

◇論文◇

石灰石－高炉スラグセメントがコンクリートの
流動性および間隙通過性に与える影響Fluidity and Passability Between Reinforcing Bars of Concrete
Using Limestone-Blast Furnace Slag Blended Cement安田 瑛 紀*, 吉田 亮 介*,
細川 佳 史**, 石田 征 男***YASUDA, Eiki*; YOSHIDA, Ryosuke*;
HOSOKAWA, Yoshifumi**; ISHIDA, Masao***

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。余剰水膜理論に基づいた検討より、石灰石の添加によって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、余剰水膜厚さによる影響と考えられた。普通強度および高強度コンクリートを対象に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、施工性への貢献が期待できる。その一方で、モルタルのレオロジー定数との比較から、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

*研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 セメント化学グループ

Cement Chemistry Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

**研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 セメント化学グループ リーダー

Manager, Cement Chemistry Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

***研究開発本部 セメント・コンクリート研究所 コンクリートソリューショングループ リーダー

Manager, Concrete Solution Group, Cement & Concrete Research Laboratory, Research & Development Division

ABSTRACT

The fluidity and passing ability of limestone-blast furnace slag cement, which contains both limestone and blast furnace slag as supplementary cementitious materials, were investigated through a series of experimental evaluations. Based on the surplus water film theory, it was inferred that the addition of limestone could increase the packing density of powder particles within the cement paste. This increase in packing density leads to an enhanced flowability of the paste, which is attributed to the influence of the thickness of the surplus water film surrounding the particles. To assess the passing ability, box filling tests and J-ring flow tests were conducted using both normal-strength and high-strength concrete mixtures. The results demonstrated that the addition of limestone significantly improved the passing performance, particularly when the clinker factor was low, indicating their potential to enhance workability in practical applications. Furthermore, a comparative analysis with the rheological parameters of mortar revealed that the relationship between plastic viscosity and passing velocity (V_{pass}) may vary depending on the strength level of the concrete. These findings suggest that the strength-dependent rheological behavior should be considered when designing mixtures for optimal placement performance.

Keywords : *Limestone, Blast furnace slag, Blended cement, Flowability, Passability between reinforcing bars, Rheology*

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いるが¹⁾, その中でも比較的早期に実行可能な施策として, 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) の低減が挙げられる. これ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 CO_2 排出量を削減できる. その一環として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²⁾が進められており, さらなる CO_2 削減のためには混合セメントの利用拡大も期待される. しかしながら代表的な混合セメントである高炉セメントに関しては, 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⁾されており, 将来においても安定供給が可能な混合セメント技術が望まれる. そこで当社では, 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⁾を進めている.

混合材として用いる石灰石の特長については, 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. 近年では施工時におけるフレッシュ性状への要求は高度化しており, この背景には熟練工の減少や過密配筋の増加, さらに良質な骨材資源の枯渇といった様々な要因がある. こうした社会的課題に対応するため, 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. そこで本検討では, 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

本試験ではフレッシュ性状に着目し, 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 **Table 1** に示す全 12 水準とした。まず全水準を対象にシリーズ 1 を行い、そのうち一部の水準 (No. 1, 4, 5, 7, 8, 9, 12) はシリーズ 2, 3 の試験を引き続き実施した。基材には普通ポルトランドセメントを使用し、高炉スラグ微粉末 4000 と石灰石微粉末を混合して種々の石灰石-高炉スラグ混合セメントを作製した。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、高炉セメント B 種~C 種の範囲に相当する。石灰石の混合量は 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 **Table 2** に示すとおりである。石灰石微粉末は粉末度が異なる 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た上で、中間の粉末度を有する L2 のみをシリーズ 2, 3 では用いた。それぞれの粉体の粒度分布は **Fig. 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を測定した。さらに、余剰水膜理論に基づいた考察のため、粉体粒子の充填率を測定した。水セメント比は 50% (質量比)

Table 1 Mix design of limestone-blast furnace blended cement

No.	Cement	Blast furnace slag	Limestone	Series
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

Table 2 Materials

Type	Symbol	Material properties
Water	W	Tap water
Ordinary Portland cement	N	Density 3.14g/cm ³ , Blaine surface area 3,370cm ² /g, Limestone component 4.5%, median particle size 18.8 μ m
Blast furnace slag	BFS	density2.90g/cm ³ , Blaine specific surface area 4,510cm ² /g, median particle size 12.8 μ m
Lime stone powder	L1	density2.71g/cm ³ , Blaine specific surface area 4,720cm ² /g, median particle size 18.6 μ m
	L2	density2.72g/cm ³ , Blaine specific surface area 6,620cm ² /g, median particle size 7.21 μ m
	L3	density2.71g/cm ³ , Blaine specific surface area 7,720cm ² /g, median particle size 5.09 μ m
Fine aggregate	S	Land sand, oven-dry density2.59g/cm ³ , water absorption 1.62%
Coarse aggregate		Crushed stone, oven-dry density2.65g/cm ³ , Maximum particle size 20mm, water absorption 0.48%
Standard AE Water-Reducing Admixture (Type I)	AD	Composite of Lignosulfonate Compounds and Polycarboxylate Ether
Air-Entraining Admixture	AE	Anionic Surfactant Based on Modified Rosin Acid Compounds
High-Performance AE Water-Reducing Admixture	SP	Polycarboxylate Ether-Based Compound with Built-In Defoamer

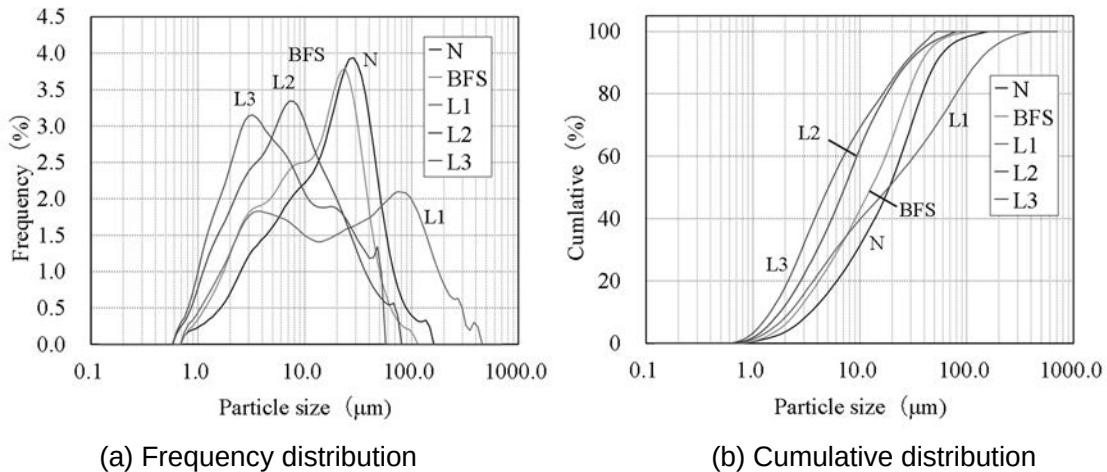


Fig. 1 Particle size distribution

に固定し、Table 1 に示した 12 種類のセメントをそれぞれ用いてペーストを作製した。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、計 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することで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

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

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

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（μm）、 S_p ：セメントペースト 1m³ 中の粉体の表面積（cm²/m³）。

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、Table 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、単位水量によって調整した。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、これと材齢 28 日での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。高炉スラグや石灰石がスランブフローに及ぼす影響を明確にするため、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。

コンクリートの練混ぜには、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、Table 4 に示す各種の試験を実施した。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（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ートの自己流動による条件にて

Table 3 Mix design of concrete

Category	W/C	W (kg/m ³)	Bulk volume of coarse aggregate (m ³ /m ³)	Target fresh properties		Chemical admixture (C×%)		
				Slump, slump flow (cm)	Air content (%)	AD	AE	SP
Normal strength	Adjustment	Adjustment	0.62	12±1.5	4.0±1.0	0.70	0.0035	-
High strength	30	170	0.54	60±5.0	1.5±0.5	-	-	Adjustment

Table 4 Experiment items of fresh properties

Category	Item	Remarks and testing standards
Common	Slump or Slump flow	Slump : JIS A 1101 Slump flow : JIS A 1150
	Air content	JIS A 1128 (Air chamber pressure method)
Normal strength	Vibrated box filling test	JSCE-F701-2016
High strength	Box filling test	JSCE-F511-2018
	J-ring flow	JIS A 1159

それぞれ評価した。両試験では共通して、**Fig. 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 クラスのものをを用いた。いずれの試験も 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するものである。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 A 1108 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℃) 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。セメントペーストの練混ぜには前述のケミカルミキサーを、モルタルの練混ぜには容量 5L のホバートミキサーをそれぞれ用いた。コンクリート試験で設定した普通強度および高強度の 2 つの強度レベルにおいて、ペーストと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。レオロジー定数の測定条件は山田ら⁹⁾の検討を参考に行った。まず、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。得られたせん断応力履歴の例は **Fig. 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 **Fig. 3(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。

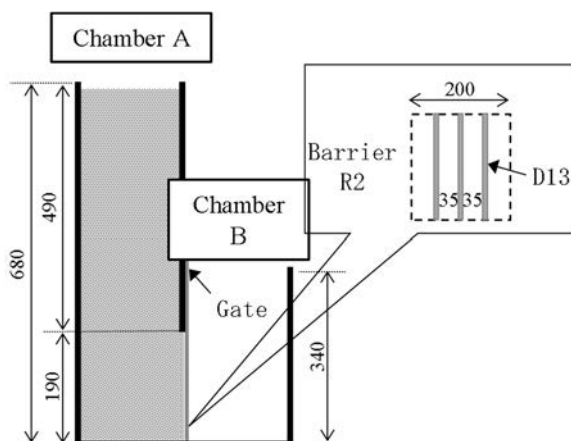


Fig. 2 Dimensions of box-shaped container (unit: mm)

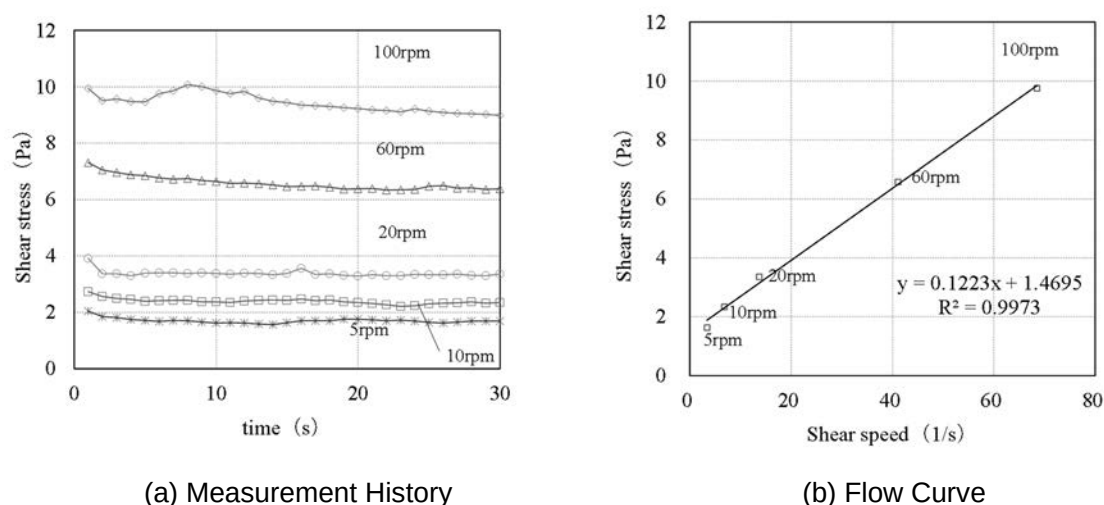


Fig. 3 Example of measurement using a rotational viscometer (No. 4: normal-strength cement paste)

3. 実験結果

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 **Table 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、混合材の種類や量による変化がみられた。クリンカファクタが 40 および 30% と低い水準では、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 Fig. 4 に示す。なお、 d_{50} は **Fig. 1** に示した粒度分布曲線におけるメディアン径を用いて、その値は **Table 2**

および **Table 5** においても示している。**Fig. 4 (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示唆される。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。

Table 5 Test results of cement paste in series 1

No.	CF (%)	Flow (mm)			ϕ_c (%)			δ_w (μm)			d_{50} (μm)		
		L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
1	60	233			48.43			0.183			16.1	16.1	16.1
2		246	225	246	50.49	49.35	50.24	0.228	0.197	0.211	16.8	15.5	15.5
3		245	218	223	50.71	49.62	49.99	0.231	0.191	0.190	17.5	14.4	14.3
4	50	240			49.62			0.197			15.6	15.6	15.6
5		237	220	242	50.63	49.45	50.33	0.219	0.188	0.201	16.2	14.9	14.9
6		261	235	229	51.15	49.43	50.34	0.227	0.177	0.186	17.0	13.9	13.8
7	40	217			49.80			0.191			15.3	15.3	15.3
8		259	220	225	50.77	49.81	50.34	0.210	0.184	0.191	15.7	14.6	14.4
9		260	227	212	50.74	49.45	49.76	0.208	0.168	0.166	1.5	13.4	13.3
10	30	218			49.86			0.183			14.7	14.7	14.7
11		233	215	231	50.06	49.98	49.6	0.186	0.178	0.167	15.3	14.0	13.9
12		262	212	216	51.21	49.88	50.42	0.206	0.167	0.169	16.0	12.2	12.8

CF : Clinker factor, ϕ_c : Packing ratio of powder particles, δ_w : Thickness of excess water film, d_{50} : median particle size

3.2 シリーズ2におけるコンクリートのフレッシュ性

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 **Table 6** および **Table 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/m^3 とくらべて $1, 2\text{kg/m}^3$ 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

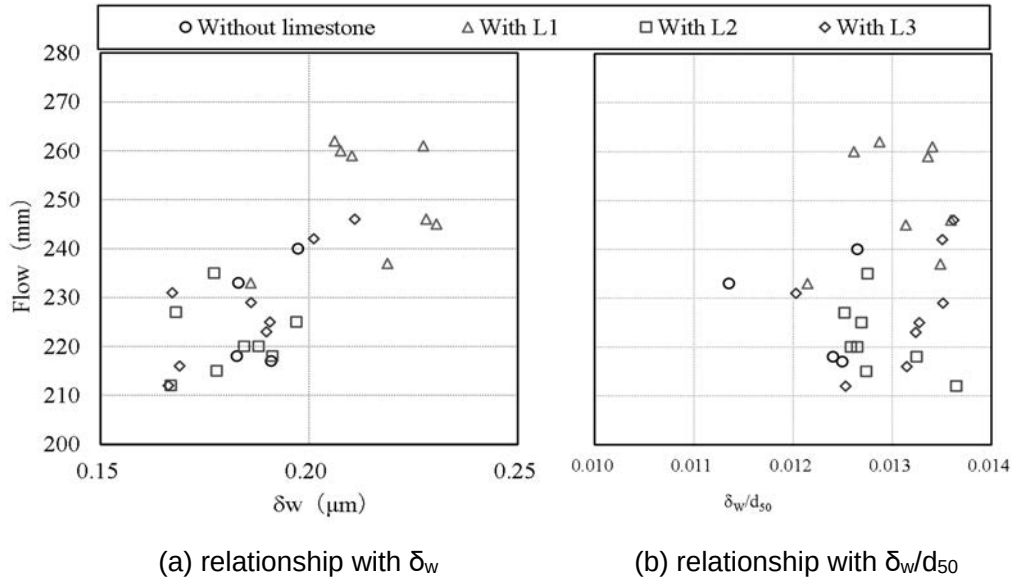


Fig. 4 Flow behavior of cement paste without chemical admixture

Table 6 Test results of Normal strength concrete

No.	W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)						Admixture (C×%)		Slump (cm)	Air (%)	Vibrated box filling test					f'_c (N/mm ²)		f_t (N/mm ²)	
			W	N	BFS	L2	S	G	AD	AE			t_{190} (s)	t_{300} (s)	V_{pass} (mm/s)	δ_A	δ_B	7d	28d	7d	28d
1	50	44.8	165	198	132	0	791	997	0.70	0.0035	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			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} : Time to reach 190 mm, t_{300} : Time to reach 300 mm, V_{pass} : passing velocity, δ_A, δ_B : Coarse aggregate ratio in chamber A/B, f'_c : Compressive strength, f_t : Splitting tensile strength

Table 7 Test results of High strength concrete

No.	W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)						SP (C×%)	Slump Flow		Air (%)	J-ring Flow				Vibrated box filling test			f' _c (N/mm ²)		f _t (N/mm ²)	
			W	N	BFS	L2	S	G		SF (mm)	T ₅₀₀ (s)		SF _J (mm)	T _{J500} (s)	PJ (mm)	Class I	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 : Slump flow, T_{500} : Time to reach 500 mm, SF_J : J-ring flow, T_{500} : J-ring flow time to reach 500mm, B_{time} : filling stop time, B_h : Filling height, δ : Coarse aggregate ratio after barrier passing, f'_c : Compressive strength, f_t : Splitting tensile strength

固定しても概ね一定の空気量が得られた。前節のセメントペースト試験の結果より、L2のような石灰石を用いた場合は余剰水膜厚さやペーストフローはいずれも改善しないため、石灰石の添加とW/Cの低下によりコンクリートの流動性は小さくなると考えるのが自然である。しかしながら本結果では流動性への影響はわずかであり、これには前述した凝集が解砕された可能性のほか、石灰石はセメントのように水和により水を消費しないことや、化学混和剤の吸着挙動が異なることなどが影響した結果と考える。

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Fig. 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Table 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程度と最も速く、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、石灰石添加量の増加にともない V_{pass} が速くなっており、間隙通過性が改善していることが確認された。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} は速くなることが報告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 (No. 7)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、その範囲内で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SP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 $C \times 1.05\%$ 、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。普通強度コンクリートと同様に、初期水和や化学混和剤との相性による影響と考えられ、水粉体比の小さい高強度レベルにおいては余剰水膜厚さよりこれらの効果がより大きくなるためと推察する。

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Fig. 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、石灰石の添加量が増加することによって、振動締固めの要否が異なるほど施工性は向上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

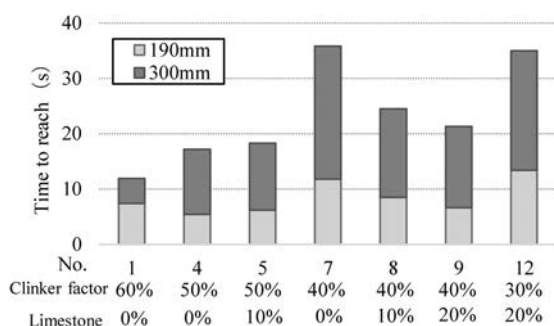


Fig. 5 Filling time to specified height in vibration box test of normal-strength concrete

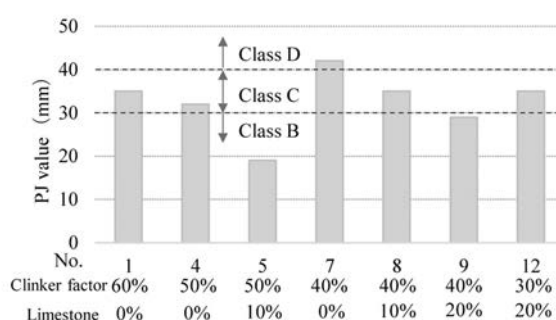


Fig. 6 PJ value in the J-ring flow test of high-strength concrete and classification in the high-fluidity concrete guideline⁸⁾

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 **Table 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に特有の現象がみられた。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 **Fig. 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. が大きくクリンファクタおよび石灰石量が大きい水準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 **Fig. 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

Table 8 Rheological parameters measured by a rotational viscometer

	No.	W/C (%)	AD or SP (C×%)	Cement paste		Mortar	
				Plastic viscosity (Pa · s)	Yield stress (Pa)	Plastic viscosity (Pa · s)	Yield stress (Pa)
Normal strength	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
	12	40	0.70	0.436	7.11	2.72	7.23
High strength	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

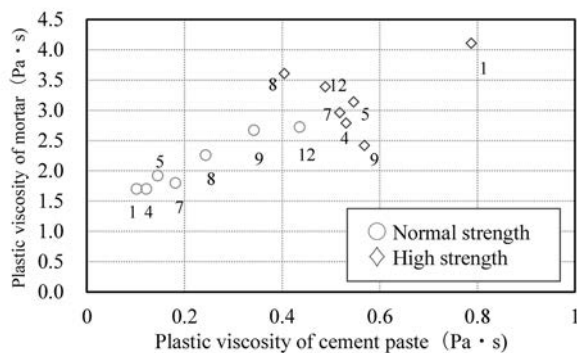


Fig. 7 Plastic viscosity of mortar and cement paste

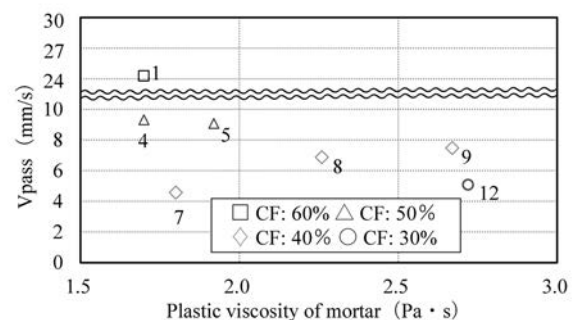


Fig. 8 Relationship between plastic viscosity of mortar at normal strength level and passing velocity V_{pass}

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 Fig. 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レオロジー定数以外にも様々な要因が影響するものと推察する。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ペースト・モルタルの変形性能のほかにも、粗骨材のアーチング¹³⁾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と考える。

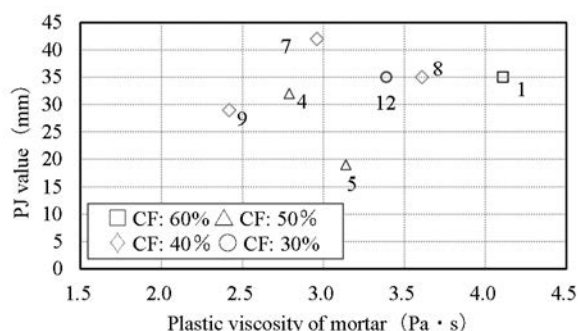


Fig. 9 Relationship between plastic viscosity of mortar at high-strength level and PJ value

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速くなった。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.
<https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2022/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW-2022.pdf>, (accessed 2025-10-31).
- 2) 例えば、平尾 宙, 野上 暁, 蒲生真也ほか. 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 実機により試験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. 2024, e2101.
- 3) 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.
<https://coal.jogmec.go.jp/content/300377648.pdf>, (accessed 2025-10-31).
- 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. 2023, 77, p. 197-205.
- 5) Etsuo SAKAI, Seiichi HOSHINO, Yoko OHBA, et al. The Fluidity of Cement Paste with various types of inorganic powders. Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, vol. 2. 1997, p. 2ii002.
- 6) 丸岡正知, 藤原浩已, 下山善秀ほか. 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. 2003, (725), p. 101-112.

- 7) 石田征男, 上田賢司, 佐藤嘉昭ほか. 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. 2016, 38, e1216.
- 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.
- 9) 山田義智, 東舟道裕亮, 上原義己ほか. 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塑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. 2019, 84(756), p. 139-148.
- 10) 土木学会. 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(コンクリート技術シリーズ 94). 2011.
- 11) 中村敏之, 橋本紳一郎, 吉村 徹ほか. 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. 第27回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集. 2018, p. 555-560.
- 12) 東舟道裕亮, 山田義智, 上原義己ほか. 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. 2017, 39, e1185.
- 13) 坂本 淳, 横井謙二, 新藤竹文. 高流動コンクリートの自己充填性に及ぼす粉体量・粗骨材量の影響. コンクリート工学年次論文報告集. 1998, 20(2), p. 415-420.