

低炭素型のコンクリート「クリーンクリート™」の開発

小林 利 充 近 松 竜 一
溝 渕 麻 子 一 瀬 賢 一

Development of Low Carbon Concrete “Clean-crete”

Toshimitsu Kobayashi Ryuichi Chikamatsu
Asako Mizobuchi Kenichi Ichise

Abstract

This paper is aimed at the development of low carbon concrete (Clean-crete) in consideration of the environment. The binder of Clean-crete use mineral admixtures such as ground granulated blast for slag or fly ash with a few carbon footprint other than cement. The experiment examines the influence that mixing ratio gives to fresh property, strength property and durability of Clean-crete. As the results, although the mixing ratio of the cement in the binder is 30% or less, the concrete can achieve up to 50N/mm² compressive strength (28 days) by designing appropriate water-binder ratio. From the application example, Clean-crete can reduce the carbon footprint by 80% compared with normal concrete.

概 要

本研究は、環境配慮型のコンクリートとして、一般のコンクリートに比べて、二酸化炭素の排出量を大幅に低減した低炭素型のコンクリート(クリーンクリート)の開発を目的としている。具体的には、二酸化炭素排出量原単位が少ない混和材を結合材とし、各種結合材の組合せおよび混合割合が、フレッシュ性状、強度性状および耐久性などの各種性状に及ぼす影響について実験的に検討した。その結果、セメントの混合割合を30%以下とした場合でも、所定の水結合材比を設定することで、50N/mm²程度の圧縮強度が得られ、二酸化炭素の排出量を削減できることを確認した。また、クリーンクリートを適用した物件において、同一強度の普通コンクリートに比べて、80%以上の二酸化炭素排出量の削減を可能としている。

1. はじめに

地球温暖化に影響を及ぼす二酸化炭素(CO₂)排出量の削減は、全産業に課せられた重要な課題となっている。コンクリート分野においても、土木学会より「コンクリートの環境負荷評価」¹⁾、日本建築学会から「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」²⁾がそれぞれ刊行され、環境問題が注目されている。ここで、コンクリート分野のCO₂排出量の削減対策として、セメント製造の観点からは、省エネ設備の導入、エネルギー代替廃棄物の使用拡大による化石由来エネルギーの低減が挙げられる³⁾。使用材料の観点からは、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの副産物を使用した混合セメントの利用、混和材を高含有したコンクリートの検討^{4) - 8)}がある。また、コンクリート製造(レディーミクストコンクリート工場)の観点からは、生産システムの効率化による電力消費量の低減、運搬効率の向上や低燃費化、車両の軽量化による積載量のアップなどが検討されている⁹⁾。参考として、日本工業規格(JIS)に規定される混合セメントの種類と混和材の混合量をTable 1に示す。

本論文では、環境配慮型のコンクリートとして、CO₂排出量を低減した「低炭素型のコンクリート：クリーン

クリート」の開発を目的に、CO₂排出量の多いセメントの一部を、CO₂排出量が少ない混和材に置換した場合の基礎的性状を検討するため、各種結合材の組合せおよび混合割合が、フレッシュ性状、強度性状および耐久性に及ぼす影響について実験的に検討した。併せて、クリーンクリートの適用事例の概要を記載する。

2. 実験概要

本実験は、2つのフェーズに分けて実施した。フェーズIでは、各種結合材の組合せおよび結合材の混合割合が単位水量に及ぼす影響について検討した。具体的には、各調合ごとに、単位結合材量(350kg/m³)、単位粗骨材かさ容積(0.58m³/m³)および高性能AE減水剤の添加率(B×0.7%)を一定とし、目標スランプ(21cm)が得られる所

Table 1 混合セメントの種類と混和材の混合量
Type and Mixed Quantity of Mixed Cement

種類	混和材の混合量(X:質量%)		
	高炉スラグ	シリカ質混合材	フライアッシュ
A種	5<X≤30	5<X≤10	5<X≤10
B種	30<X≤60	10<X≤20	10<X≤20
C種	60<X≤70	20<X≤30	20<X≤30

定の単位水量を検討した。フェーズIIでは、フェーズIで決定した単位水量を用いて、各調合ごとに、水結合材比(W/B)をパラメータとして、所定のスランブまたはスランブフローが得られるように、混和剤の添加量を調整した。なお、単位粗骨材かさ容積は、水結合材比ごとに設定した。

使用材料をTable 2およびPhoto 1に示す。結合材は、普通ポルトランドセメント(C)をベースとして、その一部を高炉スラグ微粉末(BS)、フライアッシュ(FA)、ジルコニア起源シリカフューム(SF)で置き換えた。なお、使用材料として、SF以外はJISに規定されるものを使用した。

各フェーズごとの設定条件をTable 3に、結合材の混合割合をTable 4に示す。ここで、1成分とはCを100%使用した場合とする。また、2成分とは、Cの一部をBSで置換した場合とし、3成分とは2成分にさらにFAを混合したものを示し、4成分とは3成分にSFを混合した組合せとする。

コンクリートの練混ぜは20°Cの試験室で行い、容量60ℓの水平二軸強制練りミキサーを用いて、1バッチの練混ぜ量を40ℓとした。練混ぜ手順として、フェーズIでは、結合材および骨材を10秒間空練りした後、水と混和剤を加えて90秒間練り混ぜた。フェーズIIでは、フェーズIと同様に空練りした後、水結合材比ごとに練混ぜ時間を変えた(W/B30%では120秒から150秒、W/B37%および44%では90秒とした)。

試験項目として、フレッシュ性状は、スランブ(JIS A 1101)、スランブフロー(JIS A 1150)、空気量(JIS A 1128)およびコンクリート温度(JIS A 1156)の測定を、硬化性状は、標準養生強度(JIS A 1108)、長さ変化試験(JIS A 1129)、促進中性化試験(JIS A 1153)および凍結融解試験(JIS A 1148)を行った。なお、フレッシュ性状の測定は、練混ぜ5分後に行った。

Table 2 使用材料
Materials

分類	種類	
結合材(B)	セメント	普通ポルトランドセメント(C) (3.16g/cm ³)
	混和材	①高炉スラグ微粉末(BS) (2.89g/cm ³)
		②フライアッシュII種(FA) (2.17g/cm ³)
	③シリカフューム(SF) (2.23g/cm ³)	
水(W)	上水道水	
細骨材(S)	木更津産陸砂 (2.62g/cm ³)	
粗骨材(G)	青梅産硬質砂岩碎石 (2.64g/cm ³)	
混和剤(Ad)	①高性能AE減水剤(SP) (ポリカルボン酸系)	
	②AE助剤(ロジンのカリウム塩系)	

[注] () : 密度(骨材は表乾密度)を示す

比表面積(cm²/g) : C(3160), BS(4360),
FA(4180), SF(87000)



Photo 1 使用材料の外観
View of Materials

Table 3 設定条件
Setting Conditions

項目	設定条件	
	フェーズI	フェーズII
スランブまたはスランブフロー	21±2cm	W/B30%:60±10cm W/B37%:50±7.5cm W/B44%:21±2cm
空気量	4.5±1.5%	4.5±1.5%
結合材量	350kg/m ³	—
単位水量	目標スランブが得られるように調整	フェーズIでの決定値
水結合材比	—	30, 37および44%
単位粗骨材かさ容積	0.58m ³ /m ³	W/B30%:0.56m ³ /m ³ W/B37%:0.57m ³ /m ³ W/B44%:0.58m ³ /m ³
SPの添加率	B×0.7%	目標コンシステンシーが得られるように調整

Table 4 結合材の混合割合
Mixing Ratio of Binder

No.	成分	結合材の混合割合(%)			
		C	BS	FA	SF
1	1	100	0	0	0
2	2	50	50	0	0
3		25	75	0	0
4		15	85	0	0
5		10	90	0	0
6	3	25	65	10	0
7			55	20	0
8			75	10	0
9	4	15	65	20	0
10			55	30	0
11			65	17.5	2.5
12			65	15	5

3. 実験結果

3.1 フェーズI

各種結合材の置換率と単位水量の関係をFig. 1に示す。この結果から、BSおよびFAを用いた場合は、置換率の増加に伴い、概ね線形的に低減することがわかる。ここで、単位水量の低減効果を検討するために、各混和材による単位水量の低減量から、置換率1%に対する単位水量の低減効果を算出した結果をTable 5に示す。BSを用いた場合は置換率1%で0.15kg程度、FAを用いた場合は置換率1%で0.5kg程度、それぞれ単位水量を低減でき、FAは、BSよりも単位水量低減の効果が大きい。ただし、FA置換率30%とした場合、単位水量を低減しても、目標とするスランプが得られるが、粘性が大きく施工性が低下する傾向が認められた。なお、SFを用いた場合は、本実験の範囲では置換率1%で0.4から0.8kgの水量を低減できるが、実験データが少ないこともあるため、今後データを蓄積し、検討する必要がある。

3.2 フェーズII

(1) フレッシュ性状

W/B44%のスランプは19.0~22.5cm、W/B37%およびW/B30%のスランプフローは、42.5~57.5cmおよび54.5~69.0cmであり、それぞれ設定条件を満足している。また、空気量についても、4.0~5.8%の範囲にあり、設定条件を満足する結果であった。なお、フレッシュ性状の一例をPhoto 2に示す。

(2) 圧縮強度

各種結合材の混合割合と28日標準養生強度の関係をFig. 2に示す。

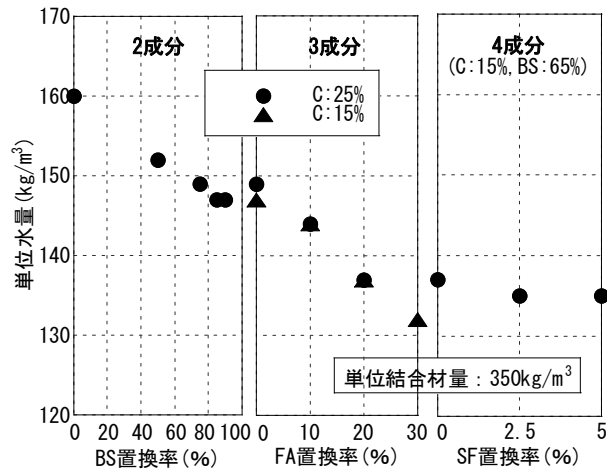


Fig. 1 結合材置換率と単位水量の関係
Relationship between Replacement Ratio of Binder and Unit Water Content

Table 5 単位水量の低減効果
Effect of decrease of Water Content per Unit Volume

No	成分	結合材の混合割合 (%)				W	低減量	低減効果
		C	BS	FA	SF			
1	1	100	0	0	0	160	—	—
2	2	50	50	0	0	152	8 ¹⁾	0.16
3		25	75	0	0	149	11 ¹⁾	0.15
4		15	85	0	0	147	13 ¹⁾	0.15
5		10	90	0	0	147	13 ¹⁾	0.14
6	3	25	65	10	0	144	5 ²⁾	0.5
7		25	55	20	0	137	12 ²⁾	0.6
8		15	75	10	0	144	3 ³⁾	0.3
9		15	65	20	0	137	10 ³⁾	0.5
10		15	55	30	0	132	15 ³⁾	0.5
11	4	15	65	17.5	2.5	135	2 ⁴⁾	0.8
12		15	65	15	5	135	2 ⁴⁾	0.4

[注]W：単位水量(kg/m³)，低減量(kg)：Wの低減量

低減効果：単位(kg/%)⇒Wの低減量(kg)÷置換率(%)

1)：No. 1との比較，2)：No. 3との比較，

3)：No. 4との比較，4)：No. 9との比較



Photo 2 フレッシュ性状
Fresh Property

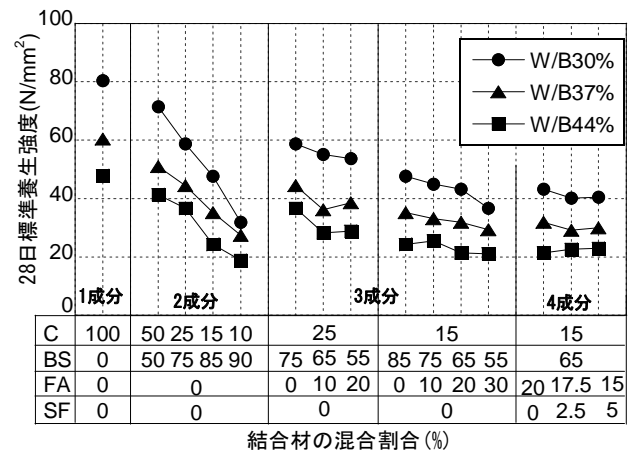


Fig. 2 結合材の混合割合と28日標準養生強度の関係
Relationship between Mixing Ratio of Binder and Compressive Strength by 28-Day Standard Cure

BSを用いた場合は、その置換率の増加に伴って標準養生強度が低下した。特に、BS置換率を85%とした場合は、C100%の5~6割となった。また、FAを用いた場合は、セメントの混合割合、水結合材比にかかわらず、その置換率の増加に伴って標準養生強度は低下する傾向にあり、置換率20%では、FAを用いない場合の8~9割となった。一方、SFを用いた場合は、置換率による標準養生強度に差異は認められなかった。これは、高強度領域と異なり、微粒子を混合しても、一般的なマイクロファイバー効果による顕著な強度増進は得られ難いものと推察される。

結合材水比と28日標準養生強度の関係を調査ごとに整理し、Fig. 3およびFig. 4に示す。結合材の混合割合にかかわらず、結合材水比の増加に伴い、28日標準養生強度は増加する傾向が認められた。2成分(CとBSの組合せ)では、BSの置換率の増加に伴い、その傾きは小さくなった。また、3成分(CとBSとFAの組合せ)は、Cの混合割合にかかわらず、FAの置換率10%および20%では、その傾きはほぼ同程度であるが、FA置換率30%になると、若干傾きが小さくなった。参考までに、Table 6には、Fig. 3およびFig. 4から求めた一次式($Y=aX+b$)による回帰分析結果を示す。

(3) 二酸化炭素排出量

検討した調査をもとに、Table 7に示す値を用いて、CO₂排出量を算出した(Fig. 5)。

Table 6 回帰分析結果
Result of Regression Analysis

No	成分	結合材の混合割合 (%)			定数	
		C	BS	FA	a	b
1	1	100	0	0	30.8	-22.4
2	2	50	50	0	28.7	-24.8
3		25	75	0	20.9	-11.2
4		15	85	0	21.9	-25.0
5	2	10	90	0	12.0	-7.2
6		25	65	10	25.7	-31.3
7	3	25	55	20	23.5	-24.8
8		15	75	10	18.5	-16.7
9		15	65	20	20.6	-24.8
10		15	55	30	14.5	-11.1

[注] a: 傾き, b: 切片

Table 7 使用材料の二酸化炭素排出量
Carbon-dioxide Emissions of Materials

材料	二酸化炭素排出量 (kg/t)
ポルトランドセメント ¹⁾	757.9
高炉スラグ微粉末 ¹⁾	24.1
フライアッシュ ¹⁾	17.9
シリカフェーム	17.9
水	0
細骨材 ¹⁾	3.5
粗骨材 ¹⁾	2.8
高性能AE減水剤 ²⁾	200

[注] シリカフェームはフライアッシュと同じ値とし、水は0と仮定する。

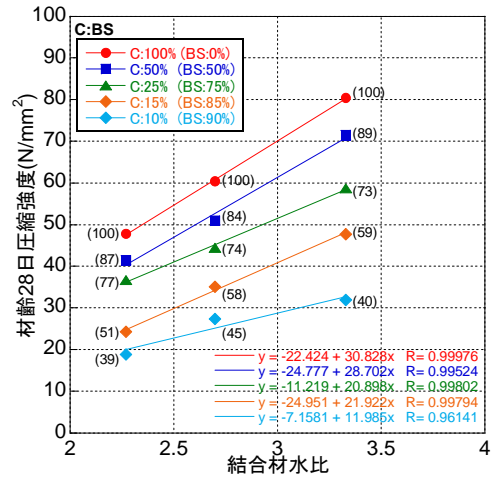


Fig. 3 結合材水比と28日標準養生強度の関係(2成分)
Relationship between Binder-Water Ratio and Compressive Strength by 28-Day Standard Cure (2 Component)

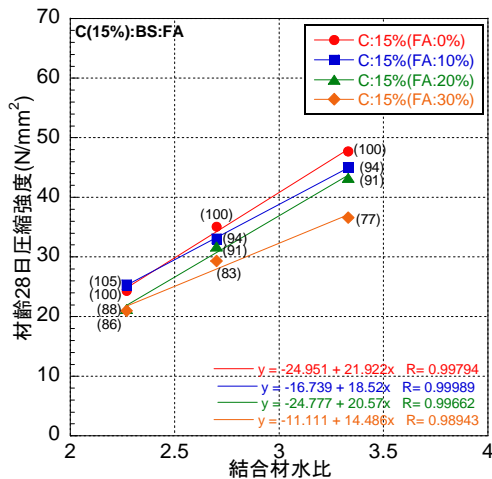
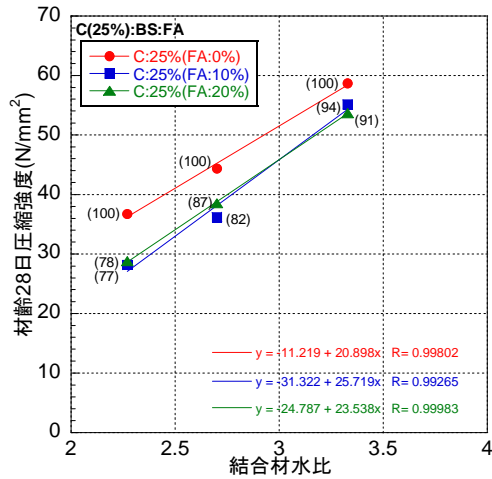


Fig. 4 結合材水比と28日標準養生強度の関係(3成分)
Relationship between Binder-Water Ratio and Compressive Strength by 28-Day Standard Cure (3 Component)

結果から分かるように、CO₂排出量に及ぼす要因としては、セメント量が支配的であり、セメント量の減少に伴ってCO₂排出量は大幅に低減する。また、C100%使用のCO₂排出量は、水結合材比で異なるが、280~410kg/m³である。C15%以下では、いずれの水結合材比においても、72kg/m³以下となり、調合条件によって最小で39kg/m³となる。一方、水結合材比が小さく、セメント量が多い領域ほど、CO₂排出量は顕著に変化するが、セメント量が少ない領域では緩慢になる傾向にある。

(4) 乾燥収縮

水結合材比37%における材齢と乾燥収縮率の関係を図6に示す。材齢182日(6ヵ月)の乾燥収縮率は、混和材の混合割合を75%以上とした場合でも、結合材の組合せにかかわらず450~550×10⁻⁶程度となり、C100%とした1成分に比べて、同等以下となった。これは、混和材で置換した場合には、単位水量が低減できたことが要因の1つであると考えられる。

(5) 中性化

結合材の混合割合と促進中性化試験による中性化速度係数(13週)の関係を図7に示す。混和材の種類に着目すると、中性化速度係数はBSの混合割合の増加に伴い増大する傾向を示し、水結合材比が大きいものほど顕著になる(図中の2成分を参照)。また、BSの一部をFAやSFに置換しても、中性化速度係数は同程度の値を示した。ただし、いずれの結合材の組合せにおいても、水結合材比の低下とともに中性化速度係数は減少する。ここで、前述したデータを28日標準養生強度と中性化速度係数(13週)の関係に整理した結果を図8に示す。全体的な傾向としては、中性化速度係数と強度の間には高い相関が認められ、水結合材比を低減させ、緻密な組織を形成することで、中性化の進行を抑制できると言える。また、中性化速度係数は、混和材の組合せにかかわらず、セメントの混合割合を指標として整理できる。ただし、セメントの混合割合が小さくなるほど、圧縮強度の増大による中性化速度係数の低減効果が大きくなる傾向にある。

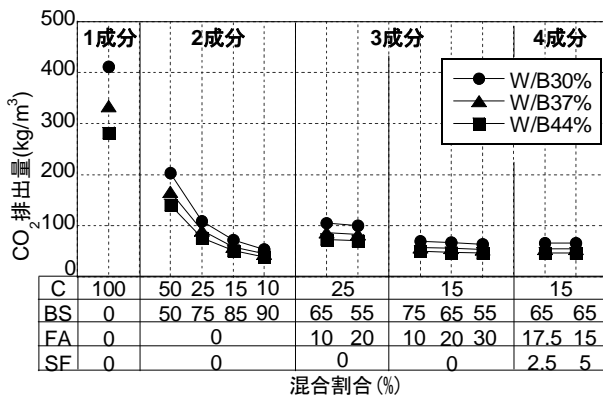


Fig. 5 結合材の混合割合とCO₂排出量の関係
Relationship between Mixing Ratio of Binder and Carbon-dioxide Emissions

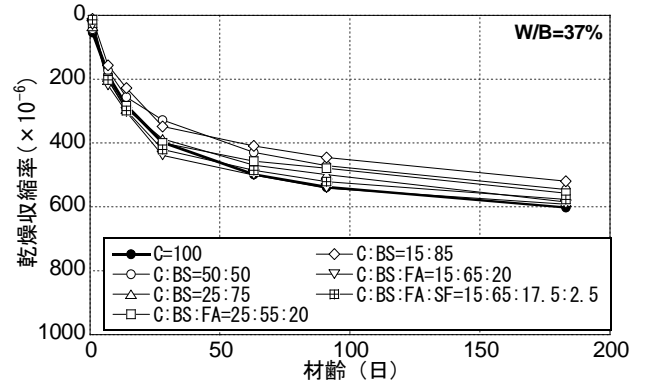


Fig. 6 材齢と乾燥収縮率の関係
Relationship between Curing Period and Dry Shrinkage

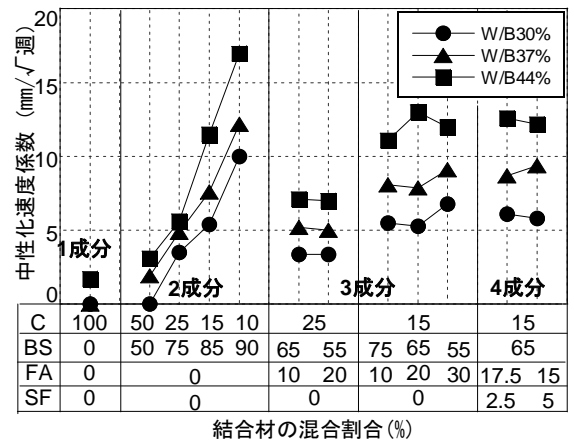


Fig. 7 結合材の混合割合と中性化速度係数の関係
Relationship between Mixing Ratio of Binder and Rate of Neutralization Coefficient

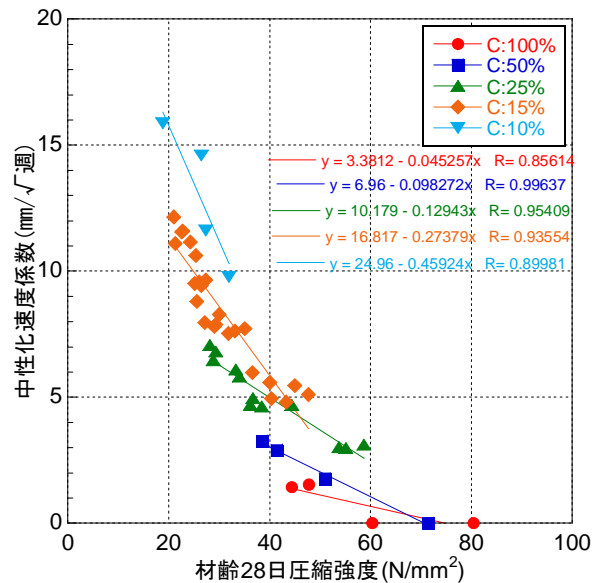


Fig. 8 28日標準養生強度と中性化速度係数の関係
Relationship between Compressive Strength by 28-Day Standard Cure and Rate of Neutralization Coefficient

(6) 凍結融解抵抗性

水結合材比37%での比較検討結果をFig. 9に示す。結合材の種類および混合割合にかかわらず、凍結融解サイクルが増加しても相対動弾性係数の顕著な低下は認められず、300サイクル後の耐久性指数は、85%¹⁰⁾以上の値が得られた。従って、限られたデータ数ではあるものの、セメントの混合割合を25%以下とした場合でも、十分な凍結融解抵抗性を有していると判断される。

(7) 調合設計と中性化速度係数

これまでの実験結果をもとに、28日標準養生強度(f_{28}^F)に対する結合材の混合割合ごとの調合条件と中性化速度係数について整理した結果をTable 8に示す。

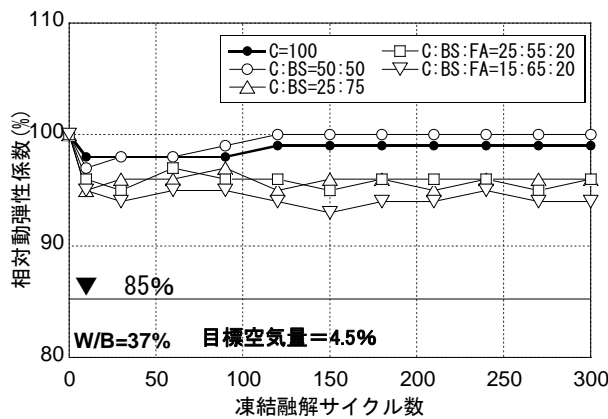


Fig. 9 凍結融解試験結果
Result of Freezing and Thawing Test

Table 8 調合設計
Mixture Design Examples

f_{28}^F	混合割合 (%)			調合条件		中性化速度係数		
	C	BS	FA	W/B	W			
40	100	0	0	49.4	160	1.57		
	50	50	0	44.3	152	3.03		
	25	75	0	40.8	149	5.00		
		65	10	36.1	144			
	15	55	20	36.3	137	5.87		
		85	0	33.8	147			
		75	10	32.6	144			
	50	65	20	31.8	137	3.13		
		10	90	0	25.4		147	6.59
		100	0	0	42.6		160	1.12
50		50	0	38.4	152		2.05	
25		75	0	34.1	149		3.71	
		65	10	31.6	144			
		55	20	31.5	137			
15	85	0	29.2	147	3.13			
	75	10	27.7	144				
	65	20	27.5	137				
	10	90	0	21.0		147	2.00	

[注] f_{28}^F : 28日標準養生強度(N/mm²), W/B: 水結合材比(%), W: 単位水量(kg/m³), 中性化速度係数(単位: mm/√週)

4. 適用事例

(1) 技術研究所本館立上り壁(事例1)

適用部位の概要および適用結果をTable 9に示す。打設当日は、外気温度が30℃で、場外運搬時間が最大で90分程度の条件であったが、荷卸し時点においても目標とする性状が得られ、高い流動性を保持した状態で打設を行ったため、豆板などの不具合も見られなかった。

材齢28日標準養生強度は、1台目と2台目の平均値として43.9N/mm²であり、設計基準強度を十分に満足する結果であった。なお、材齢91日標準養生強度は、材齢28日から8N/mm²程度の強度増進が得られた。ここで、クリーンクリートを適用した外構立上り壁の外観をPhoto 3に示す。打設後1年経過しているが、ひび割れの発生やセメントペーストが消失し、骨材が露出するアブサンデン現象など表面の変状は見られない。

Table 9 適用部位の概要および適用結果(その1)
Outline and Result of Application(Part 1)

適用部位	大林組技術研究所 新本館外構立上り壁		
規模	32×1.35×0.19m 打設量: 8.2m ³		
設計基準強度	21N/mm ²		
打設時期	2010年8月		
材料構成	結合材の種類: 4成分系 単位水量: 140kg/m ³ 水結合材比: 40.7% 細骨材率: 46.6% 目標スランプ: 21cm 目標空気量: 4.5%		
レディーミクスト コンクリート工場	東京都F工場		
強度性状	材齢	試験項目	強度
	28日	標準養生強度(N/mm ²)	43.9
		弾性係数(kN/mm ²)	35.4
		割裂引張強度(N/mm ²)	3.59
	56日	標準養生強度(N/mm ²)	50.0
91日	標準養生強度(N/mm ²)	51.9	

[注] 強度試験結果は、1台目と2台目の平均値を示す



Photo 3 クリーンクリートを適用した外構立上り壁の外観
View of Concrete Fence Wall by Crean-crete

(2) 技術研究所材料化学実験棟3Qブロック(事例2)

適用部位の概要および適用結果をTable 10に示す。荷卸し時点において、目標とするスランプフローおよび空気量を満足する結果であった。なお、60個のコンクリート製ブロック(3Qブロック)の製造には60分程度の時間を要したが(出荷から打設終了まで150分程度)、打設終了まで十分な流動性を保持し、型枠形状が比較的複雑であったが、十分な寸法精度を確保することができた。

圧縮強度については、設計基準強度を40N/mm²(封緘養生強度)としていたが、3Qブロックを養生・保管する室内の温度を20℃程度に保持したため、材齢7日の封緘養生強度で40.0N/mm²が得られ、この時点で設計基準強度を満足する結果であった。なお、材齢28日封緘養生強度は48.8N/mm²であった。ここで、クリーンクリートを適用した3Qブロックの外観をPhoto 4に示す。

Table 10 適用部位の概要および適用結果(その2)
Outline and Result of Application(Part 2)

適用部位	大林組技術研究所 材料化学実験棟耐震ブロック(3Qブロック)		
規模	コンクリート製ブロック 300×250×200mm 60個		
設計基準強度	40N/mm ² (現場封緘養生)		
打設時期	2010年12月		
材料構成	結合材の種類：4成分系 単位水量：140kg/m ³ 水結合材比：35.0% 細骨材率：48.7% 目標スランプフロー：50cm 目標空気量：4.5%		
レディミキスト コンクリート工場	東京都F工場		
強度性状	材齢 28日	試験項目	強度
		標準養生強度(N/mm ²)	58.2
		封緘養生強度(N/mm ²)	48.8
		弾性係数(kN/mm ²)	34.5
		割裂引張強度(N/mm ²)	3.79

[注] 弾性係数および割裂引張強度は封緘養生による

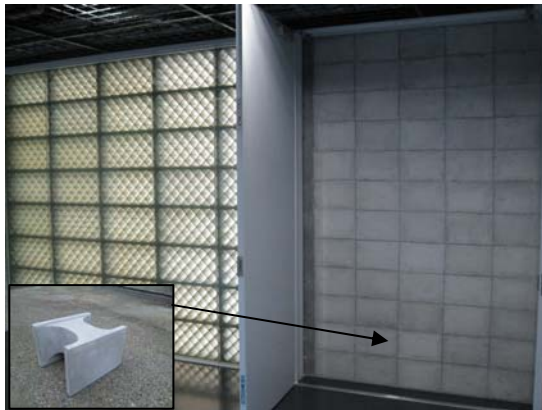


Photo 4 クリーンクリートを適用したブロックの外観
View of Seismic Concrete Block by Clean-crete

(3) A現場仮設歩道(事例3)

適用部位の概要および適用結果をTable 11に示す。打設時期が冬期ということもあり、荷卸し時点でのスランプロスが2cm以下であり、目標スランプを満足することができた。また、圧送車によるブーム打設にて行ったが、閉塞などの問題も生じなかった。ただし、ブリーディングが少ないため、一般的な高強度コンクリートのように、内部はまだ軟らかい状態であるが、表層部の硬化は比較的早いいため、こて仕上げする際には、被膜養生剤を併用して仕上げを行なった。なお、圧縮強度は、材齢28日で46.8N/mm²であった。

(4) 二酸化炭素排出量

これらの適用事例について、Table 7に示す値をもとに、クリーンクリートの二酸化炭素排出量と削減率を算出した結果をTable 12に示す。なお、削減率の算出は、適用したクリーンクリートの28日標準養生強度と同一強度の普通コンクリートの調合から二酸化炭素排出量を算出し、これを基準とした。いずれの事例においても、クリーンクリートの二酸化炭素排出量は、同一強度の普通コンクリートに比べて、80%以上の削減率が得られた。

Table 11 適用部位の概要および適用結果(その3)
Outline and Result of Application(Part 3)

適用部位	A現場仮設歩道		
規模	40×2×0.2m 打設量：16m ³		
設計基準強度	—		
打設時期	2011年2月		
材料構成	結合材の種類：3成分系 単位水量：140kg/m ³ 水結合材比：39.5% 細骨材率：48.4% 目標スランプ：21cm 目標空気量：4.5%		
レディミキスト コンクリート工場	東京都O工場		
強度性状	材齢	試験項目	強度
	28日	標準養生強度(N/mm ²)	46.8



Photo 5 クリーンクリートを適用した歩道の外観
View of Temporary Sidewalk by Clean-crete

Table 12 二酸化炭素排出量と削減率
Carbon-dioxide Emissions and Reduction Rate

適用事例	二酸化炭素排出量(kg/m ³)		削減率(%)
	クリーンクリート	普通コンクリート	
1	52.3	281.2 ¹⁾	81.4
2	59.6	324.2 ²⁾	81.6
3	53.6	303.4 ³⁾	82.3

[注]1)：呼び強度36，調合強度43.2N/mm²の調合より算出

2)：呼び強度47，調合強度56.4N/mm²の調合より算出

3)：呼び強度39，調合強度47.0N/mm²の調合より算出

5. まとめ

本論文の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 混和材(高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ)の置換率の増加に伴って、単位水量は線形的に低減することができ、その低減効果は、高炉スラグ微粉末よりもフライアッシュの方が大きい。
- 2) 混和材を高置換した場合でも、結合材水比と標準養生強度の関係は、直線で近似できる。
- 3) セメントの混合割合が30%以下でも、適切な水結合材比を設定することで、所要の強度発現を確保しつつ、二酸化炭素排出量を低減できる。
- 4) 中性化速度係数は強度と高い相関性があり、強度を高めることで、中性化の進行を抑制できる。
- 5) 乾燥収縮および凍結融解抵抗性は、同一の水結合材比で比較した結果、結合材として普通ポルトランドセメントのみを使用した場合と同等の結果が得られた。
- 6) 適用事例をもとに、クリーンクリートの二酸化炭素排出量を算出した結果、同一強度の普通コンクリートに対して、80%以上の二酸化炭素排出量を削減できる。

クリーンクリートは、低炭素と言う環境側面のほか、セメント量が少ないことに起因し、通常のコンクリートに比べて温度上昇量が少ない。したがって、マッシュな部材への適用が有効であると考えられる。

謝辞

本研究を実施するに当たり、ご協力頂きました日本シーカ、宇部興産株式会社並びに関東宇部コンクリート工業株式会社の各工場の関係各位に紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートの環境負荷評価，コンクリート技術シリーズ，No.44，II-64p，(2002)
- 2) 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，133p，(2008)
- 3) 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，pp.51～53，(2011)
- 4) 近松竜一，他：異種粒度の結合材を用いたフレッシュコンクリートの性質，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.12，No.1，pp.93～98，(1990)
- 5) 大澤友宏，他：種々の混和材を高置換したセメント系混合材料の基礎物性とCO₂削減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.179～184，(2010)
- 6) 松家武樹，他：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諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.185～190，(2010)
- 7) 坂田昇，他：高炉スラグ微粉末を大量に混合したRCDコンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.191～196，(2010)
- 8) 米澤敏男，他：エネルギー・CO₂ミニウム(ECM)セメント・コンクリートシステム，コンクリート工学，V.48，No.9，pp.69～73，(2011)
- 9) 香取恒雄：レディーミクストコンクリート工場における環境負荷低減への取り組み，コンクリート工学，V.48，No.9，pp.74～77，(2011)
- 10) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5)鉄筋コンクリート工事，pp.612～624，(2009)