

第5章 CLT 壁パネル端部部分圧縮試験

5.1 目的

「第2章 CLT 壁パネル定軸力下水平加力実験」の試験体に用いた CLT パネルと同じマザーボードから採取した試験片木口の部分圧縮試験を行い、CLT パネル端部の支圧(面圧)に対する荷重変形性能を確認する。

5.2 試験体

試験体の仕様を表 5.2.1、試験体図を図 5.2.1 に示す。樹種はスギ、強度等級はいずれも S60 である。

表 5.2.1 試験体一覧

試験体名	幅(mm)	高さ(mm)	厚さ(mm)	層構成	試験体数	
3-200	300	200	90	3層3プライ	3	
5-200						
5-400		400	150		5層5プライ	3
5-600		600				

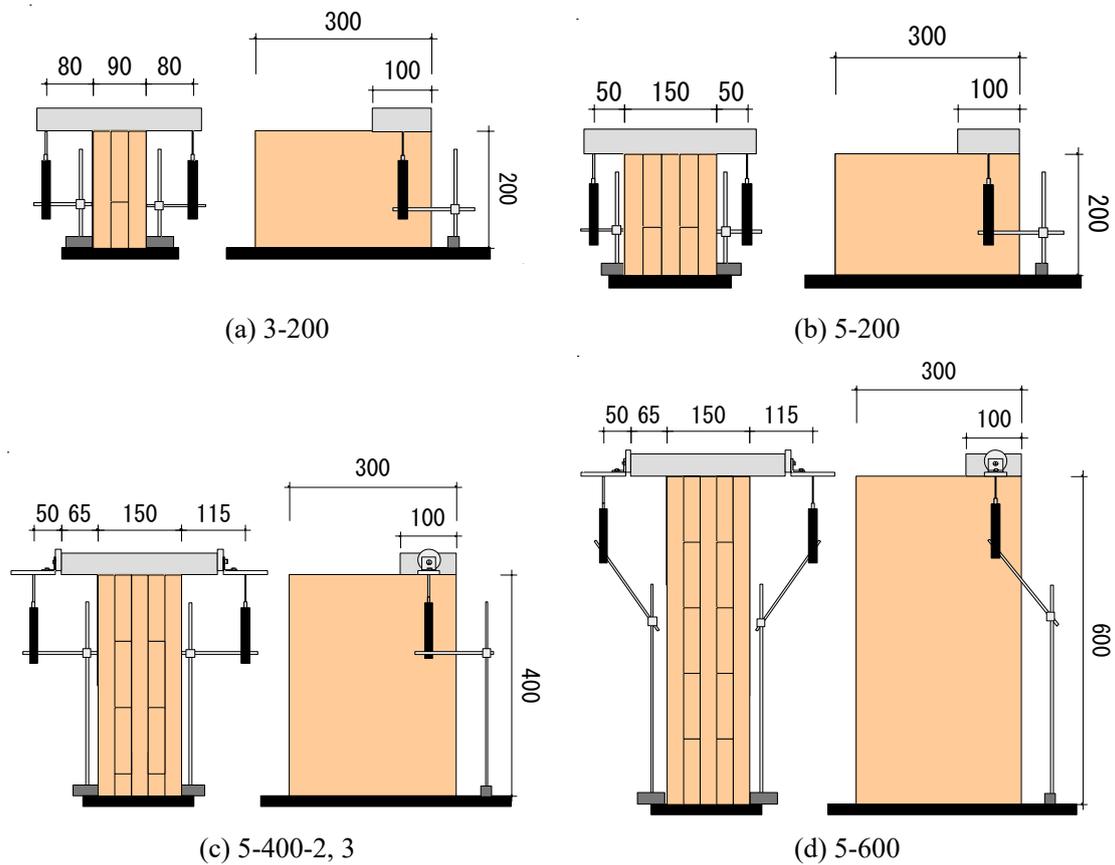


図 5.2.1 試験体図面

5.3 試験方法

油圧サーボ式堅型万能試験機 (Instron 社) に荷重容量 1000kN のロードセル (Instron 社) を取り付け
た。変位計 (株式会社東京測器研究所、CDP-50) は土台に固定し、3-200 シリーズと 5-200 シリーズでは
加圧板中央に表裏 1 つずつ、計 2 つ取り付けた。試験体 5-400-1 では、最外層のラミナが面外に押し出
されて圧縮変位が 26mm ほどで変位計に接触したため、残りの 5-400 シリーズと 5-600 シリーズでは最外
層のラミナと変位計との接触を防ぐために、加圧板に磁石で取り付けられたアクリル板に変位計を表裏 1 つづ
つ、計 2 つ取り付けた。試験機に設置した試験体の写真を図 5.3.1 に示す。

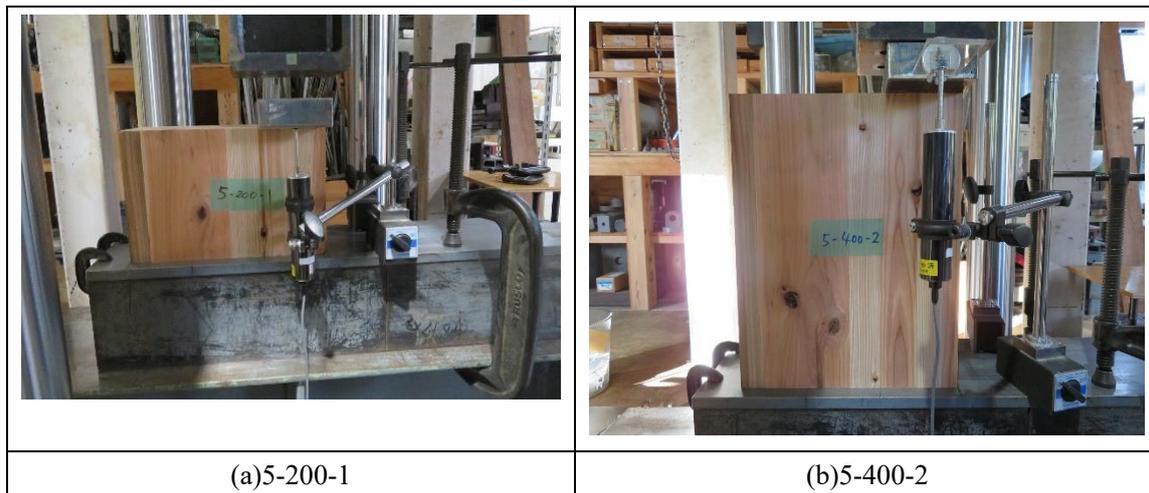


図 5.3.1 試験体設置の様子

5.4 試験結果

5.4.1 破壊性状

各試験体の試験前、試験後の写真を図 5.4.1～5.4.4 に示す。どの試験体でも変位が 1～2mm において木材からメキメキという破壊音が鳴り始めた。その後、最外層の圧縮面近傍で局部座屈が第一に起こり、それから直交層のローリングシア破壊または接着層に沿った割れが見られた。加圧部に節を持っている場合、節を起因とする割れが第一に見られ、節の近傍で最外層に局部座屈が発生した後、直交層のローリングシア破壊または接着層に沿った割れが確認されるという事例もあった。

さらに変位が大きくなると、圧潰した内層またはローリングシア破壊した内層が外層を面外に押し出す事例が多く見受けられた。また、その面外に押し出す力によって非加圧部の外層が積層方向に曲げ変形を起こし、接着面に沿って大きく亀裂が生じた。

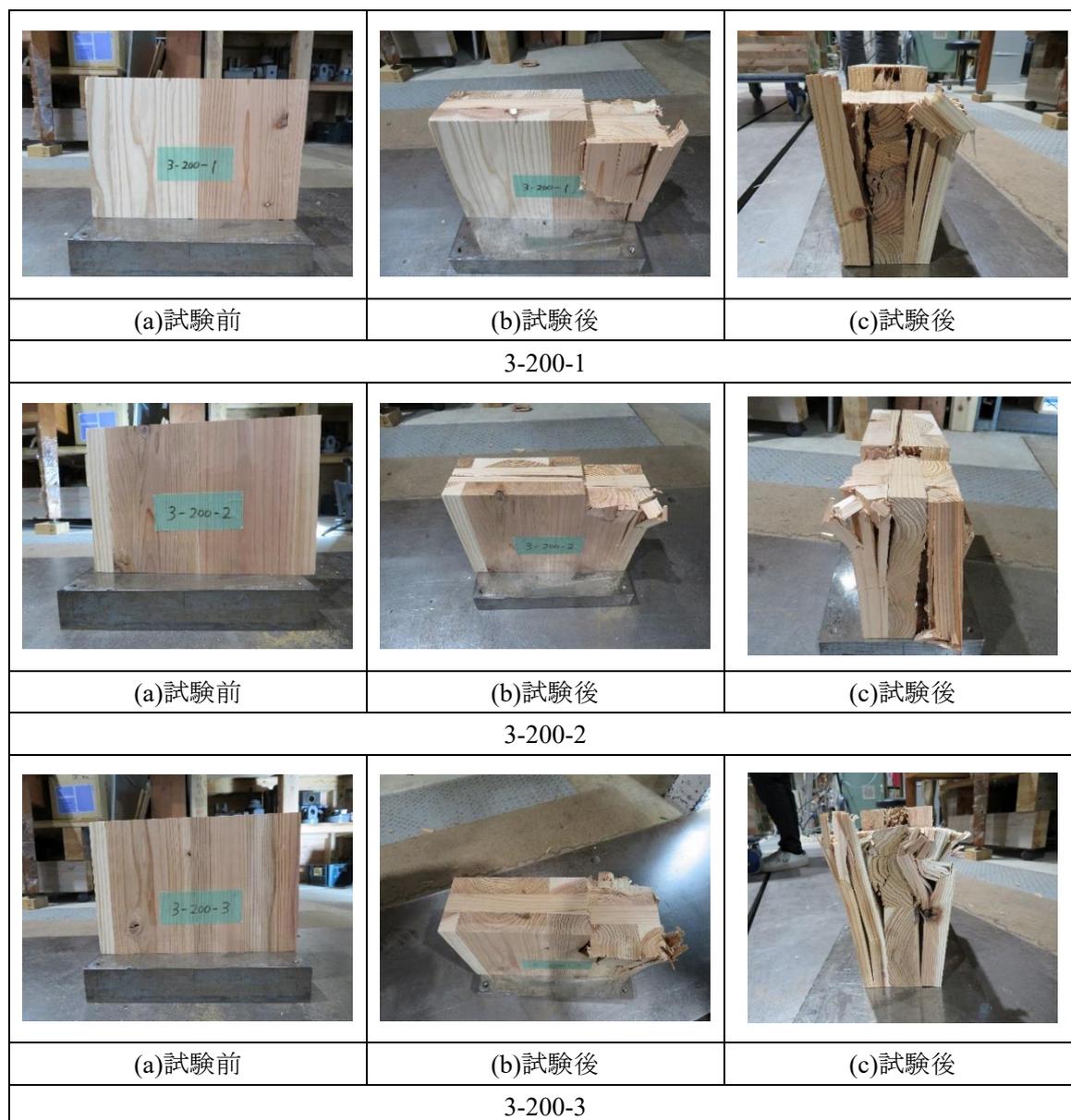


図 5.4.1 3-200 シリーズの試験体写真

		
(a)試験前	(b)試験後	(c)試験後
5-200-1		
		
(a)試験前	(b)試験後	(c)試験後
5-200-2		
		
(a)試験前	(b)試験後	(c)試験後
5-200-3		

図 5.4.2 5-200 シリーズの試験体写真

		
(a)試験前 (b)試験後 (c)試験後 5-400-1		
		
(a)試験前 (b)試験後 (c)試験後 5-400-2		
		
(a)試験前 (b)試験後 (c)試験後 5-400-3		

図 5.4.3 5-400 シリーズの試験体写真

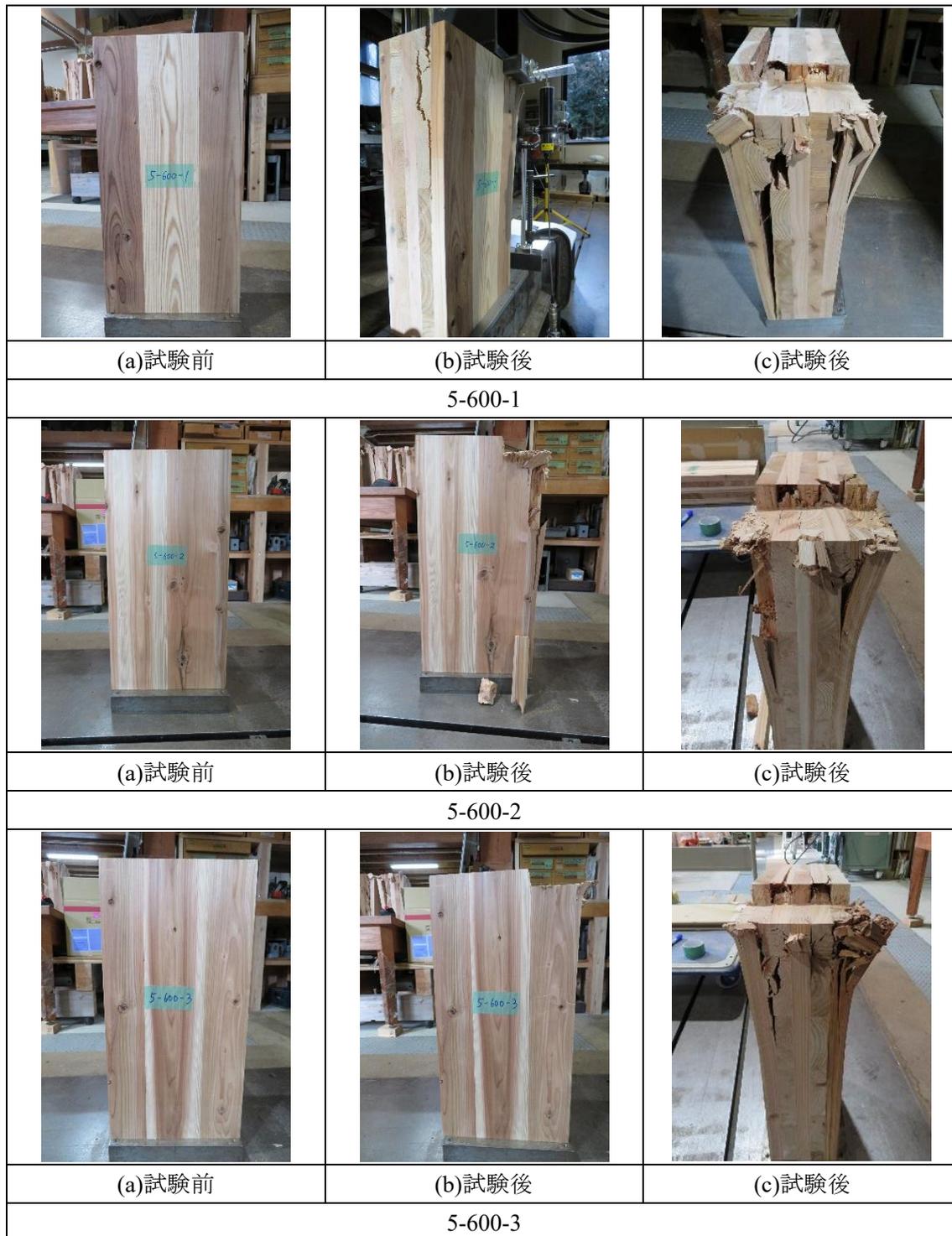


図 5.4.4 5-600 シリーズの試験体写真

5.4.2 荷重変位曲線

12体の試験体の荷重変位曲線を図5.4.5に示す。いずれの試験体も直線的に荷重上昇して最大荷重に至った。その後、3層 CLT では徐々に荷重が低下し続ける傾向が見られた。一方で5層 CLT では荷重が100~150kNほど低下した後、横ばいで推移する傾向があった。最外層は圧潰した内層などにより面外に押し出されやすい。よって、最外層の耐力が失われたとしても、5層 CLTの方が安定して荷重に抵抗できる内層の層数が多いので、変位が大きい領域で荷重変位曲線に差が生まれたと推測される。

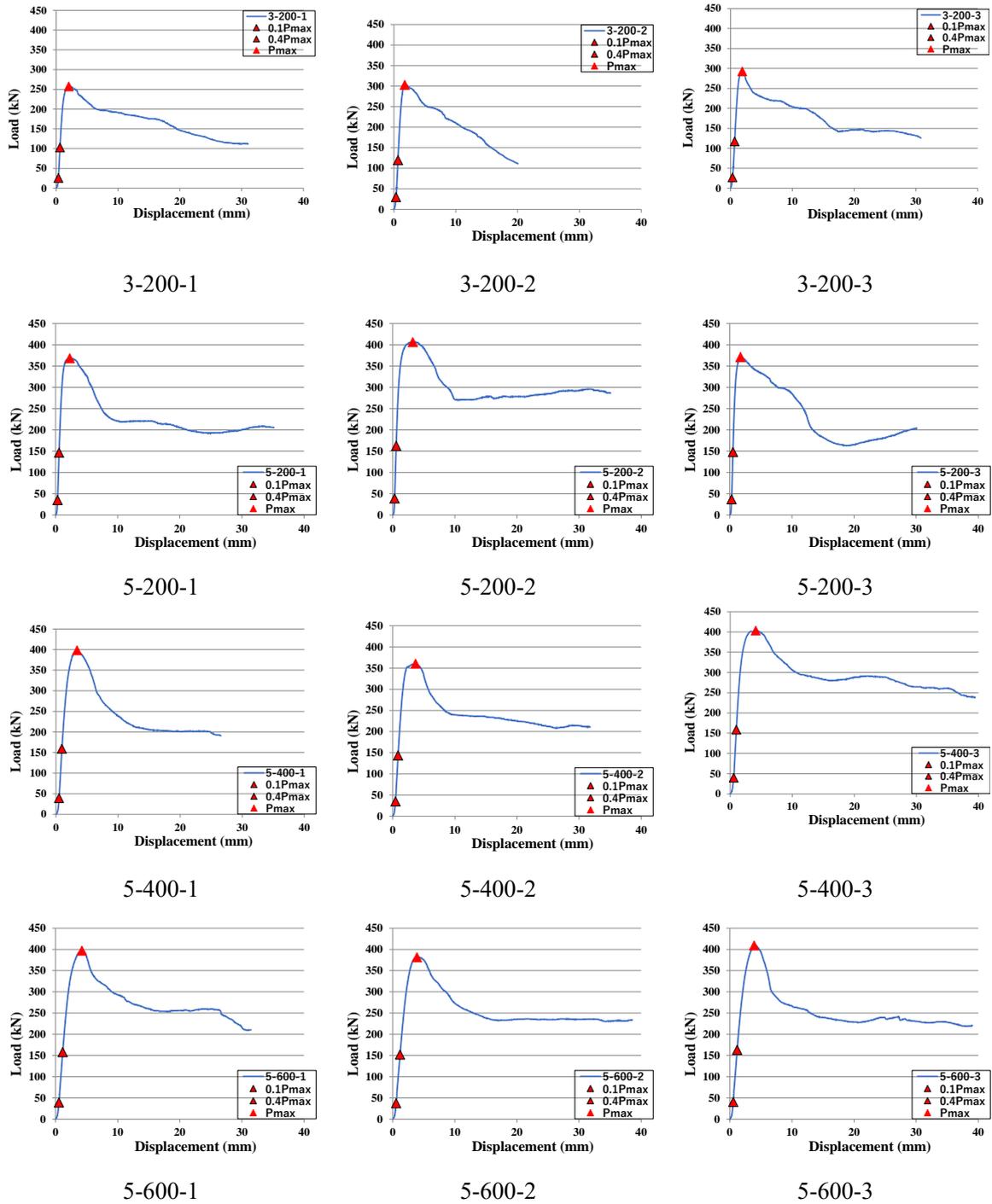


図 5.4.5 試験体の荷重変位曲線

5.4.3 圧縮特性値

各試験体の最大荷重 P_{\max} 、圧縮強度 F_c 、剛性 K 、ヤング率 E を表 5.4.1 に示す。ここで、圧縮強度 F_c は最大荷重を圧縮面積で除した値、剛性 K は荷重変位曲線における $0.1P_{\max}$ と $0.4P_{\max}$ の2点を結ぶ線分の傾き、ヤング率 E は見かけの値として K に「試験体高さ / 加圧面積」を乗じた値とした。このとき、加圧面積は $100\text{mm} \times \text{パネル厚さ}$ とした。

圧縮強度は基準強度の 2.4~3.2 倍、ヤング率は等価断面法により計算される圧縮弾性係数の 1.4~2.2 倍となった。

表 5.4.1 各試験体の圧縮特性値

試験体	Pmax(kN)	Fc (MPa)	Fc平均	基準強度	K (kN/mm)	E (GPa)	E平均	圧縮弾性係数
3-200-1	258	28.6	31.6	10.8	294	6.53	6.16	4.00
3-200-2	303	33.6			281	6.31		
3-200-3	293	32.5			261	5.65		
5-200-1	368	24.5	25.4	9.72	454	6.01	6.51	3.60
5-200-2	406	27.1			504	6.63		
5-200-3	371	24.7			517	6.90		
5-400-1	398	26.5	25.8	9.72	256	6.81	7.07	3.60
5-400-2	360	24.0			257	6.82		
5-400-3	403	26.9			279	7.59		
5-600-1	397	26.5	26.4	9.72	194	7.81	7.65	3.60
5-600-2	381	25.4			182	7.29		
5-600-3	409	27.3			197	7.86		

5.5 支圧剛性の評価

試験体に対応する構造モデルとして、加圧面の支圧剛性と CLT パネルの弾性剛性を表す 2 つのバネが直列に接続されたものとする。このとき、見かけの柔性 $1/k$ は次のように表される。

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{E_{eq}} h + \frac{1}{k_e} \quad (5.5.1)$$

ここで、 k : 剛性 K を加圧面積で除した値 (見かけの支圧剛性)

E_{eq} : CLT パネルの等価ヤング率

h : 試験体の高さ

k_e : 加圧面の支圧剛性

h を 200, 400, 600mm の 3 種類とした 5 層 5 プライの試験体について、図 5.5.1 に示すように、 $1/k$ を縦軸、 h を横軸にとって両者の関係をプロットし、それを最小二乗法によって線形関数に近似すれば、式 (5.5.1) との対比により、その勾配が $1/E_{eq}$ 、切片が $1/k_e$ に相当する。

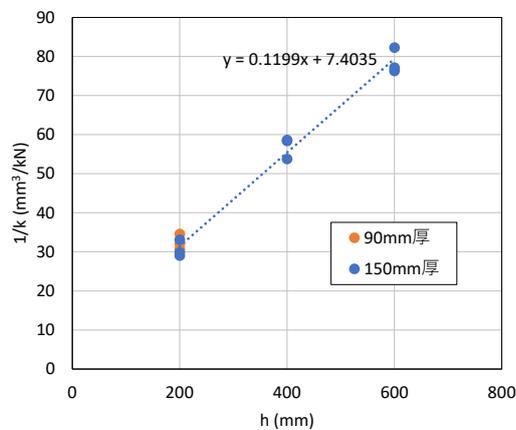


図 5.5.1 柔性と試験体高さの関係

その結果として、 E_{eq} 、 k_e は次のように得られる。

$$E_{eq} = 8.34 \text{ kN/mm}^2$$

$$k_e = 135.1 \text{ N/mm}^3$$

等価ヤング率 E_{eq} は表 5.4.1 に示す「圧縮弾性係数」、すなわち公称ヤング率 (3.6 kN/mm^2) の 2.3 倍程度である。その理由として、ラミナの材料特性のばらつきのほかに、加圧面から試験体下方に向かう圧縮応力の拡大による圧縮変形に対する有効断面積の増加が挙げられる。また、支圧剛性 k_e はマニュアル^{5.5.1)} に記載される値 (15.6 N/mm^3) の 8.7 倍程度であり、試験体底面にも支圧変形が生じているとすれば、この値はさらに大きくなる。

^{5.5.1)} 日本住宅・木材技術センター:2016年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, 2021年構造・材料増補版, 令和3年11月

5.6 支圧剛性の妥当性検証

5.5 節で評価した CLT 壁パネル端部支圧剛性の妥当性を検証するために、第 2 章で対象とした壁パネル定軸力下水平加力実験のうち、W10TB シリーズの実験結果に対する $M\theta$ 計算 (5.6.1), (5.6.2) の適合性を確認する。なお、文献 (5.6.1) では W10TB シリーズと同様の定軸力下水平加力実験、およびそれに対応する CLT パネルの部分圧縮試験が実施されており(以下、「2018 年度実験」)、その結果も考察の対象とする。

5.6.1 $M\theta$ 計算

文献 (5.6.1), (5.6.2) には、CLT 壁パネル端部接合面の歪み分布に平面保持仮定が成立することを前提として、接合面の曲げ応力と回転変形の間を、定軸力の値に応じて算定する方法が「 $M\theta$ 計算」として提示されている。ここでは、両文献による方法に対して下記の改良を行った。

- 圧縮面の終局時の応力変形関係にも有限の剛性を設定し、加えてそれが負勾配であっても正しく計算されることを確認する。
- 引張接合部(引きボルト)の応力変形関係を 3 折れ線から 4 折れ線に変更する。

以降、これらの改良に該当する部分を赤破線囲みまたは赤文字で示す。

(1) $M\theta$ 計算の方法

接合部圧縮面の支圧あるいはめり込み応力度と変形の関係、および引張接合部の応力変形関係はそれぞれ図 5.6.1 のような折れ線としてモデル化できるものとする。ここで、圧縮面について弾性状態を「Sc1」、第一降伏状態を「Sc2」、第二降伏(終局)状態を「Sc3」と表記し、引張接合部についても同様に「St1～St4」と表記することとする。

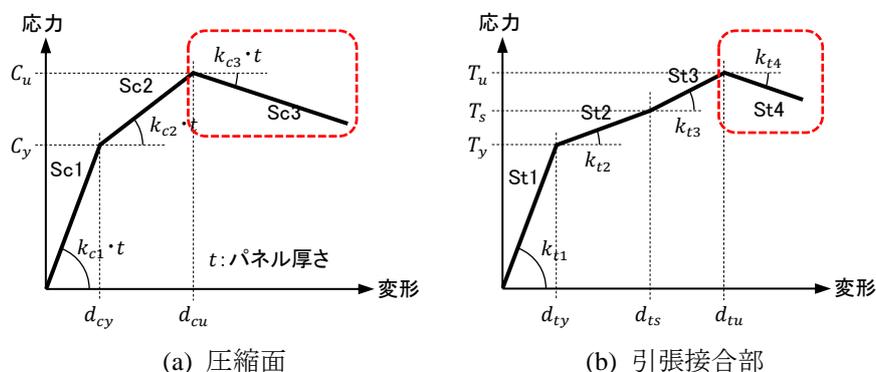


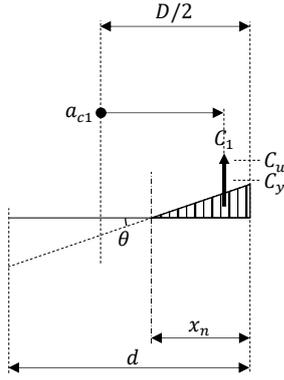
図 5.6.1 接合面の応力変形関係(模式図)

圧縮面 Sc1～Sc3、引張接合部 St1～St4 それぞれの状態における応力は、接合面の回転角を θ 、中立軸を x_n として次のように計算できる。

5.6.1) 日本システム設計：CLT 等新たな木質建築部材利用促進・定着事業、CLT パネル工法における架構方法の合理化と構造モデルの簡略化検討事業報告書、平成 31 年 3 月

5.6.2) T. Miyake, Y. Azumi, N. Kawai, H. Isoda, Y. Araki : Applicability of MS Element for CLT Constructions, 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, 2020.9

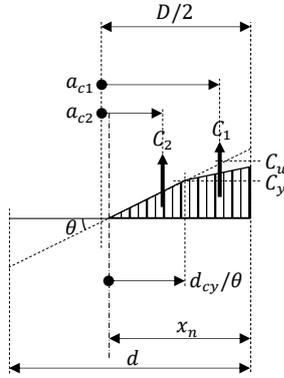
Sc1: $x_n \leq d_{cy}/\theta$ のとき



$$C_1 = k_{c1} \cdot \theta \cdot \frac{x_n^2}{2} \quad (5.6.1)$$

$$a_{c1} = \frac{D}{2} - \frac{x_n}{3} \quad (5.6.2)$$

Sc2: $d_{cy}/\theta < x_n \leq d_{cu}/\theta$ のとき



$$C_1 = \{2C_y + k_{c2} \cdot (x_n \cdot \theta - d_{cy})\} \cdot \left(x_n - \frac{d_{cy}}{\theta}\right) \cdot \frac{1}{2} \quad (5.6.3)$$

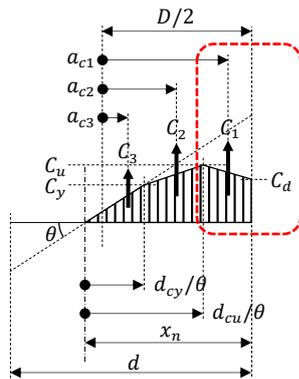
$$C_2 = C_y \cdot d_{cy} \cdot \frac{1}{2\theta} \quad (5.6.4)$$

$$a_{c1} = \frac{D}{2} - x_n + \frac{d_{cy}}{\theta} \quad (5.6.5)$$

$$+ \left(x_n - \frac{d_{cy}}{\theta}\right) \cdot \frac{C_y + k_{c2} \cdot (x_n \cdot \theta - d_{cy})}{2C_y + k_{c2} \cdot (x_n \cdot \theta - d_{cy})}$$

$$a_{c2} = \frac{D}{2} - x_n + \frac{d_{cy}}{\theta} \cdot \frac{2}{3} \quad (5.6.6)$$

Sc3: $d_{cu}/\theta < x_n$ のとき



$$C_d = C_u + k_{c3} \cdot (x_n \cdot \theta - d_{cu}) \quad (5.6.7)$$

$$C_1 = (C_u + C_d) \cdot \left(x_n - \frac{d_{cu}}{\theta}\right) \cdot \frac{1}{2} \quad (5.6.8)$$

$$= \frac{k_{c3} \cdot \theta}{2} \cdot x_n^2 + (C_u - k_{c3} \cdot d_{cu}) \cdot x_n$$

$$- \frac{d_{cu}}{2\theta} (2C_u - k_{c3} \cdot d_{cu})$$

$$C_2 = (C_y + C_u) \cdot (d_{cu} - d_{cy}) \cdot \frac{1}{2\theta} \quad (5.6.9)$$

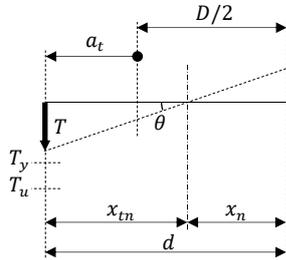
$$C_3 = C_y \cdot d_{cy} \cdot \frac{1}{2\theta} \quad (5.6.10)$$

$$a_{c1} = \frac{D}{2} - x_n + \left(\frac{d_{cu}}{\theta} \cdot C_u + x_n \cdot C_d\right) \cdot \frac{1}{C_u + C_d} \quad (5.6.11)$$

$$a_{c2} = \frac{D}{2} - x_n + \frac{d_{cy}}{\theta} + \frac{d_{cu} - d_{cy}}{\theta} \cdot \frac{C_u}{C_y + C_u} \quad (5.6.12)$$

$$a_{c3} = \frac{D}{2} - x_n + \frac{d_{cy}}{\theta} \cdot \frac{2}{3} \quad (5.6.13)$$

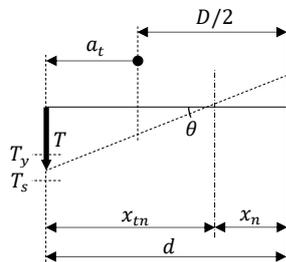
St1: $x_{tn} \leq d_{ty}/\theta$ のとき ($x_{tn} = d - x_n$ として、以下同じ)



$$T = k_{t1} \cdot (d - x_n) \cdot \theta \quad (5.6.14)$$

$$a_t = d - \frac{D}{2} \quad (5.6.15)$$

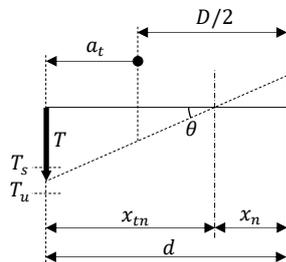
St2: $d_{ty}/\theta < x_{tn} \leq d_{ts}/\theta$ のとき



$$T = T_y + k_{t2} \cdot \{(d - x_n) \cdot \theta - d_{ty}\} \quad (5.6.16)$$

$$a_t = d - \frac{D}{2} \quad (5.6.17)$$

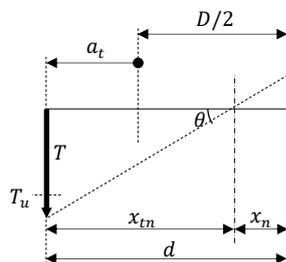
St3: $d_{ts}/\theta < x_{tn} \leq d_{tu}/\theta$ のとき



$$T = T_s + k_{t3} \cdot \{(d - x_n) \cdot \theta - d_{ts}\} \quad (5.6.18)$$

$$a_t = d - \frac{D}{2} \quad (5.6.19)$$

St4: $d_{tu}/\theta < x_{tn}$ のとき



$$T = T_u + k_{t4} \cdot \{(d - x_n) \cdot \theta - d_{tu}\} \quad (5.6.20)$$

$$a_t = d - \frac{D}{2} \quad (5.6.21)$$

これらの応力を用いて曲げモーメント M と軸力 N は次のように計算できる。

$$M = \sum_{i=1}^3 C_i \cdot a_{ci} + T \cdot a_t \quad (5.6.22)$$

$$N = \sum_{i=1}^3 C_i - T \quad (5.6.23)$$

圧縮側 Sc1~Sc3、引張側 St1~St4 それぞれの状態に応じた応力 $C_1 \sim C_3$ 、 T の計算式を(5.6.23)式に代入すれば x_n に関する方程式が得られ、それを解いて x_n の値を求めることができる。

ここで、 θ の値を 1/5000rad 刻みで設定し、その θ に対応する M の値を以下の手順で求める。

- ① N の値を設定する。
- ② x_n の初期値を d とし、 $k_{c1} \cdot \theta \cdot x_n^2 / 2 < N$ のとき(x_n が d を超えるときは) θ を更新して②に戻る(当該 θ に対する M は算定不能)。
- ③ 応力状態 Sc1~Sc3、St1~St4 を判別し、応力状態に応じた方程式を解いて x_n の値を更新する。
- ④ 更新された x_n を用いて判別される応力状態 Sc1~Sc3、St1~St4 が③における応力状態と一致すれば、(5.6.22)式により M を計算し、 θ を更新して③に戻る。一致しない場合は更新された x_n を用いて応力状態 Sc1~Sc3、St1~St3 を再度判別して③に戻る。

(2) 圧縮面・引張接合部の応力変形関係

(2.1) 圧縮面

圧縮面の応力変形関係は CLT 壁パネル下端の支圧に対する応力変形特性に基づいて設定する。支圧に対する応力変形特性を、「第 5 章 CLT 壁パネル端部の部分圧縮試験」による荷重変形関係から 5.5

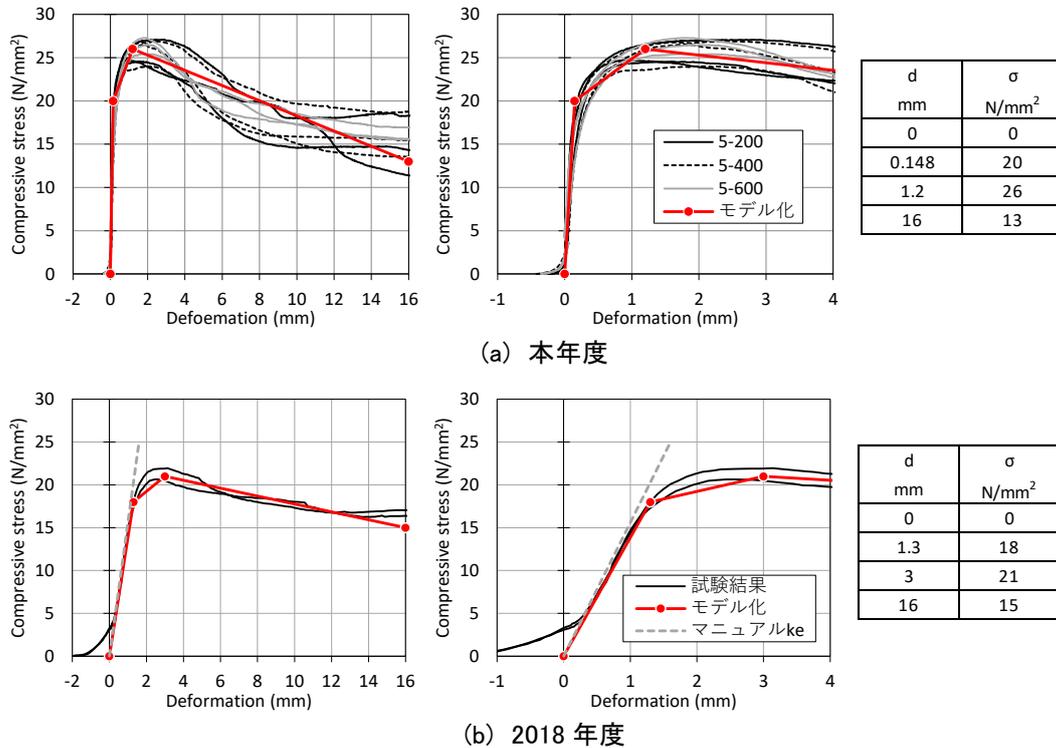


図 5.6.2 圧縮面の応力変形関係

節による壁パネルの等価ヤング係数 E_{eq} (8.34 kN/mm²)による弾性変形を差し引いたものとして、圧縮面の応力変形関係を図 5.6.2 のように設定する。なお、5.4.3 項で述べたように、本試験では初期剛性を荷重変位曲線における $0.1P_{max}$ と $0.4P_{max}$ の2点を結ぶ線分の傾きとしていることを考慮して、当該線分を応力 0 で延長して得られる変形量を「初期なじみ」とし、図 2 (a) に示す試験結果の変形は初期なじみ分だけ負側にオフセットしている。この扱いは図 5.6.2 (b) も同様であるが、2018 年度試験では初期なじみ部が大きいので、 $0.3P_{max}$ と $0.7P_{max}$ の2点を結ぶ線分の傾きを初期剛性とした。

応力変形関係のモデル化に際しては、図 5.6.2 (a) に示す本年度分については初期剛性を 5.5 節による支圧剛性 k_e (135.1N/mm³)とした。図 5.6.2 (b) に示す 2018 年度分は本年度分に対して耐力、剛性ともに小さく、初期剛性はマニュアル^{5.6.3)}に示される支圧剛性 (15.6N/mm³) にほぼ一致している。本年度分と 2018 年度分の支圧剛性にこのような差異が生じる原因は現時点では不明である。

(2.2) 引張接合部

引張接合部の応力変形関係は、壁パネル定軸力下水平加力実験において計測された引きボルト張力と壁パネル下端・引きボルト位置の鉛直変位の関係に基づき、図 5.6.3 のように設定する。本年度と 2018 年度実験における引きボルトはいずれも M24 (ABR490) であり、長さも同じであるが、降伏後の特性はやや異なっている。

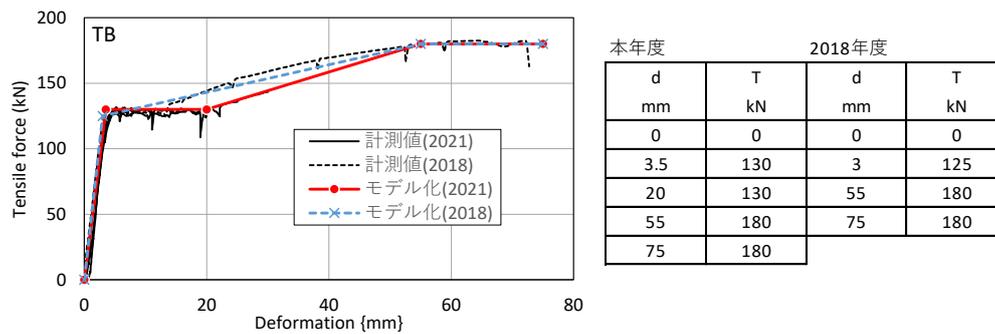


図 5.6.3 引張接合部の応力変形関係

(3) Mθ 計算の結果

Mθ 計算の結果として、本年度実験対応分を図 5.6.4 に示し、2018 年度実験対応分を図 5.6.5 に示す。それぞれ、壁脚部モーメント-壁パネル変形角関係、中立軸 x_n -壁パネル変形角関係、圧縮面・引張接合部降伏段階-壁パネル変形角関係である。壁パネル変形角は下式による壁パネルの弾性曲げ変形 δ_b と弾性せん断変形 δ_s を加算している。

$$\delta_b = \frac{M \cdot H^2}{3EI} \quad (5.6.24)$$

$$\delta_s = \frac{M}{GA} \quad (5.6.25)$$

- ここで、 M : 壁パネル脚部の曲げモーメント
 H : 壁パネル脚部から水平加力点までの高さ
 E : 壁パネル面内強軸の弾性係数 (3.6kN/mm²とする)
 G : 壁パネル面内せん断弾性係数 (0.5kN/mm²とする)

^{5.6.3)} 日本住宅・木材技術センター:2016 年版 CLT を用いた建築物の設計施工マニュアル, 2021 年構造・材料増補版, 令和 3 年 11 月

I, A : 壁パネルの断面二次モーメント、断面積

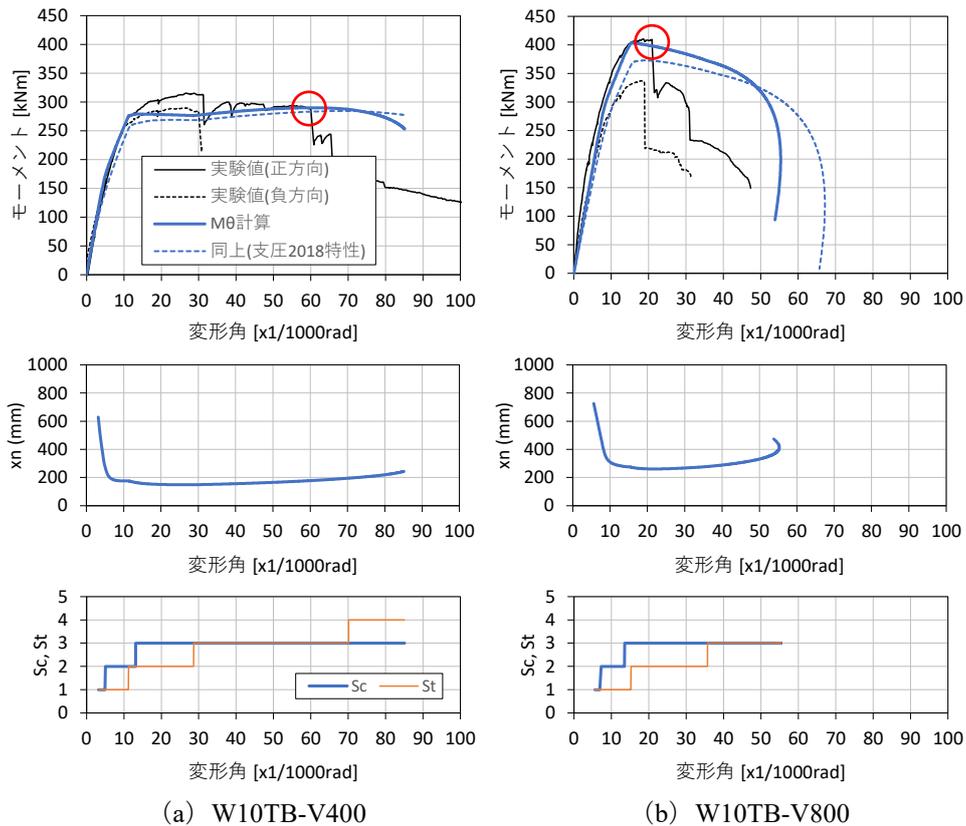


図 5.6.4 M θ 計算の結果 (本年度実験分)

また、「壁脚部モーメントー壁パネル変形角関係」には、本年度実験分については圧縮面の応力変形関係を 2018 年度実験分とした場合、同様に 2018 年度実験分については圧縮面の応力変形関係を本年度実験分とした場合を併記した。

図 5.6.4, 5.6.5 より下記の事柄が看取できる。

◆壁脚部モーメントー壁パネル変形角関係

- 接線勾配が明確に低下するまでの範囲ではM θ 計算値は実験値にはほぼ一致している。
- それ以降は、両者にやや乖離があるものがあるが、それは CLT パネルの支圧性能および引張側ボルトの引張性能のばらつきが原因と考えられる。
- 壁パネルに破壊(図中赤丸)が生じた実験では、当然ながらそれ以降のM θ 計算値は実験値に適合しない。
- 圧縮面の応力変形関係を異なる年度分とする場合は、軸力Nが大きいほど壁脚部モーメントー壁パネル変形角関係の相違が顕著になるが、特に、接線勾配が明確に低下するまでの範囲においてはその影響は顕著ではない。

◆中立軸

- 本年度実験分については、図 2.3.3(d), 2.3.5(d)に示すパネル下端鉛直変位の分布に概ね一致している。

以上より、図 5.6.2 に示す圧縮面の応力変形関係は妥当であり、一方でそれが壁脚部モーメントー壁パネル変形角関係は顕著ではないといえる。

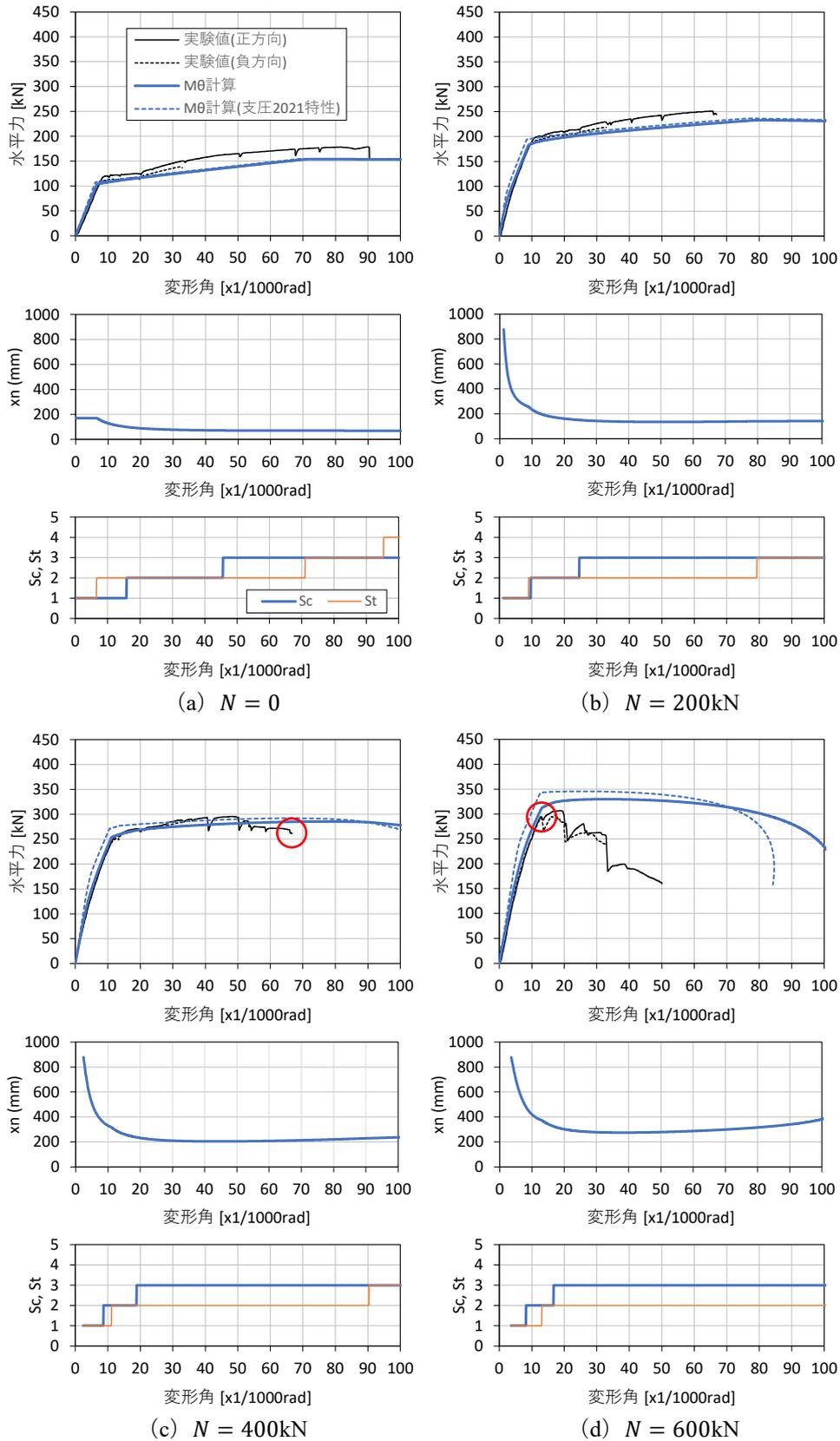


図 5.6.5 Mθ 計算の結果 (2018 年度実験分)