

# 再生骨材コンクリートの合成構造への適用に関する研究

小松 博 (日大生産工・准教授)

藤本 利昭 (安藤建設(株)・上席研究員)

櫻田 智之 (日大生産工・教授)

## 1. はじめに

近年、再生骨材の普及を促進するため、再生骨材の JIS が制定された<sup>1),2),3)</sup>。この JIS 化された再生骨材のうち、吸水率が 5%以下の再生骨材 M はコンクリート塊を破砕のみで製造した骨材であり、付着するモルタル分や微粉末の影響で吸水率が高く、乾燥収縮が大きいため、これを用いた再生コンクリートでは乾燥収縮ひび割れが発生しやすい。このため JIS A 5022<sup>2)</sup> (再生骨材 M を用いたコンクリート) では、乾燥収縮を受けにくい地下構造物や、コンクリート充填鋼管 (以下、CFT) のように継続的に乾燥を受けないよう表面が保護されている部材への適用が推奨されている。

一方、日本を代表する合成構造である鉄骨鉄筋コンクリート (以下、SRC) 構造は、耐震性能に優れた構造として大規模建築物や超高層建築物に適用されてきた。しかしながら、近年では設計および施工の複雑さ等によるコスト高、工期の長期化の問題により、建設シェアが減少傾向を辿っている。このような背景から、SRC 構造の耐震性を生かし、より施工性に優れた構造システムを実現するため、SRC 構造の鉄筋を省略した鉄骨コンクリート (以下、SC) 構造に関する研究が盛んに行われるようになった。これらの研究では、SC 部材の被覆コンクリートの圧縮破壊防止ならびに変形能力向上を目的として、被覆コンクリートに繊維補強コンクリートを用いた CES (Concrete encased steel) 柱に関する研究<sup>4)</sup>や、型枠兼用の薄肉鋼管でコンクリートを補強した SC 柱の研究<sup>5)</sup>等が行われている。

本研究では、再生骨材 M を用いたコンクリート (以下、再生コンクリート) の有効利用方法の一つとして、乾燥収縮等の耐久性上の問題点とコンクリートの圧壊等の構造的な問題点の両者を解決できる構造として、薄肉鋼板によりコンクリート外周を補強した SC 柱、ならびに CFT 柱部材に着目し、柱部材としての基本性能を表す圧縮性状について、普通コンクリートや繊維補強コンクリートとの比較を基に適用性について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体の一覧を表 1 に、代表的な試験体の断面形状を図 1 に示す。試験体の種類は、H 形鋼、交差型 H 形鋼を内蔵した SC 柱、角形および円形鋼管を用いた CFT 柱とした。

SC 柱試験体は、断面形状を  $b \times D = 150 \times 150 \text{mm}$  の正方形断面とし、H 形鋼 (H-100 $\times$ 100 $\times$ 6 $\times$ 8) を再生コンクリートで被覆し、更に耐久性・構造性能向上のため薄肉鋼板 (板厚  $t=2.3 \text{mm}$ ) で補強した試験体を標準として、薄肉鋼板の有無、内蔵鉄骨の形状 (H 形鋼、交差型 H 形鋼) および有無、被覆コンクリートの有無およびコンクリートの種類 (再生、普通、繊維補強コンクリート) を実験変数とした 15 体を計画した。また CFT 柱試験体も同様に、再生コンクリートを充填した円形および角形鋼管を標準試験体として、コンクリートの種類 (再生、普通コンクリート) および有無を実験変数とした 6 体を計画した。なお試験体の高さは 450mm とし、コンクリートの打設は試験体上

---

Study on Application of Recycled Aggregate Concretes to Composite Structures

Hiroshi KOMATSU, Toshiaki FUJIMOTO and Tomoyuki SAKURADA

端より縦打ちで行った。

表 1 試験体一覧

試験体名称	断面構成		
	内蔵鉄骨	充填部コンクリート種類	外周部
SSC-R-S	H-100*100*6*8	再生	□-150*2.3
SSC-R-0		—	—
SSC-0-0		—	—
SCC-R-S	2H-100*50*5*7	再生	□-150*2.3
SCC-R-0		—	—
SCC-0-0		—	—
0-R-S	—	再生	□-150*2.3
0-R-0		—	—
0-P-S		普通	□-150*2.3
0-P-0	—	—	—
SSC-F-0	H-100*100*6*8	繊維補強	—
SCC-F-0	2H-100*50*5*7		
0-F-0	—		
CFST-R	—	再生	□-150*4.5
CFST-P		普通	
CFST-0		—	
CFCT-R	—	再生	○-165.2*4.5
CFCT-P		普通	
CFCT-0		—	

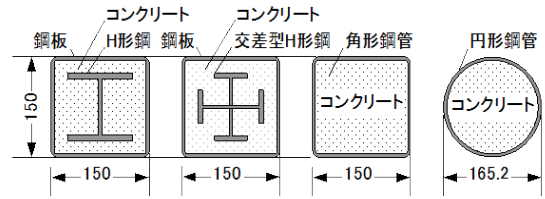
## 2.2 使用材料

使用したコンクリートの調合表を表 2 に、圧縮試験結果を表 3 に示す。各コンクリートの設計基準強度は、再生骨材 M を用いたコンクリートの呼び強度の上限値である 36N/mm<sup>2</sup> を目標とした。繊維補強コンクリートは、普通コンクリートにビニロンファイバー(RF4000)を体積混入率で 1.0%混入して製作した。コンクリート強度用供試体は 100×200 とし、封かん養生とした。表 4 に鋼材の材料試験結果を示す。内蔵鉄骨および薄肉鋼板には SS400 材を、角形鋼管は STKR400、円形鋼管は STK400 を用いた。鋼材の引張試験片は 5 号および 12B 号試験片を用い、円形および角形鋼管の降伏強度は 0.2% オフセット耐力とした。

## 2.3 加力および計測方法

加力は図 2 に示すように、試験体上下の拘束

条件を固定として実施した。载荷は 5000kN 試験機による単調载荷とし、試験体の平均軸方向



a)SC 柱 b)角形 CFT c)円形 CFT  
図 1 代表的な試験体の断面形状

表 2 コンクリートの調合表

種類	W/C (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
再生コンクリート	53.7	170	317	天然砂	再生砕石
				496	435
普通コンクリート	52	185	356	山砂	砕石
				617	156

表 3 コンクリートの材料試験結果

種類	$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )
再生コンクリート	24.8	30.7
普通コンクリート	32.9	37.8
繊維補強コンクリート	30.3	34.1

$E_c$ :ヤング係数,  $\sigma_B$ :圧縮強度

表 4 鋼材の材料試験結果

種類	$t$ (mm)	$E_s$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\epsilon$ (%)	
□-150*2.3	2.29	198	265	406	27.4	
H-100*100*6*8	ウェブ	5.52	191	329	459	24.2
	フランジ	7.43	195	325	462	27.1
H-100*50*5*7	ウェブ	4.79	190	323	438	26.3
	フランジ	6.23	195	307	429	27.7
□-150*4.5	4.21	187	387	467	26.3	
○-165.2*4.5	4.27	196	390	466	24.6	

$t$ :板厚,  $E_s$ :ヤング係数,  $\sigma_y$ :降伏強度,  $\sigma_t$ :引張強度,  $\epsilon$ :伸び率

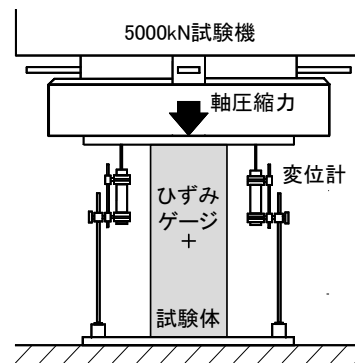


図 2 実験方法

ひずみ $\epsilon$ (=軸方向変位/試験体高さ)が5%に達するまで行うことを原則とした。なお試験体のコンクリート打設面は、セメントペーストを用いて平滑にして実施した。測定は、図2に示すように試験体2カ所に変位計を取り付け、上下加力用プレート間の平均変位を測定し、薄肉鋼板ならびに鋼管には、2軸ひずみゲージを貼付し、軸方向および周方向ひずみを測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 鉄骨柱試験体の圧縮特性

鉄骨柱試験体の圧縮試験結果を図3および表5に示す。表5には、材料試験による降伏強度 $\sigma_y$ を用いた降伏耐力 $N_y$ 、圧縮試験結果から0.2%オフセット法により求めた降伏強度 $\sigma_{yc}$ および降伏耐力 $N_{yc}$ を示している。いずれの試験体も、最大耐力は局部座屈により決定した。また、H形鋼と交差型H形鋼では引張試験に比べ圧縮試験の降伏耐力が、角形および円形鋼管では圧縮試験に比べ引張試験の降伏耐力が高い値を示した。これは、鋼管の冷間成形に伴う塑性加工が影響しているものと考えられる。

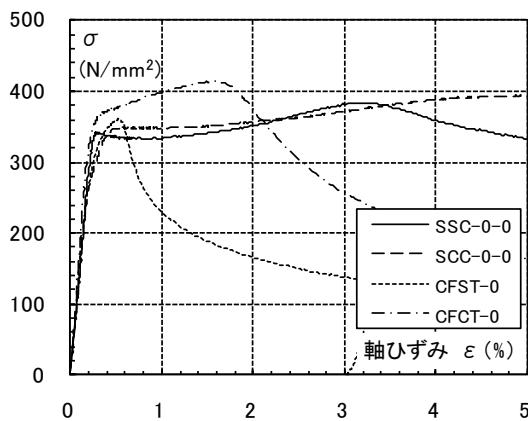


図3 鉄骨試験体の実験結果

表5 鉄骨柱試験体の耐力一覧

	$N_y$ (kN)	$N_{yc}$ (kN)	$\sigma_{yc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$N_{exp}$ (kN)	$N_{exp}/N_y$	$N_{exp}/N_{yc}$
SSC-0-0	655	678	337	772	1.18	1.14
SCC-0-0	680	712	328	855	1.26	1.20
CFST-0	934	846	350	871	0.93	1.03
CFCT-0	842	806	373	892	1.06	1.11

$N_y$ : 降伏耐力(= $\sigma_y \cdot A_s$ ,  $A_s$ : 鋼材の断面積),  $\sigma_{yc}$ ,  $N_{yc}$ : 圧縮試験から0.2%オフセット法により求めた降伏強度および降伏耐力,  $N_{exp}$ : 最大耐力

#### 3.2 コンクリート試験体の圧縮特性

コンクリート柱試験体の圧縮試験結果を表6に示す。再生コンクリート、普通コンクリートおよび繊維補強コンクリート試験体は、いずれも最大耐力を示した後に急激な破壊に伴い耐力が低下し、実験を終了した。正方形断面の柱形試験体の圧縮試験では、シリンダーを用いた材料試験による圧縮強度に対し、断面の形状や寸法の影響により強度が低下すると言われているが、本実験では最大耐力から求めたコンクリートの圧縮強度は、材料試験による圧縮強度とほぼ同等であった。よって次節以降の耐力の検討では、コンクリートの圧縮強度は、材料試験結果の値 $\sigma_B$ を用いることとした。

表6 コンクリート試験体の耐力一覧

	$N_{exp}$ (kN)	$\sigma_{exp}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_{exp}/\sigma_B$
00-R-0	691	31.6	30.7	1.03
00-P-0	851	36.5	37.8	0.97
00-F-0	776	36.5	34.1	1.07

$\sigma_{exp}$ : 圧縮強度(= $N_{exp}/A_c$ ,  $A_c$ : コンクリート断面積)

#### 3.3 SC柱試験体の圧縮特性

内蔵鉄骨と被覆コンクリートのみで構成されるSC柱試験体の圧縮試験結果を図4および表7に示す。なお図4の縦軸は、式(1)による内蔵鉄骨と被覆コンクリートによる単純累加耐力 $N_0$ で基準化して示している。

$$N_0 = N_s + N_c = \sigma_y \cdot A_s + \sigma_B \cdot A_c \quad \dots(1)$$

ここで、 $N_s$ ,  $N_c$ : 鉄骨およびコンクリート部分の終局圧縮耐力,  $A_s$ ,  $A_c$ : 鉄骨およびコンクリート部分の断面積である。

なお表7には、日本建築学会「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(以下、SRC規準)」<sup>6)</sup>に示された圧縮耐力 $N_u$ も併せて示している。

$$N_u = N_s + N_c = \sigma_y \cdot A_s + c r_u \cdot \sigma_B \cdot A \quad \dots(2)$$

ここで、 $c r_u$ : コンクリート強度の低減係数(=0.85-2.5 $s p_c$ ,  $s p_c = s A/A$ ),  $A$ : 合成部材の全断

面積である。

再生コンクリートおよび普通コンクリートを用いた SC 柱試験体は、最大耐力を示した後、かぶりコンクリートの圧壊と共に耐力低下を生じ、かぶりコンクリートの剥落を伴いながらほぼ一定の荷重を維持していた。一方繊維補強コンクリートを用いた SC 柱試験体では、耐力低下と共にひび割れが発生したものの、実験終了までコンクリートの剥落は認められなかった。

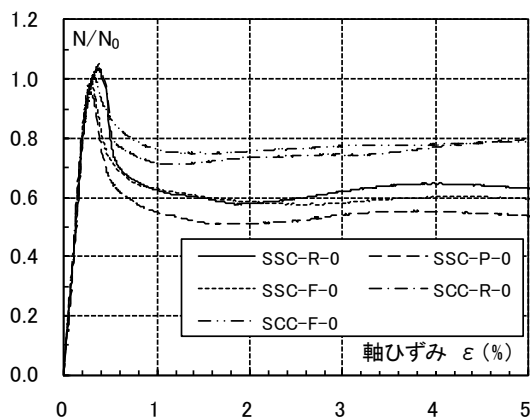


図 4 SC 柱試験体

表 7 SC 柱試験体の耐力一覧(単位:kN)

	$N_c$	$N_s$	$N_0$	$N_u$	$N_{exp}$	$N_{exp}/N_0$	$N_{exp}/N_u$
SSC-R-0	629	655	1284	1181	1328	1.03	1.12
SSC-P-0	774	655	1430	1302	1362	0.95	1.05
SSC-F-0	699	655	1354	1239	1336	0.99	1.08
SCC-R-0	624	680	1304	1201	1373	1.05	1.14
SCC-F-0	693	680	1373	1258	1388	1.01	1.10

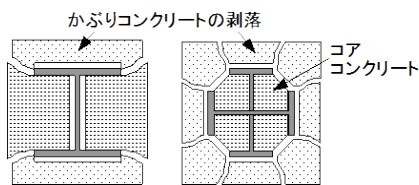


図 5 SC 柱試験体の実験結果

各試験体の最大耐力は、式(1)による単純累加耐力  $N_0$  の 0.95~1.05 倍、SRC 規準の圧縮耐力  $N_u$  の 1.05~1.14 倍で、圧縮耐力へのコンクリートの種類および鉄骨形状の違いによる影響は僅かであった。一方、変形性状に関しては、コンクリートの違いによる差異は殆ど認められな

いものの、内蔵鉄骨の形状により最大耐力以降に保持する荷重が異なる。内蔵鉄骨が H 形鋼の試験体は、鉄骨の負担軸力  $N_s(=0.46\sim0.51N_0)$  を若干上回る荷重を維持しているのに対し、交差型 H 形鋼とした試験体では、 $N_s(=0.50\sim0.52N_0)$  を大きく上回る荷重を維持している。

破壊形状を観察したところ、図 5 に示すように H 形鋼の試験体では、2 枚のフランジに囲まれたコンクリートは剥落はしないものの、ウェブの局部座屈により外側にはらみ出し、圧縮力が負担できなくなったものと推察される。但しフランジの座屈補剛材としての効果は認められることから、大変形に至るまで H 形鋼の耐力を保持できたものと考えられる。一方交差型 H 形鋼の試験体では、4 枚のフランジに囲まれたコアコンクリート (図 5 参照) は、実験終了までフランジにより拘束されており、はらみ出しおよび剥落は認められない。最大耐力以降に保持した荷重は、内蔵鉄骨とフランジに囲まれた 8 角形のコアコンクリート部分と内蔵鉄骨の累加耐力 ( $=0.65\sim0.67N_0$ ) を上回っていることから、コアコンクリートが圧縮力を負担し、結果的に H 形鋼に比べて、変形性能 (荷重保持能力) が高くなったものと判断される。

### 3.4 薄肉鋼板で拘束した SC 柱試験体の圧縮特性

薄肉鋼板によるコンクリートの拘束効果を確認するため、コンクリートを薄肉鋼板で拘束した柱試験体の圧縮試験結果を図 6 および表 8 に示す。なお図 6 の縦軸は、薄肉鋼板とコンクリートの単純累加耐力  $N_0$  で基準化している。薄肉鋼板によりコンクリートを拘束した試験体の最大耐力は単純累加耐力の 0.96~0.97 倍の値を示している。最大耐力後は鋼板が薄いため圧縮力による軸方向力と内部コンクリートの圧縮破壊による横方向力により局部座屈が生じ耐力低下を生じるが、耐力低下後も再生コンクリート試験体がコンクリートの圧縮耐力  $N_c$  の約 0.9 倍、普通コンクリート試験体が  $N_c$  の約 0.8 倍の荷重を維持し、拘束の無いコンクリートに比べ

変形能力（荷重保持能力）が著しく向上することがわかる。

次に薄肉鋼板で拘束した SC 柱試験体の圧縮試験結果を図 7 および表 9 に示す。なお図 7 の縦軸は、薄肉鋼板  $N_{so}$ 、内蔵鉄骨  $N_{si}$  およびコン

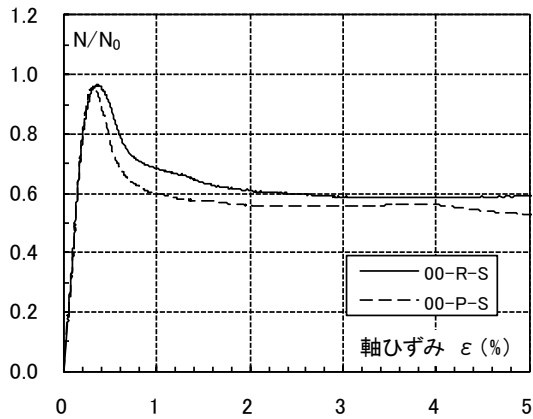


図 6 鋼板で拘束したコンクリート試験体

表 8 鋼板で拘束したコンクリート試験体の耐力一覧(単位:kN)

	$N_c$	$N_s$	$N_0$	$N_{exp}$	$N_{exp}/N_c$	$N_{exp}/N_0$
00-R-S	649	355	1005	970	1.49	0.97
00-P-S	799	355	1155	1108	1.39	0.96

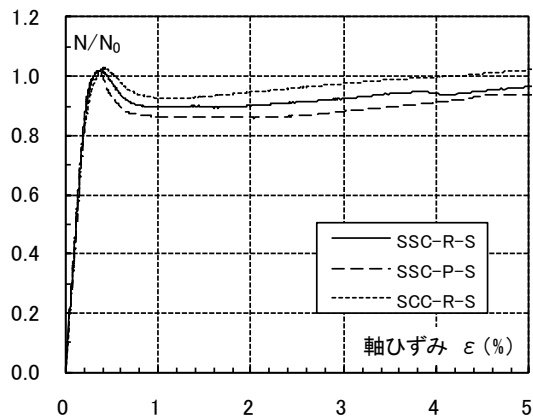


図 7 鋼板で拘束した SC 柱試験体

表 9 鋼板で拘束した SC 柱試験体の耐力一覧(単位:kN)

	$N_c$	$N_{si}$	$N_{so}$	$N_0$	$N_u$	$N_{exp}$	$N_{exp}/N_0$	$N_{exp}/N_u$
SSC-R-S	587	655	315	1558	1419	1587	1.02	1.12
SSC-P-S	723	655	315	1694	1523	1727	1.02	1.13
SCC-P-S	582	680	315	1578	1439	1621	1.03	1.13

$N_{si}$  : 内蔵鉄骨の軸耐力,  $N_{so}$  : 薄肉鋼板の軸耐力  
 $N_0 = N_c + N_{si} + N_{so}$

クリート  $N_c$  による単純累加耐力  $N_0 = N_{so} + N_{si} + N_c$  で基準化した。

薄肉鋼板で補強した SC 柱試験体は、いずれの試験体も最大耐力は薄肉鋼板の軸耐力も考慮した単純累加耐力に達し、その後若干耐力低下を生じるが軸ひずみ 1% を越えるあたりから徐々に耐力が再上昇し、薄肉鋼板による補強効果は顕著である。

中でも交差型 H 形鋼を内蔵した再生コンクリート試験体の耐力低下が最も小さく、H 形鋼を内蔵した試験体では、コンクリートの違いによる差異は僅かで、再生コンクリートを用いた試験体が、普通コンクリートを用いた試験体に比べ若干変形性能が優れていた。

### 3.5 CFT 柱試験体の圧縮特性

CFT 柱試験体の圧縮試験結果を図 8 および表 10 に示す。図 8 の縦軸も SC 柱試験体と同様に式(1)により基準化している。

なお表 10 には、日本建築学会「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針(以下、CFT 指針)」に示された圧縮耐力  $N_u$  も併せて示している。

$$N_u = (1 + \xi)N_s + N_c = (1 + \xi)\sigma_y \cdot A_s + \sigma_B \cdot A_c \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $\xi=0$ (角形断面)、 $\xi=0.27$ (円形断面)である。

角形断面 CFT 柱試験体の最大耐力は単純累

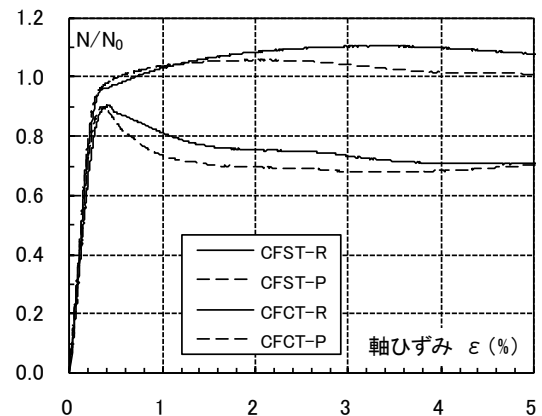


図 8 CFT 柱試験体

表 10 CFT 柱試験体の耐力一覧(単位:kN)

	$N_c$	$N_s$	$N_0$	$N_u$	$N_{exp}$	$N_{exp}/N_0$	$N_{exp}/N_u$
CFST-R	615	934	1549	1549	1400	0.90	0.90
CFST-P	757	934	1691	1691	1521	0.90	0.90
CFCT-R	592	842	1434	1662	1586	1.11	0.95
CFCT-P	729	842	1571	1798	1662	1.06	0.92

加耐力  $N_0(=N_u)$  の 0.90 倍と、計算耐力を若干下回ったが、最大耐力後の耐力低下は、中空の角形鋼管試験体に比べ僅かであり、計算耐力の約 0.7 倍の荷重を維持していた。これは鋼管によるコンクリートの拘束効果とコンクリートによる鋼管の座屈補剛効果といった両者の相互作用によるものである。また、コンクリートの違いによる差異は僅かで、ほぼ同様の性能であった。

円形断面 CFT 柱試験体は、2 体とも単純累加耐力  $N_0$  近傍の荷重に達した後、緩やかに耐力上昇を続け、最大耐力は  $N_0$  の 1.06~1.11 倍、CFT 指針の圧縮耐力  $N_u$  の 0.92~0.95 倍であった。最大耐力以降の耐力低下も緩やかであり、今回行った実験の中で最も安定した挙動を示していた。角形断面 CFT 柱試験体との比較からもわかるように、円形断面のほうがコンクリートと鋼管の相互作用効果が大きいといえ、コンクリートの違いによる差異はほとんど認められなかった。

#### 4. まとめ

再生コンクリートの合成構造への適用性について、中心圧縮実験を基に検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 再生コンクリートを用いた SC 柱の圧縮性状は、普通コンクリートおよび繊維補強コンクリートを用いた SC 柱と同等か、むしろ高い耐荷能力、変形能力を示した。但し本実験ではコンクリート強度が若干異なっていたことを考慮すれば、ほぼ同等の性能と評価できる。
- 再生コンクリートの耐久性上の問題から、SC 柱のコンクリート表面を鋼板で被覆することにより、更に耐荷能力、変形能力は向上し、合成構造部材として充分適用可能である

ものと判断される。

- 再生コンクリートを用いた CFT 柱の圧縮性状は、普通コンクリートと同等であり、JIS で推奨される CFT 柱への再生コンクリートの適用に関しては、構造的には問題ないものと考えられる。

本研究では、再生コンクリートを合成部材、特に圧縮部材に適用することを目的に検討を行った。実際の建築物の柱材に適用することを考えれば、今後は圧縮性能だけでなく、曲げおよびせん断性能についても明らかにする必要がある。今後、柱材としての構造性能を検証することで、再生コンクリートの適用範囲が拡大されるよう研究を継続する予定である。

#### 謝辞

本研究は平成 20 年度「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」の一環として行ったものである。試験体作成に際し、東京建設廃材処理協同組合 葛西再生コンクリート工場の細野知之氏には再生コンクリートの手配で御協力をいただきました。また、株式会社フローリックの方々には試し練りや調合に関して多大なご協力をいただきました。ここに記して深謝いたします。

#### 参考文献

- 日本工業規格：JIS A 5021(コンクリート用再生骨材 H)，2005.3.
- 日本工業規格：JIS A 5022(再生骨材 M を用いたコンクリート)，2007.3.
- 日本工業規格：JIS A 5023(再生骨材 L を用いたコンクリート)，2006.3.
- 倉本洋：今伝えたいトピックス CES 合成構造システム，建築雑誌，Vol.120，No.1535，pp.34-35，2005.7.
- 河本裕行，堺純一：横補強鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱材の弾塑性変形性状に関する研究，日本建築学会大会梗概集，2005 年，C-1 分冊，p.1053
- 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2001
- 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008