

◇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
室内および暴露環境における各種物性評価Evaluation of Various Properties of Concrete
Made with Limestone—Blast Furnace Slag Blended
Cement under Laboratory and Exposure Conditions渡辺 泰樹*, 扇 嘉史*,
細川 佳史**WATANABE, Taiki*; OHGI, Yoshifumi*;
HOSOKAWA, Yoshifumi**

要 旨

セメント産業における CO₂ 排出量の低減に向けて、混合材利用の拡大が注目されている。高炉スラグは有効な混合材として広く利用されてきたが、将来的な供給減少が予想される。そこで本研究では、資源量の点等で利点を有する石灰石に着目し、高炉セメント B 種(BB)の結合材構成比を基準に石灰石を 10%置換した三成分(石灰石—高炉)セメントを試製し、室内環境試験および1年間の暴露試験によりコンクリート物性を評価した。その結果、三成分混合セメントは BB と同程度の圧縮強度および耐久性を示すことが確認され、寒冷地域の実環境下においても健全な状態を維持していることが確認された。さらに、性能が BB と同等程度となる三成分混合セメントを用いたコンクリートの CO₂ 排出量は、BB 比で最大 11.1%削減可能と試算され、CO₂ 排出削減に寄与すると考えられた。

キーワード : 石灰石微粉末, 高炉スラグ微粉末, 圧縮強度, 中性化速度係数, 塩分浸透, 水分浸透, CO₂排出

*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

ABSTRACT

To reduce CO₂ emissions from the cement industry, expanded use of supplementary cementitious materials has attracted attention. Blast furnace slag has been widely used as a supplementary cementitious material, but its supply is expected to decrease in the future. In this study, a limestone–blast furnace slag blended cement was produced by replacing 10% of the binder of blast furnace slag cement type B (BB) with limestone powder (LSP), and the concrete properties were evaluated by laboratory tests and a one-year exposure test. The ternary blended cement exhibited compressive strength and durability equivalent to those of BB, and no deterioration was observed in the exposure tests conducted in cold regions. Furthermore, it was estimated that the concrete made with the ternary blended cement, which had performance equivalent to BB, would yield an up to 11.1% reduction in CO₂ emissions compared with concrete made with BB.

Keywords : *Limestone powder, Blast furnace slag, Compressive strength, Carbonation rate Coefficient, Chloride penetration, Water penetration, CO₂ emission*

1. はじめに

太平洋セメントグループでは、「カーボンニュートラル戦略 2050」¹⁾を策定し、複数の CO₂ 低減技術によって 2050 年のカーボンニュートラル実現に向けた取り組みを行っている²⁾。これら CO₂ 低減技術の一つとして、少量混合成分の増加や混合材の利用拡大といったクリンカファクタ(クリンカ比率)の低減が挙げられ、比較的に早期に実現できる技術として期待されている³⁾。混合材としては、高炉スラグ微粉末(BFS)が日本国内で最も利用されており、今後もさらに需要が高まる可能性がある。一方で、高炉スラグはすでに大部分がセメント用混合材として活用されていることや鉄鋼の製造において、高炉方式から電炉方式等への移行⁴⁾が進められていることから、将来的にはクリンカファクタ低減への寄与が制限される可能性がある。そのため、BFS 以外の混合材についても活用の検討が必要であることから、わが国において豊富な埋蔵量があり、数少ない自給可能な鉱物資源である石灰石の利用拡大が注目されている。石灰石微粉末(LSP)を活用した混合セメントとして、LSP と BFS を併用した三成分(石灰石–高炉スラグ)混合セメントがあり、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度を示す⁵⁾ことが既往の報告で確認されている。また耐久性の面においては、LSP の混合率が 0~15%の範囲において混合率を増加させると中性化抵抗性が低下する傾向がみら

れる⁶⁾ものの、水分浸透抵抗性やアルカリシリカ反応抑制効果は高炉セメントと同等程度であることが報告されている^{5) 7)}。鉄筋の腐食は、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ければ鉄筋の腐食が抑制されることが知られており、既往の水分浸透抵抗性の結果を考えれば、三成分混合セメントは高炉セメントと同等の鉄筋腐食抵抗性を有する可能性が示唆される。上記したように、三成分混合セメントは LSP 混合率が 10%程度であれば高炉セメントと同等以上の強度および耐久性を有する可能性がある。しかし、これら報告のほとんどがモルタルの物性評価によるものであり、コンクリート物性および実環境下に暴露した際の物性への影響について検討した事例は少ない。また CO₂ 削減の観点からすると、三成分混合セメントは、LSP の置換方法(基材のポルトランドセメントに対して置換するか、BFS に対して置換するか等)によっては高炉セメントと同等の諸性能を維持したままクリンカファクタを低減できる可能性がある。したがって、コンクリートの物性と CO₂ 排出量の評価を併せて検討することが重要である。

以上の背景から、本研究では LSP を 10%混合した三成分混合セメントを用いてコンクリートを作製し、室内環境および暴露環境における物性の評価を行った。さらに、得られた結果から三成分混合セメントを用いたコンクリートの CO₂ 削減効果について考察を行った。

2. 試験概要

2.1 使用材料

Table 1 に使用した普通ポルトランドセメント (OPC) と BFS の化学組成, **Table 2** にコンクリートに使用した結合材の構成を示す. 結合材は OPC (ブレン比表面積 $3340\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 $3.14\text{g}/\text{cm}^3$), BFS (ブレン比表面積 $4450\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 $2.89\text{g}/\text{cm}^3$) および LSP (ブレン比表面積 $8450\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 $2.71\text{g}/\text{cm}^3$) を混合することで作製し, OPC, 高炉セメント B 種相当品 (BB), 三成分混合セメント (S35, S39, S45) の 5 種類とした. 三成分混合セメントにおける LSP 混合では, OPC の少量混合成分である石灰石を加味して混合率が 10% となるように調整した. 三成分混合セメントは, BB の構成比を基準に, BFS に対して LSP を置換した S35, 高炉セメント B 種に対して LSP を

置換した S39, OPC に対して LSP を置換した S45 の 3 種類とした.

2.2 コンクリート配合

Table 3 にコンクリートに使用した材料を示す. 結合材は **Table 2** に示す 5 種類を使用した. 骨材は細骨材として山砂, 粗骨材として碎石 2005 を使用した. 化学混和剤として AE 減水剤および AE 剤を使用した.

コンクリートの配合は, 水結合材比 (W/B) を 45, 55 および 65% とした. ただし, OPC は 55% のみを試験対象とした. コンクリートの練り混ぜにおいて, フレッシュ性状の目標値は, スランプが $12 \pm 2.5\text{cm}$, 空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ とし, これを満足するように, AE 減水剤の添加率を $B \times 0.25\%$ 一定のもと, 単位水量および AE 剤の添加量を調整した.

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

Materials	Chemical Composition (%)												
	lg.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 ₃	MnO	Cl
OPC	2.87	20.86	5.00	2.93	65.92	1.69	2.13	0.33	0.41	0.33	0.36	0.08	0.02
BFS	0.54	32.66	13.81	0.31	42.50	6.44	2.23	0.20	0.36	0.53	0.01	0.18	0.00

Table 2 Mix proportion of binder
(結合材構成比)

No.	Mix Proportion of Binder (Wt-%)		
	OPC	BFS	LSP
OPC	100	0	0
BB	57.5	42.5	0
S35	57.5	35.0	7.5
S39	53.3	39.0	7.7
S45	47.0	45.0	8.0

2.3 コンクリートの評価方法

(1) コンクリートの評価方法 (室内試験)

コンクリートの作製は, 20°C の試験室内で, 55L パン型ミキサーを用いて行った. フレッシュコンクリートの性状は, JIS A 1101 に準拠してスランプ試験を, JIS A 1128 に準拠して空気量試験を実施した.

圧縮強度の測定は JIS A 1108 に準拠して行った. $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いて, 材齢は 3, 7, 28, 56 および 91 日とした. なお, 脱型は材齢 1 日とし, それ以降は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中養生を行った.

また, W/B=55% を対象に以下の a) ~ d) の試験を実

Table 3 Materials of concrete
(使用材料)

Type	Symbol	物性等
Water	W	Tap Water
Binder	B	Details are shown in Table 2.
Fine Aggregate	S	Saturated surface-dry particle density $2.56\text{g}/\text{cm}^3$,
Coarse Aggregate	G	Saturated surface-dry particle density $2.63\text{g}/\text{cm}^3$,
AD water-reducing agent	AD	Lignin sulfonate-based
AE Agent	AE	Anionic surfactant based on modified rosin oxide compounds

施した．なお，a)，b)およびd)は，OPCを除くBB，S35，S39，S45のみ対象とした．

(a) 促進中性化試験

促進中性化試験はJIS A 1153に準拠し，寸法100mm×100mm×400mmの角柱供試体を用い，試験面は側面の2面とした．測定材齢は促進試験開始から1，4，8，13および26週とした．

(b) 塩分浸透試験

塩分浸透試験はJSCE-G 572およびJSCE-G 574に準拠して行った．28日間20±2℃の水中養生を行ったφ100mm×200mmの円柱供試体の両端面を25mm切断除去し，打ち込み面側以外の面をエポキシ樹脂で被覆を行った．その後，20±2℃，濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に3カ月浸漬させた後，電子線マイクロアナライザー（EPMA）による面分析から塩化物イオンの浸透を測定した．

(c) 水分浸透速度係数試験

水分浸透速度係数試験は，JSCE-G 582に準拠し，28日間20±2℃の水中養生を行ったφ100mm×200mmの円柱供試体の底面を25mm切断し，温度40±2℃，相対湿度30±5%の環境下で恒量となるまで乾燥させた．その後，円周面のみエポキシ樹脂を被覆し，浸漬開始から5，24および48時間後の水分浸透深さを測定した．

(d) 電気泳動試験および移動係数 π の算出

電気泳動試験は，JSCE-G571-2003に準拠して行った．打設後28日間，20±2℃で水中養生し，材齢29日以降気中養生した供試体について，シールを行い，コンクリートを水で飽和させた後，電気泳動を開始した．セル内水溶液として，陰極には0.5mol/LのNaCl溶液を，陽極には0.3mol/LのNaOH溶液を使用し，定常状態における塩化物イオン(Cl⁻)の実効拡散係数 D_e (cm²/s)を求めた．さらに，式[1]⁸⁾に基づき，空隙構造の複雑さの指標となる，移動係数 π を算出した．既往の知見に従い， $D^*=1.474\times10^{-5}$ cm²/sとした．

$$\pi = \frac{D_e/\varepsilon}{D^*} \quad [1]$$

ここに， D^* ：Cl⁻の自己拡散係数(cm²/s)
 ε ：全空隙率

なお，全空隙率 ε は，自由水の逸散によって求め，ゲル空隙を含めるべきであるが，今回は水銀圧入法から算出した．水銀圧入法による空隙径分布測定は，電気泳動試験の場合と同一条件で養生した供試体を対象に測定した．粗骨材を除去し，4.75 mm以上8 mm未満の大きさに切断した後，アセトンで水和停止をした．真空乾燥を1週間行い，D-dry法による乾燥を2週間行ったものを測定試料とした．

(2) コンクリートの評価方法（暴露試験）

OPC以外のW/B=55%の水準を対象に暴露試験を実施した．既往の検討⁹⁾を参考に，28日間20±2℃の水中養生を行ったφ100mm×200mmの円柱供試体を寒冷海洋環境として北海道網走市鱒浦漁港の干満帯，海水滞留環境として北海道紋別市の沿岸部の土壌中に暴露した．紋別の沿岸部では，プラスチックコンテナに供試体，海水および土壌を入れ，深さ50cmの土中に設置した．各暴露環境の気温，湿度および回収時の海水のpHをTable 4に示す．暴露期間は2023年10月～2024年10月の1年間とし，暴露環境の温度ならびに湿度は紋別ではコンテナ内に，鱒浦では干満帯にデータロガーを設置することで直接測定した．暴露を行った供試体はJIS A 1108に準拠して圧縮強度試験を，JIS A 1149に準拠して静弾性係数試験を実施した．なお，本暴露試験は，低温環境下で，硫酸イオンに加えて，石灰石等から炭酸イオンが供給された際に生じ得る，タウマサイト（thaumasite）生成による劣化の促進を意図した．本研究では通常の高炉セメントよりも多くの石灰石を含んでいることから，タウマサイト生成による劣化の有無について実環境で検討した．

Table 4 Environmental condition
 （暴露試験の環境条件）

Location	Temperature (°C)			Humidity(%RH)			pH
	max	min	avg.	max	min	avg.	
Monbetsu	25.0	1.0	10.0	100	67.6	97.6	9.2
Masuura	30.0	-9.0	8.9	100	63.5	95.7	7.9

3. 試験結果

3.1 コンクリート室内試験の結果

(1) フレッシュ性状

コンクリートの配合およびフレッシュ性状をTable 5に示す．なお，記号は使用した結合材の種

Table 5 Mix proportion of concrete and results of fresh concrete
(コンクリート配合とフレッシュ性状)

Symbol	W/B (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)				Chemical admixture(B×%)		Slump value (cm)	Air content (%)
			W	B	S	G	AD	AE		
OPC_55%	55	46	168	305	813	981	0.25	0.0015	10.0	4.3
BB_45%	45	44	170	378	744	973		0.0030	11.0	4.6
BB_55%	55	46	168	306	808	975		0.0020	12.5	4.6
BB_65%	65	48	168	258	862	961		0.0020	12.5	4.1
S35_45%	45	44	170	378	743	973		0.0030	12.0	4.6
S35_55%	55	46	168	306	807	975		0.0020	11.5	4.6
S35_65%	65	48	168	258	862	961		0.0020	11.0	4.0
S39_45%	45	44	170	378	743	973		0.0030	11.0	4.4
S39_55%	55	46	168	305	807	975		0.0020	12.0	3.9
S39_65%	65	48	168	258	862	960		0.0020	12.0	4.0
S45_45%	45	44	170	378	742	971		0.0030	11.0	4.0
S45_55%	55	46	168	305	807	975		0.0020	12.5	3.7
S45_65%	65	48	168	258	861	960		0.0020	12.0	4.1

類と W/B に対応する。三成分混合セメントは、BB と比較して、単位水量および AE 剤の添加率が同等であり、フレッシュ性状の点で特段の留意は必要ないと考えられた。

(2) 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度を **Fig. 1** に示す。材齢 28

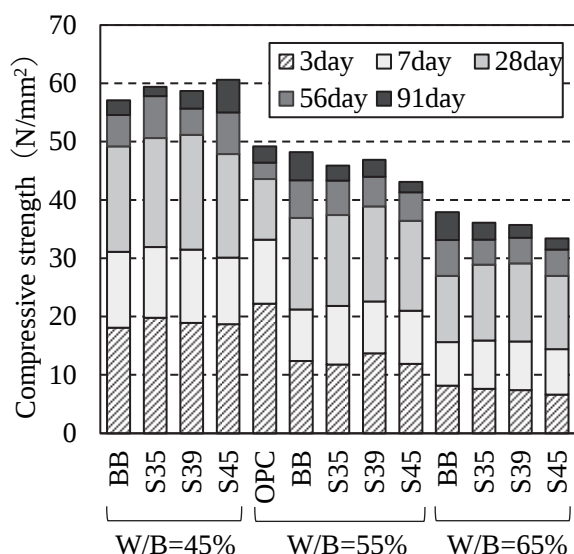


Fig.1 Compressive strength results
(Laboratory test)
(圧縮強度試験結果(室内試験))

日の圧縮強度について、三成分混合セメントは BB と比較すると、S45_45%では BB よりやや低いものの、それ以外は BB と同等以上の圧縮強度を示すことがわかった。一方で、材齢 91 日になると W/B=45%の水準は BB を超える圧縮強度を示したが、W/B=55%, 65%の水準は BB よりもやや圧縮強度が低い傾向が認められた。

ここで、B/W と圧縮強度の関係から材齢 91 日において、三成分混合セメントが BB と同等の強度となる W/B を算出した。その結果、BB_55%, BB_65%と同等となるのは S35 で W/B=52.9%, 63.0%, S39 で W/B=52.8%, 63.1%, S45 で W/B=52.0%, 60.1%となった。したがって、BB と同等の 91 日強度にするためには、BB と比較して、S35 で 2%程度、S39 で 2%程度、S45 で 3~5%程度 W/B を低下させる必要があると考えられた。

(3) 促進中性化試験

促進中性化試験における中性化深さの測定結果を **Fig. 2** に示す。中性化の進行は、BB と S35 が同等の傾向を示し、S39, S45 の順に中性化深さがより大きくなる傾向が確認された。一般的に高炉セメントは、BFS の置換で基材セメント量が減少することや、生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と BFS の反応により $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量が減少するため、OPC よりも中性化速度が大きくなると

されている。本検討における各水準の OPC の構成比は $BB=S35>S39>S45$ であった。一方, BB, S35, S39, S45 の中性化速度係数は, 4.96, 4.93, 5.38, 5.97mm/ $\sqrt{\text{週}}$ であり OPC 構成比と同様の大小関係が確認された。

中性化速度係数と有効水結合材比との関係を Fig. 3 に示す。有効水結合材比は土木学会コンクリート標準示方書[設計編]の関係式¹⁰⁾を参考に算出し, 混和材の種類により定まる定数(k)は BFS を $k=0.7$, LSP を $k=0$ または 0.7 とした。 $k=0.7$ を検討した理由を次に説明する。 LSP の k を 0 とした場合は, 中性化速度係数と有効水結合材比との相関は低い傾向が確認された。そこで中性化速度係数と有効水結合材比を直線回帰した際に決定係数が最も高くなる k を算出し, $k=0.7$ となった。本研究において, k は 0 よりも大きな値であることが示唆され, 既往の知見^{5) 11)}と一致する結果となった。したがって,

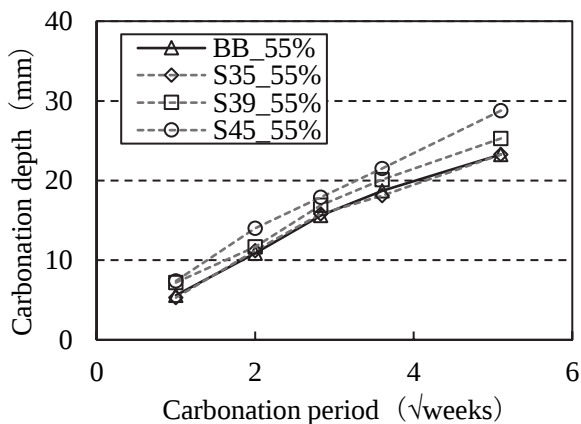


Fig.2 Carbonation depth results
(中性化深さ結果)

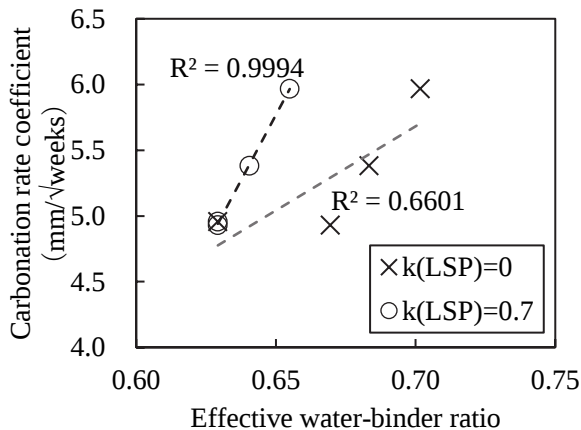


Fig.3 Relationship between Carbonation rate Coefficient and Effective water-binder ratio
(中性化速度係数と有効水結合材比の関係)

LSP は OPC よりも影響が小さいもののコンクリートの中性化抵抗性の向上に寄与している可能性が考えられた。

(4) 塩分浸透試験

塩化ナトリウム水溶液へ浸漬した供試体の分析から求めた, 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および試料表面の塩化物イオン濃度を Fig. 4 に示す。電気泳動試験から求めた, 塩化物イオンの実効拡散係数を Table 6 に示す。塩化物イオンの実効拡散係数および見掛けの拡散係数は, BB と三成分混合セメントの水準でいずれも同程度であり, 既報⁵⁾と同様に三成分混合セメントは BB と同等の塩分浸透抵抗性を有すると考えられた。

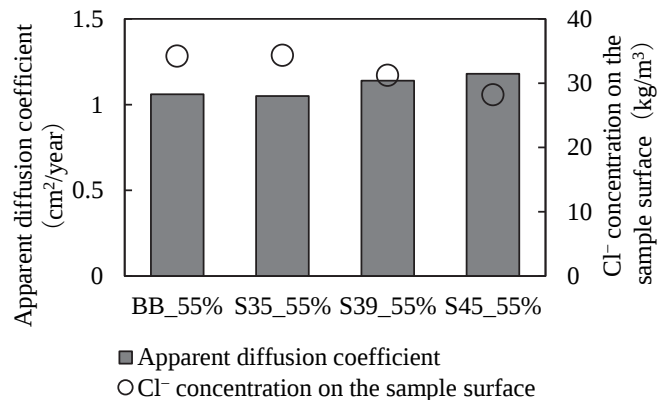


Fig.4 Apparent diffusion coefficient and Cl^- concentration on the sample surface
(見掛けの拡散係数と試料表面の塩化物イオン濃度)

(5) 水分浸透試験

水分浸透試験によって求めた, 水分浸透速度係数を Fig. 5 に示す。既往の報告⁵⁾と同様に BB や三成分混合セメントは OPC よりも水分浸透速度係数が小さくなることが確認された。また, 三成分混合セメントは BB と比較すると水分浸透速度係数が同等であることから, BB と同等の水分浸透抵抗性を有すると考えられた。既報より, 電気泳動試験によって求められる移動係数 π が小さくなる時, 空隙構造が複雑になることが示唆される⁸⁾。空隙の複雑さは水分浸透に影響する可能性があるが, Table 6 に示したように, BB と三成分混合セメントの間で移動係数 π に顕著な差は確認されず, 水分浸透速度係数の傾向と一致するものであった。

なお, 三成分混合セメントにおける水分浸透係数

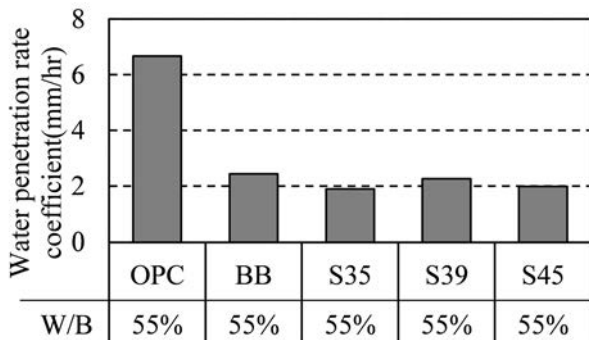


Fig.5 Water penetration rate coefficient (水分浸透速度係数)

Table 6 Diffusion coefficient, porosity, and mobility coefficient (拡散係数、空隙率および移動係数)

No.	$D \times 10^{-8}$ (cm ² /s)	ε	$\pi \times 10^{-3}$
BB	2.37	0.169	9.48
S35	2.33	0.170	9.29
S39	1.55	0.177	5.94
S45	1.69	0.181	6.31

について、モルタルを用いた既往の報告⁵⁾では BFS の混合率が高いほど水分浸透係数は小さくなる傾向が確認されている。しかし本研究では、BFS の混合率と水分浸透係数に明瞭な関係は認められなかった。BFS を大量に混和させたコンクリート硬化体では、養生条件によっては骨材界面の空隙が水分浸透抵抗性に影響を与える可能性がある¹²⁾と報告されていることから、粗骨材の有無は水分浸透抵抗性の測定結果に影響し得る。また試験開始材齢が水分浸透速度係数に影響を与えることが知られている¹⁰⁾。既往の報告では7日養生のモルタル供試体を用いており、本検討では28日養生のコンクリート供試体を用いたことから、これら養生期間の相違や粗骨材の有無によって BFS 混合率と水分浸透係数との関係に違いが生じたものと考えられた。

3.2 コンクリート暴露試験の結果

(1) 圧縮強度

1年間暴露したコンクリート供試体の圧縮強度を Fig. 6 に示す。暴露後の圧縮強度は、いずれも暴露開始の材齢28日時点よりも増加しており、また室内試験の材齢91日時点の圧縮強度よりも大きかった。さらに、暴露環境の違いは明確に確認できなかった。

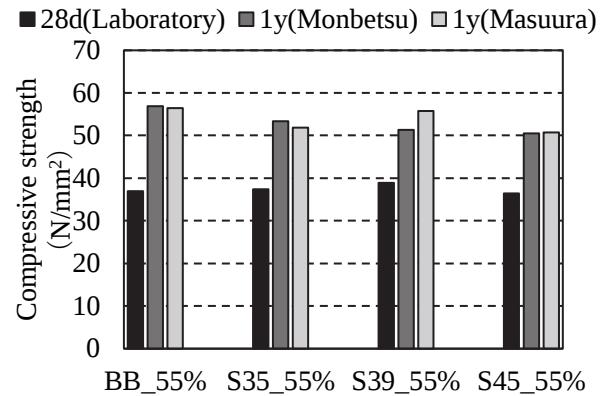


Fig.6 Compressive strength results (Exposure test) (圧縮強度試験結果(暴露試験))

(2) 静弾性係数

1年間暴露したコンクリート供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係を Fig. 7 に示す。図中に土木学会コンクリート標準示方書[設計編]の関係式¹⁰⁾を併せて示す。暴露環境や結合材の違いによる静弾性係数の差はほとんど確認されず、いずれの水準も関係式上に概ねプロットされており、一般的な土木構造物のコンクリートと同等の関係であった。

また、目視で供試体表面を観察した限りではいずれも健全であり、凍結融解、アルカリシリカ反応およびタウマサイト生成によってみられるような、ひび割れやスケーリング等の変状は生じていなかった。したがって、圧縮強度や静弾性係数の結果も考慮すれば、暴露期間1年においては、劣化が生じていな

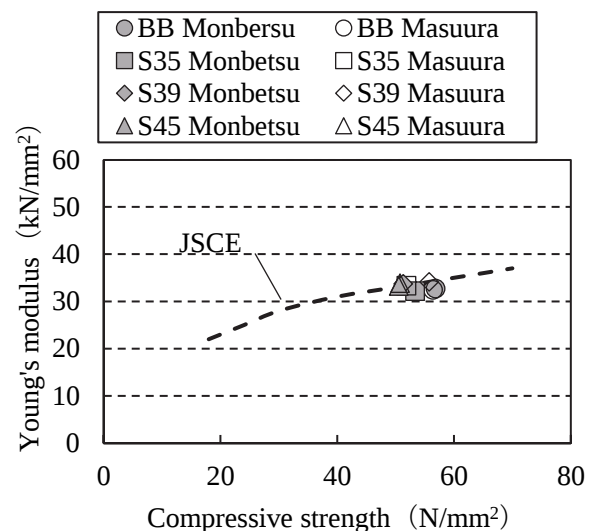


Fig.7 Relationship between compressive strength and Young's modulus (圧縮強度と静弾性係数の関係)

かったと考えた．なお，暴露試験を引き続き実施中であり，長期にわたった検討を行う．

3.3 CO₂排出量の算出

これまでの結果から，三成分混合セメントはBBと同等以上の材齢28日圧縮強度，塩分浸透抵抗性，水分浸透抵抗性を有していた．一方で，材齢91日圧縮強度および中性化抵抗性はややBBに劣っていたが，W/Bを低下させることでBBと同等の性能を確保できると考えられた．そこで，三成分混合セメントのコンクリート1m³当たりのCO₂排出量を，BBと同等以上の圧縮強度，中性化抵抗性，塩分浸透特性，水分浸透特性を有すると考えられるW/Bの条件下で算出した．

算出されたBBと同等の性能を確保できるW/BをTable 7に示す．三成分混合セメントにおいて，「a. 材齢91日圧縮強度がBB(W/B=55%)と同等となる」W/Bは3.1(2)で述べたようにS35で52.9%，S39で52.8%，S45で52.0%であった．また，「b. 中性化抵抗性がBBと同等となる」W/B(W/B=55%)は，中性化速度係数と有効水結合材比の関係から，S35で55.0%，S39で54.2%，S45で52.9%であった．なお，算出時に用いたLSPのkは，中性化速度係数と有効水結合材比を直線回帰した際に決定係数が最も高くなったk=0.7とした．塩分浸透特性および水分浸透特性はW/Bが低下するほど抵抗性が増すとされ¹⁰⁾，本研究では三成分混合セメントはBBと同一のW/Bにおいて同等の抵抗性を有していたことから，圧縮強度と中性化抵抗性の点からW/Bを検討すれば十分であった．いずれの三成分混合セメントにおいてもa<bのため，三成分混合セメントがBBと同等以上の性能を有するW/Bはaの場合となる．したがって，aについて，コンクリート1m³当たりの結合材に起因す

るCO₂排出量を計算した．結果をFig. 8に示す．なお，本計算において，OPC，BFS，LSPのCO₂排出量は，それぞれ789.0¹³⁾，39.8，56.0kg/tとした．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(BFS:4450cm²/g，LSP:8460cm²/g)から既報¹⁴⁾をもとに計算した値である．また，フレッシュ性状の結果よりW/Bの低下により単位水量が増加することから，単位水量はBBで168kg/m³，S35，S39，S45で169kg/m³とした条件で計算を行った．CO₂排出量をBBと比較すると，S35はCO₂排出量が増加，S39はBBと同等，S45は11.1%のCO₂削減となった．なお本検討は，W/B=55%のBBを基準にCO₂削減効果を検討したものであり，W/B=45%の91日圧縮強度がBBよりも三成分混合セメントの方が大きかったことを考慮すると，基準とするBBのW/BによってCO₂削減効果は異なると考えられる．

以上より，OPC比率がBBよりも低い，S39，S45であればBBと同等の性能で，かつCO₂排出量の削減が可能となることがわかった．一方で，OPC比率がBBと同等のS35では，CO₂排出量がBBよりも増加していた．既往の報告¹⁵⁾では，クリンカのエアライト含有量を高めた混合セメントにおいて強度発現性や中性化抵抗性が向上することが期待できるとされる．さらなるCO₂排出量の削減に対し，三成分混合セメント中の基材OPCの鉱物組成を調製すること等もアプローチの一つと思料され，今後の検討が必要と考えられた．

Table 7 Calculation of W/B to ensure equivalent performance to BB (W/B=55%)
(BB(W/B=55%)と同等の性能を確保できるW/Bの算出)

Conditions	Performance equivalent to BB (W/B=55%)	Calculated W/B (%)		
		S35	S39	S45
a	Compressive strength at 91 days	52.9	52.8	52.0
b	Carbonation resistance (k=0.7)	55.0	54.2	52.9

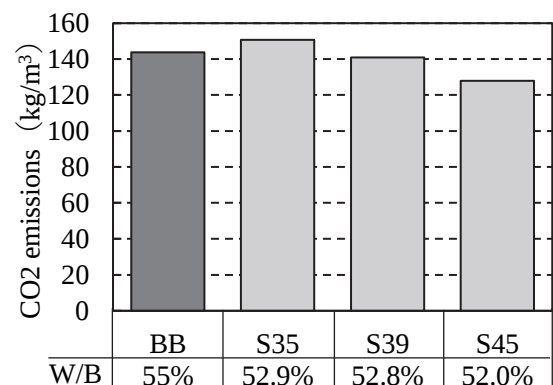


Fig. 8 CO₂ emissions per 1 m³ of concrete (コンクリート1m³あたりのCO₂排出量)

4. ま と め

LSP を 10%混合した三成分(石灰石-高炉スラグ)混合セメントを用いたコンクリートについて, 室内または暴露試験によって物性の評価を行った. 本稿において, 得られた知見を以下に示す.

- (1) コンクリートのフレッシュ性状, 材齢 28 日圧縮強度, 塩分浸透特性および水分浸透特性は BB と同等以上の値が得られた.
- (2) コンクリートの材齢 91 日圧縮強度は, W/B=45% の時 BB と同等以上の値を示し, W/B=55%, 65% の時やや低くなる傾向が確認された.
- (3) コンクリートの中性化速度係数は, OPC 比率が BB と同一の場合は同等以上の値が得られ, OPC 比率が減るに伴い BB よりも低下する傾向が確認された.
- (4) 北海道の寒冷海洋環境ならびに海水滞留環境において暴露したコンクリートについて, 暴露期間 1 年間ではタウマサイト等に起因する劣化は認められなかった.
- (5) BB と同等以上の圧縮強度, 中性化抵抗性, 塩分浸透特性, 水分浸透特性を有する, 三成分混合セメントを用いたコンクリートの CO₂ 排出量は, BB 比で最大 11.1%削減可能と試算された.

参 考 文 献

- 1) 太平洋セメント. 統合報告書: 太平洋セメントレポート 2022. 2022, p. 26-29.
- 2) 太平洋セメント. 統合報告書: 太平洋セメントレポート 2025. 2025, p. 46-49.
- 3) 桐野裕介. 石灰石によるセメント・コンクリートの品質向上および環境負荷低減効果. CEM' S. 2024, (102), p. 12-15.
- 4) 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).
- 5) 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.
- 6) 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. 2014, 36, e1028.
- 7) 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. 第 75 回セメント技術大会講演要旨. 2021, e3103.
- 8) 細川佳史, 山田一夫, 高見 満ほか. 浸せき法および電気泳動法により評価した塩化物イオン拡散係数に関する検討. コンクリート工学年次論文集. 2003, 25 (1), p. 725-730.
- 9) 細川佳史, 北澤健資, 野崎隆人ほか. 実海洋環境におけるタウマサイト硫酸塩劣化の可能性. コンクリート工学年次論文集. 2011, 33, e1112.
- 10) 土木学会. 2022 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]. 2023.
- 11) 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. 土木学会年次学術講演会講演概要集. 2024, 79, eV-695.
- 12) 深澤英将, 荒木 萌, 伊代田岳史. 温度履歴を与えた高炉コンクリートにおける水分浸透挙動の把握. 土木学会年次学術講演会講演概要集, 2020, 75, eV-47.
- 13) 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.
- 14) 盛岡 実, 前田悦孝, 坂井悦郎ほか. 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. 2004, 15 (2), p. 79-88.
- 15) 新杉匡史, Norrarat SIRIBUDHAIWAN, 新 大軌, ほか. 混合セメントにおける高エーライトクリンカーの利用. セメント・コンクリート論文集. 2014, 68, p. 212-217.