

◇論文◇

石灰石—高炉スラグ混合セメントのモルタル物性に
与える影響要因に関する研究A Study on Properties of Limestone-blast Furnace Slag
Blended Cement and the Influencing Factors後藤 壮*, 桐野 裕介**,
兵頭 彦次***GOTO, So*; KIRINO, Yusuke**;
HYODO, Hikotsugu***

要 旨

脱炭素社会の実現に向けて、セメント産業では混合材の利用が検討されている。一方、代表的な混合材である高炉スラグの発生量は今後減少することが予想されている。そこで本研究では、石灰石微粉末を用いて、高炉セメントの一部を置き換えた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を行った。その結果、石灰石微粉末の混合により、流動性の向上、凝結の短時間化および初期強度発現性の向上が確認され、混合率が10%までであれば28日圧縮強さおよび水分浸透速度係数は同等程度に維持できることが判明した。また、圧縮強さは空隙率が支配因子であったものの、水分浸透速度係数は空隙構造の複雑さについても考慮する必要が示唆された。

キーワード : 石灰石微粉末, 高炉スラグ微粉末, 水和解析, 空隙構造, 圧縮強さ, 中性化, 水分浸透, CO₂排出量

* 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 海外技術チーム
International Technology Team, Cement & Concrete Research Department, Central Research Laboratory
** 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 セメント化学チーム
Cement Chemistry Team, Cement & Concrete Research Department, Central Research Laboratory
*** 中央研究所 セメント・コンクリート研究部 海外技術チーム チームリーダー
Manager, International Technology Team, Cement & Concrete Research Department, Central Research Laboratory

ABSTRACT

Use of mineral admixtures in cement has been promoted in the cement industry in the efforts towards a carbon-neutral society. On the other hand, the production of blast furnace slag, a typical mineral admixture, is forecasted to decrease in the future. This study experimentally investigated the properties of the mortar of blended blast furnace slag cement which was partially replaced with limestone powder, and also evaluated the influencing factors of the properties for the mortar. It was found that the partial replacement with limestone powder increased flowability of the mortar, shortened setting time and improved early strength development. When the replacement ratio of limestone powder was up to 10%, both 28-day compressive strength and water penetration rate coefficient of the mortar remained almost the same as those without replacement. Moreover, the results suggested that while porosity was the dominant influencing factor of the compressive strength, the complexity of the pore structure in the mortar had to be also taken into account for the water penetration rate coefficient.

Keywords : *Limestone powder, Blast furnace slag, Hydration phase analysis, Pore structure, Compressive strength, Carbonation, Water penetration, CO₂ emission*

1. はじめに

地球温暖化への対策として、セメント産業においても大幅な二酸化炭素排出量の低減が求められている。その対策の一つとして、セメント中におけるクリンカ割合の低減が挙げられ、普通ポルトランドセメント (OPC) における少量混合成分の増加^{例え1)}や高炉セメントをはじめとする混合セメントの利用が検討されている。一方、高炉スラグ微粉末 (BFS) の大部分はすでに活用されており²⁾、さらに電炉への移行等による将来の発生量減少も予想されているため³⁾、代替となる混合材の検討は重要と考えられる。

このような背景から、国外では資源量の多い石灰石微粉末 (LSP) の活用を検討した事例が増加傾向にあり⁴⁾、その一例として BFS を LSP で一部置換した三成分系 (石灰石-高炉スラグ) 混合セメントの検討が行われている^{例え5)}。また、国内の材料および規格・基準類に基づいた石灰石-高炉スラグ混合セメントの研究開発についても一部実施されており LSP の混合率が 10%程度であれば、高炉セメントと同等の圧縮強さおよびアルカリシリカ反応抑制効果を維持できることが報告されている⁶⁾。一方、中性化に対する抵抗性については LSP の混合率とともに低下する傾向があることが指摘されている⁷⁾⁸⁾。しかしながら、近年の調査研究から、コンクリートの中性化

が進行していても、鉄筋位置まで水が浸透しない場合には、鉄筋の腐食が抑制されることが知られており⁹⁾、2017年制定土木学会コンクリート標準示方書 [設計編] では、このことを考慮した方法として中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の照査方法が導入されている。そのため、石灰石-高炉スラグ混合セメントに関しても水分浸透特性を把握することが重要と考えられる。以上のように、国内においても、石灰石-高炉スラグ混合セメントに関する検討は一部実施されているが、BFS や LSP の混合率がモルタル・コンクリートの物性に与える影響に関する一連した検討は行われていない。

そこで本研究では、石灰石-高炉スラグ混合セメントのモルタル物性として、代表的な物性である流動性、凝結、圧縮強さ、塩分浸透、中性化に加え、上述の理由から水分浸透速度についても評価した。さらに、相組成および空隙径分布から各物性に与える影響要因について考察を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料の化学組成を **Table 1** に示す。セメントには、少量混合成分を含まない OPC (ブレン比表面積 3260cm²/g) を用いた。混合材には、BFS

(ブレン比表面積 $4230\text{cm}^2/\text{g}$, 塩基度 1.80) および LSP(ブレン比表面積 $8800\text{cm}^2/\text{g}$, CaCO_3 純度: 99.9%)を用いた。なお, BFS には国内で一般的に使用されている SO_3 量となるように, 二水石膏を SO_3 換算で 2.0%添加した。また, 石灰石はセメントクリンカと比較して被粉碎性が高いため⁴⁾, 同時粉碎の製造による細粒化を想定し, LSP の比表面積を設定した。細骨材には JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に適合する標準砂を用いた。

2.2 セメントおよび混合材の配合

セメントおよび混合材の配合を **Table 2** に示す。BFS を 42.5~45%, LSP を 0~2.5%混合した水準 (S45 および S42.5-L2.5) は JIS R 5211 で規定される現行の高炉セメント B 種 (BB) 相当品であり, これを本試験の基準とした。LSP の置換率については, 既往の研究⁶⁾を参考に最大 20%とし, その置換方法は, BFS, BB および N に対して置換する 3 通りの検証を実施した。BFS 置換ではセメント量を維持できるため強度優位, OPC 置換では BFS 量を維持できるため耐久性優位, BB 置換についてはこれらの中間の性能を想定して水準を設定した。なお, 圧縮強さ試験の結果に基づき, 耐久性試験 (塩分浸透, 中

性化, 水分浸透速度) は LSP 混合率 10%以下の配合を対象とした。

2.3 実験方法

(1) 流動性

流動性試験は, 水準間の差が生じやすいように水結合材比を 0.35 とし¹⁰⁾, ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を添加したモルタルにて試験を実施した。細骨材結合材比は 2.0 とし, 高性能 AE 減水剤を結合材に対して 0.45%添加した。ミキサーで 4 分間練混ぜ後, JIS A 1171:2000 に規定されるフローコーンにモルタルを充填し, 練混ぜ直後のフロー値を測定した。なお, JIS R 5201 に規定される落下運動は行わず, モルタルの自重のみによるフロー値を評価した。

(2) 凝結および圧縮強さ

凝結試験および圧縮強さ試験は, JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠して実施した。

(3) 塩分浸透

塩分浸透試験は, (財)高速道路技術センター「高性能コンクリートの研究」の塩化物浸透試験法に準

Table 1 Chemical compositions
(使用材料の化学組成)

Materials	Chemical Compositions (%)												
	Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
OPC	1.02	21.40	4.84	3.20	64.98	1.08	2.02	0.33	0.43	0.24	0.18	0.10	0.009
BFS	0.99	33.00	13.54	0.32	42.96	5.37	2.00	0.20	0.30	0.57	0.01	0.23	0.001
LSP	43.50	0.00	0.10	0.00	56.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000

Table 2 Mix proportion of cement
(セメントおよび混合材の配合)

		Mix Proportion of Cement (Wt-%)		
		OPC	BFS	LSP
OPC	—	100	0	0
S45	BB (Blank)	55	45	0
S42.5 - L2.5		55	42.5	2.5
S35 - L10	Replacement of BFS	55	35	10
S25 - L20		55	25	20
S39 - L10	Replacement of BB	51	39	10
S35 - L20		45	35	20
S45 - L10	Replacement of OPC	45	45	10

抛して実施した。JIS R 5201 に準拠してモルタル供試体を作製後、材齢 7 日まで 20°C 水中養生した。その後、20°C 60%RH の気中養生を材齢 28 日まで行い、これを前養生とした。供試体は、20°C の 3%NaCl 水溶液に 3 日間浸漬、20°C 60%RH の恒温恒湿室内で 4 日間乾燥を 1 サイクルとし、26 サイクルまで繰り返した。

(4) 中性化

促進中性化試験は JIS A 1152 「コンクリートの中性化深さの測定方法」および JIS A 1153 「コンクリートの促進中性化試験方法」を参考に実施した。なお、本研究ではモルタルで試験を実施するため、JIS R 5201 に準拠してモルタルを練混ぜ後、40×40×160mm の型枠に打設した。また、測定箇所は、10mm 間隔で 3 か所を測定し、各供試体 2 面の計 6 点を測定した。

(5) 水分浸透速度

水分浸透速度係数試験は、JSCE-G582-2018 「短期の水掛かりを受けるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法 (案)」を参考に実施した。なお、本研究ではモルタルで試験を実施するため、JIS R 5201 に準拠してモルタルを練混ぜ後、φ50×100mm の型枠に打設した。また、測定箇所は、浸せき面について両端 15mm を除いて約 10mm 間隔で 3 か所を 0.5mm 単位で測定し、割裂した 2 面双方の計 6 点を測定した。養生は、20°C 水中養生を材齢 7 日まで実施した。乾燥は、温度 40±2°C かつ相対湿度 30±5% の恒温恒湿槽で 28 日間行った。

(6) 相組成

相組成は、既報¹¹⁾に従って XRD/リートベルト法により算出した。養生終了後の硬化セメントペーストを粗砕後、多量のアセトンを用いて水和停止し、11% RH のデシケーター内で 7 日間乾燥させた。その後、粗砕した試料をディスクミルで測定に適した粒径になるまで粉碎し、粉末 X 線回折を測定した。測定条件は特性 X 線: CuKα, 管電圧: 35kV, 管電流: 350mA, 走査範囲: 2θ= 5~65°とした。エーライト (C₃S), ビーライト (C₂S), アルミネート相 (C₃A), フェライト相 (C₄AF), カルサイト, ポルトランドイト (CH), エトリングイト (Ett), モノサルフェート (Ms), モノカーボネート (Mc), ヘミカーボネート (Hc) を定量した。なお、カルサイトのピークは LSP によるものであると考えられるため、相組成の算出においては

カルサイトの定量値を LSP の定量値とした。また、分析試料には内部標準試料として α-Al₂O₃ を 10% 混合し、各鉱物相の含有量を一括で定量した。硬化セメントペースト中の未反応スラグの定量は、選択溶解法としてサリチル酸-アセトン-メタノール法¹²⁾で行った。非晶質水和物である C-S-H の含有量は α-Al₂O₃ および未反応スラグの定量値から算出し、C-S-H の密度は一定 (1.9 g/cm³)¹¹⁾と仮定した。

(7) 空隙径分布

空隙径分布は、水銀圧入式ポロシメータを用いて測定した。材齢 28 日のモルタル供試体をダイヤモンドカッターで一辺 5mm の立方体に切断後、多量のアセトンで水和停止し、真空乾燥を 3 日間、D-dry (ドライアイスの凝固点 -79°C の水蒸気分圧における乾燥) を 7 日間行った供試体を測定に用いた。

3. 実験結果

3.1 流動性

モルタルの流動性試験結果を Fig. 1 に示す。いずれの水準においても、OPC と比較して流動性が向上した。これは、混合材による充填率の向上と OPC の希釈によるものであると考えられる⁴⁾。また、LSP の置換方法に関わらず、LSP の混合率が増加するにつれて流動性は向上する傾向にあった。これは、LSP が BFS と比較して微細であり、また LSP から供給された炭酸イオンにより C₃A の初期水和反応を抑制したためであると考えられる⁴⁾¹³⁾。

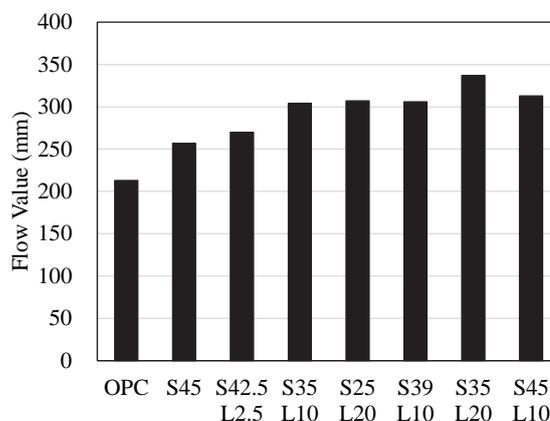


Fig. 1 Flow value (フロー値)

3.2 凝結

各セメントの凝結時間および標準軟度水量を Fig. 2 に示す。OPC および S45 の比較から、BFS を混合することにより終結時間が遅延した。これは、既往の研究と同様の傾向である¹⁴⁾。一方、LSP の混合率が增加するにつれて標準軟度水量の低下および始発・終結時間ともに短くなる傾向がみられた。これは、LSP の微粉末効果により C₃S の水和反応が促進されたためであると考えられ⁴⁾、混合セメントにおける凝結特性を LSP の混合によって短時間化できる可能性が示唆された。なお、練混ぜ直後に測定する流動性では LSP による C₃A の初期水和抑制効果が卓越した一方、加速期に相当する凝結時間では C₃S の水和反応を促進する効果が卓越したと考えられる。

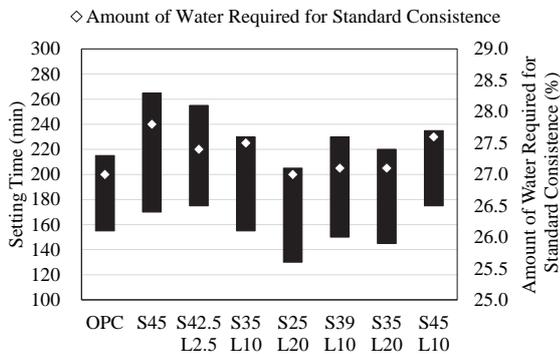


Fig. 2 Setting time (凝結時間)

3.3 圧縮強さ

各材齢におけるモルタルの圧縮強さを Fig. 3 に示す。LSP の置換方法に関わらず、LSP の混合により S45 と比較して材齢 3, 7 日の初期強度が向上した。

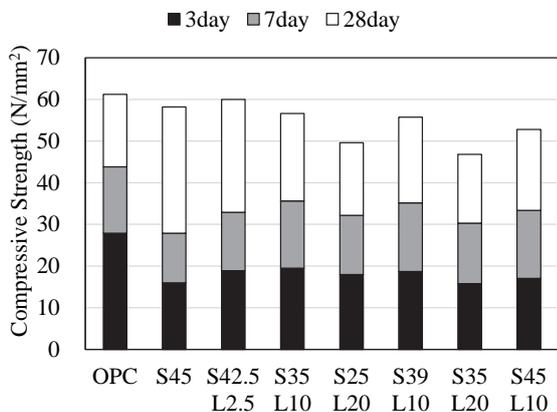


Fig.3 Compressive strength (圧縮強さ)

また、LSP の混合率については、10%で初期強度が最大となり 20%では低下する傾向にあった。初期強度が向上した要因としては、LSP の微粉末効果による初期水和の促進が考えられる⁴⁾。また、LSP の混合率が 20%においては、微粉末効果と比較し、OPC の希釈効果が大きくなったため、初期強度が低下したと考えられる。28 日圧縮強さについては、LSP の混合率が 20%の水準および OPC 比率の小さい S45-L10 では低下傾向にあったものの、他の水準ではおおむね同程度の値であった。これは、材齢 7 日から 28 日にかけての強度増進が S45 において最も大きく、LSP の混合率とともに水準間の差が小さくなったためである。

3.4 塩分浸透

モルタルの塩分浸透深さを Fig. 4 に示す。いずれの水準においても、塩分浸透深さに大きな差はみられなかった。水準間に差がみられなかった要因については、LSP の混合により相組成や空隙構造が変化した影響が複合的に作用した可能性が考えられる。

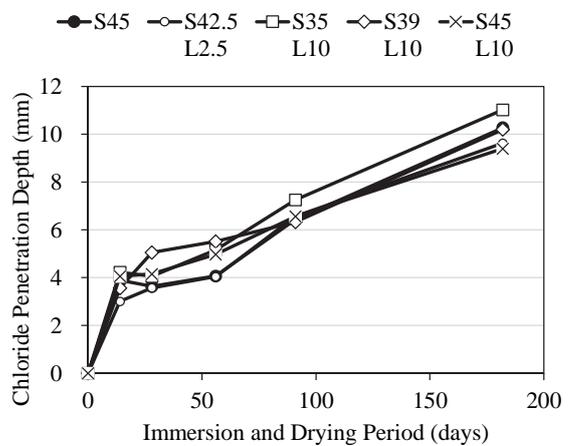


Fig.4 Chloride penetration depth (塩分浸透深さ)

3.5 中性化

モルタルの中性化深さを Fig. 5 に示す。いずれの水準においても、LSP を混合することにより中性化深さは S45 と比較して大きくなる傾向にあった。LSP の置換方法に着目すると、中性化深さは S45-L10 > S39-L10 > S35-L10 の順となり、OPC の混合率が低いほど中性化深さは大きくなる傾向にあった。

3.6 水分浸透速度

モルタルの水分浸透速度係数を Fig. 6 に示す。OPC と比較し、BFS を混合した水準では水分浸透速度

係数が小さい傾向にあった。これは、既往の研究と同様の結果である¹⁵⁾。また、LSPの置換方法に着目すると、水分浸透速度係数は、S35-L10 > S39-L10 > S45-L10の順となり、BFSの混合率が高いほど水分浸透速度係数は小さくなる傾向にあった。

3.7 物性評価結果のまとめ

前節までの結果から、LSPの混合による流動性の向上、凝結の短時間化および初期強度発現性の向上が確認された。また、混合率が10%までであれば高炉セメントB種と同程度の28日圧縮強さを示した。一方、既往の研究でも述べられているように⁷⁾⁸⁾、中

性化抵抗性に関しては本研究においても低下する傾向が確認された。しかしながら、水分浸透速度係数に関しては、OPCと比較して小さい結果が得られたことから、中性化が進行していても、鉄筋腐食の進展が抑制されることが示唆された。

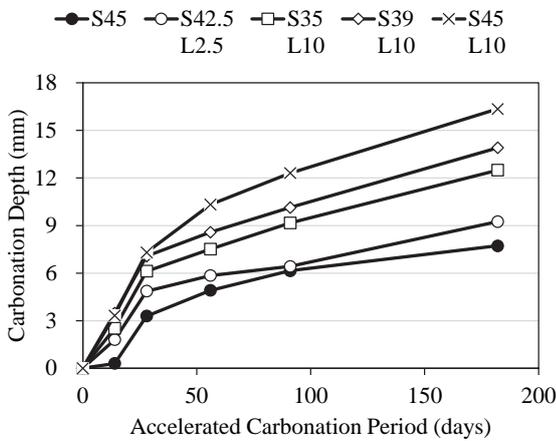


Fig. 5 Carbonation depth (中性化深さ)

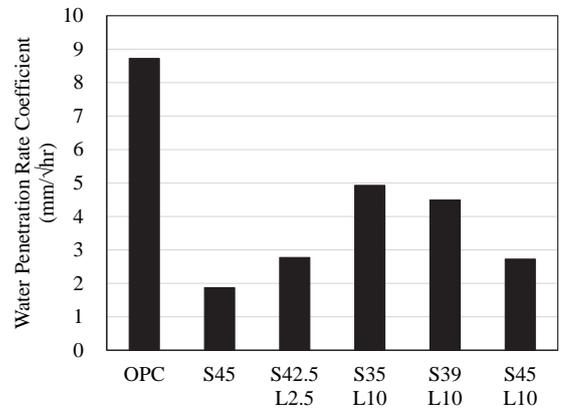


Fig. 6 Water penetration rate coefficient (水分浸透速度係数)

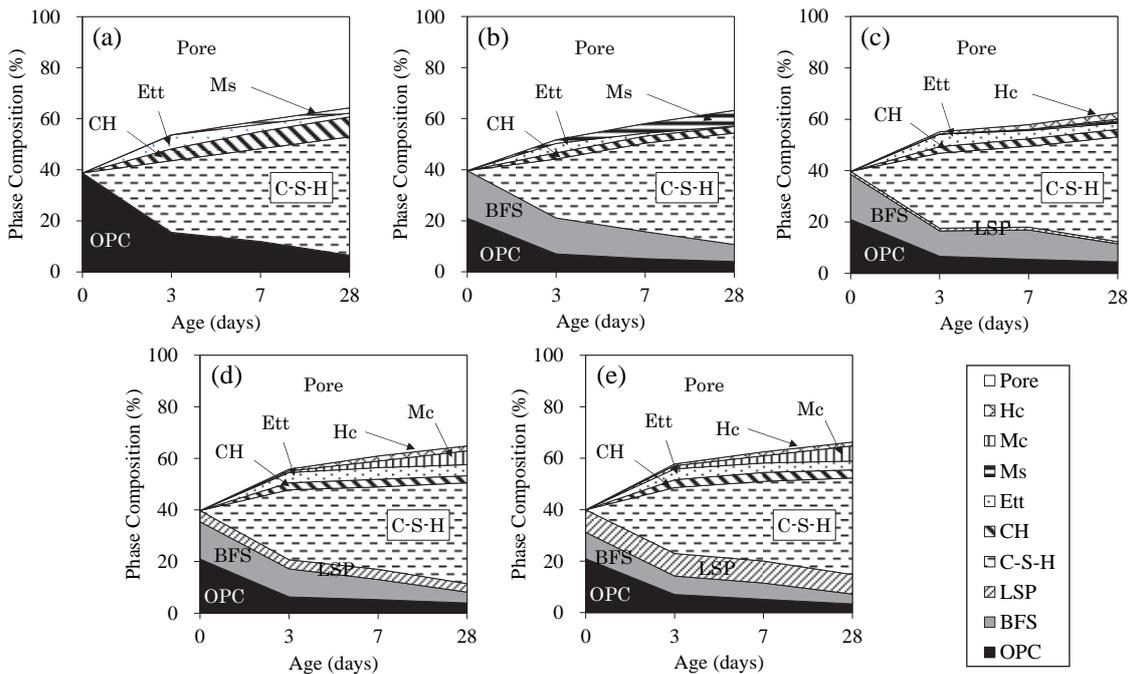


Fig. 7 Phase composition (a)OPC、(b)S45、(c)S42.5-L2.5、(d)S35-L10、(e)S25-L20 (相組成)

4. 反応メカニズムおよび現象の考察

4.1 相組成

代表的な水準の相組成変化を Fig. 7 に示す。OPC および S45 では、Ett が材齢 3 日以降に減少し、Ms が生成した。一方、LSP を混合した水準では、Ett の減少が抑制され、材齢とともにカーボネート相 (Mc および Hc) が生成した。これは、LSP の混合によるカーボネート相の生成によって、Ett の分解および Ms の生成が抑制されたため¹¹⁾であると考えられる。一般に、Ett は Ms と比較して重量あたりの体積が大きいので、上述した現象により空隙が緻密化すると考えられる。

LSP の混合率に着目すると、LSP の混合率が 2.5% ではカーボネート相の生成はみられるものの、Ett のわずかな減少および少量の Ms の生成が確認された。一方、LSP の混合率が 10% および 20% では、Ett の減少はみられず、カーボネート相の生成も確認できるものの、未反応の LSP が多く残存していた。以上より、Ett の安定化および LSP 反応率の両者を考慮すると、LSP の混合率が 2.5% から 10% の間に最適値があるものと考えられた。

4.2 空隙径分布

水銀圧入式ポロシメータから算出した空隙径分布を Fig. 8 に示す。LSP の置換方法に関わらず、LSP を混合することによって、100nm-5 μ m の空隙が減少し、100nm 以下の小径の空隙量が増加した。これは、前述したカーボネート相の生成による Ett の安定化により、微細な空隙構造を維持できたためであると考えられる。一方、LSP の混合率の増加にともない総空隙率が増加する傾向にあった。

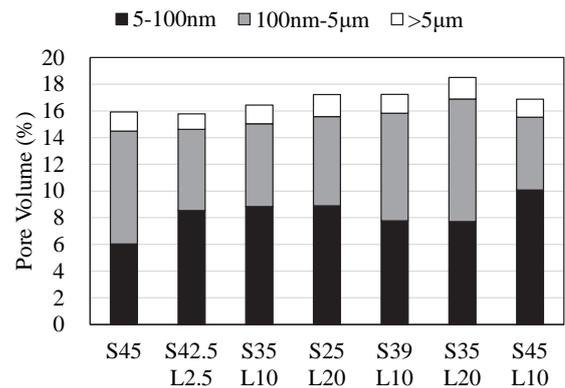


Fig. 8 Pore size distribution (空隙径分布)

4.3 圧縮強さとの関係

圧縮強さと空隙径分布および相組成から算出した空隙率の関係を Fig. 9(a), (b) に示す。空隙率の低下とともに圧縮強さは増加する傾向にあり、空隙径分布および相組成のどちらにおいても圧縮強さとの相関が確認された。圧縮強さと空隙率に相関があることは一般的に知られており、本研究においても同様の傾向であった。

圧縮強さの支配因子をさらに詳細に調査するため、既往の研究¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾において圧縮強さとの相関が高いことが示されているゲル空隙比を相組成から算出し、圧縮強さとの関係を検証した (Fig. 9(c))。ゲル空隙比の増加とともに圧縮強さは増加する傾向にあり、両者には高い相関が確認された。また、Fig. 9(a), (b) のどちらの空隙率と比較した場合においても、ゲル空隙比との相関が最も高い結果であった。空隙率と比較してゲル空隙比との相関が高くなる傾向は既往の研究¹⁸⁾と同様であり、LSP を 0~20%混

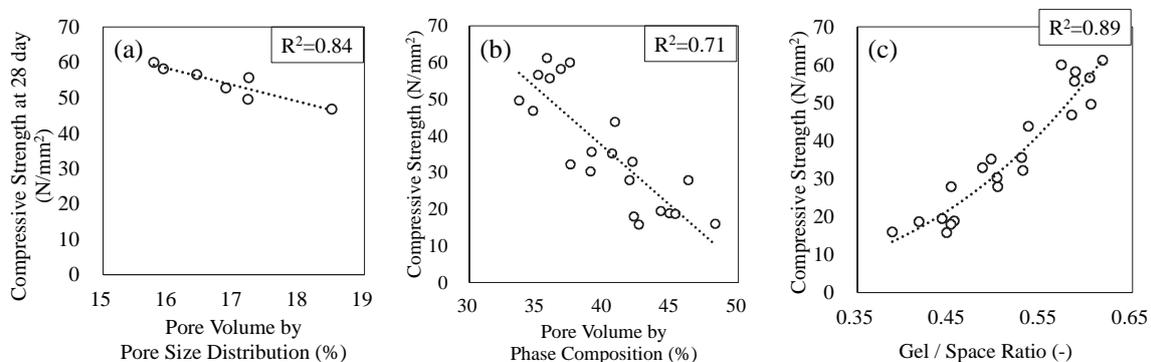


Fig. 9 Relationship between compressive strength and

(a) Pore volume by pore size distribution、(b) Pore volume by phase composition、(c) Gel / Space ratio (圧縮強さとの関係 (a)空隙径分布から算出した空隙率、(b)相組成から算出した空隙率、(c)ゲル空隙比)

合した石灰石—高炉スラグ混合セメントにおいてもゲル空隙比を用いることで圧縮強さをより正確に説明できることが判明した。また、須田ら¹⁸⁾はC-S-Hの密度変化を考慮することで混合材の種類に関わらず、圧縮強さとゲル空隙比の関係を同一曲線で表すことができることを報告している。一方、本研究では、C-S-Hの密度を一定と仮定しても、ゲル空隙比と圧縮強さに高い相関が得られた。これは須田らと比較して、本研究では材料種類および混合比率の範囲が小さいため、C-S-Hの密度変化が大きくなかったことが要因として考えられる。

4.4 塩分浸透との関係

Fig. 4 に示したように塩分浸透深さは、いずれの水準においても大きな差はみられなかった。一方、既往の研究では、塩分浸透深さに及ぼす要因として、Ms 量が多いほど固定される塩素が増加すること、空隙が小径・緻密であるほど塩分浸透は抑制される傾向にあることが指摘されている⁷⁾¹⁹⁾²⁰⁾。本研究では、S45 では Ms が確認された一方、Fig. 7 に示したように LSP を混合した水準においては Ms が確認されなかったことから、相組成の観点からは S45 が優位であると考えられる。一方、Fig. 8 に示した空隙径分布の算出結果より、LSP を混合した水準では小径の空隙量が増加したことから、空隙構造の観点からは LSP を混合した水準が優位であったと考えられる。以上より、本研究においては上述した二つの効果が複合的に作用し、結果として塩分浸透深さに大きな差がみられなかったと考えられる。

4.5 中性化との関係

混合材の比率が中性化に与える影響を検証するため、土木学会コンクリート標準示方書[設計編]における中性化速度係数の単位体積当りの有効水結合材比を算出した。なお、LSP については、混和材の種類によって定まる定数(以下、k 値)が設定されていないため、k=0 と仮定した。中性化速度係数と有効水結合材比の関係を Fig. 10 に示す。有効水結合材比が高くなるにつれて中性化速度係数は比例して大きくなる傾向であり、両者には高い相関が認められた。さらに、LSP の k 値の妥当性を検証するため、k 値を 0.02 間隔で、0~1.0 まで変化させた場合の中性化速度係数との決定係数(R^2)を算出した(Fig. 11)。その結果、k = 0~0.6 であれば、決定係数に大きな差は無く、この範囲に真値があることが示唆された。

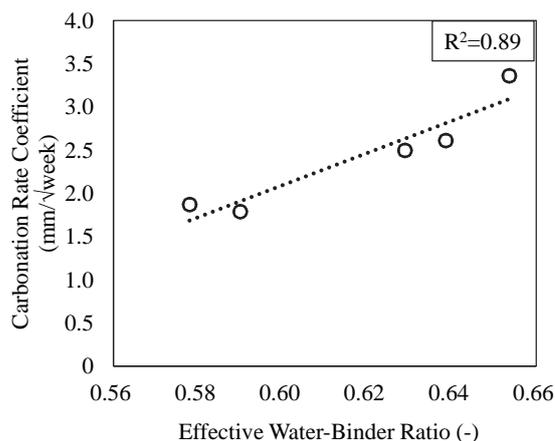


Fig. 10 Relationship between carbonation rate coefficient and effective water-binder ratio (中性化速度係数と有効水結合材比の関係)

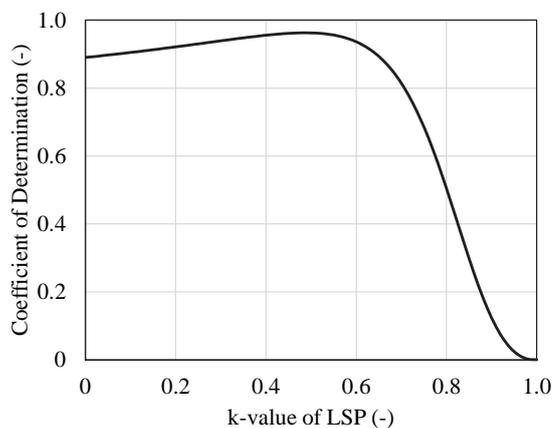


Fig. 11 k-value of LSP (LSP の k 値)

4.6 水分浸透速度係数との関係

水分浸透速度係数と空隙径分布、28 日圧縮強さおよび BFS 混合率の関係を Fig. 12 に示す。水分浸透速度係数といずれの空隙径における空隙率および総空隙率には相関がみられず(Fig. 12(a))、また、圧縮強さとの間にも相関は無かった(Fig. 12(b))。一方、本研究の範囲では、水分浸透速度係数と BFS 混合率の間に高い相関が確認された(Fig. 12(c))。

空隙径と水分浸透速度係数の関係は、澁谷ら¹⁵⁾によって調査されており、BFS の混合率が 30% 以下では平均空隙径の増加にともない水分浸透速度係数が大きくなる傾向にあるものの、BFS を 50% 以上混合した系では水分浸透速度係数が小さくなる傾向が確認されている。また、圧縮強さと水分浸透速度係数に関しては、圧縮強さの増加にともない水分浸透速度係数は小さくなる傾向にある一方、高炉セメント B 種および C 種においては強度が低い場合でも水分

浸透速度係数が小さくなる傾向が報告されている²¹⁾。

以上のように、高炉セメントでは BFS 混合率 50% 程度を閾値として、水分浸透速度係数の傾向が異なることが知られている。この要因は明確になっていないものの、BFS の反応による空隙構造の複雑化が一因として指摘されており、既往の研究においても混合材による空隙の屈曲度の増加²²⁾、連結性の低下²³⁾ が起こることが報告されている。

本研究の BFS 混合率は 50% 以上では無いものの、最大 45% と近い範囲にあること、また、石灰石の混合によって OPC に対する BFS の混合比率が相対的に高くなっていることから、上述の報告例と同様の要因によって、空隙率や圧縮強さのみでは水分浸透速度係数の差異を説明できないと考えられる。また、既往の研究では、C-S-H の Ca/Si 比が低いほど空隙の屈曲度は増加し、連結性は低下することが報告されている²²⁾²³⁾。石灰石-高炉スラグ混合セメントにおいては、高炉セメントと比較し、LSP からのカルシウムイオンの供給により Ca/Si 比が増加する可能性が考えられる²⁴⁾²⁵⁾。そのため、Ca/Si 比の観点では BFS のみが空隙構造の複雑化に寄与し、**Fig. 12(c)** に示すように、水分浸透速度係数と BFS 混合率の間に高い相関が確認されたと考えられる。一方、LSP の混合による C-S-H 以外の相組成変化および空隙の微細化も確認されていることから、これらの影響も踏まえた詳細な検証が今後必要であると考えられる。

本研究では、高炉スラグ微粉末を 25~45%、石灰石微粉末を 0~20% 混合した石灰石-高炉スラグ混合セメントの物性およびその影響要因を検討した。以下に得られた知見を示す。

5. まとめ

1. 石灰石微粉末の混合によって、流動性の向上、凝結の短時間化および初期強度発現性の向上が確認された。また、混合率が 10% までであれば高炉セメント B 種と同程度の 28 日圧縮強さを示した。
2. 石灰石微粉末の混合により、中性化抵抗性は低下する傾向がみられた一方、水分浸透速度係数は普通ポルトランドセメントと比較して小さいことが確認された。
3. 石灰石微粉末の混合により、カーボネート相が生成し、エトリンガイトが安定化され、空隙が緻密化した。
4. 石灰石-高炉スラグ混合セメントの圧縮強さは、ゲル空隙比を用いることにより説明できることが示された。
5. 水分浸透速度係数の差異は、圧縮強さや空隙率のみでは説明できず、空隙の屈曲度・連続性などの空隙構造の複雑さについても考慮する必要性が示唆された。

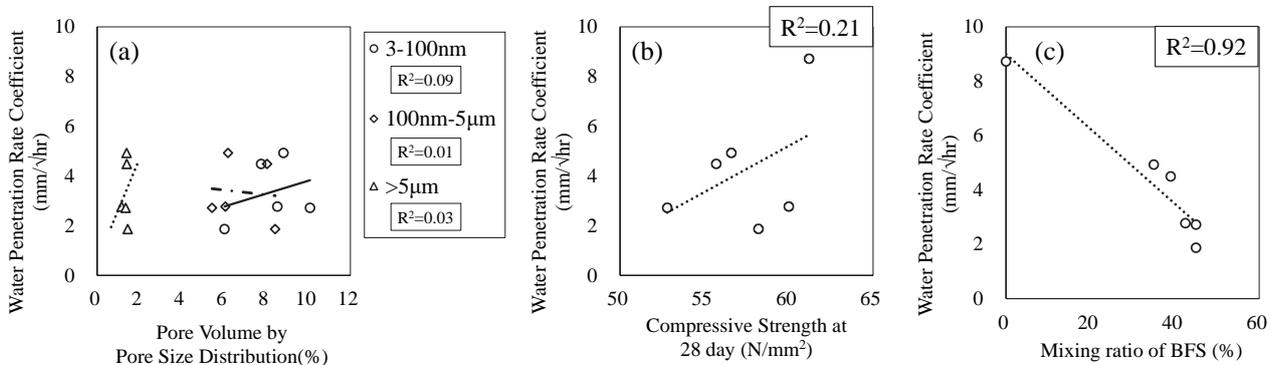


Fig. 12 Relationship between water penetration rate coefficient and (a) Pore volume by pore size distribution, (b) Compressive strength at 28 day, (c) Mixing ratio of BFS (水分浸透速度係数の関係、(a) 空隙径分布から算出した空隙率、(b) 28 日圧縮強さ、(c) BFS 混合率)

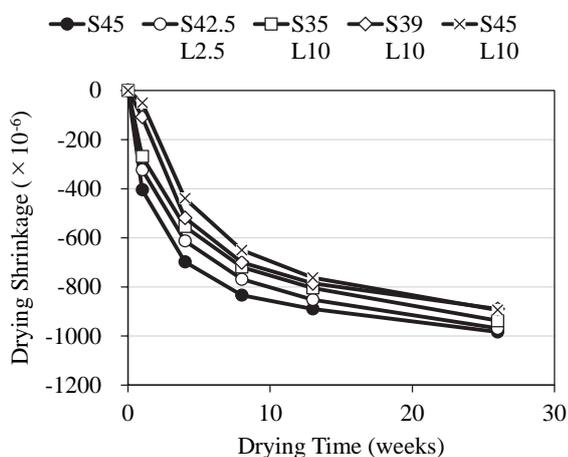
付 録

参 考 文 献

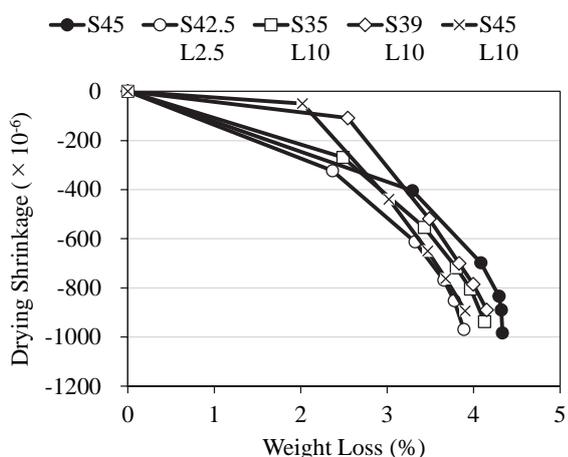
モルタルの乾燥収縮ひずみの測定結果を付録として記載する。

乾燥収縮試験は, JIS A 1129-3:2010「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第3部:ダイヤルゲージ方法」に準拠して実施した。JIS R 5201に準拠してモルタル供試体を作製後, 材齢7日まで20℃水中養生した。その後, 20℃ 60%RHの環境にて保管し, 各材齢にて測定を行った。

モルタルの乾燥収縮ひずみをAppendix Aに, 乾燥収縮ひずみと重量減少率の関係をAppendix Bに示す。



Appendix A Drying shrinkage
(乾燥収縮ひずみ)



Appendix B Relationship between drying shrinkage and weight loss
(乾燥収縮ひずみと重量減少率の関係)

- 1) 中口歩香, 森 泰一郎, 松澤一輝. 少量混合成分とアルミネート相を増量したセメントの設計開発～その1 セメントの品質評価～. セメント・コンクリート論文集. 2019, 73, p. 429-435.
- 2) 鐵鋼スラグ協会. 鐵鋼スラグ統計年報2021年度版. 2021.
- 3) 石油天然ガス・金属鉱物資源機構. 鐵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 2024-03-15).
- 4) Yuvaraj Dhandapani, Manu Santhanam, Gopakumar Kaladharan et al. Towards ternary binders involving limestone additions - A review. Cement and Concrete Research. 2021, 143, e106396.
- 5) Samuel Adu-Amankwah, Maciej Zajac, Christopher Stabler et al. Influence of limestone on the hydration of ternary slag cements. Cement and Concrete Research. 2017, 100, p. 96-109.
- 6) 中口歩香, 桐野裕介, 林 建佑ほか. 石灰石-高炉スラグ混合セメントの ASR 抑制効果に関する検討. セメント技術大会講演要旨. 2021, 75, e3103.
- 7) 伊代田岳史, 村上 拓. 耐久性向上と環境負荷低減を目的とした高炉セメント A 種への少量混合材の適用検討. コンクリート工学論文集. 2014, 25, p. 125-134
- 8) 平本真也, 植木康知, 大塚勇介. ポルトランドセメント中の石灰石微粉末置換率を増加させた場合における高炉セメントコンクリートの耐久性について. コンクリート工学年次論文集(CD-ROM). 2014, 36, e1028.
- 9) 松田芳範. コンクリートの耐久性を定める『水』の制御 ①コンクリート構造物の劣化・損傷に及ぼす水の影響について. コンクリート工学. 2013, 51(10), p. 814-818.
- 10) 呉承寧, 手塚正道, 今井昌文ほか. 高流動モルタルの性状に及ぼすセメント及び高性能AE減水剤の影響. コンクリート工学年次論文集. 1996, 18(1), p. 57-62.

- 11) Seiichi Hoshino, Kazuo Yamada, Hiroshi Hirao. XRD/Rietveld Analysis of the Hydration and Strength Development of Slag and Limestone Blended Cement. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2006, 4(3), p. 357-367.
- 12) 近藤連一, 大沢栄也. 高炉水砕スラグの定量およびセメント中のスラグの水和反応速度に関する研究. *窯業協會誌*. 1969, 77(882), p. 39-46.
- 13) 一瀬龍太郎, 坂井悦郎, 大門正機ほか. 石灰石微粉末を置換したアルミネート高含有セメントの流動性. *セメント・コンクリート論文集*. 2008, 62, p. 8-13.
- 14) 伊代田岳史. 高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート. *コンクリート工学*. 2014, 52(5), p. 409-414.
- 15) 澁谷亜香里, 伊代田岳史. 物質移動試験に基づくセメント硬化体の空隙ネットワークの理解. *コンクリート工学年次論文集 (CD-ROM)*. 2021, 43, e1051.
- 16) 坂井悦郎, 加藤昌宏, 浅賀喜与志ほか. セメント水和の相組成モデル. *コンクリート工学年次論文集*. 1998, 20(1), p. 101-106.
- 17) 坂井悦郎, 井元晴丈, 大門正機. 高炉セメント硬化体の相組成と強度発現性. *コンクリート工学年次論文集*. 2004, 26(1), p. 135-140.
- 18) 須田裕哉, 斎藤 豪, 佐伯竜彦. 各種セメント硬化体の相組成と圧縮強度に関する研究. *セメント・コンクリート論文集*. 2012, 66, p. 159-166.
- 19) 平尾 宙, Hassan ZIBARA, 高橋晴香ほか. 塩化物イオンの固定に及ぼすセメント組成の影響. *コンクリート工学年次論文集*. 2004, 26(1), p. 855-860.
- 20) 石田哲也, 宮原茂禎, 丸屋 剛. ポルトランドセメントおよび混和材を使用したモルタルの塩素固定化特性. *土木学会論文集 E*. 2007, 63(1), p. 14-26.
- 21) 平本真也, 大塚勇介, 植村幸一郎ほか. 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの水分浸透性に関する評価. *コンクリート工学年次論文集 (CD-ROM)*. 2019, 41, e1008.
- 22) 真島耕平, 川原真一, 菊地道生. 高炉スラグ微粉末およびシリカフェームを用いたセメント系硬化体の塩分浸透抵抗性. *セメント・コンクリート論文集*. 2012, 66, p. 452-459.
- 23) 須藤俊幸, 佐伯竜彦, 斎藤 豪. 空隙の連結性に着目したセメント系硬化体の空隙構造の評価. *土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)*. 2017, 73(1), p. 82-92.
- 24) セメント協会. 石灰石微粉末専門委員会報告書. 2001.
- 25) 坂井悦郎, 植田由紀子, 梅津真見子ほか. 高炉スラグ高含有セメントの水和生成物に及ぼす石灰石微粉末の影響. *セメント・コンクリート論文集*. 2022, 76, p. 84-91.