

論文 混和材を高含有したコンクリートの CO₂削減効果

溝渕 麻子^{*1}・小林 利充^{*2}・神代 泰道^{*3}・一瀬 賢一^{*4}

要旨：本研究は、混和材を高含有したコンクリートの CO₂削減効果を把握することを目的に、結合材の種類および混合割合、水結合材比をパラメータとした実験を行い、結合材水比と強度の関係および結合材水比と CO₂排出量の関係をもとめ、対象とするコンクリートの CO₂排出量低減率を算定した。その結果、CO₂排出量の削減率は、強度レベルによらず結合材中のセメントの混合割合と相関が高いことが実験結果からも確認することができた。また、適用事例および既往の研究例での検証も行った。

キーワード：低炭素、混和材、CO₂排出量、水結合材比、圧縮強度

1. はじめに

低炭素社会の構築を進め、温室効果ガス排出量の削減に努めなければならない昨今であるが、日本は現在、地球温暖化、東日本大震災からの復興・復旧、エネルギーの安定的確保などの課題を抱えているのが現状である。

日本の年平均気温は約 1.15℃/100 年の割合で上昇しており、1990 年以降は高温となる年が頻出している¹⁾。また、IPCC 第 4 次評価報告書²⁾では「20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇は、人為起源の温室効果ガス濃度増加による可能性が高い」と示されており、温暖化の要因が人為的なものによるとされている。

コンクリートの低炭素化には、CO₂排出量原単位が少ない産業副産物である高炉スラグ微粉末、フライアッシュ等の混和材を利用することが有効であるとされ、各種検討が行われている。本研究は、このような背景を踏まえ、コンクリートの材料起源における CO₂排出量を算定し、混和材を高含有したコンクリートの CO₂削減効果について実験的に検討している。また、併せて、適用事例

や既往の研究例をもとに検証を加えている。

2. コンクリートの低炭素化

コンクリートの主な使用材料であるポルトランドセメントは CO₂排出量原単位が大きく、これはセメントの製造工程に起因する。セメントの製造工程は「原料工程」、「焼成工程」および「仕上工程」に大別され、これらの工程において、CO₂はエネルギー起源と非エネルギー起源として排出される。「原料工程」および「仕上工程」では原材料の粉砕およびセメントの中間製品であるクリンカを粉砕する際の電力エネルギー、「焼成工程」では高温で原材料を焼成し、クリンカを製造する際の熱エネルギーがある。日本のセメント製造技術は世界のトップクラスにあり、積極的にエネルギーの効率化を追求している。しかし、セメント産業からの CO₂排出量は日本国内全体の約 3.7%³⁾を占めるため、コンクリートを低炭素化することにより CO₂削減に大きな効果を期待することができる。

表-1 使用材料

材料	種類	記号	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3160cm ² /g
高炉スラグ微粉末	石膏添加タイプ	BS	密度 2.89g/cm ³ , 比表面積 4360cm ² /g
フライアッシュ	フライアッシュⅡ種	FA	密度 2.17g/cm ³ , 比表面積 4180cm ² /g
シリカフューム	ジルコニア起源	SF	密度 2.23g/cm ³ , 比表面積 87000cm ² /g
水	上水道水	W	
細骨材	陸砂	S	表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.34%, 粗粒率 2.63
粗骨材	硬質砂岩碎石	G	表乾密度 2.64 g/cm ³ , 吸水率 0.79%, 実積率 60.0%
混和剤	高性能 AE 減水剤	-	ポリカルボン酸系
	AE 助剤	-	ロジンのカリウム塩

*1 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任 (正会員)

*2 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 (株)大林組技術研究所 生産技術研究部長 博士(工学) (正会員)

3. 実験概要

本実験は、既報⁴⁾の実験結果を用いて CO₂排出量を算定し、検討を行った。以下に、実験概要を示す。

3.1 使用材料

使用材料の種類および品質を表-1 に示す。結合材としては、普通ポルトランドセメント、高炉スラグ微粉末、フライアッシュおよびシリカフュームを用いた。

3.2 実験条件

実験の設定条件を表-2 に、パラメータとした結合材の混合割合および予備実験により決定した単位水量を表-3 にそれぞれ示す。

各種結合材の組合せおよび結合材料に対する各種材料の混合割合をパラメータとし、結合材はセメントをベースとして、その一部を高炉スラグ微粉末で置換した 2 成分系、高炉スラグ微粉末の一部をさらにフライアッシュで置換した 3 成分系、フライアッシュの一部をシリカフュームで置換した 4 成分系に大別する。水結合材比は 30%、37%および 44%の 3 水準とした。目標空気量は 4.5%とし、スランプおよびスランプフローについては水結合材比ごとに設定した。なお、所定の設定条件を満たすために、高性能 AE 減水剤の添加量を調整した。

3.3 試験および CO₂ 排出量の算定方法

コンクリート製造後、所定のフレッシュ性状であることを確認し、各調合の材齢 28 日における標準養生強度を求めた。また、各調合の CO₂排出量の算定には、表-4 に示す使用材料のインベントリデータ^{5),6)}を用いた。算定方法としては、使用材料ごとの単位量とインベントリデータによる CO₂排出量の積として求めた。

4. 実験結果

4.1 強度試験結果

結合材の混合割合と 28 日標準養生強度の関係に整理した結果を図-1 に示す。セメント単体とした 1 成分と高

表-3 結合材の混合割合

調合 No.	結合材の混合割合(%)				単位水量 (kg/m ³)
	C	BS	FA	SF	
1	100	0	0	0	160
2	50	50	0	0	152
3	25	75	0	0	149
4	15	85	0	0	147
5	10	90	0	0	147
6	25	65	10	0	144
7	25	55	20	0	137
8	15	75	10	0	144
9	15	65	20	0	137
10	15	55	30	0	132
11	15	65	17.5	2.5	135
12	15	65	15	5	135

表-4 使用材料のインベントリデータ

材料	CO ₂ 排出量 (kg/t)	出典
ポルトランドセメント	757.9	5)
高炉スラグ微粉末	24.1	5)
フライアッシュ	17.9	5)
シリカフューム	17.9	-
水	0	-
細骨材	3.5	5)
粗骨材	2.8	5)
高性能 AE 減水剤	200	6)

[注] シリカフュームはフライアッシュと同じ値と仮定し、水は 0 とした。

表-2 設定条件

項目	設定条件
水結合材比 (%)	30, 37 および 44
粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	30% : 0.56 37% : 0.57 44% : 0.58
空気量 (%)	4.5±1.5
スランプ(SL) (cm)	30% : 60±10 (SF)
スランプフロー(SF) (cm)	37% : 50±7.5 (SF) 44% : 21±2 (SL)
高性能 AE 減水剤添加量	調整

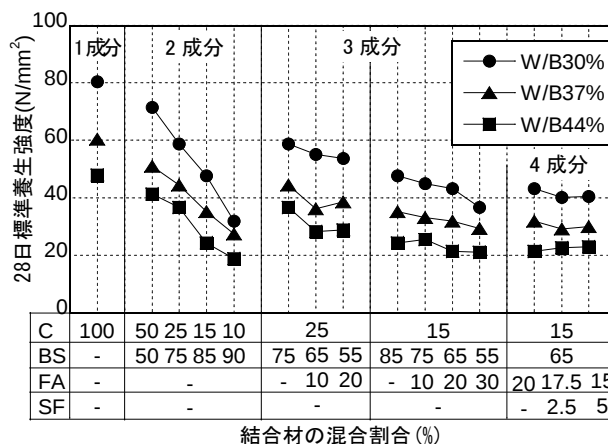


図-1 28 日標準養生強度

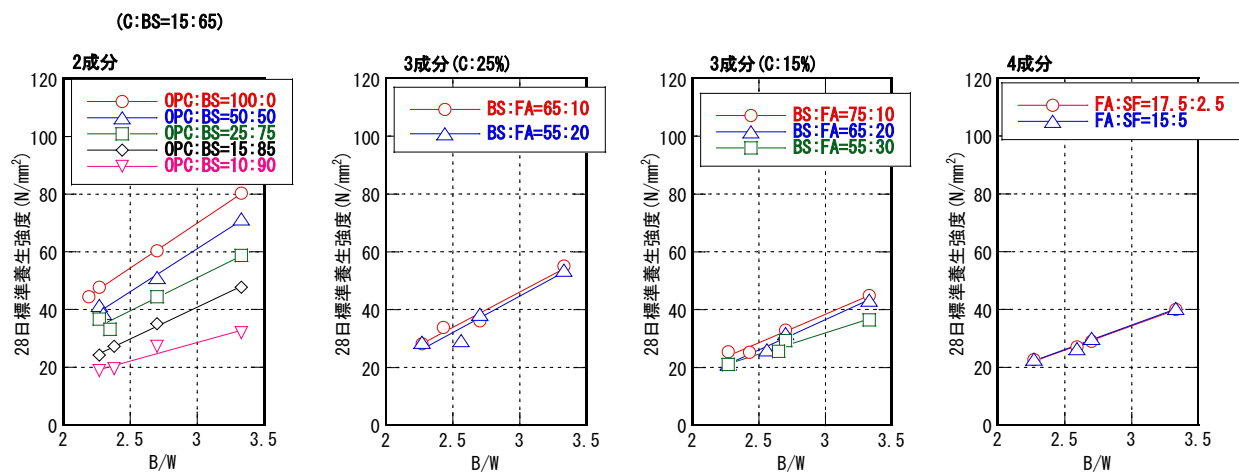


図-2 結合材水比と 28 日標準養生強度の関係

炉スラグ微粉末を組合せた 2 成分を見ると、セメントの混合割合の減少に伴って、強度は減少する傾向にある。また、セメントの混合割合を一定にし、高炉スラグ微粉末の一部をフライアッシュに置換した 3 成分は、フライアッシュの混合割合を多くすることで強度は若干低下する傾向にあり、28 日標準養生強度に及ぼす影響としては、セメント>高炉スラグ微粉末>フライアッシュの順になると考えられる。

次に、28 日標準養生強度と結合材水比(B/W)の関係を図化し図-2 に成分ごとに示す。結合材水比と 28 日標準養生強度の関係は、セメント単体と同様に、混和材を高含有した場合でも結合材水比の増大に伴って強度も増加する傾向がある。結合材水比と 28 日標準養生強度の関係から得られた、結合材水比と圧縮強度の回帰式を表-5 に示す。

4.2 CO₂ 排出量の算定

(1) 結合材水比と CO₂ 排出量の関係

表-4 を用いて各調査における CO₂ 排出量を算定した結果を図-3 に示す。CO₂ 排出量は、結合材中のセメントの混合割合に比例しており、ポルトランドセメントの混合割合が減少すると、CO₂ 排出量も低下する傾向がある。結合材中の混和材の種類（高炉スラグ微粉末・フライアッシュ・シリカヒューム）による混合割合が変化しても、CO₂ 排出量には大きな影響を与えないことが分かる。

次に、各成分の結合材水比 (B/W) と CO₂ 排出量の関係に整理した結果を図-4 に示す。結合材水比が大きくなるに従い、CO₂ 排出量も大きくなる傾向が見られ、結合材に対するポルトランドセメントの混合割合が大きくなるほど、この傾向は顕著になる。

ここで得られた結合材水比と CO₂ 排出量の関係より回帰式を求め、結合材の混合割合ごとに整理した回帰式を表-6 に示す。

表-5 結合材水比と圧縮強度の回帰式

調査 No.	結合材の混合割合(%)				結合材水比と圧縮強度の回帰式
	C	BS	FA	SF	
1	100	0	0	0	$f_c = -23.55 + 31.19(B/W)$
2	50	50	0	0	$f_c = -28.78 + 29.26(B/W)$
3	25	75	0	0	$f_c = -17.84 + 22.95(B/W)$
4	15	85	0	0	$f_c = -24.85 + 21.89(B/W)$
5	10	90	0	0	$f_c = -9.89 + 12.82(B/W)$
6	25	65	10	0	$f_c = -27.69 + 24.63(B/W)$
7	25	55	20	0	$f_c = -30.65 + 25.13(B/W)$
8	15	75	10	0	$f_c = -20.68 + 19.70(B/W)$
9	15	65	20	0	$f_c = -26.47 + 21.03(B/W)$
10	15	55	30	0	$f_c = -12.22 + 14.74(B/W)$
11	15	65	17.5	2.5	$f_c = -15.80 + 16.71(B/W)$
12	15	65	15	5	$f_c = -16.26 + 16.96(B/W)$

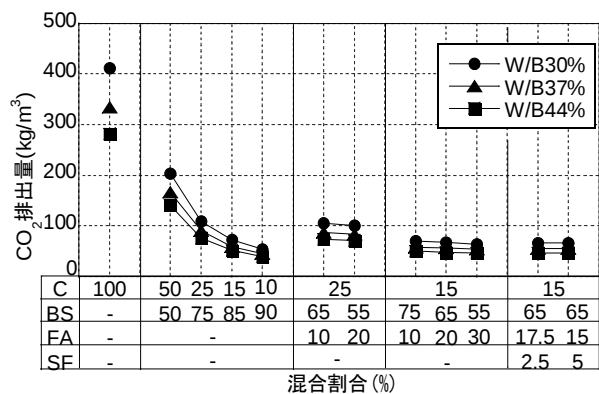


図-3 CO₂ 排出量の算定結果

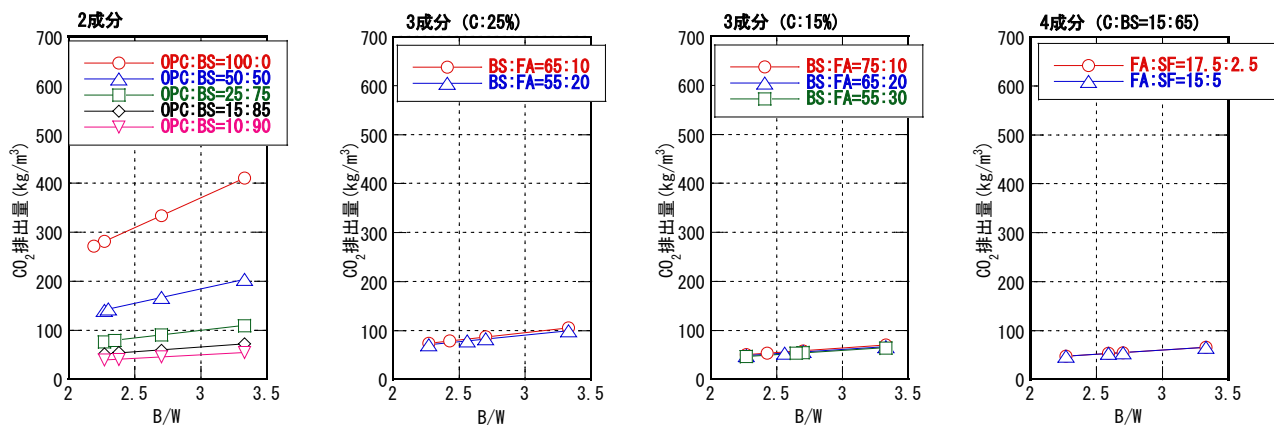


図-4 結合材水比と CO₂ 排出量の関係

(2) 強度レベルごとの CO₂ 排出量の関係

表-5 で示す回帰式より 28 日標準養生強度を 30N/mm², 40N/mm² および 50N/mm² とした場合の結合材水比を各調査で算出する。さらに、得られた結合材水比を用いて表-6 に示す回帰式より CO₂ 排出量を算出し、CO₂ 排出量の低減率（結合材中のポルトランドセメントの混合割合が 100% のケースからの比較）を混合割合ごとに整理した結果を表-7 から表-9 に示す。表中の空欄の部分は、水結合材比が 30% 以下となるため、検討の対象から外した。

また、結合材中のポルトランドセメントの混合割合と CO₂ 排出量の低減率との関係を強度レベルごとに図-5 に示す。この結果より、強度レベルにかかわらず CO₂ 排出量の低減率は、結合材中のポルトランドセメントの混合割合と高い相関があり、結合材中のポルトランドセメントの混合割合で CO₂ 排出量低減率が整理できると考えられる。

本研究における、結合材中のポルトランドセメントの混合割合が 10% から 25% の範囲のコンクリートの CO₂ 排出量の低減率は、いずれの強度レベルにおいても 60% 以上となる。

5. 適用事例および文献による CO₂ 排出量の検証

ここで筆者らが現場適用したケース（適用事例）および既往の研究例^{7),8),9),10)}から算定した結合材中のポルトランドセメントの混合割合と CO₂ 排出量の低減率をプロットし図-6 に示す。点線は強度レベルに限らず、実験結果を線形近似したものである。なお、適用事例の CO₂ 排出量の低減率は、当該プラントにおけるポルトランドセメント単体で同じ強度レベルの調査のコンクリートとの比較とした。適用事例における主な適用部位は、外構、工場基礎、耐圧版、土間、架台基礎、地中梁などである。強度レベルは Fc18 から 30 であり、結合材の構成成分数は 2 成分、3 成分および 4 成分である。諸元を表-10 に示す。この結果より、現場適用したコンクリートは結合材

表-6 結合材水比と CO₂ 排出量の回帰式

調査 No.	結合材の混合割合(%)				結合材水比と CO ₂ 排出量の回帰式
	C	BS	FA	SF	
1	100	0	0	0	CO ₂ =3.68+122.34(B/W)
2	50	50	0	0	CO ₂ =6.44+59.36(B/W)
3	25	75	0	0	CO ₂ =6.13+30.94(B/W)
4	15	85	0	0	CO ₂ =7.10+19.44(B/W)
5	10	90	0	0	CO ₂ =6.09+14.38(B/W)
6	25	65	10	0	CO ₂ =8.10+29.13(B/W)
7	25	55	20	0	CO ₂ =9.0+27.34(B/W)
8	15	75	10	0	CO ₂ =7.13+18.87(B/W)
9	15	65	20	0	CO ₂ =7.22+17.97(B/W)
10	15	55	30	0	CO ₂ =8.11+16.85(B/W)
11	15	65	17.5	2.5	CO ₂ =6.64+17.85(B/W)
12	15	65	15	5	CO ₂ =6.64+17.85(B/W)

中のポルトランドセメントの割合が 29% 以下であり、CO₂ 排出量低減率は 60% 以上であることがわかる。

また、既往の文献における CO₂ 排出量の低減率は、同じ研究における結合材中のポルトランドセメントの混合割合が 100% で、同じ強度レベルの調査との比較とした。諸元を表-10 に示す。B は混和材を示す。なお、調査のうちケース 2 およびケース 3 については文献⁹⁾からの推定値である。ケース 4⁹⁾では強度レベルが本研究での検討範囲（30 N/mm²～50N/mm²）を超えているが同様にプロットした。

既往の研究例からの算定結果は、本検討結果で示した回帰式（結合材中のポルトランドセメントの混合割合と CO₂ 排出量低減率の回帰式）で概ね評価できるものと考ええる。

表-7 強度レベル：30N/mm²（28日標準養生強度）

調査 No.	混合割合(%)				検討結果			
	OPC	BS	FA	SF	W	W/B	CO ₂	低減率
1	100	0	0	0	160	58.2	214	0
2	50	50	0	0	152	51.0	123	42.5
3	25	75	0	0	149	48.0	71	66.8
4	15	85	0	0	147	39.9	56	73.8
5	10	90	0	0	147	32.1	51	76.2
6	25	65	10	0	144	43.0	76	64.5
7	25	55	20	0	137	41.4	75	65.0
8	15	75	10	0	144	38.9	56	73.8
9	15	65	20	0	137	37.2	55	74.3
10	15	55	30	0	132	34.9	56	73.8
11	15	65	17.5	2.5	135	36.5	56	73.8
12	15	65	15	5	135	36.7	55	74.3

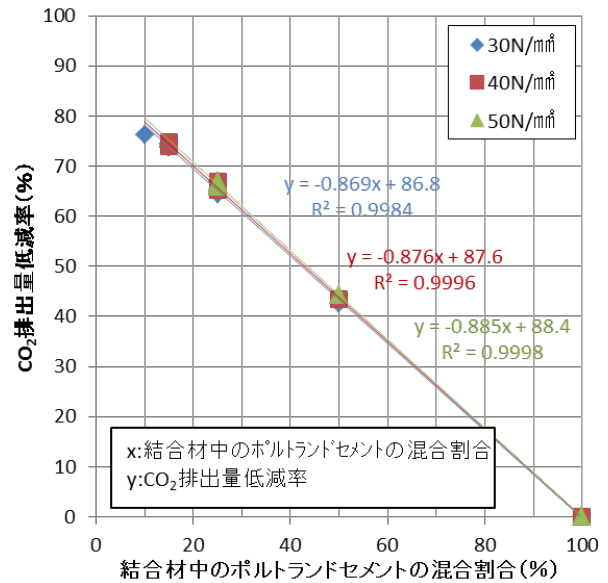
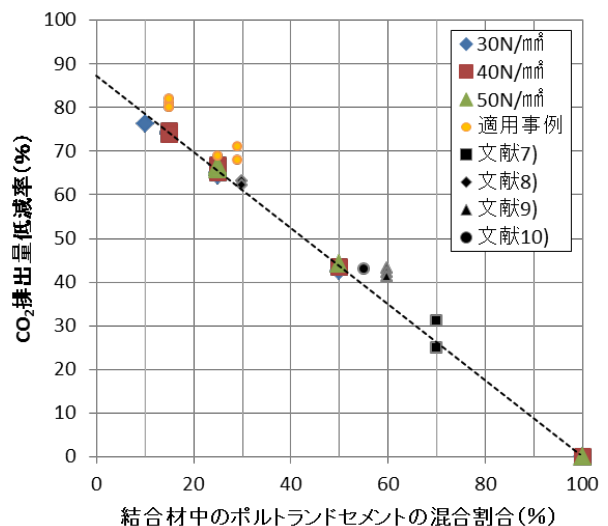
表-8 強度レベル：40N/mm²（28日標準養生強度）

調査 No.	混合割合(%)				検討結果			
	OPC	BS	FA	SF	W	W/B	CO ₂	低減率
1	100	0	0	0	160	49.1	253	0
2	50	50	0	0	152	43.6	143	43.5
3	25	75	0	0	149	39.7	84	66.8
4	15	85	0	0	147	33.8	65	74.3
5	10	90	0	0	147	-	-	-
6	25	65	10	0	144	36.6	88	65.2
7	25	55	20	0	137	35.6	86	66.0
8	15	75	10	0	144	32.5	65	74.3
9	15	65	20	0	137	31.6	64	74.7
10	15	55	30	0	132	-	-	-
11	15	65	17.5	2.5	135	-	-	-
12	15	65	15	5	135	30.2	66	73.9

表-9 強度レベル：50N/mm²（28日標準養生強度）

調査 No.	混合割合(%)				検討結果			
	OPC	BS	FA	SF	W	W/B	CO ₂	低減率
1	100	0	0	0	160	42.4	292	0
2	50	50	0	0	152	38.0	163	44.2
3	25	75	0	0	149	33.8	98	66.4
4	15	85	0	0	147	-	-	-
5	10	90	0	0	147	-	-	-
6	25	65	10	0	144	31.9	100	65.8
7	25	55	20	0	137	31.2	97	66.8
8	15	75	10	0	144	-	-	-
9	15	65	20	0	137	-	-	-
10	15	55	30	0	132	-	-	-
11	15	65	17.5	2.5	135	-	-	-
12	15	65	15	5	135	-	-	-

[注] W：単位水量(kg/m³)、W/B：水結合材比(%)、CO₂：CO₂排出量(kg/m³)、低減率：普通ポルトランドセメント100%の調査(No.1)からのCO₂排出量の低減率(%)

図-5 ポルトランドセメントの混合割合とCO₂低減率の関係図-6 ポルトランドセメントの混合割合とCO₂低減率の関係（適用事例と既往の研究例）

よって、本研究範囲内では、CO₂排出量低減率は、強度レベルに関係なく、結合材中のポルトランドセメントの混合割合から推定することができることが分かった。

6. まとめ

混和材を高含有したコンクリートのCO₂削減効果を把握することを目的に、混和材の種類とその混合割合をパラメータとした実験を行った。実験結果より、結合材水比と圧縮強度の関係および結合材水比とCO₂排出量の関係を整理することにより強度レベルにおけるCO₂排出量の低減率を求めた。これにより、以下のことが分かった。

表-10 適用事例と既往の文献データの諸元

項目	セメントの 混合割合 (%)	調合 (kg/m ³)					強度 (N/mm ²)	CO ₂ 削減率 (%)
		C	B※	W	S	G		
適用事例 1	100	342	0	170	810	993	27 ^{*1}	-
	15	53	299	140	876	952	27 ^{*1}	80
適用事例 2	100	412	0	185	752	946	39.6 ^{*2}	-
	29	118	289	175	742	968	41.7	68
適用事例 3	100	363	0	175	913	849	43.2 ^{*2}	-
	15	51.6	292	140	853	982	43.9	81
適用事例 4	100	419	0	170	882	846	56.4 ^{*2}	-
	15	60	340	140	863	918	58.2	82
適用事例 5	100	463	0	185	770	857	49.8 ^{*2}	-
	29	200	210	172	942	772	50.4	71
適用事例 6	100	356	0	185	796	9220	32.8 ^{*2}	-
	29	170	175	180	937	814	33.5	68
適用事例 7	100	337	0	175	914	862	33.3 ^{*2}	-
	15	56	308	155	877	914	33.5	80
適用事例 8	100	307	0	184	865	936	25.0 ^{*2}	-
	25	81	243	178	834	958	26.4 ^{*2}	69
ケース1 ⁷⁾	100	384	0	178	764	962	-	-
	70	285	122	174	771	911	33 ^{*2}	25
	70	260	111	159	728	1029	-	31
ケース2 ⁸⁾	100	235	0	150	931	1001	-	-
	30	92	214	150	843	1001	30 ^{*3}	62
ケース3 ⁸⁾	100	253	0	150	916	1002	-	-
	30	97	225	150	832	997	33 ^{*4}	63
ケース4 ⁹⁾	100	350	0	140	849	1030	70 ^{*4}	-
	60	193	130	129	859	1043	63 ^{*4}	43
	60	197	131	131	859	1040	70 ^{*4}	42
	60	200	133	133	859	1043	69 ^{*4}	41
ケース5 ¹⁰⁾	100	318	0	175	803	1034	30 ^{*4}	-
	55	175	143	175	792	1034	34 ^{*4}	43

※：Bは混和材（BS+FA+SF）を示す。

*1：Fc，*2：調合強度，*3：呼び強度，*4：文献からの読み取り値（材齢28日），その他の強度は材齢28日標準養生強度

- 本研究範囲内では、CO₂排出量低減率は、強度レベルに関係なく、結合材中のポルトランドセメントの混合割合から推定することができることと考える。
- 結合材中のポルトランドセメントの混合割合が 10～30%では、CO₂排出量低減率が 60%以上となることを確認した。
- 適用事例および既往の文献からの検証の結果、本検討結果で示した回帰式（結合材中のポルトランドセメントの混合割合と CO₂排出量低減率の回帰式）で概ね評価できるものとする。

参考文献

- 気象庁：日本の年平均気温，気象庁 HP，http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/temp/an_jpn.html，2013.
- 文部科学省，経済産業省，気象庁，環境省：IPCC 第 4 次評価報告書第 1 作業部会報告書 概要，Intergovernmental Panel on Climate Change（気象庁），p.46，2013
- 細谷俊夫：セメント産業における CO₂排出削減の取り組み，コンクリート工学，V.48，No.9，pp51-57，2010
- 溝渕麻子，小林利充，近松竜一，一瀬賢一：混和材を高置換した各種コンクリートの基礎的性質および CO₂排出量の削減効果，混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム論文集，pp167-172，2011.12
- 土木学会：コンクリート技術シリーズ，コンクリートの環境負荷評価，p. I -26.，2002.
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の環境配慮施工指針(案)・同解説，p.67，2008.
- 黒田泰弘，西田朗，長澤達朗，中川邦光：博多駅ビル（仮称）新築工事における現場練りコンクリートの製造・施工，コンクリート工学，vol.48，No.12，p32-p38，2010.12
- 黒田泰弘，依田侑也，片山行雄：高炉セメントとフライアッシュを混合使用した低炭素コンクリートに関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，p103-p108，2013
- 齋藤淳，堺孝司，鈴木康範，福留和人：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたローカーボンコンクリートのひび割れ抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，p1537-p1542，2013
- 内村謙太，松藤泰典，陶山裕樹，高巢幸二：コンクリートの粉体水比強度則仮説，その 2 三成分系コンクリートにおける検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp549-550，2012.9