

論文 石灰石-高炉スラグセメントを用いたコンクリートの流動性および 間隙通過性能に関する検討

安田 瑛紀^{*1}・吉田 亮佑^{*1}・細川 佳史^{*2}・石田 征男^{*2}

要旨: 混合材に石灰石と高炉スラグを用いた石灰石-高炉スラグセメントについて、流動性や間隙通過性能を評価した。石灰石の添加によりセメントペースト中の粉体粒子の充填率は高くなる場合はセメントペーストのフローも大きくなり、余剰水膜厚さが大きくなるためと考えられた。普通強度および高強度コンクリートに対してボックス充填試験や J リングフロー試験により間隙通過性能を評価したところ、特にクリンカファクタが低い場合には石灰石の添加による改善効果が大きくなった。モルタルのレオロジー一定数との比較から、モルタルの塑性粘度と間隙通過性能の関係は強度レベルによって異なる可能性が示唆された。

キーワード: 石灰石, 高炉スラグ, 混合セメント, 流動性, 間隙通過性能, レオロジー

1. はじめに

セメント産業では 2050 年までのカーボンニュートラルの達成に向けた様々な取組みを進めており¹⁾、その一つがセメント中に含まれるクリンカ比率（以下、クリンカファクタ）の低減である。この対策によりクリンカ製造時の熱エネルギーや石灰石の脱炭酸反応に由来する CO₂ 排出量を削減でき、国内でもポルトランドセメントに含まれる少量混合成分の増量に向けた検討^{例え²⁾}が進められている。高炉セメントのような混合セメントの利用拡大も期待されるが、製鉄方式の電炉への移行等により、高炉スラグの発生量は今後減少することも予想³⁾されている。そこで、高炉スラグの一部を国内に豊富な資源である石灰石に置き換えた混合セメント（以下、石灰石-高炉スラグセメント）についても検討⁴⁾されている。

混合材として用いる石灰石については、コンクリートのフレッシュ性状への貢献が指摘⁵⁾されており、ブリーディングの抑制や材料分離抵抗性の向上といった効果が知られている。その一方で施工時におけるフレッシュ性状への要求は近年高度化しており、熟練工の減少や過密配筋の増加といった背景から、型枠や鉄筋の隅々に行き渡るような、間隙通過性能の高いコンクリートが求められている。このような背景の下、石灰石-高炉スラグセメントのフレッシュ性状や施工性への影響を把握することを目的に種々の試験を行い、クリンカファクタや石灰石量の異なる石灰石-高炉スラグセメントを用いたセメントペースト、モルタルおよびコンクリートの性状を整理した。その上で、石灰石の添加による流動性や間隙通過性能への貢献が大きくなるセメント処方やコンクリート配合を検討し、その要因について考察した。

2. 試験内容

2.1 試験の概要および分類

本試験では、次に記す 3 シリーズの試験を行った。すなわち、シリーズ 1：化学混和剤を添加しないセメントペースト試験、シリーズ 2：普通強度および高強度コンクリートを対象にしたフレッシュ性状試験、シリーズ 3：化学混和剤を添加したペーストおよびモルタルのレオロジー試験の 3 つである。試験に供する混合セメントの水準は表-1 に示す全 12 水準とし、一部の水準（No. 2,

表-1 混合セメントの水準

No.	セメント	高炉スラグ	石灰石	シリーズ
1	57.3 %	40.0 %	2.7 %	1, 2, 3
2	60.0 %	30.0 %	10.0 %	1
3	60.0 %	20.0 %	20.0 %	1
4	47.8 %	50.0 %	2.2 %	1, 2, 3
5	50.0 %	40.0 %	10.0 %	1, 2, 3
6	50.0 %	30.0 %	20.0 %	1
7	38.2 %	60.0 %	1.8 %	1, 2, 3
8	40.0 %	50.0 %	10.0 %	1, 2, 3
9	40.0 %	40.0 %	20.0 %	1, 2, 3
10	28.6 %	70.0 %	1.4 %	1
11	30.0 %	60.0 %	10.0 %	1
12	30.0 %	50.0 %	20.0 %	1, 2, 3

表-2 使用材料

種類	記号	物性等
水	W	上水道水
普通ポルトランドセメント	C	密度 3.14g/cm ³ , プレーン比表面積 3,370cm ² /g, 石灰石含有率 4.5%
高炉スラグ微粉末 4000	BS	密度 2.90g/cm ³ , プレーン比表面積 4,510cm ² /g
石灰石微粉末	L1	密度 2.71g/cm ³ , プレーン比表面積 4,720cm ² /g
	L2	密度 2.72g/cm ³ , プレーン比表面積 6,620cm ² /g
	L3	密度 2.71g/cm ³ , プレーン比表面積 7,720cm ² /g
細骨材	S	山砂, 表乾密度 2.59g/cm ³ , 吸水率 1.62%
粗骨材	G	碎石, 表乾密度 2.65g/cm ³ , 最大粒径 20mm, 吸水率 0.48%
AE 減水剤標準系 (1 種)	AD	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体
AE 剤	AE	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物, 消泡剤内添タイプ

*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 博士 (工学) (正会員)

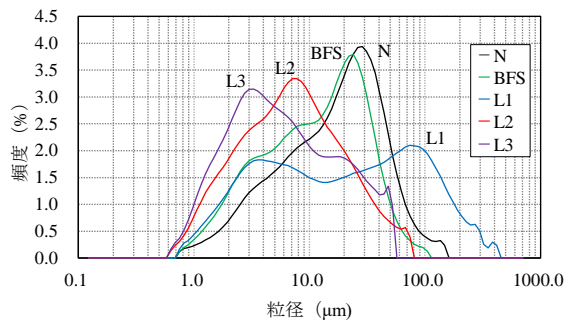


図-1 粉体の粒度分布

表-3 コンクリートの配合条件

分類	W/C	W (kg/m ³)	粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	フレッシュ性状		混和剤 (C×%)		
				スランブ, スランブフロー (cm)	空気量 (%)	AD	AE	SP
普通強度	調整	調整	0.62	12±1.5	4.0±1.0	0.70	0.0035	-
高強度	30	170	0.54	60±5.0	1.5±0.5	-	-	調整

表-4 フレッシュ性状試験の項目

分類	項目	備考, 試験規格等
共通	スランブまたは スランブフロー	スランブ: JIS A 1101 スランブフロー: JIS A1150
	空気量	JIS A 1128 (空気室圧力方法)
普通強度のみ	加振ボックス充填試験	JSCE-F701-2016
高強度のみ	ボックス充填試験	JSCE-F511-2018
	Jリングフロー試験	JIS A 1159

3, 6, 10, 11) はシリーズ1のみ実施した。混合セメントのクリンカファクタ (少量混合成分の石灰石を除いた、クリンカと石膏の和) は 30, 40, 50 および 60% とし、石灰石の混合量を 0, 10 および 20% と変動させた。ただし、基材のセメント中に少量混合成分として石灰石が含まれるため、石灰石量を 0% とみなした水準 (No.1, 4, 7, 10) においても、実際には 2% 程度の石灰石が含まれている。

2.2 使用材料

試験に使用した材料は表-2 に示すとおりである。混合セメントの基材には普通ポルトランドセメントを、混合材には高炉スラグ微粉末および石灰石微粉末をそれぞれ用意した。石灰石微粉末は粒度が異なる L1, L2 および L3 の 3 つを用意し、シリーズ1 でその影響を比較し、シリーズ2, 3 では L2 のみを用いた。それぞれの粉体の粒度分布は図-1 に示すとおりである。モルタル・コンクリートの作製では、細骨材に山砂を、粗骨材に碎石をそれぞれ用いた。化学混和剤は表中に示した 3 種類を用意し、後述する強度レベルに応じて使い分けた。

2.3 シリーズ1 (セメントペースト試験)

セメントと水 (化学混和剤は添加しない) から構成される最も単純な系の挙動を把握することを目的に、セメントペーストのフローと粉体粒子の充填率を測定した。水セメント比は 50% (質量比) に固定し、表-1 に示した混合セメントを用いてペーストを作製した。この際、石灰石微粉末には粒度の異なる 3 つを用意したため、セメント処方 (計 12 水準) と石灰石粒度 (計 3 水準) がそれぞれ異なる 28 水準のペーストを作製した。

ケミカルミキサーを用いてペーストを練り混ぜ、JIS R 5201 を参考に落下振動の無いフローを測定した。また、丸岡ら⁶⁾の手法を参考に、フレッシュ状態のペーストを遠心分離により上澄み水の層と混合セメントの層を分離し、粉体粒子の充填率を測定した。遠沈管に 10g の試料を量り入れ、遠心分離機で 3000rpm の速度で 5 分間の遠心分離を行い、式 (1) により充填率を算出した。

$$\phi_c = \frac{V_p}{V_p + V_w} = \frac{V_p}{V_p + (V - V_{wu})} \quad (1)$$

ここに、 ϕ_c : 粉体粒子の充填率 (%), V_p : 粉体の容積 (mL), V_w : 粉体粒子間の水の容積 (mL), V : 練混ぜ水の容積 (mL), V_{wu} : 遠心分離を行った後の上澄み水の容積 (mL)

さらに、セメントペーストにおける余剰水膜量およびその厚さを、著者らの過去の検討⁷⁾を参考に、式 (2), (3) により算出した

$$W_{exc} = 10^4 \cdot (G_p - G_{pp}) \quad (2)$$

$$\delta_w = 10^4 \cdot W_{exc} / S_p = 10^8 \cdot (G_p - G_{pp}) / S_p \quad (3)$$

ここに、 W_{exc} : 余剰水量 (cm³/セメントペースト m³), G_p : 混合セメントの充填率 (%), G_{pp} : セメントペースト体積中に占める粉体の体積比率, δ_w : 余剰水膜厚さ (μ m), S_p : セメントペースト 1m³ 中の粉体の表面積 (cm²/g)

2.4 シリーズ2 (コンクリート試験)

普通強度レベルおよび高強度レベルの 2 つを設定し、表-3 に示す配合を基本としてコンクリートを作製した。普通強度レベルの配合は、目標スランブを 12cm, 目標空気量を 4.0% とした AE コンクリートである。化学混和剤には AE 減水剤 (AD) および AE 剤 (AE) を使用し、それぞれの添加量は統一した上で、目標範囲のスランブが得られるよう、単位水量を調整した。また、水セメント比 (以下、W/C) は混合セメントの種類によって変動させ、No.1 のセメントを用いて W/C が 50% の配合を基本として、これと 28 日圧縮強度が同程度になるよう調整した。高強度レベルでは、水セメント比は 30%、単位水量は 170kg/m³ にそれぞれ固定した。スランブフローの目標値は 60cm を目安として、化学混和剤には高性能 AE 減水剤 (以下、SP) のみを使用した。事前試験の結果、全水準でスランブフローが同値になるよう SP 添加量のみで調整することは困難であったため、クリンカファクタ毎に SP 添加量を統一して比較を行った。

普通強度レベルでは容量 55L のパン形強制練りミキサーを、高強度レベルでは容量 60L の水平強制二軸練りミキサーをそれぞれ使用した。フレッシュ性状として、表-4 に示す試験をそれぞれ実施した。間隙通過性能を評価するため、普通強度コンクリートでは加振ボックス充填試験を、高強度コンクリートではボックス充填試験を行った。前者では棒状パイプレータ (呼び径 28mm, 振動数 250Hz) による振動を与えて、後者では締固めを行わずコンクリ

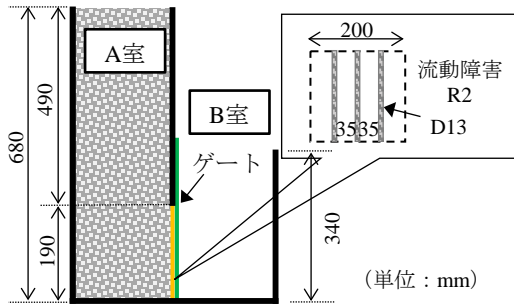


図-2 ボックス型容器の寸法

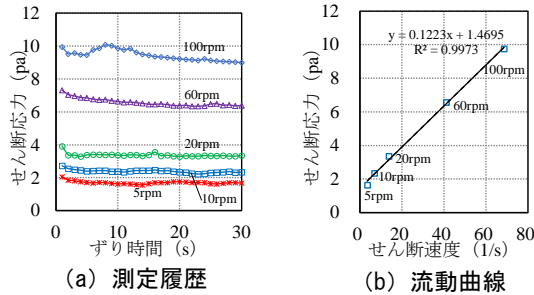


図-3 回転粘度計の測定例
(No. 4 普通強度ペースト)

ートの自己流動による条件にてそれぞれ評価した。両試験では共通して、図-2 に示すボックス型容器を用い、これは JSCE-F511 に規定されるものである。流動障害には R2 クラスのものを用いた。いずれの試験でも A 室にコンクリートを充填したのち、ゲートを開放して B 室にコンクリートが流入する速度や充填高さを測定した。加えて、高強度コンクリートでは J リングフロー試験を行い、間隙通過性能の指標である PJ 値を求めた。さらに、日本建築学会の「高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説」⁸⁾ (以下、高流動コン指針) を参考に、間隙通過性能を 3 段階で評価した。本検討ではスランプフローの目標目安を 600mm としたため、PJ 値が 30mm 以下では区分 B、30mm 超 40mm 以下では区分 C、40mm 超の場合は区分 D として評価した。

硬化後のコンクリート強度として、圧縮強度 (JIS A1108 準拠、寸法 $\phi 100 \times 200$ mm の円柱試験体) および割裂引張強度 (JIS A 1113 準拠、寸法 $\phi 100 \times 100$ mm の円柱試験体) をそれぞれ測定した。材齢 1 日で脱型した後、所定の材齢まで水中養生 (20°C) を行い、試験材齢は 7 日および 28 日とした。

2.5 シリーズ 3 (レオロジー試験)

前節のシリーズ 2 で作製したコンクリートについて、骨材部分を取り除いたペーストおよびモルタルを別途作製して試験した。練混ぜには容量 5L のホバートミキサーを用いて、普通強度および高強度レベルのペーストおよびモルタルをそれぞれ作製し、回転粘度計によりレオロジー定数を測定した。回転粘度計には二重円筒形の装置 (BROOKFIELD 社製、RST-CC Rheometer) を用い、外

表-5 シリーズ 1 におけるペーストの試験結果

No.	CF	フロー (mm)			Φ_c (%)			δ_w (μ m)		
		L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	60	233			48.43			0.183		
2		246	225	246	50.49	49.35	50.24	0.228	0.197	0.211
3		245	218	223	50.71	49.62	49.99	0.231	0.191	0.190
4	50	240			49.62			0.197		
5		237	220	242	50.63	49.45	50.33	0.219	0.188	0.201
6		261	235	229	51.15	49.43	50.34	0.227	0.177	0.186
7	40	217			49.80			0.191		
8		259	220	225	50.77	49.81	50.34	0.210	0.184	0.191
9		260	227	212	50.74	49.45	49.76	0.208	0.168	0.166
10	30	218			49.86			0.183		
11		233	215	231	50.06	49.98	49.6	0.186	0.178	0.167
12		262	212	216	51.21	49.88	50.42	0.206	0.167	0.169

CF: クリカファクタ, Φ_c : 粉体粒子の充填率, δ_w : 余剰水膜厚さ

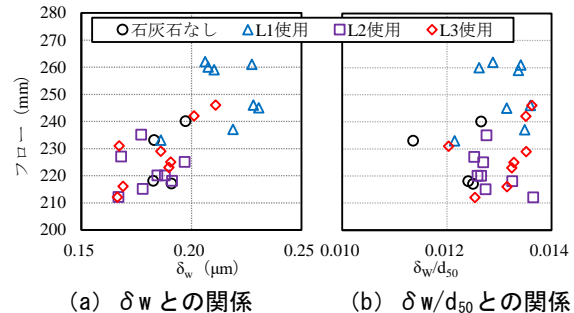


図-4 化学混和剤を添加しないペーストのフロー

筒半径は 21mm である。内円筒は測定試料により使い分け、ペーストでは半径 18mm かつ高さ 70mm、モルタルには内径 11mm かつ高さ 39mm のものをそれぞれ用いた。試験条件は山田ら⁹⁾の検討を参考に、5 組の回転速度 (5, 10, 20, 60, 100rpm) を 30 秒間与え続け、1 秒間隔でせん断応力とせん断速度を測定した。得られたせん断履歴の例は図-3 (a) に示すとおりであり、ずり時間 10s におけるせん断応力とせん断速度を同図 (b) のようにプロットした。この流動曲線をビンガムモデルにより線形近似し、傾きを塑性粘度、切片を降伏値とした。

3. 試験結果

3.1 シリーズ 1 におけるフローおよび余剰水膜厚さ

化学混和剤を添加しないセメントペーストを対象とした、シリーズ 1 の試験結果を表-5 にまとめる。フレッシュ時のフローは 210~260mm 程度の範囲であり、混合材の処方や石灰石の比表面積によって変化した。クリンカファクタが 40 および 30% の低い水準では石灰石の添加によりフローが向上する傾向であり、特に比表面積の最も小さい L1 で顕著である。

既往の検討⁷⁾を参考に、粉体粒子の充填率から算出した余剰水膜厚さ (δ_w)、およびセメントの平均粒径 (d_{50}) に対する δ_w の比とフローの関係を図-4 に示す。同図

(a) より、 δ_w の大きいセメントを用いた場合のフローが高くなっており、流動性に寄与する水量が増加したためにフローが大きくなったと唆される。これに対して δ_w/d_{50} とフローの関係はばらつきが大きくなっており、本検討の範囲では、 δ_w の方がペーストの流動性に及ぼ

表-6 普通強度コンクリートの試験結果

No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量						混和剤 (C×%)		スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	加振ボックス充填試験					f'_c (N/mm ²)		f_t (N/mm ²)	
			W	C	BS	L2	S	G	AD	AE			t_{190} (s)	t_{300} (s)	V_{pass} (mm/s)	δ_A	δ_B	7日	28日	7日	28日
1	50	44.8	165	198	132	0	791	997			11.0	3.5	7.4	11.9	24.4	1.10	0.98	23.3	41.3	2.40	3.74
4	49	44.5	165	168	168	0	783	997			12.5	3.5	5.4	17.2	9.32	1.14	0.91	23.1	39.8	2.32	3.81
5	47	43.9	166	177	141	35	764	997			13.0	4.0	6.2	18.3	9.09	1.19	0.92	26.5	43.4	2.63	4.31
7	47	43.8	167	142	213	0	759	997	0.70	0.0035	11.5	4.2	11.8	35.8	4.58	1.22	0.89	24.7	41.7	2.32	3.85
8	44	43.2	167	151	189	38	741	997			11.5	4.0	8.5	24.5	6.88	1.21	0.90	30.3	46.2	3.08	4.36
9	41	42.3	166	162	162	81	714	997			10.5	3.5	6.6	21.3	7.48	1.17	0.92	30.8	48.3	3.01	4.26
12	40	42.0	167	124	206	83	707	997			10.0	3.0	13.4	35.0	5.09	1.19	0.92	31.0	47.2	3.14	4.38

t_{190} : 190mm 到達時間, t_{300} : 300mm 到達時間, V_{pass} : 間隙通過速度, δ_A , δ_B : A, B 室の粗骨材量比率, f'_c : 圧縮強度, f_t : 割裂引張強度

表-7 高強度コンクリートの試験結果

No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						SP (C×%)	スランプフロー試験		空気量 (%)	Jリングフロー試験				ボックス充填試験		f'_c (N/mm ²)		f_t (N/mm ²)		
			W	C	BS	L2	S	G		SF	T_{500}		SF _J	T_{J500}	PJ 値 (mm)	区分	B_{time} (s)	B_h (mm)	δ	7日	28日	7日	28日
1	30	47.5	170	340	227	0	768	869	1.05	630	5.00	1.00	500	8.13	35	C	21.0	211	1.07	72.8	93.4	5.53	6.41
4		47.4	170	283	283	0	764	869	1.05	645	5.05	1.40	520	10.5	32	C	26.2	282	1.06	71.9	95.6	5.19	6.56
5		47.3	170	297	227	43	762	869	1.05	670	3.86	1.80	645	5.30	19	B	29.6	210	1.02	73.4	94.6	5.44	5.51
7		47.2	170	227	340	0	760	869	1.00	590	5.57	1.60	505	16.7	42	D	27.2	301	1.02	69.1	92.7	5.12	6.18
8		47.2	170	237	283	46	758	869	1.00	650	4.70	2.00	560	9.14	35	C	23.8	319	1.05	69.8	87.7	5.17	6.81
9		47.0	170	237	227	103	754	869	1.00	670	3.76	1.70	585	5.82	29	B	26.7	289	1.06	70.7	86.0	5.24	5.56
12		46.9	170	178	283	105	750	869	0.90	595	4.02	1.50	515	9.50	35	C	23.6	291	1.04	62.1	79.8	4.60	6.17

SF : スランプフロー, T_{500} : 500mm 通過時間, SF_J : Jリングフロー, T_{J500} : Jリングフロー500mm 通過時間, B_{time} : 充填停止時間, B_h : 充填高さ, δ : 障害通過後の粗骨材量比率, f'_c : 圧縮強度, f_t : 割裂引張強度

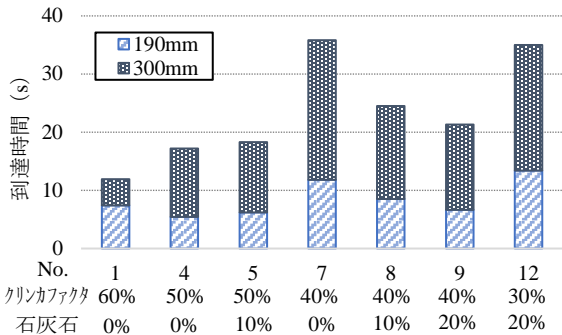


図-5 普通強度コンクリートの加振ボックス充填試験における所定高さへの時間

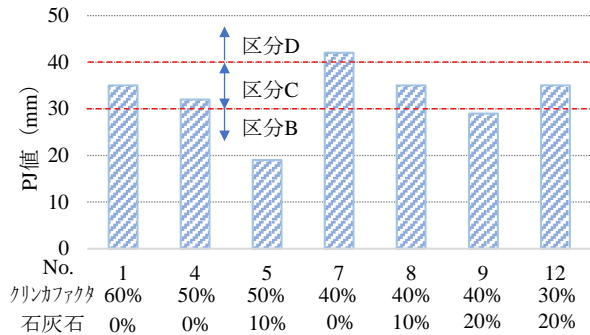


図-6 高強度コンクリートのJリングフロー試験におけるPJ値と高流動コン指針⁸⁾における区分

す影響が強いと考えられる。しかしながら、比表面積の大きいL2やL3を用いた場合の δ_w およびフローは無添加より必ずしも大きくなっておらず、石灰石による貢献がみられない場合もある。この要因として、本シリーズでは化学混和剤を添加しておらず、微細な石灰石を用いた場合は凝集を生じる可能性がある。そこで、化学混和剤を用いたシリーズ2以降の検討を重ねた。

3.2 シリーズ2におけるコンクリートのフレッシュ性状

普通強度および高強度コンクリートにおける試験結果の概要を表-6および表-7にそれぞれ示し、強度レベル別に以下に整理する。

(1) 普通強度コンクリート

水セメント比を40~50%の間で調整した普通強度コンクリートにおいて、目標のスランプを得るための単位水量はほとんど変わらず、基準とした165kg/m³とくらべて1, 2kg/m³増える程度であった。石灰石-高炉スラグセメントを用いる際、強度を担保するためにW/Cを小さくしたとしても、必要な単位水量への影響はわずかであると考えられる。空気量についての影響もほとんどなく、AE

剤の添加量を固定しても概ね一定の空気量が得られた。間隙通過性能に関して、加振ボックス充填試験においてB室の高さ190mmおよび300mm到達時間を図-5に示す。また、この区間をコンクリートが通過する速度である V_{pass} は表-6中に記している。 V_{pass} はクリンカファクタが高い水準ほど速く、No.1(クリンカファクタ60%)で24mm/s程度と最大で、次いでNo.4および5で9mm/s程度であった。石灰石量による影響としては、クリンカファクタ40%のNo.7, 8, 9において、石灰石添加による改善傾向がみられた。本試験方法では、材料分離を生じる場合には間隙通過性能が低下して V_{pass} は大きくなることが報告⁸⁾されている。そこで間隙通過後のB室から採取したコンクリートについて、配合表の粗骨材量と試料中の粗骨材量の比率 δ_B を算出したところ、最小でも0.89であった。 δ_B が0.85を下回るような場合にはコンクリートの初期品質低下のリスクが指摘されている¹¹⁾ことを考慮すると、本検討ではいずれの水準も顕著な材料分離は生じておらず、その中でもクリンカファクタや石灰石添加による差がみられたものとする。コンクリー

ト強度については、No.1, 4, 5, 7 では 42N/mm²程度の同等強度が得られたものの、No.8, 9, 12 の3水準では47N/mm²前後のやや高い強度が得られた。これら3水準は必要以上に W/C を低減したものと考えられるが、そのような場合も所要のスランプを得るための単位水量は他の水準とも大きく変わらなかった。

(2) 高強度コンクリート

W/C を 30% に固定した高強度コンクリートにおける S P 添加量は、No.1, 4, 5 (クリンカファクタ 60 および 50%) では添加量を C×1.05%, No.7, 8, 9 (クリンカファクタ 40%) では 1.0%, No.12 (クリンカファクタ 30%) では 0.95% である。換言すれば、クリンカファクタが小さいほど SP 必要量は少なくなる傾向がみられた。クリンカファクタが 40% のとき、No.7 から石灰石量を増やした No.8 および 9 ではスランプフローが最大 80mm ほど大きくなり、明確な流動性の向上がみられた。J リングフロー試験における PJ 値と、間隙通過性能の区分を図-6 に示す。間隙通過性能の指標である PJ 値についても、石灰石の添加によって小さくなり、区分についても No.7 の D から No.9 では B まで改善している。高流動コン指針⁸⁾によると、区分 D は鉄筋間隔が 40mm より広い場合を、区分 C では鉄筋間隔 40mm 程度で振動締固めを伴う場合、区分 B は鉄筋間隔 40mm 程度で自己充填での打込みを想定していることから、石灰石の添加量によって振動締固めの要否が異なるほど施工性は改善したことが示唆された。No.7~9 において、J リングフロー試験においては明確なフローの増加が確認できる一方で、ボックス充填試験における充填高さ B_h をくらべると、No.9 よりも 8 の方が改善効果は大きいように、試験方法によって間隙通過性能の評価は異なる。実施工においては、部材の形状や打込み方法等に応じて適切な試験方法を選択することが望ましいと考えられる。

3.3 シリーズ 3 におけるレオロジー定数

回転粘度計によって測定したペーストおよびモルタルのレオロジー定数は表-8 にまとめるとおりである。なお高強度レベルでは、ペーストおよび No.9 を用いたモルタルにおいて、降伏値がわずかにマイナスに算出され、既往の文献¹²⁾で指摘されているように、ポリカルボン酸系の高性能減水剤を用いた際の現象とみられた。そこでこれらの水準では文献¹²⁾と同様に降伏値をゼロとした。

ペーストとモルタルにおけるそれぞれの塑性粘度の関係を整理したものが図-7 であり、図中には水準 No. を併記している。いずれの強度レベルにおいてもペーストよりモルタルの塑性粘度の方が大きく、細骨材の有無による影響が表れている。普通強度レベルではペーストとモルタルの塑性粘度には良好な相関がみられるとともに、水準 No. が大きくクリンカファクタおよび石灰石量が大き

表-8 回転粘度計により測定したレオロジー定数

	No.	W/C (%)	ADor SP (C×%)	ペースト		モルタル	
				塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)	塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)
普通強度	1	50	0.70	0.102	2.65	1.70	2.32
	4	49	0.70	0.122	1.47	1.70	2.28
	5	47	0.70	0.145	2.92	1.92	2.59
	7	47	0.70	0.181	2.69	1.80	2.83
	8	44	0.70	0.243	3.68	2.26	3.21
	9	41	0.70	0.342	6.26	2.67	3.83
高強度	12	40	0.70	0.436	7.11	2.72	7.23
	1	30	1.05	0.787	0	4.11	6.00
	4	30	1.05	0.531	0	2.79	4.45
	5	30	1.05	0.546	0	3.14	1.70
	7	30	1.00	0.518	0	2.96	1.64
	8	30	1.00	0.404	0	3.61	3.06
	9	30	1.00	0.568	0	2.42	0
	12	30	0.90	0.488	0	3.39	1.31

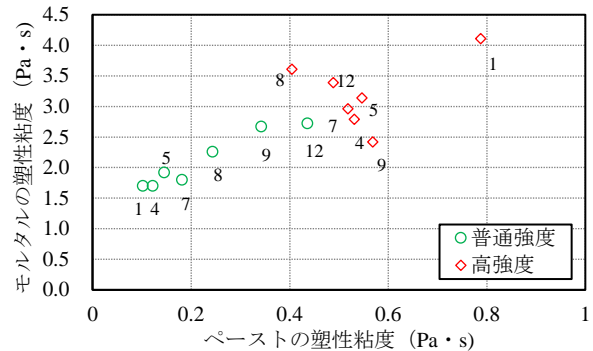


図-7 ペーストおよびモルタルの塑性粘度

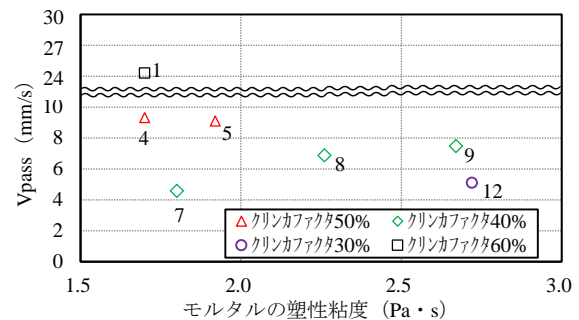


図-8 普通強度レベルにおけるモルタルの塑性粘度と間隙通過速度 V_{pass} の関係

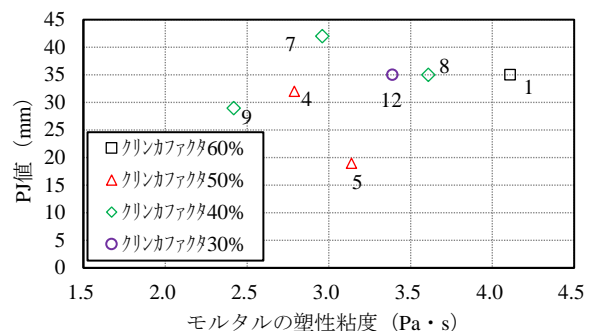


図-9 高強度レベルにおけるモルタルの塑性粘度と間隙通過速度 V_{pass} の関係

きいほど塑性粘度は大きくなっている。対して高強度レベルの傾向は異なり、No.1, 5, 7 では普通強度レベルの延長線上に位置しているが、その他の水準ではこの傾向か

ら外れている。詳細な理由については今後の課題としたいが、化学混和剤の種類の違い等により、高強度レベルでは細骨材の存在によるモルタルの塑性粘度への影響が卓越する可能性が考えられる。

シリーズ2で行った間隙通過性能の試験結果とモルタルの塑性粘度を比較するため、普通強度レベルにおける加振ボックス充填試験における V_{pass} と塑性粘度を整理したものが図-8 である。石灰石の添加による改善がみられた No.7 から 9 ではモルタルの塑性粘度は大きくなっていることから、W/C の調整および石灰石の添加によって材料分離抵抗性が高くなった結果として、加振条件における間隙通過速度である V_{pass} は大きくなったことが示唆される。その一方、7 水準全体で比較すると、 V_{pass} が最大である No.1 は塑性粘度が最小であるため、モルタルの塑性粘度以外の要因によっても V_{pass} は変化するものと考えられる。高強度レベルにおいて、J リングフロー試験における PJ 値とモルタルの塑性粘度を整理して図-9 に示す。この図によれば塑性粘度と PJ 値の関係は明確ではなく、コンクリートの間隙通過性能は種々の要因の影響を受けるものと推察される。コンクリートの間隙通過性能は、本検討でレオロジー定数を求めたモルタルの変形性能のほかにも、粗骨材のアーチング等も影響することから、これらの要因について今後更なる検討を重ねたい。

4. まとめ

高炉スラグと石灰石を併用した石灰石-高炉スラグセメントについて、以下の知見を得た。

- (1) 化学混和剤を添加しないセメントペーストにおいて、石灰石の添加によってフローが大きくなる場合、粉体粒子の充填率と余剰水膜厚さも大きくなる傾向がみられた。
- (2) 普通強度コンクリートにおいて、水セメント比を最大 10% 低減しても、単位水量をほとんど変化させることなく所要のスランプが得られた。また、加振ボックス充填試験における間隙通過速度はクリンカファクタが高いほど大きくなった。クリンカファクタの小さい場合には石灰石の添加による改善がみられ、粘性の向上により材料分離抵抗性が高くなった可能性が示唆された。
- (3) 高強度コンクリートにおいて、クリンカファクタが小さくなるほど目標のスランプフローを得るための SP 必要量は小さくなる傾向がみられた。また、J リングフロー試験による間隙通過性能においても、クリンカファクタが 40% のときに石灰石の添加による改善がみられた一方で、モルタルの塑性粘度との明確な関係は認められなかった。

参考文献

- 1) Global Cement and Concrete Association、Concrete Future – GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete, 2021
- 2) 平尾宙, 野上暁, 蒲生真也, 小林幸一: セメントの少量混合成分増量がコンクリート特性に及ぼす影響の検証 その1 実機により試製したセメントの品質, 第 78 回セメント技術大会講演要旨集, pp. 128-129, 2024
- 3) 独立行政法人石油天然ガス・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, 2022
- 4) 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, No.1, pp.197-205, 2023
- 5) E. Sakai, S. Hoshino, Y. Ohba and M. Daimon: The Fluidity of Cement Paste with various types of inorganic powders, Proc. 10th Int'l Cong. Chem., Cement, Vol. 2, pp 2 ii002 (8 p), 1997
- 6) 丸岡正知, 藤原浩已, 下山善秀, 富田六郎: 石灰石微粉末の各種特性とモルタルのフレッシュ性状の関係, 土木学会論文集, No. 725, V-58, pp. 101-112, 2003
- 7) 石田征男, 上田賢司, 佐藤嘉昭, 大谷俊浩: 加熱改質フライアッシュを用いたセメントペーストおよびモルタルのコンシステンシーとその評価指標に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 1323-1328, 2016
- 8) 日本建築学会: 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針・同解説 第 2 版, 2021 年
- 9) 山田義智, 東舟道裕亮, 上原義己, 崎原康平: セメントペーストのレオロジー定数測定とマーカー粒子粘性有限要素法によるセメントペーストフロー解析, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 85, No. 756, pp. 139-148, 2019 年
- 10) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 94, コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会 (341 委員会) 委員会報告書, 2011
- 11) 中村敏之, 橋本紳一郎, 吉村徹, 市山大輝: 鉄筋間隙通過におけるコンクリートの材料分離が品質に及ぼす影響, プレストレストコンクリート工学会第 27 回シンポジウム論文集, pp.555-560, 2018 年
- 12) 東舟道裕亮, 山田義智, 上原義己, 崎原康平: セメントペーストのフロー特性とレオロジー定数に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No.1, pp. 1153-1158, 2017