

再生コンクリートの合成構造への適用に関する研究

－実大試験体の中心圧縮性状－

小松 博（日大生産工・教授）

藤本 利昭（安藤建設株・主管研究員）

櫻田 智之（日大生産工・教授）

三橋 博巳（日大理工・教授）

1. はじめに

前報では、縮小試験体を用いた中心圧縮実験を行い、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)による鉄骨コンクリート(以下、SC)柱の圧縮性能が、普通コンクリートを用いた SC 柱と同等であることが明らかとなった。

しかしながら、縮小試験体ではコンクリートに用いた粗骨材の最大径が異なることや、実構造物へ適用する場合には、施工性やコストの観点から、外殻部に用いる鋼管は、出来るだけ板厚の薄い材料とするのが合理的である。

そこで本報では、実大の SC 柱を用いた中心圧縮実験を行うことで、再生コンクリートの合成構造への適用性を検討した。

なると想定されることである。なお、断面を構成する内蔵鉄骨と薄肉鋼管の圧縮性能を確認するため、それぞれ単体での試験体も併せて計画した。試験体数は、合計 7 体である。試験体の高さは SC 柱試験体の断面せい D の 3 倍(=1800mm)とし、コンクリートの打設は試験体上端より縦打ちで行った。なお、試験体のコンクリート打設面は、グラウト材を注入し平滑に仕上げた。

2.2 使用材料

使用したコンクリートの調合表を表 2 に、実験時の圧縮強度 σ_B 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^2 を目標とした。コンクリート強度用供試体は $\phi 100 \times 200$

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の一覧を表 1 に、試験体の断面形状を図 1 に示す。試験体は、実大の柱を想定した断面形状を $b \times D = 600 \times 600\text{mm}$ の正方形断面とし、H 形鋼(H-488 \times 300 \times 11 \times 18)をコンクリートで被覆し、更に型枠兼用の薄肉鋼管で補強した。実験変数は、薄肉鋼管の板厚($t=3.2\text{mm}$, $t=6\text{mm}$)とコンクリートの種類(再生コンクリート、普通コンクリート)である。前報の縮小試験体との大きな違いは、薄肉鋼管の幅厚比 B/t (B :鋼管の断面幅, t :鋼管の板厚)であり、縮小試験体が $B/t=65.2$ であるのに対して、実大試験体では板厚 $t=6\text{mm}$ の鋼管が $B/t=100$, $t=3.2\text{mm}$ の鋼管が $B/t=187.5$ と極めて大きいため、早期の局部座屈により負担できる軸力が僅かに

表 1 試験体一覧

試験体名称	断面構成		
	内蔵鉄骨	コンクリート	薄肉鋼管
S-0-0	H- 488*300*11*18	無し	
S-R-S3		再生	$t=3.2\text{mm}$
S-R-S6			$t=6.0\text{mm}$
S-P-S3		普通	$t=3.2\text{mm}$
S-P-S6			$t=6.0\text{mm}$
0-0-S3	無し	$t=3.2\text{mm}$	
0-0-S6	無し	$t=6.0\text{mm}$	

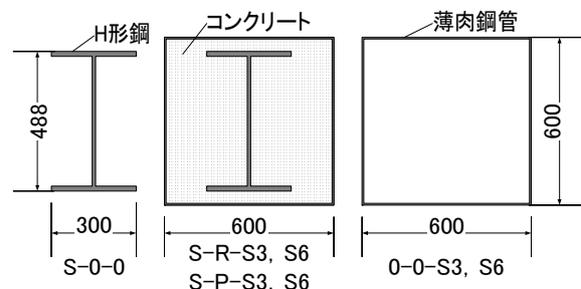


図 1 試験体の断面形状

Study on Application of Recycled Aggregate Concrete to the Composite Structures

－ Axial Compression Behavior of Full Scale Specimen －

Hiroshi KOMATSU, Toshiaki FUJIMOTO, Tomoyuki SAKURADA and Hiromi MITSUHASHI

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管にはSS400材を用い、鋼材の引張試験片は1A号および5号試験片を用いた。

表2 コンクリートの調合表

種類	W/C (%)	単位質量 (kg/m ³)					
		水	セメント	細骨材			粗骨材
再生	47.0	180	383	山砂	再生砂	砕石	再生粗骨材
				410	354	457	417
普通	54.0	184	341	山砂	砕砂	砕石	
				563	243	948	

表3 コンクリートの材料試験結果

種類	再生		普通	
試験体	S-R-S6	S-R-S3	S-P-S6	S-P-S3
圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	34.2	34.4	33.6	33.7
実験時材齢	28日	33日	27日	33日

表4 鋼材の材料試験結果

種類	板厚 t (mm)	ヤング係数 E_s (kN/mm ²)	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_t (N/mm ²)	伸び率 ϵ (%)	
鋼管	3.2mm	3.20	194	387	22.4	
	6.0mm	5.92	195	390	17.6	
H形鋼	ウェブ	11.2	192	319	449	22.7
	フランジ	17.9	193	284	436	23.9



写真1 実験風景 (30MN 試験機)

2.3 加力および計測方法

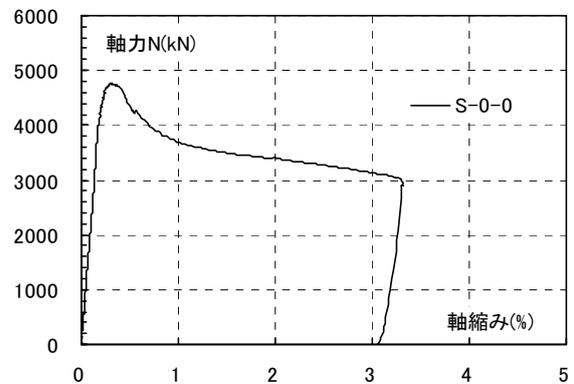
実験は、H形鋼試験体およびSC柱試験体については30MN試験機(写真1参照)を用い、薄肉鋼管試験体については、5000kN試験機を用いて行った。

加力は、試験体上下の拘束条件を固定とした単調載荷とし、試験体の平均軸方向ひずみ ϵ (=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。測定は、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、H形鋼ならびに薄肉鋼管には、ひずみゲージを貼付し、軸方向および横方向ひずみを測定した。

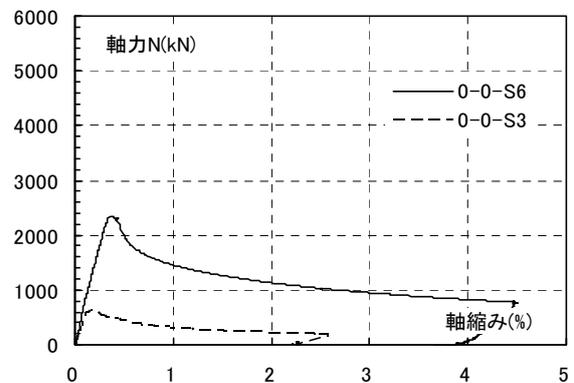
3. 実験結果

3.1 鉄骨柱の実験結果

H形鋼ならびに薄肉鋼管試験体の圧縮試験結果を図2(a)、(b)および表5に、試験体の最終破壊形状を写真1に示す。最大耐力は、全試験体とも



(a) H形鋼試験体



(b) 薄肉鋼管試験体

図2 鉄骨試験体の実験結果

局部座屈により決定した。H 形鋼の最大耐力は、計算降伏耐力 $N_y (= \sigma_y \cdot A_s, A_s: \text{鋼材の断面積})$ 、とほぼ同じ値を示した。一方薄肉鋼管は、幅厚比 B/t が極めて大きいことから早期に局部座屈が認められ、最大耐力は板厚 6mm の試験体が計算降伏耐力 N_y の 0.42 倍、板厚 3.2mm の試験体が N_y の 0.21 倍で、降伏耐力を下回った。

表 5 鉄骨柱試験体の耐力一覧

	N_y (kN)	N_{max} (kN)	N_{max}/N_y
S-0-0	4661	4755	1.02
0-0-S6	5560	2350	0.42
0-0-S3	2956	616	0.21

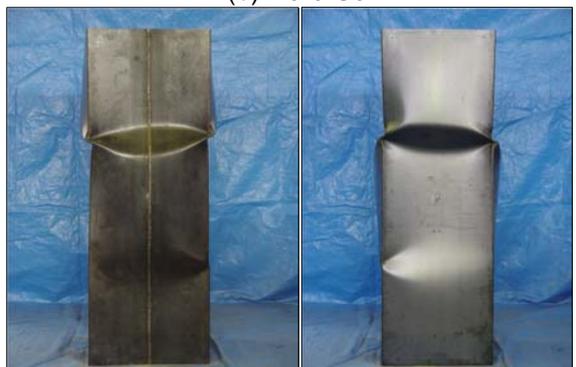
$N_y = \sigma_y \cdot A_s, A_s: \text{鋼材の断面積}, N_{max}: \text{最大耐力}$



(a) S-0-0



(b) 0-0-S6



(c) 0-0-S3

写真 2 最終破壊形状 (鉄骨柱試験体)

3.2 SC 柱の実験結果

コンクリートを薄肉鋼管で補強した SC 柱試験体の最終破壊形状を写真 3 に、圧縮試験結果を図 3(a), (b) に示す。



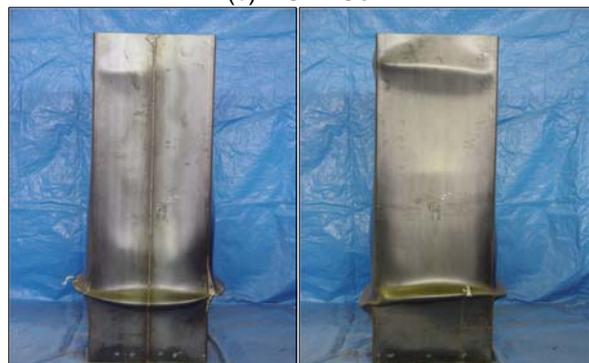
(a) S-R-S6



(b) S-P-S6



(c) S-R-S3



(d) S-P-S3

写真 3 最終破壊形状 (SC 柱試験体)

SC 柱試験体は、いずれの試験体も目視により薄肉鋼管の面外へのふくらみが確認された後に最大耐力に達した。その後耐力低下を示すが、薄肉鋼管の板厚が 6mm の試験体では最大耐力の約 80%、板厚 3.2mm の試験体では最大耐力の約 70% の荷重を維持し、試験機の都合により除荷するまで安定した挙動を示した。

4. 考察

4.1 被覆材による拘束効果

図 4(a), (b)に、各試験体の最大耐力に達するまでの H 形鋼フランジおよびウェブのひずみを比較して示す。なお図の縦軸は、軸力 N を各試験体の最大耐力 N_{max} で基準化して示している。

図 4(a)に示すフランジの軸ひずみは、いずれの試験体も最大耐力近傍まで、ほぼ比例的に増加している。

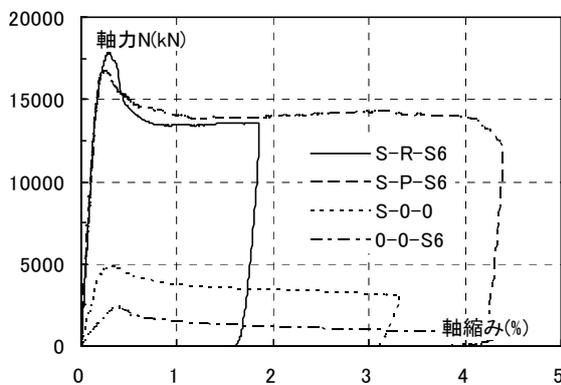
一方図 4(b)に示すウェブのひずみは、最大耐力の約 0.4 倍、軸ひずみ約 0.5% までは、ほぼ比例的に増加しているものの、その後軸力の増加に対し

てひずみの増加は認められない。このことはウェブの局部座屈がこの時点から生じ始めたためと推察できる。またコンクリートおよび薄肉鋼管の有無に関わらず同様の傾向を示していることから、最大耐力に達するまでの内蔵鉄骨に対するコンクリートと薄肉鋼管による拘束効果は認められない。

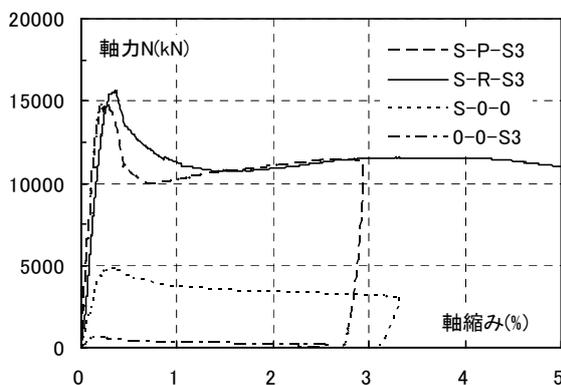
4.2 コンクリートと薄肉鋼管の相互作用

コンクリートによる薄肉鋼管の座屈補剛効果を確認するため、各試験体の最大耐力に達するまでの薄肉鋼管のひずみを比較して図 5 に示す。なお図の縦軸は、図 4 と同様である。

中空鋼管試験体では、軸方向ひずみが板厚 $t=3.2\text{mm}$ の試験体で約-0.02%、 $t=6\text{mm}$ の試験体では-0.05%を超えると徐々に減少する傾向があり、局部座屈がこの時点から生じ始めているものと推察できる。一方内部に H 形鋼とコンクリートがある SC 柱試験体では、ひずみの乱れはあるものの、最大耐力近傍まで軸ひずみが増加する傾向が

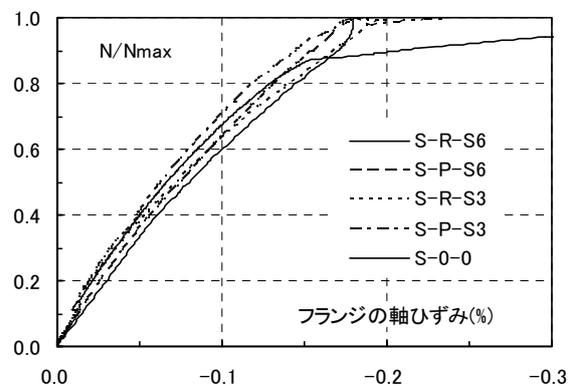


(a) 薄肉鋼管 : $t=6\text{mm}$

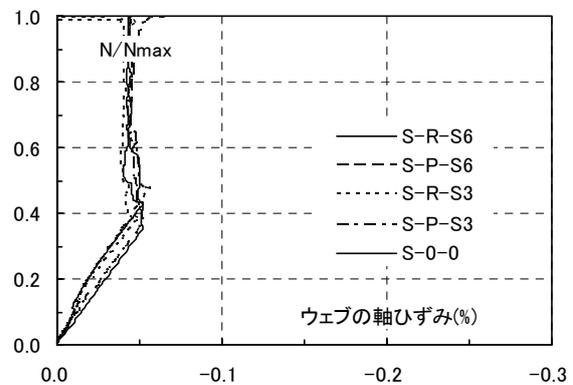


(b) 薄肉鋼管 : $t=3.2\text{mm}$

図 3 SC 柱試験体の実験結果



(a) フランジ



(b) ウェブ

図 4 H 形鋼の軸ひずみ

見て取れる。このことは、コンクリートにより鋼管が内側への変形を拘束されているため、中空鋼管に比べ、高い軸方向力を負担できるものと推察される。

図 6 に、SC 柱試験体の薄肉鋼管の横方向のひずみの推移を示す。なお図の横軸は試験体の軸縮みである。

図 3 に示した様に SC 柱試験体は、軸縮みが約 0.3% の時に最大耐力を示し、一旦耐力低下をした後に最大耐力の 0.7~0.8 倍の荷重を維持している。

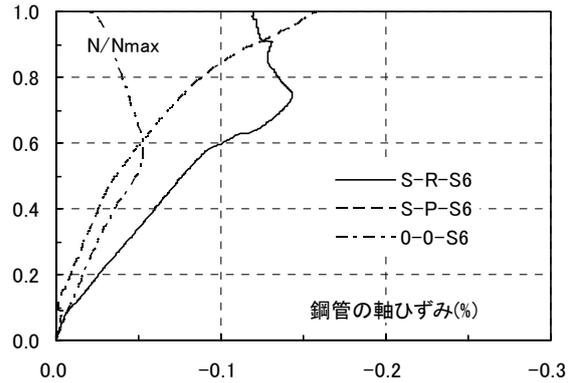
鋼管の横方向ひずみは、図 6 からわかるように、軸縮みが 0.3% を超えた後も徐々に引張側に増加していく傾向が認められる。このことは、コンクリートの破壊を鋼管が拘束しているためと考えられ、最大耐力以降は鋼管がコンクリートの拘束材として機能することによって SC 柱の変形能力が向上するものと考えられる。

4.3 実大 SC 柱の圧縮耐力

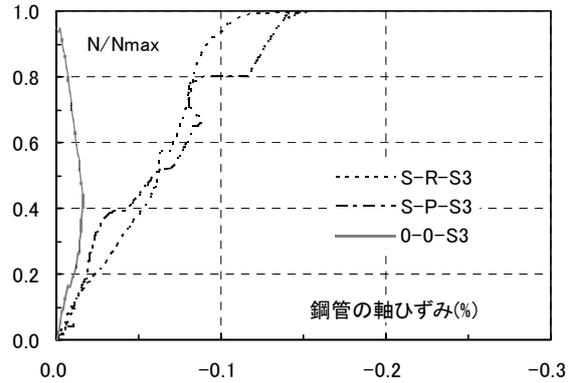
SC 柱試験体の最大耐力の一覧を表 6 に示す。縮小試験体の実験結果では、薄肉鋼管で補強した SC 柱試験体の最大耐力は、式(1)に示す薄肉鋼管 N_{so} 、内蔵鉄骨 N_{si} およびコンクリート N_c による単純累加耐力 N_0 とほぼ一致していた。

$$N_0 = N_c + N_{si} + N_{so} \quad (1)$$

ここで、 N_c : コンクリート部分の終局圧縮耐力 ($=\sigma_B \cdot A_c$, A_c : コンクリート断面積), N_{si} : 内蔵鉄骨部分の終局圧縮耐力 ($=\sigma_y \cdot A_{si}$, A_{si} : 内蔵鉄骨の断面積), N_{so} : 薄肉鋼管の終局圧縮耐力 ($N_{so} = \sigma_y \cdot A_{so}$, A_{so} : 薄肉鋼管の断面積) である。



(a) 薄肉鋼管 : t=6mm



(b) 薄肉鋼管 : t=3.2mm

図 5 鋼管の軸ひずみ

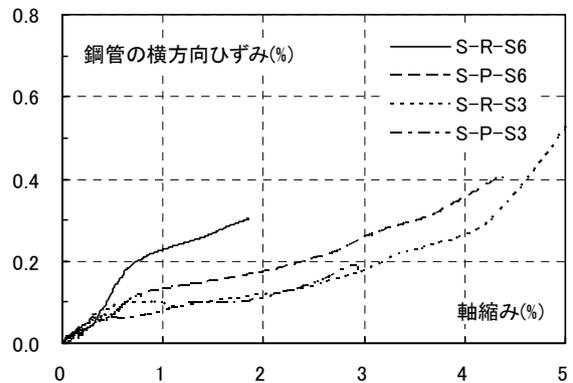


図 6 鋼管の横方向ひずみ

表 6 外殻材を用いた SC 柱試験体の耐力一覧

	N_{max} (kN)	N_0 (kN)	N_{max}/N_0	N_{si} (kN)	N_{smax} (kN)	N_{u1} (kN)	N_{max}/N_{u1}	N_{cmax} (kN)	N_{cmax}/N_c	D	$c'f_u$	N_c'	N_{u2} (kN)	N_{max}/N_{u2}
S-R-S6	17850	21435	0.83	4661	2350	18302	0.98	10839	0.96	664	0.81	9107	16118	1.11
S-P-S6	16693	21237	0.79			18104	0.92	9682	0.87	664	0.81	8948	15959	1.05
S-R-S3	15563	19192	0.81		616	16855	0.92	10286	0.89	670	0.81	9329	14606	1.07
S-P-S3	14774	18957	0.78			16620	0.89	9497	0.84	670	0.81	9140	14417	1.02

$N_0 = N_c + N_{si} + N_{so}$, $N_{u1} = N_c + N_{si} + N_{smax}$, $N_{cmax} = N_{max} - (N_{si} + N_{smax})$, $N_{u2} = N_c + N_{si} + N_{smax}$, N_c : コンクリート部分の終局圧縮耐力 ($=\sigma_B \cdot A_c$, A_c : コンクリート断面積), N_{si} : 内蔵鉄骨部分の終局圧縮耐力 ($=\sigma_y \cdot A_{si}$, A_{si} : 内蔵鉄骨の断面積), N_{so} : 薄肉鋼管の終局圧縮耐力 ($N_{so} = \sigma_y \cdot A_{so}$, A_{so} : 薄肉鋼管の断面積), N_{smax} : 中空薄肉鋼管の圧縮耐力(実験値), r : スケール効果によるコンクリート強度の低減係数 ($=1.67d^{0.112}$, $d=2D/\sqrt{\pi}$), N_c' : スケール効果を考慮したコンクリートの圧縮耐力 ($=r \cdot N_c$)

しかしながら、実大試験体の最大耐力 N_{max} は N_0 の 0.78~0.83 倍であり、単純累加耐力に達していない。そこで式(2)に示すように、鋼管の耐力 N_{so} に中空鋼管の実験結果 $N_{so\max}$ を用いた単純累加耐力 N_{u1} を求めたが、この場合でも実験値は N_{u1} を下回った。

$$N_{u1} = N_c + N_{si} + N_{so\max} \quad (2)$$

ここで、 $N_{so\max}$: 中空薄肉鋼管の圧縮耐力(実験値)である。

これらのことから、式(3)に示すようにコンクリートの負担軸力 $N_{c\max}$ を SC 柱の耐力 N_{max} から内蔵鉄骨の耐力 N_{si} と薄肉鋼管の耐力 $N_{so\max}$ を差し引くことで求めると、 $N_{c\max}$ は N_c の 0.84~0.96 倍であった。

$$N_{c\max} = N_{max} - (N_{si} + N_{so\max}) \quad (3)$$

このことは、コンクリートがシリンダー強度に達していないものと推測され、文献 2) のコンクリート充填鋼管(CFT)柱の研究で指摘されているようにコンクリートのスケール効果によるものと考えられる。

そこで、文献 2) の方法により求めたスケール効果を考慮したコンクリートの圧縮耐力 N_c' を用いた SC 柱の圧縮耐力 N_{u2} について検討した。

$$N_{u2} = N_c' + N_{si} + N_{so\max} \quad (4)$$

ここで、 N_c' : スケール効果を考慮したコンクリートの圧縮耐力($=r \cdot N_c$)、 r : スケール効果によるコンクリート強度の低減係数($=1.67d^{0.112}$, $d=2D/\sqrt{\pi}$)である。

式(4)により求めた SC 柱の圧縮耐力 N_{u2} は、 N_{max} を下回り($N_{max}/N_{u2}=1.02\sim 1.11$)、実験値を安全側に評価できることがわかった。このスケール効果を考慮した圧縮耐力 N_{u2} は、実験値に比べ若干低めの評価となっているが、4.2 節で述べたように SC 柱における鋼管の圧縮耐力が、コンクリートの座屈補剛効果により中空鋼管より上昇するものと考えれば、ほぼ評価できるものと考えられる。

5. まとめ

再生コンクリートを用いた実大の合成構造柱部材の中心圧縮実験を行い、以下の知見が得られた。

- ・ 耐久性上の問題から再生コンクリート表面を薄肉鋼管で被覆した SC 柱の圧縮性状は、普通コンクリートを用いた場合と同等の性能を示し、合成構造部材として充分適用可能である。
- ・ 実大の SC 柱の設計では、コンクリートのスケール効果を考慮する必要がある。

謝辞

本研究に際し、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。また実験で使用した 30MN 試験機は日本大学理工学部大型構造物試験センター設置の装置です。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1)小松博，藤本利昭，櫻田智之：再生コンクリートの合成構造への適用に関する研究，第 2 回日本大学生産工学研究所地域連携プロジェクト研究発表会報告書，2010.2.26
- 2)崎野健治，山口達也，中原浩之，向井昭義：コンクリート充填円形鋼管の中心圧縮耐力，構造工学論文集，Vol.48B，pp.213-236，2002.3