

木芯コンクリート柱の圧縮特性に関する基礎的研究

都祭 弘幸*

Experimental Study on Compression Characteristics of Wood-core RC Composite Columns

Hiroyuki TOMATSURI

ABSTRACT

To prevent global warming, carbon dioxide emissions are reduced using wood materials for buildings. However, wooden structures require the fireproof covering, for instance, fire-resistant gypsum hoard with more than 46mm thickness for 2 hours fireproof. This proposed composite structure, the wood-core RC composite column (called as WRC), may be able to increase the opportunities to use woods.

The compression tests were carried out, then, the following knowledge was provided from the test results.

1. The ultimate axial strengths of the WRC's columns and that of the RC columns are about the same, in spite of the ratio of RC to laminated lumber section.
2. The superposed strength theory can be used for the WRC in the region from elastic to plastic.
3. The strain at the ultimate axial strengths of the WRC's columns is in proportion to wood section enlargement.

キーワード: 木芯コンクリート柱, 集成材, 累加強度, 中心圧縮実験

Keywords: Wood-core RC composite columns, Laminated lumber, Superposed strength, Compression tests

1. はじめに

地球温暖化に伴い世界各地で異常気象が観測されている。この地球温暖化は大気中の温室効果ガスの増加が原因であり、その大半を占める二酸化炭素が最も影響を与えると言われている。

二酸化炭素排出量（以下、CO₂排出量）が増加する要因は、世界的な産業構造の変化、豊かな生活環境の追求、森林の減少などが考えられる。日本における 2018 年度の CO₂ 排出量は、温室効果ガス総排出量の約 92%を占め、1990 年度比で 2.0%減少、前年度比で 4.0%減少している¹⁾。CO₂ 排出量のうち、燃料の燃焼に伴う排出が約 95%と最も多く、その約 23%を製造業及び建設業が占めている¹⁾。つまり、CO₂ 排出量の約 2 割強が建設業に關係していると考えられることができる。

日本では 2016 年 4 月に CLT 関連の建築基準法告示が公布・施行されたことを機に、国土交通省は木質系建築

物の需要増大および利用促進を図るために、総合技術プロジェクト「新しい木質材料を活用した混構造建築物の設計・施工技術の開発」を 2017 年度から 5 年間にわたり実施している²⁾。

このような建築分野における取り組みにより CO₂ 排出量削減のために環境を配慮した建築を考えなければならない時代となった。木質化が先行している欧米では木材を建築物の構造や仕上げに使用・活用した多数の事例が見られるようになってきている。それらの事例のほとんどが木材を表面に使用し、柔らかさ・暖かさを醸し出している。ただし、耐火建築とするためには木材を石膏ボードなどで被覆しなければならないことが木質構造の弱点である。例えば、木造・木質部材の柱や梁部材を耐火構造とするためには、1 時間耐火であっても総厚 46mm 以上の強化せっこうボードを外周に張り付けなければならない³⁾。

建築物の木質化は、混合構造とする技術開発がほとん

*福山大学工学部建築学科 教授・博士（工学）

どであり、木質合成構造は鉄筋コンクリート造（以下、RC造）梁や鉄骨梁の上に CLT を設置する構造以外に例は少ない。木質化を推進するためには RC 造や S 造との混合構造だけでなく、木質合成構造も考える必要があろう。木質合成構造の研究例は、文献 4) に示す鉄骨コンクリート柱の外周に集成材を張り付けた実験的研究のほかは見られない。

本研究は木材の使用機会を少しでも増やすため、木質合成構造の一つの例として考案した“木芯コンクリート柱”に関する実験的研究である。この木芯コンクリート柱とは、強化せっこうボードの代わりに RC 造で木質部材を被覆し、耐火性能とともに構造強度を持たせることを計画した柱部材である。

2. 試験体計画

2.1 試験体

本研究で検討する木質系合成構造は、木材と RC 造との合成構造であり、上述のように強化せっこうボードに替えて剛性・強度を期待できる RC 造で耐火被覆した柱部材である。断面の芯部分を木造とした RC 造との合成構造が圧縮応力に対してどのような効果があるかを中心圧縮実験により検討する。

試験体一覧を Table.1 に試験体断面および配筋図を Fig.1 に示す。断面は全て 300mm 角である。RC-1 は通常の RC 造柱断面であり、WRC-1 から WRC-3 が中心部分に木材を設置している。RC 造部分の主筋およびせん断補強筋量はいずれの試験体も同じ補強量である。芯部分の木材には同一等級のヒノキ集成材 E95-F315（4～5 層）2）を使用した。この集成材のヤング係数は 9.5kN/mm^2 、圧縮基準強度 25.8N/mm^2 である。ヒノキ集成材を使用した理由は、圧縮強度およびヤング係数等の構造性能が安定しているからと考えられたからである。

各試験体ともに試験区間は中央部の 300mm としている。この区間のせん断補強筋比 p_w は 0.38% であり、その上下部分については、圧縮破壊しないようにせん断補強筋を試験区間の 2 倍（0.76%）とした。

集成材とコンクリートが接する面には特殊な処理はなく、集成材とコンクリートとの応力伝達が可能なダボ筋やコッターなどは設けていない。

木芯コンクリート柱のほかに要素実験として使用した集成材 105 角、120 角、150 角の中心圧縮試験を各 1 体ずつ行った。要素実験の長さは木芯コンクリートとして使用する修正材と同じ 600mm である。

試験体に使用したコンクリートの試験結果を Table.2 に、主筋およびせん断補強筋の試験結果を Table.3 に示す。

2.2 累加強度

2.2.1 弾性範囲

Table.1 List of the specimens

試験体名	断面 (mm)	主筋	せん断補強筋	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
RC-1	300×300	8-D16 (SD390)	2-D6@50 (SD295A) $p_w=0.38$	31.7	31.3	4.86
WRC-1						
WRC-2						
WRC-3						

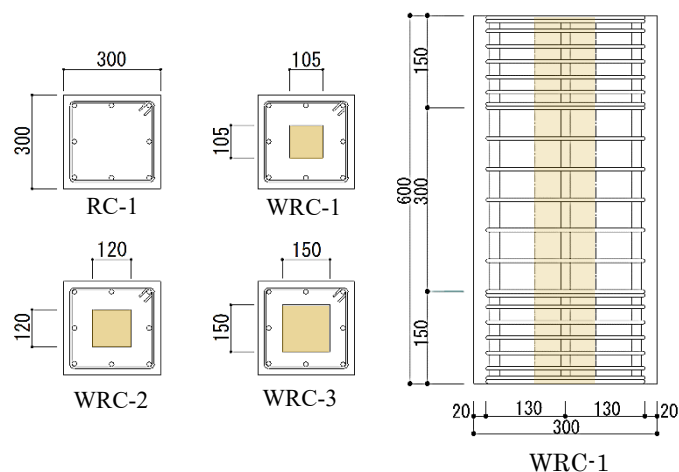


Fig.1 Sections of specimens and reinforcing

Table.2 Material test results of concrete

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)
RC-1, WRC-1 WRC-2, WRC-3	31.7	31.3	4.86

Table.3 Material test results of reinforcing

種別	径	材質	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
主筋	D16	SD390	437.6	593.5	203.4	17.6
せん断補強筋	D6	SD295A	341.7	516.3	190.2	14.9

一般的な RC 造柱および木芯コンクリート柱の弾性範囲における荷重－軸ひずみ関係を式 (1) に示す。この式は、コンクリートと集成材に生じた軸ひずみを累加した提案式である。コンクリートのヤング係数は RC 規準⁴⁾式である。

$$N_E = \varepsilon \cdot (E_C \cdot A_C + E_W \cdot A_W) \quad (1)$$

$$E_C = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{\gamma}{24} \right)^2 \times \left(\frac{F_C}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

ここで、 N_E : 弾性範囲における軸強度(N)、 ε : 柱の軸ひずみで、鉛直変位/変位測定距離で計算した値、 E_C : コンクリートのヤング係数(N/mm²)、 γ : コンクリートの気乾単位体積重量(kN/m³)、 A_C : コンクリートの断面積(mm²)、 E_W : 集成材のヤング係数(N/mm²)、 A_W : 集成材

断面積(mm²).

2. 2. 2 最大軸耐力

RC造柱の最大軸耐力算出式を式(3)⁵⁾に、木芯コンクリート柱の最大軸耐力提案式を式(4)に示す.

$$N_u = 0.85A_C \cdot \sigma_B + A_S \cdot \sigma_y \quad (3)$$

$$N_u = 0.85A_C \cdot \sigma_B + A_S \cdot \sigma_y + A_W \cdot \sigma_w \quad (4)$$

ここで、 N_u : 最大軸耐力(N), A_C : コンクリートの断面積(mm²), σ_B : コンクリート圧縮試験結果(N/mm²), A_S : 鉄筋断面積(mm²), σ_y : 主筋の降伏強度(N/mm²), A_W : 集成材断面積(mm²), σ_w : 集成材圧縮強度(N/mm²)で圧縮基準強度の1.2倍とした.

集成材の許容圧縮応力度は、基準強度に対して2/3倍であるが、本研究の木芯コンクリート柱の場合、内部の集成材は座屈しないので圧縮終局状態を考慮できると判断し1.2倍とした.

式(3)および式(4)によって算出した最大軸耐力をTable.4に示す. 比率は、RC-1を1.00としたときの倍率である. コンクリートの圧縮強度試験値が31.7N/mm²であり、計算に使用した集成材の圧縮強度は圧縮基準強度(25.8N/mm²)の1.2倍としたので、ほぼ同じ応力度となる. したがって、RC-1を規準とした最大軸耐力の比は、いずれもほぼ同じ耐力となった.

3. 実験方法・計測方法

3. 1 実験方法

Fig.2に荷重装置(福山大学8号館5MN万能試験機)を、Fig.3に試験体部分の拡大図を示す. 試験体を垂直に保った上で試験体の上下面に反力プレートを設置した. 上部プレートと試験体との間にせっこうを挟みプレートと試験体上面に隙間がないようにした. また、上部反力プレートの上に球座を載せ、偏心圧縮がさやうしないよう配慮した.

荷重は、弾性範囲における圧縮強度と軸ひずみとの関係が累加式で表せることを確認する目的で、最大軸耐力 N_u の 1/3 を 3 回、続いて同 N_u の 2/3 を 3 回繰り返した後、破壊するまで圧縮力を加えることとした.

3. 2 測定方法

柱の高さ中央部の検長375mmに設定した柱4面の測定値を平均した値を実験による軸ひずみと定義した. そのほか、Fig.4に示すようにWSGにより鉄筋および集成材のひずみを計測した.

使用したゲージは、鉄筋には2mmゲージを、集成材およびコンクリート表面については60mmゲージを使用した.

4. 実験結果

Table.4 Estimated ultimate axial strength

試験体名	N_u (kN)	比率
RC-1	3085.3	1.00
WRC-1	3129.5	1.01
WRC-2	3143.1	1.02
WRC-3	3175.6	1.03

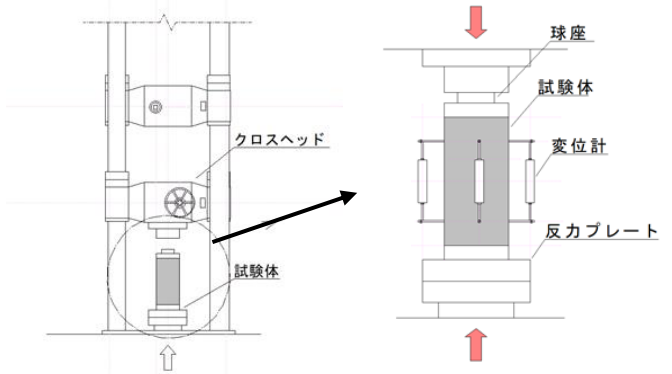


Fig.2 Compression test device

Fig.3 Measurement method

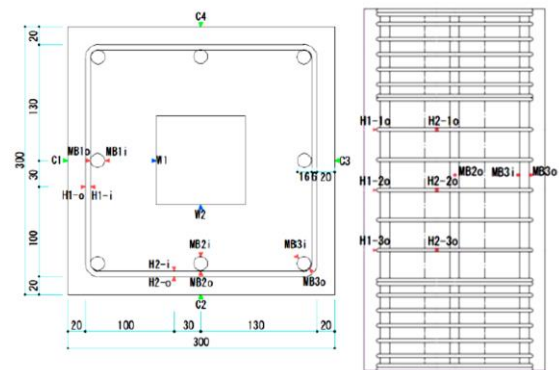


Fig.4 Setting of W.S.G.

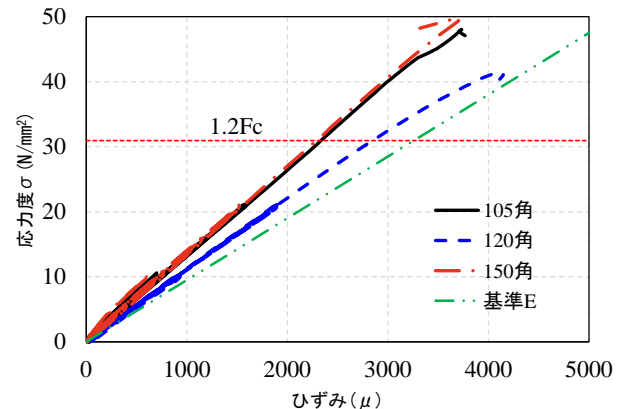


Fig.5 Axial stress versus strain

Table.5 Test results of laminated ltimbers

	σ_{max} N/mm ²	α_σ $\times F_c$	$E_{E(1.2F_c)}$ kN/mm ²	α_E $\times E$
105角	48.0	1.86	13.3	1.40
120角	41.3	1.60	10.8	1.14
150角	49.9	1.93	13.5	1.42
平均	46.4	1.80	12.5	1.32

4. 1 集成材単体の軸圧縮試験結果

集成材単体の圧縮試験結果、軸応力度－軸ひずみ度関係を Fig.5 に示す。また、各集成材の最大応力度実験値と圧縮基準強度との比、およびヤング係数実験値と基準となるヤング係数との比を Table.5 に示す。Fig.5 および Table.5 中の F_c は集成材の圧縮基準強度を意味する。Fig.5 の軸応力度は圧縮荷重をそれぞれの集成材断面積で除したものであり、軸ひずみ度は集成材の高さ方向中央に貼付した 2 枚の 60mmW.S.G (隣り合う直交する面に貼付) の平均値である。

Fig.5 の“基準 E”とは、ヒノキ集成材の基準強度となるヤング係数 9.5kN/mm^2 から推定する応力度－ひずみ度関係である。図から分かるように各集成材の応力度－ひずみ度関係は、基準となるヤング係数よりも剛性が高く、圧縮基準強度の 1.2 倍 (図中の $1.2F_c$) を超えてもほぼ弾性状態にあることが分かる。最も低い集成材 (120 角) の最大応力度でも圧縮基準強度の 1.6 倍であった。

4. 2 木芯コンクリート柱の圧縮試験結果

各試験体の最大軸耐力実験値と計算値の比較を Table.6 に、圧縮荷重－軸ひずみ度関係を Fig.6 に示す。横軸のひずみ度は、試験体 4 面の検長 375mm における軸方向変位の平均値である。また、Photo.1 には 4 体のうち、RC-1 と WRC-1 の破壊後の写真を示す。

最大軸耐力実験値は、RC 部分と集成材の断面積比が異なっても顕著な差異はない。また、累加強度式(3)および(4)を用いた実験値／計算値の値は、断面積比に関係なくほぼ 1.1 倍となった。

最大軸耐力以降の荷重低下傾向は、RC 柱である RC-1 と木芯コンクリート柱 WRC-1 に大きな差異は見られない。集成材の断面が大きくなる WRC-2 と WRC-3 は急激に荷重が低下した。軸ひずみ 1% 時の残存軸耐力は最大軸耐力の約 5 割となった。

4. 2. 1 破壊経過

各試験体とも同様な破壊経過であった。最大軸耐力計算値 N_u の 1/3 および 2/3 の繰り返しでは、いずれの試験体も表面に損傷は見られなかった。最大軸耐力以降、試験体中央部周辺のかぶりコンクリートが圧壊し始め、主筋が座屈して耐力が低下していった。

4. 2. 2 弾性域における性状

Fig.7 に弾性域 ($N_u/3$, $2N_u/3$) における荷重 P －ひずみ度 ϵ 関係を、Table.7 に弾性域における各柱の等価軸剛性の平均値と RC-1 に対する軸剛性の比を示す。等価軸剛性はそれぞれ 3 回繰り返した平均値とした。RC 造柱と木芯コンクリート柱の P － ϵ 関係に大きな差異は見られず、等価軸剛性については集成材断面の大きさによる影響は見られない。

この弾性域における軸荷重の分担割合は、RC 部分と集成材のひずみが同じであることから、主筋負担分を無

Table.6 Comparison between tests and estimated values of ultimate axial strengths

試験体名	断面積比 RC:集成材	$N_u(\text{kN})$		実験値 /計算値
		実験値	計算値	
RC-1	—	3382.0	3085.3	1.10
WRC-1	7.2:1.0	3542.5	3129.5	1.13
WRC-2	5.3:1.0	3529.5	3143.1	1.12
WRC-3	3.0:1.0	3450.0	3175.6	1.09

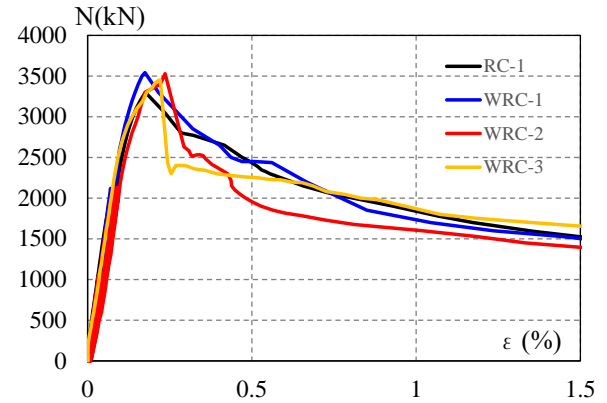


Fig.6 Axial force versus strain of WRC columns in elastoplastic region

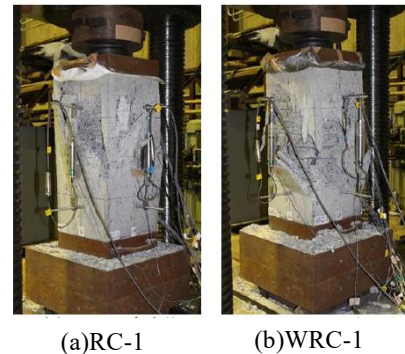


Photo.1 After collapsing of WRC columns

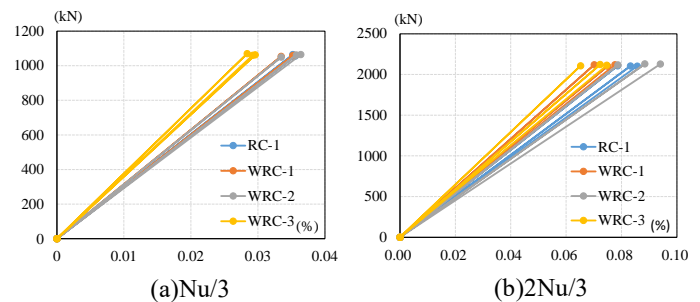


Fig.7 Axial force versus strain of WRC columns in elastic region

Table.7 Comparison between tests and estimated values of axial rigidity

	$N_u/3$ (3回平均)		$2N_u/3$ (3回平均)	
	kN/mm	比率	kN/mm	比率
RC-1	7987	1.00	6811	1.00
WRC-1	8132	1.02	7608	1.12
WRC-2	8031	1.01	6545	0.96
WRC-3	9768	1.22	7998	1.17

Table.8 Axial force ratio in elastic region

	RC部分 %	集成材 %
WRC-1	94.4	5.6
WRC-2	93.8	6.2
WRC-3	87.4	12.6

Table.9 Axial force ratio at the ultimate axial strengths

	最大軸耐力		集成材			RC部分		
	荷重 kN	軸ひずみ %	応力度 N/mm ²	負担軸力 kN	比率 %	応力度 N/mm ²	負担軸力 kN	比率 %
WRC-1	3542.5	0.175	34.9	384.4	10.9	40.0	3158.1	89.1
WRC-2	3529.5	0.236	32.5	468.6	13.3	40.5	3060.9	86.7
WRC-3	3450.0	0.222	23.5	527.8	15.3	43.3	2922.2	84.7

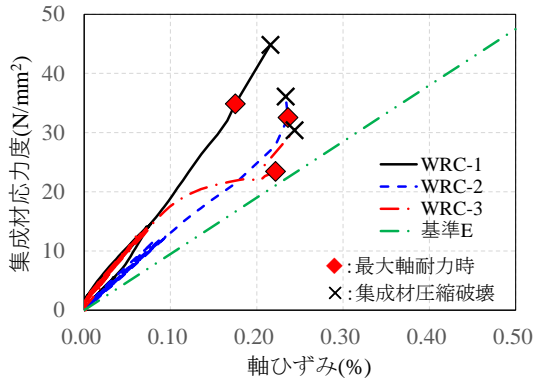


Fig.8 Changes in axial stress of laminated lumber

視すると次の式(5)および式(6)のように考えることができる (記号の説明は式(1)・(2)を参照).

$$\text{RC部分の負担割合} = \frac{E_C \cdot A_C}{E_C \cdot A_C + E_W \cdot A_W} \quad (5)$$

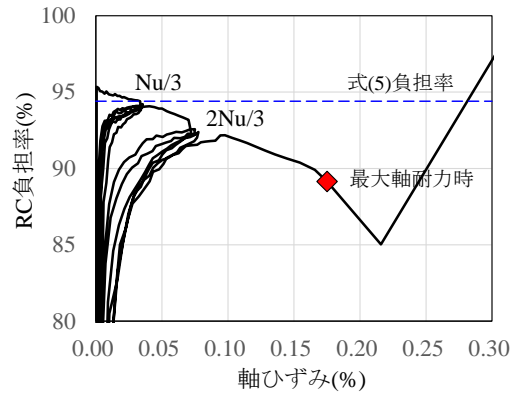
$$\text{集成材の負担割合} = 1 - \frac{E_C \cdot A_C}{E_C \cdot A_C + E_W \cdot A_W} \quad (6)$$

式(5)・(6)により算出した軸荷重の負担割合を Table.8 に示す. 集成材の剛性は, 集成材の軸圧縮試験から得られた Table.5 に示す軸剛性を使用した. Table.8 より式(5)・(6)で算出された弾性域における圧縮荷重の負担割合は, 弾性ほとんどが RC 部分であることが分かる.

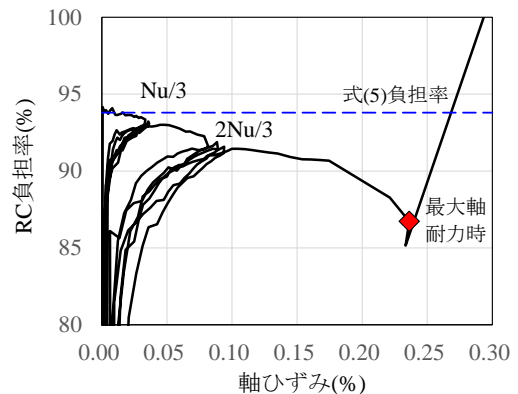
4. 2. 3 弾塑性域における性状

Table.9 に最大軸耐力時における RC 部分と集成材との軸荷重負担率を示す. また, Fig.8 に木芯コンクリート柱内部の集成材応力度-軸ひずみ度関係を示す. Table.9 および Fig.8 の集成材応力度および負担軸力は, 集成材に貼付したひずみゲージ実験値と集成材単体の軸圧縮試験から得られたヤング係数 (Table.5) から算出した. Fig.5 に示した集成材の応力度-ひずみ度関係から集成材は破壊するまでほぼ一定の剛性を保つと仮定している. Fig.8 中の×は, 集成材単体試験による最大応力度を超えない上限である. いずれの集成材も木芯コンクリート柱の最大軸耐力直後にひずみが急激に増加し破壊している. さらに, Fig.9 に実験初期から最大軸耐力以降に至る RC 部分負担率の推移を示す. 横軸は木芯コンクリート柱全体の軸ひずみ(%)である.

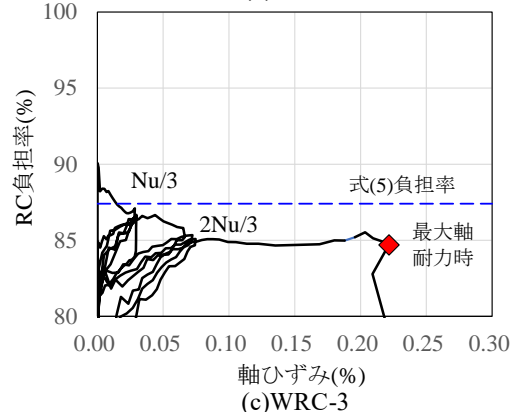
Fig.5 と Fig.8 を比較すると, 105 角(WRC-1)・120 角(WRC-2)の集成材は, 単体試験と同様な応力度-ひずみ



(a)WRC-1



(b)WRC-2



(c)WRC-3

Fig.9 Changes in axial force ratio of RC-section

度関係であるが, 150 角(WRC-3)の場合, 2Nu/3 以降で軸剛性が低下している.

Fig.9 より初期から Nu/3 および 2Nu/3 における RC 部分の負担率は, 全体の軸ひずみの増加に比例して集成材の軸ひずみが増え集成材の軸荷重負担が増加するため, 軸ひずみの増加に伴い減少していくことが分かる. RC 部分負担率の推移から式(5)による負担割合は, 概ね Nu/3

と考えることができる。

RC部分の負担率の減少の程度に着目するとWRC-1とWRC-2のRC負担率は、軸ひずみ0.15%程度まで軸ひずみの増加と反比例関係にあるが、WRC-3では $2Nu/3$ 以降、最大軸耐力まで減少がなく一定となった。

最大軸耐力の直後に集成材が破壊応力度に達した。これ以降の集成材負担荷重はいきなりゼロになることはないと考えられるが、破壊後の負の剛性が不明であるため負担ゼロとした。そのため、WRC-2とWRC-3ではRC部分の負担率が急激に上昇し、全荷重をRC部分が負担しているようになった。Fig.6におけるWRC-2とWRC-3の最大軸耐力後の急激な荷重低下の要因は、集成材の破壊によるものと考えられる。

集成材断面がWRC-2,WRC-3よりも小さいWRC-1は柱としての軸剛性が高いので最大軸耐力時の軸ひずみ(0.173%)が他の2体よりも小さくなったと考えられる。また、集成材断面が他の2体よりも小さかったため集成材破壊後の荷重低下が顕著ではなかったと思われる。

5. まとめ

集成材を鉄筋コンクリート断面の中央に配置した木芯コンクリート柱の中心圧縮実験および使用した集成材の軸圧縮実験の検討から下記の知見が得られた。

- 1) 構造用集成材の軸方向圧縮実験から、強度等級で示された圧縮強度およびヤング係数の値には余裕があることが確認できた。特に圧縮強度は圧縮基準強度に対して1.5倍以上であった。
- 2) 木芯コンクリート柱は集成材の断面積を増やしてもコンクリート強度と同等の強度を有する集成材を使用することによりRC柱とほぼ同等の最大軸耐力を保有することが可能である。
- 3) 木芯コンクリート柱の最大軸耐力は、RC柱に集成材の軸耐力を累加することによりRC柱と同様の精度で推定できる。
- 4) 木芯コンクリート柱の最大軸耐力時の軸ひずみは、集成材の断面積比が大きくなるほど大きくなる傾向がある。
- 5) 木芯コンクリート柱のRC部分と集成材の負担割合は、軸ひずみが増すにつれRC部分の負担割合が減少する傾向が見られた。弾性剛性により算出した負担割合は、最大軸耐力の1/3程度に相当することが分かった。

謝辞

本研究の実験や分析では卒業生の大上拓海氏には多大な協力を賜りました。また、実験実施については多数の学生に協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 国立研究開発法人国立環境研究所 環境省地球環境局総務課脱炭素社会移行推進室 監修：日本国温室効果ガスインベントリ報告書，温室効果ガスインベントリオフィス（GIO）編，pp.2-1～3，2020.
- [2] 国土交通省：個別研究開発課題評価書（その2），新しい木質材料を活用した混構造建築物の設計・施工技術の開発，p.2，2017.3
- [3] 国土交通省住宅局建築指導課長：耐火構造の構造方法を定める件の一部を改正する件及び準耐火構造の構造方法を定める件の一部を改正する件の施行について（技術的助言），2018.3
- [4] Fauzan， Hiroshi Kuramoto, Yutaka Shibayama and Tetsuro Yamamoto：Structural Behavior of Engineering Wood Encased Concrete-Steel Composite Columns，コンクリート年次論文集，Vol.26，No.2，pp.295-300，2004.
- [4] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.55-57，2018.12
- [5] 小阪義夫，森田司朗：鉄筋コンクリート構造，p.72，1975.12.