

鋼管に木とグラウトを充填した合成構造柱の 中心圧縮性状に関する基礎的研究（その3）

中原 浩之*・陳 逸鴻*・坂井 実佳子**

Experimental Study of Centrally Loaded Column Composed of Steel Tube, Timber and Grout (part 3)

by

Hiroyuki NAKAHARA*, Iathong CHAN*, Mikako SAKAI**

The authors have developed a new hybrid member composed of wood, cement grout and steel tube (WGFT). This is similar to the concrete filled steel tube (CFT), because the wood occupies the inner space of steel tube mainly, and WGFT has advantages of its weight against to CFT. Also, WGFT is made of cement grout which is easy to get and cast than the high flow concrete casted in CFT. WGFT was developed to use for seismic retrofitting brace for reinforced concrete structure. In the previous tests, the authors have tested short columns and six long columns under concentric compression. The main test parameters are shapes of the steel tube and diameter of the inner wood. The axial stiffness and strength decreased according to the increases of the sectional area of the wood. After the investigation for the behavior of the short columns of WGFT, centrally loading test was conducted for the long columns. These specimens failed in buckling and attained the maximum strength. These results showed that the axial load carrying capacities were estimated by the summation of buckling strength of each component. The paper shows that the possibility of actual use of WGFT for seismic retrofit.

Keywords : Composite columns, Seismic retrofit, Brace member, CFT, Axial loading test

1. はじめに

コンクリート充填鋼管（CFT）に関しては、多くの実験および解析研究が報告されている¹⁾。CFTは、鋼管の内部にコンクリートを充填した構造で、これまでの研究から、強度、剛性、靱性に優れた性能を示す性能が明らかとなっており、我が国の研究成果は日本建築学会「コンクリート充填鋼管構造設計施工指針」²⁾（以下CFT指針と呼ぶ）に纏められている。これらの知見を踏まえ、著者らは、CFTを耐震補強材として利用する研究を進めている^{3) 4)}。現在、日本だけでなく世界中で耐震補強の需要が高まっている。しかし、離島や山間部のような重機を使用できない地域が存在するため、耐震補強のCFTをさらに軽量化させ、施工を簡易化する要求が出てきている。

補強材を軽量化する案としては、CFRPによる鋼管

の側面補強案、二重鋼管案、遠心形成による空洞案などが考えられたが、本研究では、鋼管内に木材を内蔵し、鋼管と木材の間にできる隙間にグラウト（無収縮モルタル）を充填した新しい合成構造材（以下、WGFTとする）を提案した。既報⁵⁾、⁶⁾において、このWGFTの基本性状を報告している。

本研究は、同名の既報において、検討が十分でない長柱の実験を追加するものである。同時に行っている短柱試験体は、いわば材料試験に相当するものであり、こうした新しい構造を提案するにあたり、実験結果を積み上げてきている。

* システム部門（Division of System Science）

** 工学研究科（Graduation School of Engineering）

本研究により、WGFTの基礎性能が保証されれば、手作業での施工を可能とした簡易耐震補強法のさらなる改善に貢献できると考える。

2. 実験計画

本報では、新しく提案したWGFTについて、300mm試験体を中心とした基礎的性状検討用短柱試験体シリーズ（以下、短柱シリーズとする）と1700mm試験体を中心とした実用性状検討用長柱試験体シリーズ（以下、長柱シリーズとする）の2つの中心圧縮実験プログラムを実施して、その力学的性能について調べる。文献2)を参照して、座屈長さ l_k が4以下を短柱、12以上を長柱と定義している。なお、長柱シリーズには、材料試験としての300mm試験体を含んでいる。

2.1 使用材料

試験体の使用材料をTable 1-1,1-2,1-3に示す。

Table 1-1に示す鋼材の材料試験結果は、冷間成形鋼管から切り出した試験片の引張試験より得られたものであり、円形鋼管はJIS規格SKT400_101.6×3.2、角形鋼管はJIS規格STKR400_100×3.2を用いた。

Table 1-2に示すグラウトの圧縮強度は、試験体打設後の際に製作したφ100×200の圧縮強度試験用供試体を軽量型枠に入れたまま、試験体と同様に室内養生し、端面研磨処理後に、試験を実施した結果である。

Table 1-3に示す木材の基準強度は、文献7)のすぎ甲種構造材3級の基準強度を用い、ヤング係数は文献8)を参照した。

2.2 試験体形状

例として、300mm、1700mmの角形試験体をFig. 1に示す。試験体名の付け方は下のよう設定した。

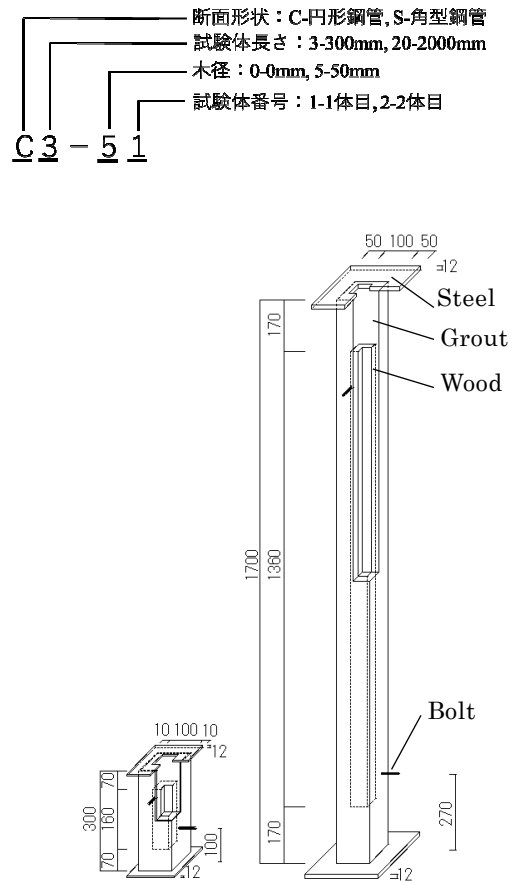


Fig. 1 Shape of the specimen

Table 1-1 Material properties of steel tubes

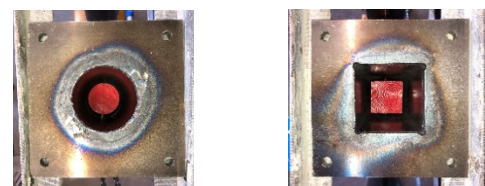
Standard	Yield strength	Young's modulus
	N/mm ²	kN/mm ²
STK400	328	207
STKR400	356	186

Table 1-2 Material properties of cement grout

Placement date	Test date	Age	Compressive strength	Young's modulus
		day	N/mm ²	kN/mm ²
2019.4.23	2019.6.17	55	66	27

Table 1-3 Nominal strength and stiffness of wood

Tree species	Dividion	Grade	Compressive strength	Young's modulus
			N/mm ²	kN/mm ²
Ceder	Class A structural	Level 3	18	7



(a) Circular

(b) Square

Photo. 1 Top view of the test specimens

2.3.a 要素実験の短柱試験体について

実験変数は、断面形状（C-円形鋼管、S-角形鋼管）、試験体長さ（300mm、 $l_k=396$ mm）、木径もしくは木幅（0mm、50mm、70mm）とした。試験体数は、円形試験体9本、角形試験体9体の計18体である。

2.3.b 長柱試験体について

実験変数は、断面形状（C-円形鋼管、S-角形鋼管）、試験体長さ（1700mm、 $l_k=1950$ mm）、木径もしくは木幅（0mm、70mm）とした。試験体数は、円形試験体3本、角形試験体3体の計6体である。

2.4 作製方法

試験体作製の工程は、以下の通りである。

- 1) 鋼管と木材の中心が合うように、鋼管と木材を固定する寸切りボルトを通すための孔を設ける。
- 2) 寸切りボルトで木材を鋼管の中心に固定し、ナットで留める。Photo. 1 参照
- 3) 上端エンドプレートには打設孔を設け、試験体上下にエンドプレートを溶接する。
- 4) 試験体にグラウトを注入および強度試験用の供試体を作製する。
- 5) 4~8 週間の室内養生をする。
- 6) 上端エンドプレートの打設面を平滑にする。

300mm 試験体には上下端に厚さ 12mm の加力用プレートを、1700mm 試験体には上端に厚さ 9mm、下端に厚さ 12mm の加力用プレートを設けた。さらに、両試験体の上端プレートには、グラウト材打設孔を設けた。

本実験では、打設する際に、試験体の中に木材が固定されており、狭所へグラウトを流し込む必要がある。そこで、流動性、充填性に優れた無収縮グラウトを用いて、縦打ちとした。また、同一強度のグラウト材の打設は、一括して同一日に実施した。

試験体作製に関して以下の 2 つに注意した。1 つ目は、木材の虫害や腐食防止のために、木材を試験体内部に完全封筒し、外気に触れないようにした。2 つ目は、2 本の寸切りボルトは、直角方向に互い違いで通し、試験体に対して木材を中心に固定することで、座屈した際、曲げ剛性に影響を与えないように考慮した。

2.5 実験装置

2.5.a 短柱シリーズ

短柱試験体の中心圧縮実験の加力方法と測定方法を Fig. 2 に示す。試験体において、加力は試験体上下の拘束条件をピン固定とした単調載荷を行う。載荷は、変位が 2% に達するまで行うことを原則とした。

変位計による変位の測定は、試験体上下プレート間の軸方向変形について行う。短柱試験において、加力時の治具のずれを解消するため、試験体の両側に 2 つずつ変位計を設置し実験を行った。弾性ひずみゲージによる鋼管ひずみの測定は、試験体中央位置に、円形試験体では弾性二軸ゲージを 3 枚貼付し、角形試験体では弾性一軸ゲージを 4 枚貼付して行う。

載荷荷重の測定は、ロードセルを用いて行い、設置位置はアムスラー試験機と試験体の間とした。また、以下では、著者らの荷重-変形関係の解析結果^{9) 10)}も掲載し、WGFT 短柱の中心圧縮性状について考察する。

2.5.b 長柱シリーズ

長柱試験体の中心圧縮実験の加力方法と測定方法を Fig. 3 に示す。試験体において、加力は試験体上下の拘束条件をピン固定とした単調載荷を行う。載荷は軸ひずみが 2% に達するまで行うことを原則とした。

既往の研究から、長柱試験体の計測においては、ひずみゲージによる変形の測定が有力とみられたため、今回の実験では変位計を用いずに、弾性ひずみゲージのみによる計測とした。弾性ひずみゲージによる鋼管ひずみの測定は、試験体上部、中央、下部に、円形試験体中央のみ弾性二軸ゲージを 4 枚貼付し、その他は全て弾性一軸ゲージを 4 枚貼付して行う。試験体中央は、座屈によりひずみゲージに曲げがかかってしまうため、曲げの影響が少ない上部、下部にひずみゲージを設置することで補完的に変形を観測する。

載荷荷重の測定は、ロードセルを用いて行い、設置位置はアムスラー試験機と試験体の間とした。

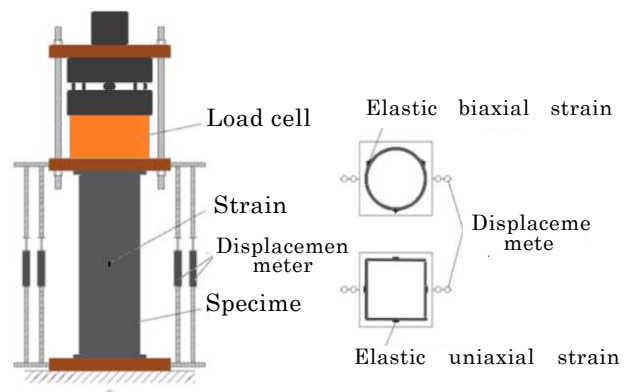


Fig. 2 Loading condition and measuring devices (short columns)

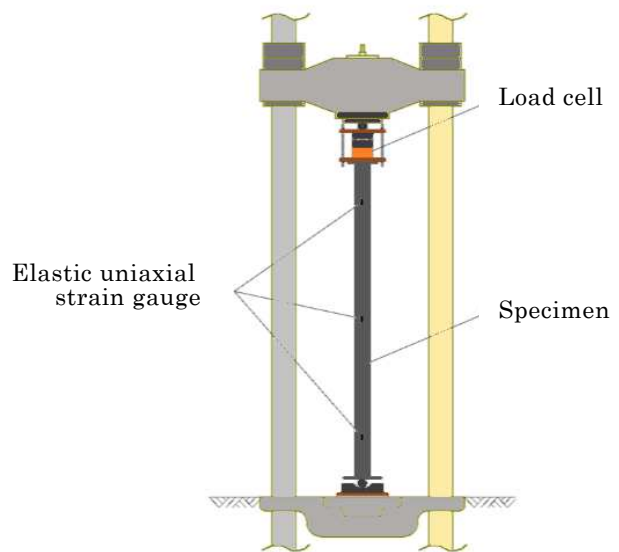


Fig. 3 Loading condition and measuring devices (long columns)

3. 短柱シリーズ試験体結果

Table 2 に短柱試験体シリーズの一覧を示す。表では、実験の軸剛性と圧縮強度を併せて示す。これらは、後述する計算結果との比較がなされている。

3.1 荷重-軸ひずみ関係

代表例として、C3-52 と S3-51 の実験より得られた荷重-軸ひずみ関係と実験後試験体を Fig. 4.a, b に示す。図には、構成要素の荷重-軸ひずみ関係モデルを総和した解析結果も載せており、実験と比較している。2 例とも、実験は解析で予想された剛性・耐力とほぼ同等の値となっている。この傾向は、他の試験体も同様で、次節において剛性と耐力の評価精度について述べる。

3.2 軸剛性評価

Table 2 に示す実験の剛性は、3.1 節に示す各荷重-軸ひずみ関係上の、最大耐力の 2/3 までの観測点における最小二乗法による回帰直線である。計算の軸剛性は、構成要素それぞれの断面積に表 1 にまとめたヤング係数を乗じて加算したものである。木材の置換率が上がるほど、軸剛性が下がるという結果がわかる。

Fig. 4 で見た通り、この計算剛性では、円形がやや過小評価、角形試験体では、過大評価となっている。ひずみゲージのデータから得られる軸剛性は、通常の CFT 試験体でも Table 2 程度のばらつきは観測され、木材やグラウトの品質が大きく影響しているとは考えていない。軸剛性については、今後は、変位計の測定結果も含めて、より詳細に検討を進める予定である。

Table 2 Test results (short columns)

Test Specimen	Depth	Thickness	Depth of thickness ratio	Height	Depth of Wood	Axial Stiffness			Compressive Strength							
	D	t				D/t	H	d	EA_{exp}	EA_{cal}	EA_{exp}/EA_{cal}	N_{exp}	N_0	N_{exp}/N_0		
	mm	mm				—	mm	mm	MN	MN		kN	kN			
C3-01	101.6	3.2	31.75	300	0	404	398	1.02	880	791	1.11					
C3-02						293		0.74			820	1.04				
C3-03						414		1.04			887	1.12				
C3-51					50	372	358	1.04	750	697	1.08					
C3-52						308		0.86			749	1.08				
C3-53						379		1.06			764	1.10				
C3-71						70		279			320	0.87	673	607	1.11	
C3-72								350				1.09			671	1.11
C3-73								368				1.15			607	1.00
S3-01					100.0		3.2	31.25	300	0		373			462	0.81
S3-02						368					0.80	1065	1.07			
S3-03						374					0.81	1102	1.11			
S3-51						50				384	411	0.93	971	877	1.11	
S3-52	646	1.57	793	0.90												
S3-53	465	1.13	919	1.05												
S3-71	70	314	363	0.87		719				762	0.94					
S3-72		379		1.04							838	1.10				
S3-73		357		0.98							839	1.10				



Fig. 4 Relations between axial force and axial strain of test and analysis

3.3 圧縮耐力評価

圧縮耐力の予測には、以下の(1)式を用いた。

$$N_0 = s\sigma_c \cdot sA + g\sigma_c \cdot gA + w\sigma_c \cdot wA \quad (1)$$

$s\sigma_c$: 鋼管圧縮強度, sA : 鋼管断面積

$g\sigma_c$: グラウト圧縮強度, gA : グラウト断面積

$w\sigma_c$: 木材圧縮強度, wA : 木材断面積

試験体の形状や長さを問わず、圧縮強度は、 N_0 によって精度よく耐力評価が可能と言える。Fig. 4 より、明瞭な鋼管の局部座屈が観察され、この局部座屈によって最大耐力が決定したものと考えられる。

4. 長柱シリーズ試験体結果

Table 3 に長柱試験体シリーズの一覧を示す。表では、実験の軸剛性と圧縮強度を併せて示す。これらは、後述する計算結果との比較がなされている。

4.1 荷重-軸ひずみ関係

Fig. 5. a に円形、Fig. 5. b に角形の荷重-軸ひずみ関係を示す。円形は、剛性・座屈耐力ともに木材無が木材有を上回り、期待通りの結果が得られた。角形は、剛性は木材無が木材有を上回り、座屈耐力は木材有が木材無を上回ったがその差は小さく、ともに期待通りの結果が得られたと言える。

4.2 木材の影響

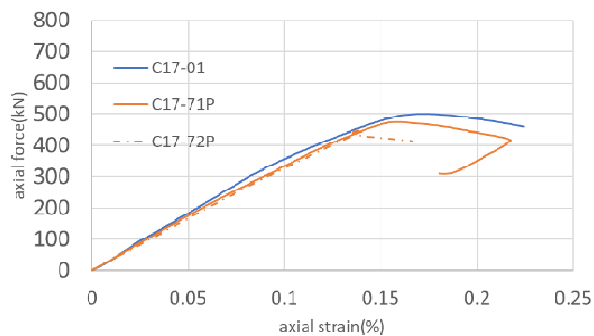
Fig. 6.1 に木材の有無による座屈耐力、Fig. 6.2 に木材の有無による重量の変化を、円形試験体と角形試験体ごとに示す。グラフ内の平均値は、C17-71 と C17-72 の実験値の平均を取った値である。WGFT 柱の一部グラウトが木材に置換されていることにより、円形試験体、角形試験体ともに 20%重量を減少させることができている。それに伴う耐力の変化をみてみると、円形試験体では 8%減少し、角形試験体では 2%増加している。まだ試験実施本数が少ないため、統計的な考察は難しいが、試験体中央に木材を入れることによる耐力の低下が、本実験のように小さいことが確認できれば、約 20%の重量減少が耐力減のデメリットを相殺するため、WGFT の実用は十分可能であると考えられる。

4.3 軸剛性評価

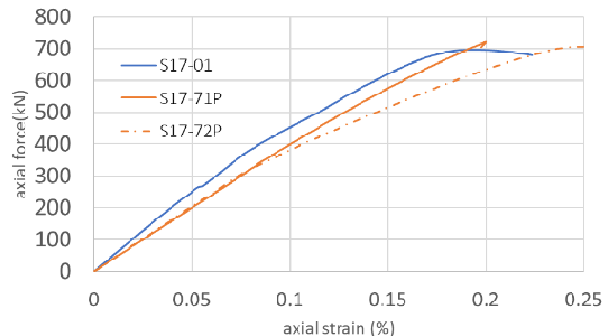
Table 3 に示す実験の剛性は、4.1 節に示す各荷重-軸ひずみ関係上の、最大耐力の 2/3 までの観測点における最小二乗法による回帰直線である。計算の軸剛性は、構成要素それぞれの断面積に Table 1 にまとめたヤング係数を乗じて加算したものである。これらは、短柱で見られたようなばらつきも少なく、実験値と計算値の対応は良好である。

Table 3 Test results (long columns)

Test Specimen	Depth	Thickness	Depth of thickness ratio	Height	Depth of Wood	Axial Stiffness			Compressive Strength			Weight kg
	D	t	D/t	H	d	EA_{exp}	EA_{cal}	EA_{exp}/EA_{cal}	N_{exp}	N_{cr}	N_{exp}/N_{cr}	
	mm	mm	—	mm	mm	MN	MN		kN	kN		
C17-01	101.6	3.2	31.75	1700	0	368	398	0.93	499	529	0.94	48
C17-71P					70	332	320	1.04	474	415	1.14	39
C17-72P					70	332	320	1.04	446	415	1.07	39
S17-01	100.0	3.2	31.25	1700	0	464	462	1.00	698	737	0.95	57
S17-71P					70	391	363	1.08	722	553	1.31	46
S17-72P					70	355	363	0.98	706	553	1.28	46



(a) Circular



(b) Square

Fig. 5 Relations between axial force and axis strain

4.4 圧縮耐力評価

WGFT 長柱の座屈試験については、長柱試験体の座屈耐力算定式(2)^{2) 11) 12)}を参照して実験結果を考察する。式(2)では、構成要素の累加座屈強度が算出される。ここでは、木材は座屈強度が無視できるほど小さいので、その耐力を0と仮定して、カラムカーブを計算した。

$$N_{cr} = sN_{cr} + gN_{cr} + wN_{cr} \quad (2)$$

N_{cr} : 累加座屈荷重

sN_{cr} : 鋼管の座屈荷重

gN_{cr} : グラウトの座屈荷重

wN_{cr} : 木柱の座屈荷重 ($wN_{cr} = 0$)

カラムカーブを Fig. 7. a, b に示し、図上に実験結果をプロットしている。ここで、木材無の試験体を GFT と表している。短柱試験体の実験結果は一部を除いて予想強度を上回っている。しかし、長柱試験体においては、木材の有無、試験体の形状に関わらず、木材無の強度と木材有の強度の間にプロットされている。即ち、今回の実験では、長柱において、木材の有無が耐力の及ぼす影響が小さいといえる。実験と計算の誤差は、剛性評価よりも大きくなっている。これは、座屈耐力は、試験体そのものが真直でないことや、支点治具における回転抵抗のわずかな変化に影響されるためである。このような条件であっても、Fig.7 で見れば、長柱試験体の実験結果は、累加座屈強度により、精度良く評価できているといえる。

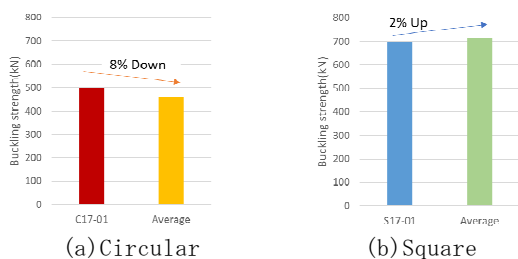


Fig. 6-1 Buckling strength

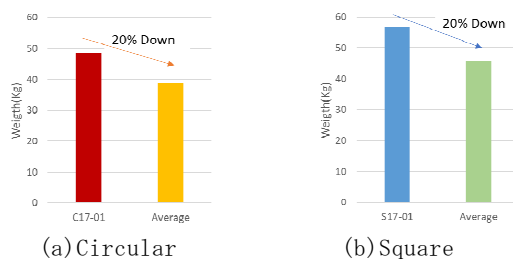
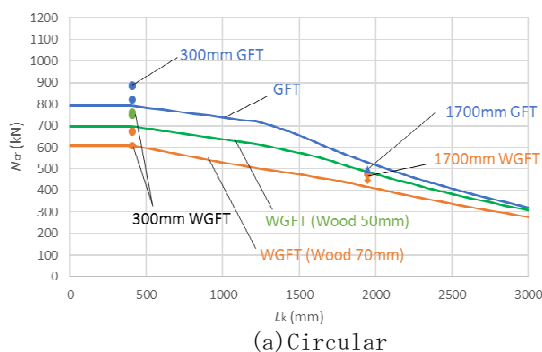
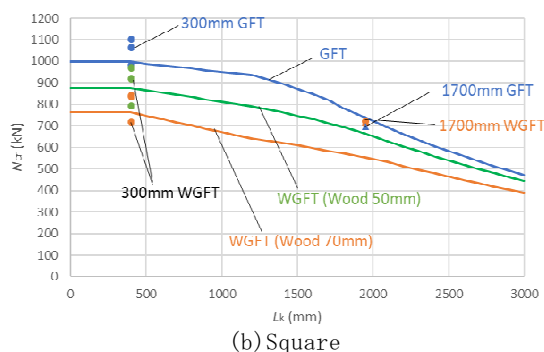


Fig. 6-2 Weight



(a) Circular



(b) Square

Fig. 7 Comparisons between experiments and calculations

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に列挙する。

- 1) CFT 構造の軽量化を図り、CFT の充填材に木材とグラウトを使用した構造 WGFT を提案し、長さ 300mm の短柱試験体、長さ 1700mm の長柱試験体を計画通りに作製することができた。
- 2) 一部の例外を除き、グラウトから木材への置換率が上がるほど、最大耐力は下がり、文献 5)–6) と同様の傾向が確認できた。
- 3) 短柱の実験耐力を構成要素の単純累加耐力で評価した場合、精度よく評価できた。
- 4) 短柱の最大耐力後の変形挙動は、通常の CFT と比較して靱性に乏しい挙動が観測された。この原因として、材軸方向におけるグラウトから木材の切り替え部の局所的な破壊が起因していると考えられる。
- 5) 短柱の荷重–軸ひずみ関係モデルを総和した解析と実験値を比較した場合、解析は実験の剛性を過大評価し、耐力を過小評価する傾向にあった。
- 6) 長柱試験体において約 20%の軽量化が実現できた。
- 7) 長柱の耐力は、円形試験体では 8%減少し、角形試験体では 2%増加している。この差は、6)で述べた軽量効果に比して影響が小さい。

6. 今後の課題

本報で検討した、WGFT 長柱試験体は、円形および角形で、それぞれ 3 体にとどまり、実験結果は少ない。今後はさらに試験体を追加して中心圧縮実験のデータを蓄積することで、WGFT 長柱のブレースとしての性能を確立して、耐震補強材としての実用化を目指す。

参考文献

- 1) Nishiyama, I. *et al.* :Summary of Research on Concrete-Filled Structural Steel Tube Column System Carried Out Under The US-JAPAN Cooperative Research Program on Composite and Hybrid Structures, BRI Research Paper No.147, Jan. 2002.
- 2) 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
- 3) 中原浩之, 他：CFT ブレースにより耐震補強を施した実在建物の静的水平加力実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78 ,No.688, pp.1131-1138, 2013 年 6 月
- 4) Nakahara, H. and Ashida, Y. :Trial Construction for Seismic Retrofit by CFT Brace on an Isolated Island, Proceedings of the 8th International Structural Engineering and Construction Conference, pp.437-442, Nov. 2015.
- 5) 中原浩之,塚本涼太：鋼管に木とグラウトを充填した合成構造柱の中心圧縮性状に関する基礎的研究, 長崎大学工学研究科研究報告第 48 巻 第 91 号,2018 年 6 月
- 6) 中原浩之,塚本涼太：鋼管に木とグラウトを充填した合成構造柱の中心圧縮性状に関する基礎的研究 (その 2), 長崎大学工学研究科研究報告第 49 巻 第 93 号,2019 年 8 月
- 7) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会, 2007 年版建築物の構造関係技術基準解説書, 2007
- 8) 佐治泰次：建築構法, 1981, 理工学社
- 9) 中原浩之,稲井栄一,崎野健治:コンクリート充填角形鋼管短柱の中心圧縮耐力：構造工学論文集, Vol.44B , pp.167-174,1998 年 3 月
- 10) 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短柱の中心圧縮耐力,構造工学論文集, Vol.48B, pp.231-236, 2002 年 3 月
- 11) 津田恵吾,松井千秋：コンクリート充填鋼管柱の累加座屈荷重,鋼構造論文集,第 3 巻第 9 号, pp.485-494,1996.3.
- 12) 津田恵吾,松井千秋,石橋靖夫:コンクリート充填鋼管柱の座屈耐力,構造工学論文集,Vol.42B, pp.285-298, 1996.3.