環境配慮型超高強度コンクリートに関する基礎的研究

BASIC STUDY ON ENVIRONMENTALLY FRIENDLY ULTRA HIGH STRENGTH CONCRETE

吉田 泰*, 山本佳城**, 陣内 浩***

Yutaka YOSHIDA, Keiki YAMAMOTO and Hiroshi JINNAI

The spreading awareness of green issues in recent years has prompted us to develop environmentally friendly concrete: ultra high strength concrete that contains high volume of by-products. Compressive strength tests were conducted using mortar and concrete specimens containing various by-products. As a result, we suggested a computation approach of the compressive strength of mortar by using a regression expression that uses the chemical composition and the mixing condition of the by-product as parameters. And CO₂ emissions from the component materials of this environmentally friendly, ultra high strength concrete reduce 40% of the emissions for conventional ultra high strength concrete.

Keywords : *environment friendly, ultra high-strength concrete, by -product, cement replacement, mortar, compressive strength*

環境配慮, 超高強度コンクリート, 副産物, セメント置換, モルタル, 圧縮強度

1. はじめに

近年, 環境問題への意識の高まりから環境配慮技術の重要性が高まっている。環境問題の中でも CO₂ 排出量の削減は逼迫の課題である。国内の CO₂ 排出量の試算は, 様々なアプローチによって実施されているが, 堺¹⁾によれば, 2007 年における日本の CO₂ 総排出量 12.4 億トンであり, 建設セクター全体で 2.6 億トンのうちコンクリートセクターが約 2 億トン排出していると言われている。したがって建設セクターにおいては, CO₂ 排出量の削減を実施する一つの方法として, 建設材料の生産時に発生する CO₂ を低減することが効果的であると考えられる。日本国内においては, 技術的な努力の成果により各材料の生産時の CO₂ 排出量を低減する方法は, すでに限界近いと考えられる。したがって, コンクリートの構成材料中で最も CO₂ 排出量の多いポルトランドセメントの使用量を抑制することが効率的であると考えられている。たとえば Malhotra は, セメントの代わりにフライアッシュや高炉スラグ微粉末を Supplementary Cementing Materials(SCM)として大量に使用することにより, CO₂ 排出量の削減が可能であることを提言している²⁾。日本国内においても, Malhotra のように SCM として産業副産物であるフライアッシュや高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの研究について多くの研究が実施されているが, コンクリート中のポルトランドセメントの使用量の抑制が圧縮強度や中性化抵抗性とのトレード

オフの関係となることが周知の事実となっている^{3)~8)}。これらのセメントを副産物と置換する検討は, 普通強度レベルから 80N/mm² クラスまでの範囲であることから, 本研究では 100N/mm² を超えるようなコンクリートを対象とし, セメントを副産物と置換した検討を実施することとした。超高強度コンクリートは単位量当たりを使用するポルトランドセメント量が多いことから, このような超高強度コンクリートにおいて副産物の大量使用が可能となれば, 多くの CO₂ 排出量の低減を実現できる。

副産物を大量使用する場合, 前述のとおり圧縮強度とのトレードオフを考慮しなければならない。ポルトランドセメントと副産物との置換率を大きく設定したとしても, コンクリートの圧縮強度への寄与率の低い副産物を使用したことにより, コンクリートの強度発現が良好なものとならなければ, ポルトランドセメントと副産物を置換する前のコンクリートと同じ圧縮強度を得るための水結合材比をより低く設定することとなる。この結果, コンクリート中のポルトランドセメント量は増加する方向になる。したがって, 使用する混和材の種類や置換率がコンクリートの強度寄与率に与える影響は極めて重要な要素といえる。強度寄与率に関する研究は, 例えばフライアッシュでは黄⁹⁾, 呉¹⁰⁾らの研究があり, 単位セメント量やフライアッシュの比表面積をパラメータとしたフライアッシュの強度寄与係数が提案されている。一方, 高炉スラグでは, 坂井らのセメ

* 大成建設㈱技術センター 研究員・工修

** 大成建設㈱技術センター 副主任研究員・博士(工学)

*** 大成建設㈱技術センター 主席研究員・博士(工学)

Research Engineer, Technology Center, Taisei Corp., M. Eng.

Research Engineer, Technology Center, Taisei Corp., Ph. D.

Chief Research Engineer, Technology Center, Taisei Corp., Ph. D.

表 1 セメントおよび混和材

記号	結合材の種類	CO ₂ 原単位	CaO (mass%)	Al ₂ O ₃ (mass%)	SiO ₂ (mass%)	R** (μm)
P	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3320cm ² /g)	0.7666	63.28	5.65	20.61	16.99
S	シリカフューム(密度 2.00g/cm ³ , 比表面積 200600cm ² /g)	0.0196*	0.38	1.07	92.60	0.87
F	フライアッシュⅡ種(密度 2.22g/cm ³ , 比表面積 4220cm ² /g)	0.0196	1.78	30.29	58.20	10.51
B	高炉スラグ微粉末(密度 2.92g/cm ³ , 比表面積 2980cm ² /g)	0.0265	42.65	14.00	34.02	22.59

CO₂原単位 CO₂-t/t¹²⁾ * シリカフュームの CO₂原単位はフライアッシュの値を代用 **50%粒子の平均粒径

ント硬化体の相組成を考慮した強度発現性についての研究¹¹⁾などが新しい。しかしながら、混和材の置換率を大きく設定し、さらに複数の混和材を組み合わせることを想定すると、そのような複合的な強度寄与率を検討した例は少ない。特に、筆者らの目指す低水結合材比を対象とした研究はほとんど存在しない。

そこで本研究では、CO₂原単位の低い環境配慮型超高強度コンクリートを効率的に調合することを目標とした基礎的な資料の構築を目的とし、複数の混和材を組合せたコンクリートの強度寄与率などを大まかに推定する方法の構築を試み、その推定方法によって CO₂原単位の低い環境配慮型超高強度コンクリートの調合を試算した。

2. モルタル実験

2.1 使用材料

モルタル実験で使用したセメントおよび混和材を表 1 に示す。セメントをフライアッシュ等の副産物と大量置換使用する場合、初期材齢の強度発現が遅くなる¹¹⁾ため、初期の強度発現を確保する観点から、セメントには普通ポルトランドセメントを選択した。なお、ポルトランドセメントはすでに製造時に 5%以下の副産物を混入しているが、今回は置換率の計算からは外した。混和材として使用する SCM は、資源の有効活用を実施するためにも、産業副産物を選択することが望ましい。したがって、建築分野において一般的に使用され、また安定して供給可能な副産物であるシリカフューム、フライアッシュⅡ種および高炉スラグ微粉末を使用した。また、細骨材には大月産の安山岩砕砂(表乾密度 2.61g/cm³)を、混和剤にはポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤を使用した。

2.2 調合計画

モルタルの調合は、大きく 2 つのシリーズに分けた。実験シリーズ別のセメントと副産物の組合せを表 2 および表 3 に示す。シリーズⅠでは、水結合材比と圧縮強度の関係を得るために、水結合材比ごとのセメントと各副産物の混合比を同一とした。このシリーズⅠではセメントに対する副産物の置換率は 10~30%とした。

シリーズⅡでは、副産物の置換率および組合せの影響を把握するために、水結合材比を 22%に統一し、副産物の組合せごとにセメントに対する副産物の置換率および、副産物の混合比を変化させた。このシリーズⅡではセメントに対する副産物の置換率は 30~50%とした。また、どちらのシリーズにおいても、モルタルの結合材と細骨材の単位量は、単位水量 155kg/m³、単位粗骨材量 865kg/m³、空気量 2.0%の超高強度コンクリートを想定して決定した。

2.3 供試体の作製

モルタルの練混ぜにはホバート型ミキサを使用した。高性能減水剤の添加率は、練上がり直後の 0 打フロー¹³⁾が 200mm 以上かつ分

表 2 セメントと副産物の組合せ(シリーズⅠ)

結合材	混合比 (P:F:B:S)	副産物 置換率 (質量%)	CO ₂ 原単位 (CO ₂ -t/t)	モルタルの 水結合材比 (%)
P	10:0:0:0	0	0.7666	31,26,22,19
S	9:0:0:1	10	0.6919	26,22,19
F	8:2:0:0	20	0.6172	
B	8:0:2:0		0.6186	
FB	8:1:1:0		0.6179	
FS	7:2:0:1	30	0.5425	
BS	7:0:2:1		0.5439	
FBS	7:1:1:1		0.5432	

表 3 セメントと副産物の組合せ(シリーズⅡ)

結合材	混合比 (P:F:B:S)	副産物 置換率 (質量%)	CO ₂ 原単位 (CO ₂ -t/t)	モルタルの 水結合材比 (%)
F	8:2:0:0, 7:3:0:0 6:4:0:0	20~40	0.6172 ~0.4678	22
B	8:0:2:0, 7:0:3:0 6:0:4:0	20~40	0.6186 ~0.4706	
FB	8:1:1:0, 7:2:1:0 7:1.5:1.5:0, 7:1:2:0 6:3:1:0, 6:2:2:0, 6:1:3:0	20~40	0.6179 ~0.4685	
FS	7:2:0:1, 6:3:0:1 5:4:0:1, 6.5:3:0:0.5 5.7:4:0:0.3	30~50	0.5425 ~0.3931	
BS	7:0:2:1, 6:0:3:1 5:0:4:1	30~50	0.5439 ~0.3959	
FBS	7:1:1:1, 6:2:1:1 6:1.5:1.5:1, 6:1:2:1 5:3:1:1, 5:2:2:1 5:1:3:1, 6.5:1.5:1.5:0.5 5.7:2:2:0.3	30~50	0.5432 ~0.3938

図 1 圧縮強度試験結果（シリーズⅠ）

図 2 圧縮強度試験結果（シリーズⅡ）

離が生じない範囲とし、結合材水比ごとに同一とした。圧縮強度試験にはφ50×100mm の円柱供試体を使用し、試験材齢は、7、28 および 91 日（標準水中養生）とした。

2.4 モルタルの圧縮強度試験結果

図 1 および図 2 に圧縮強度の試験結果を示す。本研究で検討した範囲の副産物を使用した調合では、既往の研究¹⁴⁾同様、いずれの調合の供試体も材齢 7 日での圧縮強度が普通ポルトランドセメントのみを使用した供試体よりも低く、置換率が大きくなるほど低くなる傾向であった。また、材齢 28 日において、100～150N/mm²程度の圧縮強度が得られた。

セメントに対する副産物の置換率が 30%以下であるシリーズⅠでは、材齢 28 日以降の圧縮強度は、いずれの水結合材比においても普通ポルトランドセメントを使用した供試体の約 90%以上が得られているが、調合によって差異がある。水結合材比を 22%で統一し、副産物の組合せおよび置換率を変化させたシリーズⅡでは、セメントに対する副産物の置換率が大きい 50%の調合 (P:F:S=5:4:1, P:F:B:S=5:3:1:1, P:F:B:S=5:2:2:1, P:F:B:S=5:1:3:1, P:B:S=5:4:1) で比較すると、高炉スラグ微粉末、シリカフェームを混和材として使用した P:B:S=5:4:1 の圧縮強度が相対的に高かった。材齢 28 日以降では、普通ポルトランドセメントを使用した供試体の 80%以上の強度が得られている。

図 3 ポルトランドセメント水比と強度寄与率の関係

図 3 に材齢別の副産物の強度寄与率¹⁹⁾をポルトランドセメント水比で整理した結果を示す。強度寄与率は、文献¹⁵⁾のフライアッシュの強度寄与率を用いた圧縮強度推定式 (1) によって求めている。

$$F_E = a(C + kE)/W + b \quad (1)$$

全体として、材齢が大きくなるほど強度寄与率は増加する傾向がみられるものの、いずれの材齢においても、強度寄与率とポルトランドセメント水比との間には明確な関係が得られなかった。

図 4 100N/mm² のコンクリートの調合にした場合の CO₂ 排出量の試算結果

2.5 CO₂ 排出量の試算

この実験結果を基に、単位水量 155kg/m³、単位粗骨材量 865kg/m³、空気量 2.0%のコンクリートの調合を想定した場合の CO₂ 排出量を試算した。使用した CO₂ 原単位は表 1 に示したものとした。ここでは、材齢 28 および 91 日のモルタルの圧縮強度試験の結果からセメントに対する副産物の置換率が 30%と 50%の場合について、ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートに対する CO₂ 排出量比を比較した。いずれの調合も所定の材齢において 100N/mm² の圧縮強度が得られるように水結合材比を決定した。検討結果を図 4 に示す。図の縦軸には普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートに対する各調合の CO₂ 排出量を百分率で表した。結果として、セメントに対する副産物の置換率と同等の CO₂ 排出量の削減が期待できる副産物の組合せと期待できない組合せがある例が示された。P:F:S=7:2:1 や P:F:B:S=5:4:1 はいずれの材齢においてもセメントに対する副産物の置換率と同等の CO₂ 排出量の削減が見込める。一方、P:F:S=7:2:1 のように、材齢 28 日ではセメントに対する副産物の置換率 30%の半分である 15%しか CO₂ 排出量の削減が見込めないものの、材齢 91 日ではセメントに対する副産物の置換率と同等の CO₂ 排出量の削減が見込めるものもある。置換率で比較すると、材齢 91 日では 30%の置換率であればほとんどの組合せで 30%程度の CO₂ 排出量の削減が見込めるが、50%の置換率ではほとんどの組合せが 40~50%程度の CO₂ 排出量の削減しかできず、置換率の上昇によって期待できる CO₂ 排出量の削減の限界が示唆されている。

2.6 強度推定式の提案

前章で示したように、単に副産物を使用するだけでは CO₂ 排出量の大幅な削減は達成できない。したがって、圧縮強度を確保しつつ CO₂ 排出量の削減が可能な最適調合を設計する必要がある。そこで、最適調合を設計するために、得られたモルタルの圧縮試験結果から、複数種の副産物を使用した場合の簡便な圧縮強度推定式を提案することとした。

表 4 提案式の係数

h	j	m	n	p	s
-1.65×10^{-3}	-0.68×10^{-1}	1.09	-1.04×10^3	1.48×10^2	-0.52×10
-3.40×10^{-3}	-1.57×10^{-1}	1.79	-1.50×10^3	2.37×10^2	-0.87×10
-3.01×10^{-3}	-0.47×10^{-1}	1.56	-1.92×10^3	3.03×10^2	-1.07×10

※上段より材齢 7, 28, 91 日の係数

本検討では、文献⁵⁾のフライアッシュの強度寄与率を用いた圧縮強度推定式 (1) を参考に、複数の副産物を使用した場合にも適用可能な式に拡張することを考えた。具体的には強度寄与率を目的変数、単位セメント量、セメントと副産物の比、分子の構成比および 50%粒子の平均粒径を説明変数とした重回帰分析を行った。使用した材料の物性値を表 1 に示す。提案式は (2)、(3) のように構成した。

$$F_E' = a(C + k'E)/W + b \quad (2)$$

$$k' = hC + j(C/E) + ma + n(1/R^2) + p(1/R) + s \quad (3)$$

F_E, F_E' : 圧縮強度 (N/mm²) a, b : 実験係数

C : 単位セメント量 (kg/m³) k' : 強度寄与率

E : 単位副産物量 (kg/m³) W : 単位水量 (kg/m³)

a : CaO/ (SiO₂+Al₂O₃)

R : 50%粒子の平均粒径 (μm)

h, j, m, n, p, s : 係数 (表 4 に示す)

ここで、式 (3) の説明変数は以下のように考えている。C および C/E は、黄ら⁹⁾や呉ら¹⁰⁾の研究を参考にセメント反応物と副産物の反応のしやすさへの影響を考慮し選定した。 α は、本田ら¹⁶⁾や片山ら¹⁷⁾の研究や JIS A 6206 「コンクリート用高炉スラグ微粉末」で定義されている塩基度¹⁸⁾を参考にセメント水和物との化学反応によって生ずる生成物の化学組成への影響を考慮し選定した。今回の検討では CaO/SiO₂ や (CaO+Al₂O₃)/SiO₂ 等も説明変数としたが、CaO/ (SiO₂+Al₂O₃) を説明変数としたほうが高い相関を示した。1/R²および 1/R は、黄ら⁹⁾、呉ら¹⁰⁾や李ら¹⁹⁾の研究を参考に、副産

物の反応性への影響を考慮し選定した。なお、比表面積を説明変数とした検討も行ったが、粒子半径の逆数を説明変数としたほうがよい相関が得られた。

図5～図7のAは文献¹⁰⁾を参考に、寄与率を目的変数、単位セメント量を説明変数として回帰分析し、式(1)に代入して圧縮強度を推定した例である。図より、いずれの材齢においても単位結合材量のみで強度寄与率を説明した場合には、複数種の副産物を使用した圧縮強度の推定は困難であることがわかる。図5～図7のBは提案式から導き出される推定値と実測圧縮強度の関係を示したものである。図より、いずれの材齢においても提案式では、単位セメント量のみならずその他の要素も考慮することにより、圧縮強度をよく推定できていることがわかる。

続いて、作成した強度推定式を使用し、水結合材比 19, 22, 26%, 副産物置換率 30～70% (30～70%のうちシリカフェームの置換率 10%固定, 残り部分をフライアッシュと高炉スラグ微粉末で置換) の条件でフライアッシュと高炉スラグ微粉末の構成割合を変化させた場合の材齢 28 日における副産物の強度寄与率を試算した。材齢 7 日の試算結果を図 8, 材齢 28 日の試算結果を図 9, 材齢 28 日の試算結果を図 10 に示す。図中、左側によるほど副産物中に占める高炉スラグ微粉末の割合が増え、右側によるほどフライアッシュの割合が増える。図よりいずれの水結合材比においても材齢が増加するごとに強度寄与率は増加する傾向にある。また、副産物中に高炉スラグ微粉末が多い場合、材齢 7 日においても高炉スラグ微粉末の潜在水硬性により多少の強度寄与率を発揮するものの、例えば水結合材比 19% の場合 0.4 以下、材齢が 28 日になると 0.4～0.8, 材齢 91 日では 0.6～0.8 程度となっている。弱材齢時には強度発現が遅い高炉スラグ微粉末使用コンクリートの強度発現の特徴を表現できていると考えられる。一方フライアッシュが多い調査は、水結合材比 19% では材齢 7 日での強度寄与率は 0.1 以下となっておりほとんど強度に寄与していない。しかし、材齢 28 日での強度寄与率は 0.1～0.4, 材齢 91 日では 0.3～0.5 と材齢が経過するごとに大きくなっており、フライアッシュのポズラン反応を表現できていると考えられる。次に、低水結合材比になるほど強度寄与率は低下する傾向にあるが、強度推定式作成に使用した図 1 に示すモルタルの圧縮試験結果が、水結合材比をパラメータとしたデータが少ないため、今後検討が必要であると考えられる。また、置換率が 30～50% 場合は、高

図5 推定強度と強度の実測値の関係 (材齢 7 日)

図6 推定強度と強度の実測値の関係 (材齢 28 日)

図7 推定強度と強度の実測値の関係 (材齢 91 日)

図8 フライアッシュと高炉スラグ微粉末の構成割合と強度寄与率の関係 (材齢 7 日)

図9 フライアッシュと高炉スラグ微粉末の構成割合と強度寄与率の関係（材齢 28 日）

図10 フライアッシュと高炉スラグ微粉末の構成割合と強度寄与率の関係（材齢 91 日）

表5 コンクリートの使用材料

記号	結合材の種類	CaO (mass%)	Al ₂ O ₃ (mass%)	SiO ₂ (mass%)	R** (μm)
P	普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3280cm ² /g)	63.36	5.53	21.11	16.64
S	シリカフューム(密度 2.20g/cm ³ , 比表面積 168000cm ² /g)	0.18	0.42	94.59	6.04
F	フライアッシュII種(密度 2.22g/cm ³ , 比表面積 3830cm ² /g)	1.26	31.00	58.00	9.67
B	高炉スラグ微粉末(密度 2.92g/cm ³ , 比表面積 3140cm ² /g)	42.80	13.82	34.16	19.61

表6 コンクリートの基本調合

水結合材比 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		結合材	水	細骨材*	粗骨材
20	2.0	775	155	250	865
25	2.0	620		299	865
33	2.0	465		348	865

*：使用する副産物の密度によって調整

炉スラグ微粉末が多いほうが強度寄与率は高いものの、置換率が 60～70% の場合は、高炉スラグ微粉末とフライアッシュの混合割合が 60% 程度のところに強度寄与率のピークが来ている。高置換率になり、セメントよりも粒度の細かいフライアッシュが増加することで、結合材の粒度分布が最適な方向にシフトしたことや、化学反応に最

適な化学組成となった可能性が考えられる。しかし、今回の試算で
使用した強度推定式は、置換率が 30～50% の範囲で作成されたもの
であることや、調合ごとの組成物も確認できていない点について今
後検討が必要である。

3. コンクリート実験

2. のモルタル実験結果および強度推定式を用いた試算結果を基
にコンクリートでの実験を行った。

3.1 使用材料

コンクリート実験で使用したセメントおよび混和材を表 5 に示す。
また、細骨材には大月産の安山岩砕砂（表乾密度 2.62g/cm³, CO₂
原単位 0.0037t-CO₂/t）、粗骨材には大月産の安山岩砕石（表乾密度
2.62g/cm³, CO₂原単位 0.0029t-CO₂/t）、混和剤にはポリカルボン酸
エーテル系の高性能減水剤を使用した。

図 11 コンクリートの圧縮強度試験結果

表 7 セメントと副産物の組合せ

シリーズ	結合材質量割合 (%)				副産物 置換率 (%)	水結合 材比 (%)
	P	F	B	S		
P	100	0	0	0	0	20～33
S	90	0	0	0	10	
FS	50	40	0	10	50	
	40	50	0	10	60	
	30	60	0	10	70	
BS	50	0	40	10	50	
	40	0	50	10	60	
	30	0	60	10	70	
FBS	50	20	20	10	50	
	40	25	25	10	60	
	30	30	30	10	70	

3.2 調合計画

コンクリートの基本調合を表 6 に示す。コンクリートの基本調合の結合材と細骨材の単位量は、単位水量 155kg/m^3 、単位粗骨材量 865kg/m^3 、空気量 2.0% の超高強度コンクリートを想定して決定した。水結合材比は 2. のモルタル実験の結果を基に、材齢 28 日で 100 N/mm^2 の圧縮強度が得られる範囲を包括できるよう 20, 25, 33% の 3 水準とした。セメントと副産物の組合せを表 8 に示す。モルタル実験においてセメントと副産物の置換率が 50% でも十分な圧縮強度が得られたことから、副産物の置換率は 50～70% とした。副産物の組合せは前章の強度寄与率の試算結果を参考に、フライアッシュとシリカフェーム、フライアッシュと高炉スラグ微粉末とシリカフェーム（フライアッシュと高炉スラグ微粉末は同量）、高炉スラグ微粉末とシリカフェームの 3 種類とした。シリーズ P が表 7 に示すコンクリートの基本調合と一致する。その他のシリーズの細骨材量は、使用する副産物の組合せによって変化させた。

3.3 供試体の作製

コンクリートの練混ぜには水平二軸強制練りミキサーを使用した。高性能減水剤の添加率は、練上がり後のスランプフローが 450mm

表 8 作成した 100N/mm^2 のコンクリート調合

シリーズ	記号	置換率 (%)	水結合材比 (%)	
			材齢 28 日	材齢 91 日
P	P	0	28.0	40.7
FS	FS-50	50	20.2	24.1
FBS	FBS-50		21.2	27.1
BS	BS-50		22.1	26.6
FS	FS-60	60	17.8	20.4
FBS	FBS-60		18.9	24.1
BS	BS-60		20.6	25.5
FS	FS-70	70	14.8	15.2
FBS	FBS-70		17.0	21.5
BS	BS-70		18.6	24.7

以上かつ分離しない範囲となるように調整した。

圧縮強度試験には標準養生した $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を使用した。試験材齢は、7, 28 および 91 日とした。

3.4 コンクリートの圧縮強度試験結果

図 11 にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。水結合材比 20% であれば、P:F:S=5:4:1 や P:B:S=5:4:1 および 4:5:1 などは材齢 28 日において 100N/mm^2 以上の圧縮強度を示しており、超高強度コンクリートの実現が期待できる。本研究で検討した範囲では、セメントを副産物と大量置換したコンクリートは、いずれの水結合材比においても材齢 7 日での圧縮強度が小さく、水結合材比 20% の場合はシリーズ P のコンクリートの約 40～75% の圧縮強度、水結合材比 33% の場合は約 25～50% であった。しかし、材齢 91 日では水結合材比 20% の場合は約 65～105%、水結合材比 33% の場合は約 50～80% と、材齢が経過するほど圧縮強度の増進が見込める結果となった。これは、材齢の経過とともにフライアッシュなどのポゾラン反応が強度へ影響したためと考えられる。

3.5 CO_2 排出量の検討

3.4 で得られたコンクリートの圧縮強度試験結果を基に圧縮強度が 100N/mm^2 となるコンクリートの水結合材比を試算し、表 6 の調合の考え方に基いて作成した仮想調合から、 CO_2 排出量を検討

図 12 コンクリートの CO₂ 排出量

した。水結合材比の試算結果を表 8 に示す。2. 5 において材齢 28 日での圧縮強度が低かったシリーズほど水結合材比の低い割合となっており、例えば FS-70 は副産物を大量使用したにもかかわらず、使用する結合材量が非常に多くなっている。シリーズごとに比較すると BS シリーズ、FBS シリーズ、FS シリーズの順に水結合材比は低くなった。ここでも 3. 2 と同様に普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートと CO₂ 排出量を比較した。比較結果を図 12 に示す。図より、セメントの副産物置換率がそのまま CO₂ 排出量の削減率にはつながっていないことが明らかである。例えば FS-50 と FS-60 を比較すると、副産物置換率は 10% 上昇しているものの、CO₂ 排出量は材齢 28 日で 5% 程度しか削減できていない。今回の検討の範囲においては、BS-70 が最も CO₂ 排出量を削減できており、普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートと比較して、40% 程度の CO₂ 排出量が削減できるという試算結果であった。ただし、今回の試算結果は材料由来の CO₂ 排出量についてのみの検討であり、実際のコンクリートを製造する場合には材料の運搬、製造によって発生する CO₂ 排出量を総合的に評価する必要がある。

4. まとめ

本研究での検討の範囲において、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 副産物を大量使用することがそのまま二酸化炭素排出量の削減に直結しないことを示した。
- 2) 副産物の化学組成や調合条件を要因とした回帰式でモルタルの圧縮強度を推定できることを示した。
- 3) 100N/mm² の環境配慮型超高強度コンクリートを試算した場合、普通ポルトランドセメントを用いた場合よりも 40% 以上の CO₂ 排出量を削減できる可能性を示した。
- 4) セメントを高炉スラグ微粉末とシリカフェームで置換した調合が CO₂ 排出量を削減できる最適調合である可能性が高いことを示した。

今後、これらの知見を元に、コンクリート中の組成物などについても検討を行い、複数の副産物を使用したコンクリートの圧縮強度推定式の精度を高めるとともに、副産物を大量使用した環境配慮型超高強度コンクリートの中性化抵抗性や凍結融解抵抗性などの耐久

性試験を行い、環境配慮型超高強度コンクリートの研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 堀孝司, コンクリートセクターの CO₂ 排出の現況と削減戦略, コンクリート工学, pp. 8-15, No. 9, 2010
- 2) V.M. Malhotra: Making Concrete "Greener" with Fly Ash -Supplementary cementing materials can reduce greenhouse gas emissions into the environment, Concrete international, pp. 61-66, May, 1999
- 3) 全洪珠, 嵩英雄: コンクリートの強度および耐久性に及ぼすフライアッシュの種類・置換率の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 602, pp. 1-7, 2006. 4
- 4) 依田彰彦: 20 年間自然暴露した高炉セメントコンクリートの中性化について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系 57 (構造系), pp. 225-226, 1982, 10
- 5) 柳啓, 友沢史紀, 榊田佳寛, 阿部道彦, 田中斉, 和泉意登志: コンクリートの中性化進行予測に関する実験 (その 2) 中性化速度に及ぼす水セメント比, 炭酸ガスの影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 247-248, 1987, 10
- 6) 長瀧重義, 大賀広行, 佐伯竜彦: コンクリートの中性化深さの予測, セメント技術年報, No. 41, pp. 343-346, 1987
- 7) 和田真平, 阿部道彦, 柳啓, 藤田克己: フライアッシュコンクリートの中性化, 水密性および遮塩性に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 121-126, 1998, 6
- 8) 黄光律, 野口貴文, 友沢史紀: フライアッシュを大量混和したコンクリートの中性化特性に及ぼすボゾラン反応の影響, 日本建築学会構造系論文集, No. 531, pp. 7-14, 2000, 5
- 9) 黄光律, 野口貴文, 友沢史紀: フライアッシュを混合したコンクリートの圧縮強度推定式, 日本建築学会構造系論文集, No. 519, pp. 1-6, 1999, 5
- 10) 呉富栄, 榊田佳寛, 中村成春: 高強度コンクリートにおけるフライアッシュの強度寄与効果, 日本建築学会構造系論文集, No. 587, pp. 1-6, 2005, 1
- 11) 坂井悦郎, 井元晴丈, 大門正機: 高炉セメント硬化体の相組成と強度発現性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 135-140, 2004
- 12) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 62 コンクリートの環境負荷評価 (その 2), 2004
- 13) 日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5「鉄筋コンクリート工事」, 付 18. JASS5 M-701:2005 高強度コンクリート用セメントの品質基準, 2009, 2
- 14) 笠井芳夫, 青木敏雄, 根本星男: フライアッシュ (F)-普通ポルトランドセメント (C) ベースの初期強度発現に関する研究 (2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, 材料施工, 防火, 海洋, 情報システム技術, pp. 679-680, 1988, 10
- 15) 日本建築学会: フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, 2007
- 16) 本田悟, 椎葉大和: 各種フライアッシュがコンクリートの諸特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 18, No. 1, pp. 351-356, 1996
- 17) 片山行雄, 西祐宜, 檜垣誠, 太田達見, 西田朗, 名和豊春: フライアッシュコンクリートの品質管理手法および硬化コンクリートの特性 (その 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 535-536, 2009, 8
- 18) JIS A 6206:2008 「コンクリート用高炉スラグ微粉末」
- 19) 李長江, 依田彰彦, 横室隆: セメントペーストの細孔構造および圧縮強度に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響, 日本建築学会構造系論文集, No. 506, pp. 1-6, 1998, 4

(2011 年 7 月 10 日原稿受理, 2011 年 10 月 19 日採用決定)