

論文 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及ぼす経年の影響に関する実験的研究

中原 浩之*¹・陳 逸鴻*²・木場 聖史郎*³・倉持 咲希*⁴

要旨：著者らは、鋼管内に木材を挿入し、その隙間をグラウトで充填することで一体化した合成構造部材の開発を進めている。この部材は、断面中心に配置された木材が、その曲げ剛性を著しく減少させないことを利用して、使用するグラウトを減じて軽量化を実現しつつも、座屈強度の低下を防ぐ長柱として開発されてきた。しかしながら、内部の木材の経年劣化等による影響については、検討されていない。本研究では、試験体製作後5年を経過した、短柱及び長柱の中心圧縮実験を実施し、これまでの実験と比較した。本研究では、木材の劣化や、これに伴う初期剛性や最大耐力の低下は観測されなかった。

キーワード：耐震補強, CFT プレース, 短柱, 長柱

1 はじめに

著者らは、コンクリート充填鋼管 (CFT) を耐震補強材として利用する研究を進めている¹⁾。長崎大学とルーマニアのブカレスト工科大学は、学術交流協定を結び、この補強法を東欧で実装するための研究を進めている。ブカレスト工科大学側から、耐震補強材のさらなる軽量化と現地で入手困難な高流動コンクリートの代替えを用いた補強材の開発を要請されている。そこで、著者らは、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、Wood and Grout Filled steel Tubular, WGFT と呼ぶ) を提案した。著者らは、これまで、文献2)、3) で、WGFT の短柱と長柱の中心圧縮性状を実験的に調べた研究結果を公表している。

しかしながら、WGFT 内部の木材の保存状態や劣化等の影響については、これまで検討が行われていない。本研究では、製作して5年を経過した WGFT 試験体の中心圧縮実験を実施し、これまでの実験研究と比較することで、WGFT の実用の可能性について検討する。

2 試験体

本研究では、著者らが提案した WGFT について、短柱と長柱の2シリーズの試験体を製作して、実験を実施した。これらは、長さ300mmの基礎性状検討用の短柱シリーズと長さ1700mmの実用性状検討用の長柱シリーズである。

試験体名称の例を図-1に示す。主な実験変数は、木径 (幅) で、短柱シリーズでは0mm (木なし)、50mm、70mmの3種類、長柱シリーズでは0mm (木なし)、70mm

の2種類であり、木材長さは試験体長さ300mmにおいて160mm、試験体長さ1700mmにおいて1360mmである。短柱シリーズは、円形9本、角形9本の計18本、長柱シリーズは、円形3本、角形3本の計6本である。

円形鋼管は○_101.6×3.2(STK400)で径厚比31.8である。角形鋼管は□_100.0×3.2(STKR400)で幅厚比は、31.3である。鋼材の機械的性質は、鋼管から切り出した試験片の引張試験より得られた平均として定め、円形および角形鋼管の降伏強度は、それぞれ359N/mm²、365N/mm²、ヤング係数は、それぞれ206kN/mm²、198kN/mm²であった。グラウトの圧縮強度測定に用いる供試体はφ100×200のブリキ製の使い捨て軽量型枠を用いて製作し、軽量型枠に入れたまま、試験体と同様に5年間室内養生した。6体の供試体圧縮強度の平均値は65.3N/mm²、ヤング係数は31.0kN/mm²であった。木材の強度とヤング係数は、鋼材、グラウトのそれに比べて非常に小さい。本研究では、木材の素材試験を行っていない。使用した木材は、すぎ甲種構造材3級の芯持材である。木材の圧縮強度とヤング係数は、それぞれ18N/mm²、7kN/mm²とした⁴⁾。試験体形状を図-2に示す。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。

試験体製作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、鋼管と木材に孔を設け寸切りボルトとナットで固定。(写真-1³⁾を参照。)
- 2) 試験体上下に厚さ12mmの加力用鋼板を溶接する。
- 3) 試験体にグラウト注入。
- 4) 5年間の室内養生。

*1 長崎大学大学院総合生産科学研究科 教授・博士 (工学) (正会員)

*2 長崎大学大学院総合生産科学研究科 助教・博士 (工学) (正会員)

*3 長崎大学大学院工学研究科 大学院生

*4 長崎大学工学部工学科 学部生

- 5) 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。

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た。グラウトの打設は縦打ちとし、試験体上端プレートに設けた孔から行い、同一強度のグラウトの打設は、一括して同一日に実施した。グラウト充填作業の際、試験体を木製のハンマーを用いて打設口から空気が出てこなくなるまで振動を与えることでグラウトの充填を確認した。

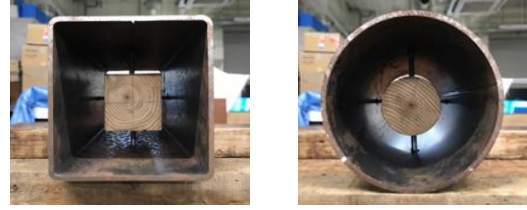


写真-1 グラウト充填前の試験体(文献3)より抜粋)

3 実験装置

短柱シリーズの中心圧縮実験の加力方法と測定方法を図-3に示す。荷重の測定は試験機と試験体の間に設置したロードセルを用いて行った。

試験体の両側に1つずつ設置した変位計を用いて、試験体上下プレート間の軸方向変位を計測した。ひずみゲージにより試験体中央位置の鋼管のひずみを測定した。円形試験体では二軸ゲージを、角形試験体では一軸ゲージを、それぞれ4枚用いた。ゲージの位置は、試験体中心(下から150mm)である。試験体上下の拘束条件をピン固定にし、軸方向の圧縮力を加え、変位計による軸ひずみが2%に達するまで単調载荷をした。

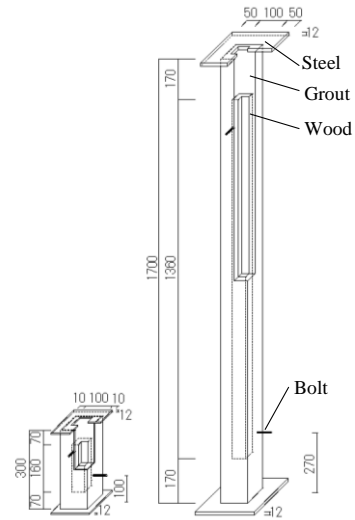


図-2 試験体形状(左:短柱,右:長柱)

長柱シリーズの中心圧縮実験の加力方法と測定方法を図-4に示す。荷重の測定は、試験体上部に設置したロードセルを用いて測定した。鋼管ひずみの測定には、円形試験体では二軸ゲージ、角形試験体では一軸ゲージを用いた。ゲージは、試験体中央部に2枚、その中央部から上下に425mmの位置に2枚貼付した。これらは、試験体が曲げ座屈を起こしたときに、引張側と圧縮側になる位置で、長さ方向の曲率分布を計算できる。さらに、試験体中央部から上に118mmの位置(座屈長さの中心)に4枚貼付した。なお、図に用いたひずみ値は、座屈長さ中心位置のゲージの値である。

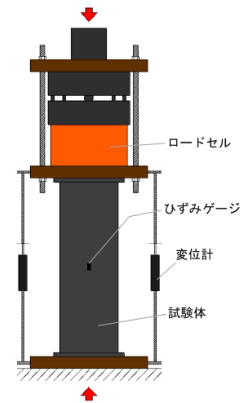


図-3 加力方法と測定方法(短柱シリーズ)

加力は、試験体上下の拘束条件を両端ピン支持にし、軸方向の圧縮力を加え、変位計による軸ひずみが2%に達するまでに単調载荷をした。

本実験は、2019年に養生期間4~8週間の試験体を対象に行った実験^{2), 3)}と比較する。そのため、試験体は養生期間を除き同一で、载荷と計測方法も同じである。

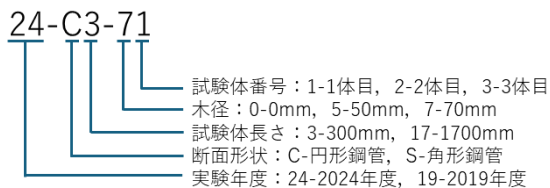


図-1 試験体名称の例

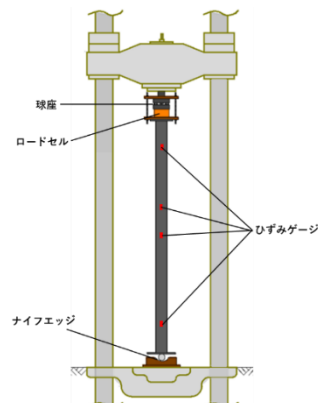


図-4 加力方法と測定方法(長柱シリーズ)

4 短柱シリーズの実験結果

短柱シリーズの荷重と軸ひずみの関係を図-5~8に示す。図の軸ひずみは、鋼材表面に貼付したひずみゲージの値の平均である。本論では、紙面の関係上、木径 0mm、木径 70mm の試験体の実験結果のみを示す。

図-5には木径 0mm の円形試験体の実験結果を各 3 本ずつ示す。図-6には円形試験体の木径 70mm、図-7には、角形試験体の木幅 0mm、図-8には角形試験体の木幅 70mm のものを示す。図の実線・点線・破線により同一パラメータの試験体を区別している。赤が本実験で、黒が既往の実験²⁾である。赤線と黒線の初期剛性を比較すると、前者の方が大きい傾向がみられる。これは、内蔵グラウトの養生期間が 5 年となり、そのヤング係数 28.2kN/mm² から 31.0kN/mm² に上昇したためと考えられる。

円形試験体は、最大耐力後も耐力低下が小さい。これは、CFT で観測される相互拘束効果⁵⁾によるもので、WGFT でもこの効果が観測されている。一方で、角形試験体は、円形ほどの相互拘束効果は発揮されていない。

養生期間による軸方向の初期剛性の変化について数値で検討する。表-1に、各木径ごとの軸剛性の実験値と計算値の比の平均値、標準偏差を示す。なお、本試験の計算方法は 5 年前と同様の方法を用いている³⁾。表-1の実験剛性は、荷重と軸ひずみの関係から最大耐力の 1/3 までの範囲を最小二乗法による回帰直線の傾きである。軸剛性の計算法は、文献 2) と同じで、構成要素それぞれの断面積に素材試験で求めたヤング係数を乗じて加算する。円形試験体において、養生期間 4~8 週間の試験体²⁾の木 70mm 試験体の軸剛性の実験値と計算値の比の平均値、標準偏差はそれぞれ 1.20, 0.08 であった。本実験の平均剛性は、1.19 であり、木材の経年の影響は見られない。

一方で、角形試験体においては、養生期間 4~8 週間の試験体の木 70mm 試験体の軸剛性の実験値と計算値の比の平均値、標準偏差はそれぞれ 1.17, 0.06 であった。本実験の平均剛性は、1.25 であり、ここでも木材の経年の影響は見られない。

次に、圧縮強度について検討する。表-1に実験より得られた最大耐力(N_{exp})と、圧縮強度の計算値 N_0 を比較している。 N_0 は(1)式²⁾を用いて求めた。

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

$s\sigma_c$: 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

表-1より、平均で見れば、円形・角形ともに、木入りの試験体は、角形の木径 70mm の試験体を除き、実験値は

計算の単純累加強度を上回った。

円形試験体において、養生期間 4~8 週間の試験体²⁾の木 70mm 試験体の圧縮強度の実験値と計算値の比の平均値、標準偏差はそれぞれ 1.07, 0.05 であった。これは、本実験の平均 1.00 より大きい。一方、角形試験体においては、養生期間 4~8 週間の試験体の木 70mm 試験体の圧縮強度の実験値と計算値の比の平均値、標準偏差はそれぞれ 1.05, 0.07 であった。これも、本実験の平均 0.96 より大きい。短柱の破壊箇所は、木材の上端部であった。写真-2 に角形試験体の内部の様子を示す。グラウトの水分が木材の小口面から吸収され、この部分でのグラウト強度が低下し、実験の圧縮強度が低下したと考えられる。

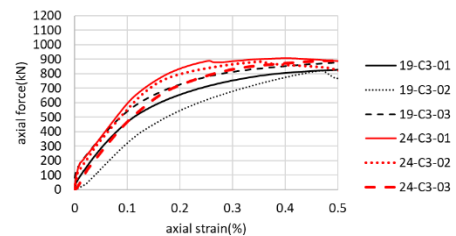


図-5 短柱の荷重-軸ひずみ関係 (木径 0mm, 円形)

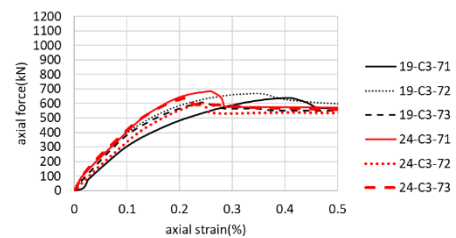


図-6 短柱の荷重-軸ひずみ関係 (木径 70mm, 円形)

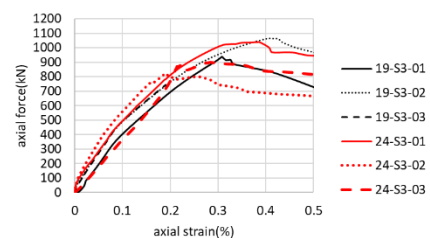


図-7 短柱の荷重-軸ひずみ関係 (木径 0mm, 角形)

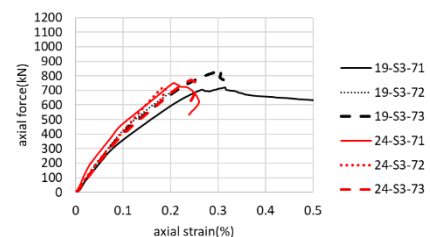


図-8 短柱の荷重-軸ひずみ関係 (木径 70mm, 角形)



写真-2 角形短柱の内部の様子

5 長柱シリーズの実験結果

長柱シリーズの荷重と軸ひずみの関係を図-9, 10 に示す。図の軸ひずみは、座屈長さ中央の鋼材表面に貼付したひずみゲージの値を用いている。図の実線・点線・破線により同一パラメータの試験体を区別している。赤が本実験で、黒が既往の実験³⁾である。図-9には、木径 0mm, 70mm の円形試験体の実験結果を各 3 本ずつ示す。図-10には、角形試験体のものを示す。円形試験体と比較すると、赤線が黒線を下回っているが、後述する計算結果との比較では、予想強度よりも大きい結果が得られている。

表-2には、長柱シリーズの実験より得られた軸剛性と圧縮強度をまとめている。なお、本試験の計算方法は5年前と同様の方法を用いている³⁾。円形試験体において、養生期間 4~8 週間の試験体²⁾は木径 70mm 試験体の軸剛性の実験値と計算値の比の平均値、標準偏差はそれぞれ 1.07, 0.02 となっている。角形試験体においては、養生期間 4~8 週間の試験体は木径 70mm 試験体の軸剛性の実験値と計算値の比の平均値、標準偏差はそれぞれ 1.10, 0.01 となっている。表-2 に示す 2024 年に行った

養生期間 5 年の試験体の平均値は、上記と比較すると、円形と角形両方において、若干小さめの値となっているが、大きな相違点は見られない。

圧縮強度については、実験より得られた最大耐力 N_{exp} は木材を内蔵したことにより、円形は 10~20%, 角形は約 10% の低下が見られた。また、長柱シリーズの実験では、いずれの試験体にも座屈が発生し、実験の最大耐力は(1)式で算出した圧縮強度 N_0 より小さくなっている。

そのため、文献 3) で提案した累加座屈強度式 (2)³⁾ を用いて WGFT 長柱シリーズの座屈耐力を計算する。

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

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 ($wN_{cr} = 0$)

また、文献 3) と同様に、木材は座屈耐力が無視できるほど小さいので、その耐力を 0 と仮定して、WGFT の長さ座屈耐力の関係 (以下、カラムカーブ) を計算する。つまり、木ありの試験体は、木材が占める部分が欠損した状態のグラウト断面を用いて座屈強度を計算している。

カラムカーブを図-11, 12 に示し、図中に実験結果をプロットで併記した。長柱シリーズの実験結果は、木材の有無に関わらず、木材なしの強度と木材ありの強度の間にプロットされていることより、実験と計算の対応はおおむね良好であることが分かる。

表-1 2024 年度試験結果 (短柱シリーズ, 養生期間 5 年)

| 試験体 | 軸剛性 | | | | | 圧縮強度 | | | | |
|----------|------------|------------|---------------------|------|------|-----------|-------|---------------|------|------|
| | EA_{exp} | EA_{cal} | EA_{exp}/EA_{cal} | 平均 | 標準偏差 | N_{exp} | N_0 | N_{exp}/N_0 | 平均 | 標準偏差 |
| | MN | MN | | | | kN | kN | | | |
| 24-C3-01 | 556 | 427 | 1.30 | 1.23 | 0.08 | 908 | 825 | 1.10 | 1.09 | 0.02 |
| 24-C3-02 | 541 | | 1.27 | | | 882 | | 1.07 | | |
| 24-C3-03 | 481 | | 1.12 | | | 918 | | 1.11 | | |
| 24-C3-51 | 525 | 380 | 1.38 | 1.35 | 0.03 | 767 | 732 | 1.05 | 1.05 | 0.02 |
| 24-C3-52 | 497 | | 1.31 | | | 786 | | 1.07 | | |
| 24-C3-53 | 514 | | 1.35 | | | 747 | | 1.02 | | |
| 24-C3-71 | 385 | 335 | 1.15 | 1.19 | 0.15 | 684 | 643 | 1.06 | 1.00 | 0.05 |
| 24-C3-72 | 347 | | 1.04 | | | 605 | | 0.94 | | |
| 24-C3-73 | 464 | | 1.39 | | | 639 | | 0.99 | | |
| 24-S3-01 | 444 | 507 | 0.88 | 0.94 | 0.19 | 1039 | 1007 | 1.03 | 0.91 | 0.09 |
| 24-S3-02 | 607 | | 1.20 | | | 820 | | 0.81 | | |
| 24-S3-03 | 383 | | 0.76 | | | 901 | | 0.90 | | |
| 24-S3-51 | 437 | 447 | 0.98 | 0.99 | 0.05 | 922 | 888 | 1.04 | 1.02 | 0.05 |
| 24-S3-52 | 417 | | 0.93 | | | 840 | | 0.95 | | |
| 24-S3-53 | 470 | | 1.05 | | | 943 | | 1.06 | | |
| 24-S3-71 | 571 | 389 | 1.47 | 1.25 | 0.16 | 753 | 775 | 0.97 | 0.96 | 0.03 |
| 24-S3-72 | 448 | | 1.15 | | | 719 | | 0.93 | | |
| 24-S3-73 | 438 | | 1.13 | | | 770 | | 0.99 | | |

表-2 2024 年度試験結果 (長柱シリーズ, 養生期間 5 年)

| 試験体 | 軸剛性 | | | | | 圧縮強度 | | | | |
|-----------|------------|------------|---------------------|------|------|-----------|-------|---------------|------|------|
| | EA_{exp} | EA_{cal} | EA_{exp}/EA_{cal} | 平均 | 標準偏差 | N_{exp} | N_0 | N_{exp}/N_0 | 平均 | 標準偏差 |
| | MN | MN | | | | kN | kN | | | |
| 24-C17-01 | 388 | 425 | 0.91 | - | - | 524 | 820 | 0.64 | - | - |
| 24-C17-71 | 332 | 332 | 1.00 | 1.03 | 0.03 | 479 | 568 | 0.84 | 0.78 | 0.06 |
| 24-C17-72 | 354 | | 1.07 | | | 406 | | 0.71 | | |
| 24-S17-01 | 445 | 507 | 0.88 | - | - | 617 | 1007 | 0.61 | - | - |
| 24-S17-71 | 423 | 390 | 1.09 | 1.07 | 0.02 | 615 | 686 | 0.90 | 0.87 | 0.03 |
| 24-S17-72 | 408 | | 1.05 | | | 573 | | 0.84 | | |

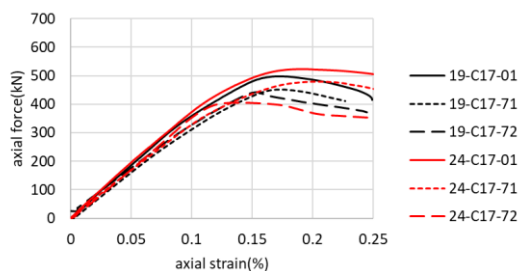


図-9 長柱の荷重-軸ひずみ関係 (円形)

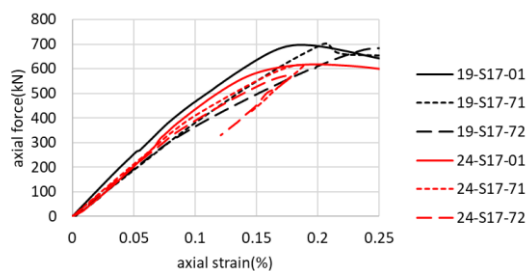


図-10 長柱の荷重-軸ひずみ関係 (角形)



図-11 カラムカーブ (円形)

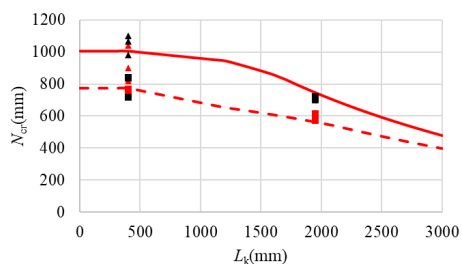


図-12 カラムカーブ (角形)

表-3において、 N_{exp} 、計算結果 N_{cr} 、試験体重量 W の値をまとめている。木材入りで養生期間5年の長柱シリーズの実験結果は、24-C17-72を除き、 N_{cr} により最大耐力を安全側に評価できている。また、 W は円形、角形共通して、木材を内蔵したことにより、20%減少していることが分かる。 N_{exp}/W の値は、圧縮強度と重量の比を表している。円形、角形共通して、WGFTはCFTよりも、 N_{exp}/W の値が大きく、単位重量当たりの圧縮強度が高

くなることを示した。これは、WGFTの座屈強度の低下度合いは、その重量減少率よりも小さいことを示している。

実験後に撮影した長柱シリーズの内部の木材を、写真-4に示す。写真-3は2024年に行った養生期間5年の試験体で、写真-4は2019年に行った養生期間4~8週間の試験体³⁾である。写真-3と写真-4を比較すると、ほとんど差異はなく、打設後5年間経過しても内蔵木材の腐食などは見られない。

表-3 2024年度試験結果 (長柱シリーズ)

| 試験体 | N_{exp} | N_{cr} | W | N_{exp}/N_{cr} | N_{exp}/W |
|-----------|-----------|----------|------|------------------|-------------|
| | kN | kN | kg | | |
| 24-C17-01 | 524 | 546 | 50.0 | 0.96 | 10.5 |
| 24-C17-71 | 479 | 433 | 40.0 | 1.11 | 12.0 |
| 24-C17-72 | 406 | | 40.4 | 0.94 | 10.0 |
| 24-S17-01 | 617 | 747 | 58.4 | 0.83 | 10.6 |
| 24-S17-71 | 615 | 564 | 47.2 | 1.09 | 13.0 |
| 24-S17-72 | 573 | | 46.9 | 1.02 | 12.2 |

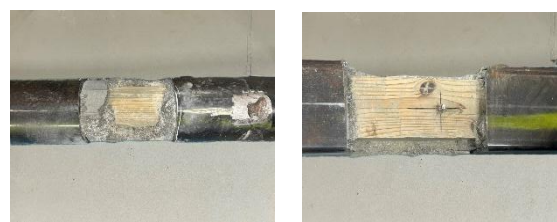


写真-3 実験後の内部の木材 (長柱, 養生期間5年)



写真-4 実験後の内部の木材 (長柱, 養生期間4~8週間)³⁾

6 長柱シリーズの破壊状況

写真-5に円形試験体、写真-6に角形試験体の座屈の様子を示す。写真-5では、試験体が全体的に曲っており、曲げ座屈が先行し破壊に至ったことが分かる。一方、写真-6では、試験体の上部で局部座屈を起している様子が確認できる。局部座屈が発生した位置は、木材とグラウトの境目または、木材固定用のボルトの位置であり、これらの部分で局部座屈を起し、最大耐力に至ったと考えられる。

局部座屈発位置の鋼管の内部の様子を写真-7に示す。木材とグラウトの境目は、短柱シリーズと同様に、グラウトが破壊していた。これは、前述の通り、木材の小口面からの吸水の影響で、グラウト強度が低下したものと

考えられる。また、木材固定用のボルトに近い位置でグラウトがひび割れており、また同じ位置で、木材のき裂も観察された。

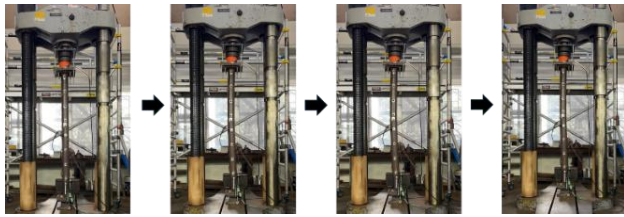


写真-5 座屈の進行状況（円形）



写真-6 座屈の進行状況（角形）



写真-7 局部座屈部の内部詳細（角形）

7 WGFTの耐震補強材としての実用化

耐震補強材として、WGFT長柱を使用する場合、内蔵木材の経年劣化による構造性能の低下が懸念されていた。しかしながら、本研究の実験においては、木材の劣化による耐力低下は見られていない。一方で、重量の軽減は確実に実現できる。以上より、WGFT長柱の耐震補強材としての実用可能性が示されたと考えられるが、課題も残された。木材の経年による劣化は観測されないものの、木材の吸水の影響で、グラウト側の強度が低下する可能性がある。これは、文献2)の実験時にも考慮しており、一部の試験体の内蔵木材の小口面にはペンキ塗装して、水の移動を防止する工夫を行っていた。しかしながら、文献2)では、この塗装の影響は観測されていなかった。

これから、グラウトから木材への水分移動は、ある程度の時間をかけて行われることが分かる。実用にあたっては、木材小口面の防水処理が必要であることが分かった。

8 結論

製作後5年を経過した木材入りCFT部材の中心圧縮実験を実施した。5年前の実験結果と比較し、以下の結果を得た。

- 1) 実験後、内蔵木材の状況を目視したところ、腐食等は観測されなかった。
- 2) 木材の経年劣化による、実験の剛性や耐力の低下は観測されなかった。
- 3) 長柱シリーズにおいて、円形試験体は曲げ座屈が先行したが、角形試験体では、木材端部での局部座屈が先行した。
- 4) 木材入り長柱シリーズの実験結果は、24-C17-72を除き、累加座屈強度式で安全側に評価できた。
- 5) 木材の小口面に接触するグラウト部の破壊が観測された。これは木材の繊維方向の吸水の影響と考えられる。
- 6) 木材入りCFT部材の実用にあたっては、内蔵木材の小口面の防水処理が必要となることが分かった。

謝辞 本研究は、令和5-6年度国土交通省建設技術研究開発助成「木材入りCFT部材の開発とその実用化」（研究代表者：中原浩之）の助成に基づき実施した。関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 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
- 2) 中原浩之，他：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予備的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.2，pp.919-924，2020年7月
- 3) 陳逸鴻，他：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集，Vol.43，No.2，pp.595-600，2021年7月
- 4) 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年
- 5) 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年