

# 論文 建設汚泥骨材のコンクリートへの有効利用に関する研究

中津 紀幸<sup>\*1</sup>・八十島 章<sup>\*2</sup>・木山 邦宏<sup>\*3</sup>・荒木 秀夫<sup>\*4</sup>

**要旨**：建設汚泥の固化物をコンクリート用の骨材として活用することを目指し、建設汚泥骨材を粗骨材として混入した建設汚泥骨材コンクリートの力学特性を材料試験および中心圧縮実験により把握した。また、建設汚泥骨材コンクリートの構造部材への適用を目的とし、柱試験体を用いた加力実験を行った。実験より得られた結果として、せん断ひび割れ強度および最大耐力は普通コンクリートにおける既存の計算式により推定できることを示した。

**キーワード**：建設汚泥、骨材、圧縮特性、乾燥収縮、耐震性能

## 1. はじめに

わが国の建設副産物としての建設汚泥は平成14年度800万tで全発生量の10%と決して少なくない量であり、今後増加することが予測されるが、そのリサイクル率は69%とコンクリート塊等に比べあまり高くないのが現状である<sup>1)</sup>。現在、固化した建設汚泥は埋め戻しや裏込め材などの土質材料として再利用されているものの、その種類の多様性や統一的な評価基準が無いことによって再資源化率が低いままとなっている。建設汚泥を固化したものをコンクリート塊などと同様にコンクリート用の材料として活用が可能になることで資源化率の飛躍的な拡大が望むことができ、砕石等の天然資源採取の低減につながると思われる。

筆者らは、建設汚泥の固化物を骨材として利用した建設汚泥骨材コンクリートの材料試験を行い、割裂引張強度が普通コンクリートより若干低下することを示した<sup>2)</sup>。本研究では、建設汚泥骨材の強度をあげ、混入率を変動させた材料試験および中心圧縮実験により力学の性質を検

討する。また、建設汚泥骨材コンクリートの構造部材への適用を目的とし、柱部材実験を行い、既存の計算式による値と比較検討する。

## 2. 建設汚泥骨材コンクリートの力学的性質

### 2.1 骨材強度

建設汚泥骨材は、汚泥、石炭灰、セメント、再生砕石、石灰をそれぞれ51.7%、31.1%、15.6%、1.6%で混入し、ミキサー内で回転運動により造粒固化させた骨材である。骨材の物性値を表-1に示す。また、フォースゲージを用いた圧縮試験結果を図-1に示す。

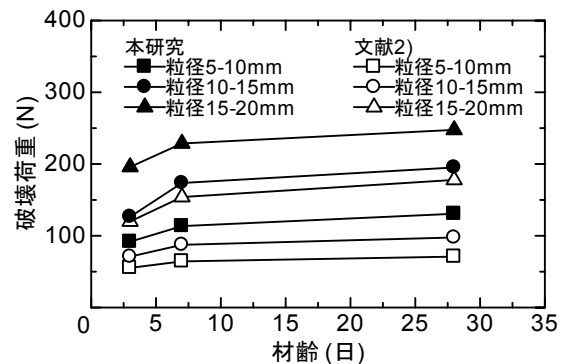


図-1 破壊荷重と材齢の関係

表-1 建設汚泥骨材の物性値

表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	すりへり減量 (%)	微粒分量 (%)	単位容積質量 (kg/l)	実績率 (%)
2.04	1.72	18.6	2.6	2.2	1.07	62.1

\*1 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 大学院生 (正会員)

\*2 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

\*3 (株)熊野技建 研究開発部 汚泥再資源グループリーダー

\*4 広島大学大学院工学研究科社会環境システム専攻 准教授 工博 (正会員)

## 2.2 調合設計

調合計画を表-2に示す。日本建築学会のコンクリート調合設計指針<sup>3)</sup>に基づき、普通コンクリートを設計基準強度 30N/mm<sup>2</sup>、スランプ値 18cm で設計し、その粗骨材を容積比 25, 50, 75, 100% の割合で汚泥骨材に置換して、建設汚泥骨材の混入率を変動因子とした調合計画を行った。水、セメント、細骨材、砕石と汚泥骨材を加えた粗骨材の絶対容積を一定としている。なお、空気量は調整せず、空気量が汚泥骨材に与える影響も検討することとした。

## 2.3 力学特性

### (1) 圧縮強度

材齢 28 日の各養生条件における φ100×200mm シリンダーの圧縮強度と汚泥骨材混入率の関係を図-2に示す。図中には、3本のテストピースの強度およびその平均値を示している。ばらつきが見られるが、汚泥骨材混入率が大きくなるに伴い、圧縮強度が低下していることが確認できる。また、圧縮強度と混入率の関係において、養生条件による違いはほとんど見られなかった。普通コンクリートおよび混入率 25% の圧縮強度は目標圧縮強度に達しているが、混入率 100% の圧縮強度は普通コンクリートの 7割程度になっている。また、圧縮強度と材齢の関係を図-3に示す。混入率による違いは見られず、ほぼ同様に強度増大していることが確認できる。

### (2) 弾性係数

材齢 28 日の封緘養生における φ100×200mm シリンダーの弾性係数と圧縮強度の関係を図-4に示す。同図中の実線は日本建築学会の RC 規

準<sup>4)</sup>に示される (1) 式の計算値である。若干ばらつきはあるが、(1) 式による計算値と概ね適合していることが確認でき、建設汚泥骨材コンクリートの弾性係数は既存の計算式により評価できることがうかがえる。

$$E = 3.35 \times 10^4 \times \left( \frac{\gamma}{24} \right)^2 \times \left( \frac{\sigma_B}{60} \right)^{1/3} \quad (1)$$

ここで、

$E$  : 弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$\gamma$  : 気乾単位容積重量 (kN/mm<sup>3</sup>)

$\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

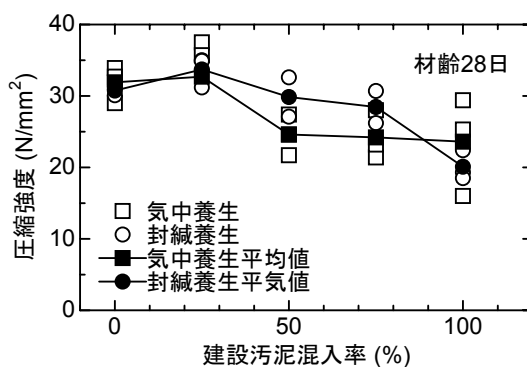


図-2 圧縮強度-混入率関係

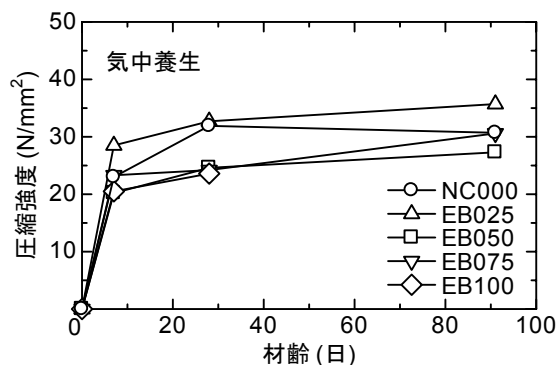


図-3 圧縮強度-材齢関係

表-2 調合計画

呼び名	建設汚泥骨材混入率 (%)	水セメント比 (%)	水 (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積 (l/m <sup>3</sup> )				単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				セメント	砂	砕石	汚泥骨材	セメント	砂	砕石	汚泥骨材
NC000	0	51.6	185	114	288	368	0	358	750	987	0
EB025	25					277	92			742	188
EB050	50					184	183			494	367
EB075	75					92	277			247	565
EB100	100					0	369			0	753

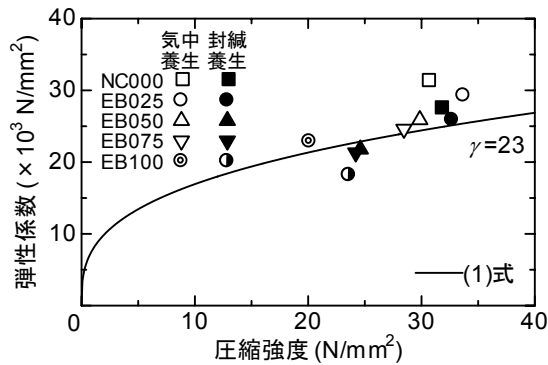


図-4 弾性係数-圧縮強度関係

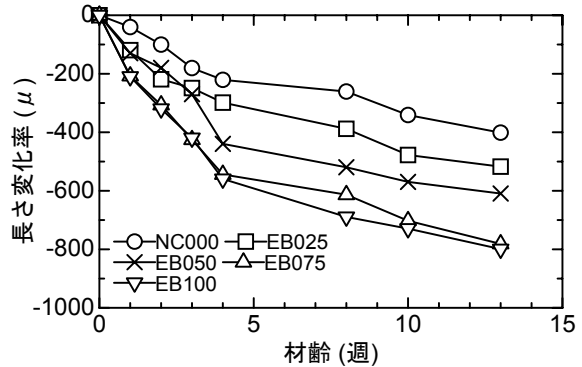


図-6 長さ変化率-材齢関係

### (3) 割裂引張強度

材齢 28 日における引張強度と圧縮強度の関係を図-5 に示す。図中の曲線は、文献 5) における 15~140N/mm<sup>2</sup> クラスの圧縮強度を対象とした (2) 式による計算値を示している。いずれの混入率においても、実験値と計算値は良い対応を示しており、建設汚泥骨材の強度上昇効果が現れている。

$$\sigma_t = 4 \cdot \left( \frac{\sigma_B}{60} \right)^{2/3} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_t$  : 割裂引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_B$  : 圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

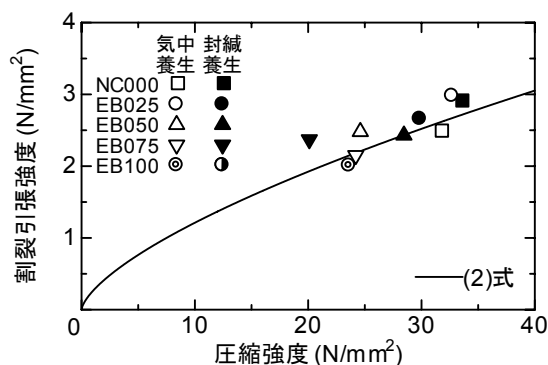


図-5 割裂引張強度-圧縮強度関係

### (4) 乾燥収縮

100×100×400mm の角柱試験体を用いた乾燥収縮試験の結果である長さ変化率と材齢の関係を図-6 に示す。建設汚泥骨材の混入率が大きくなるにつれて、乾燥収縮量が増大していることが確認できる。ただし、混入率 75%と 100%はほぼ同様な傾向を示している。

## 3. 中心圧縮実験

### 3.1 試験体

構造部材の強度や変形能がコンクリートに対する横補強筋の拘束効果で大きく変化し、特に高軸力の作用する柱部材ではその特性が問題となる。そこで、横拘束された建設汚泥骨材コンクリートの圧縮特性を把握するために中心圧縮実験を行った。試験体は全部で 8 体であり、断面 150×150mm、高さ 300mm で、上下 50mm 区間は横補強筋を多量に配筋し、中央の高さ 200mm を試験区間とした。変動因子は、建設汚泥骨材の混入率 (50%, 100%) および横補強筋比 (0.0~0.9%) である。試験体一覧を表-3 に、試験体の形状および配筋例を図-7 に示す。

試験体に使用した鉄筋の引張試験結果を表-4 に、加力時材齢のコンクリート材料試験結果を表-5 に示す。なお、横補強筋を固定するためにアルミニウムφ5の主筋が 4 本入っているが、圧縮強度および拘束効果にほとんど影響を与えないと思われるため、無視することとした。

表-3 試験体一覧

試験体名	コンクリート	横補強	
		配筋	$p_w$ (%)
EB050-00	建設汚泥骨材の混入率 50%	—	0.0
EB050-03		φ 4@56	0.3
EB050-06		φ 5@44	0.6
EB050-09		φ 5@29	0.9
EB100-00	建設汚泥骨材の混入率 100%	—	0.0
EB100-03		φ 4@56	0.3
EB100-06		φ 5@44	0.6
EB100-09		φ 5@29	0.9

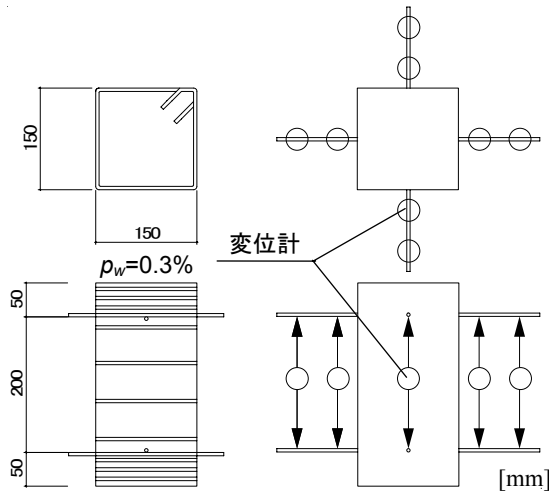


図-7 試験体形状および配筋例

表-4 鉄筋の引張試験結果

鉄筋種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (GPa)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
φ4	600.2*	192.2	791.5	20.4
φ5	689.7*	180.6	885.4	13.4

\*0.2%オフセット耐力

表-5 コンクリートの材料試験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (GPa)
EB050 シリーズ	28.2	2.63	20.4
EB100 シリーズ	23.8	2.32	17.0

### 3.2 加力・計測方法

加力は、1MN 圧縮試験機を用いて、単調一方向載荷で行った。計測項目は、荷重および試験区間の変位であり、中央部に埋め込んだボルトに取り付けた変位計により測定した。

### 3.3 実験結果および検討

軸応力-ひずみ関係を図-8 に示す。混入率 50%および 100%とともに、横補強筋比が大きくなるにつれて、最大軸応力が増大し、最大応力以降の圧縮軟化域において、応力低下が緩やかになっていることが確認できる。テストピースの圧縮強度 $\sigma_B$ で基準化した最大軸応力 $\sigma_m$ と横補強筋比の関係を図-9 に示す。また、試験体形状は異なるが、横補強筋による横拘束効果を検討するため、図中には文献 6)の (3) 式, (4) 式による計算値を示し、実験結果を最小二乗法によ

り回帰計算した直線も示している。なお、(3) 式は普通コンクリートに対する式であり、(4) 式は高強度人工軽量骨材コンクリートに対する式である。混入率 50%の EB050 は、混入率 100%の EB100 よりも横補強筋比による強度増加率が大きいことが確認できる。また、試験体形状の違いはあるが、横補強筋比の変動による拘束効果のみを比較すると EB050 の回帰直線の傾きは (3) 式の傾きより 20%以上大きく、EB100 の回帰直線の傾きは (4) 式の傾きと同じである。

$$\sigma_m / \sigma_B = 0.77 + 0.37 \cdot p_w \quad (3)$$

$$\sigma_m / \sigma_B = 0.74 + 0.19 \cdot p_w \quad (4)$$

ここで、 $\sigma_m$  : 最大軸応力 (N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_B$  : 材料試験の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)、 $p_w$  : 横補強筋比 (%)

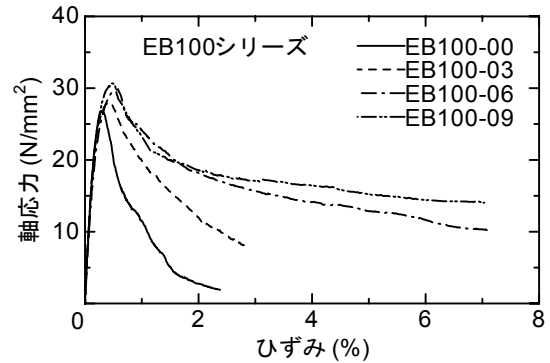
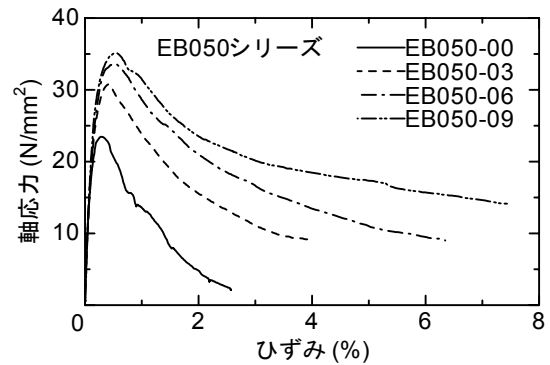


図-8 応力-ひずみ関係

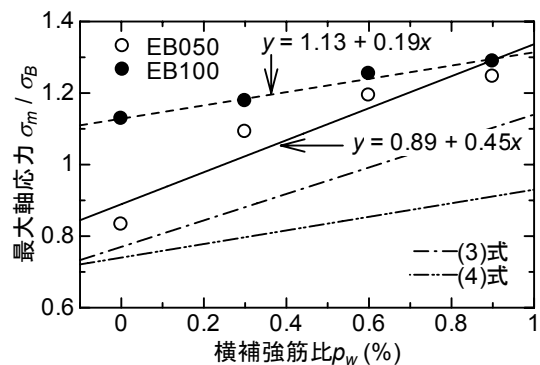


図-9 最大軸応力-横補強筋比関係

#### 4. 柱部材実験

##### 4.1 試験体

建設汚泥骨材コンクリートを構造部材に有効利用するために、柱試験体を作製し、加力実験を行い、曲げせん断性状を検討した。試験体の諸元を表-6に、試験体形状および配筋を図-10に示す。試験体は断面  $300 \times 300 \text{mm}$ 、せん断スパン  $800 \text{mm}$  でせん断スパン比  $2.67$  である。主筋にSD390の異形鉄筋を用い、配筋を16-D19とした。コンクリートは目標圧縮強度  $30 \text{N/mm}^2$  で、混入率  $100\%$  の建設汚泥骨材コンクリートである。使用した鉄筋の引張試験結果を表-7に示す。なお、使用したコンクリートは前節の表-5におけるEB100シリーズと同じである。

表-6 試験体の諸元

断面 $b \times D$ (mm)	コンクリート 強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	配筋		軸力比
		主筋	帯筋	
300 $\times$ 300	30	16-D19	2-D6@100	0.1

##### 4.2 加力・計測方法

加力は一定軸力 ( $21.4 \text{kN}$ ) を保ちながら、水平ジャッキによる正負交番繰り返し载荷を行った。加力サイクルは、部材角  $1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/50$  の正負2回繰り返しとした。計測項目は、荷重、全体変形、主筋および帯筋の主な位置のひずみである。

##### 4.3 実験結果および検討

###### (1) 破壊性状および荷重-変形関係

試験体の最大耐力時および終局時の破壊状況を図-11に、荷重-変形関係を図-12に示す。試験体は部材角  $1/800 \text{rad}$  で曲げひび割れが発生し、部材角  $1/400 \text{rad}$  で曲げせん断ひび割れが発生した。部材角  $1/200 \text{rad}$  の1回目でせん断ひび割れが発生し、その後、せん断ひび割れが進展すると共に帯筋が降伏ひずみに達し、最大耐力後、徐々に耐力低下を起こして最終破壊に至った。なお、主筋の曲げ降伏は確認されなかった。

表-7 鉄筋の引張試験結果

鉄筋 種類	降伏強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング率 ( $\text{N/mm}^2$ )
D6	328.0*	497.7	160.9
D19	414.3	587.9	193.7

\*0.2%オフセット耐力

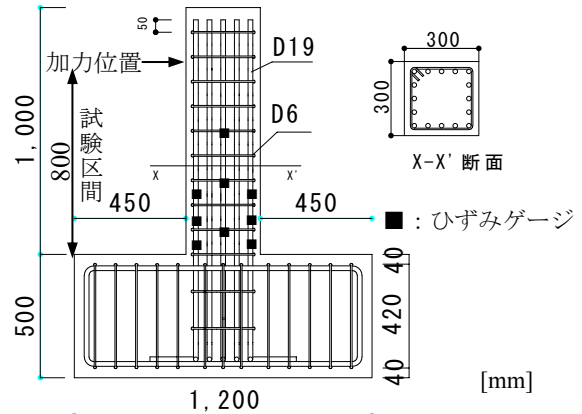


図-10 試験体配筋図

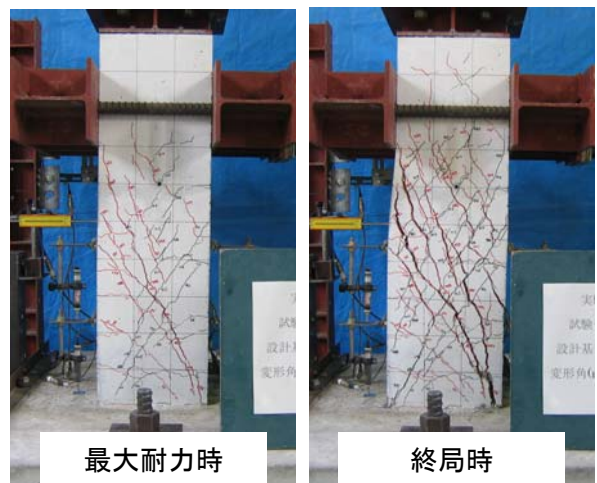


図-11 破壊状況

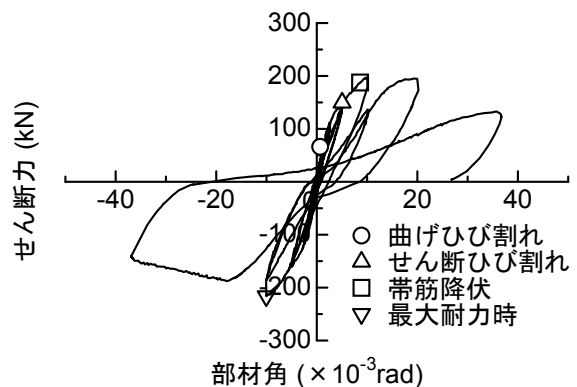


図-12 せん断力-部材角関係

表-8 実験結果一覧

曲げひび割れ強度 (kN)	せん断ひび割れ強度 (kN)	最大耐力 (kN)	曲げひび割れ強度計算値 <sup>7)</sup> (kN)	せん断ひび割れ強度計算値 <sup>8)</sup> (kN)	せん断強度計算値 <sup>8)</sup> (kN)
66.2	149.5	216.3	68.2	165.5	212.0

(2) 最大荷重とひび割れ強度

表-8 に実験結果一覧を示す。曲げひび割れ強度計算値は、日本建築学会の高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工により算出し、せん断ひび割れ強度計算値およびせん断強度計算値は、日本建築学会の靱性保証型耐震設計指針式を用いて算出した。せん断ひび割れ強度は計算値と比較して 10%ほど小さく、せん断耐力は計算値よりも 2%程度大きくなり、普通コンクリートにおける既存の評価式によりひび割れ強度および部材耐力を推定できると思われる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 汚泥骨材混入率が大きくなるに伴い、圧縮強度が低下する。引張割裂強度は、いずれの混入率においても、実験値と計算値は良い対応を示した。
- 2) 乾燥収縮では汚泥骨材混入率の増加に伴い長さ変化率が增大する。
- 3) 中心圧縮試験では横補強筋量が増加するに伴い最大応力が増加する。また、汚泥骨材を 50% 置換したコンクリートを使用したほうが最大応力は高くなることわかる。加えて、横補強筋による負担圧縮応力の増加具合も大きくなる傾向があると言える。EB050 では普通コンクリートと横補強の拘束効果による軸強度の上昇の度合いが大差ない。
- 4) 柱部材実験では混入率の調整などにより、普通コンクリートと同等程度の強度が確保できるのではないかと考えられ、普通コンクリートにおける既存の評価式により推定できると思われる。

謝辞

本研究の一部は旭硝子財団およびNPO 法人広島循環型社会推進機構からの援助を受けて実施したものである。また、実験にあたっては広島大学耐震工学研究室大学院生および学生諸氏の協力を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 平成 14 年度建設副産物実態調査結果, 国土交通省総合政策局
- 2) 横田尚也, 椛山健二, 荒木秀夫, 木山邦宏: 建設汚泥骨材を用いたコンクリートの材料特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.1201~1206, 2005.6
- 3) 日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, 丸善, 1999.2
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (許容応力度設計法), 丸善, 1999.11
- 5) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学的特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, No.472, pp.11~16, 1995.6
- 6) 金久保利之, 園部泰寿: 高強度軽量コンクリートを用いた柱部材の中心圧縮性状と断面解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C 構造 II, pp.533~534, 1992.8
- 7) 日本建築学会: 高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた建築物の設計と施工, 丸善, 1992.12
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 丸善, 1997.7