

〈一般研究課題〉 CLT制振架構における接合部の
力学的挙動に関する実験研究
助成研究者 名城大学 松田 和浩



CLT制振架構における接合部の 力学的挙動に関する実験研究

松田 和浩
(名城大学)

Experimental Study on Mechanical Behavior of Passively Controlled Structure Connection with Self-centering-type CLT Wall-Columns

Kazuhiro Matsuda
(Meijo University)

Abstract :

To effectively use the large supplies of wood material obtained from forest thinning, research focused on developing cross-laminated timber (CLT) structures is increasing globally. However, the earthquake resistance of CLT structures is considered insufficient owing to the relationships between the force and deformation of CLT structures exhibiting pinched hysteresis behavior with slippage. A CLT wall-column with a self-centering function owing to pre-stress by prestressed concrete steel bar (P/C rod) and a series of so-called shear link type passive control systems to effectively reduce the seismic response and damage to CLT structures were proposed.

This paper proposes an estimation method of envelop curve about the relationships between bending moment and rotation angle at CLT connection. The estimation method is based on force equilibrium condition at cross section, some material property of multi-linear model and beam on elastic foundation theory. The accuracy of the estimation method is demonstrated by comparing with past test data.

In addition, this paper also shows the static test scheme of CLT wall-column to circumstantially confirm the accuracy of the above-mentioned estimation method, such as specimen parameter, test setup, measurement method, loading schedule and so on.

1. はじめに

2010年に施工された「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」により 中大規模建築物における木材利用が推進されている。現在、日本における中大規模建築物のほとんどは非木造だが、欧米を中心に直交集成板(Cross Laminated Timber、以下CLT)を用いた中高層建築物が建てられている。CLTは、図1に示すようにひき板を並べた層を繊維方向が直交するように交互に接着した大判のパネルで、日本における今後の普及が予想される。従来の木造建築物では 柱や梁で構成される軸組工法や 枠組材に構造用合板などの面材を打ち付けて壁や床を作る枠組壁工法がある。これに対して、CLTを用いた建築物は、CLTパネル自体を壁や床として用いて力を負担させるCLTパネル工法¹⁾が用いられる。CLTは、そのボリュームの大きさから面内の耐力や剛性が高いため、パネル自体の変形は少なく 建築物の水平変形は接合部の水平変形に起因するため 接合部では、耐力や靱性が求められる。しかし CLTを金物やボルトで接合するだけの一般的なパネル工法は、復元力特性がスリップ性状を示す^{2,3)}(図2)ため、繰り返し作用する力に弱く 地震後の機能維持が難しいという問題が生じる。

一方、セルフセンタリング機能を有したCLT壁柱と摩擦ダンパーを併用した制振架構の水平加力実験が2016年に実施され、スリップ性状のないCLT制振架構が開発された。セルフセンタリング機構とは、架構に生じた変形を自動的に元に戻す機構のことである。制振架構の水平加力実験においては、壁柱の中央にPC鋼棒を挿入しプレストレスを導入することで、壁柱を常に土台に押さ

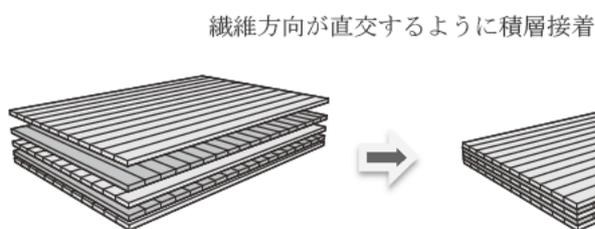
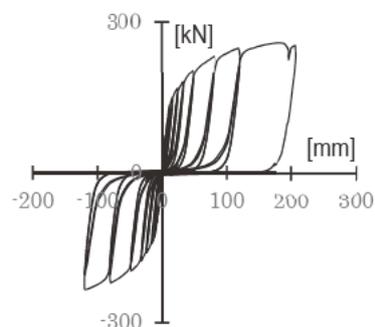


図1 CLTの積層接着



- ・著しいスリップ性状
- ・地震後の性能維持が難しい

図2 スリップ性状

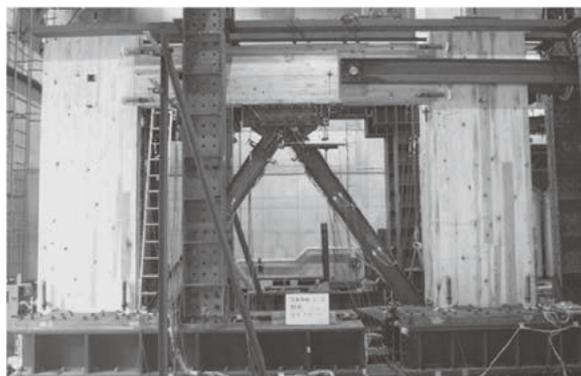
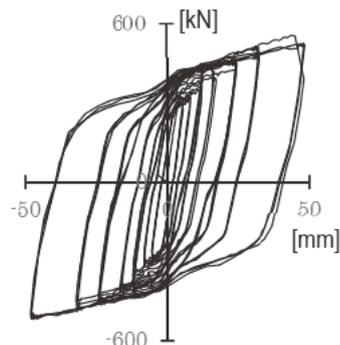


写真1 制振架構の水平加力実験



- ・スリップのない履歴

図3 制振架構の履歴特性

えつける「定着力」を与え、水平荷重が除かれたときにその定着力によって自然と水平残留変形をなくし、試験体を初期の位置に戻すために導入されている。

そして、その実験結果は、層せん断力-層間変形関係や各接合部の曲げモーメント-接合部回転角など詳細にまとめられており、セルフセンタリング機構を導入することによるCLT制振架構の力学的挙動の変化を極めて詳細に把握されている。しかし、その実験結果において 大変形時に定着力が低下することが報告されている。また、PC鋼棒を壁柱に固定するための定着板が想定よりも大きく変形していたことも問題とされている。

本研究では、制振架構の水平加力実験の実験結果を基に、定着力の指標となるPC鋼棒の張力 T_{cb} とPC鋼棒位置の柱脚浮き上がり u_c 関係を評価し、上記した問題に取り組み、さらに張力柱脚支持部のモーメント M_{cb} -回転角 θ_c 関係の評価法を提案する。また、壁柱単体の実験も行うことで上記した問題に取り組み、提案した評価法の精度の検証も行う。

2. 評価法

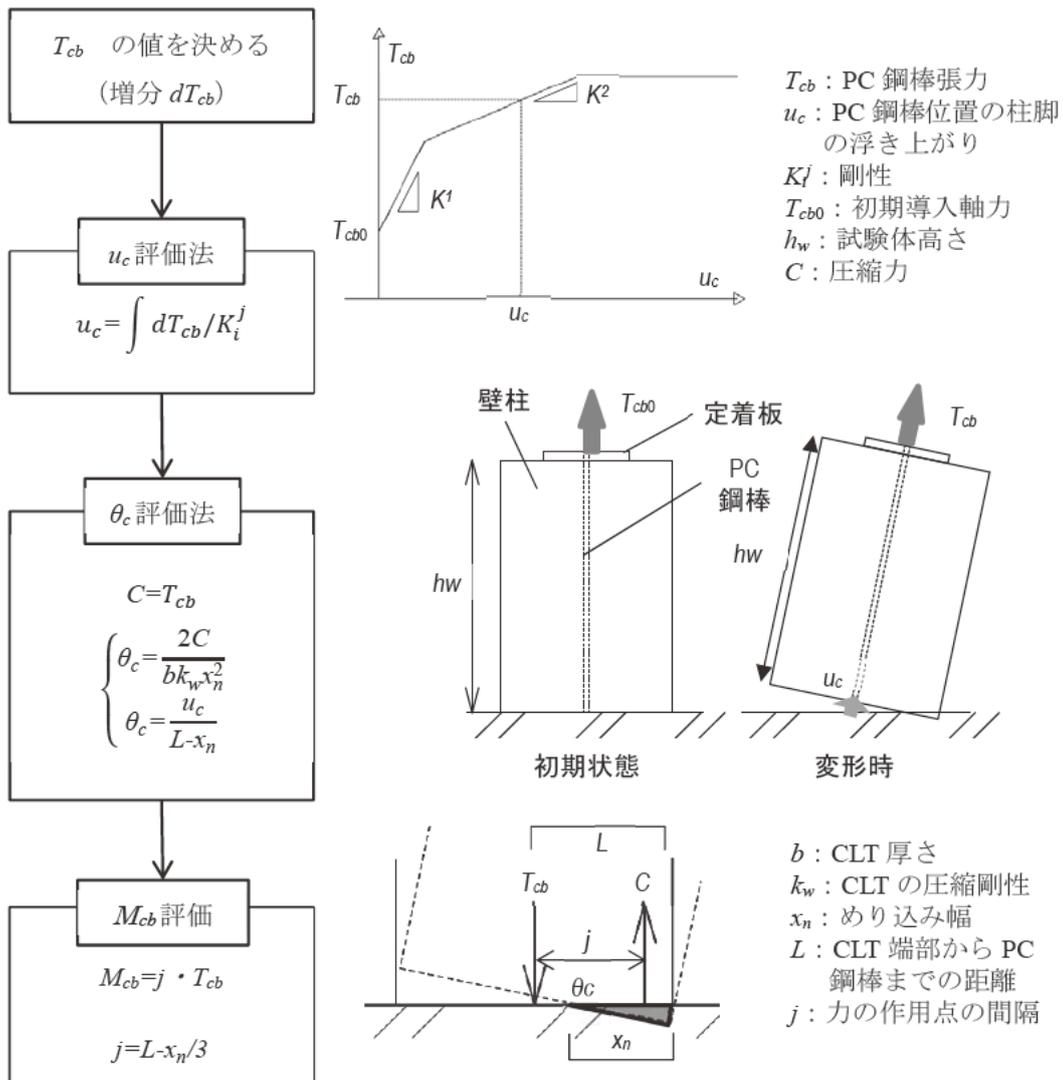


図4 評価法概要

本章では、壁柱の変形性状を把握するために、脚部と柱-梁接合部の曲げモーメント M_{cb} -回転角 θ_c 関係の骨格曲線を評価し、制振架構の水平加力実験との比較を通してその精度を確認する。ここで骨格曲線はPC鋼棒-CLT、定着板のマルチリニアモデルを直列結合して求める。評価法の概要は、図4に示す通りである。張力 T_{cb} に値を増分で決定することで、 u_c 評価法にて $T_{cb}-u_c$ 関係を算出し、次に θ_c 評価法にて C, θ_c, x_n を、最後に M_c を算出できるようになっている。

2.1.1 u_c 評価法

本項では、 u_c 評価法により $T_{cb}-u_c$ 関係の包絡線を骨格曲線で評価する手法を提案する。 u_c 評価法は、PC鋼棒の剛性 K^1, K^2 、CLT-定着板間の剛性 $K_w^1 \sim K_w^4$ を定義し u_c は式1のようにPC鋼棒の変形 dx_t と定着板を弾性床の上の梁とした場合のたわみ dx_w の和とする。変形やたわみは式2, 3より、定義した剛性 K^j を用いて算出する。 T_{cb} は初期張力 T_{cb0} に dT_{cb} の総和を足したものとする。

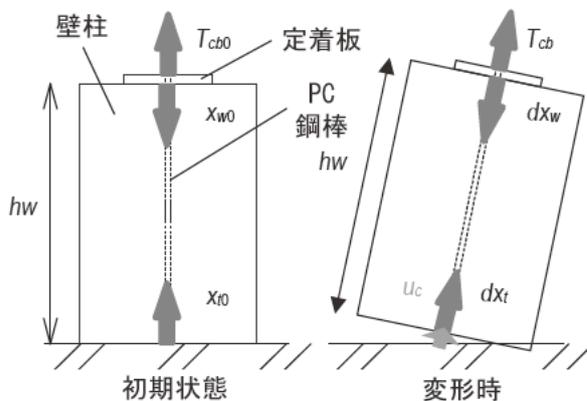


図5 PC鋼棒と定着板周辺の力

$$u_c = \int dx_t + \int dx_w \quad (1)$$

$$dx_t = dT_{cb} / K_t^j \quad (2)$$

$$dx_w = dT_{cb} / K_w^j \quad (3)$$

$$T = T_0 + \int dT_t \quad (4)$$

dx_t : PC 鋼棒の変形量

dx_w : 弾性床の上の梁とした場合の定着板のたわみ量

K_t^j : PC 鋼棒の軸剛性

K_w^j : 弾性床の上の定着板の曲げ剛性

T_0 : 初期張力

dx_0 : PC 鋼棒の初期変形量

dx_0 : 弾性床の上の梁とした場合の定着板の初期たわみ量

2.1.2. 材料特性の定義

表1にPC鋼棒と定着板-CLT間の各モデルの材料特性を示す。各ヤング係数 E の値は、以下に示すマルチリニアモデルに基づき算出します。PC鋼棒の応力度は σ_1^1 はPC鋼棒の降伏耐力、 σ_1^2 はPC鋼棒の引張強さとした。ヤング係数は、 E_1^1 は鉄のヤング係数とし、 E_1^2 は伸び5%時に σ_1^2 に達すると定めて求めた数値とした。ここで定着板の各パラメータは、定着板-CLT間に弾性床の上の梁理論を適用して求めた。定着板の第1折れ点は縁応力度が降伏応力度に達した弾性限界時とし、また第2折れ点は定着板中央が全塑性化する弾塑性限界時を想定する。それぞれの限界点の設定方法は長くなるため割愛する。

表1 u_c 評価法材料特性

| | PC鋼棒 E_t | | | 定着板-CLT間 E_w | | |
|--------|-------------------------------|--------|----------------------------|-------------------------------|---------|----------------------------|
| | ヤング係数 [N/mm ²] | 折れ点 | | ヤング係数 [N/mm ²] | 折れ点 | |
| | | ひずみ | 応力 [N/mm ²] | | ひずみ | 応力 [N/mm ²] |
| 初期(第1) | 205000 | 0.0045 | 930 | 10700 | 0.00044 | 4.72 |
| 第2 | 3300 | 0.05 | 1080 | 8440 | 0.0022 | 19.58 |
| 第3 | | | | 503 | 0.0027 | 19.83 |
| 第4 | | | | 275 | 0.0047 | 20.4 |

$$K_t^j = \frac{A_t E_t^j}{h_w} \quad (5) \quad K_w^j = \frac{A_w E_w^j}{h_w} \quad (6)$$

A_t : PC 鋼棒の断面積

E_t : PC 鋼棒のヤング係数

A_w : 定着板の仮想的な支圧面積

E_w : 弾性床の上の定着板のヤング係数

2.1.3. $T_{cb}-u_c$ 関係の評価値と実験値の比較

まず、制振架構の水平加力実験の試験体について示す。ダンパー部を接合せず、架構が独立しているものをType N、その状態で壁柱にプレストレスを導入しないものをType-N₀、摩擦ダンパーを接合したものをType-Fとした。また、PC鋼棒に導入するプレストレス量は、CLTの長期許容圧縮耐力の30%とした。

図6に $T_{cb}-u_c$ 関係の実験値と評価法の比較を示す。結果がほぼ一致していることが確認できる。

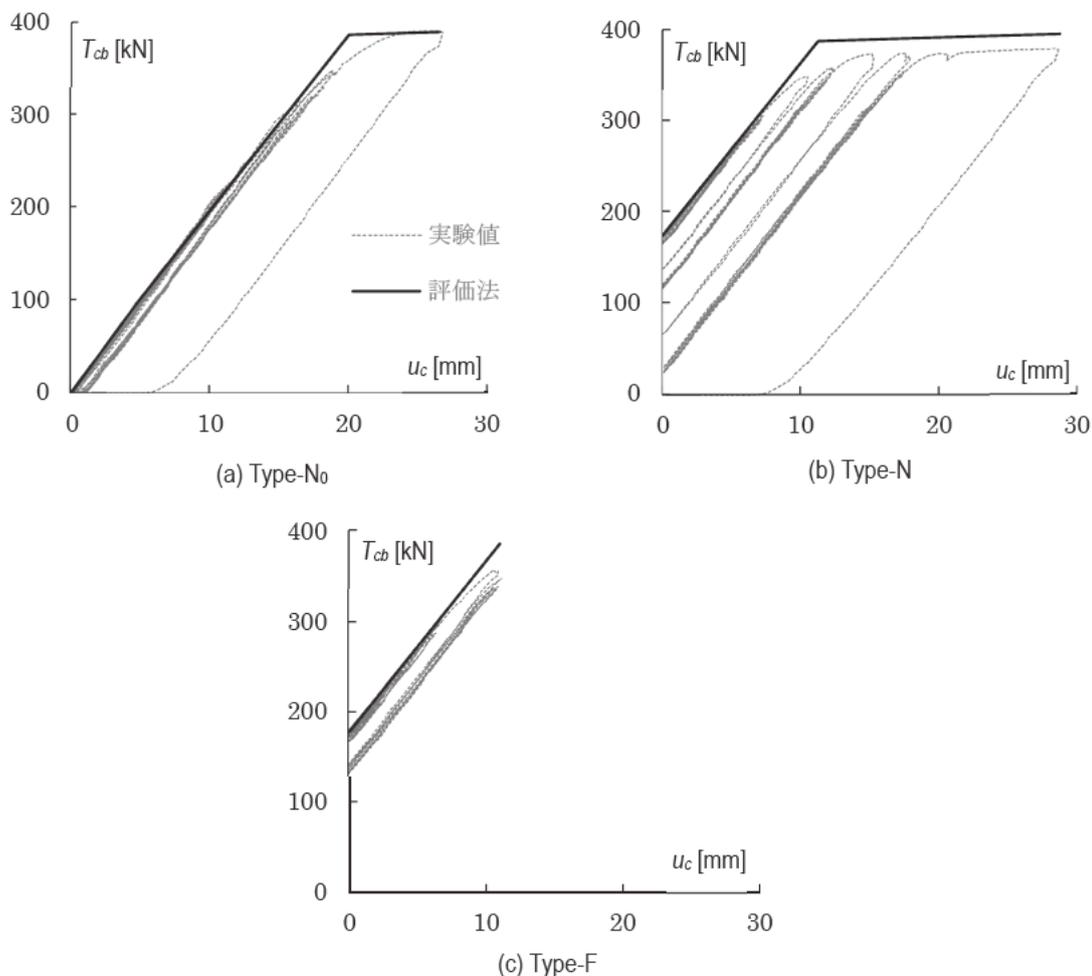


図6 $T_{cb}-u_c$ 関係の実験値と評価法の

2.2.1. θ_c 評価法

本項では、 θ_c 評価法により $M_{cb}-\theta_c$ 関係の包絡線を骨格曲線で評価する手法を提案する。 u_c 評価法により求めた T_{cb} の結果を用いて、式7のように圧縮力 C は、PC鋼棒の張力 T_{cb} と釣り合っているものとする。次に θ_c と x_n の方程式(式8, 9)を解いてそれぞれの値を算出します。このとき、 u_c は、 u_c 評価法により求めた結果を用いる。また、文献4)より圧縮側 C 、回転角 θ_c 、回転中心距離 x_n 関係式を用いて、支圧面内のひずみが、CLTの降伏ひずみ ϵ_y に達していない場合は弾性式の式8を、また、この縁のひずみが降伏ひずみ ϵ_y を超えた場合は弾塑性式の式9をそれぞれ使い分けて θ_c と x_n を算出する。面圧剛性 k については、文献5)より式10を用いる。

$$C = T_{cb} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \theta_c = \frac{2C}{bk_w x_n^2} \\ \theta_c = \frac{u_c}{L - x_n} \end{cases} \quad \left(\theta_c \leq \frac{\varepsilon_y E_{w1}}{k_w x_n} \right) \quad (8)$$

$$\begin{cases} \theta_c = \frac{2C}{bk_w x_n^2} - \frac{E_{w1} - E_{w2}}{E_{w2}} \frac{2\varepsilon_y h_w}{x_n} \\ + \sqrt{\left(\beta \frac{2C}{bk_w x_n^2} \right)^2 + 2\beta \frac{\varepsilon_y E_w}{k_w x_n}} \\ \theta_c = \frac{u_c}{L - x_n} \end{cases} \quad \left(\theta_c > \frac{\varepsilon_y E_{w1}}{k_w x_n} \right) \quad (9)$$

$$k_w = E_{w1} / (31.6 + 10.9x_n/2) \quad (10)$$

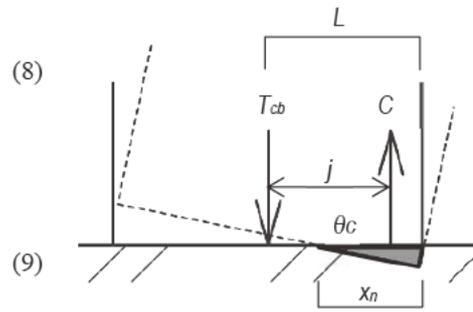


図7 柱脚周辺の力

2.2.2. $M_{cb}-\theta_c$ 関係の評価値と実験値の比較

図8に $M_{cb}-\theta_c$ 関係の実験値と評価法の比較を示す。結果がほぼ一致していることが確認できる。

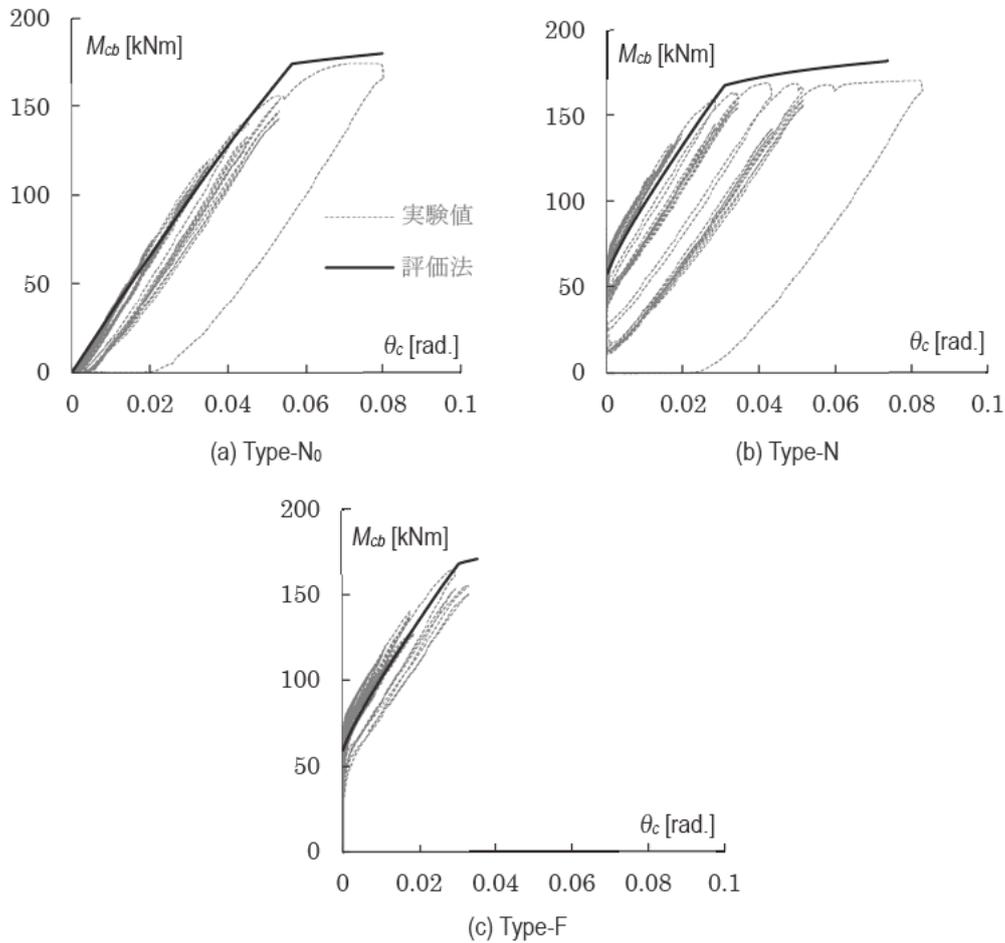


図8 $M_{cb}-\theta_c$ 関係の実験値と評価法の比較

3. CLT壁柱単体実験

3.1. 試験体概要

表2に試験体一覧を、図9に試験体形状を、写真2に使用した金物を示す。試験体は基準となるスタンダード試験体(S-Sta.30, S-Sta.0, M-Sta.)を幅1000mm、高さ2970mmとし、試験体形状はセルフセンタリング型と曲げモーメント抵抗型の2種類とした。使用するCLTの樹種はスギで、5層6プライ(ラミナ1枚の厚さは25mm)、強度等級をS60とした。尚、壁柱で用いるCLTは、3層3プライのCLTを2枚重ね合わせることで作製した。

表2 試験体一覧

| | セルフセンタリング機構:S | | | | | | | | | | | 曲げモーメント抵抗:M | |
|-----------------|---------------|--------|---------|---------|--------|---------|------------|--------|-----------|-----------|-----------|-------------|---------|
| | 基準:Sta | | CLT:CLT | | 定着板:PL | | | | PC鋼棒:PC | | | 基準:Sta | CLT |
| | 30To | 0To | hw | w | Normal | la | t, la | リブ付:r | | | | 基準:Sta | CLT |
| 試験体名称 | S-Sta30 | S-Sta0 | S-CLT:h | S-CLT:w | S-PL:N | S-PL:la | S-PL:t, la | S-PL:r | S-PC17,30 | S-PC32,30 | S-PC23,10 | M-Sta | M-CLT:w |
| CLT高さ又は端距離: | 2970 | 2970 | 5970 | 2970 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 2970 | 2970 | 2970 | 2970 | 2970 |
| CLT幅:w[mm] | 1000 | 1000 | 1000 | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 600 |
| CLT奥行き:b[mm] | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 |
| 定着板厚:t[mm] | 32 | 32 | 32 | 32 | 16 | 16 | 32 | 16 | 32 | 32 | 32 | 25 | 25 |
| 定着板幅:la[mm] | 500 | 500 | 500 | 500 | 300 | 100 | 100 | 300 | 500 | 500 | 500 | 90 | 90 |
| 初期張力To[%] | 30.0% | 0.0% | 30.0% | 50.0% | 30.0% | 10.0% | 10.0% | 30.0% | 30.0% | 30.0% | 10.0% | × | × |
| 初期張力To[kN] | 178 | 0 | 178 | 178 | 107 | 36 | 36 | 107 | 178 | 178 | 59 | 21.9 | 21.9 |
| CLTの負担[%] | 60.0% | 0.0% | 60.0% | 60.0% | 60.0% | 60.0% | 60.0% | 60.0% | 60.0% | 60.0% | 20.0% | | |
| PC鋼棒・引きボルト径:φ | 23 | 23 | 23 | 23 | 17 | 17 | 17 | 17 | 17 | 32 | 23 | M24 | M24 |
| 有効定着板奥行き:bs[mm] | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 120 | 110 | 120 | 94 | 94 |

曲げモーメント抵抗型は、壁柱に対するPC鋼棒の挿入とプレストレスの導入がない架構で、スタンダードのM-Sta.とCLT壁幅を変更したM-CLT:wの2種類とする。壁柱 - 基礎間の接合部については、せん断抵抗としてU字金物をビス打ちし、引張抵抗としてφ24の引きボルト2本で締め付ける。

セルフセンタリング型は、壁柱中心にPC鋼棒を挿入してプレストレスを導入した架構で、基準となるスタンダード試験体S-Sta、CLTのサイズを変更したS-CLT、定着板のサイズを変更したS-PL、PC鋼棒のサイズを変更したS-PCの4分類とし、試験体としては11種類を作成した。S-Sta.30において、壁柱で用いるCLTは、PC鋼棒を挿入するために30×30mmの貫通孔を設けた。表3に使用するPC鋼棒の諸元を示す。導入するプレストレス量は、CLTの長期許容圧縮耐力の30%である178kNとする。尚、PC鋼棒に作用する引張力は端部に取り付けたロードセルによって測定する。導入方法はポストテンション方式で、壁柱端部に取り付けた定着板と基礎に定着させた。定着板には、500×150×32mmのSS400のプレートで中央にφ30mmの孔をあけたものを用い

表3 PC鋼棒諸元

| 径 [mm] | ヤング係数 [N/mm ²] | 降伏応力度 [N/mm ²] | 引張強さ [N/mm ²] |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 23 | 205000 | 930 | 1080 |

た。壁柱 - 基礎間は、せん断抵抗として $\phi 50$ の鋼製ダボを2本を設けた。

基準となるS-Sta試験体は、壁柱にプレストレスを導入していないものをS-Sta.0、プレストレスを導入するものをS-Sta.30とした。S-CLT試験体は、高さを変えたS-CLT:h、壁幅を変えたS-CLT:wの2種類とした。S-PL試験体は、基準となるS-PL:N、板長さを変えたS-PL: la、板厚と板長さを変えたS-PL:t, la、定着板にリップをつけたS-PL:rの4種類とし、S-PC試験体は、 $\phi 17$ のPC鋼棒に初期張力を30%としたS-PC:17, 30、 $\phi 32$ のPC鋼棒に初期張力を30%としたS-PC:32, 30、 $\phi 23$ のPC鋼棒に初期張力を10%としたS-PC:23, 10とした。

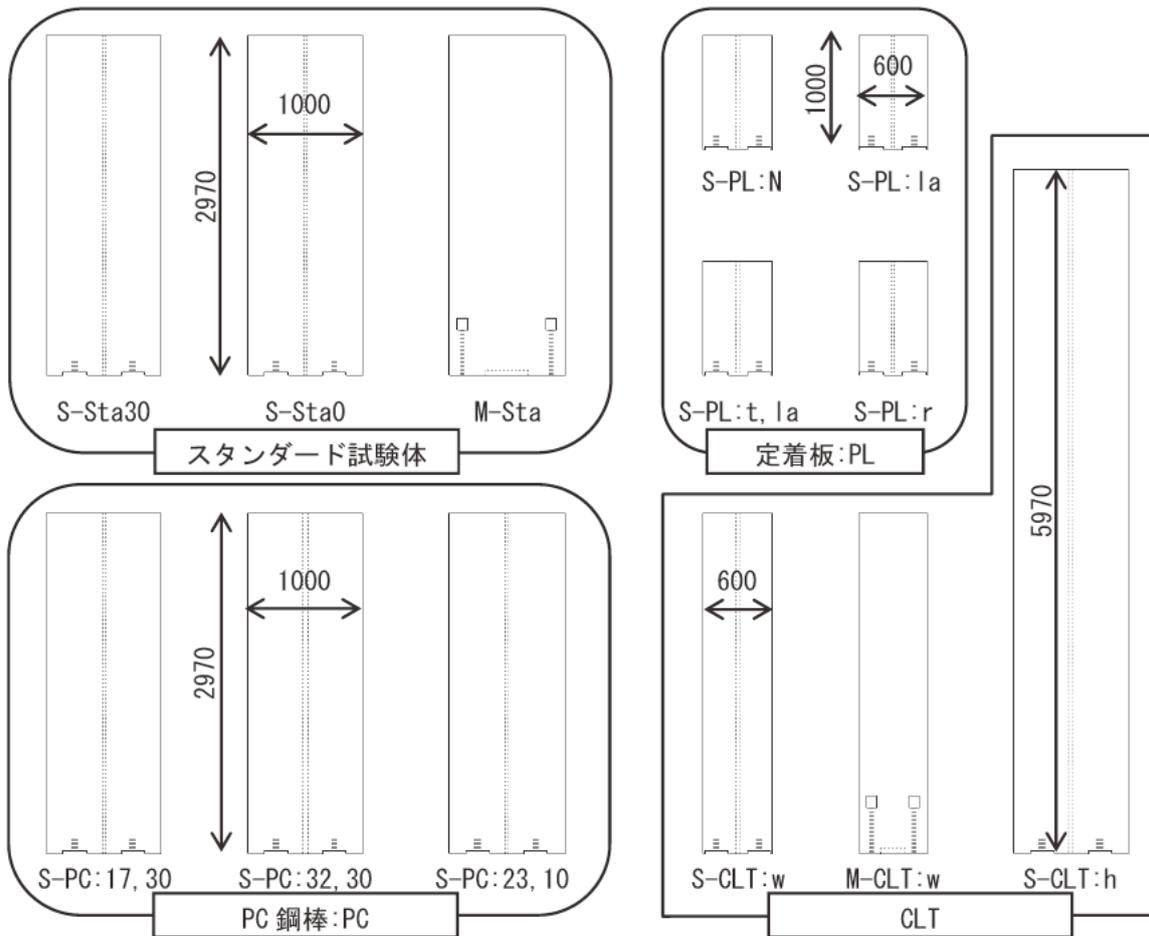


図9 試験体概要



(a) U字金物



(b) 鋼製ダボ ($\phi 50$)



(c) 定着板

写真2 使用する金物

3.2. 加力計画

図10に試験体のセットアップを示す。加力点は、高さ2400mmを鋼板2枚で $\phi 17$ のPC鋼棒2本を用いて挟み込むように固定し、ロードセルを介して1000kNジャッキと接続した。加力方法は、見かけのせん断変形角 θ で制御した正負交番の3回繰り返りとした。目標変形角 θ は、加力点高さでの変形角が、 $1/450$ 、 $1/300$ 、 $1/200$ 、 $1/150$ 、 $1/100$ 、 $1/200$ 、 $1/75$ 、 $1/50$ 、 $1/100$ 、 $1/30$ 、 $1/20$ rad.とし、その後一方向に引ききる。図11に加力サイクルを示す。層間変形角は高さ2700mmの絶対水平変位と両壁柱脚部の絶対水平変位の差を試験体高さ2700mmで除すことで求めた。

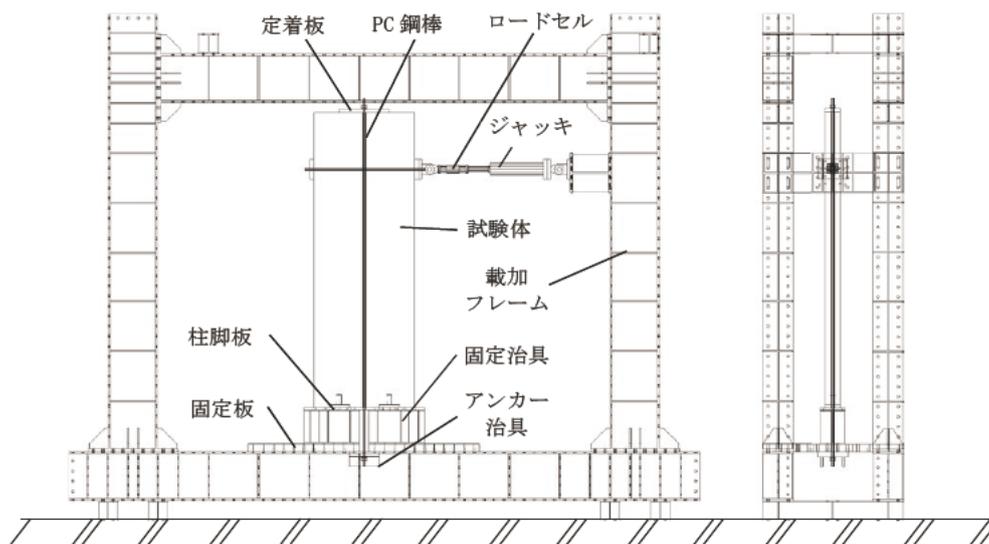


図10 試験体概要

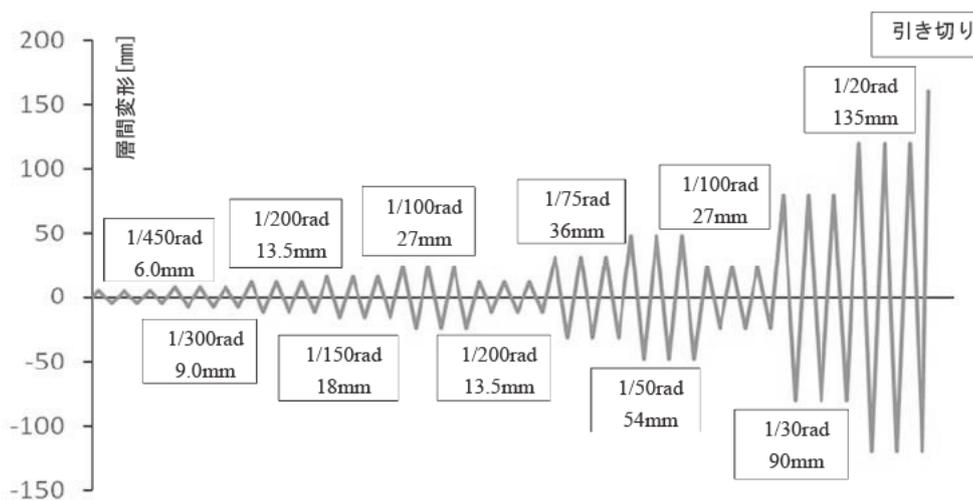


図11 加力サイクル

3.3. 計測計画

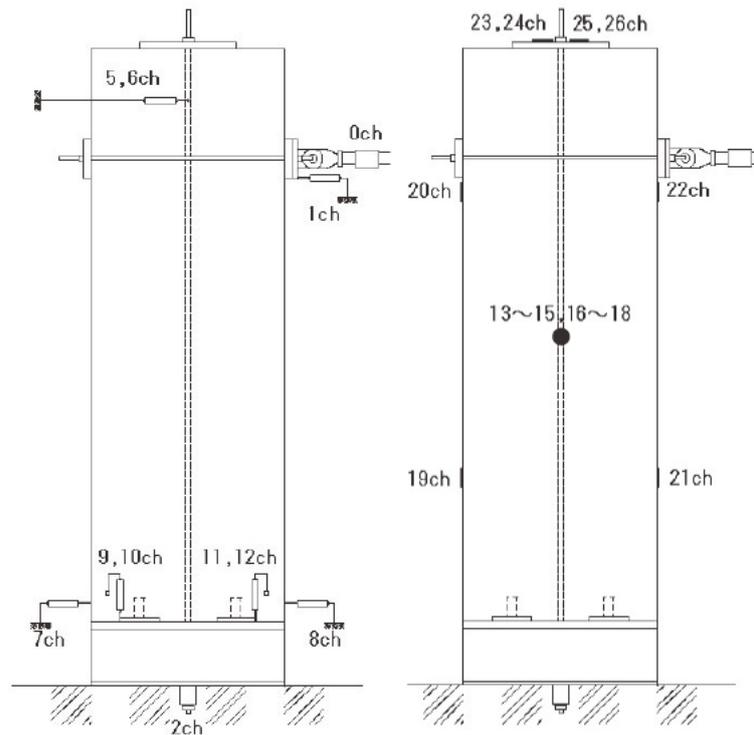
制振架構の水平加力実験の壁柱において、定着板の拳動確認・設計法の提案、PC鋼棒降伏によるセルフセンタリング機構の効力低下(初期張力低下)に関する基準の設定、また評価法の精度検証を目的としているため、それらに必要なデータを測定する

表4に計測項目一覧を 図12、13に計測計画を示す。見かけの層間変形角 θ を求めるために、壁柱の頭部の絶対水平変位(5,6ch)と壁柱の脚部の絶対水平変位(7,8ch)を計測し、式(1)により算出する。

$$\theta = \left\{ \frac{((5ch) + (6ch)) - ((7ch) - (8ch))}{2} \right\} \times \frac{1}{2700} \quad (11)$$

表4 計測項目

| ch | 測定箇所 | 測定内容 | 使用器具 |
|-------|------------|--------------|---------|
| 0 | ジャッキ | ジャッキ 荷重 | ロードセル |
| 1 | 加力板 | 加力点変位 | ワイヤー変位計 |
| 2 | 壁柱 | PC鋼棒 引張力 | ロードセル |
| 3 | 壁柱脚部(南側) | 壁柱脚引抜き力 | ロードセル |
| 4 | 壁柱脚部(北側) | | |
| 5 | 壁柱頭部(東側) | 壁柱頭部 絶対水平変位 | SDP300 |
| 6 | 壁柱頭部(西側) | | |
| 7 | 壁柱脚部(南側) | 壁柱脚部 絶対水平変位 | CDP50 |
| 8 | 壁柱脚部(北側) | | |
| 9 | 壁柱脚部(南東側) | 壁柱-基礎 相対鉛直変位 | CDP100 |
| 10 | 壁柱脚部(南西側) | | |
| 11 | 壁柱脚部(北東側) | | |
| 12 | 壁柱脚部(北西側) | | |
| 13~15 | 壁柱中央部(東側) | 壁柱 セン断ひずみ | ひずみゲージ |
| 16~18 | 壁柱中央部(西側) | | |
| 19 | 壁柱側面(下・南側) | 壁柱側面 ひずみ | |
| 20 | 壁柱側面(上・南側) | | |
| 21 | 壁柱側面(下・北側) | | |
| 22 | 壁柱側面(上・北側) | | |
| 23 | 定着板上面(南東側) | 定着板 ひずみ | |
| 24 | 定着板上面(南西側) | | |
| 25 | 定着板上面(北東側) | | |
| 26 | 定着板上面(北西側) | | |



(a) 変位計、ロードセル位置

(b) ひずみゲージ位置

図12 計測箇所(S-Station)

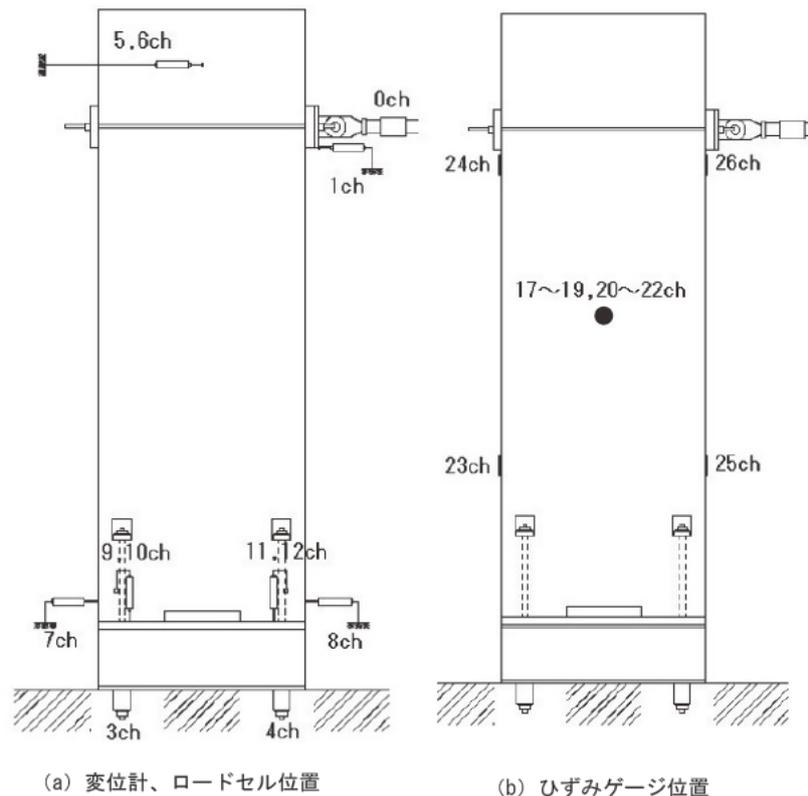


図13 計測箇所 (M-Station)

4. おわりに

木質高層建物を実現するために重要と考えられるCLT制振架構を対象として、柱脚支持部における曲げモーメントと回転角の関係などを明らかにした上で、それらの関係における包絡線評価手法を提案した。提案した評価手法は、CLT制振架構の水平加力実験で得られた包絡線と精度高く一致することを確認した。また、上記包絡線評価手法について、その妥当性を検証できるよう様々なパラメータをふったCLT壁柱試験体の強制変形実験に関する計画を示した。

参考文献

- 1) 日本住宅・木材技術センター, 日本CLT協会: 2016年公布・施行 CLT関連告示等解説書, 2016.6
- 2) 志村智, 津田千尋, 畠山太志, 菅沼田直人, 鈴木圭, 岡部実, 中川貴文, 荒木康弘, 槌本敬大: クロス・ラミネイティド・ティンバーによる構造の耐震性能に関する研究 その4 構面実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp 311-312, 2012 9
- 3) 村上了, 槌本敬大, 弥浦荘太, 五十田博, 三宅辰也, 安村基: クロス・ラミネイティド・ティンバーによる構造の耐震性能に関する研究 その18 大型パネルの構面実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp 569-570, 2013 8
- 4) 坂田弘安, 宮木志伸, 山崎義弘, 鈴木賢人, 伊東洋路, 藤代東: ラグスクリューボルトと鋼板挿入式ドリフトピン接合を用いた木質接合部の曲げせん断挙動に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, pp.2163-2171, 2013年12月
- 5) 稲山正弘: 引きボルト式木造ラーメン柱脚接合部の設計法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演, pp.621-622, 北海道, 2013年8月

