

第4章 構造モデル簡略化に関する検討

4.1 平面保持仮定の妥当性検証

2.3.1 項で述べたように、MS 要素では歪みの平面保持仮定が成立することが前提となっている。CLT パネル端接合部について、平面保持仮定に基づいて曲げ応力と回転角の関係等を計算し、3.1 節に示す「壁パネル単体定軸力下水平加力実験」の結果に対する適合性を検討することで、構造モデルへの MS 要素適用の妥当性を検証する。併せて、壁パネル単体定軸力下水平加力実験で確認された脆性的破壊等を防止するための制限、および構造計算で考慮する曲げ耐力と軸耐力の関係 (M-N 関係) 等について検討する。

4.1.1 M- θ 関係の算定 (M θ 計算) の方法

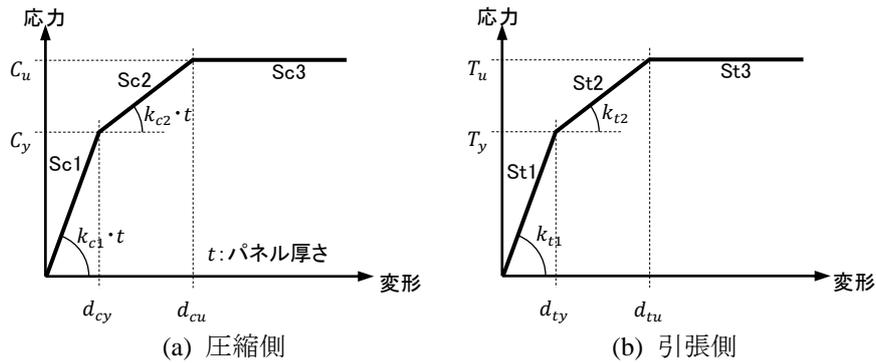


図 4.1.1 接合部の応力変形関係 (模式図)

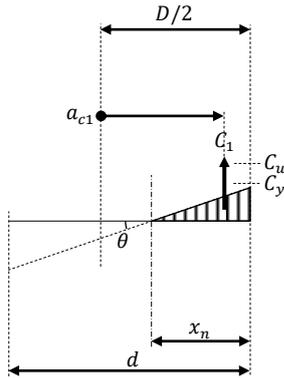
C \ T	St1	St2	St3
Sc1			
Sc2			
Sc3			

図 4.1.2 接合部の応力変形状態の分類

接合部圧縮側の支圧あるいはめり込み応力度と変形の関係、および引張側の応力変形関係はそれぞれ図 4.1.1 のようなトリリニアとしてモデル化できるものとする。ここで、圧縮側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、引張側についても同様に“St1”、“St2”、“St3”と表記することとする。このように圧縮側、引張側それぞれ 3 通りの状態に分類し、歪みの平面保持仮定が成立するものとするれば、接合部の応力変形状態はその組み合わせとして図 4.1.2 に示す 9 通りに分類できる。

圧縮側 Sc1~Sc3、引張側 St1~St3 それぞれの状態における応力は次のように計算できる。

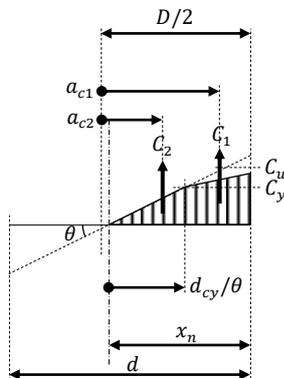
Sc1 : $x_n \leq d_{cy}/\theta$ のとき



$$C_1 = k_{c1} \cdot \theta \cdot \frac{x_n^2}{2} \quad (4.1-1)$$

$$a_{c1} = \frac{D}{2} - \frac{x_n}{3} \quad (4.1-2)$$

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



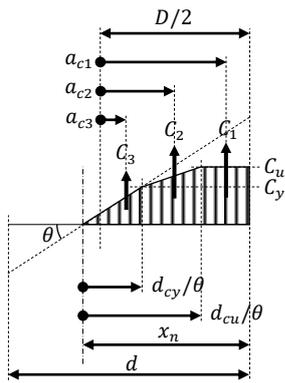
$$C_1 = \left\{ 2C_y + k_{c2} \cdot (x_n \cdot \theta - d_{cy}) \right\} \cdot \left(x_n - \frac{d_{cy}}{\theta} \right) \cdot \frac{1}{2} \quad (4.1-3)$$

$$C_2 = C_y \cdot d_{cy} \cdot \frac{1}{2\theta} \quad (4.1-4)$$

$$a_{c1} = \frac{D}{2} - x_n + \frac{d_{cy}}{\theta} + \left(x_n - \frac{d_{cy}}{\theta} \right) \cdot \frac{C_y + k_{c2} \cdot (x_n \cdot \theta - d_{cy})}{2C_y + k_{c2} \cdot (x_n \cdot \theta - d_{cy})} \quad (4.1-5)$$

$$a_{c2} = \frac{D}{2} - x_n + \frac{d_{cy}}{\theta} \cdot \frac{2}{3} \quad (4.1-6)$$

Sc3 : $d_{cu}/\theta < x_n$ のとき



$$C_1 = C_u \cdot \left(x_n - \frac{d_{cu}}{\theta} \right) \quad (4.1-7)$$

$$C_2 = (C_y + C_u) \cdot (d_{cu} - d_{cy}) \cdot \frac{1}{2\theta} \quad (4.1-8)$$

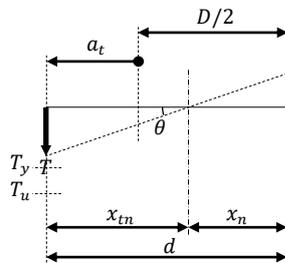
$$C_3 = C_y \cdot d_{cy} \cdot \frac{1}{2\theta} \quad (4.1-9)$$

$$a_{c1} = \frac{D}{2} - \left(x_n - \frac{d_{cu}}{\theta} \right) \cdot \frac{1}{2} \quad (4.1-10)$$

$$a_{c2} = \frac{D}{2} - x_n + \frac{d_{cy}}{\theta} + \frac{d_{cu} - d_{cy}}{\theta} \cdot \frac{C_u}{C_y + C_u} \quad (4.1-11)$$

$$a_{c3} = \frac{D}{2} - x_n + \frac{d_{cy}}{\theta} \cdot \frac{2}{3} \quad (4.1-12)$$

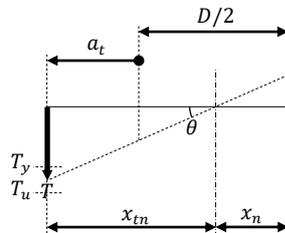
St1 : $x_{tn} \leq d_{ty}/\theta$ のとき



$$T = k_{t1} \cdot (d - x_n) \cdot \theta \quad (4.1-13)$$

$$a_t = d - \frac{D}{2} \quad (4.1-14)$$

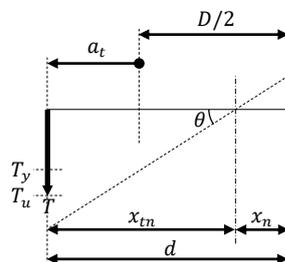
St2 : $d_{ty}/\theta < x_{tn} \leq d_{tu}/\theta$ のとき



$$T = T_y + k_{t2} \cdot \left\{ (d - x_n) \cdot \theta - d_{ty} \right\} \quad (4.1-15)$$

$$a_t = d - \frac{D}{2} \quad (4.1-16)$$

St3 : $d_{tu}/\theta < x_{tn}$ のとき



$$T = T_u \quad (4.1-17)$$

$$a_t = d - \frac{D}{2} \quad (4.1-18)$$

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。

$$M = \sum_{i=1}^3 C_i \cdot a_{ci} + T \cdot a_t \quad (4.1-19)$$

$$N = \sum_{i=1}^3 C_i - T \quad (4.1-20)$$

圧縮側 Sc1~Sc3、引張側 St1~St3 それぞれの状態に応じた応力 $C_1 \sim C_3$ 、 T の計算式を(4.1-20)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。
- ③ 応力状態 Sc1~Sc3、St1~St3 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~St3 が③における応力状態と一致すれば、(4.1-19)式により M を計算し、 θ を更新して②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。

4.1.2 M θ 計算と壁パネル単体定軸力下水平加力実験結果との比較

(1) 接合要素の応力変形関係

圧縮側・引張側それぞれの応力変形関係を図 4.1.3 に示すトリリニアとして設定する。圧縮側については、定軸力水平加力実験試験体と同一のマザーボードから採取した試験片を用いた支圧試験とめり込み試験結果に基づいて設定している。引張側については、壁パネル単体定軸力水平加力実験において計測された引きボルト接合部の応力変形関係に基づいている。

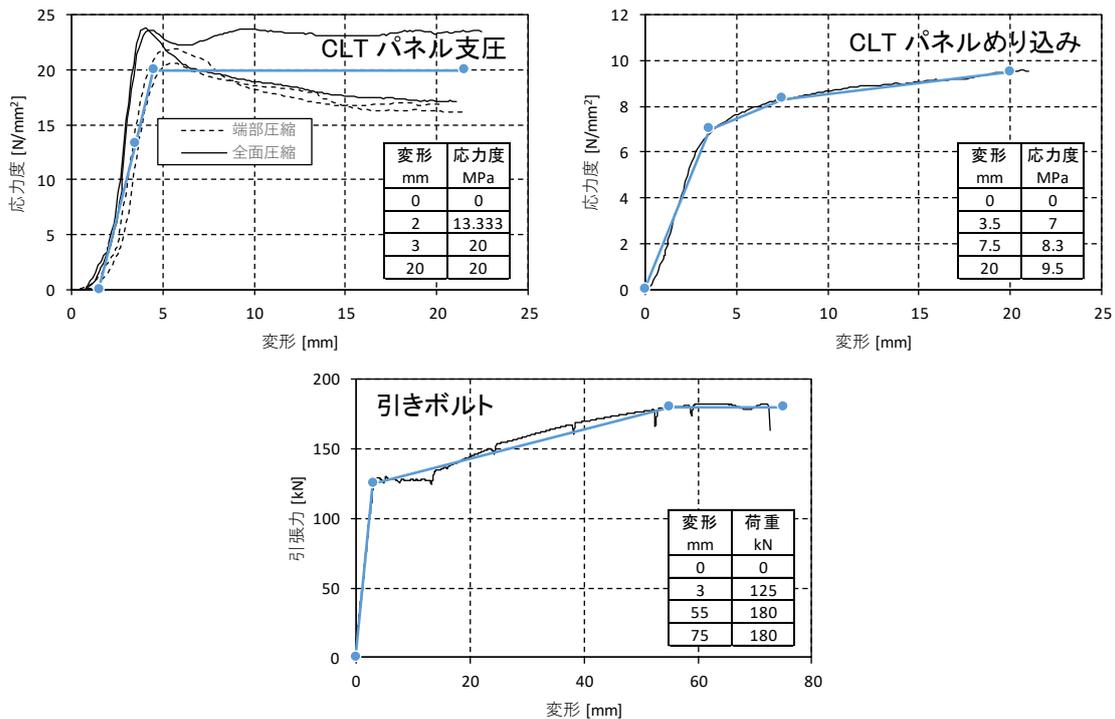


図 4.1.3 圧縮側・引張側の応力変形関係

(2) M-θ 関係

壁パネル単体定軸力水平加力実験に対応する Mθ 計算による水平力-水平変位関係を実験結果と比較して図 4.1.4, 5 に示す。CLT パネルの弾性変形はマニュアル第Ⅲ部 3.3.1 項に示される弾性係数を用い、全断面有効として計算した。Mθ 計算の結果は実験結果に良好に一致し、歪みの平面保持仮定の妥当性、ひいては MS 要素適用の妥当性が確認されたといえる。ただし、「基礎上設置・N = 600kN」では引きボルト孔周辺の圧壊による脆性的破壊、「床上設置・N = 450kN」では全面めり込み（床版への沈下）による引きボルトの緩みに起因する剛性低下が生じ、それぞれ注意を要する。

(3) 中立軸位置 x_n

Mθ 計算による中立軸位置 x_n と水平変位の関係を図 4.1.4, 5 に併記した。短期許容時水平変位を基礎上で 12mm、床上で 15mm とし、終局時水平変位を 100mm とし、それらに対応する x_n を図 4.1.4, 5 から読み取ると表 4.1.1 のようになる。

マニュアルでは x_n を、引張接合部から圧縮縁までの距離 d の 1/2 と仮定しており、これを x_{nd} とする。本試験体では $x_{nd} = 442.5\text{mm}$ となる。構造計算上は x_n を大きく仮定する方が安全側となる。

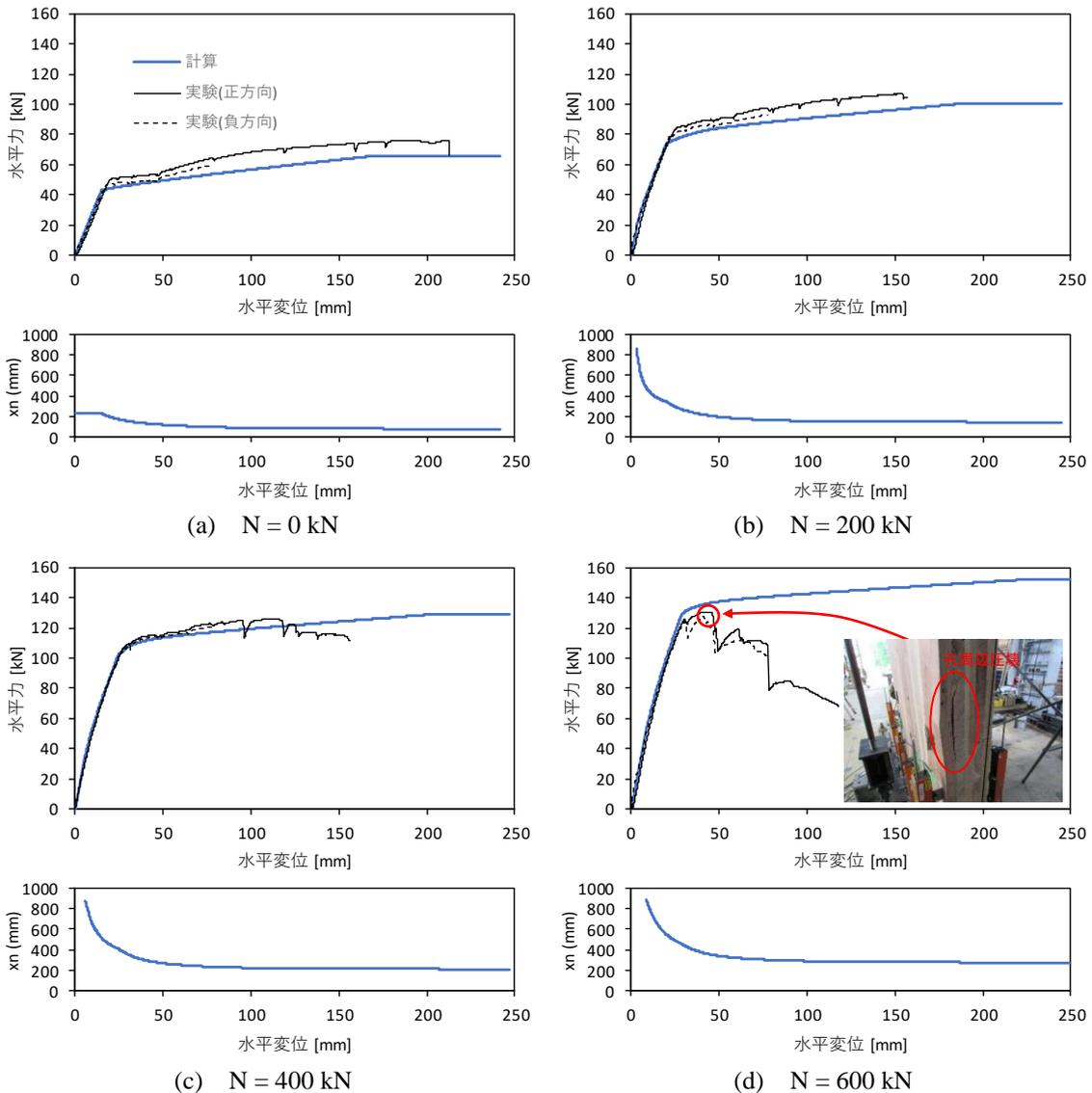


図 4.1.4 歪みの平面保持仮定に基づく計算値と実験結果の比較（基礎上設置）

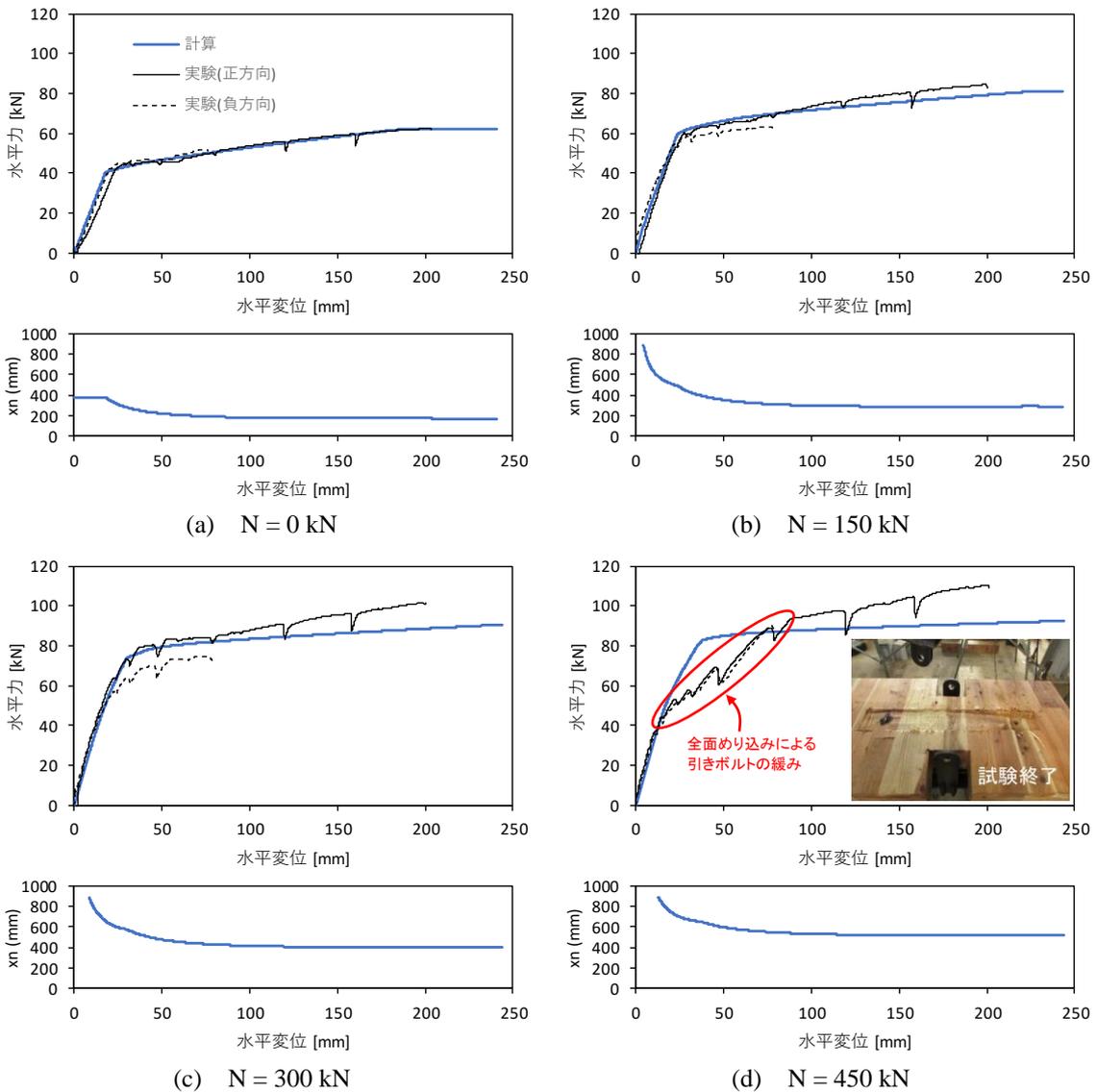


図 4.1.5 歪みの平面保持仮定に基づく計算値と実験結果の比較（床上設置）

表 4.1.1 の x_n は、基礎上については $N=600\text{kN}$ の場合の短期許容時を除き x_{nd} を下回っており、ほぼ安全側の設定となっている。 N が 200kN 程度以下の場合には x_{nd} を $d/3$ 程度とすることが可能といえる。床上については、短期許容で $N \geq 150\text{kN}$ の場合に x_n が x_{nd} を上回っており、 x_{nd} を現在の仮定より小さくすることは難しい。

表 4.1.1 $M\theta$ 計算による中立軸位置 (mm)

(a) 基礎上			(b) 床上		
N	短期許容時	終局時	N	短期許容時	終局時
0	221.8	87.8	0	361.4	178.3
200	350.7	153.5	150	510.2	294.6
400	440.4	219.2	300	624.4	410.8
600	515.8	284.8	450	734.9	527.1

(3) M-N 関係

図 4.1.4, 5 に示す実験による水平力-水平変位関係から降伏耐力を看取り、その時の壁脚部のモーメントと軸力の関係を終局時 M-N 関係（実験 MN 関係）とする。その関係と M0 計算等による終局時 M-N 関係を比較して図 4.1.6 に示す。

基礎上設置について、実験 MN 関係は、M0 計算において引きボルトが第一降伏点に達するときおよび圧縮部が第二降伏点に達するときのいずれか早い時点の M-N 関係（図 4.1.6 左③）にほぼ一致している。また、 $N = 600\text{kN}$ の実験 MN 関係はパネル欠損部の(4.1-21)式の弾性検定による MN 関係上（図 4.1.6 左⑤）にあり、 F_c, F_b は実強度に対して相応の安全率を有することを考慮すれば、(4.1-21)式左辺が 1.0 以下であることを検定することにより脆性的破壊は防止できると考えられる。

$$\frac{N}{A_e \cdot F_c} + \frac{M}{Z_e \cdot F_b} = 1.0 \quad (4.1-21)$$

ここで、 A_e, Z_e : 引きボルト孔による欠損を考慮した断面積、断面係数
 F_c, F_b : 圧縮、曲げの基準強度

床上設置について、基礎上設置と同様に実験 MN 関係は M0 計算による M-N 関係（図 4.1.6 右②）にほぼ一致している。高軸力下の全面めり込みに伴う剛性低下は正負交番加力による壁パネルの沈下が原因であり、例えば MS 要素によってこれを考慮するためには圧縮バネ・引張バネに正負交番加力に対する応力変形関係の履歴則を設定するなどの工夫が必要であり、それを現時点で構造設計に取り込むことは困難と考えられる。当面は、 $N = 450\text{kN}$ とした実験で生じた程度の剛性低下は許容できるものとして、保有水平耐力時の壁パネル軸力をパネル全断面積で除した値を $450\text{kN} / (150 \times 1000\text{mm}) \times 1000 = 3\text{N/mm}^2$ 以下とすることとする。

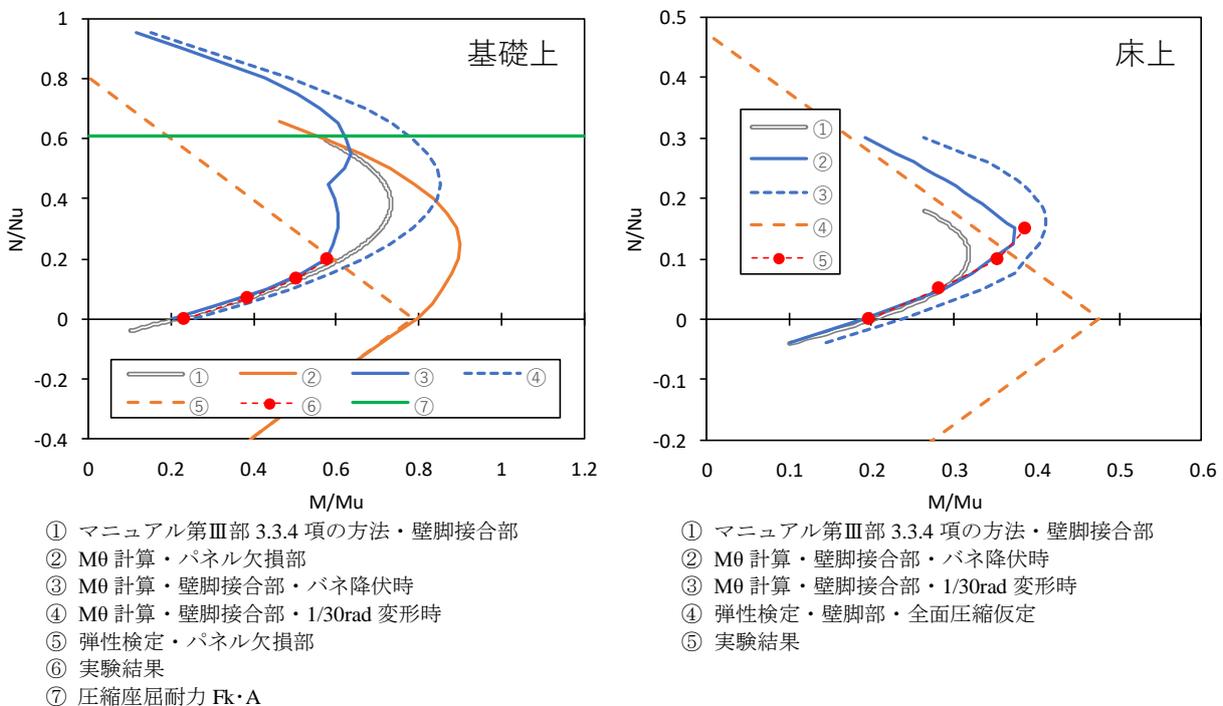


図 4.1.6 CLT 壁パネル脚部の M-N 関係

(4) 終局時の M-N 関係

構造モデルを現行のフレームモデルとする場合の終局時 MN 関係は現マニュアル第Ⅲ部 3.3.4 (3.2)項に示される図 4.1.6 ①の二重線とし、壁パネル端接合部のモデル化と検定の方法は同 3.1.2 (3)項の記述に従うこととする。

MS 要素を用いて構造モデルを構成する場合は図 4.1.6 左④および図 4.1.6 右③のような終局時 MN 関係が自動的に考慮される。MS 要素を用いる場合の壁パネル端接合部の検定方針として、弾性設計時は圧縮接合部（壁パネル）応力および引張接合部応力を短期許容耐力以下とし、終局設計時はそれらの変形を終局変形以下とすることとする。

4.2 MS 要素設定における断面分割数の適正值

4.2.1 目的

MS 要素を用いた構造モデル（以下、MS モデル）は MS 要素を設定する際の断面分割数を細かくするほど精度が向上する。ここでは、図 4.2.1 及び図 4.2.2 に示すように、分割間隔 q 、壁パネルの幅 L 、定軸力 P_v を変数として片持ち柱の荷重—変位関係の比較を行い、MS 要素への置換に際する適切な断面分割数の検討を行う。

4.2.2 解析モデルの概要

- CLT パネル：S60-5-5（材料特性値はマニュアルに基づく）
- 壁 幅：1m、2m、3m
- 接 合 部：引 張 引きボルト（M24-ABR490）
 圧 縮 基礎の場合：CLT パネルの支圧、床上の場合：CLT パネルのめり込み
 せん断 剛
- 軸 力：壁幅 1m の場合 0、200、400、600kN、
 壁幅 2m の場合 0、400、800、1200kN、
 壁幅 3m の場合 0、600、1200、1800kN
 ※壁幅によらず、圧縮応力度 σ_c は同一（それぞれ 0、1.33、2.67、4.00N/mm²）となるように軸力を設定する。
- MS 要素(圧縮バネ)の断面分割数：①10mm 間隔配置、②2~30 分割

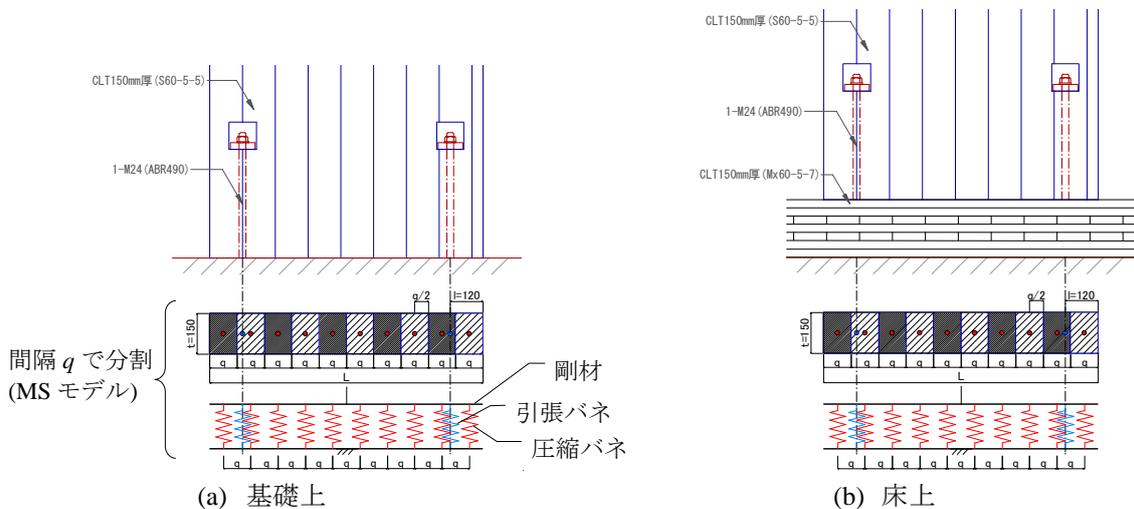


図 4.2.1 MS 要素の断面分割

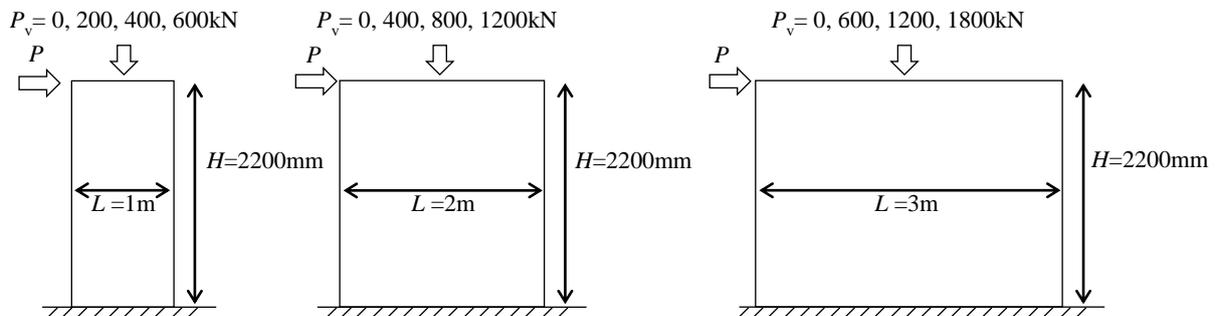


図 4.2.2 検討対象とする壁パネルの高さと幅と定軸力の組み合わせ

解析モデルに設定する引張バネ及び圧縮バネの復元力特性は、下記のように設定する。

引張接合部：3.1節で示した無軸力水平加力試験より得られる引きボルト接合部の荷重—変位関係より図4.2.3(a)のように設定する

圧縮接合部：支圧及びめり込みの要素試験結果に基づき、図4.2.3(b)と図4.2.3(c)のように設定する

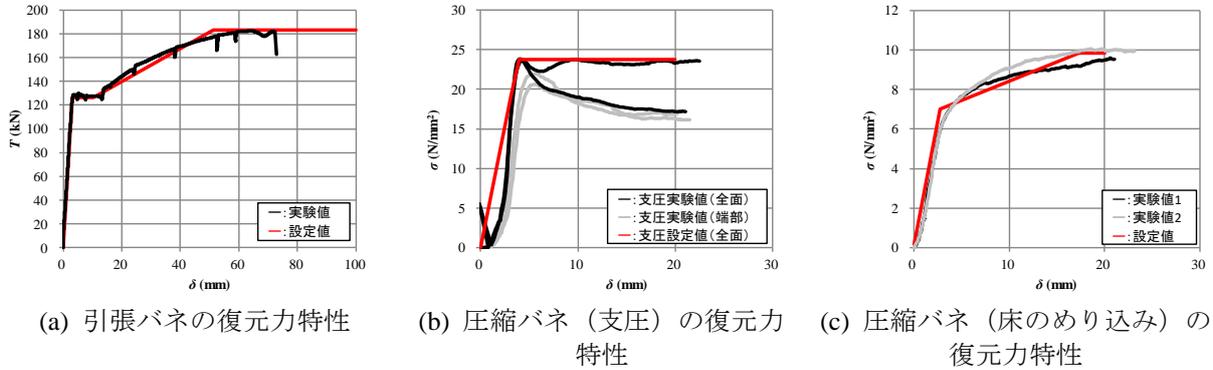


図 4. 2. 3 接合部性能

4. 2. 3 MS 要素の設定

MS 要素は、一般的に RC を対象としているため応力度 σ —ひずみ ε 関係で復元力特性を設定する。従来モデルでは、各接合部は荷重 P —変位 δ 関係より復元力特性を設定したバネ要素を設定することになっており、既往の接合部データ等も P — δ 関係で示していることが多い。MS 要素を用いる場合は、接合部の P — δ 関係を σ — ε 関係に読み替えて、等価となるようにモデルを設定する必要がある。本検討では、下式を用いて接合部の P — δ 関係を σ — ε 関係に置換した。

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{4.2-1}$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \tag{4.2-2}$$

$$k = \frac{EA}{l} \tag{4.2-3}$$

ここで、 A ：MS 要素の有効断面積、 l ：MS 要素の長さ、 k ：接合部の弾性剛性、 E ：MS 要素の弾性剛性

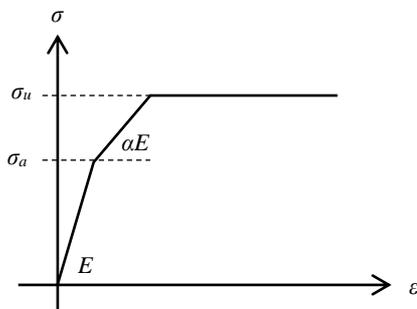


図 4. 2. 4 MS 要素に設定する復元力特性 (σ — ε 関係)

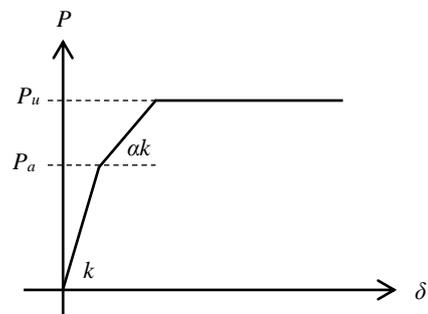


図 4. 2. 5 バネ要素に設定する復元力特性 (P — δ 関係)

4.2.4 解析結果

解析結果より得られる荷重—変位関係を図 4.2.6 に示す。初期剛性 k 、許容耐力 Q_a 、終局耐力 Q_u について、10mm 間隔で断面分割を行ったときの各特性値に対する断面分割数を変数としたときの各特性値の比を図 4.2.7~図 4.2.9 にそれぞれ示す。同図中の赤枠は、断面分割数が 10 のとき、10mm 間隔の特性値との比が 3%以上となっているものを意味している。

パネル幅が 3m 以下の範囲において、壁幅の 1/10 以下の間隔以下で圧縮バネを配置すれば、軸力の大きさに関わらず、荷重—変位関係は概ね等しいことが図 4.2.6 よりわかる。パネル幅が 3m 以下の範囲において、MS 要素の断面を 10mm 間隔で分割したときの各特性値（剛性、許容耐力、終局耐力）に対して、MS 要素の断面分割数が 10 以上 20 未満であれば 5%以下の相違、断面分割数が 20 以上であれば 2%以下の相違であることが図 4.2.7~図 4.2.9 より確認された。

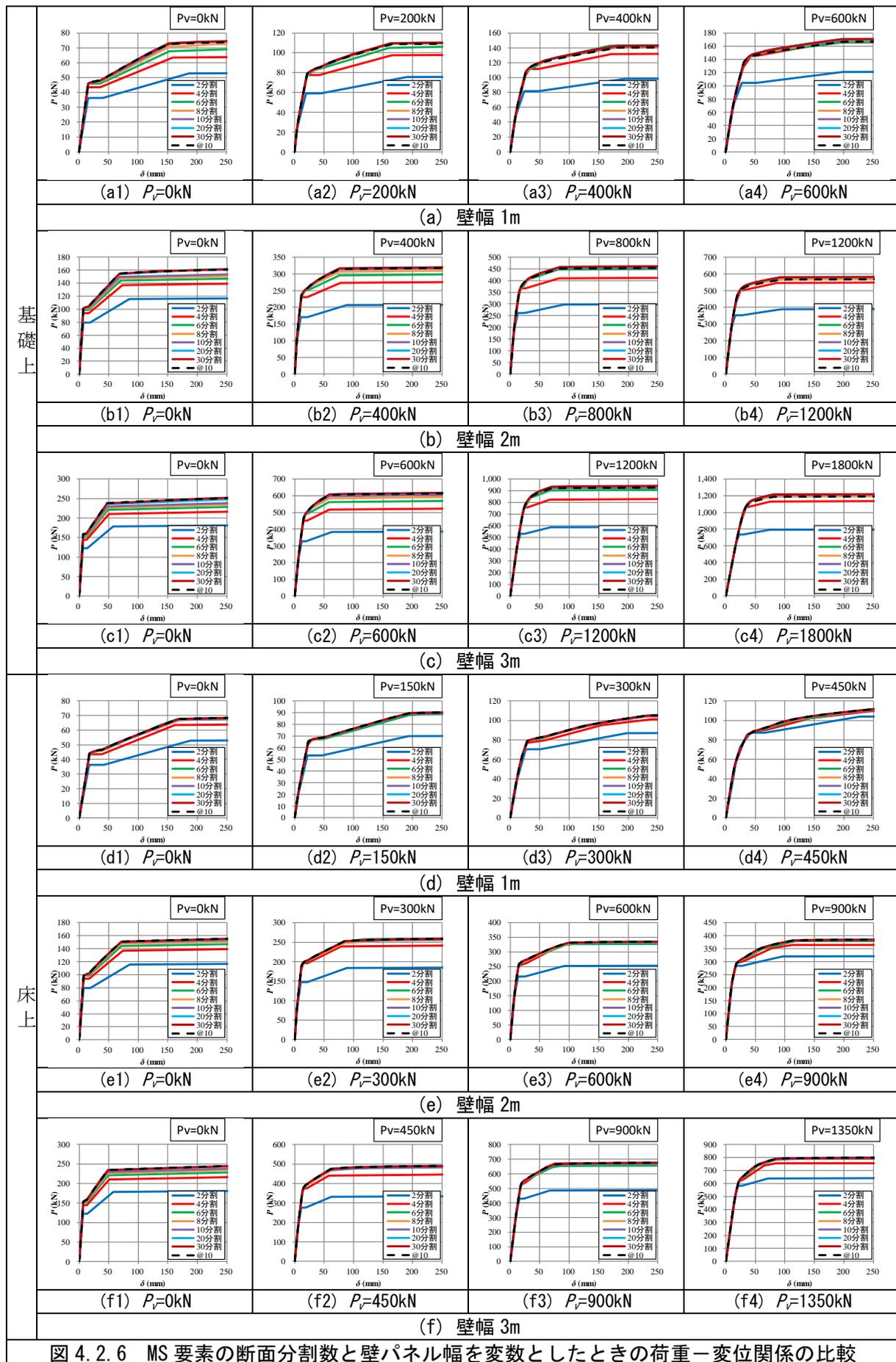
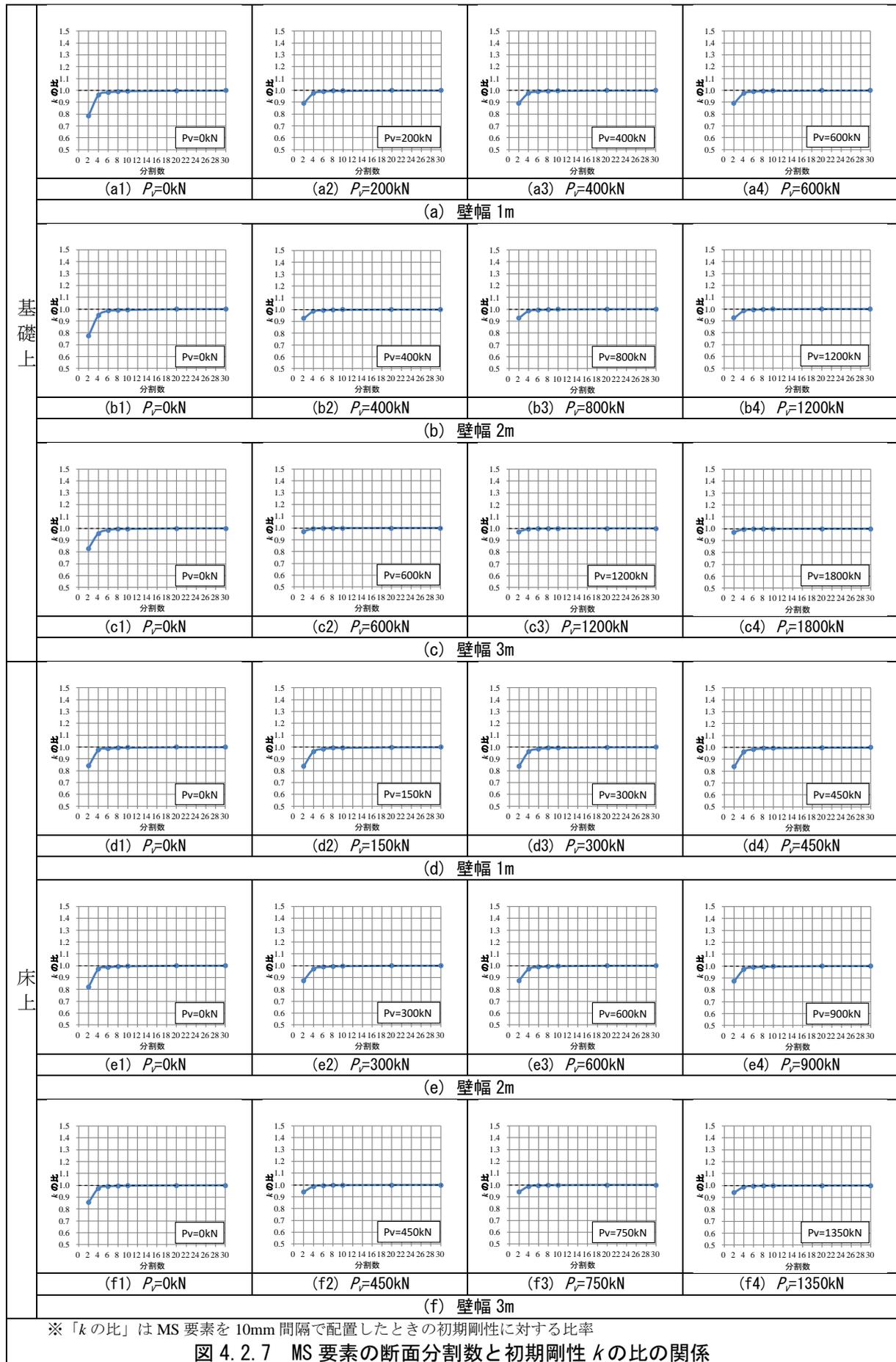
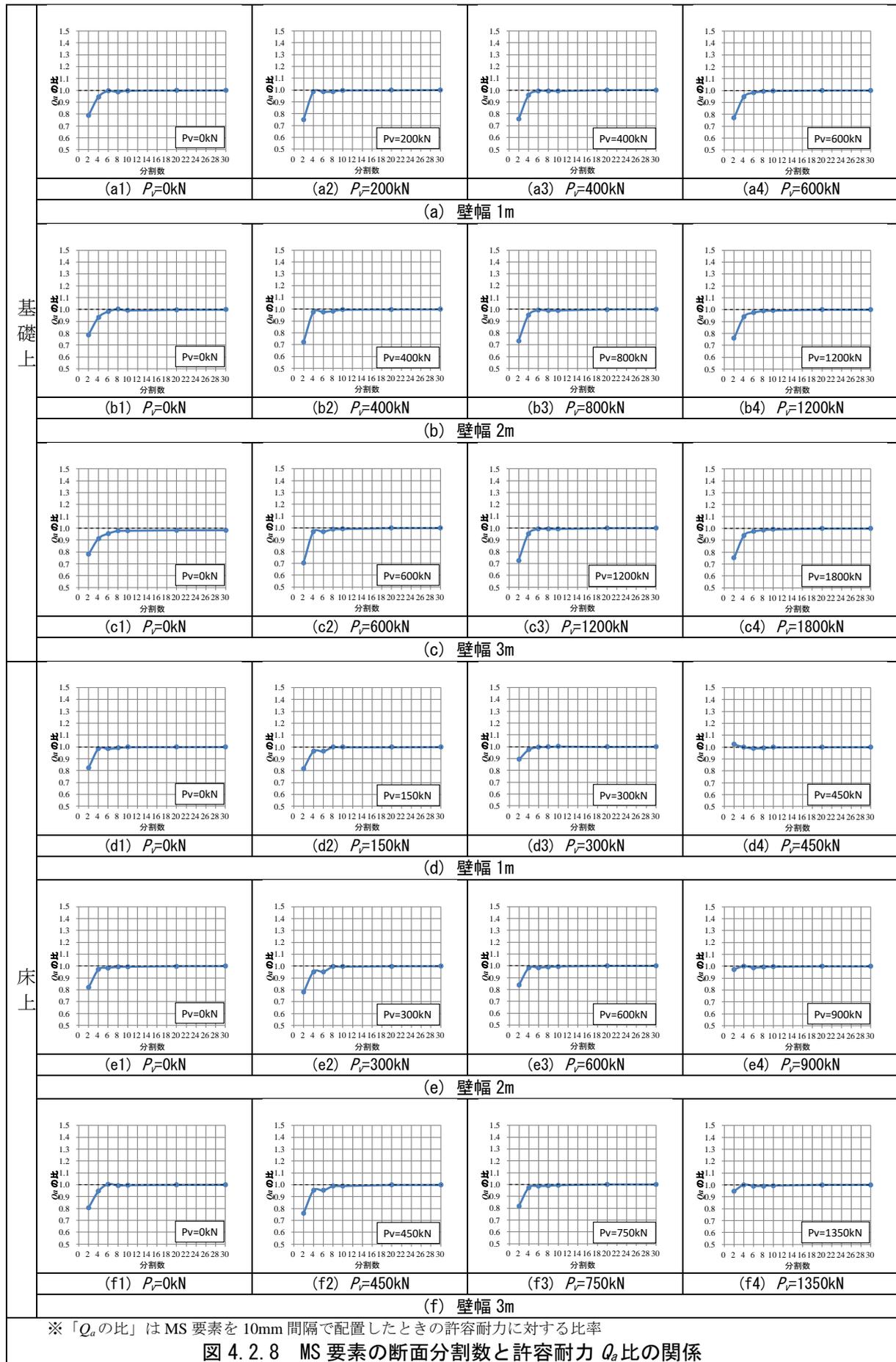


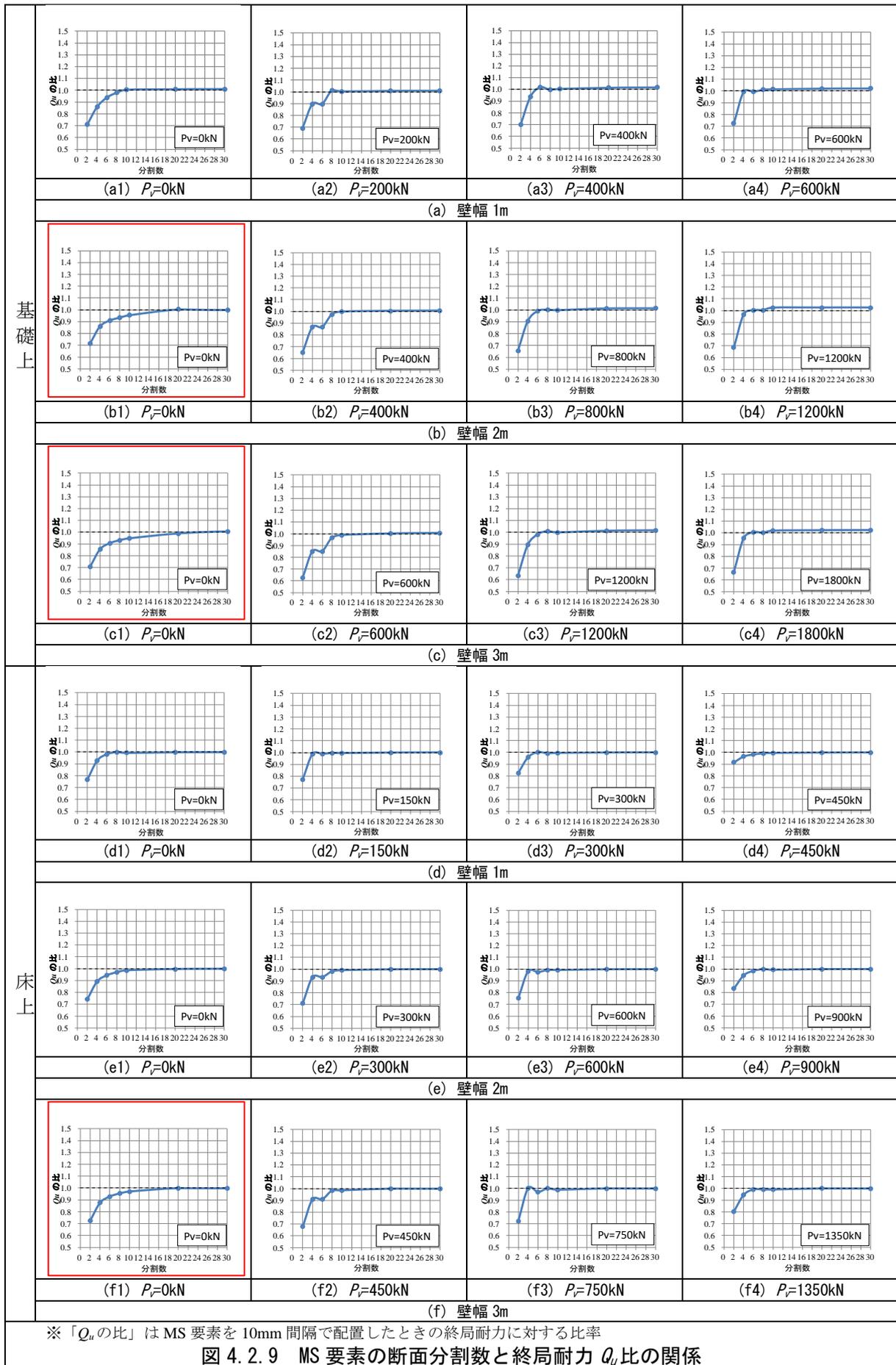
図 4.2.6 MS 要素の断面分割数と壁パネル幅を変数としたときの荷重-変位関係の比較



※「 k の比」はMS要素を10mm間隔で配置したときの初期剛性に対する比率

図 4.2.7 MS要素の断面分割数と初期剛性 k の比の関係





4.2.5 まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- ・ 本検討では、壁パネル (S60-5-5) の高さを 2.2m、幅を 1m、2m、3m の 3 種類でそれぞれ基礎上配置及び床上配置を対象に MS 要素への置換に際する適切な断面分割数の検討を行った。
- ・ パネル幅が 3m 以下の範囲において、壁幅の 1/10 以下の間隔以下で圧縮バネを配置すれば、軸力の大きさに関わらず、荷重-変位関係は概ね等しい。
- ・ パネル幅が 3m 以下の範囲において、MS 要素の断面を 10mm 間隔で分割したときの各特性値 (剛性、許容耐力、終局耐力) に対して、MS 要素の断面分割数が 10 以上 20 未満であれば 5% 以下の相違、断面分割数が 20 以上であれば 2% 以下の相違であった。
- ・ パネルの高さに対して幅の比が大きい壁パネルのモデル化に MS モデルを適用することは議論の残るところであり、今後の課題とする。

4.3 MS 要素応力と接合部応力の関係

従来モデルは接合部をバネ要素でモデル化を行うため、接合部応力はバネ要素の応力を出力すれば得られるのに対し、MS モデルの接合部応力は一括出力では得られない。MS 要素内のバネ要素は個々に出力可能ではあるが、接合部ごとに個々のバネ要素の応力・変位を取り出すのは極めて煩雑であり、実務設計にはなじまない。そのため、MS モデルにおける引張・圧縮接合部の検討は MS 要素で接合された節点の並進と回転角から接合部の変位を算出すること（以下、節点計算と呼ぶ）とする。各接合部の変位は図 4.3.1 に基づき、以下のように表される。

$$\text{引張バネ} \quad 1 \text{ 階柱脚} \quad \delta_{t1} = (\gamma_1 \cdot l_{t1}) + \delta_{1Y} \quad (4.3-1)$$

$$\text{上階柱脚} \quad \delta_{t2} = (\gamma_2 \cdot l_{t2} - \gamma_3 \cdot l_{t2}) + (\delta_{2Y} - \delta_{3Y}) \quad (4.3-2)$$

$$\text{圧縮バネ} \quad 1 \text{ 階柱脚} \quad \delta_{c1} = -(\gamma_1 \cdot l_{c1}) + \delta_{1Y} \quad (4.3-3)$$

$$\text{上階柱脚} \quad \delta_{c2} = (\gamma_2 \cdot l_{c2} - \gamma_4 \cdot l_{c2}) - (\delta_{2Y} - \delta_{4Y}) \quad (4.3-4)$$

$$\text{下階柱頭} \quad \delta_{c3} = (\gamma_4 \cdot l_{c2} - \gamma_3 \cdot l_{c2}) - (\delta_{4Y} - \delta_{3Y}) \quad (4.3-5)$$

$$\text{壁-垂れ壁} \quad \delta_{c4} = (\gamma_5 \cdot l_{c3} - \gamma_6 \cdot l_{c3}) + (\delta_{5X} - \delta_{6X}) \quad (4.3-6)$$

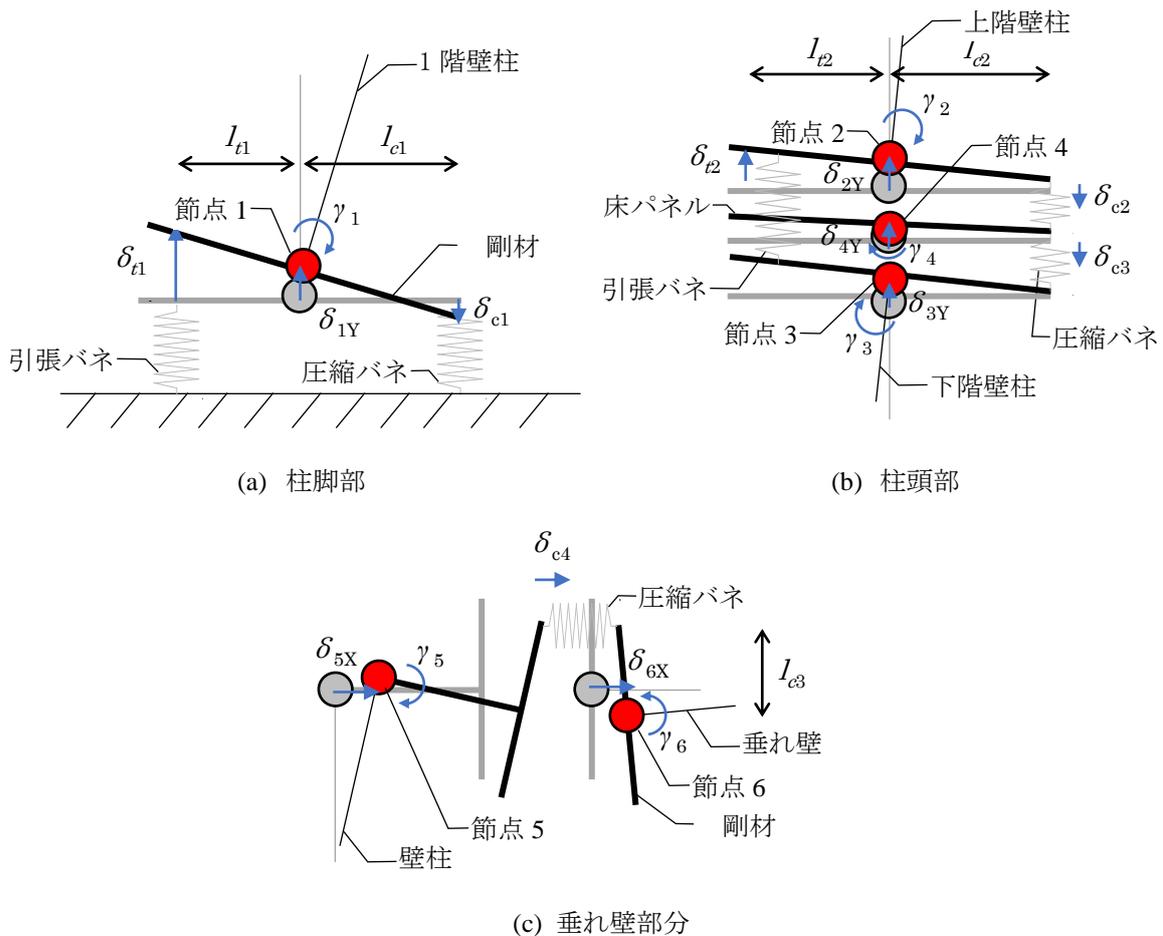


図 4.3.1 節点の並進及び回転とバネ要素の変位

せん断接合部については、MS 要素とした線材のせん断変形より得られる。引張・圧縮バネと同様に、節点の並進から算出する場合は、下式のように得られる。

$$\text{せん断バネ 1 階柱脚} \quad \delta_{s1} = \delta_{1X} \quad (4.3-7)$$

$$\text{柱頭・柱脚} \quad \delta_{s2} = \delta_{2X} - \delta_{4X} \quad (4.3-8)$$

$$\text{壁-垂れ壁} \quad \delta_{s3} = \delta_{5Y} - \delta_{6Y} \quad (4.3-9)$$

MS 要素における接合部応力は、当該接合部の変位に剛性を乗じて（変位 $\delta \times$ 接合部剛性 k ）算出する。

4.4 MS要素を用いた構造モデルの精度検証

4.4.1 壁-垂れ壁接合部の性能

MS要素を用いた構造モデルの精度検証を目的に、「第3章 3.3 壁-垂れ壁接合部曲げ試験」を対象に解析モデルによる試験結果の追跡を試みた。なお、以下の解析検討において、解析ソフトは汎用計算プログラム「SNAP」(株式会社構造システム)を用いた。

(1) 解析モデル概要

(a) 解析モデル構成

解析モデルの全体図を図4.4.1に示す。解析モデルは2次元フレームモデルとし、線材に置換したCLT壁パネルとCLT垂れ壁パネルMS要素を介して接続したモデルである。解析方法は加力点に単位荷重を与え、加力点の目標変位を500mmとした変位増分による非線形解析とした。MS要素のバネ配置を図4.4.2に示す。MS要素は、L形金物を引張バネ及びCLTパネルの壁-垂れ壁接触面木口を圧縮バネとしてモデル化する。

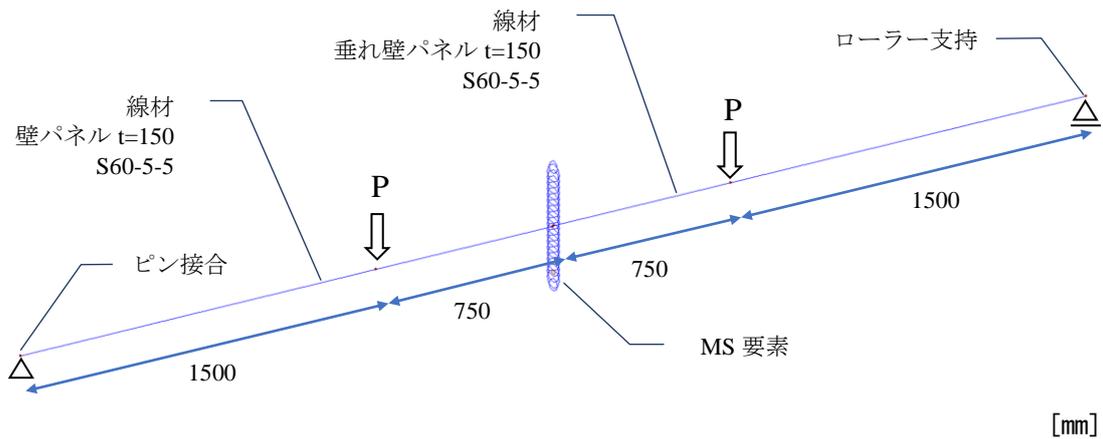


図 4.1.1 解析モデル

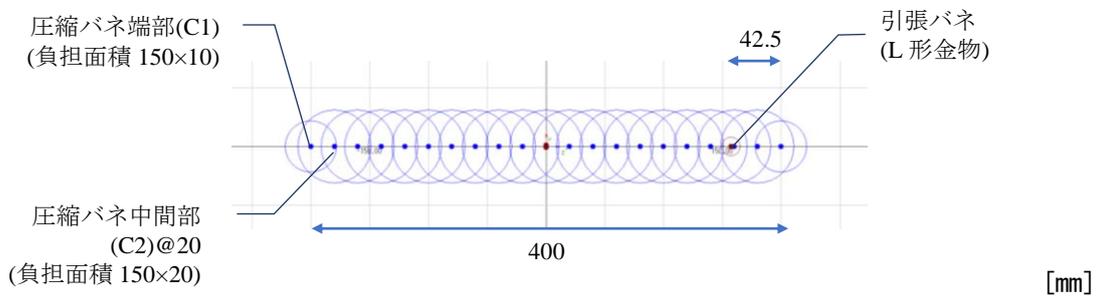


図 4.4.2 MS要素

(b) 解析モデル詳細

解析モデル要素の特性は、マニュアル及び3章で示した要素試験結果による。詳細を以下に示す。

(i) CLT パネルのモデル化

CLT パネルは CLT の材料特性及び断面寸法を与えた線材に置換し、弾性モデルとする。表 4.4.1 に CLT パネルの特性値を示す。なお、CLT のヤング係数 E はラミナのヤングを 7500N/mm^2 として算出した。

表 4.4.1 CLT パネルの特性値

部位	強度等級 ラミナ構成	計算条件						備考
		E	G	t	l	A	I	
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ⁴]	
壁パネル	S60-5-5	3000	500	150	600	90000	2.7×10^9	面内・弱軸方向
垂壁パネル	S60-5-5	4500	500	150	400	60000	8.0×10^8	面内・強軸方向

E : CLT のヤング係数、 G : CLT のせん断弾性係数、 t : CLT の厚さ、 l : CLT の幅、 A : CLT の断面積($=t \times l$)、 I : CLT の断面 2 次モーメント

(ii) MS 要素のモデル化

接合部の復元力特性は試験結果に基づき図 4.4.3、図 4.4.4 に示すように設定する。

引張接合部は、「第3章 3.3 壁-垂れ壁接合部曲げ試験」図 3.3.10 に示した接合部の荷重変形関係に従い、図 4.4.3 に示すように設定した。

壁-垂れ壁接触面木口を圧縮バネの復元力特性は、試験結果と解析結果の整合性から調整して図 4.4.4 に示すように設定した。

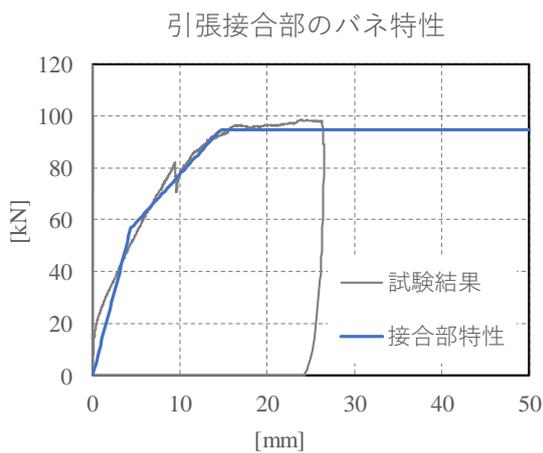


図 4.4.3 引張接合部のバネ特性

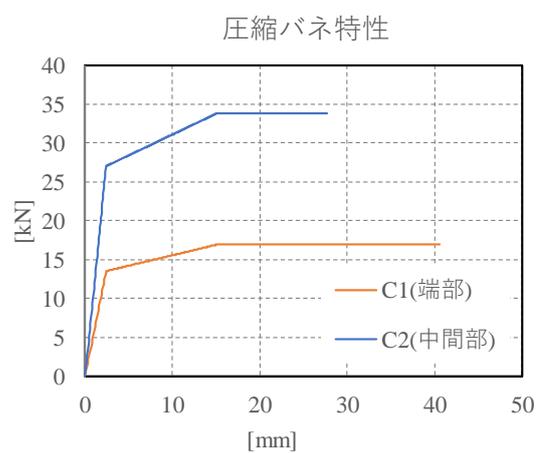


図 4.4.4 圧縮バネ特性

(2) 解析と試験結果の比較

(a) 荷重変形関係の比較

図 4.4.5 に試験結果と解析の荷重変形関係を示す。図 4.4.5 のプロットは解析の第二折れ点を降伏点として示したものである。図 4.4.6 は引張接合部の解析結果、図 4.4.7 は圧縮縁と圧縮縁から 20mm 内側の圧縮バネの解析結果の同ステップ時にプロットしたものである。引張接合部の第二折れ点は試験体の降伏点とほぼ一致しており、その時点で圧縮縁近傍の圧縮バネは二次勾配に達していたことが確認できる。

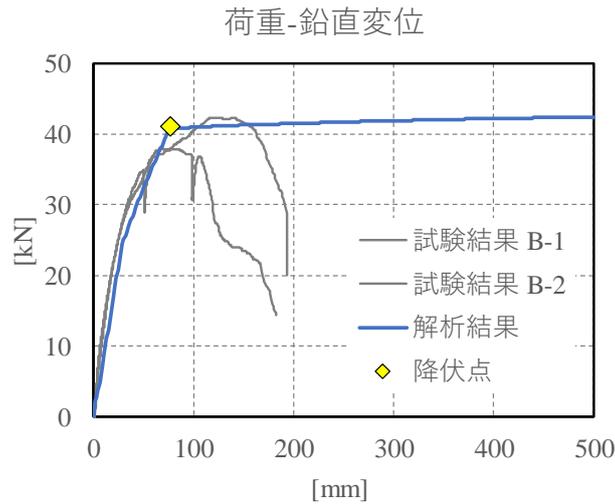


図 4.4.5 解析と試験結果の比較

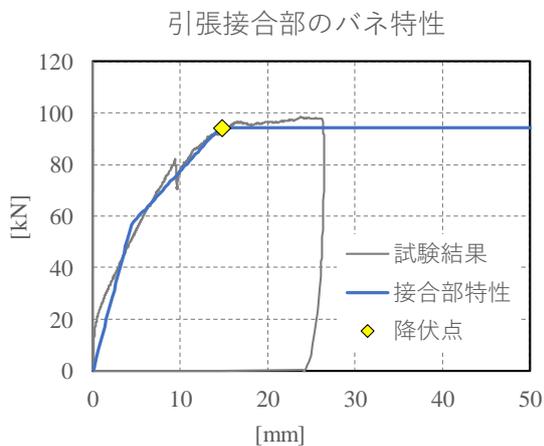


図 4.4.6 引張接合部

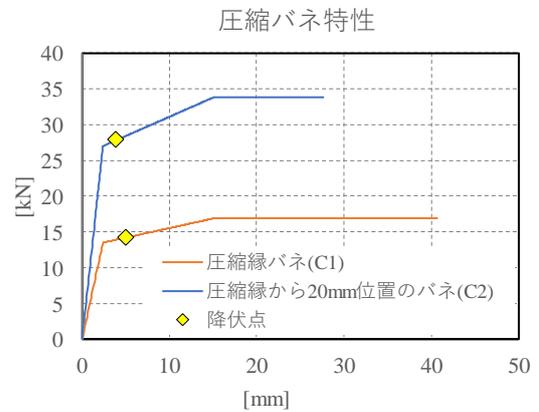


図 4.4.7 圧縮バネ

4.4.2 L形構面定軸力下水平加力実験結果との比較

MSモデルの妥当性を確認するため、3.3節で示したL形構面の実験結果と解析結果の比較を行う。試験体図を図4.4.8に、試験体に対応する解析モデルを図4.4.9に示す。試験体概要は以下の通りである。

- CLTパネル：S60-5-5（厚さ150mm）
- 壁幅：150×1000mm
- 垂れ壁：150×500mm
- 接合部：引張 1階柱脚 引きボルト（M24-ABR490）
 壁－垂れ壁 鋼板添え板ビス接合 LST+STS・65 26本
 圧縮 1階柱脚 CLTパネルの支圧
 壁－垂れ壁 CLTパネルのめりこみ
 せん断 1階柱脚 剛
 壁－垂れ壁 鋼板添え板ビス接合 LST+STS・65 26本※
 ※引張性能を同等のせん断性能を有すると仮定する
- 定軸力：400kN
- MS要素(圧縮バネ)の断面分割数：10分割

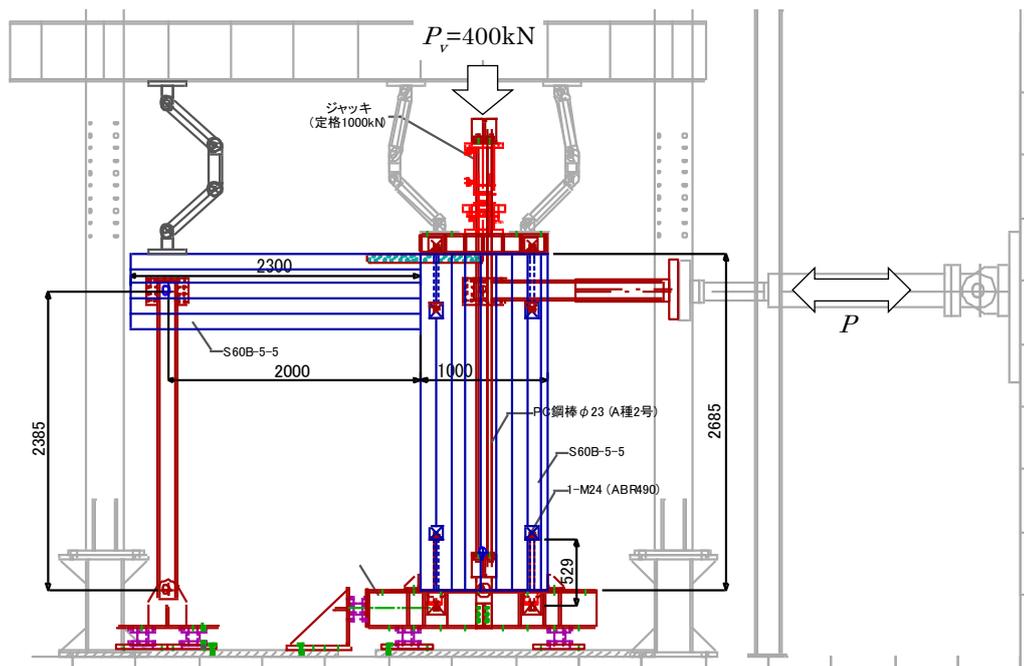


図 4.4.8 試験体図

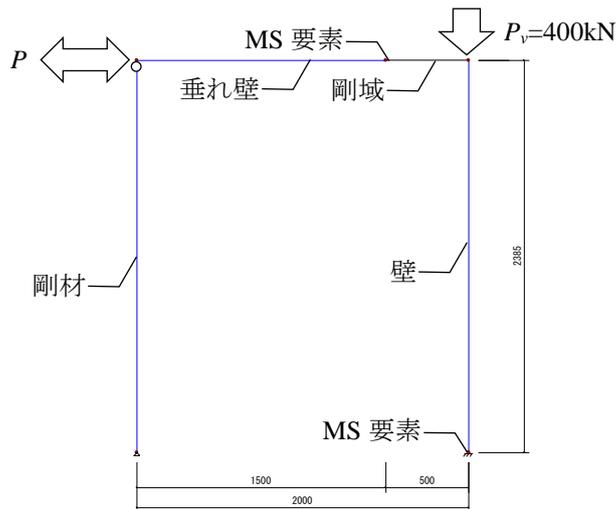
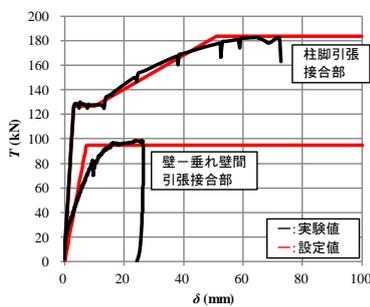


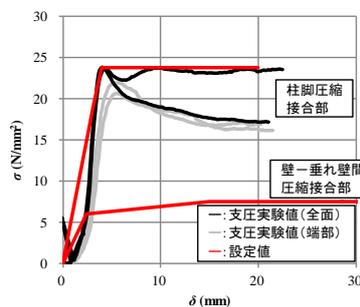
図 4.4.9 解析モデル

解析モデルに設定する引張バネ及び圧縮バネの復元力特性は、下記のように設定する。

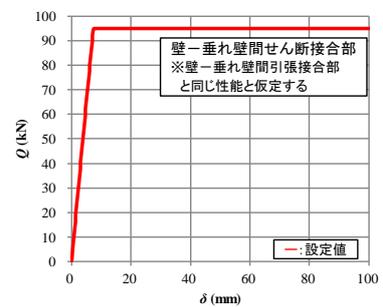
- ・柱脚引張接合部 : 3.1 節で示した無軸力水平加力試験より得られる引きボルト接合部の荷重－変位関係より図 4.4.10(a)のように設定する
- ・壁－垂れ壁間引張接合部 : 4.4.1 節で示した壁－垂れ壁接合部の引張曲げ試験結果より壁－垂れ壁間の引張接合部（ビス接合部）の荷重－変位関係を図 4.4.10(a)のように設定する
- ・柱脚圧縮接合部 : 支圧の要素試験結果に基づき、図 4.4.10(b)のように設定する
- ・壁－垂れ壁間圧縮接合部 : 4.4.1 節で示した壁－垂れ壁接合部の引張曲げ試験結果より壁－垂れ壁間の引張接合部（ビス接合部）の荷重－変位関係を図 4.4.10(b)のように設定する
- ・柱脚せん断接合部 : 剛とする
- ・壁－垂れ壁間せん断接合部 : 壁－垂れ壁間引張接合部と同等のせん断性能を有すると仮定して図 4.4.10(c)のように設定する



(a) 引張バネの復元力特性



(b) 圧縮バネの復元力特性



(c) せん断バネの復元力特性

図 4.4.10 接合部性能

実験結果と解析結果の荷重－変位関係の比較を図 4.4.11 に、解析結果より得られる 1/150rad と 1/30rad のモーメント図と変形図をそれぞれ図 4.4.12 と図 4.4.13 に示す。正加力時の荷重－変位関係は実験値と解析値で比較的良好に一致している。一方、負加力時では解析値の耐力が高く評価されている。負加力時に引張側となる引きボルト接合部の応力－変位関係を図 4.4.14 に示す。解析モデルの復元力特性は 3.1 節で示した無軸力水平加力試験より得られる引きボルト接合部の荷重－変位関係より設定しているが、L 形構面では 140kN 程度まで到達後、荷重低下していることが図 4.4.14 より分かる。図 4.4.15 に負加力時に圧縮側となる引きボルト接合部の 1/50rad 時と 1/30rad 時の写真を示す。同図より、1/50rad(56.7mm)時に引張による亀裂が生じ、1/30rad(94.5mm)時に圧壊が生じていることが分かる。荷重－変位関係において、1/50rad(56.7mm)付近で実験値と解析値の相違が大きくなりはじめ、1/30rad(94.5mm)付近で実験値の荷重低下が生じていることが図 4.4.11 より分かる。以上より、引張抵抗による引きボルト接合部周辺の亀裂の発生が圧縮時に早期の同接合部の圧壊を誘発しており、これにより実験結果と解析結果の荷重－変位関係の相違が生じたと考えられる。

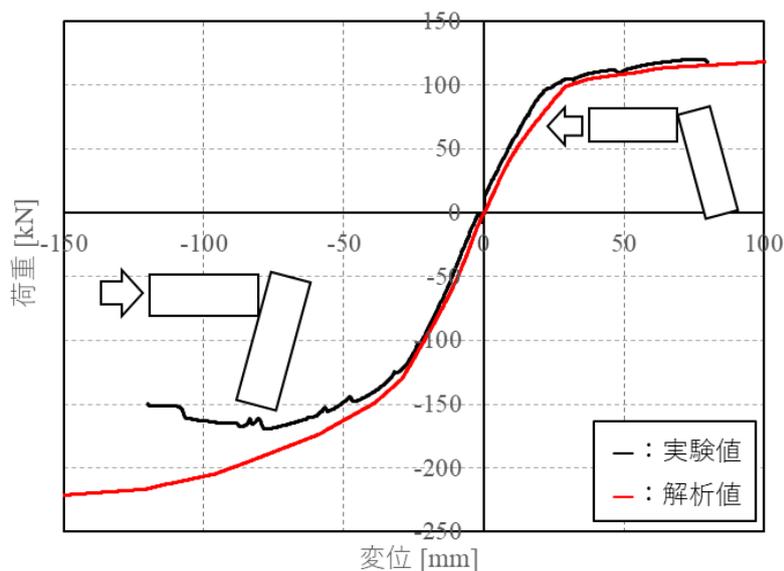


図 4.4.11 荷重－変形角関係

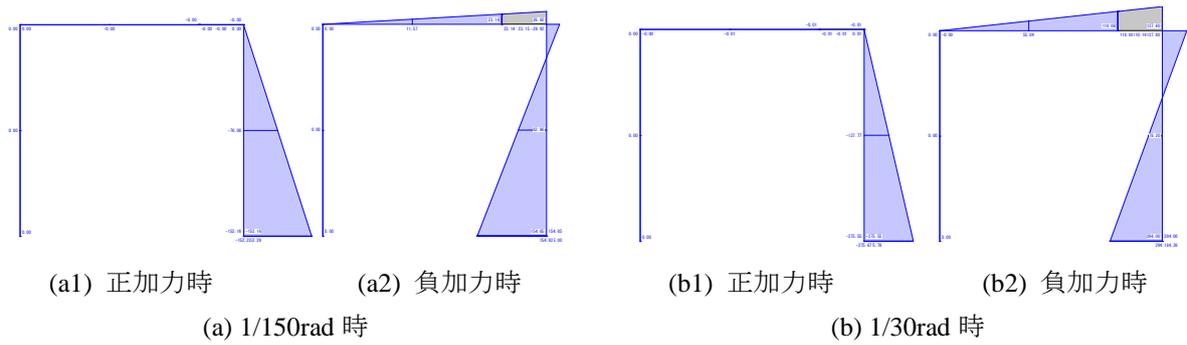


図 4.4.12 モーメント図

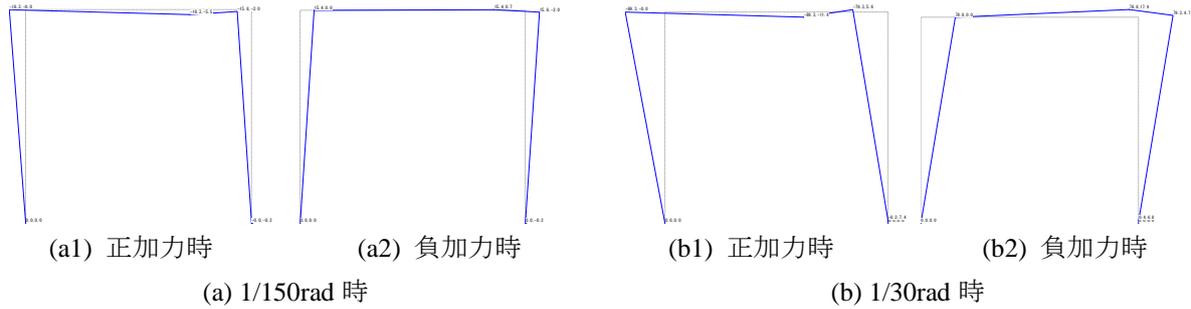


図 4.4.13 変位図

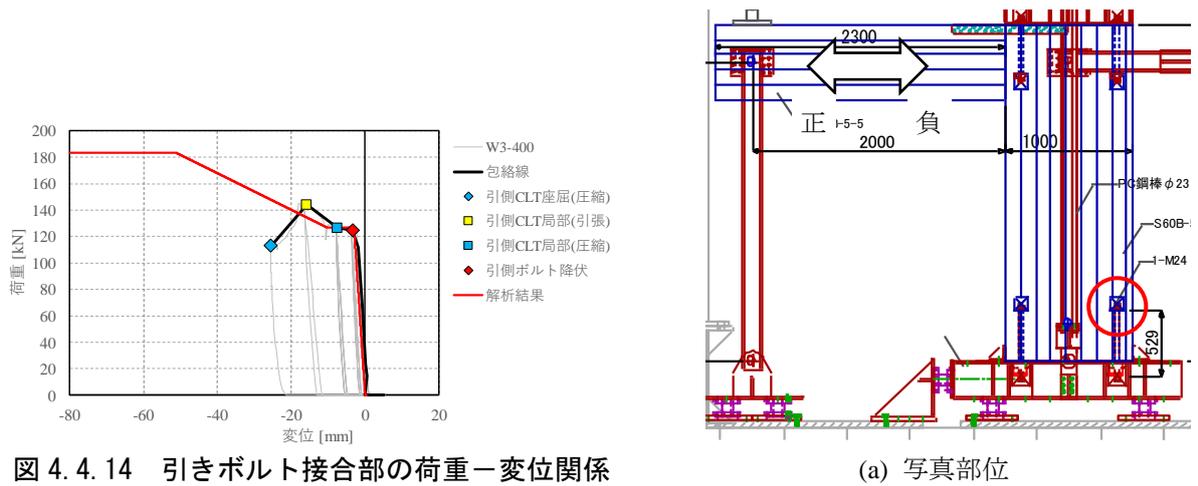


図 4.4.14 引きボルト接合部の荷重-変位関係の比較



(b) 1/50rad 時 (正加力)



(c) 1/30rad 時 (負加力)

図 4.4.15 引きボルト接合部の破壊

4.4.3 MSモデルと従来モデルの計算結果の比較

(1) 目的

図 4.4.16 に示す 2 層 1 スパンモデルを対象に、MS モデルによる荷重増分解析結果と従来モデル（フレームモデル）による解析結果を比較する。

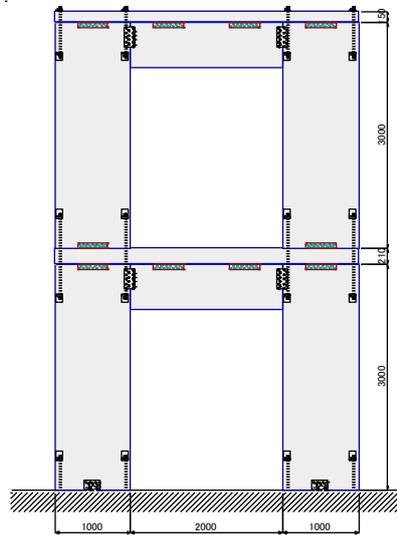


図 4.4.16 検討対象とする架構

(2) 解析モデルの概要

図 4.4.16 に対応する解析モデルを図 4.4.17 に示す。

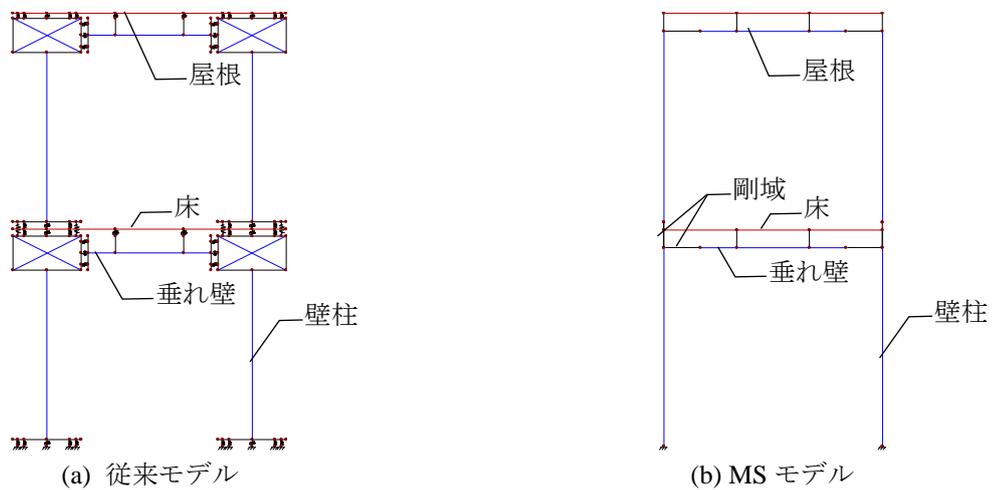


図 4.4.17 解析モデル

検討対象とする架構の仕様及び解析モデルの概要を以下に示す。

- CLT パネル 部 材 壁 S60-5-5、床 Mx60-5-7、屋根 Mx60-5-5
(材料特性値はマニュアルに基づく)
- 断 面 壁柱 1000×150mm、垂れ壁 500×150mm、床 210×1000mm、
屋根 150×1000mm
- 接合部 各部の接合方法は下記の通りとする。

引張バネ	1 階 柱 脚	引きボルト (M16-ABR490, ボルト長さ $l=800$)
	上 階 柱 脚	引きボルト (M20-ABR490, ボルト長さ $l=950$)
	最上階柱頭	引きボルト (M20-ABR490, ボルト長さ $l=550$)
圧縮バネ	1 階 柱 脚	CLT パネルの支圧
	上 階 柱 脚	CLT パネルのめりこみ
	最上階柱頭	CLT パネルのめりこみ
	壁－垂れ壁	CLT パネルのめりこみ
せん断バネ	1 階 柱 脚	鋼板添え板ビス接合 SB-150+STS・65 14 本
	上 階 柱 脚	鋼板添え板ビス接合 2-LST+STS・65 36 本
	上 階 柱 頭	鋼板添え板ビス接合 2-LST+STS・65 36 本
	壁－垂れ壁	鋼板添え板ビス接合 2SP+STS・65 36 本

引張バネ、せん断バネ、圧縮バネの荷重－変位関係はマニュアルに従い、図 4.4.18 のように設定する。

• MS モデルの設定条件

MS モデル 1：断面分割数を最小限 (=2) とし、有効面積を従来モデルに合わせたモデル

MS モデル 2：断面分割数を 20 としたモデル

- 各階の水平力は A_i 分布に基づいて設定する。各階の重量比は最上階で 4kN/m^2 、一般階で 6kN/m^2 とする。
- 長期荷重の影響（抑え込み効果）は考慮しないこととする。

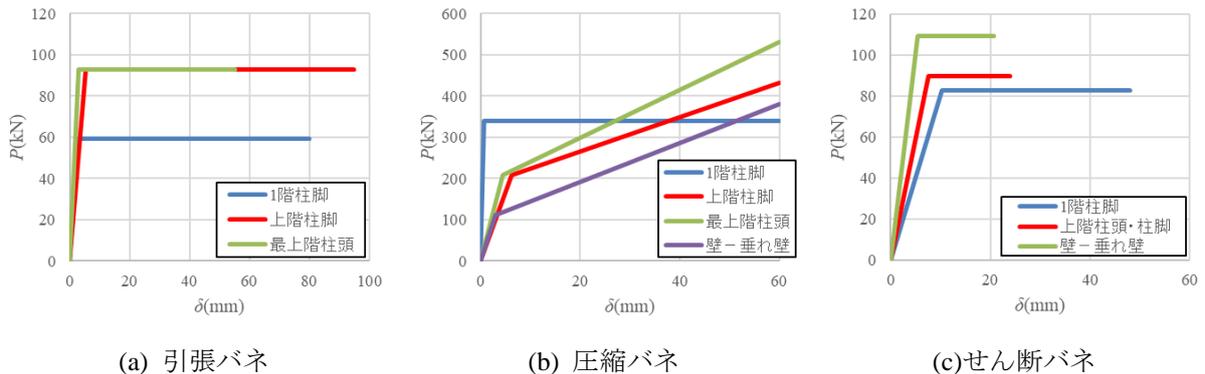
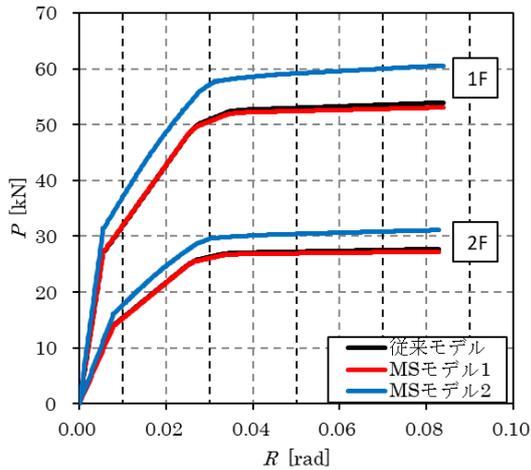


図 4.4.18 接合部性能

(3) 解析結果

各モデルの解析結果を図 4.4.19 に、短期許容時及び 1/30rad 時のモーメント図と変位図をそれぞれ図 4.4.20 と図 4.4.21 に示す。MS モデル 1 の解析結果は従来モデルとほぼ一致しており、MS モデルは機能的に現行フレームモデルを包含しているといえる。MS モデル 2 の解析結果は従来モデルに対して水平耐力が 1~2 割程度大きくなっているが、そちらの方がより実態に近いと考えられる。



従来モデル : 現行フレームモデル

MS モデル 1 : 断面分割数を最小限 (=2) とし、有効面積を従来モデルに合わせたモデル

MS モデル 2 : 断面分割数を上記の適正值 (断面分割数を 20) としたモデル

図 4.4.19 荷重－変形角関係

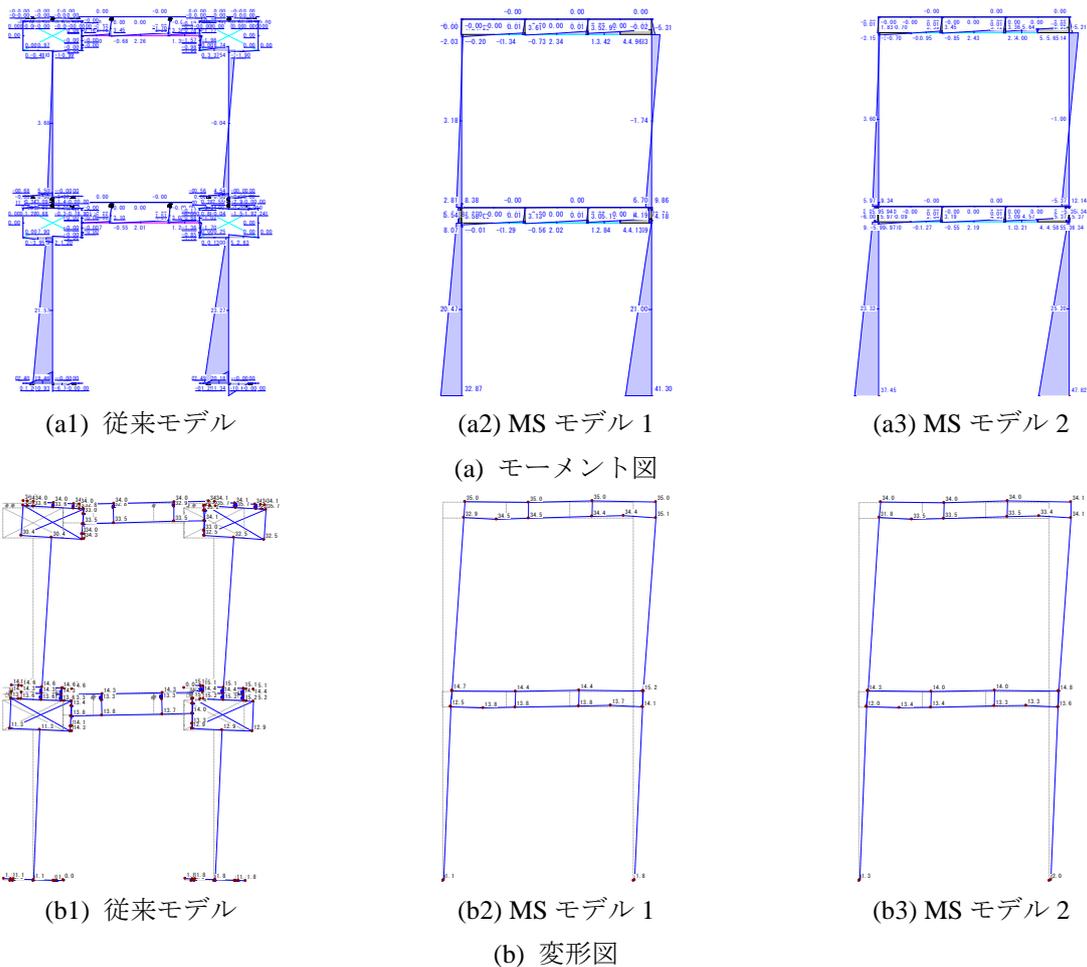
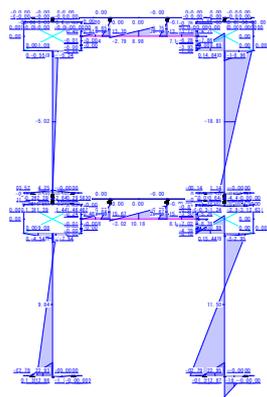
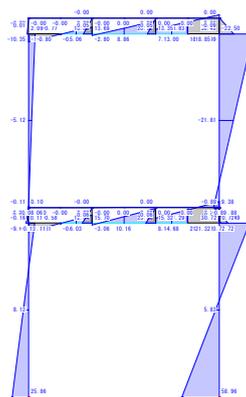


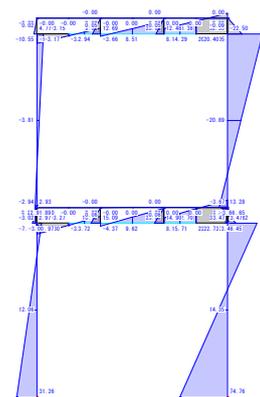
図 4.4.20 短期許容時のモーメント図と変位図



(a1) 従来モデル

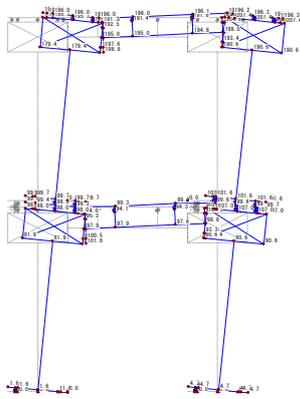


(a2) MSモデル 1

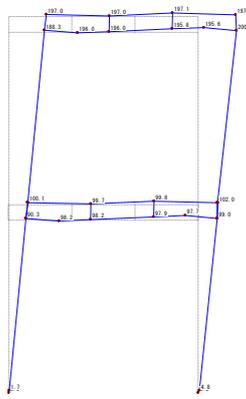


(a3) MSモデル 2

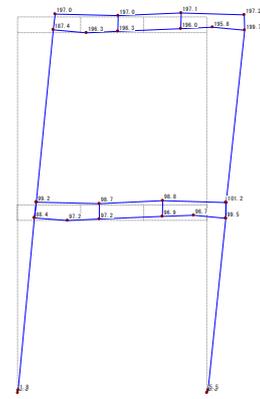
(a) モーメント図



(b1) 従来モデル



(b2) MSモデル 1



(b3) MSモデル 2

(b) 変形図

図 4. 4. 21 1/30rad 時のモーメント図と変位図

4.4.4 原則適用による水平耐力の変化（低下）の度合い

(1) 目的

下記に示す構造モデル簡略化のための原則(2.1節参照)のうち、1)~3)を適用することによる水平耐力低下の度合いを確認する。

- 1) 床版の面外剛性・面外耐力は無視する（0とする）
- 2) 垂れ壁・腰壁と床版の間に鉛直方向圧縮バネは設けない
- 3) 垂れ壁・腰壁と床版の間には壁面内方向のせん断接合を設けない
- 4) 連続壁パネル継ぎ目位置の水平構面上には単一の節点を設ける

検討対象とする架構を図 4.4.22 に示す。同図(a)は上記の原則のうち 1)のみを適用した現行の架構、同図(b)と(c)は上記の原則を適用しない架構である。同図(b)と(c)の違いは、同図(b)が同図(a)の仕様に対して垂れ壁-床間のせん断金物を除くことで上記原則の 3)を満足しているのに対し、同図(c)は当該接合部を袖壁に移設して原則の 3)を満足していることである。

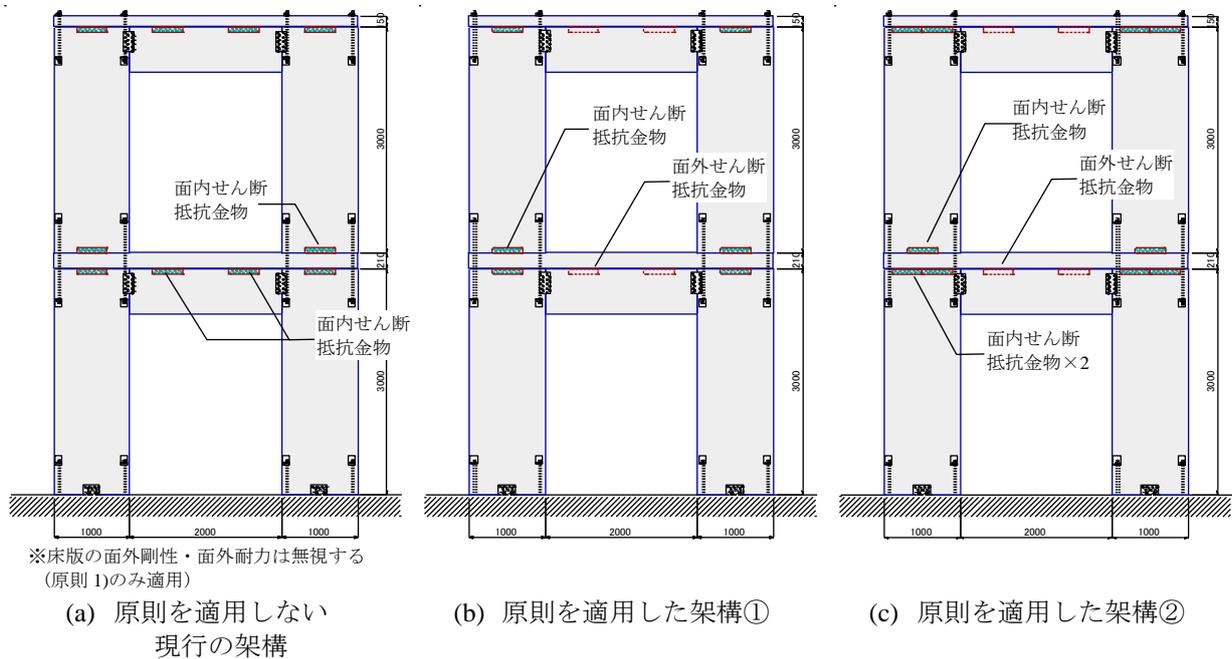


図 4.4.22 検討対象とする架構

(2) 解析モデルの概要

図 4.4.22 に対応する解析モデルを図 4.4.23 に示す。

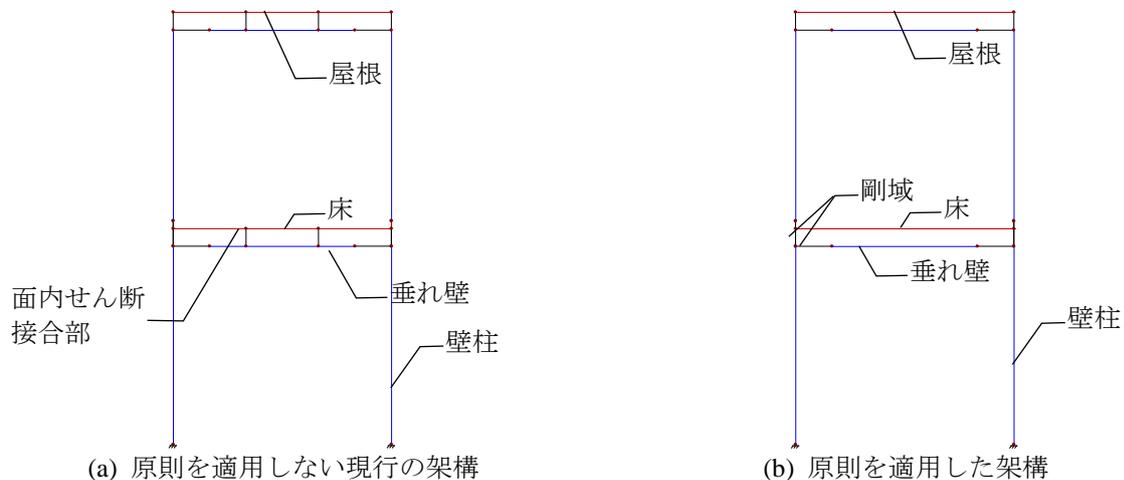


図 4.4.23 解析モデル

検討対象とする架構の仕様及び解析モデルの概要を以下に示す。

・CLTパネル 部 材 壁 S60-5-5、床 Mx60-5-7、屋根 Mx60-5-5
(材料特性値はマニュアルに基づく)

断 面 壁柱 1000×150mm、垂れ壁 500×150mm、床 210×1000mm、
屋根 150×1000mm

・接合部 各部の接合方法は下記の通りとする。

引張バネ 1階柱脚 引きボルト (M16-ABR490,ボルト長さ $l=800$)
上階柱脚 引きボルト (M20-ABR490,ボルト長さ $l=950$)
最上階柱頭 引きボルト (M20-ABR490,ボルト長さ $l=550$)

圧縮バネ 1階柱脚 CLTパネルの支圧
上階柱脚 CLTパネルのめりこみ
最上階柱頭 CLTパネルのめりこみ
壁-垂れ壁 CLTパネルのめりこみ

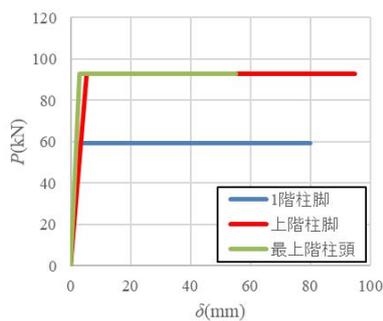
せん断バネ 1階柱脚 鋼板添え板ビス接合 SB-150+STS・65 14本
上階柱脚 鋼板添え板ビス接合 2-LST+STS・65 36本
上階柱頭 鋼板添え板ビス接合 2-LST+STS・65 36本
壁-垂れ壁 鋼板添え板ビス接合 2SP+STS・65 36本

引張バネ、せん断バネ、圧縮バネの荷重-変位関係はマニュアルに従い、図 4.4.24 のように設定する。

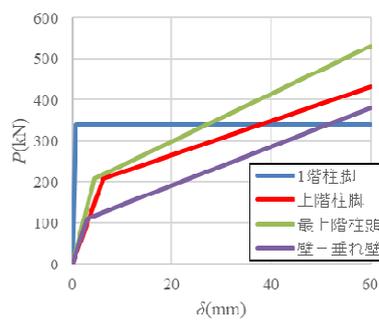
・MSモデル要素の断面分割数は20とする。

・各階の水平力は A_i 分布に基づいて設定する。各階の重量比は最上階で 4kN/m^2 、一般階で 6kN/m^2 とする。

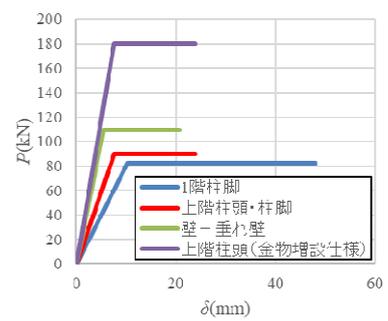
・長期荷重の影響 (抑え込み効果) は考慮しないこととする。



(a) 引張バネ



(b) 圧縮バネ

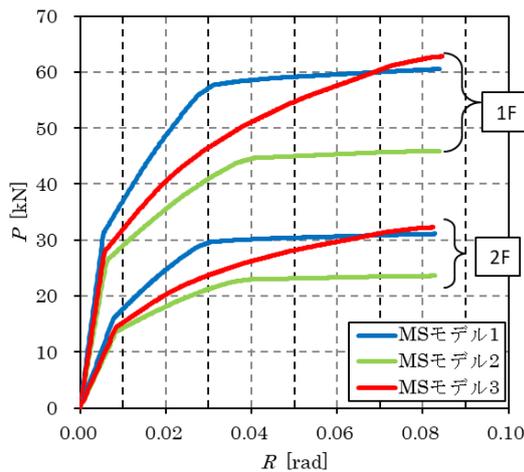


(c)せん断バネ

図 4.4.24 接合部性能

(3) 解析結果

各モデルの解析結果より得られる各階の層せん断力-変形角関係を図 4.4.25 に、短期許容時及び 1/30rad 時のモーメント図と変位図をそれぞれ図 4.4.26 と図 4.4.27 に示す。MS モデル 1 と MS モデル 2 を比較、即ち構造モデル簡略化の原則を適用することにより、2 割程度耐力が低下することが図 4.4.25 より分かる。MS モデル 3 についても、MS モデル 1 と比較して、1/30rad 程度では 2 割程度荷重が低い、1/15rad 以降も耐力の上昇が見られる。これは、MS モデル 1 及び MS モデル 2 では 1 階脚部が先行降伏したのち、柱頭金物のせん断降伏により耐力の上昇がなくなるのに対し、柱頭一床間のせん断接合部を増設した MS モデル 3 では、1 階脚部が先行降伏したのちに壁-垂れ壁間のめり込み降伏が生じ、2 次剛性による耐力上昇が生じるためである。



※MS モデル 1：「原則」を適用しない現行の架構
 MS モデル 2：「原則」を適用した架構
 MS モデル 3：「原則」を適用した架構で柱頭一床間のせん断金物を増設した仕様

図 4.4.25 各階の層せん断力-変形角関係

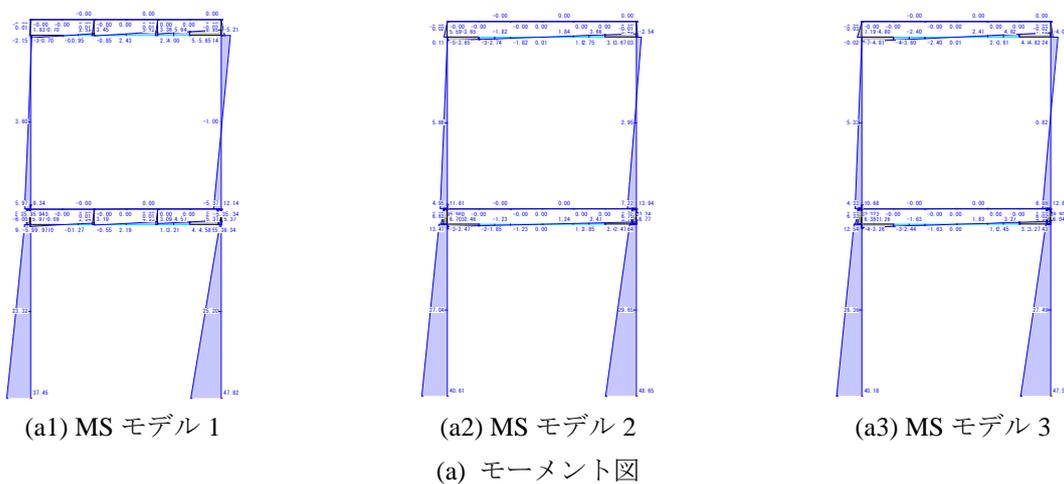
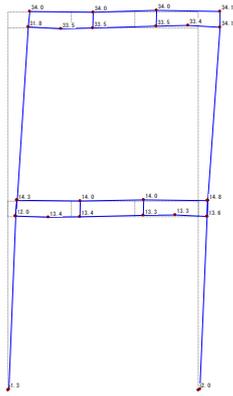
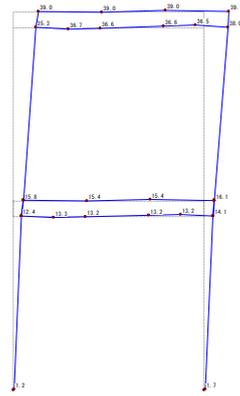


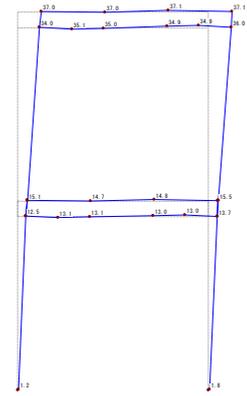
図 4.4.26 短期許容時のモーメント図と変位図



(b1) MS モデル 1



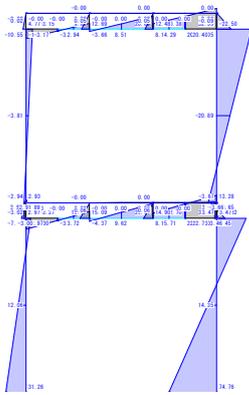
(b2) MS モデル 2



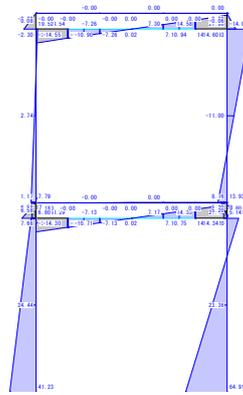
(b3) MS モデル 3

(b) 変形図

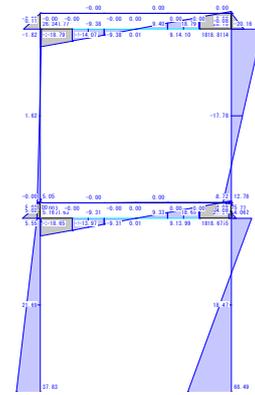
図 4. 4. 26 続 短期許容時のモーメント図と変位図



(a1) MS モデル 1

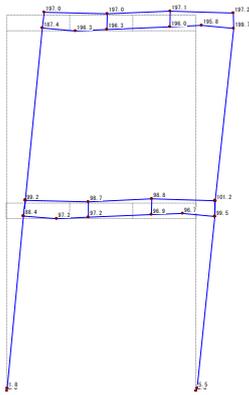


(a2) MS モデル 2

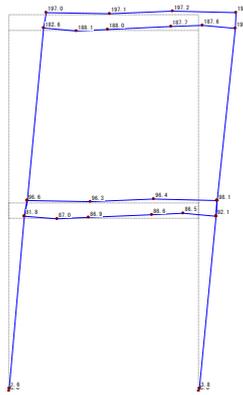


(a3) MS モデル 3

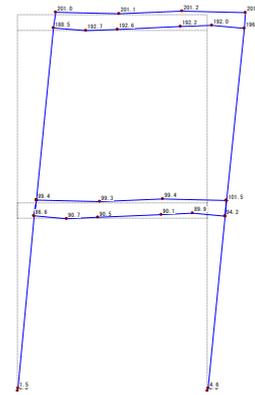
(a) モーメント図



(b3) MS モデル 2



(b2) MS モデル 2



(b3) MS モデル 3

(b) 変形図

図 4. 4. 27 1/30rad 時のモーメント図と変位図

4.4.5 まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- ・ L型構面定軸力水平加力試験により MS 要素を用いた解析モデルの妥当性を検証した。高軸力（400kN）と正負交番繰り返し载荷による引きボルト用開口部の亀裂が生じるまでは、解析モデルと実験結果は比較的よく適合している。
- ・ 従来モデルと断面分割を等価となるように設定した MS モデル 1 の解析結果は従来モデルとほぼ完全に一致しており、MS モデルは機能的に現行フレームモデルを包含しているといえる。MS モデル 2 の解析結果は従来モデルに対して水平耐力が 1～2 割程度大きくなっているが、そちらの方がより実態に近いと考えられる。
- ・ 2.1 節で述べた原則を適用したモデルと原則を適用しないモデルを比較すると、解析結果の水平耐力が 1～2 割程度小さくなることが確認された。

