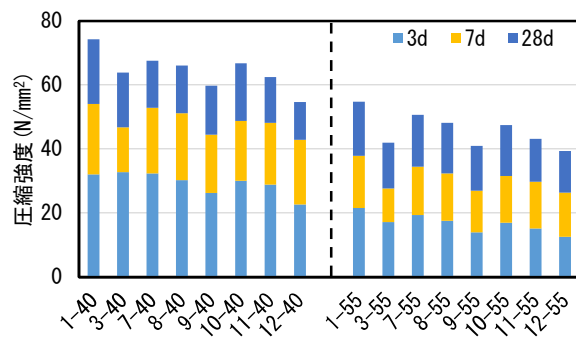


図-6 圧縮強度 (円柱モルタル)

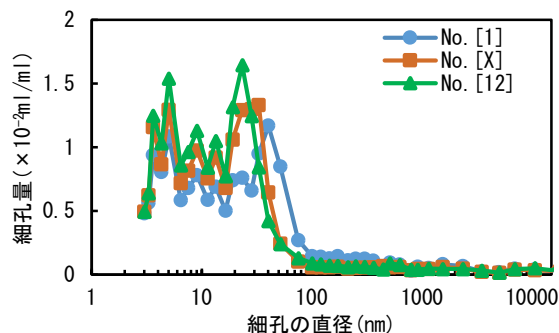


図-7 細孔径分布

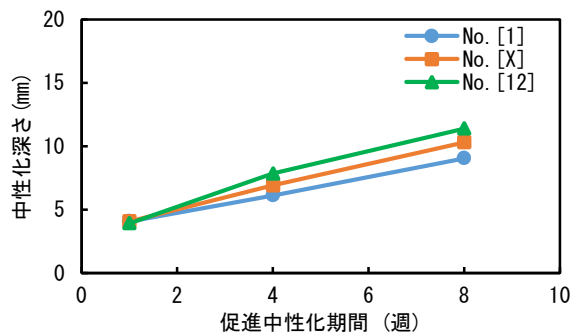


図-8 中性化深さ

ム量が多く、二酸化炭素の消費量が多いと推測される。したがって、本研究では、水酸化カルシウムの生成量の影響が中性化の傾向に強く影響したと考えられた。

炭酸カルシウムの濃度分布を図-9に示す。いずれの水準においても暴露面から11mm以上の深さで炭酸カルシウム量がほぼ一定となっていることから、それより内部へは二酸化炭素が浸透していないと考えられ、この領域で炭酸カルシウム量が異なるのは、モルタル配合の違い、すなわちLSPの混合量や海砂に含まれる炭酸カルシウム量（貝殻）を反映したものと考えられた。そこで、LSPの混合量と骨材由来の炭酸カルシウムを除くために、炭酸化していない深部の炭酸カルシウム量を差し引いた。その結果を図-9に示す。供試体表面の炭酸カルシウム濃度はNo. [1]>No. [X]>No. [12]となることからわかる。これは、消費された二酸化炭素量の大小関係を表し、中性化速度への影響は細孔径分布よりも二酸化炭素消費量が支配的であることが裏付けられた。

(3) 塩化物イオン浸透深さ

塩化物イオンの浸透深さは図-10に示すとおり No. [1]>No. [X]>No. [12]となり、クリンカー比率が低いセメントにおいても強度を同等とした場合には塩化物イオ

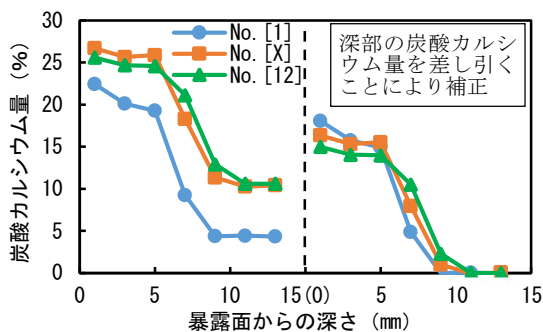


図-9 炭酸カルシウムの濃度分布

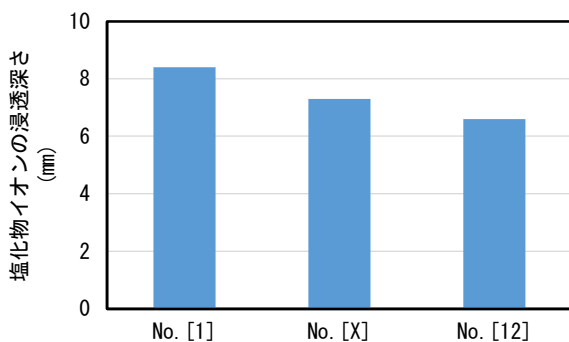


図-10 塩化物イオンの浸透深さ

ン浸透抵抗性は同等以上になることが示された。塩化物イオン浸透抵抗性は細孔径分布の影響を受けることが知られていること⁹⁾、および各水準の細孔径分布が異なっていること（「3.3 (1) 細孔径分布」）から、本結果を示した要因の一つとして細孔径分布が影響したものと考えられたが、これらの関係性については細孔の連続性や屈曲度等のより詳細な分析が必要と考える。

(4) 乾燥収縮

乾燥収縮試験の結果を図-11に示す。乾燥による長さ変化率の差はわずかであり、ほぼ同等であった。本結果はLSPをN置換した既報⁹⁾と同様の傾向を示しており、クリンカー比率を大幅に低下させた場合においても、W/Bを下げることで強度を確保した場合には、乾燥による長さ変化率が同程度となることが示された。

(5) 圧縮強度を同等としたモルタルの耐久性

ここで、圧縮強度を同等としたモルタルの耐久性と乾燥収縮特性をまとめる。強度試験、促進中性化試験、塩化物イオン浸透深さの測定および乾燥収縮試験の結果より、本検討範囲においてはクリンカー比率を大幅に下げた場合においても、W/Bを調整することで強度と耐久性を確保することが可能であり、乾燥収縮による長さ変化率も概ね変化しないことが示された。ただし、本研究では比較的短期間で耐久性試験を実施したため、より長期間での評価も必要と考える。

クリンカー比率が低下した場合でも、コンクリート強度の確保のため、W/Bを低下させると、単位B量が増加、すなわち単位N量が増加するので、コンクリートとして考えた場合にはCO₂排出量(kg-CO₂/m³)が増加する可能性がある。そこで、本検討で使用したモルタル配合からコンクリート配合に換算し、1m³当たりのCO₂排出量について次項でまとめた。

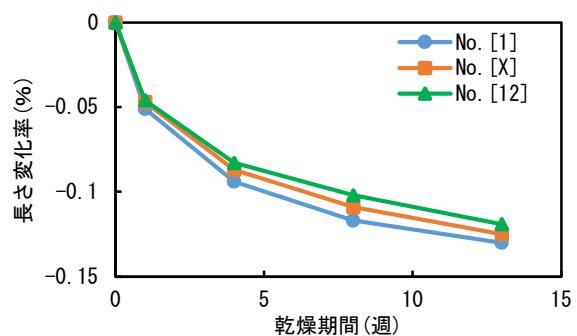


図-11 長さ変化率

表-6 コンクリート配合（強度調整）とCO₂排出量

No.	スランプ (cm)	W/B (%)	空気量 (%)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	B(kg/m ³)			W (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ³)
					N	BFS	LSP				
[1]	12	50	4.5	0.62	198	132	0	165	806	1011	175
[X]		39			163	227	84	167	702	1011	152
[12]		37			163	190	79	166	683	1011	138

(6) 環境負荷を考慮したセメントの設計

モルタル配合から換算したコンクリート配合を表一6に示す。なお、コンクリート配合の設計にあたって骨材の密度はSと粗骨材(G)でそれぞれ2.62, 2.70g/cm³とし、単位水量はNo.9とNo.12のW/B=40, 50%のデータ(2.2で述べたコンクリートの単位水量)をもとに、「2.3(1)モルタル配合の設計」と同様に、線形補間によって決定した。既報^{10, 11)}より、N, BFS, LSP, W, SおよびGのCO₂排出原単位をそれぞれ789.0, 40.5, 40.7, 0.198, 7.09 および7.09kg-CO₂/tとし、コンクリート1m³あたりのCO₂排出量を計算した。なお、BFSとLSPは粉砕にかかるCO₂排出量のみを考慮し、使用材料の比表面積から既報¹¹⁾をもとに計算した値である。結果を表一6に併せて示す。No. [1], No. [X], No. [12]のCO₂排出量はそれぞれ175, 152, 138kg-CO₂/m³となった。したがって、BB相当品(No. [1])に対するCO₂削減率は、No. [X], No. [12]でそれぞれ13%および21%となり、クリンカー比率の低下に伴ってCO₂排出量が削減されることが認められた。一方、BFS使用量(kg/m³)は増加していた。BFSの大部分はすでに活用されていること¹²⁾、高炉方式による鉄鋼製造はCO₂排出量が多く電炉方式への移行が進められており¹³⁾BFS発生量の将来的な減少が見込まれることから、コンクリートとした場合のCO₂排出量の削減について、BFS使用量の増加を伴わない検討も必要と考えられる。したがって、石灰石-高炉スラグセメントの圧縮強度を向上させる方策、例えば比表面積の増加や基材セメントの鉱物組成変更の影響を研究する等、今後はより実用性を考慮した検討が必要であろう。

4. まとめ

石灰石-高炉スラグ混合セメントにおける粉体配合が硬化体物性に及ぼす影響を把握するため、クリンカー比率が30~60%, LSP比率が0~20%としたセメントについて各種物性評価を行った。また、W/Bを調整することによって強度を同等としたモルタルの耐久性を評価した。結果と考察の概要を以下に記す。

- (1)クリンカー比率の低下に伴いセメントの圧縮強さは低下した。LSP置換により短期材齢における強さは向上する傾向がみられた。
- (2)BFS比率の増加で凝結が遅延する傾向があったが、LSPの混合によりこの遅延が緩和された。
- (3)混和剤が無添加の場合、流動性と粉体配合に相関は認められない一方で、混和剤を添加した場合はナフタリンスルホン系、ポリカルボン酸エーテル系のいずれにおいてもBSF比率やLSP比率が高いほど良好な流動性を示した。特にLSPの影響が顕著であった。

- (4)LSPを20%含有したセメントは、圧縮強度を同等とすることで耐久性をほぼ低下させることなくCO₂を削減可能なことが示された。一方で、将来的に発生量の減少が見込まれるBFSの単位量が増加するため、実用性を考慮した更なる検討が必要と考えられた。

参考文献

- 1) セメント協会：カーボンニュートラルに向けた技術対応と標準化への取り組み, 2024.10
- 2) 後藤壮, 桐野裕介, 兵頭彦次：石灰石-高炉スラグ混合セメントのモルタル物性とその影響要因に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.77, pp.197-205, 2023
- 3) 近藤早瑛, 扇嘉史, 細川佳史：石灰石-高炉スラグ混合セメントの各種物性とCO₂排出量削減効果, 土木学会全国大会年次学術講演会, Vol.79, V-695, 2024
- 4) 西田豊一, 高尾昇, 田中幸生, 中西陽一郎：石灰石微粉末を利用した環境負荷の低い混合セメントの開発, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.375-381, 2013.2
- 5) 上村克郎：減水剤, コンクリート・ジャーナル, Vol.8, No.3, pp.17-23, 1970.3
- 6) 山田一夫, 羽原俊祐, 本間健一：セメントの初期水和活性がポリカルボン酸系減水剤の分散能力に及ぼす影響, コンクリート工学論文集, Vol.11, No.2, pp.83-90, 2000.5
- 7) 野口貴文ほか：コンクリート構造物の長期性能評価-材料劣化の予測モデル-, コンクリート工学, Vol.50, No.11, pp.1057-1063, 2012.11
- 8) 鄭載東, 平井和善, 三橋博三：中性化速度に及ぼすコンクリートの調合及び細孔構造の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.61-73, 1990.1
- 9) 羽原俊祐, 沢木大介：硬化コンクリートの空隙構造とその物性, 石膏と石灰, No.240, pp.314-323, 1992.9
- 10) 日本コンクリート工学会：セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書, 2024.9
- 11) 盛岡実, 前田悦孝, 坂井悦郎, 松下博通：高炉徐冷スラグと高炉水砕スラグを併用した32.5N/mm²クラスセメントに関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.15, No.2, pp.79-88, 2004.5
- 12) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報(2023年度版), 2024.7
- 13) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構：鉄鋼業における二酸化炭素排出削減に係る動向と原料炭需要への影響等調査(令和3年度), 2022.3