

論文 石灰石—高炉スラグ混合セメントを用いたコンクリートの室内・暴露環境における各種物性と CO₂ 削減効果に関する検討

渡辺 泰樹*1・扇 嘉史*2・細川 佳史*3

要旨：高炉セメント B 種(BB)の結合材構成比を基準に、LSP の混合率を 10%として、その置換法を変えて試験した三成分(石灰石—高炉スラグ)混合セメントについて、室内環境と暴露環境においてコンクリートの各種物性を評価した。室内環境での試験の結果、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有することが確認された。また、寒冷海洋環境と海水滞留環境を対象とした 1 年間の暴露試験の結果、いずれのコンクリートも健全な状態であった。BB と同等以上の性能を有する、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、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

1. はじめに

セメント産業では、2050 年のカーボンニュートラル達成に向けて、様々な CO₂ 削減技術の開発が進められている。これら CO₂ 削減技術の一つとして、少量混合成分の増加や高炉セメントなどの混合セメントの利用検討といった混合材の活用増加によるクリンカファクタ(クリンカ比率)の低減¹⁾が挙げられる。特に高炉スラグ微粉末(BFS)は、日本国内で最も利用されている混合材であり、今後もさらに需要が高まる可能性がある。しかし、鉄鋼の製造では電炉方式等への移行が進められ、BFS の発生量が減少することが予想されている²⁾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であり、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³⁾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⁴⁾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^{3),5)}。鉄筋の腐食は、コンクリートの中

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、コンクリート物性からの検討は少ないのが現状である。また、三成分混合セメントを用いたコンクリートの劣化では、高炉セメントよりも LSP を多く含有することからタウマサイトの生成による劣化が懸念される。タウマサイトの生成には、低温環境下において、水、硫酸塩からの硫酸イオン供給、石灰石等の炭酸塩からの炭酸イオン供給、Si の存在が必要であり、C-S-H の分解を伴いながら生成し、組織が脆弱化するとされている。国内でのタウマサイト生成による劣化事例はほとんどないものの三成分混合セメントではこれらリスクが懸念されることから、実環境下において生成し得るのか検討が求められる。

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

表—1 OPC および BFS の化学組成

材料	化学組成(%)												
	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 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	42.5	6.44	2.23	0.2	0.36	0.53	0.01	0.18	0.00

*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 修士(工学) (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)

表－2 結合材構成比

記号	結合材構成比(%)		
	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

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

表－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、表－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 3340cm²/g, 密度 3.14g/cm³), BFS (ブレン比表面積 4450cm²/g, 密度 2.89g/cm³) および LSP (ブレン比表面積 8450cm²/g, 密度 2.71g/cm³) 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

表－3 にコンクリートに使用した材料を示す。結合材は表－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)。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±2.5cm, 空気量が 4.5±1.5% とし、これを満足するように、AE 減水剤の添加率を B×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。

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℃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。

表－3 使用材料

種類	記号	物性等
水	W	上水道水
結合材	B	詳細は表－2 に示した通り
細骨材	S	表乾密度 2.56g/cm ³ ,
粗骨材	G	表乾密度 2.63g/cm ³ ,
AE 減水剤	AD	リグニンスルホン酸系
AE 剤	AE	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表－4 暴露試験の環境条件

場所	気温(℃)			湿度(%RH)			pH
	最高	最低	平均	最高	最低	平均	
紋別	25.0	1.0	10.0	100	67.6	97.6	9.2
鱚浦	30.0	-9.0	8.9	100	63.5	95.7	7.9

圧縮強度の測定は JIS A 1108 に準拠して行った。φ 100mm×200mm 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±2℃の水中養生を行った。

OPC 以外の W/B=55%を対象に促進中性化試験と塩分浸透試験を実施した。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。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 φ 100mm×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深さを測定した。

W/B=55%の水準を対象に水分浸透速度係数試験を JSCE-G 582 に準拠して行った。28 日間 20±2℃の水中養生を行った φ 100mm×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。

(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 φ 100mm×200mm の円柱供試体を寒冷海洋環境として北海道網走市鱚浦漁港の干満帯、海水滞留環境として北海道紋別市の沿岸部の土壤中に暴露した。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 を表－4 に

表-5 コンクリート配合とフレッシュ性状

記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤添加量(B×%)		フレッシュ性状	
			W	B	S	G	AD	AE	スランプ	空気量
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

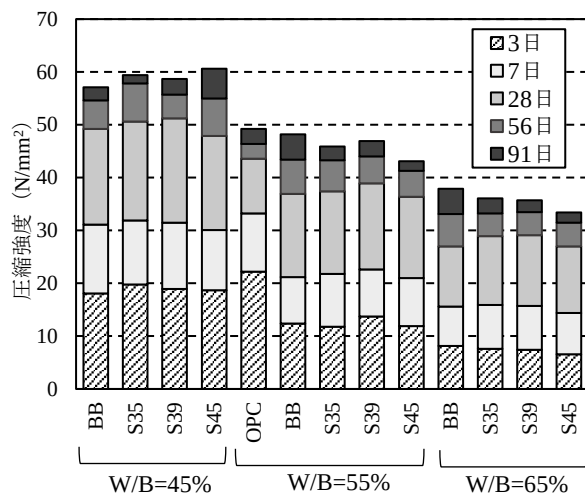


図-1 室内試験におけるコンクリートの圧縮強度

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。

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表-5に

示す。なお、記号は使用した結合材の種類と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図-1に示す。材齢28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図-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Ca(OH)₂とBFSの反応によりCa(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/√週でありOPC構成比と同様の大小

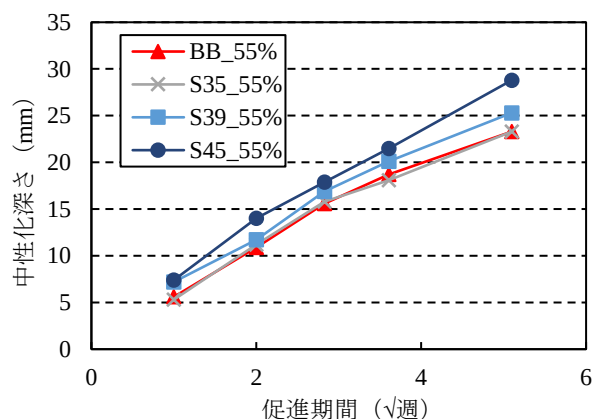


図-2 中性化深さ

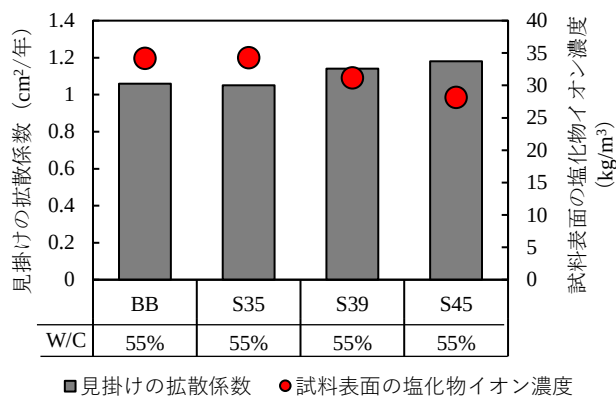


図-4 見掛けの拡散係数および
試料表面の塩化物イオン濃度

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図-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⁷⁾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^{3),8)}と一致する結果となった。したがって、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

塩分浸透試験によって測定した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図-4に示す。塩化物イオンの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³⁾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。

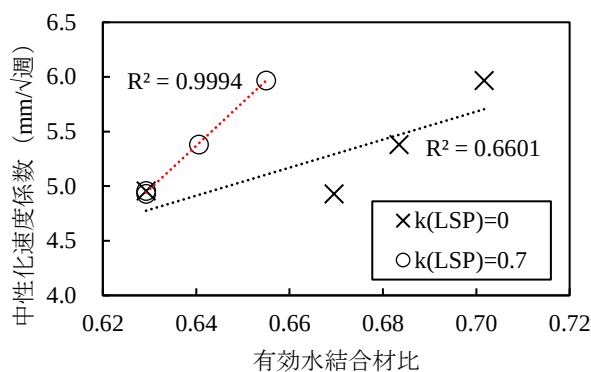


図-3 中性化速度係数と有効水結合材比の関係

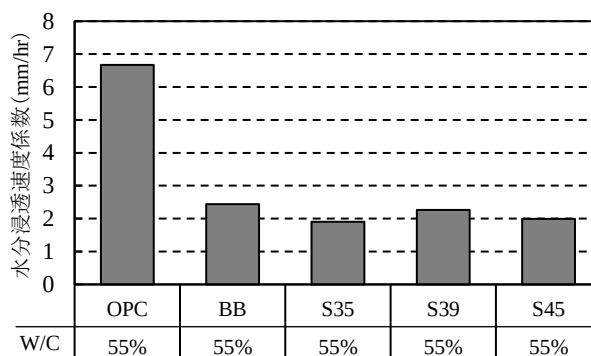


図-5 水分浸透速度係数

(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図-5に示す。既往の報告³⁾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いずれもBBよりも水分浸透速度係数が低く、BBと同等以上の水分浸透抵抗性を有すると考えられた。

三成分混合セメントにおける水分浸透係数について、モルタルを用いた既往の報告³⁾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⁹⁾と報告されていることから、粗骨材の有無および養生条件は水分浸透抵抗性の測定結果に影響し得る。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。また水分浸透係数については、C-S-HのCa/Siが低いほど空隙の屈曲度が増加し、水分浸透抵抗性に影響を与える可能性¹⁰⁾が考えられるなど、いくつかの要因が複合的に作用しているため、これら影響を踏まえて今後も詳細な検討が求められる。

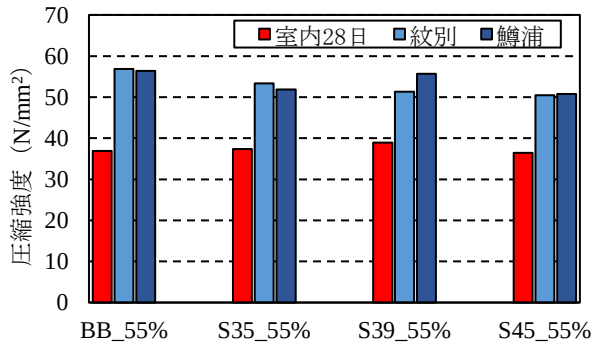


図-6 暴露試験におけるコンクリートの圧縮強度

表-6 BB と同等の性能を確保できる W/B の算出

算出条件	BB と同等にする物性	算出された W/B (%)		
		S35	S39	S45
a	材齢 91 日圧縮強度	52.9	52.8	52.0
b	中性化抵抗性(k=0.7)	55.0	54.2	52.9

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図-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。

(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図-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⁷⁾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、ひび割れやスケール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

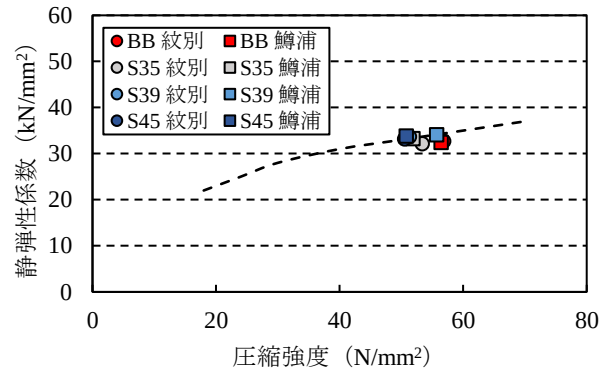


図-7 圧縮強度と静弾性係数の関係

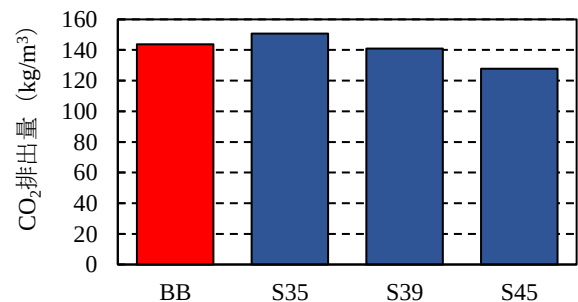


図-8 CO₂ 排出量

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 を表-6 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 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³⁾、本研究では三成分混合セメントは BB と同一の W/B において同等以上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。結果を図-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 789.0¹¹⁾、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:8460 cm²/g) から既報¹²⁾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/m^3 、S35,S39,S45 で 169kg/m^3 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¹³⁾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史料され、今後の検討が必要と考えられた。

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。

謝辞：網走、紋別における暴露試験の実施にあたり、北見工業大学の井上真澄教授、崔希燮教授に多大なるご協力を頂きました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) セメント協会：カーボンニュートラルを目指すセメント産業の長期ビジョン，2022
- 2) 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同行と原料炭需要への影響等調査，2022
- 3) 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
- 4) 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，Vol. 36，No. 1，pp. 208-213，2014
- 5) 中口歩香，桐野裕介，林建佑，内田俊一郎：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，pp. 188-189，2021
- 6) 細川佳史，北澤健資，野崎隆人，山田一夫：実環境におけるタウマサイト硫酸塩劣化の可能性，コンクリート工学論文集，Vol.33，No.1，pp. 707-712，2011
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2022
- 8) 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
- 9) 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，土木学会第 75 回年次学術講演会講演概要集，V-47，2020
- 10) Luge Chegg et al. : Plugging effect of fine pore water in OPC and LC3 paste during accelerated carbonation monitored via single-sided nuclear magnetic resonance spectroscopy, Cement and Concrete Research, Vol.186, 10688, Dec.2024
- 11) 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，2024
- 12) 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
- 13) 新杉匡史，Norrarat SIRIBUDHAIWAN，新大軌，坂井悦郎：混合セメントにおける高エアライトクリンカーの利用，Cement Science and Concrete Technology，Vol.68，pp.212-217，2014