

(36) 木材を内蔵した鋼管短柱の圧縮特性に関する基礎研究

山本 貴正¹・中原 浩之²

¹正会員 愛知工業大学准教授 工学部建築学科 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草1247)

E-mail: takamasa@aitech.ac.jp

²正会員 長崎大学大学院教授 工学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

E-mail: nakaharahiroyuki@nagasaki-u.ac.jp

鋼管に木材を内蔵させた合成部材の基本的力学性状を把握することを目的として、木材を鋼管内側に配置・挿入し、隙間はグラウト材で埋めた各合成短柱の圧縮特性について実験的に検討したところ、グラウト材を使用している合成短柱は、CFT短柱のように、最大耐力到達後、圧縮力が再上昇する現象が見受けられた。ただし、木材部が負担する圧縮力の割合が硬化グラウト部と比較して大きいほど圧縮靱性が減少する。さらに最大圧縮力に及ぼす各種材による相乗効果は期待できない傾向がある。角形鋼管内に隙間がなくグラウト材を使用していない合成短柱については、角柱木材を挿入させた角形鋼管において、鋼管平板部の凹凸形状の局部座屈による木材のめり込み変形は、圧縮靱性に影響を及ぼさないなどの知見を得た。

Key Words : compressive ductility, compress force, grout, synergistic effect, local buckling

1. はじめに

(1) 本研究の背景・目的

著者らは、鋼・コンクリート合成構造に木材を内蔵させて部材の軽量化をする提案を行い、この部材の構造性能に関する実験的研究を進めている^{1,2,3}。なお、コンクリート充填鋼管(以下、CFT)部材の軽量化については、内部を空洞化させた宮木らの先行研究⁴があるが、この遠心成形CFTは、遠心成型技術を使用することから高コストになることと、内部コンクリートが破壊後に内側に崩落するなど、解決すべき問題が残存していた。そこで、著者らは、安価で軽量の木材に注目し、これを合成構造に利用する研究に着手している。このような新しい提案の研究では、参照できる先行研究が少なく、実験的に検討すべき事項は多い。

文献3)では、鋼管に木とグラウトを充填した合成部材について、離島における耐震補強ブレースに利用すること(例えば、文献5)を参照)ことを念頭に、主に長柱の中心圧縮性状について調べている。一方、文献1),2)では、この構造の部材の基礎性状を把握するべく、短柱の中心圧縮実験についてまとめている。本研究では、文献2)をさらに発展させるべく、木材を含む新たな組み合わせの合部材の短柱試験体を作成し、その圧縮特性を実験的に検討している。

(2) 本研究に関連する既往研究

a) 遠心成形コンクリート充填鋼管

遠心成形 CFT 短柱は、圧縮試験より⁶、コンクリート部は、断面のひずみがアーチアクションのため、鋼管による拘束効果で、破壊開始時の軸ひずみ度は高くなるなどの知見が得られている。一方で、破壊されると破片が空洞部に落下するため、圧縮強度を上昇させるほどの効果はないとされている。なお、30%程度まで空洞率が大きくなるほど、遠心成形 CFT 短柱の最大耐力時の軸ひずみ度は小さくなる結果が、また、遠心成形 CFT 短柱は、CFT 短柱と同様に、最大耐力到達後に、圧縮力が再上昇する現象が観測されており、最大圧縮力に対する軸ひずみ度が最大耐力時から軸ひずみ度 3.0%までの最小の圧縮力(以下、劣化抵抗率)は、空洞率が大きいほど低下する結果が得られている⁴。

b) 円筒コンファインドコンクリート

円筒コンファインドコンクリート短柱は、圧縮試験より、空洞率が大きくなるほど、強度時ひずみ度到達時の横補強筋ひずみ度は小さくなる⁷、かつ円筒コンクリートと同様、破壊領域が狭くなる結果が認められている⁸。

c) 角柱のスギ製材を挿入させたアルミニウム角管

角柱のスギ製材を挿入させたアルミニウム角管(以下、ALW)短柱の圧縮試験によると⁹、ALW短柱の最大圧縮力は、アルミニウム角管単体およびスギ製材単体それぞれの短

柱試験で得られている最大圧縮力の標本平均の和と同程度である結果が得られている。耐力劣化勾配は、各単体それぞれと比較して緩やかである結果が得られている。

2. 実験について

(1) 短柱試験体の種類

円柱木材を中央に配置して、隙間をグラウトした鋼管(以下、配置型)短柱、角柱木材を内接配置して、隙間をグラウトした鋼管(以下、内接型)短柱および角柱木材を挿入させた角形鋼管(以下、挿入型)短柱、また挿入型の木材のみに圧縮力を載荷する短柱(以下、挿入 UB 型短柱)の圧縮試験を実施した。これら合成短柱の試験体の概略が図-1 に示してある。

配置型においては、木材配置の影響を検討するため、木材を配置していない CFT 短柱の圧縮試験を、各合成短柱は、使用している鋼管および木材それぞれの短柱の圧縮試験を実施している。ただし、挿入 UB 型短柱に使用している鋼管の短柱圧縮試験は実施していない。

(2) 使用材料

表-1 に各合成短柱試験体に使用している材料の組み合わせを示す。木材は国産スギを使用し、円柱は辺材かつ節なし、角柱は芯材かつ節ありである。各鋼管の高さは、公称径または幅の3倍とした。なお、鋼管のヤング係数は 205kN/mm^2 、ポアソン比を0.3とした。

グラウトは、配置型および内接型それぞれモルタルおよびセメントペーストとした。水は水道水、セメントは普通ポルトランドセメント(密度： 3.15g/cm^3)、細骨材は山砂(表乾密度： 2.55g/cm^3 、吸水率：0.5%)を使用している。モルタルには高性能AE減水剤を添加した。

(3) 試験体作製

a) グラウト材

モルタルのセメント水比は3.3、セメント砂比は2.7であり、高性能AE減水剤をセメント質量比で0.5%添加している。セメントペーストのセメント水比は2.1とした。モルタルの供試体に併せて、中空円筒形(以下、円筒モルタル)の供試体も作製している。なお、円筒形空洞部

には、空洞を模擬した円柱の発泡プラスチック(密度： 0.061g/cm^3)を配置している。

モルタルの供試体は内径100mm・内高200mmの鋼製型枠で、セメントペーストの供試体は $40\times 40\times 160\text{mm}$ の3連型枠で成形し、短柱の強度試験実施日までそれぞれ封緘養生した。同一条件供試体数は3である。

b) 木材

市販の幅120mmの角柱木材を、内接型短柱では、鋼管に内接する設計幅となるように、隣り合う2面を長手方向にカンナで削り加工している。挿入型においては、鋼管内に挿入できる設計幅となるように、このカンナによる作業に加え、隅角部をトリマで研いだ。

各合成短柱に使用する木材を切り出した挽き材から、木材短柱の試験体を採取した。この公称高は、円柱は180mm、角柱は鋼管と同一の高さとした。ただし、挿入 UB型に使用している木材は340mmとしている。同一条件試験体数は3である。

c) 合成短柱・鋼管短柱

配置型および内接型短柱は、それぞれあらかじめラップフィルムを被覆した木材を鋼管内に設置した後、グラウトをした。またグラウト打設側の端部を研磨している。鋼管短柱の同一条件供試体数は3である。

(4) 試験方法

a) 合成短柱・鋼管短柱

各合成短柱と鋼管短柱の圧縮試験の概略を図-2 に示す。同図に示すように、固定した上下載荷板の変位を、相対する2台の変位計で測定した。また二軸ひずみゲージを、鋼管短柱および配置型短柱それぞれの鋼管には中央水平断面3等分点、内接型短柱の鋼管には木材が内接している4点の箇所を含む中央水平断面8等分点上の6点に、角形鋼管短柱、挿入型および挿入 UB 型それぞれ

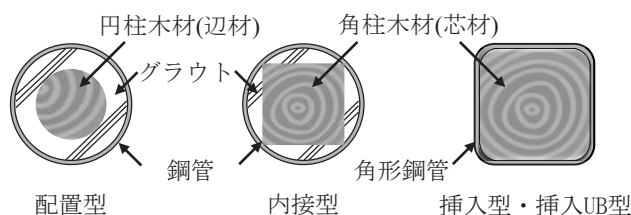


図-1 合成短柱試験体の断面(概略)

表-1 各合成短柱試験体に使用している鋼管・木材・グラウト材の組み合わせ

ID	短柱試験体名称	使用鋼管	使用木材(国産スギ)	グラウト材の種類	備考	n
01	径75mm配置型	STKR400-101.6×3.2	円柱(公称径75mm) 辺材	モルタル	木材短柱の試験体高さ180mm	3
	径50mm配置型		円柱(公称径50mm) 辺材		圧縮試験時の上端に球座設置	3
	CFT		-		-	3
02	内接型		角柱(設計幅67mm) 芯材	セメントペースト	-	3
03	挿入型	STKR400-100×100×3.2	角柱(設計幅93mm) 芯材	-	-	3
04	挿入UB型	STKR400-100×100×2.3	角柱(設計幅95mm) 芯材	-	木材部のみに圧縮力載荷	1

n : 同一条件試験体数

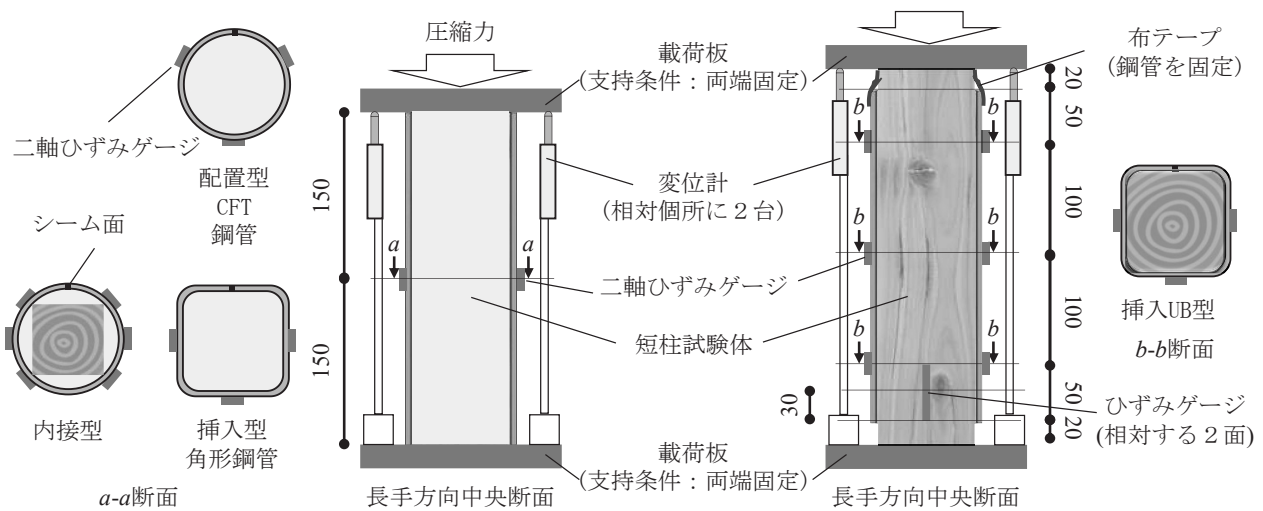


図-2 各合成短柱と鋼管短柱の圧縮試験方法の概略

の鋼管にはシーム面を除く3面の平板部の中央に貼付し、軸周ひずみ度を測定した。なお、内接型は、木材が内接していない個所のシーム面とその相対する箇所にはひずみゲージを貼付していない。挿入 UB 型は、角形鋼管上下端から 50mm の箇所にも同様に二軸ひずみゲージを、また挿入する角柱木材の相対する 2 面の下端から 50mm の箇所に、ひずみゲージを軸方向に貼付した。この角柱木材と角形鋼管は、上端にて布テープで固定している

挿入 UB 型に使用した鋼管については、シーム面を除く3面の平板部から引張試験片を採取した。この試験片の引張試験は JIS Z 2241 に準拠して実施した。

b) 木材短柱・グラウトの供試体

木材短柱の圧縮試験において、円柱は、上下載荷板それぞれ球座付きおよび固定とし、軸ひずみ度をコンクリート圧縮試験用の測定区間 100mm のコンプレッソメータで測定した。なお、この木材との接点を皿頭ビスに置き換えている。角柱は、固定した上下載荷板の変位を相対する 2 台の変位計で、また軸ひずみ度を相対する中央側面に貼付したひずみゲージで測定した。なお、挿入 UB 型に用いた木材の短柱試験体は、ひずみゲージを相対する 2 面の下端から 50mm の軸方向にも貼付している。木材短柱の縦ヤング係数を、日本住宅木材・技術センターの構造用木材の強度試験マニュアル¹⁰⁾の縦圧縮試験に準拠して測定した。

モルタルの供試体の圧縮試験を、JIS A 1105および 1149 に準拠して実施した。軸ひずみ度は、コンプレッソメータで測定している。セメントペーストの供試体の強さ試験を、JIS R 5201 に準拠して実施した。

c) 実験データの測定方法

各短柱の圧縮試験において、圧縮ひずみ度を、最大耐力到達までは軸ひずみ度、最大耐力到達後は、最大耐力時の軸ひずみ度と試験体高さに対する変位計で測定した最大耐力到達後の変位増分量の和とした。軸ひずみ度は

ひずみゲージによる測定値の標本平均、変位増分量は、相対する 2 台の変位計による測定値の標本平均である。

配置型、CFT、内接型、挿入 UB 型および鋼管それぞれの短柱においては、鋼管表面を平面応力状態と仮定し、ひずみゲージで測定した軸周ひずみ度と弾塑性理論¹¹⁾より鋼管の軸周応力度を測定(以下、モデル値)している。

鋼管は、短柱の圧縮試験の結果より、直交異方性材料として扱い Hi11 の相当応力を、角形鋼管は、等方性材料として扱い Von-Mises の相当応力をそれぞれ用いている。各鋼管の相当応力度と相当ひずみ度の関係は、Ramberg-Osgood モデルを用いて次式とした。

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sigma_{eq}}{E_s} + 0.2 \times 10^{-2} \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{eqy}} \right)^\mu \quad (1)$$

ここに ε_{eq} : 相当ひずみ度 σ_{eq} : 相当応力度 E_s : 鋼管のヤング係数 σ_{eqy} : 相当降伏応力度 μ : 硬化指数

式(1)の硬化指数は、配置型と内接型では鋼管短柱の最大耐力到達まで、挿入 UB 型では引張試験片の軸ひずみ度 2.0%までの各軸応力度の観測値と、式(1)の相当応力度のモデル値を用いた最小二乗法により求めた。ここでの式(1)の相当降伏応力度および相当ひずみ度には、それぞれ圧縮または引張降伏応力度の標本平均および軸ひずみ度の標本平均を代入している。

直交異方性材料として扱う鋼管のマイナスを乗じた軸ひずみ度増分に対する周ひずみ度増分(以下、軸周ひずみ増分比)の塑性成分は、軸周ひずみ増分比の観測値の標本平均と、次式から得られる軸周ひずみ増分比のモデル値を用いた最小二乗法により求めた。

$$v_{ep} = \frac{v \cdot d\varepsilon_e + v_p(d\varepsilon - d\varepsilon_e)}{d\varepsilon} \quad (2a)$$

$$d\varepsilon_e = \frac{d\sigma}{E_s} \quad (2b)$$

ここに v_φ : 軸周ひずみ増分比 v : 鋼管のポアソン比
 ε : ひずみ度 v_p : 軸周ひずみ増分比の塑性成分 σ : 応力度

ここでの式(2a)のひずみ度には鋼管短柱の軸ひずみ度の標本平均を、式(2b)の応力度には式(1)の相当応力度のモデル値を代入している。

各合成短柱の圧縮靱性の指標として、劣化抵抗率(前述 1.(2)a参照)を用いた。ここでは最大耐力時から圧縮ひずみ度 5.0%までの最小の圧縮力を採用している。

3. 実験結果・考察

(1) 鋼管・木材・グラウト材

a) 鋼管

表-2(a) (b)に、各鋼管短柱の圧縮試験結果および挿入 UB 型で使用している角形鋼管から採取した試験片の引張試験結果をそれぞれ示す。表中の ID は前掲表-1 と対応しており、例えば ID03 は、挿入型に使用した角形鋼

表-2 鋼管の材料試験結果
(a) 鋼管短柱の圧縮試験

ID	公称 径(幅)厚比	圧縮降伏 応力度		最大圧縮 応力度		最大耐力時 ひずみ度	
		<i>m</i>	<i>s/m</i>	<i>m</i>	<i>s/m</i>	<i>m</i>	<i>s</i>
		(N/mm ²)	(%)	(N/mm ²)	(%)	(%)	(%)
01, 02* 31.8(=D/t)		373	0.89	423	0.32	1.719	0.214
03 31.3(=B/t)		346	2.61	349	2.65	0.422	0.040

D(B)/t: 径(幅)厚比 *m*: 標本平均 *s*: 標本標準偏差
 *硬化指数: 14.6 *塑性成分の軸周ひずみ度増分比: 0.56

(b) 角形鋼管から採取した試験片の引張試験

ID	引張降伏応力度*			最大引張応力度		破断伸び率		硬化 指数
	<i>m</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>m</i>	<i>s/m</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	
	(N/mm ²)			(N/mm ²)		(%)		
04	418	422	415	475	0.521	29.5	2.51	26.9

max: 最大値 *min*: 最小値 *サンプル数2

表-3 鋼管の軸周応力度の観測値とモデル値の誤差

	β		α	
	<i>m</i>	<i>s</i>	<i>m</i>	<i>s</i>
	(N/mm ²)		(N/mm ²)	
1/3 $\times\sigma_y$ 到達時	-0.035	0.024	0.020	0.011
2/3 $\times\sigma_y$ 到達時	-0.018	0.023	0.023	0.003
σ_y 到達時	-0.007	0.011	-0.012	0.008
最大耐力到達時	0.000	0.011	0.005	0.005
	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>
σ_y 以下	0.039	-0.066	0.034	-0.014
σ_y 超 σ_u 以下	0.017	-0.017	0.014	-0.039

β : 鋼管の軸応力度/鋼管の降伏応力度(軸応力成分比)

α : 鋼管の周応力度/鋼管の降伏応力度(周応力成分比)

σ_y : 鋼管の降伏応力度 σ_u : 鋼管の最大圧縮応力度

管である。後掲する各表中の ID も同様である。なお、各表中の降伏応力度は、全て 0.2%off-set 法で算出した。また引張試験の同一条件試験体数 3 の内 1 体は、ひずみゲージが正確な値を測定できていないため、引張降伏応力度のサンプル数は 2 である。なお、表-3 には、前述 2. (4)c 項の方法で測定した鋼管短柱の軸周応力度の観測値とモデル値の誤差が示してある。ここでは、周応力度の観測値はゼロとしている。

鋼管短柱は、同一断面様に円周方向へ凸形状となる局部座屈が、角形鋼管短柱は、最大耐力到達後に隣合う鋼管平板部が凹凸に変形する不伸張型の局部座屈が生じた。これらは最大耐力到達付近から発生した。

b) 木材

表-4に、木材短柱の圧縮試験結果を示す。表中のID04の挿入UB型に使用した木材単体の短柱は、中央と下側それぞれのひずみゲージで測定した縦ヤング係数と強度時ひずみ度が示してある。これら平均値は対応のあるt検定をすると有意水準5%で差ありとはいえない。なお、目視によると、全試験体ともに、最大耐力到達後にキックバンドが生じた。節ありの試験体は、キックバンドが生じた後に、節近傍で繊維方向の割れが発生した。

c) グラウト

表-5(a) (b)に、硬化グラウト供試体の圧縮強度および強さ試験結果をそれぞれ示す。表(a)中には、既報2)の

表-4 木材短柱の縦圧縮試験結果

ID	縦圧縮強度		縦ヤング係数		強度時ひずみ度		備考
	<i>m</i>	<i>s/m</i>	<i>m</i>	<i>s/m</i>	<i>m</i>	<i>s</i>	
	(N/mm ²)	(%)	(kN/mm ²)	(%)	(%)	(%)	
01	33.1	2.64	8.49	5.33	0.428	0.036	木材径75mm
01	36.7	2.78	7.89	15.5	0.597	0.037	木材径50mm
02	27.4	4.65	7.67	24.9	0.692	0.212	-
03	21.7	10.9	5.33	21.9	0.550	0.104	-
04	22.6	2.46	5.95	11.4	0.327	0.038	試験体中央
			7.52	11.1	0.363	0.117	試験体下側

表-5 硬化グラウト供試体

(a) 硬化モルタルの圧縮試験結果

ID	形状	圧縮強度		静弾性係数		強度時ひずみ度	
		<i>m</i>	<i>s/m</i>	<i>m</i>	<i>s/m</i>	<i>m</i>	<i>s</i>
		(N/mm ²)		(kN/mm ²)		(%)	
*	中実	47.5	5.58	27.3	18.4	0.280	0.034
	円筒	46.5	2.90	23.9	2.97	0.299	0.013
01	中実	59.0	11.9	20.9	8.6	0.374	0.063
	円筒	56.2	16.8	17.2	4.4	0.383	0.066

*既報2)の供試体

(b) 硬化セメントペーストの強さ試験結果

ID	曲げ強度				折片圧縮強度			
	<i>m</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>s/m</i>	<i>m</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>s/m</i>
	(N/mm ²)				(N/mm ²)			
04	8.92	10.0	8.49	10.5	49.2	55.9	45.7	7.98

結果が併せて示してある。

同表(a)に示す各グラウトの中実供試体と円筒供試体の圧縮強度、静弾性係数および強度時ひずみ度の平均値は、それぞれ検定すると有意水準5%で差ありとはいえない。このことから、以下、合成型のグラウトの圧縮強度は、中実供試体の圧縮強度を用いる。

(2) 合成短柱の最終破壊状況

CFT短柱、径50mm配置型短柱それぞれともに、最大耐力到達後、高さ方向にズレて円周方向へ凸形状となる局部座屈が鋼管部に発生した。径75mm配置型短柱および内接型短柱は、使用している鋼管短柱と類似しており、同一断面一様に円周方向へ凸形状となる局部座屈が生じた。挿入型短柱は、使用している角形鋼管短柱と類似しており、最大耐力到達後に隣合う鋼管平板部が凹凸に変形する不伸張型の局部座屈が生じている破壊状況である。なお、この破壊状況の例が写真-1に示してある。このことから、挿入型短柱は、角形鋼管の凹の局部座屈により、挿入されている木材がめり込み変形していると推測でき

る。挿入UB型短柱は、最大耐力到達後に、隣接する2面の鋼管部が外側に膨らんだ。なお、写真-2に示すように、その膨らみの付近の木材には、片面に節が存在していた。

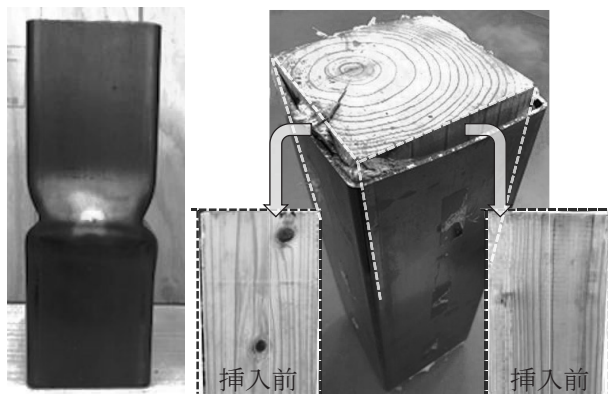
(3) 配置型

図-3に、ID01の径75mmと径50mm配置型短柱、CFT短柱および鋼管短柱それぞれの圧縮力-圧縮ひずみ度関係を示す。図より、各配置型は、CFTと同様に、最大耐力到達後、圧縮力が再上昇する現象が見受けられる。表-6には、これら合成短柱の実験結果一覧が示してある。表中の加算圧縮耐力は次式で算出した値である。

$$N_0 = A_s \cdot \sigma_y + A_c \cdot \sigma_B + A_w \cdot \sigma_0 \quad (3)$$

ここに A_s 、 A_c 、 A_w ：鋼管部、硬化グラウト部および木材部それぞれの断面積 σ_y 、 σ_B 、 σ_0 ：鋼管短柱の圧縮降伏応力度、硬化グラウト供試体の圧縮強度および木材短柱の縦圧縮強度それぞれの標本平均

表中の標準化変量の平均値は式(3)の加算圧縮耐力、標



左側：写真-1 挿入型の最終破壊状況
右側：写真-2 挿入UB型の最終破壊状況と挿入前の木材の表面(破壊箇所)

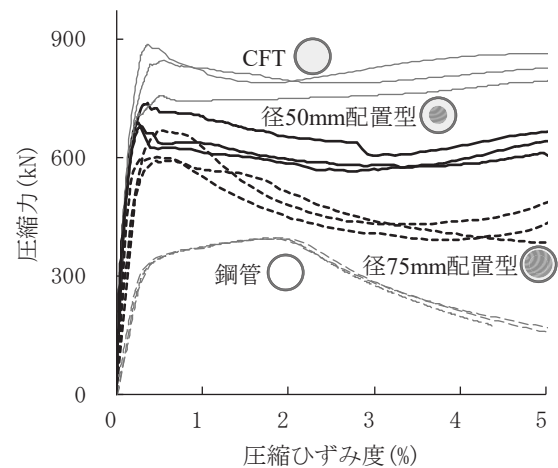


図-3 配置型の圧縮力-圧縮ひずみ度関係

表-6 配置型短柱・CFT短柱の実験結果一覧

試験体 名称	最大 圧縮力 観測値 (kN)	最大圧縮力 加算圧縮耐力		最大耐力到達時								劣化抵抗率		
		観測値	m ()内s	圧縮ひずみ度(%)		β		α		ω		観測値	m ()内s	
				観測値	m ()内s	モデル 値	m ()内s	モデル 値	m ()内s	モデル 値	m ()内s			
径75mm 配置型	669	1.018	0.60	0.445	1.034	0.031	1.017	0.642	0.646					
	600	0.913	0.944 (0.065)	-2.84	0.464	0.489 (0.09)	1.020	1.038 (0.020)	-0.005 (0.018)	0.016	1.023 (0.016)	0.651 (0.005)	0.646	
	591	0.900		-3.26	0.589		1.060		0.021		1.048		0.644	
径50mm 配置型	737	1.042	0.26	0.357	0.956	-0.062	0.992	0.926					0.926	
	688	0.978	0.991 (0.045)	-1.08	0.252	0.292 (0.057)	0.932	0.951 (0.017)	-0.014 (0.047)	-0.015	0.940 (0.028)	0.961 (0.028)	0.869 (0.037)	0.883
	679	0.955		-1.31	0.267		0.966		0.031		0.949		0.856	
CFT	886	1.149	2.27	0.358	1.009	0.023	0.996	0.959					0.959	
	846	1.097	1.075 (0.087)	1.48	0.559	0.482 (0.108)	0.994	1.004 (0.009)	-0.063 (0.047)	-0.029	1.030 (0.022)	1.021 (0.022)	0.954 (0.023)	0.970
	755	0.979		-0.32	0.528		1.009		-0.048		1.037		0.997	

z値：標準化変量(平均値：加算圧縮耐力) ω：鋼管の相当応力度/鋼管の降伏応力度(相当応力比)

下線：1個所のひずみゲージの値は、正確な測定できていないため検討対象外とした。

準偏差は、鋼管部、硬化グラウト部および木材部それぞれの断面積に、鋼管短柱の降伏応力度、硬化グラウト供試体の圧縮強度および木材短柱の縦圧縮強度それぞれの標本標準偏差を乗じた値の二乗平方和である。

同表および図-3それぞれより、CFT、径50mm配置型、径75mm配置型の順に劣化抵抗率が小さいこと、および圧縮靱性が小さいことを見受けられる。これらは木材部を空洞部に置換すると、遠心成形CFT短柱（前述1.(2)a)項参照）と同じ傾向である。配置型の木材部を空洞部に置換すると、径75mmおよび径50mm配置型の空洞率はそれぞれ61%および27%程度である。なお、この各合成短柱の圧縮靱性の差異については、木材部の圧縮靱性も寄与している可能性があるため、今後更なる検討を要する。

同表より、径50mm配置型短柱の最大耐力到達時の圧縮ひずみ度は、CFTかつ径75mm配置型短柱と比較して小さいことを見受けられる。なお、平均値は、それぞれ検定すると有意水準5%で差なしとはいえない。前者については、径50mm配置型は、CFTと比較して側圧が小さいためと推測される。後者については、径50mm配置型は、径75mm配置型と比較して、側圧は大きいが、グラウト部の負担圧縮力が木材部と比較して大きいこと、換言すると、径75mm配置型は、径50mm配置型と比較して、側圧は小さいが、グラウト部の負担圧縮力が木材部と比較して小さいため、最大圧縮力が木材部の破壊で決定したことが起因していると考えられる。なお、径75mm配置型と公称径75mmの木材短柱の最大耐力到達時の圧縮ひずみ度は、平均値をt検定すると有意水準5%で差ありとはいえない。

同表に示すように、径75mm配置型短柱の3体中2体は、最大圧縮力の標準化変量が-2.0以下である。これは、比較的厚さの小さい硬化グラウトの乾燥収縮ひび割れが影響している可能性がある。また同表より、径50mm配置型短柱の最大圧縮力は、加算圧縮耐力と同程度であることを見受けられる。これについては最大耐力時の軸ひずみ度 ($m=0.292$) と木材短柱の強度時ひずみ度 ($m=0.592$) より、木材部の圧縮応力度が縦圧縮強度に到達していないため、木材部の負担圧縮力と木材短柱の最大圧縮力の差と、拘束効果による硬化グラウトの最大圧縮力の上昇量が相殺されたためと推測される。以上より、各配置型は、材料の組み合わせにもよるが、最大圧

縮力に及ぼす各種材による相乗効果はないと推察される。

同表より、各合成短柱は、最大耐力時の軸周応力成分比が同一条件試験体においてばらついていることを見受けられる。また、マイナスを乗じた最大耐力時の周応力度成分比の標本平均は、CFT、径50mm配置型、径75mm配置型の順に小さいが、各合成短柱ともに周応力成分がゼロ付近であることを見受けられる。この原因として、モデル値の誤差(前掲表-3参照)、硬化グラウトの乾燥収縮ひび割れが起因していると考えられる。

(4) 内接型短柱

図-4に、ID02の内接型短柱、鋼管短柱および木材短柱それぞれの圧縮力-圧縮ひずみ度関係を示す。図より、内接型短柱は、CFTと同様に、最大耐力到達後に、圧縮力が再上昇する現象が見受けられる。

表-7に、内接型短柱の実験結果一覧が示してある。表中の加算圧縮耐力は式(3)で算出した。標準化変量は、前節の配置型と同じ方法で求めている。最大耐力到達時の鋼管部の各応力度は、木材内接部と木材が内接していないグラウト部それぞれ別々で算出している。

同表より、各試験体ともに最大圧縮力が加算圧縮耐力に到達していないこと、また、別々に算出した箇所での最大耐力到達時における鋼管部の軸周応力成分比は、同一条件試験体においてばらついていることを見受けられる。これらは、前節の配置型と同様のことが起因していると考えられる。

(5) 挿入型短柱

図-5に、ID03の挿入型短柱、鋼管短柱および木材短柱

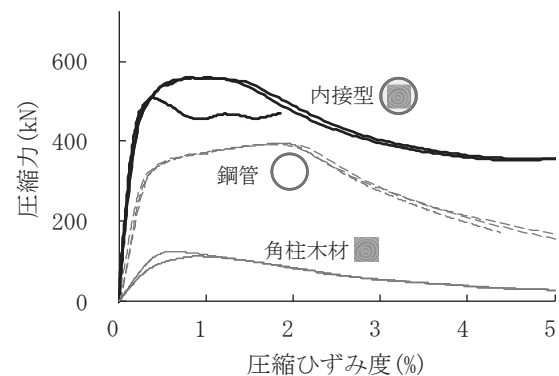


図-4 内接型の圧縮力-圧縮ひずみ度関係

表-7 内接型短柱の実験結果一覧

最大圧縮力 (kN)	最大圧縮力加算圧縮耐力		最大耐力到達時 圧縮ひずみ度 (%)	最大耐力到達時						
	観測値	z値		木材内接部			グラウト部			劣化抵抗率
				β	α	γ	β	α	γ	
561	0.933	-3.303	0.841	1.099	0.027	1.084	1.079	-0.006	1.082	0.635
559	0.930	-3.467	0.848	1.011	-0.124	1.086	0.892	-0.289	1.083	0.631
509	0.847	-7.577	<u>0.380</u>	<u>0.995</u>	<u>0.016</u>	<u>0.986</u>	0.999	-0.025	1.013	0.668

下線：1個所のひずみゲージの値は、正確な測定できていないため検討対象外とした。

それぞれの圧縮力-圧縮ひずみ度関係を示す。薄い太線は、木材の圧縮強度の標本平均をコンクリートの圧縮強度の標本平均に置換して算出した角形CFT短柱の圧縮力-圧縮ひずみ度関係の予測値¹²⁾(以下、角形CFT短柱相当)である。図中の横破線は、式(4)の加算最大圧縮力である。

$$N_u = N_{us} + N_{uw} \quad (4)$$

ここに N_{us} : 鋼管短柱の最大圧縮力の標本平均 N_{uw} : 木材短柱の最大圧縮力の標本平均
横破線は式(4)±s(s:鋼管短柱の最大圧縮力の標本標準偏差と木材短柱のそれとの二乗平方和)である。

同図より、挿入型短柱は、圧縮靱性が角形CFT短柱相当と比較して著しく小さいこと、また最大耐力到達後の圧縮力-圧縮ひずみ度関係が、鋼管短柱と木材短柱の和と同程度であり、圧縮力が収束していないことを見受けられる。この後者と破壊状況(前掲写真-1)を踏まえ、鋼管平板部の凹の局部座屈により、木材部は、めり込み変形をしても、圧縮靱性が著しく低下しないと推測される。以上より、材料の組み合わせにもよるが、挿入型短柱は、ALW短柱(前述1.(2)c)節参照)と異なり、拘束効果による木材の圧縮靱性の向上は期待できないと考えられる。

同図より、挿入型短柱の最大圧縮力は、全同一条件試験体ともに式(4)±s内に存在していることが認められる。これは鋼管短柱と木材短柱の最大耐力時の圧縮ひずみ度が同程度であることが影響していると考えられる。

(6) 挿入UB型短柱

図-6(a)に、ID04の挿入UB型短柱の木材部と木材短柱の圧縮応力度-圧縮ひずみ度関係を併せて示す。圧縮応力度は、圧縮力を木材部の断面積で除した値である。図中の横破線は、木材短柱の縦圧縮強度の標本平均[m]を、横点線は $m \pm 3s$ (s:木材短柱の縦圧縮強度の標本標準偏差)である。木材の軸ひずみ度は、前述3.(1b)より、下端に貼付したひずみゲージの測定値である。

図-6(b)は、挿入UB型短柱の鋼管上部の最も鋼管の膨らみが大きい箇所付近である平板部3面にそれぞれ貼付したひずみゲージから測定した軸周応力度と圧縮ひずみ度関係が示してある。軸周応力度は、相当応力度が試験片の引張降伏応力度の標本平均に到達(以下、降伏)するまでのモデル値である。ただし3面中1面は、試験終了まで降伏していない。鋼管中央部と下部に貼付したひずみゲージで測定した試験終了までの軸周ひずみ度は、最大で圧縮側が0.056%、引張側が0.065%であり、軸周応力度がその上部と比較して、圧縮、引張側ともに著しく小さいことが推測される。

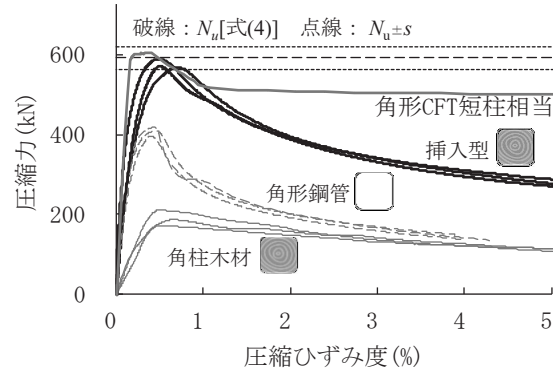
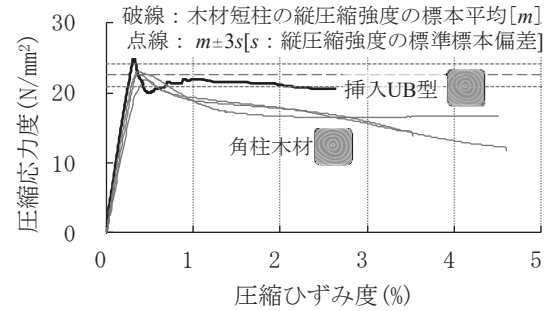
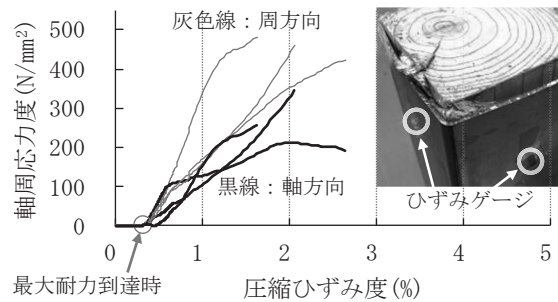


図-5 挿入型の圧縮力-圧縮ひずみ度関係



(a) 木材部の圧縮応力度



(b) 鋼管上部の平板部の軸周応力度

図-6 挿入UB型の応力度-圧縮ひずみ度関係

同図(a)に示すように、挿入UB型短柱は、木材短柱と比較して、圧縮強度到達直後の劣化勾配は激しいが、それ以降の応力度は大きく、高圧縮ひずみ度領域において圧縮靱性が高い。なお挿入UB型の圧縮強度は、木材短柱の縦圧縮強度の標本平均+3s(s:縦圧縮強度の標本標準偏差)を超えている。後者については、圧縮強度到達までの鋼管平板部に貼付してある各ひずみゲージで測定した軸周ひずみ度は、最大値で圧縮側が0.002%、引張側が0.002%である、また統計学的な推定に、標本平均および標準偏差を用いていることから、木材の不均一性による変動が影響している可能性がある。

同図(b)に示すように、鋼管平板部各3面ともに、最大耐力到達後、軸周応力度が圧縮側に著しく上昇していることがわかる。このことから、挿入UB型は、木材部が圧縮強度に到達した後の高圧縮ひずみ度領域で比較的大きい圧縮靱性を発揮すると考えられる。なお、軸周応力度ともに圧縮であるのは、鋼管部上端の膨らみにより、鋼

管平板部の側面が1.5波の形状となり、この曲げ圧縮されている面にひずみゲージが貼付してあることが起因していると考えられる。

4. おわりに

本稿で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 配置型および内接型短柱は、それぞれCFT短柱のように、最大耐力到達後、圧縮力が再上昇する現象が見受けられた。ただし、木材部が負担する圧縮力の割合が硬化グラウト部と比較して大きいほど圧縮靱性が減少する、また最大圧縮力に及ぼす各種材による相乗効果は期待できない傾向がある。
- 2) 挿入型短柱は、圧縮特性に及ぼす角形鋼管と木材による相乗効果は認められない。なお、鋼管平板部の凹凸形状の局部座屈による木材のめり込み変形は、圧縮靱性に影響を及ぼさない。
- 3) 挿入UB型は、木材部が圧縮強度に到達した後の高圧縮ひずみ度領域で比較的大きい圧縮靱性を発揮すると考えられる。

謝辞 本稿の研究成果は、愛知工業大学耐震実験センター研究助成の支援による。

参考文献

- 1) 柴尾海斗, 中原浩之: 木材を内蔵したグラウト充填鋼管の中心圧縮性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp. 1333-1334, 2019. 9
- 2) 萩尾和輝, 尾崎直哉, 鈴木智也, 山本貴正, 中原浩之: 木材を内蔵したコンクリート充填鋼管短柱の圧縮特性に関する基礎研究, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第58号, pp. 73-76, 2020. 2
- 3) 陳逸鴻, 中原浩之, 坂井美佳子, 笠飯翔平: 鋼管に木とグラウトを充填した合成構造部材を用いた圧縮抵抗型ブレースの開発に関する実験的研究, コンク

リート工学年次論文報告集, Vol. 43, No. 2, pp. 595-600, 2021

- 4) 宮木聡, 松井千秋, 津田恵吾, 畑戸龍夫, 今村輝武: 遠心成形コンクリート充填鋼管柱の軸圧縮性状, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 482, pp. 121-130, 1996. 4
- 5) 芦田恭子, 中原浩之, 脇岡幸輝, 山本剛, 石橋宏一郎: ボランティアによるCFTブレース耐震補強の普及スキームに関する基礎研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第54号, pp. 529-532, 2015. 3
- 6) 福沢公夫, 沼尾達弥, 半田健二, 清田章二: 中空鋼管コンクリート合成部材の軸方向圧縮耐力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 9, No. 2, pp. 543-548, 1987
- 7) 小橋弘樹, 中塚侑, 大和真一, 山本裕之: 円筒コンファインドコンクリートの強度・変形特性におよぼす材料強度の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp. 217-222, 2000
- 8) 小橋弘樹, 中塚侑, 大和真一: 円筒コンファインドコンクリートの強度・変形特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 21, No. 3, pp. 241-246, 1999
- 9) 石渡康弘, 伊藤有美, 小松博: アルミニウム箱形断面材と木材による合成構造柱に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 746, pp. 647-657, 2018. 4
- 10) 日本住宅木材・技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, pp. 13-14, 2011. 3
- 11) 山田嘉昭: 塑性・粘弾性, 培風館, 初版, 1980. 12
- 12) 中原浩之, 崎野健治, 稲井栄一: コンクリート充填角形鋼管柱の中心圧縮性状のモデル化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 20, No. 3, pp. 817-822, 1998

(Received September 10, 2021)

AXIAL COMPRESSIVE TEST OF STEEL TUBE HAVING WOOD INSIDE

Tamasa YAMAMOTO and Hiroyuki NAKAHARA

The compressive behavior of composite columns was experimentally investigated. Two different types of short columns of specimens were tested. One was composed of steel tube, cement grout and wood. The other was simple combination of steel tube and wood. In the case of the composite short columns using grout, the compressive force was increased again after reaching the maximum compressive force as well as the compressive behavior of CFT short columns. The strength enhancement due to synergistic effect of the various materials was not observed. As for the short columns composed of the square steel tube with inserted square wood, which not using grout material, local buckling of the steel tube occurred. The partial increases of compressive strain by the local buckling did not decrease the ductility of the specimens.