

# 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

中原 浩之\*, 塚本 涼太\*\*

## Experimental Study of Centrally Loaded Column Composed of Steel Tube, Timber and Grout

by

Hiroyuki NAKAHARA\*, Ryota TSUKAMOTO \*\*

The authors have been developing a seismic retrofit method by using concrete filled steel tubular (CFT) brace acting in compression. The customers asked two requests to this method. One was weight saving and the other was the replacement of high flow concrete to cement grout. The high flow concrete is usually used to normal CFT, but it is sometimes difficult to be available in developing countries and/or isolated islands. A new composite brace of steel tube, timber and grout has been developed. The proposed brace is similar to CFT, and it is made by setting the timber in the steel tube at the central position of the section. The gap between the steel tube and the timber is filled by cement grout. The proposed columns were tested under axial compression to obtain the basic structural property. These results showed that the axial force carrying capacities were estimated by summation of nominal squash load of each component. The paper shows that the possibility of actual use of grout filled steel tube including timber to the seismic retrofit.

**Key words :** Composite columns , Seismic retrofit, Brace member, CFT, Axial loading test

### 1 はじめに

著者らは、コンクリート充填鋼管 (CFT) に関する、基礎的な性状を明らかにするべく、実験および解析的研究を継続して、実施してきている<sup>1)</sup>。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ことが明らかとなっている<sup>2)</sup>。上記の知見を踏まえ、当研究室では、CFT を耐震補強材として利用する研究も進めている。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では、従来の耐震補強法の適用が難しく、普及が進んでいない。著者らが開発した CFT を用いた耐震補強法は、補強部材を圧縮のみに抵抗させるため、枠材を不要とした簡易施工を可能とし

ている<sup>3)</sup>。また、鋼管のみをまず、補強対象建物に設置して、その後、コンクリートを充填する為、施工時重量が著しく小さくなる。そのため、手作業による設置も可能となり、実証実験によりその施工性能を検証済みである<sup>4), 5), 6)</sup>。このように、耐震補強材の軽量化と簡易施工を実現してきたが、耐震補強材のさらなる軽量化と、施工方法のさらなる簡便化の要請が出てきている。

補強材を軽量化する案としては、例えば (1) CFRP による鋼管の側面補強案、(2) 二重鋼管案、(3) 遠心成形による空洞案、などが考えられる。

\* システム科学部門 (Division of System Science)

\*\* 工学研究科 (Graduate School of Engineering)

(1)のCFRPによる鋼管の側面補強案については、先行研究がある<sup>7)</sup>。文献7)では、CFRPを鋼管の側面に貼り付けて補強した試験体の中心圧縮実験により、その補強効果を検討している。この実験結果は、まだ論文として公表されていないが、関連の卒業研究を参照すると、実験の最大値は、計算の予測値を大幅に下回り、炭素繊維プレートの価格に見合う補強効果が見込めないことが分かっている。

(2)の二重鋼管案では、鋼管を2つ使用するので鋼材費用が2倍となる。また、鋼材の比重が、7.85であることを考えると相当薄いものを使用しないと、軽量化が図れない。したがって、コスト面と軽量化の双方で、これを採用するメリットが見いだせない。CFTには、通常エンドプレートが溶接されるが、二重鋼管とするとこの溶接が困難となり、施工面での有利さも見込めない。

遠心成形は、電信柱の製作などに用いられる。この技術を利用するには、遠心成形機を完備した工場の製作による大量生産が必須の条件で、これがない場合は、実現性がない。

現在、本研究は、発展途上国での耐震補強も視野に入れて進めており、上記に示した3つの軽量化案の実用は困難であると考え。そこで、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と呼ぶ）を提案する。木材は、国内外を問わず比較的入手可能な材料である。また、木材を内蔵することにより多少の軽量化を図ることができる。一方で、CFTに使用する高流動コンクリートは、発展途上国で入手することが難しい。本提案では、高流動コンクリートの代替材として、市販のグラウトを使用することにした。木材を内蔵することにより、グラウトの使用量を減じることで現場作業の効率化も図る。

こうした新しい構造を提案するに当たり、まず最も基本的な短柱の中心圧縮性状を実験研究により調べ、WGFT実用の可能性を検討する。基礎的な性状を確認できた後、WGFT長柱の実験を実施して、これを耐震補強材として実用できるかどうか確認する予定である。

本研究により、WGFTの基礎性能が保証されれば、将来的に手作業での施工を可能とした当研究室の簡易耐震補強のさらなる発展に貢献できると考える。

## 2 実験計画

新しく提案したWGFT短柱の基礎性状を調べるために中心圧縮試験を実施する。CFT短柱の中心圧縮

試験については、これまで多数の実験結果がある。ここでは、著者らの実験及び解析研究<sup>8), 9)</sup>を参照して、WGFT短柱の中心圧縮性状について考察する。

### 2.1 試験体

試験体一覧を表-2.1に示す。実験変数は、断面形状（C-円形鋼管、S-正方形鋼管）、試験体高さ、木径もしくは木幅とした。試験体高さは300mmと600mmである。木径（幅）は0mm、30mm、50mm、70mmの4種類である。試験体長さ300mmの試験体数は、円形試験体12本、角形試験体12本の計24本である。試験体長さ600mmの試験体数は、円形試験体5本、角形試験体5本の計10本である。また、表-2.1には中空鋼管試験体4体も含まれている。

高さ600mmの試験体形状を、図-2.1に示す。試験体形状を写真2.1.a,b,cに示す。鋼管は、市販の冷間成形管であるSTKもしくはSTKRを使用した。試験体の製作で、最も注意したのは、木材を試験体の中央に設置することである。この試験体では、虫害や腐食による木材の劣化防止のために、木材をグラウト充填により試験体内に完全封函し、外気に触れないように考慮した。また、剛性の低い木材を断面中心に配置しても、材全体としての曲げ剛性は大きく低下しない。そのため、前述のとおりWGFT長柱として使用した場合の座屈耐力低下を抑える効果があると考えている。

鋼管の側面には木材を固定する寸切りボルトを通すための孔を設けた。寸切りボルトは、直交方向に上下互い違いで通し、木材を中心に固定する。

300mm試験体には、鋼管の上下に厚さ2.3mm、600mm試験体には、鋼管の上下に厚さ6mmの加力用プレートを設け、さらに上端プレートにはグラウト材打設用の孔を設けた。

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、狭所へコンクリー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た。グラウト材の打設は縦打ちとした。

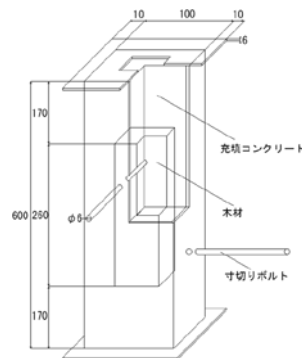


図 2.1 600mm 角形試験体

表 2.1 試験体一覧

試験体	幅	板厚	幅厚比	高さ	木径	コンクリート 充填
	D mm	t mm	D/t	H mm	L mm	
C3-00	101.6	3.2	31.75	300	0	無
C3-01						有
C3-02						
C3-03						
C3-31						
C3-32						
C3-33						
C3-51						
C3-52						
C3-53						
C3-71	70					
C3-72						
C3-73						
C3-73						
S3-00	100	3.2	31.25	300	0	無
S3-01						有
S3-02						
S3-03						
S3-31						
S3-32						
S3-33						
S3-51						
S3-52						
S3-53						
S3-71	70					
S3-72						
S3-73						
S3-73						
C6-00	101.6	3.2	31.75	600	0	無
C6-01						有
C6-31						
C6-51						
C6-71	70					
S6-00		100	31.25	600	0	無
S6-01						有
S6-31						
S6-51						
S6-71	70					
S6-71						



写真 2.1.c 打設後試験体一覧

## 2.2 使用材料

試験体の鋼材の材料試験結果一覧を表 2.2 に示す。ここで鋼材の材料試験結果は、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る。円形鋼管は JIS 規格 STK400\_101.6×3.2 で、角形鋼管は JIS 規格 STKR400\_100×3.2 である。

表 2.2 鋼材の材料試験結果

規格	降伏強度	引張強度	ヤング係数
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
STK400_101.6×3.2	359	447	208
STKR400_100×3.2	357	454	195

300mm 試験体、600mm 試験体に使用したグラウトの材料試験結果を表 2.3.a,b に示す。

これらは、試験体打設の際に製作した 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ものである。

表 2.3.a グラウトの材料試験結果(300mm)

打設日	試験日	材齢	圧縮強度	静弾性係数
		日	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
2016/12/12	2017/1/18	38	62	23

表 2.3.b グラウトの材料試験結果(600mm)

打設日	試験日	材齢	圧縮強度	静弾性係数
		日	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
2017/6/26	2017/8/28	62	69	23

木材の基準強度一覧を表 2.4 に示す。木材の基準強度は平成 12 年建設省告示 1452 号、及び日本建築学会の「木質構造設計基準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-」に基づき、すぎ甲種構造材 3 級の基準強度を用いた。

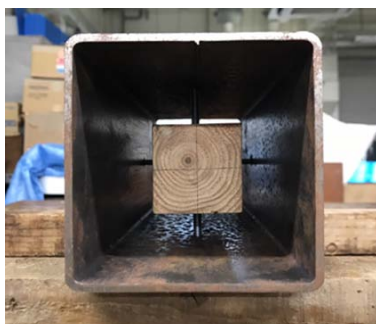


写真 2.1.a 角形鋼管



写真 2.1.b 円形鋼管

表 2.4 木材の基準強度

樹種	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>
スギ	18	14	7

### 2.3 作業手順

試験体作製の工程は以下の通りである。

- 1) 鋼管の中央に木材が配置されるように、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。写真 2.1.a,b,c を参照。
- 2) 木材と鋼管を寸切りボルトで固定し、ナットで留める。
- 3) 試験体上下に加力用プレートを溶接する。上端エンドプレートには打設用の孔を設ける。
- 4) 試験体にグラウト材注入する。
- 5) 4~8 週間の室内養生。
- 6) 上端エンドプレートの凹凸のあるグラウト打設面を平滑にする。

### 2.4 加力方法

試験体の中心圧縮実験の加力方法を図 2.4 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。

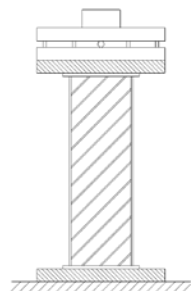


図 2.4 加力方法

### 2.5 測定方法

変位測定位置および弾性ひずみゲージ貼付位置について、600mm 試験体を例として図 2.5 に示す。

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。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 枚貼付して行った。

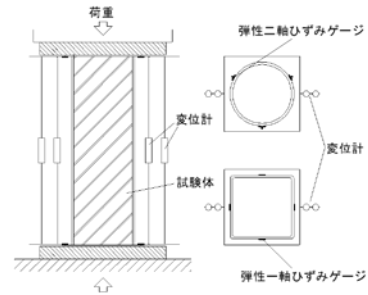


図 2.5 測定方法

### 3 実験結果

実験後の試験体様子を写真 3.a, b に示す。写真 3.a では、試験体名 C3-53 と S3-53 を一例として示している。写真 3.b では、試験体名 S6-51 と C6-51 を一例として示している。長さに関わらず、鋼管の局部座屈が発生して、最大耐力を発揮したものと思われる。

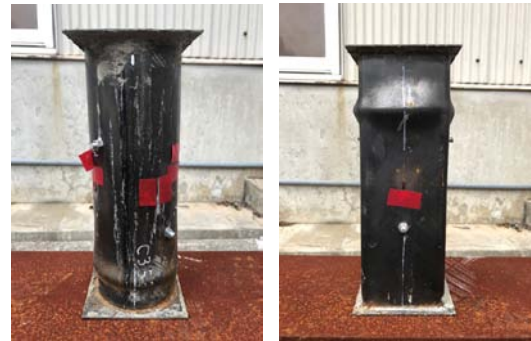


写真 3.a 実験後の 300mm 試験体



写真 3.b 実験後の 600mm 試験体

#### 3.1 軸力-軸ひずみ関係

実験より得られた試験体の荷重-ひずみ関係を図 3.1 に示す。図には、構成要素の応力-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。

図 3.1.a に高さ 300mm の円形試験体 (C3-71,72,73) について示す。この実験は、木の内蔵率が最も大きい試験体である。試験体は、3 体同じものを用意した。

実験のばらつきは小さいため今後はこのように複数の同一試験体を作製する必要はないと考えられる。解析は、実験の荷重-変形関係を精度よく追跡できており、想定通りの実験結果が得られた。図 3.1.b に高さ 300mm の角形試験体 (S3-31,32,33) の結果を例示している。ここでも、同一試験体のばらつきは小さい。解析は、実験の初期状況における剛性軟化を評価できていない。これは、冷間成形管の特性が、解析モデルに反映されていないからである。

高さ 600mm 試験体については、円形 (C6-31,71) と角形 (S6-31,71) の結果を図 3.1.c, d, e, f に示している。円形試験体の初期剛性については、解析は実験を精度よく評価できているが、最大耐力は過大評価している。木材を挿入したことにより、靱性能が低下していることが危惧され、さらなる検討が必要と考えられる。一方、角形試験体は、鋼管の塑性加工の影響を受け、実験剛性が解析よりも低くなっている。また、実験の最大耐力は円形と同様に解析は実験を過大評価している。長さの影響も含めて、今後の課題としたい。

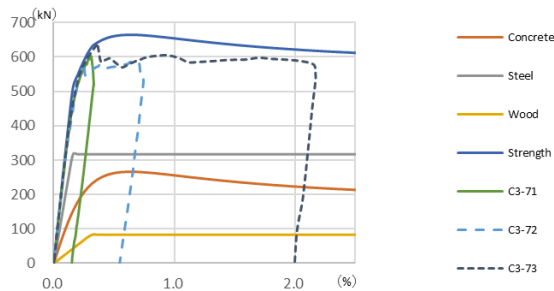


図 3.1.a 荷重-ひずみ関係 (300mm 円形)

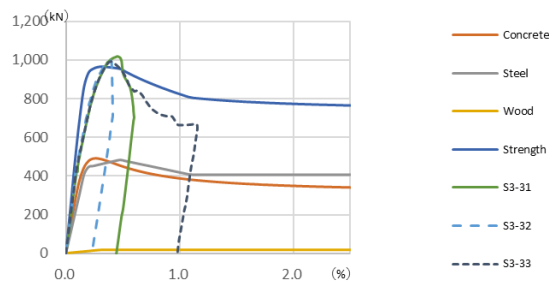


図 3.1.b 荷重-ひずみ関係 (300mm 角形)

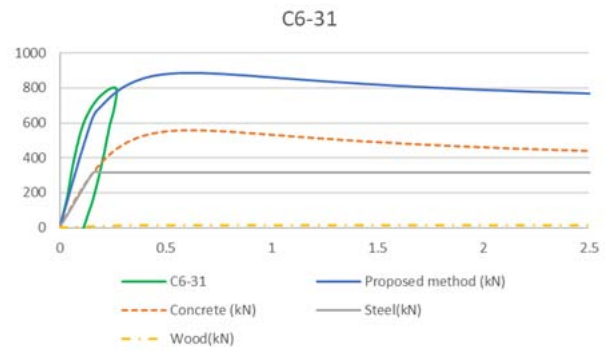


図 3.1.c 荷重-ひずみ関係 (600mm 円形鋼管)

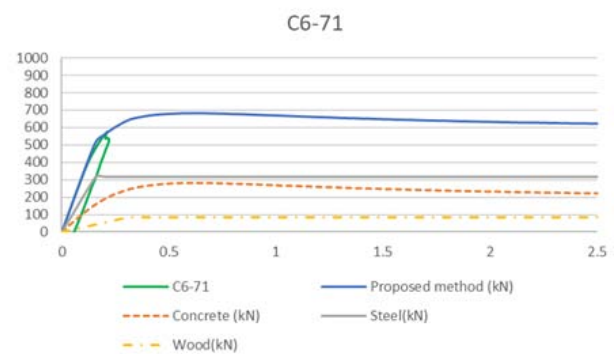


図 3.1.d 荷重-ひずみ関係 (600mm 円形鋼管)

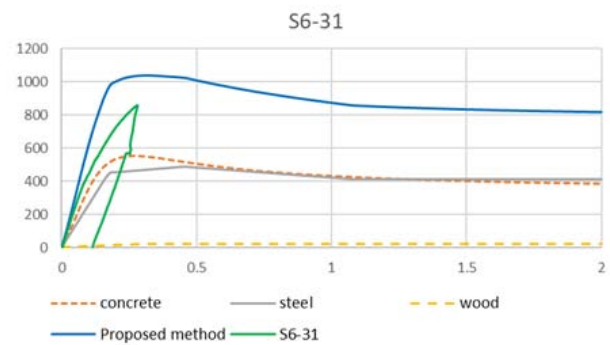


図 3.1.e 荷重-ひずみ関係 (600mm 角形)

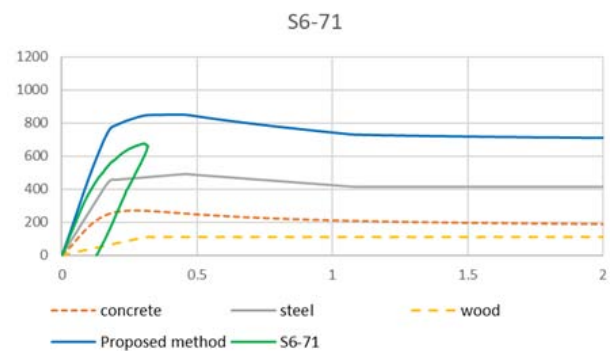


図 3.1.f 荷重-ひずみ関係 (600mm 角形)



## 3.2 剛性と耐力

### 3.2.1 剛性評価

全試験体の弾性剛性の実験と計算の比較を表 3.2 に示す。実験の剛性は、図 3 に示す軸力-ひずみ関係上の、最大耐力の 1/3 の点における割線剛性である。計算の剛性は、それぞれの断面に表 2.2~2.4 のヤング係数を乗じて加算したものである。各試験体で、木材の置換率が上がるほど、弾性剛性が下がる傾向が確認できた。断面形状と長さが異なる試験体では、剛性の評価の精度が大きく異なる。300mm と 600mm の試験体を比較すると、600mm の試験体の実験は、計算に比して大きく、特に円形においてこの傾向は顕著となる。一方、300mm の試験体では、円形の試験体のすべての実験値が計算値を下回っている。

表 3.2.a 弾性剛性一覧(300mm)

試験体名	弾性剛性			試験体名	弾性剛性		
	実験値	計算値	実/計		実験値	計算値	実/計
	E <sub>exp</sub>	E <sub>cal</sub>			E <sub>exp</sub>	E <sub>cal</sub>	
	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>			kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	
C3-01	32.5	45.6	0.71	S3-01	43.2	43.7	0.99
C3-02	40.2	45.6	0.88	S3-02	53.3	43.7	1.22
C3-03	31.9	45.6	0.70	S3-03	41.4	43.7	0.95
C3-31	37.3	44.2	0.84	S3-31	44.4	42.2	1.05
C3-32	37.5	44.2	0.85	S3-32	47.5	42.2	1.12
C3-33	35.8	44.2	0.81	S3-33	47.0	42.2	1.11
C3-51	34.1	41.7	0.82	S3-51	42.6	39.7	1.07
C3-52	36.0	41.7	0.86	S3-52	43.1	39.7	1.09
C3-53	35.1	41.7	0.84	S3-53	40.2	39.7	1.01
C3-71	31.8	38.0	0.84	S3-71	37.9	35.8	1.06
C3-72	33.3	38.0	0.88	S3-72	37.7	35.8	1.05
C3-73	33.2	38.0	0.87	S3-73	35.8	35.8	1.00

表 3.2.b 弾性剛性一覧(600mm)

試験体名	弾性剛性			試験体名	弾性剛性		
	実験値	計算値	実/計		実験値	計算値	実/計
	E <sub>exp</sub>	E <sub>cal</sub>			E <sub>exp</sub>	E <sub>cal</sub>	
	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>			kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	
C6-01	52.3	45.1	1.16	S6-01	41.9	43.2	0.97
C6-31	67.8	43.8	1.55	S6-31	50.3	41.8	1.20
C6-51	64.0	41.4	1.55	S6-51	43.7	39.3	1.11
C6-71	41.9	37.8	1.11	S6-71	39.6	35.5	1.11

本研究は、新しい提案研究のため既往のデータを参照できない。今後も、同様の試験体を追加して、実験データを蓄積したのち、総合的に剛性評価をする必要があり、今後の課題としたい。

### 3.2.2 耐力評価

圧縮耐力の予測には、(1)式と(2)式を用いた。

$$N_{cal1} = wN_{c1} + cN_{c1} + sN_{c1} \quad (1)$$

$$N_{cal2} = wN_{c2} + cN_{c1} + sN_{c1} \quad (2)$$

$wN_{c1}$  と  $cN_{c1}$  と  $sN_{c1}$  は、それぞれ木材・グラウト・鋼管の圧縮耐力である。各断面積に材料強度をかけ合わせて計算している。これらを累加したものを  $N_{cal1}$  (圧縮耐力算定式 (1)) とした。一方で軸剛性が小さい木材は、素材の圧縮強度に達していない可能性がある。そこで、木材の軸剛性に実験の最大荷重時軸ひずみをかけた  $wN_{c2}$  を定義し、 $wN_{c1}$  の代わりにこれを足した耐力を  $N_{cal2}$  とした。

300mm, 600mm の試験体における圧縮耐力の実験値と計算値の比較を図 3.2a, b に示す。図の縦軸は、実験値を計算値で除したものである。図の横軸は、木材の径(幅)であり、参考のため一番左に中空鋼管試験体の結果も示している。

図には、実験値を  $N_0$  で除したものと、実験値を  $N_{cal}$  で除したものを比較している。 $N_0$  は、通常の CFT 柱の単純累加耐力に相当し、次式で表される。

$$N_0 = cN_c + sN_c$$

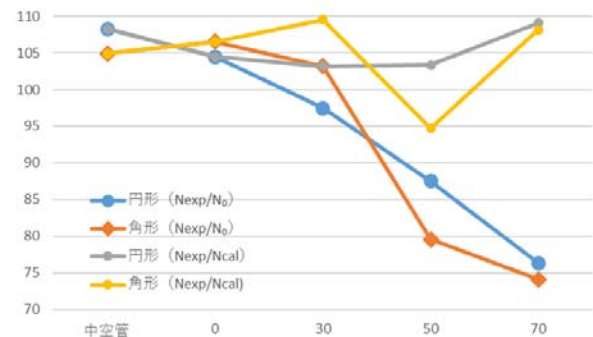


図 3.2.a 実験値と計算値の比較 (300mm 試験体)

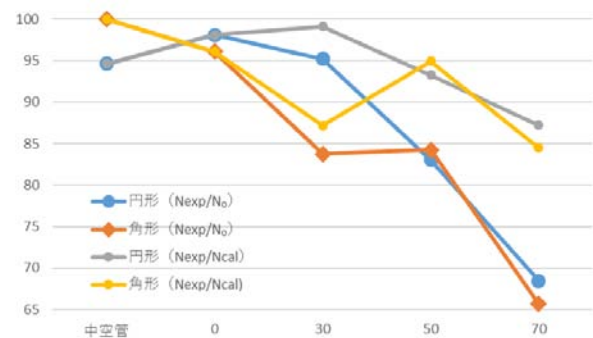


図 3.2.b 実験値と計算値の比較 (600mm 試験体)

試験体の長さを問わず、木材の使用量が増えるにつれて、実験値は  $N_0$  に比して小さくなる。しかし、 $N_{cal1}$  で評価すれば、おおよその耐力評価が可能となる。長さが 600mm の試験体のほうが、300mm 試験体に比して、木材の使用による耐力低下が大きいことが分かる。

圧縮強度の実験値と計算値の比較を表 3.3 に示す。 $N_{cal2}$  で評価すれば、 $N_{cal1}$  よりも耐力予測精度が上がり、かつばらつきも小さくなる。

表 3.3 実験値と計算値の比較

試験体		平均値		標準偏差	
		Nexp/Ncal	Nexp/Ncal	Nexp/Ncal	Nexp/Ncal
300mm	円形CFT	1.05	1.05	0.02	0.03
	角形CFT	1.04	1.05	0.05	0.05
600mm	円形CFT	0.96	1.04	0.04	0.01
	角形CFT	0.92	0.96	0.05	0.04

#### 4 総括

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 300 mm と 600mm の短柱試験体を計画通りに作製することができた。
- 2) 木材の使用量が上がるほど、最大耐力と弾性剛性が下がる傾向が確認できた。
- 3) 実験耐力を構成要素の累加耐力で評価した場合、計算値は過大評価となった。一方で、木材軸負担力を低減した評価法によれば、実験耐力を比較的精度よく評価できる。
- 4) 最大耐力後の変形挙動は、通常の CFT に比して靱性能に乏しい挙動が観測された。この原因として、材長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) 応力-ひずみ関係モデルを総和した解析と実験を比較した結果、円形 CFT では、実験の最大荷重と軸剛性は解析により精度よく評価できた。一方、角形 CFT の弾性剛性では、解析結果と誤差が観測される。これは、鋼管の塑性加工の影響と考えられる。

#### 4 今後の課題

今回実施した WGFT 短柱では、木材を多くすると明瞭に圧縮耐力が低下する。しかし、耐震補強で使用

する長柱の場合は、曲げ座屈により耐力が決定する為、木材の影響は小さいと考えられる。現在は、実用化に向けて WGFT 長柱試験体を作製中であり、この施工法の検討とともに、圧縮実験を実施して、基本性状を調べる予定である。

#### 【参考文献】

- 文 1) 中原浩之：コンクリート充填角形鋼管柱の耐力および変形性能の評価法に関する研究 九州大学学位請求論文, 1999
- 文 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
- 文 3) 中原浩之：CFT ブレースにより耐震補強を施した実在建築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
- 文 4) Hiroyuki Nakahara, Yukiko Ashida : 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.
- 文 5) Hiroyuki Nakahara, Sunao Akamatsu, Tatsuya Hanada and Yoichi Onomiya :Effect of Seismic Retrofitting by CFT Braces on Existing RC Building, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Structural Engineering and Construction Conference, pp.295-300, June. 2013.
- 文 6) Hiroyuki Nakahara, Sunao Akamatsu, Tatsuya Hanada and Yoichi Onomiya Low-cost Method for Seismic Retrofitting by CFT Braces, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Structural Engineering and Construction Conference, pp.873-878, June. 2013.
- 文 7) 玉井宏章：炭素繊維プレートによる接着補強角形鋼管圧縮材の耐荷性能, 鋼構造年次論文報告集 第25巻, 2017年11月
- 文 8) 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
- 文 9) 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