

# 論文 セメント混合成分の種類および量がコンクリートの諸性状に与える影響

中村 士郎<sup>\*1</sup>・山田 一徳<sup>\*2</sup>・鈴木 宏信<sup>\*3</sup>・岡本 英明<sup>\*4</sup>

**要旨:** コンクリート製造に伴う CO<sub>2</sub> 発生量削減に向けた方策の 1 つとして, セメントの少量混合成分を現行の 5%以下から 20%まで増加した場合のコンクリートの諸性状を検討した。混合成分の種類や量により, コンクリートの流動性, 強度発現や耐久性に与える影響は異なり, 同一強度のコンクリートを製造する際の CO<sub>2</sub> 発生量は, 現行のセメントを使用する場合に比べて増加するケースも減少するケースもあることを明らかにした。CO<sub>2</sub> 発生量を削減できるケースにおけるコンクリートの耐久性予測結果は, 本研究の範囲では中性化に関して低下し, 塩害に対しては向上した。

**キーワード:** セメント混合成分, 石灰石微粉末, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 強度, 耐久性

## 1. はじめに

ポルトランドセメントの JIS R 5210 では, 少量混合成分の使用が認められている。これは, 1979 年の同 JIS 改正において, 省資源, 省エネルギーの観点から認められたものであり, 高炉スラグ, フライアッシュ, 石灰石などの混合材が 5%を上限に使用されている。セメント製造による CO<sub>2</sub> 排出の約 6 割がクリンカー焼成時の石灰石の脱炭酸によるものであり, 混合材を使用することによりクリンカー焼成量を抑制し, 焼成エネルギーおよび CO<sub>2</sub> 排出量を削減するものである<sup>1)</sup>。混合材の上限値 5% は, セメントの性能に影響を与えない範囲として定められており<sup>2)</sup>, それ以上の混合材を使用したセメントは高炉セメントなどの混合セメントとなる。

今後さらに重要性の増すことが確実である地球温暖化などの環境問題に対するセメント・コンクリート分野の取組みの方向性として, セメントに代表される材料起源の CO<sub>2</sub> 排出量を更に削減していくことは重要である。しかし, クリンカー製造量を削減することは, 安全でクリーンな産業廃棄物処理というセメント工場の大きな社会的役割の容量を小さくすることにつながる。廃棄物使用量の増大と CO<sub>2</sub> 排出量の削減の両立を目指した取組みも行われている<sup>3)</sup>。

一方で, 著者らは近年の高強度化したポルトランドセメントに対する低強度セメントとしてのアプローチとして, EN197-1 の 42.5N, 32.5N (42.5, 32.5 が材齢 28 日セメント強さの下限値に対応) に相当する石灰石フィラーセメントに関する検討を行ってきた。石灰石を混合材として 15%程度混合粉碎したセメントは, 目標強度が低く, 水セメント比の高いコンクリートにおいて単位セ

メント量が増加し, 施工性の向上が見られるほか, 炭酸ガスや塩化物イオンなどの物質透過性も改善することを報告している<sup>4)</sup>。

環境負荷の抑制と廃棄物処理というセメント産業に課せられた課題に対しては多面的な方策が検討されるべきであるが, 現行の少量混合成分の上限値の緩和という方向性は, 上記 2 つの課題に加えて, コンクリートの耐久性も含めた性能の最適化という観点からも重要なものと考えている。しかし, 混合材の混合率を 20%以下とした場合のコンクリートの耐久性, 特に混合材種類を変化させた場合の検討は十分になされていないのが現状である。

本論文では, 現行 5%以下とされる少量混合成分を最大 20%まで増加させることを想定し, 各種混合材を使用した場合のコンクリートの流動性や強度といった基礎的性状に加えて耐久性について検討を行った。

## 2. 実験概要

混合成分として 5%の石灰石が用いられた普通ポルトランドセメントを現行品と位置づけ, それに石灰石微粉末, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュを混合した 12 種類のセメントを使用し, コンクリートの基礎的性状および耐久性試験を実施した。

### 2.1 セメント

実験に用いた普通ポルトランドセメント, 石灰石微粉末, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュの物理特性, 化学成分を表-1 に示す。普通ポルトランドセメントはセメント工場で製造されたものであり, 粉碎工程にて少量混合成分として石灰石を混合粉碎している。熱分析

\*1 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所課長代理 工博 (正会員)

\*2 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 工修

\*3 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所副センター長 工博 (正会員)

\*4 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所センター長 (正会員)

表-1 使用セメント、混合材の物理、化学試験結果

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	強熱減量 (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Cl (%)	備考
普通ポルトランドセメント(NC)	3.15	3470	2.45	20.44	63.93	1.57	2.18	0.025	石灰石混合率3.6%
石灰石微粉末(LP)	2.73	4860	42.49	-	54.54	0.97	-	0.001	LP品質規格を満足
高炉スラグ微粉末(SG)	2.92	3600	-	34.85	41.79	6.07	0.27	0.002	JIS 4000品
フライアッシュ(FA)	2.26	3560	2.00	59.80	-	-	-	0.001	JIS II 種品

(TG-DTA) による石灰石混合量の実測値は 3.6%であった。石灰石微粉末は、CaCO<sub>3</sub>を 97%含み、プレーン比表面積 4860cm<sup>2</sup>/g に粉砕したものであり、JCI 基準案「コンクリート用石灰石微粉末品質規格」を満足するものを用いた。高炉スラグ微粉末は、セメント原料や高炉セメント用に使用される水砕スラグを石膏は添加せずにプレーン比表面積 3600cm<sup>2</sup>/g に粉砕して用いた。フライアッシュは、JIS II 種品を用いた。

表-1 に示す材料を混合して 12 種類のセメントを試製した。材料の混合割合を表-2 に示す。基準となる普通ポルトランドセメント (NC) に含まれる石灰石と併せて、混合材量が 5, 10, 15, 20%となるように石灰石微粉末 (LP), 高炉スラグ微粉末 (SG), フライアッシュ (FA) を所定量混合した。以後、表-2 に示すように混合材の混合率に応じて各セメントを LP5FA5, LP10SG10 などの略称を用いる。

## 2.2 コンクリート配合および材料

12 種類のセメントを使用して水セメント比 55%および 45%の 2 配合のコンクリートを製造し、試験に用いた。使用材料を表-3、コンクリート配合を表-4 に示す。

混合材の種類および量がコンクリートの性状に与える影響を把握することを目的とし、各水セメント比における単位水量は 12 種類のセメントで一定とした。AE 助剤の使用量のみ変化させて空気量を 4.5±1.0%に調整した。水セメント比 55%の配合は、現行品である LP5 を用いた場合の目標スランプを 8cm とした土木用配合であり、AE 減水剤を使用した。水セメント比 45%の配合は同様に目標スランプを 18cm とした建築用配合であり、高性能 AE 減水剤を一定量使用した。

## 2.3 試験項目および方法

### (1)セメント物理試験

表-2 に示した 12 種類のセメントの圧縮強さを JIS R 5201 に従い測定した。

### (2)コンクリート試験

コンクリートは、20±3°Cの恒温室内にて容量 55L の強制 2 軸練りミキサにより練混ぜ、練上り直後にスランプ、空気量、コンクリート温度を測定した。その後、供試体を作製して下記の試験を実施した。

圧縮強度：JIS A 1108 に従い、材齢 3, 7, 28, 91 日における標準養生の圧縮強度を測定した。

乾燥収縮：JIS A 1129-2 に従い、温度 20±2°C、湿度 60

表-2 使用セメントの材料混合率

名称	セメント		混合率 (%)		
	種類	量 (%)	LP	SG	FA
LP5	NC	95	5	0	0
LP10		90	10	0	0
LP5SG5			5	5	0
LP5FA5			5	0	5
LP15		85	15	0	0
LP10SG5			10	5	0
LP5SG10			5	10	0
LP20		80	20	0	0
LP15SG5			15	5	0
LP10SG10			10	10	0
LP5SG15			5	15	0
LP5FA15			5	0	15

表-3 コンクリートの使用材料

細骨材	揖斐川産川砂 表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> 吸水率 2.54,F.M. 2.50
粗骨材	西島産碎石 表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup> 吸水率 0.62,F.M. 6.63
AE減水剤	リゲニンスルホン酸系
高性能 AE減水剤	ポリカルボン酸系
AE助剤	陰イオン界面活性剤
水	上水道水

表-4 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		混和剤量(C×%)	
		水	セメント	AE 減水剤	高性能 AE減水剤
55	44.5	165	300	0.25	-
45	45.0	167	371	-	0.7

±5%の乾燥条件における乾燥収縮ひずみを材齢 182 日まで測定した。

自己収縮：JCI-SAS2 に従い、埋込みひずみゲージを使用した自己収縮ひずみの測定を材齢 91 日まで行った。測定は、水セメント比 45%の配合のみ実施した。

中性化：JIS A 1153 に従い、促進中性化試験を行い、促進 26 週における中性化速度係数を算出した。

塩化物イオン透過性：JSCE-G 572 に従い、10%NaCl 溶液への浸漬による見掛けの拡散係数を測定した。浸漬期間は 6 ヶ月とした。

## 3. 試験結果

### 3.1 フレッシュ性状

水セメント比を 45%および 55%としたコンクリートのスランプと混合材の混合率との関係を図-1、図-2 に示

す。混合材を現行品 (LP5) より増加させた場合、全てのケースでスランブは大きくなった。使用した混合材のブレン比表面積は、石灰石微粉末が  $4860\text{cm}^2/\text{g}$ 、高炉スラグ微粉末が  $3600\text{cm}^2/\text{g}$ 、フライアッシュが  $3560\text{cm}^2/\text{g}$  とベースとなるセメント ( $3470\text{cm}^2/\text{g}$ ) に比べて大きく、粉体としては細かいものの、注水直後からの反応の有無、速度や粒形の違いにより、粉体としての拘束水が少なくなり流動性が増したものと考えられる。また、混合材の増量による間隙相量の希釈効果の影響<sup>6)</sup>も流動性の向上

に寄与している可能性がある。混合材種類の影響としては、高炉スラグ微粉末の混合率の増加に伴うスランブの増加は比較的小さく、石灰石微粉末、フライアッシュの使用によるスランブの増加が大きくなった。

### 3.2 強度特性

材齢 7 日、28 日におけるセメント物理試験による圧縮強さおよび水セメント比を 55%、45% としたコンクリートの圧縮強度と混合材の混合率の関係を図-3~8 に示す。石灰石微粉末の混合率を増加させた場合、材齢によら

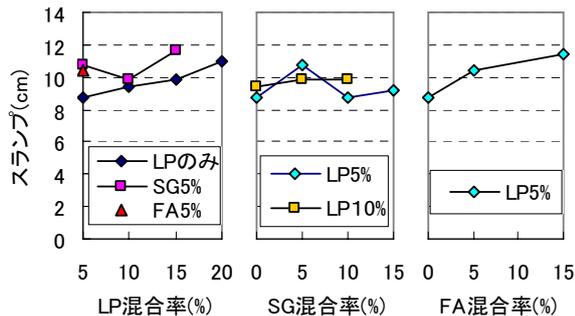


図-1 混合セメント使用コンクリートのスランブ (W/C55%)

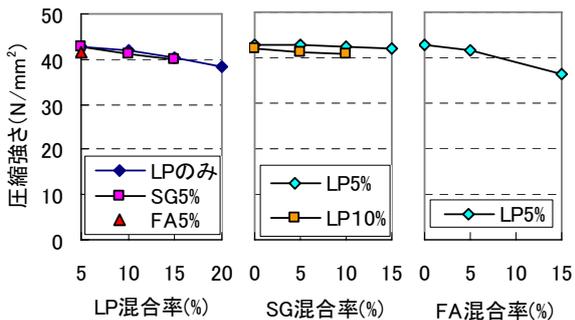


図-3 混合セメントのセメント圧縮強さ (材齢7日)

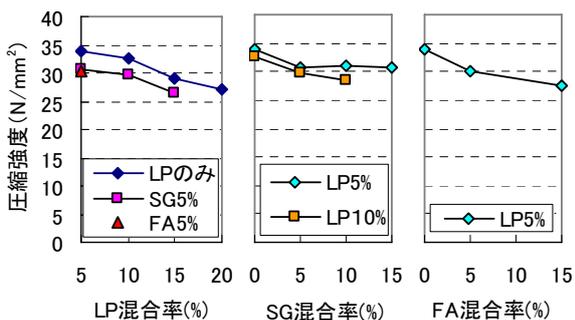


図-5 コンクリートの圧縮強度 (W/C55%、材齢7日)

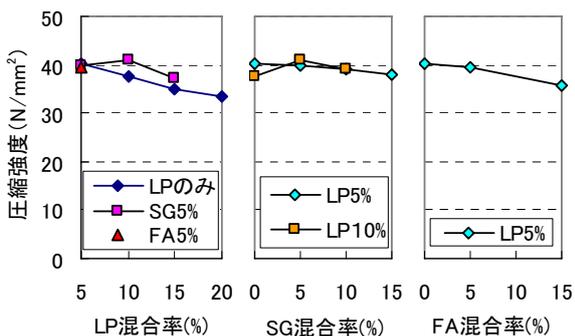


図-7 コンクリートの圧縮強度 (W/C45%、材齢7日)

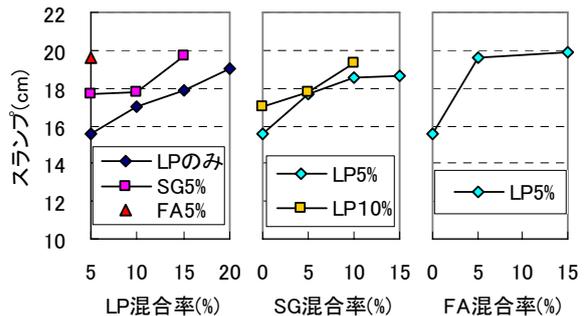


図-2 混合セメント使用コンクリートのスランブ (W/C45%)

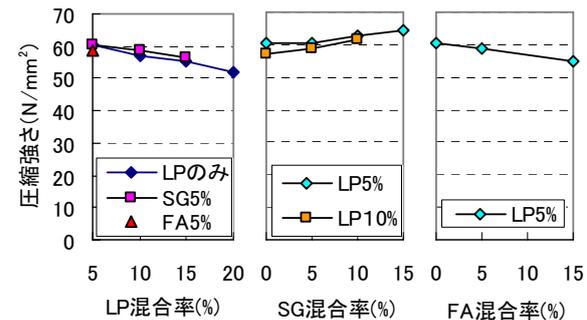


図-4 混合セメントのセメント圧縮強さ (材齢28日)

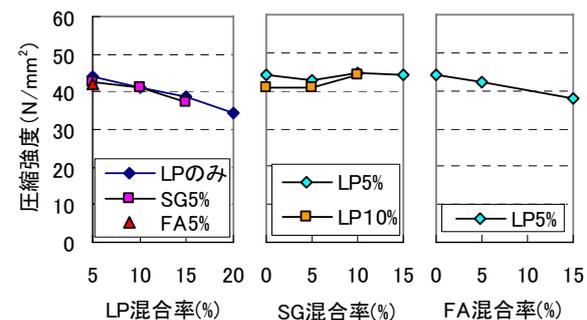


図-6 コンクリート圧縮強度 (W/C55%、材齢28日)

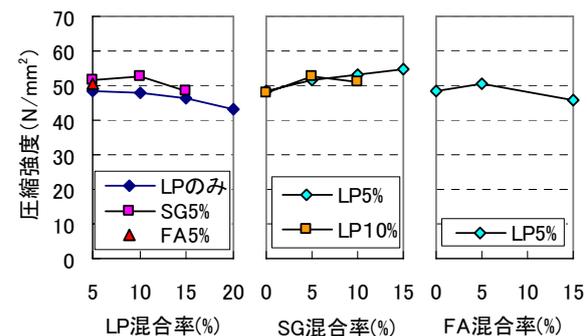


図-8 コンクリートの圧縮強度 (W/C45%、材齢28日)

ず圧縮強さ，コンクリート強度ともに小さくなる傾向にあった。石灰石微粉末をセメントの内割りで使用した場合の強度低下は数多く報告されているとおりである。また，石灰石微粉末によりエーライトの水和が促進され，初期材齢における強度低下は緩和されることも報告されているが<sup>例え7)</sup>，本研究では石灰石微粉末のみを混合材として使用した場合，混合率増加に伴う強度低下割合は材齢7日と28日で同程度となった。また，石灰石微粉末の混合率増加に伴う強度低下は，各配合においてほぼ直線関係にあるが，その強度低下割合は配合により違いが見られた。石灰石混合率5%に対する混合率20%の強度低下率は，22% (W/C55%コンクリート)，14% (JISモルタル：W/C50%)，12% (W/C45%コンクリート)，となり，水セメント比が低いほど強度低下率は小さくなった。小澤らは，水粉体比が低下するほど石灰石微粉末置換に伴う強度低下は抑制され，水粉体比27%では混合率20%に対して強度低下は5%程度に留まることを報告している<sup>8)</sup>。これは，水粉体比が低いと水和物の生成空間が不足するために結合材は完全水和できなくなり，不活性な鉱物微粉末で置換しても水和物量の低下が抑制されるためと報告している。本研究の強度試験結果は，水セメント比が小澤らの報告より高い45～55%の範囲でも同様の傾向を示しており，混合成分として石灰石微粉末を増量させた場合，同一水セメント比における強度低下は避けられないものの，同一強度を得るための水結合材比としては増加する可能性を示している。

高炉スラグ微粉末を混合した系では，スラグ混合率の増加に伴い，材齢7日では若干の強度低下またはほとんど変化が無く，材齢28日では増加傾向を示した。また，高炉スラグ微粉末を混合率5%で石灰石微粉末と併用することにより，石灰石微粉末を単独使用した場合に比べて強度低下は抑制された。フライアッシュを混合した系では，材齢28日まで強度が低下する傾向を示した。

### 3.3 耐久性

#### (1)収縮特性

水セメント比を55%および45%としたコンクリートの材齢182日における乾燥収縮を図-9および図-10に示す。乾燥収縮ひずみは-670～-740 $\mu$ の範囲となり，混合率を20%以下とした場合の混合材の種類および量の影響は比較的小さいものと判断される。また，水セメント比を45%としたコンクリートの材齢91日における自己収縮を図-11に示す。自己収縮ひずみは-150 $\mu$ 以下と小さいものの，高炉スラグ微粉末の混合量が多いほど増大する傾向を示した。石灰石微粉末，フライアッシュの使用が自己収縮に与える影響は比較的小さいものの，石灰石微粉末の混合率を5%とした場合に比べて混合率を10%とした場合の方が高炉スラグ微粉末の増加に伴う

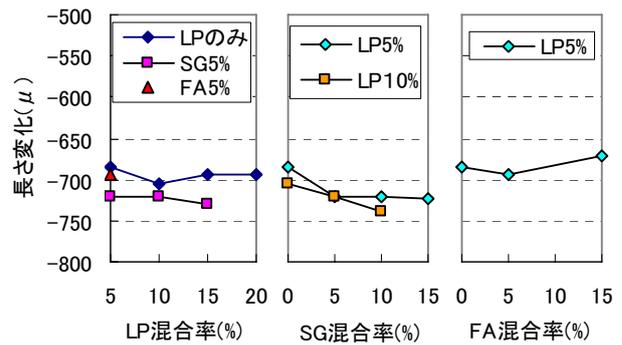


図-9 コンクリートの乾燥収縮ひずみ (W/C55%、材齢182日)

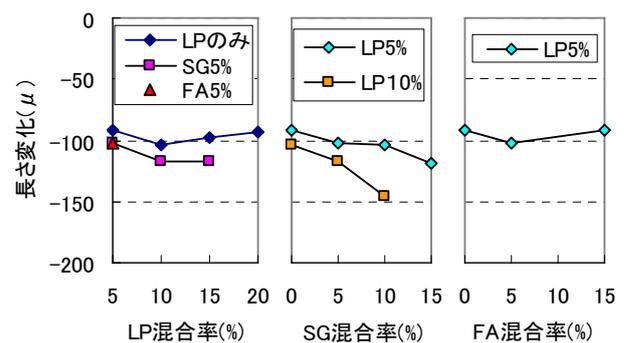
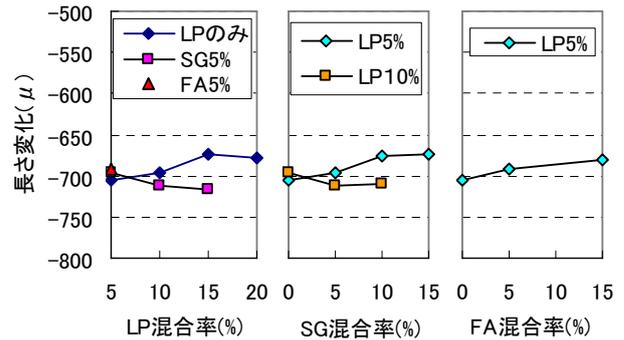


図-11 コンクリートの自己収縮ひずみ (W/C45%、材齢91日)

自己収縮量の増加が顕著であった。

#### (2)物質透過性

水セメント比を55%および45%としたコンクリートの促進試験による中性化速度係数を図-12および図-13に示す。混合材の混合率の増加は，中性化速度を増加させる傾向にあり，特に石灰石微粉末とフライアッシュの混合率増加による影響が大きくなった。この2つの混合材の混合率増加は，強度低下への影響も比較的大きかったことから，炭酸ガスの透過抵抗性を支配する細孔量が増加したものと推測される。一方，高炉スラグ微粉末を混合した場合の中性化速度は，水セメント比55%では増加したものの，水セメント比45%では若干減少する傾向にあった。これは，高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートでは，スラグの水和反応が水酸化カルシウムを消費するため，中性化に対する抵抗性が低下すると考えられるが，混合率が最大15%と小さいことおよび水セメント比が低下するとスラグ混合に伴う細孔構造の緻密化

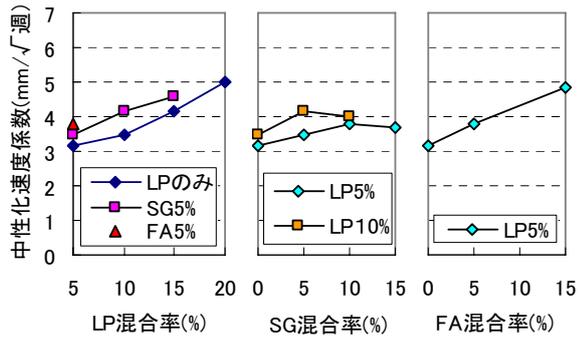


図-12 コンクリートの中性化速度係数(W/C55%)

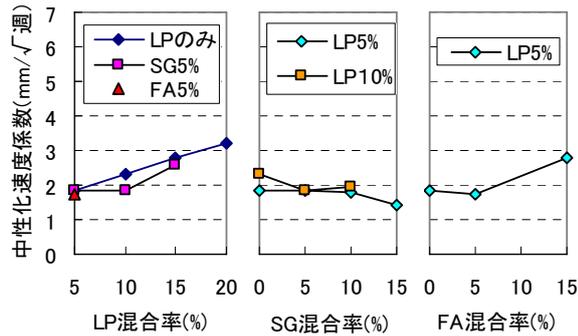


図-13 コンクリートの中性化速度係数(W/C45%)

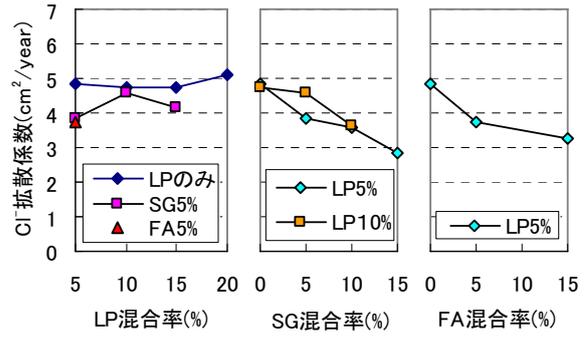


図-14 コンクリートの塩化物イオン拡散係数(W/C55%)

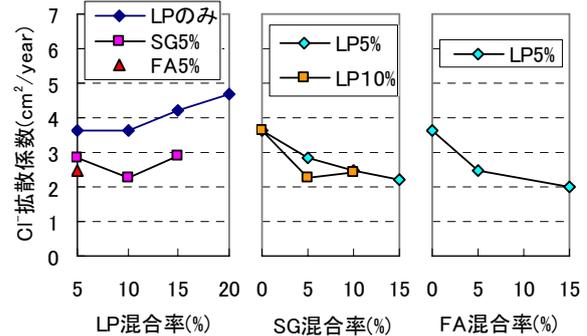


図-15 コンクリートの塩化物イオン拡散係数(W/C45%)

の影響が卓越することなどによって考えられる。

水セメント比を 55%および 45%としたコンクリートを 6ヶ月塩水浸漬して得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数を図-14 および図-15 に示す。高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを使用した系では、混合率の増加に伴い拡散係数が減少する傾向であった。混合率が 5～15%程度と比較的少量であっても塩化物イオンの内部への侵入を抑制する効果が期待される。石灰石微粉末の混合率を増加させた場合には、拡散係数がやや増加する傾向にあるが、拡散係数の増加は水セメント比を 45%とした場合に比べて水セメント比を 55%とした場合の方が小さくなった。著者らの過去の研究では、石灰石を 15%混合させた石灰石フィラーセメントと石灰石を混合しない普通ポルトランドセメントの拡散係数を同一強度で比較した場合、圧縮強度が 30N/mm<sup>2</sup>と低い配合ではフィラーセメントの拡散係数が小さくなり、圧縮強度が 50N/mm<sup>2</sup>まで増加した配合では拡散係数が同等になることを報告している<sup>4)</sup>。本研究の実験結果も、強度の小さい水セメント比 55%の配合において、石灰石微粉末の混合率が高く、強度の低下したコンクリートの拡散係数は混合率 5%のコンクリートに対してほとんど増加していない。本研究ではセメントクリンカーと混合材は分離粉砕したもの、既報は両者を混合粉砕したものを用了という違いはあるものの、いずれも石灰石微粉末の混合により強度が比較的低いコンクリートの塩化物イオン透過性を向上させることができると解釈することができる。

表-5 使用材料のインベントリデータ<sup>9)</sup>

	CO <sub>2</sub> 排出量* (kg/トン)
普通ポルトランドセメント (LP5%混合)	766.6
石灰石微粉末(LP)	16.1
高炉スラグ微粉末(SG)	26.5
フライアッシュ(FA)	19.6

\* 原料、エネルギー起源含む

#### 4. 混合成分が環境性能および耐久性に与える影響

##### 4.1 コンクリート製造時の環境負荷

本研究で用いたセメントの混合成分および強度発現性の違いを考慮し、コンクリート製造時の CO<sub>2</sub> 排出量を評価した。水セメント比 55%および 45%の強度試験結果から得られた強度とセメント水比の関係式から、コンクリート強度が 45N/mm<sup>2</sup>となる水セメント比を算出し、表-5 に示す各材料の CO<sub>2</sub> 排出量から同一強度のコンクリートを製造する際の CO<sub>2</sub> 排出量を試算した。

セメント 1 トン当りの CO<sub>2</sub> 排出量および同一強度におけるコンクリート 1m<sup>3</sup>当りの CO<sub>2</sub> 排出量率を図-16 に示す。セメント 1 トン当りの CO<sub>2</sub> 排出量は、混合成分を 20%に増加させた場合、混合材の種類によらず 15%程度削減した。コンクリートの CO<sub>2</sub> 排出量は、石灰石を 5%混合させた現行品を用了した場合を 100 として 84～105%の範囲となり、石灰石微粉末のみを増量するとやや大きくなり、高炉スラグ微粉末を増量すると小さくなる傾向にあった。コンクリートでの CO<sub>2</sub> 排出量を 1 割以上削減できるのは、LP5SG10, LP10SG10, LP5SG15 の 3 種類と試

算された。本試算は、混合成分の影響を強度に関してのみ考慮し、かつ2種類の配合による試験結果から推定したものであり、想定する強度レベルの異なる場合などの試算を精度良く行うには、更なる検討が必要である。

#### 4.2 耐久性評価

前項と同じくコンクリートの強度が  $45\text{N/mm}^2$  となる水セメント比における中性化速度および塩化物イオンの拡散係数を試験結果から推定し、中性化および塩害の劣化過程における潜伏期間を試算した。試算条件および結果を表-6に示す。前項の環境性能試算においてコンクリート製造時の  $\text{CO}_2$  削減を見込める3種類のセメントの潜伏期間は、現行のセメントであるLP5と比べて中性化に対しては短くなり、塩害に対しては長くなった。

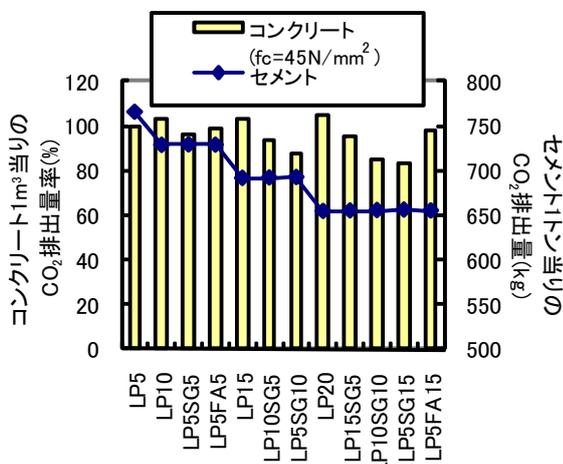


図-16 混合材の混合率を変化させたセメントのCO<sub>2</sub>排出量

表-6 中性化および塩害による劣化予測結果

名称	コンクリート強度が $45\text{N/mm}^2$ となる配合			中性化潜伏期間*1 (年)	塩害潜伏期間*2 (年)
	W/C (%)	中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )	Cl <sup>-</sup> 拡散係数 (cm <sup>2</sup> /年)		
LP5	53	1.6	4.6	86	26
LP10	49	1.5	4.0	97	29
LP5SG5	52	1.7	3.6	80	33
LP5FA5	51	1.7	3.2	82	36
LP15	46	1.7	4.3	82	28
LP10SG5	51	1.8	3.7	69	32
LP5SG10	54	2.1	3.5	53	33
LP20	43	1.6	4.6	87	25
LP15SG5	48	1.7	3.2	76	36
LP10SG10	53	2.1	3.4	54	34
LP5SG15	54	2.0	2.8	59	42
LP5FA15	46	1.7	2.1	82	55

試算条件:

- ・中性化速度、Cl<sup>-</sup> 拡散係数はW/C45、55%の実験値から直線補間により算出
- ・中性化速度(屋外)=中性化速度(促進) ×  $\sqrt{0.3/5.0}$  として算出<sup>10)</sup>(屋外CO<sub>2</sub>濃度0.3%、促進CO<sub>2</sub>濃度5.0%)
- \*1 かぶり25mm、中性化残りが10mmとなる時点
- \*2 かぶり80mm地点の塩化物量が $1.2\text{kg/m}^3$ に達する時点(表面塩化物イオン濃度を $2\text{kg/m}^3$ と仮定)

#### 5.まとめ

混合成分として石灰石微粉末、高炉スラグ微粉末、フライアッシュを最大20%混合したセメントを使用したコンクリートに関して、以下の知見が得られた。

- (1) 混合材として石灰石微粉末のみを増量した場合、コンクリート強度は低下するが、水セメント比が低いほど強度低下率は縮小した。
- (2) 高炉スラグ微粉末を使用した場合、石灰石微粉末の増量に伴う強度低下は抑制された。
- (3) 混合材の種類および量が乾燥収縮ひずみに与える影響は小さい。
- (4) セメント製造時のCO<sub>2</sub>排出量は、混合材率の増加に伴い減少するが、同一強度となるコンクリートを製造する際のCO<sub>2</sub>排出量は増加するケースも見られた。高炉スラグ微粉末を10%以上使用し、石灰石微粉末と併用するケースがCO<sub>2</sub>排出抑制に有効であった。
- (5) コンクリート製造時の環境負荷抑制に有効な少量混合成分増量セメントの耐久性は、現行のセメントに比べて中性化に対して低下し、塩害に対しては向上した。

#### 参考文献

- 1) セメント協会：セメント産業の環境保全に関する自主的行動計画、セメント協会ホームページ、2008
- 2) JIS R 5210-1986 セメント品質規格解説
- 3) 丸屋英二ほか：廃棄物使用量の増大とCO<sub>2</sub>排出量削減に向けたセメントの材料設計、廃棄物資源循環学会論文誌、Vol.20, No.1, pp.1-11, 2009
- 4) 中村士郎、西田直樹、枝松良展、本田優：石灰石ファイラーセメントの物性がコンクリートの諸性状に及ぼす影響、セメントコンクリート論文集、No. 55, pp.149-154, 2001
- 5) 日本コンクリート工学協会：JCI 基準集、日本コンクリート工学協会、pp.465-467, 2004.4
- 6) 丸屋英二ほか：アルミネート相量の異なるセメントの流動性に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響、セメントコンクリート論文集、No.61, pp.8-13, 2007
- 7) 浅賀喜与志、久我比呂氏：粒度の異なる炭酸カルシウム添加がセメントの水和反応に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、Vol.51, pp.20-25, 1997
- 8) 小澤尚志、丸岡正知、荻部創、後藤孝治：石灰石微粉末がコンクリートの強度発現に与える影響、セメント・コンクリート論文集、No.53, pp.178-183, 1999
- 9) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価(その2)、コンクリート技術シリーズ62, 2004.9
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・解説、pp.92-108, 2004.3