

# アンボンド PC 鋼より線により圧着された集成材梁を有する 十字形部分架構の静的載荷実験

## Static Load Test of Interior Beam Column Subassemblages with Unbonded Prestressed Timber

構造技術部 白山 貴志 TAKASHI SHIRAYAMA  
構造技術部 徳武 茂隆 SHIGETAKA TOKUTAKE  
構造技術部 佐藤 希 NOZOMI SATO  
技術企画部 新上 浩 HIROSHI SHINJO  
技術研究所 田野 健治 KENJI TANO

木材は、その繊維方向に対し繊維直交方向は著しく柔らかく、強度が低いという異方性材料である。モーメントに抵抗できる柱梁フレームを構築しても、その異方性のため剛性は低く、耐力はその接合部により決定されることが多く、柱、梁そのものの部材性能を十分に生かしきれていないと難しい。著者らは、それら従来のモーメント抵抗接合より性能の高いフレーム構造の開発を目指し、柱梁接合部を鉄筋コンクリートとし、集成材梁を圧着接合する複合構造を考案し、十字形架構の静的載荷実験によってその性能を検証した。その結果、本架構は梁部材の持つ性能、およびプレストレスの効果を十分に発揮できることが確認された。

**キーワード**：アンボンド PC 鋼より線，集成材，圧着工法，鉄筋コンクリート，十字形架構

Timber is anisotropic material and the stiffness and strength of the perpendicular direction to the grain are significantly lower than those of parallel to the grain. Therefore, moment resisting timber frames have low stiffness and the strength is often limited by strength of the joint, so that it is hard to make full use of the capacity of timber. The authors conducted static load tests of prestressed Glued Laminated Timber (GLT) subassemblages with RC beam column joint aiming for the higher stiffness and strength and confirmed the feasibility from the test results.

**Key Words**: Unbonded Prestressing Strand, Glued Laminated Timber, Posttensioning Assembly, Reinforced Concrete, Interior Beam Column Subassemblages

### 1. はじめに

近年さまざまな用途の中大規模建築物の構造用材料として、世界的に木材への需要が高まっており、多様なプランに対応するため、さまざまな工法が開発されてきている。そのような背景の中、海外ではモーメント抵抗接合の一つとして、プレストレスを木質の梁に導入した圧着工法が開発され、実際に適用された建築物は、今までの木造建築物とは異なり、柱や壁の少ない大空間を造り出している。一方、日本においては、木質材料の梁にプレストレスを用いて圧着接合した架構の実験等が報告<sup>2,3)</sup>されてはいるが、しかし未だその例は少なく、その耐力や変形性能について、十分な知見が得られているとは言えない状況である。

また、プレストレスを導入した木質構造フレームを考えた時、木材の繊維直交方向のめり込みに対する剛性や強度は繊維方向のそれに比べて、極端に低いという異方性に対処する必要がある。通常、柱や梁の材軸が繊維方向となっており、柱繊維直交方向へ直に梁を圧着させた場合には、従来のモーメント抵抗接合同様、梁部材自体が持つ性能を十分に発揮させることは難しい。

そこで本実験では、木材の繊維直交方向のめり込みの影響をなくすために柱梁接合部に鉄筋コンクリート造を採用し、集成材梁をアンボンド PC 鋼より線により圧着接合した十字形部分架構の静的載荷実験を行い、その耐力や架構の挙動について確認した。

## 2. 実験の概要

### (1) 試験体概要

試験体は 8~10m スパンを持つ中規模程度の建築物を想定し、縮尺を約 3/4 とした十字形部分架構 3 体とした。**Table1** に試験体諸元を、**Fig. 1, 2** に試験体概要図を示す。

WJC-1 は柱梁接合部をプレキャスト鉄筋コンクリート部材とし、梁心に直線配置したアンボンド PC 鋼より線によるプレストレスで両側の集成材梁を接合部に圧着させた試験体で、WJC-1E は長期荷重によるモーメントをキャンセルすることを考慮し、PC 鋼より線を梁上端側に 75mm 偏心させたものである。両試験体とも柱も集成材であり、鉄筋コンクリート接合部に通し配筋した全ネジボルト (14-M24:SNR490) を柱に設けた孔に挿入し、二液混合型エポキシ樹脂系接着剤を用いて接合 (Glued-in Rod, 以降 GIR と表記する) した。CJC-1 は柱全長を鉄筋コンクリート造としたもので、梁については WJC-1 と同様である。また、各試験体の集成材柱、および梁は RC 部と接する面に 20mm 厚でグラウトしている。

### (2) ラミナ圧縮強度

本実験で使用する梁は **Fig.3** に示すように、等級の異なる約 30mm 厚さのラミナ 15 層により構成される断面を持つ対称異等級構成集成材である。構成された断面については、**Table1** に示すように圧縮強度等が規定されているが、実際は梁断面内の各ラミナは等級により曲げ剛性、曲げ強度が異なるうえ、JAS 等による圧縮強度の規定がない。本実験では集成材梁の圧縮端での圧壊を想定しており、より詳細に梁断面内の圧縮強度分布を把握する必要があると考え、梁に使用されているラミナ等級ごとに圧縮試験を行い、各々の性能の確認を行った。試験用ラミナは 30×30×180mm の直方体 3 体を各等級のラミナから切り出した。試験結果を **Table2**、破壊状況の例を **Photo1**、圧縮応力と試験体中央部 2 面に貼ったひずみゲージの平均値との関係を **Fig.4** に示す。また、**Table2** に示すヤング係数は各々の圧縮強度に対する 10% 応力時と 40% 応力時を結ぶ直線の傾きとしている。

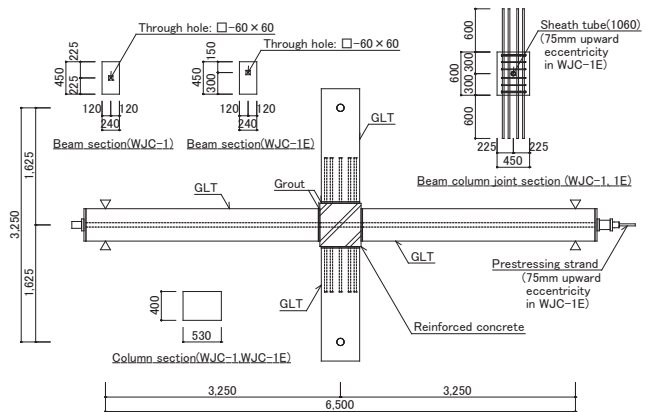
### (3) GIR 引張強度

本試験体は実際の施工性を考慮し、RC 柱梁接合部と集成材柱の接合に GIR を採用している。認定や評定を受けたメーカー仕様ではなく、当社独自仕様としており、引張強度と引張剛性の確認をするため要素引張試験を行い、本試験体の柱接合部の設計を行うこととした。要素引張実験概要図を **Fig.5** に示す。使用する材料には架構実験で採用したものと同一 E105-F300 のカラマツ集成材

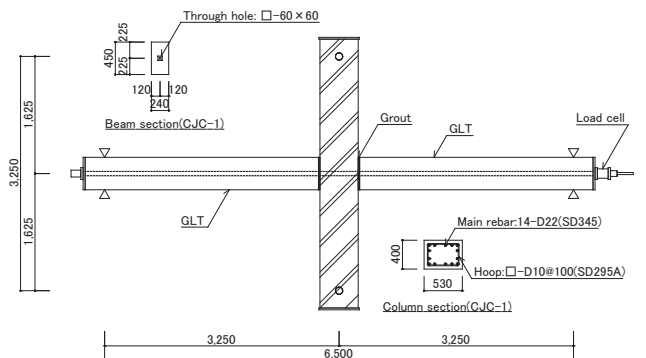
**Table1** Specimen details

Specimens		WJC-1	WJC-1E	CJC-1
Tendon	Number-Diameter	1-φ28.6(SWPR19L)		
Beam	Material	GLT(Japanese Larch)		
	Strength-Grade	E105-F300		
	Width×Depth[mm]	240×450		
	Compressive strength[N/mm <sup>2</sup> ]	23.2		
	Bending strength[N/mm <sup>2</sup> ]	30.0		
	Coefficient of tendon(q) <sup>※1</sup>	0.32		
	Initial post tension force[kN]	609	591	606
	Ratio of initial tensile stress(η) <sup>※2</sup>	0.75	0.73	0.75
	Eccentricity of tendon arrangement	-	75mm	-
	Compressive strength of grout[N/mm <sup>2</sup> ]	125	117	109
Column	Material	GLT(Japanese Larch)[E105-F300]		RC
	B×D[mm]	400×530		
Beam Column Joint	Compressive strength[N/mm <sup>2</sup> ]	56.3	63.1	52.9
	Young's modulus[10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> ]	31.5	34.5	30.9

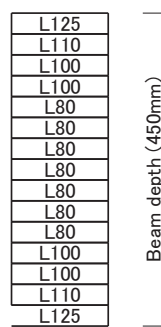
※1 Ratio of the sum of tensile yield load of all tendons to the product of cross sectional area and its compressive strength  
 ※2 Ratio of the initial tensile stress to tensile yield strength of the tendon



**Fig.1** Elevation and cross sections of specimen WJC-1, 1E



**Fig.2** Elevation and cross sections of specimen CJC-1



**Fig.3** Composition of laminae

**Table2** Results of compression test

Test specimens	Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )
L80-1	53.3	11.4
L80-2	40.2	7.0
L80-3	38.0	6.4
L100-1	60.6	12.2
L100-2	61.2	12.5
L100-3	56.7	11.8
L110-1	60.4	12.0
L110-2	52.5	8.5
L110-3	54.6	9.0
L125-1	82.6	18.7
L125-2	76.3	14.6
L125-3	80.3	17.0

と M24 (SNR490) 全ネジボルトを使用し、実験因子は鋼棒埋込み長さ $e$ と鋼棒芯から集成材外縁までの距離 $e$ （へりあき）とした。

要素引張試験結果一覧を Table3 に、最終破壊状況を Photo2 に、荷重と鋼棒の抜け出し量の関係を Fig.6 に示す。すべての試験体において、破壊形式は Photo2 に示すように木材の割裂破壊であった。そのため、へりあき 2.5d シリーズの引張耐力が大きくなっていると考えられる。また、へりあき 1.7d の試験体では埋込み長 25d が 20d より最大荷重平均値で約 7%大きくなったが、へりあき 2.5d では定着による差は見られなかった。しかしながら Photo2 に見られるように、すべての試験体で木材小口部に孔からあふれ出た余分な接着剤が付着しており、各試験体でその量も異なっており、試験結果に影響を与えている可能性がある。

なお、架構試験体の GIR 部のへりあきは 2.5d、埋込み長さは 25d であり、同様のサイズの要素引張試験体は 1 体しかないが、木材の強度、剛性はばらつきが大きいことを考慮して、試験結果と接着剤メーカー資料をもとに 1 本あたりの引張強度 150kN、最大荷重時のすべり量を 2.0mm と設定し、参考資料<sup>4)</sup>をもとに柱接合部を設計した。

(4) 加力方法

載荷装置計画図を Fig.7 に示す。試験体は柱部分の上下反曲点位置でピン支持としてセットし、梁にプレストレスを導入し圧着させた後、梁部分の左右反曲点位置に載荷用の油圧ジャッキを取り付けた。載荷は上記の状態において、Fig.8 に示す左右の梁の載荷点の変位 $(\delta_n, \delta_s)$ を 0 とし、柱軸力を 180kN まで与え、左右の油圧ジャッキより梁にせん断力を加える方法とした。なお、柱梁接

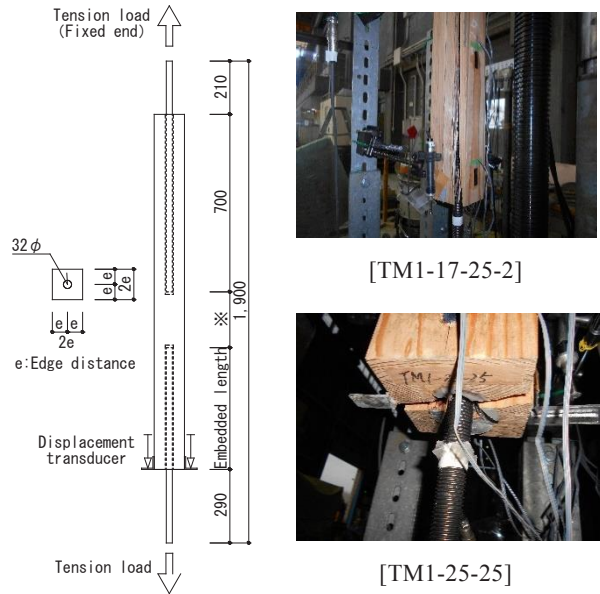


Fig.5 Test specimen

Photo2 Failure mode

Table3 Results of tension test

Tension test specimen	No.	Bolt	Timber size (mm*mm)	Edge distance (mm)	Embedded length (mm)	Maximum load (kN)		Slip (at Maximum load) (mm)
						Result	Ave.	
TM1-17-20	1	M24	80*80	40 (1.7d)	480 (20d)	140.2	142.4	2.12
	2					145.0		3.00
	3					131.7		2.99
	4					152.8		2.62
TM1-17-25	1	M24	80*80	40 (1.7d)	600 (25d)	148.9	151.8	3.58
	2					160.8		5.12
	3					145.5		2.15
TM1-25-20	1	M24	120*120	60(2.5d)	480(20d)	169.6		5.37
TM1-25-25	1	M24	120*120	60(2.5d)	600(25d)	166.6		3.72

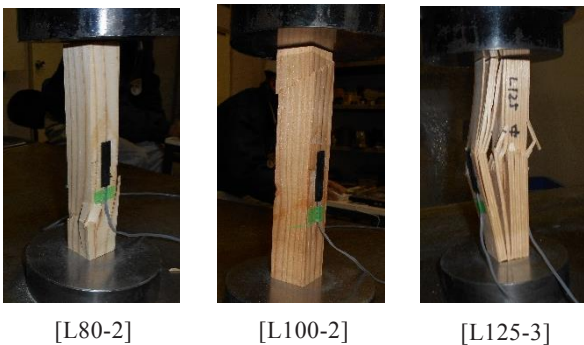


Photo1 Fracture modes

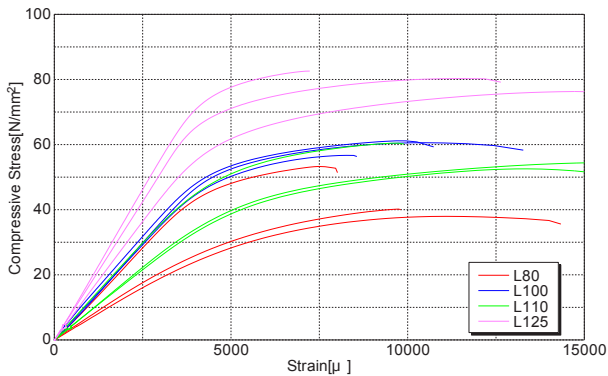


Fig.4 Compression stress - strain relationships

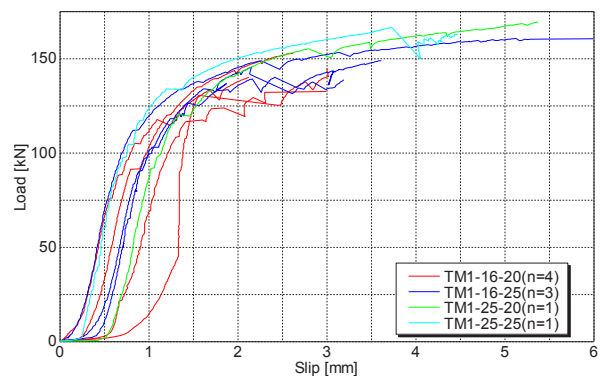


Fig.6 Tension load - slip relationships

合部のみ RC 造の試験体は、集成材柱と RC 接合部の GIR を柱セット前に先行して行っている。

載荷履歴は、 $n\delta$ ,  $s\delta$  が等しくなるように加力し、層間変形角  $R$  で制御し、最大変形角 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50, 1/30 の正負交番載荷を各々3回繰り返した後、梁端部の変形で各々300mm ( $R=1/10.8$ ) まで正方向に押切単調載荷を行った。

### 3. 実験の結果

#### (1) 柱せん断力-層間変形角関係

Fig.9 に、梁に与えたせん断力からモーメントの釣り合いにより計算される柱せん断力  $Q_c$  と層間変形角  $R$  の関係について示す。図中には、参考として文献<sup>5)</sup>に示されるプレレストコンクリート梁の曲げ耐力式を準用した下式、

$$M_u = T_i(d_p - k_2 \cdot x_n) \quad (1)$$

$M_u$  : 曲げ耐力

$T_i$  : 初期緊張力

$d_p$  : 圧縮縁から緊張材までの距離

$$x_n = T_i / (b \cdot k_1 \cdot k_3 \cdot F_b) \quad (2)$$

$x_n$  : 圧縮縁から中立軸位置までの距離

$b$  : 梁幅

$F_b$  : 集成材曲げ基準強度

$k_1 : 0.85, k_2 : 0.42, k_3 : 1.0$

により算出した梁曲げ耐力、および後述する式(3)により算定した梁曲げ耐力から求められる柱せん断耐力を破

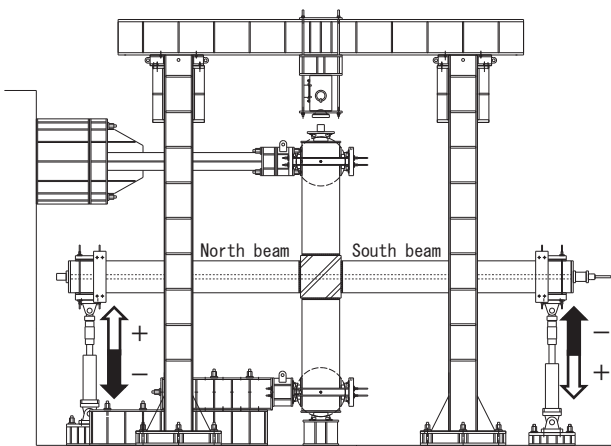


Fig.7 Test setup

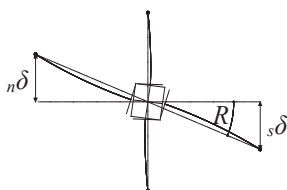


Fig.8 Story drift angle  $R$

線で示している。

すべての試験体において、柱せん断力と層間変形角の関係は  $R=1/100$  付近まで非線形弾性挙動を示した。 $R=1/75$  から  $1/30$  の間では、初載荷時の復元力特性に非弾性挙動がわずかに見られたが、 $Q_c=0$  時の残留変形は非常に小さく、プレストレスが有効に機能していたと考えられる。2回目以降のサイクルでは初載荷時の除荷剛性をたどるが、耐力の低下は見られず、 $R=1/10.8$  の大変形時まで耐力を一定に保持した。ただし、WJC-1E については、北梁が  $n\delta=287\text{mm}$  ( $R=約 1/11.3$ ) 時において梁

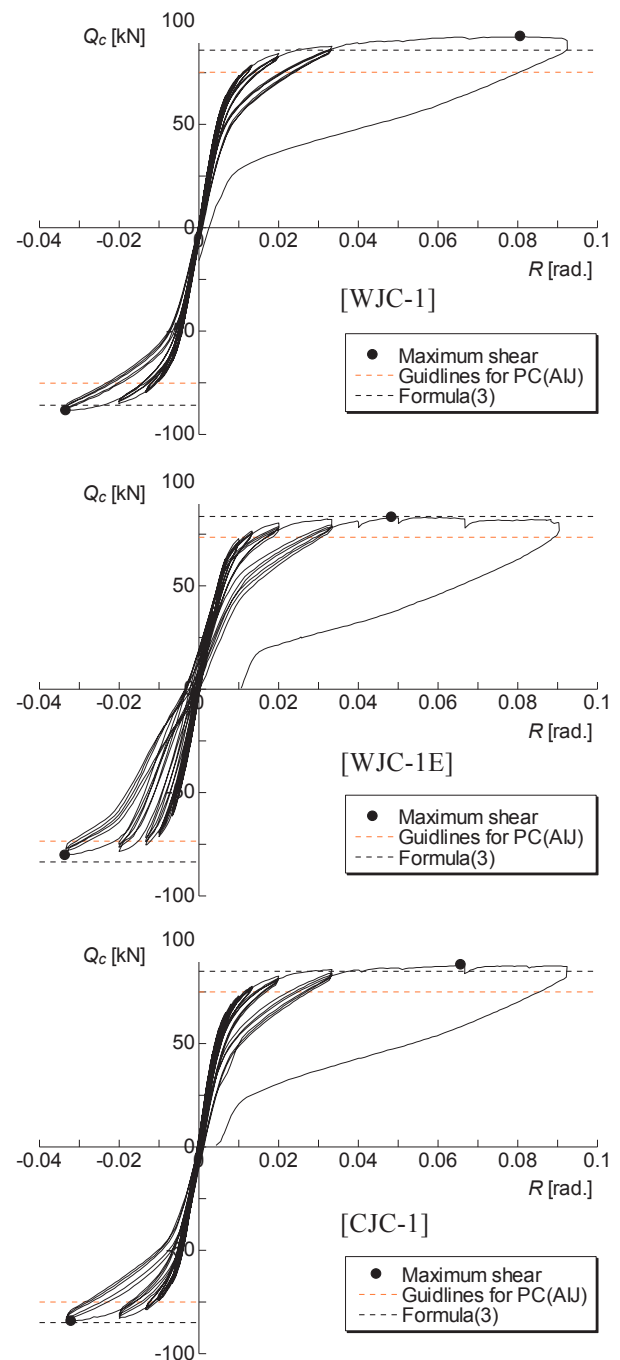


Fig.9 Story share force  $Q_c$  - story drift angle  $R$  relationships



圧着部にせん断破壊 (Photo3 [R=1/10.8]参照) が生じたため、それ以降の加力を中止 (変形は維持) し、南梁のみ載荷を続けた。

## (2) 破壊状況

梁圧着部でのディコンプレッションはすべての試験体において  $R=1/450\sim 1/300$  の加力サイクルで生じた。柱梁接合部のみ RC 造である WJC-1, および 1E とも、集成材柱と RC 接合部の継目であるグラウト部に  $R=1/150$  サイクルで曲げひび割れが発生し、接合部せん断ひび割れが WJC-1 で  $R=+1/30$ , WJC-1E では押切載荷時に発生した。CJC-1 においては、 $R=1/100$  サイクルで柱危険断面付近に曲げひび割れが、 $R=+1/75$  載荷時に接合部せん断ひび割れが生じた。しかしそれらの損傷は、その後の加力で特に大きく広がることはなかった。

Photo3 に WJC-1E 北梁の  $R=+1/30$  時と押切時の梁端部破壊状況を示す。すべての試験体の梁側面に圧着部から梁軸方向に沿って Photo3 [R=+1/30] に示すような割れが発生し、WJC-1 では  $R=+1/50$  載荷時に南梁、 $R=-1/30$  載荷時に北梁、CJC-1 は  $R=-1/50$  の 2 サイクル目に北梁、 $R=+1/30$  載荷時に南梁に割れが生じた。緊張材を梁上端側に偏心して配置した WJC-1E は  $R=+1/100$  載荷時に北梁、南梁では  $R=-1/30$  載荷時に生じ、割れの幅と長さが層間変形角の増大に伴い、ほかの 2 体と比較して大きく拡大、進展した。また、これらの割れは逆方向載荷時には閉じる傾向も見られた。試験終了後、梁断面を確認したところ、すべての試験体において、割れが梁の幅方向に貫通していた。しかしながら、これらの割れにより耐力が低下することはない、最終的には集成材梁圧着部の圧縮降伏、またはせん断破壊 (WJC-1E の北梁のみ) が生じている。

また、本試験体は圧着部にシアキーを設けていないため、損傷が進むにつれ、繰り返し載荷による梁圧着端部の移動が生じた。特に WJC-1E の北梁では集成材に割れが生じた後、繰り返し載荷に伴い、梁の圧着側端部が下方へ移動し始め、 $R=1/30$  サイクル終了時には梁圧着端



[R=+1/30]

[R=1/10.8]

Photo3 Side view of north beam's end(WJC-1E)

部下端側にあてた変位計で約 28mm 下がったことが計測された (Photo3 参照)。なお、WJC-1 と CJC-1 の梁圧着端部については 1~2mm 程度のずれであった。また、試験終了後の圧縮降伏した集成材梁の端部断面に現れる残留変位から推計すると、WJC-1E の北梁で 15mm 程度、その他の試験体では 5mm 程度幅方向にもずれが生じていたと思われる。

## (3) 変形成分割合

Fig.10 に WJC-1, CJC-1 の柱、梁、および接合部の各変形成分 ( $R_c$ ,  $R_g$ ,  $R_j$ ) の正載荷時ピーク層間変形角に対する割合を示す。梁の変形成分には圧着部の目開きによる回転を含んでいる。両試験体とも、微小変形時から梁の変形成分割合が高く、大変形時では 90%以上が梁の変形成分で占められた。

WJC-1 の柱変形成分割合が CJC-1 に比べ高くなっているが、集成材柱と RC 接合部の接続部である GIR 部分に特にすべりは確認されておらず、RC 柱よりヤング係数、およびせん断弾性係数の低い集成材柱の変形により変形割合が増大したものと考えられる。

また、WJC-1 の接合部変形成分の占める割合がほぼない。損傷状況から見ても接合部せん断ひび割れの発生が  $R=+1/30$  と非常に遅く、これは、RC 接合部がほぼ剛体

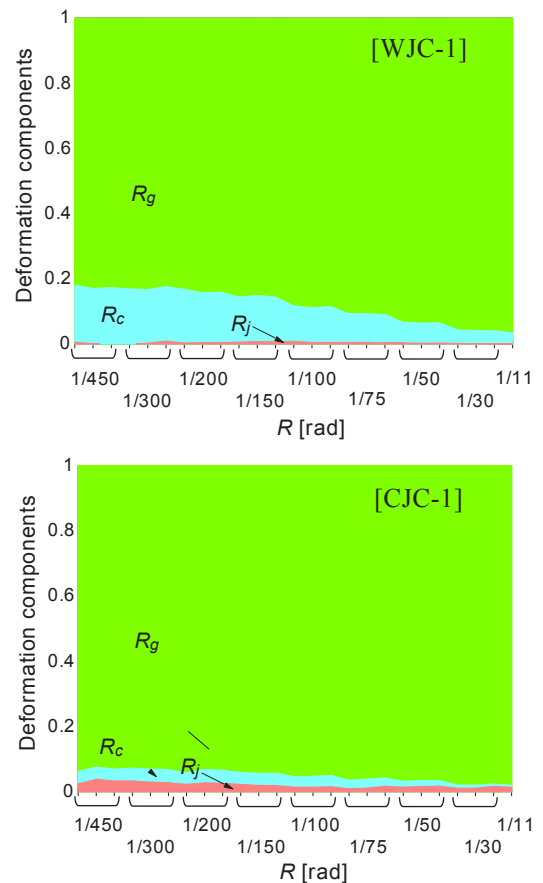


Fig.10 Deformation components contributions

のまま回転していたことを示している。

なお、WJC-1EについてはWJC-1と同様の傾向を示していた。

(4) 梁圧着端部の回転

本架構の挙動は、前述したように梁圧着端部の目開きによる梁端部回転の影響が大きい。そこで Fig.11 にすべての試験体の梁圧着端でのモーメントと梁圧着端部における回転角の関係を示す。梁圧着端部の回転角は Fig.12 に示す変位計の計測値から算出した。なお、WJC-1E の北梁については、 $R=1/50$  の3サイクル目に梁圧着端部の下方への移動が大きくなり、梁下端側の RC 接合部との相対変位が計測できなくなり、計測を中止し

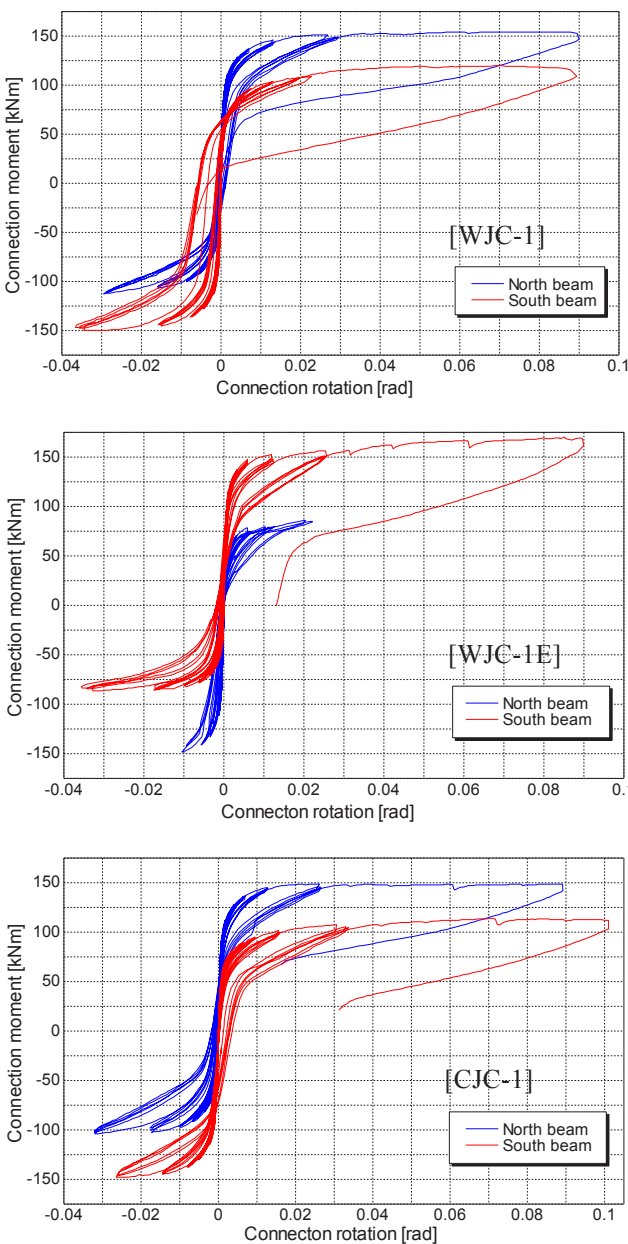


Fig.11 Connection moment and connection rotation relationships

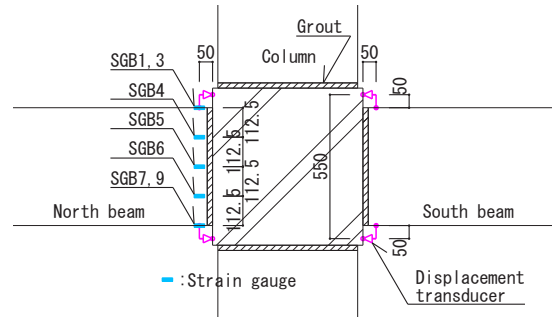


Fig.12 Arrangement of measuring devices

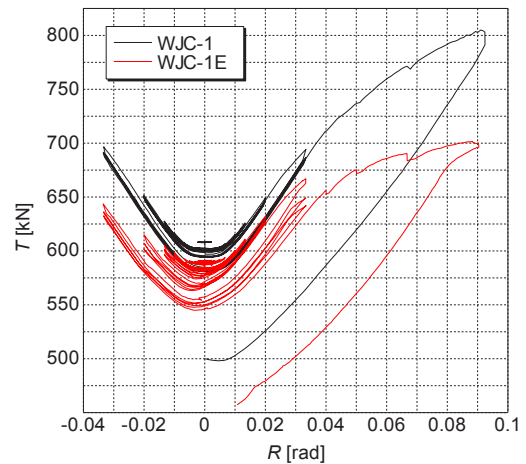


Fig.13 Tension force of PC strand

ためグラフが示されていない。

すべての試験体で圧着端部のモーメントー回転角関係に  $Q_c-R$  関係と同様の非弾性挙動が存在しており、また変形成分割合も考慮すると、架構全体の挙動において、圧着部の目開きによる回転変形特性が支配的であることが分かる。また、南梁について、PC 鋼より線を偏心配置させた WJC-1E での最大曲げモーメントは、偏心させていない試験体より約40%大きくなっている。よって、緊張材を偏心配置させることで長期応力による曲げモーメントをキャンセルし、正負の曲げ耐力のバランスを計ることができる。

なお、各試験体における南北梁間でのモーメント差は、梁自重、および梁先端に取り付けた冶具等の重量の影響である。

(5) 緊張力の推移

Fig.13 にロードセルで計測した WJC-1、および 1E の PC 鋼より線緊張力 ( $T$ ) の繰り返し载荷に対する推移を示す。両試験体とも層間変形角の増大に伴い緊張力も増加し、また、梁圧着端部の損傷が進むにつれ集成材の縮みが進み、 $R=0$  での緊張力が低下した。また、梁の損傷が大きかった WJC-1E の押切時での緊張力の増加は WJC-1 より小さかったが、 $R=1/30$  までの緊張力の層間

変形角に対する増加率は両試験体ではほぼ同等であった。

(6) 最大耐力の評価

Fig.14 に WJC-1, および 1E の荷重開始時～R=1/30 までの各最大変形角初荷重時でのひずみ分布を示す。なお、各ひずみゲージの位置は Fig.12 に示す通りである。2章2節のラミナの材料試験結果を考慮すると、このグラフからは WJC-1 で R=1/75 前後、WJC-1E は R=1/100 前後で梁圧着端部の集成材が圧縮降伏していると思われる。

また、曲げ耐力を考察するため Fig.9 の図中に黒破線で示した耐力は、Fig.15 に示す曲げ圧縮端側からの試験結果によるラミナの圧縮強度の和と初期緊張力の釣り合いを仮定した式(3)による  $M_y$  から算出される曲げ耐力を示している。

$$M_y = T_i(d_p - d_c) \tag{3}$$

$$d_c = \frac{\sum_{i=1}^n (f_{ci} \cdot t_i \cdot b \cdot h_i)}{C} \tag{4}$$

$$C = \sum_{i=1}^n (f_{ci} \cdot t_i \cdot b) \tag{5}$$

ここで、

$C$  : 圧縮合力

$f_{ci}$  : ラミナ等級ごとの圧縮強度平均値

$t_i$  : 各ラミナ厚さ

$h_i$  : 各ラミナにおいて、圧縮強度に達した範囲の圧縮縁からの距離

$T_i$  : 初期緊張力

試験結果との対応から、集成材の曲げ圧縮強度を用いて本架構の梁曲げ耐力を評価できると考えられる。

Fig.16 に層間変形角と梁圧着端部モーメントを緊張力 ( $T$ ) で除すことにより算定した梁危険断面位置での応力中心間距離 ( $j$ ) の関係を示す。R=1/50 以降、応力中心間距離がほぼ一定となるか、またはゆるやかに減少している。実際の挙動として圧着部の回転変形が増大するに従い、緊張材の張力も増加したが、それともなって集成材梁圧着端部の曲げ圧縮端側から内側に圧縮降伏領域が拡大していったものと思われる。ラミナ材料試験における圧縮強度-歪関係では、非線形領域に入ってから最大強度を経験し試験終了するまでの間、非常にゆるやかな勾配を描いており、部材の曲げ強度算定時のラミナ

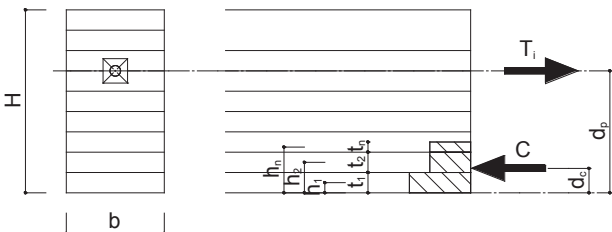


Fig.15 Explanatory diagram of formula(3)-(5)

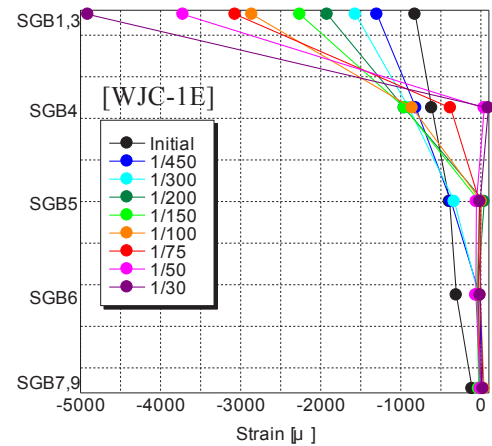
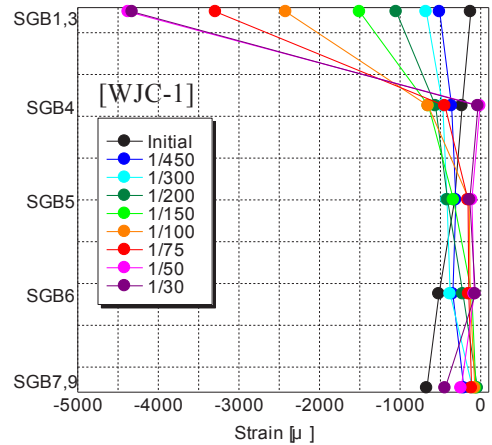


Fig.14 Strain of beam's edge

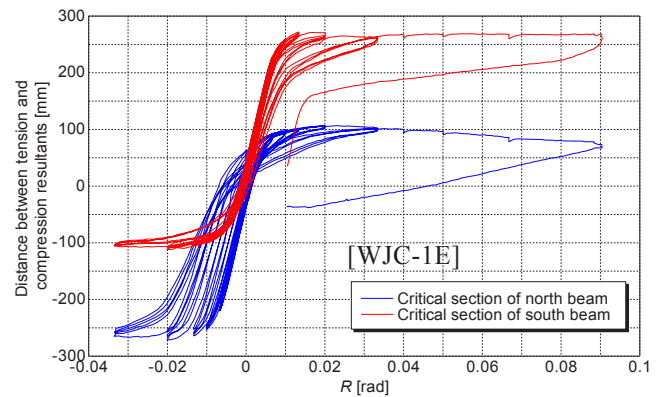
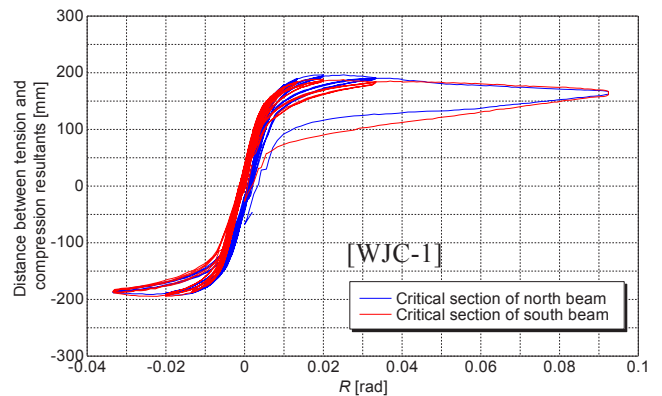


Fig.16 R and distance between tension and compression resultants j relationships

の圧縮強度の評価方法についてはより詳細な検討が必要であると思われる。

#### 4. まとめ

本論では、集成材梁にプレストレスを導入した十字形部分架構の静的載荷実験を行い、その結果について報告した。

実験により本架構について得た知見を以下にまとめる。

- ①柱梁接合部を RC 造とすることで、集成材梁自体が持つ性能をより発揮させることができ、架構として高い耐力、剛性を得ることができた。
- ②層間変形角  $R=1/30$  までおおむね非線形弾性の復元力特性を有し、残留変形も小さく、耐力も約  $R=1/10$  まで保持した。
- ③梁の軸方向割れは剛性低下を招くが、耐力は低下せず、曲げ耐力は木材の圧縮降伏、またはせん断破壊により決定された。よって最大曲げ耐力は集成材の曲げ圧縮強度により算定可能と思われるが、その際の強度の評価手法については今後のさらなる検討が必要である。
- ④最大耐力を発揮した後の靱性能は集成材梁の圧縮特性によるものが大きいと考えられるが、梁圧着部の回転変形が大きくなり、圧着面積が小さくなると、せん断破壊を起こす可能性がある。

謝辞：本実験を進めるにあたり、工学院大学建築学部河合直人教授、J 建築研究所 手塚慎一氏にご指導、ご協力をいただきました。ここに深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Palermo, A., Pampanin, S., Buchanan, A. & Newcombe, M.: Seismic Design of Multi-Storey Buildings using Laminated Veneer Lumber(LVL), New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference, 2005.5
- 2) 塩屋晋一, 松木和彦, 有馬桃子: プレストレスを利用する木造ラーメンの剛接合法に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.632, pp.1787-1796, 2008.10
- 3) 池上寛樹, 山崎義弘, 坂田弘安: 集成材を用いた圧着工法による圧着部の力学的挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.595-596, 2018.9
- 4) 田中圭, 井上正文, 後藤泰男: GIR (Glued-in Rod) 接合法を用いた木質構造接合部の曲げ耐力算定法, 日本建築学会九州支部研究報告集, Vol.41, pp.297-300, 2002.3
- 5) 日本建築学会: プレストレストコンクリート造建築物の性能評価型設計施工指針(案)・同解説, 2015