

## 第4章 高耐力壁と接合金物を組み合わせた 解析モデル

#### 4.1 はじめに

本節では、高耐力壁（高倍率、高階高耐力壁）について弾塑性モデルによる増分解析により評価する方法を提案する。モデル構築方法は昨年度構築したものを改良し、本年度タイロッド式耐力壁試験を実施した 3 仕様（No27, 28, 29）について、柱頭柱脚に金物を配した場合の耐力壁特性の推定を行う。

また参考として、木造軸組工法中大規模木造建築物の構造設計の手引き（公益財団法人 日本住宅・木材技術センター、講習会テキスト、令和 2 年に講習会開催）に示されるロックンク変形を考慮した耐力壁の面内せん断剛性を求める手法より剛性を求め、柱頭柱脚に金物を配置した場合の耐力の推定を行う。

## 4.2 提案する解析モデルの考え方について

### 4.2.1 解析モデルの概要

モデル化の方針を以下に示す。

- ・解析は正側方向（図左方向）について行うこととし、それに合わせて各要素を配置する。
- ・柱脚金物部は、柱脚金物試験結果（昨年度実施）から設定した引張ばねを配置する。
- ・柱頭のホールダウン金物（+めり込み補強金物）部には、材長を考慮した 2-M16 の軸ばねを配置する。
- ・壁面材は要素試験結果（面材の面内せん断試験）より、ブレース要素として配置する。
- ・面材釘や受け材ビスはせん断ばねとして配置する。たて方向の接合具（柱等）はたて方向の力にのみ抵抗し、よこ方向の接合具（桁等）はよこ方向の力のみ抵抗すると仮定する。
- ・面材の釘、受け材のビスのせん断特性は、2.4 節の一面せん断試験結果から設定する。1 本当たりの特性に、各方向（鉛直、水平）の本数を乗じた特性をせん断ばねとして配置する。
- ・図 4.2-1 のように、受け材を介して納まる部分は、各要素を直列ばねとしてモデル化する。
- ・柱頭柱脚の横架材へのめり込みは、壁実験においてめり込み補強金物によりほぼ生じないことを確認したため、圧縮ばねは剛とする。

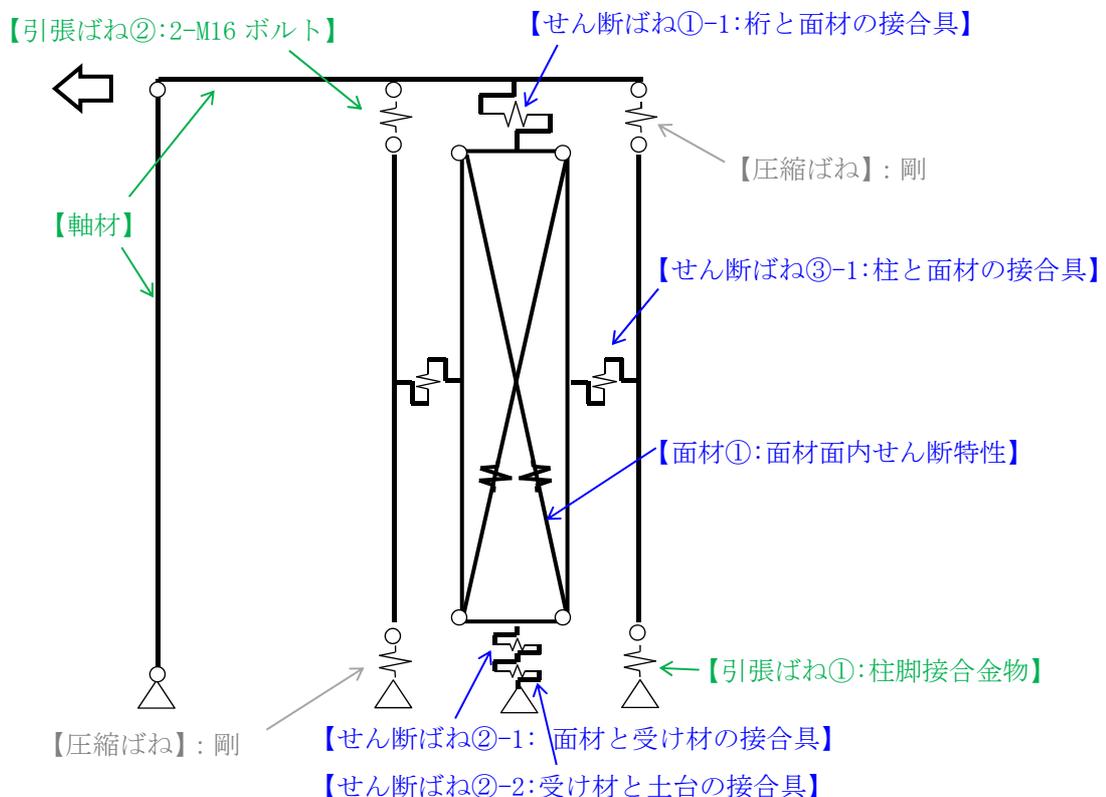


図 4.2-1 大壁仕様の解析モデル概要

表 4.2-1 解析モデルの構成要素

	No27	No28	No29	
せん断ばね ①-1	桁-面材 CNZ65@100mm 2列千鳥	桁-面材 CNZ65@100mm 2列千鳥	桁-面材 CNZ65@100mm 2列千鳥	要素試験 (一面せん断)
せん断ばね ②-1	面材-受け材 CNZ65@100mm 2列千鳥	面材-受け材 CNZ65@100mm 2列千鳥	面材-受け材 CNZ65@100mm 2列千鳥	要素試験 (一面せん断)
せん断ばね ②-2	受け材-土台 STS6.5F-180 @75mm	受け材-土台 STS6.5F-180 @75mm	受け材-土台 STS6.5F-180 @75mm	要素試験 (一面せん断)
せん断ばね ③-1	柱-面材 CNZ65@100mm 2列千鳥	柱-面材 CNZ65@100mm 2列千鳥	柱-面材 CNZ65@100mm 2列千鳥	要素試験 (一面せん断)
壁面材	構造用合板 全層カラマツ 18mm	構造用合板 全層ヒノキ 18mm	構造用合板 全層カラマツ 18mm	要素試験 (面内せん断)
柱脚 引張ばね①	柱脚金物を引張ばね (柱脚金物 HD-D9)			金物試験
柱頭 引張ばね②	2-M16 ボルトを軸ばね			規格値
軸材(柱、桁)	—			規格値
めり込み	柱頭柱脚の横架材へのめり込み			剛

## 4.3 各要素の特性

### 4.3.1 試験体 No. 27 の各要素の特性

(1) せん断ばね①-1(桁と面材の接合具)、せん断ばね②-1(面材と受け材の接合具)

2.6 節の要素試験(釘、ねじの一面せん断試験)より、試験体 No. 6(構造用合板カラマツ 18mm、ヒノキ集成材、CNZ65)の結果よりせん断ばね①-1を設定する。

せん断ばねは要素試験の平均値をトリリニア化した結果を以下に示す。

接合具：CNZ65

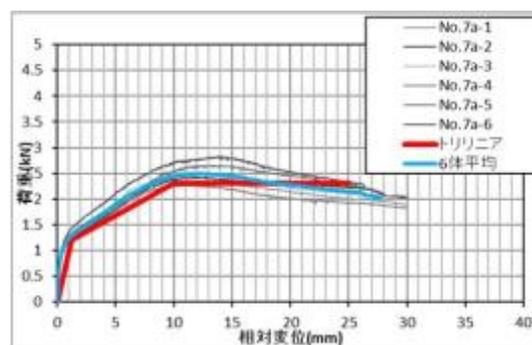
主材：ヒノキ集成材(受け材、桁)

側材：構造用合板カラマツ 18mm(壁面材)

$$f_c = 1.2 \text{ [kN]}, d_c = 1.2 \text{ [mm]}$$

$$f_y = 2.3 \text{ [kN]}, d_y = 10 \text{ [mm]}$$

$$K = 1.0 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.125, \beta = 0$$



<一面せん断試験>

上記特性値を釘本数倍(水平方向に19本×両面=38本)してせん断ばね②-1とする。

$$\begin{aligned} K &= 1.0 \times 38 \\ &= 38.0 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.125, \beta = 0 \end{aligned}$$

(2) せん断ばね③-1(柱と面材の接合具)

特性は(1)せん断ばね①-1に示した釘1本あたりの特性値を釘本数倍(71本×両面=142本)したものとする。

$$\begin{aligned} K &= 1.0 \times 142 \\ &= 142.0 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.125, \beta = 0 \end{aligned}$$

#### 4.3.2 試験体 No. 28 の各要素の特性

(1) せん断ばね①-1(桁と面材の接合具)、せん断ばね②-1(面材と受け材の接合具)

2.6 節の要素試験(釘、ねじの一面せん断試験)より、試験体 No. 6(構造用合板カラマツ 18mm、ヒノキ集成材、CNZ65)の結果よりせん断ばね①-1を設定する。

せん断ばねは要素試験の平均値をトリリニア化した結果を以下に示す。

接合具：CNZ65

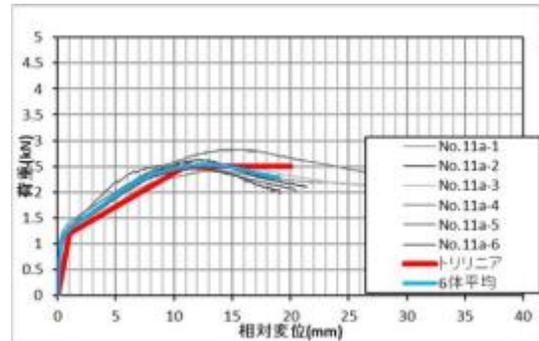
主材：ヒノキ集成材(受け材、桁)

側材：構造用合板ヒノキ 18mm(壁面材)

$$f_c = 1.2 \text{ [kN]}, d_c = 1.0 \text{ [mm]}$$

$$f_y = 2.5 \text{ [kN]}, d_y = 11 \text{ [mm]}$$

$$K = 1.2 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.108, \beta = 0$$



<一面せん断試験>

上記特性値を釘本数倍(水平方向に19本×両面=38本)してせん断ばね②-1とする。

$$K = 1.2 \times 38 \\ = 45.6 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.108, \beta = 0$$

(2) せん断ばね③-1(柱と面材の接合具)

特性は(1)せん断ばね①-1に示した釘1本あたりの特性値を釘本数倍(71本×両面=142本)したものとする。

$$K = 1.2 \times 142 \\ = 170.4 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.108, \beta = 0$$

### 4.3.3 試験体 No. 29 の各要素の特性

(1) せん断ばね①-1(桁と面材の接合具)、せん断ばね②-1(面材と受け材の接合具)

2.6 節の要素試験(釘、ねじの一面せん断試験)より、試験体 No. 6(構造用合板カラマツ 18mm、ヒノキ集成材、CNZ65)の結果よりせん断ばね①-1を設定する。

せん断ばねは要素試験の平均値をトリリニア化した結果を以下に示す。

接合具：CNZ75

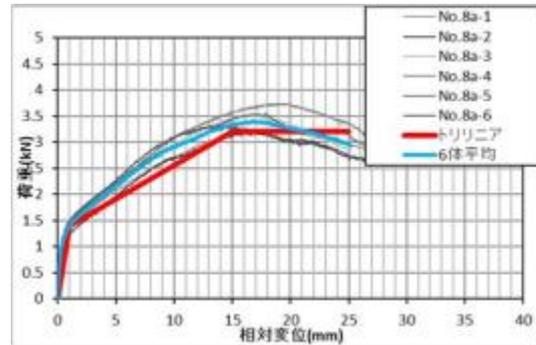
主材：ヒノキ集成材(受け材、桁)

側材：構造用合板カラマツ 18mm(壁面材)

$$f_c = 1.4 \text{ [kN]}, d_c = 1.0 \text{ [mm]}$$

$$f_y = 3.2 \text{ [kN]}, d_y = 15 \text{ [mm]}$$

$$K = 1.4 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.092, \beta = 0$$



<一面せん断試験>

上記特性値を釘本数倍(水平方向に19本×両面=38本)してせん断ばね②-1とする。

$$K = 1.4 \times 38$$

$$= 53.2 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.092, \beta = 0$$

(2) せん断ばね③-1(柱と面材の接合具)

特性は(1)せん断ばね①-1に示した釘1本あたりの特性値を釘本数倍(71本×両面=142本)したものとする。

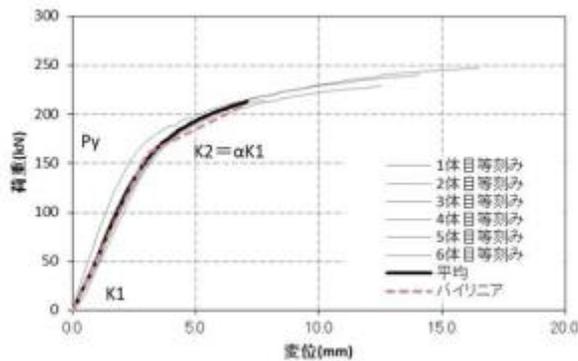
$$K = 1.4 \times 142$$

$$= 198.8 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.092, \beta = 0$$

#### 4.3.4 全試験体共通の要素の特性

##### (1) 引張ばね①(柱脚金物)

引張ばね①の特性は、一昨年度実施した柱脚接合金物試験より「HD-D9」の試験結果に基づいて設定した。試験体 6 体の荷重変形関係を平均して、その平均の荷重変形関係に合うような骨格曲線を引張ばねとして設定した。



$$P_y = 160 \text{ [kN]}$$

$$K_1 = P_y / \delta y = 160 / 3 = 53.3 \text{ [kN/mm]}$$

$$K_2 = (210 - 160) / (7 - 3) = 12.5 \text{ [kN/mm]}$$

$$= 0.23 \times K_1$$

図 4.3-1 引張ばね①の設定 (柱脚金物 HD-D9)

##### (2) 引張ばね②(柱頭ボルト)

引張ばね②の特性は、壁試験の柱頭側の M16 のボルト (2 本) を軸ばねとしてモデル化した。

$$E = 2.05 \times 10^5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$A = 166 \times 2 = 332 \text{ [mm}^2\text{]} \text{ (2-M16)}$$

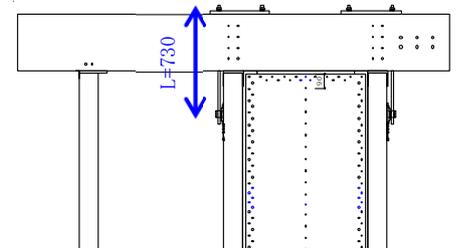
$$L = 730 \text{ [mm]}$$

$$N/A = E \cdot \Delta L / L$$

$$N = 2.05 \times 10^5 \times 332 \times \Delta L / 730$$

$$K = N / \Delta L = 93232 \text{ [N/mm]}$$

$$= 93.2 \text{ [kN/mm]}$$



### (3) せん断ばね②-2(受け材と土台の接合具)

前年度実施した要素試験（前年度 No. 1）の結果よりせん断ばね②-2 を設定する。

せん断ばねは要素試験の平均値をトリリニア化した結果を以下に示す。

接合具：STS6.5F-180mm

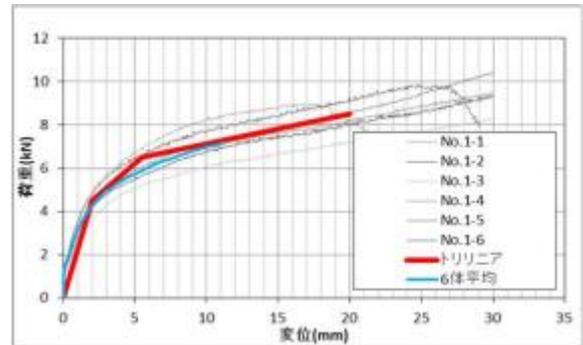
主材：ヒノキ集成材（受け材）

側材：ヒノキ集成材（柱）

$$f_c=4.5[\text{kN}], d_c=2[\text{mm}]$$

$$f_y=6.5[\text{kN}], d_y=5.5[\text{mm}]$$

$$K=2.25[\text{kN/mm}], \alpha=0.254, \beta=0.113$$



<一面せん断試験 No. 1>

上記特性値をビス本数倍（水平方向に 11 本）してせん断ばね②-1 とする。

$$K=2.25 \times 11$$

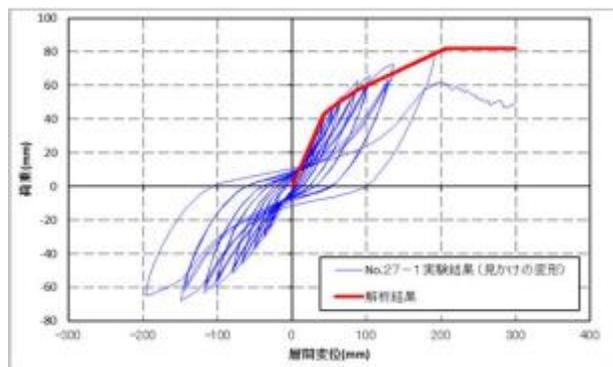
$$=24.75[\text{kN/mm}], \alpha=0.254, \beta=0.113$$

## 4.4 解析結果

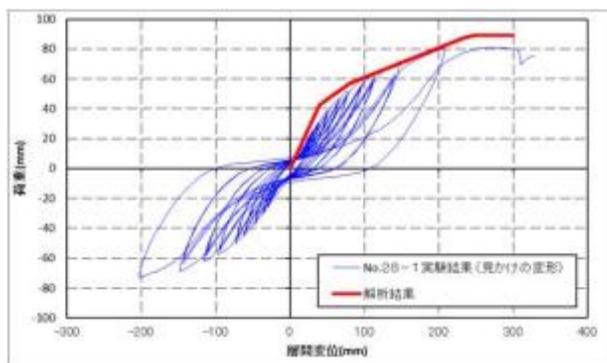
### 4.4.1 実験結果との比較

#### (1) 荷重変形関係

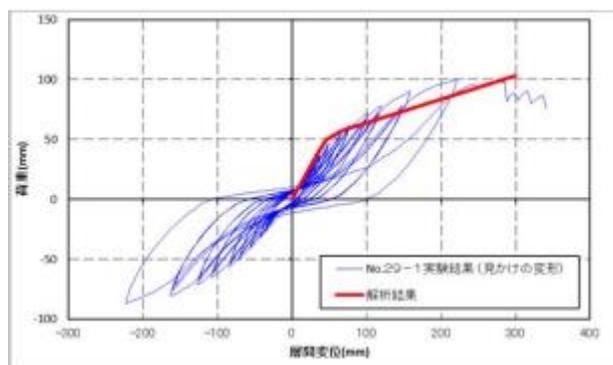
各耐力壁の解析結果と実験結果（見かけの変形）の比較を図 4.4-1 に示す。前項に示した要素の特性からなる解析結果は、耐力壁試験の荷重変形関係と同程度の履歴を描くことが分かった。



<No. 27>



<No. 28>



<No. 29>

図 4.4-1 実験結果と解析結果の比較（荷重変形関係）

#### 4.4.2 解析結果の短期基準せん断耐力の試算

前項の解析により得られた荷重変形関係から短期基準せん断耐力の試算を行った結果を表 4.4 1 図 4.4 3 に示す。柱頭・柱脚に金物を配置した場合の耐力は 27~30kN/m (14~15 倍) 程度となることが確認された。

表 4.4-1 特性値

	No.27	No.28	No.29
降伏荷重 $P_y$ [kN]	44.0	46.9	51.4
降伏変位 $\theta_y$ [rad. $\times 10^{-3}$ ]	12.27	13.97	13.68
最大荷重 $P_{max}$ [kN]	82.0	88.8	92.5
最大荷重時変位 $\theta(P_{max})$ [rad. $\times 10^{-3}$ ]	55.95	66.67	66.67
$2/3P_{max}$ [kN]	54.6	59.2	61.7
$2/3P_{max}$ 時変位 $\theta(2/3P_{max})$ [rad. $\times 10^{-3}$ ]	21.32	24.67	24.11
終局荷重 $P_u$ [kN]	70.0	73.1	75.1
終局変位 $\theta_u$ [rad. $\times 10^{-3}$ ]	66.7	66.7	66.7
初期剛性 $K$ [kN/rad. $\times 10^{-3}$ ]	3.58	3.36	3.76
仮想降伏点変位 $\theta_v$ [rad. $\times 10^{-3}$ ]	19.5	21.8	20.0
塑性率 $\mu$	3.4	3.1	3.3
構造特性係数 $D_s$	0.41	0.44	0.42
$0.1P_{max}$ [kN]	8.2	8.9	9.2
$0.1P_{max}$ 時変位 [rad. $\times 10^{-3}$ ]	2.19	2.23	2.25
$0.4P_{max}$ [kN]	32.8	35.5	37.0
$0.4P_{max}$ 時変位 [rad. $\times 10^{-3}$ ]	8.77	8.93	9.00
$0.9P_{max}$ [kN]	73.8	80.0	83.2
$0.9P_{max}$ 時変位 [rad. $\times 10^{-3}$ ]	45.30	53.12	53.90
$0.2P_u/D_s$ [kN]	33.8	33.1	35.8
$P(1/120rad)$ [kN]	24.9	26.5	27.4
短期基準せん断耐力 [kN]	24.9	26.5	27.4
壁長さ1mあたり [kN/m]	27.4	29.1	30.1
相当壁倍率	14.0	14.9	15.4

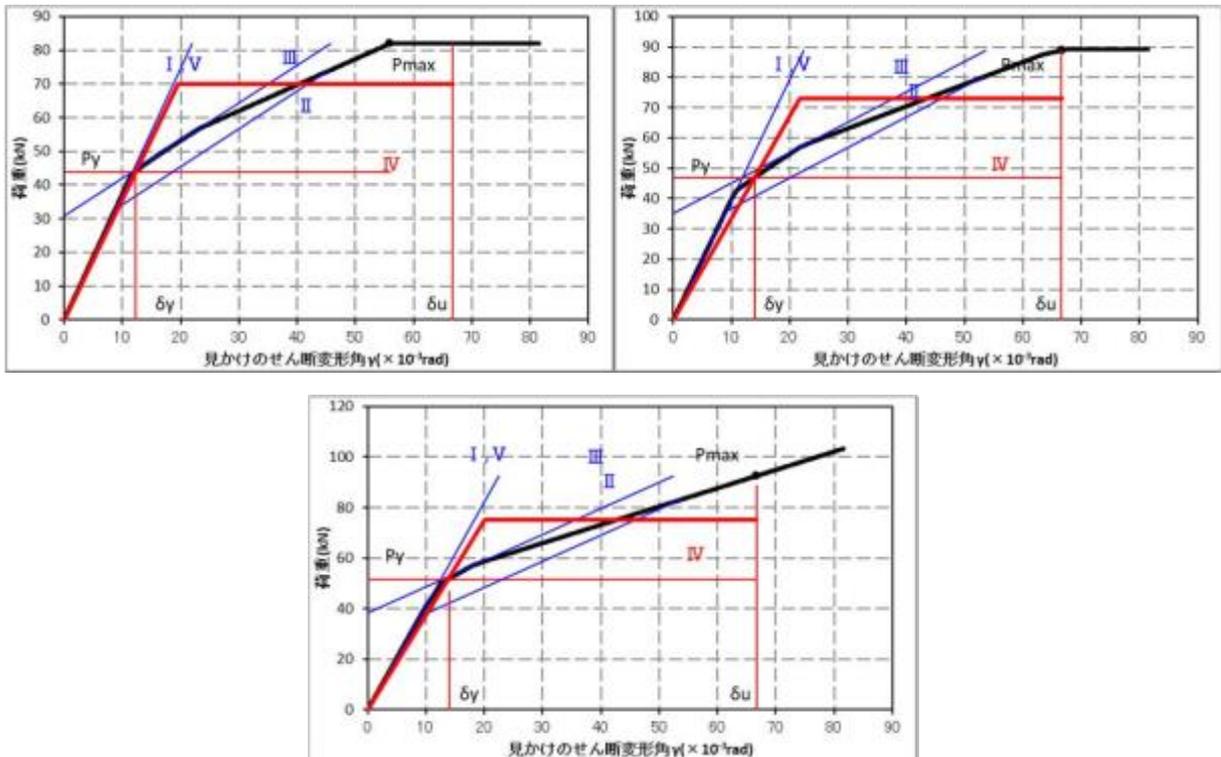


図 4.4-2 解析結果及び完全弾塑性モデル

### 4.4.3 各要素の変形状態

各モデルの増分解析結果の降伏点をそれぞれ降伏点①, ②とし、その降伏点における各要素の応力状況を確認し、耐力壁特性への寄与度を整理する。

増分解析結果における各要素の変形状態を図 4.4-3 に示す。耐力壁の構造特性（剛性）に対して、受け材のビスや面材の釘の特性の影響が大きいことがわかった。特に、たて方向に留付けられる面材釘の寄与度が大きく、壁の降伏点＝面材釘の降伏点となることがわかった。

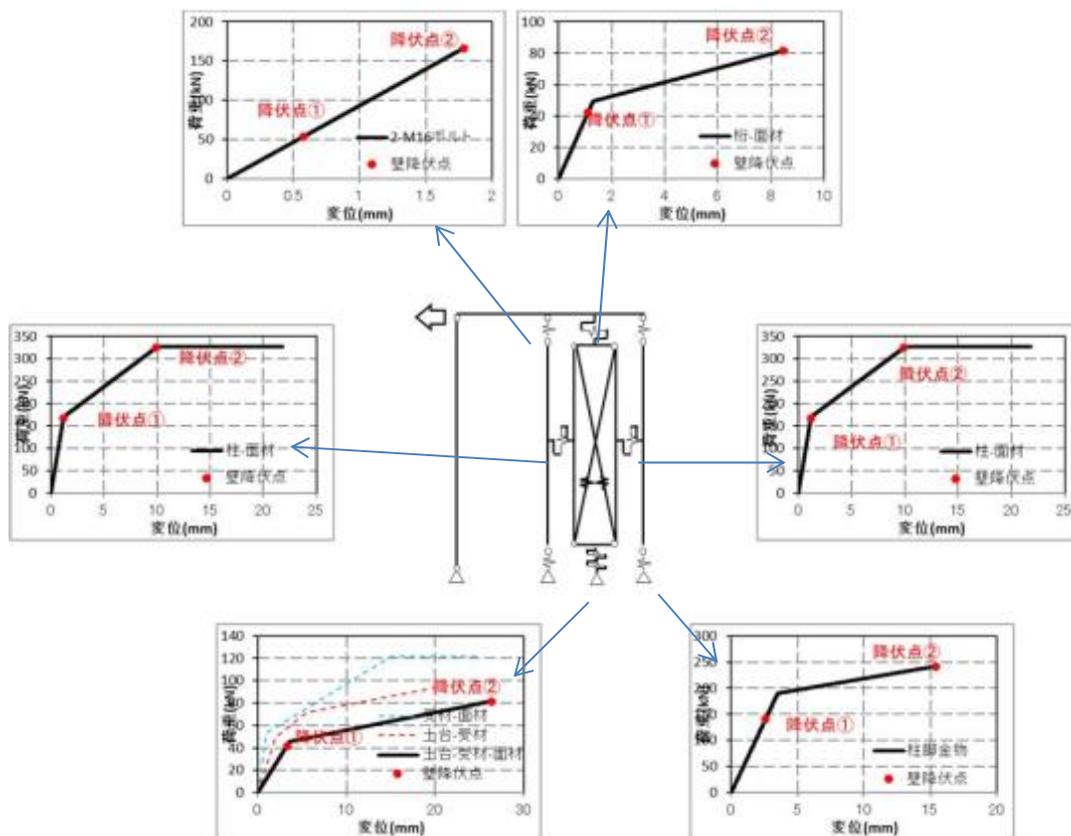


図 4.4-3 各要素の変形状態 (No. 27)

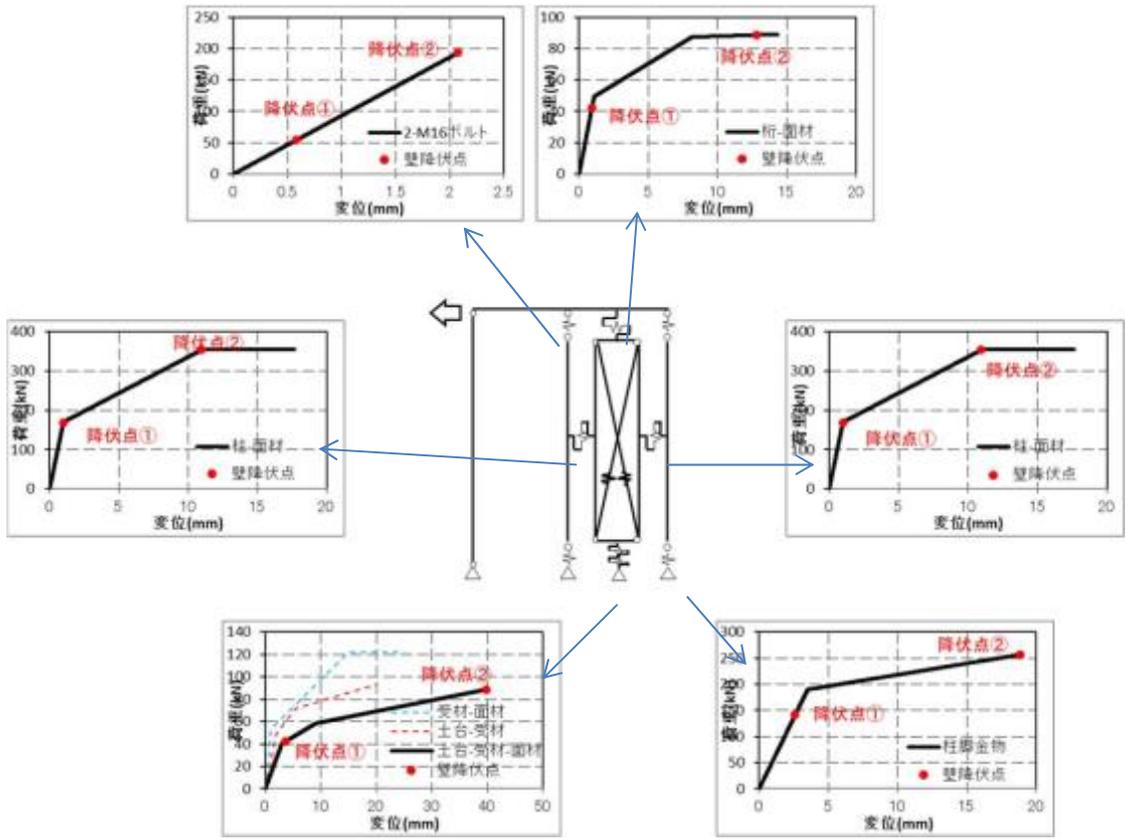


図 4.4-4 各要素の変形状態 (No. 28)

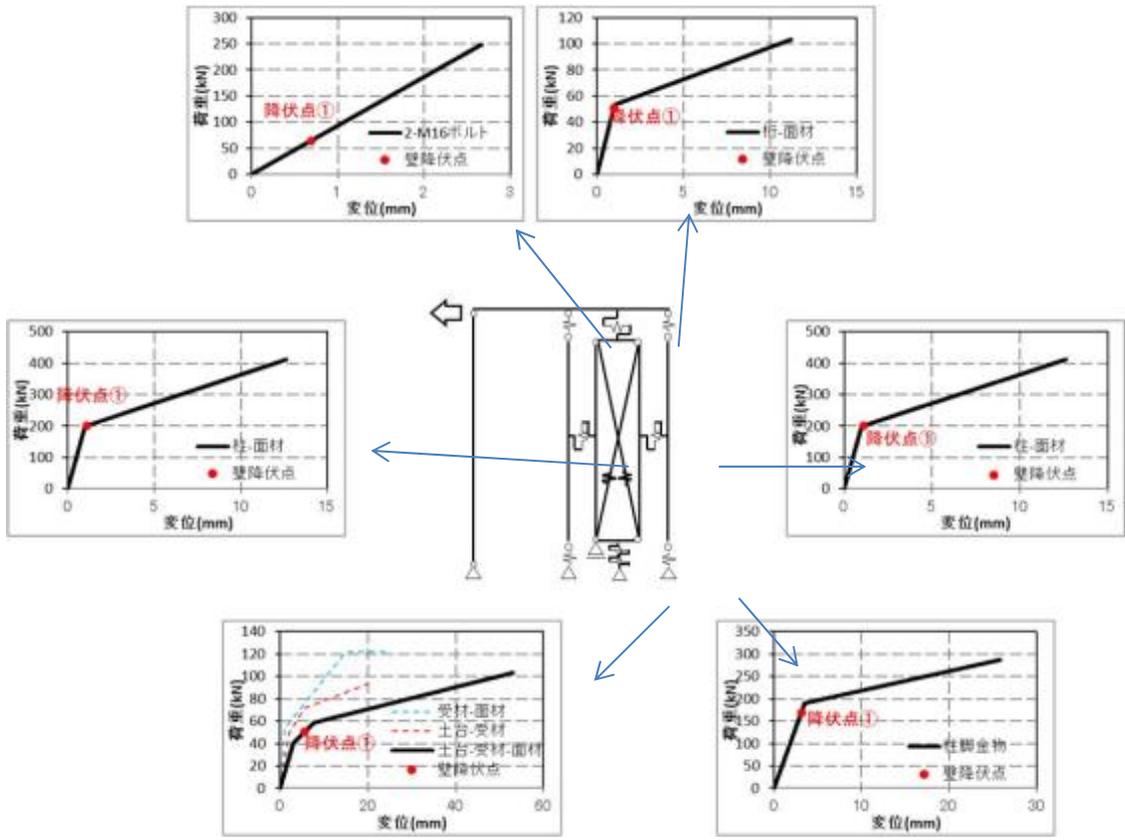


図 4.4-5 各要素の変形状態 (No. 29)

#### 4.5 (参考) ロッキング変形を考慮した耐力壁特性に関する検討

木造軸組工法中大規模木造建築物の構造設計の手引き（公益財団法人 日本住宅・木材技術センター、講習会テキスト、令和 2 年開催の講習会）に示されるロッキング変形を考慮した耐力壁の面内せん断剛性を求める手法より剛性を求め、柱頭・柱脚に金物を配置した場合の耐力の推定を行う。

##### 算定方法

ロッキング変形を考慮した耐力壁の面内せん断剛性は手引きに示される下記算定式により求める。柱脚の圧縮、引張剛性  $k_c$ 、 $k_r$  はテキストに示される値を参考にする。

ロッキング変形を考慮した耐力壁 1 か所あたりの面内せん断剛性：

$$K[\text{kN/m}] = \left( \frac{K_W \cdot K_L}{K_W + K_L} \right) / H^2$$

耐力壁の回転剛性：

$$K_W[\text{kN} \cdot \text{m/rad.}] = K_0[\text{kN/rad.}] \times H[\text{m}]$$

H：横架材天端間距離

$K_0$ ：耐力壁の面内せん断剛性（実験の真のせん断変形角評価、完全弾塑性モデルに置換した結果の初期剛性）

$$K_L[\text{kN} \cdot \text{m/rad.}] = \frac{1000 \cdot L_c^2}{1/k_t + 1/k_c}$$

$L_c$ ：耐力壁の幅[m]

$k_c$ ：柱の基礎への圧縮剛性 100kN/mm

$k_r$ ：1 階柱脚の引張剛性 60kN/mm

ロッキングを考慮した剛性  $K$  時の耐力  $P_0'$  は実験  $P_0$  の変形角  $r$  相当の変形時と仮定し、下式により求める。

$$P_0'[\text{kN}] = K \times H \times r$$

##### 算定結果

ロッキングを考慮した剛性  $K$  時の耐力  $P_0'$  を算出した結果を表 4.5-1 に示す。また、各試験体の計算結果は表 4.5-2～4 に示す。

表 4.5-1 耐力算出結果

No.	$P_0'$
No. 27	21.8kN (11.1 倍)
No. 28	23.1kN (11.8 倍)
No. 29	24.6kN (12.6 倍)

表 4.5-2 試験体 No. 27 の計算結果

引張金物の剛性	kt=	60	[kN/mm]	
圧縮剛性	kc=	100	[kN/mm]	
壁長さ	Lc=	1.00	[m]	
耐力壁のロッキング剛性	KL=	37500	[kN・m/rad]	$= \frac{1000 \cdot L_c^2}{1/k_t + 1/k_c}$
壁高さ	H=	3.8	[m]	
実験結果の層間変形角を真のせん断変形角で評価し、完全弾塑性モデルに置換した結果の初期剛性	K0=	10500	[kN/rad]	実験結果(3体の平均)
壁の許容耐力	P0=	45.0	[kN]	実験結果(短期基準せん断耐力)
		23.0	[倍]	
	1/r=	233	[1/rad]	Pa時の変形角
耐力壁の回転剛性	Kw=	39900	[kN・m/rad]	$= K_0 \times H$
ロッキングを考慮した耐力壁1か所あたりの面内せん断剛性	K=	1338.7	[kN/m]	$= \left[ \frac{K_w \cdot K_L}{K_w + K_L} \right] / H^2 \times$ 剛性低減係数 $C_k$
剛性Kの耐力 短期基準せん断耐力	P0'	21.8	[kN]	P0'=K×H×r (実験P0の変形角時相当)
		11.1	[倍]	
剛性Kの耐力 短期許容せん断耐力	Pa'	19.6	[kN]	Pa'=P0'×低減係数α(α=0.90と仮定)
		10.0	[倍]	

表 4.5-3 試験体 No. 28 の計算結果

引張金物の剛性	kt=	60	[kN/mm]	
圧縮剛性	kc=	100	[kN/mm]	
壁長さ	Lc=	1.00	[m]	
耐力壁のロッキング剛性	KL=	37500	[kN・m/rad]	$= \frac{1000 \cdot L_c^2}{1/k_t + 1/k_c}$
壁高さ	H=	3.8	[m]	
実験結果の層間変形角を真のせん断変形角で評価し、完全弾塑性モデルに置換した結果の初期剛性	K0=	9300	[kN/rad]	実験結果(3体の平均)
壁の許容耐力	P0=	44.9	[kN]	実験結果(短期基準せん断耐力)
		22.9	[倍]	
	1/r=	207	[1/rad]	Pa時の変形角
耐力壁の回転剛性	Kw=	35340	[kN・m/rad]	$= K_0 \times H$
ロッキングを考慮した耐力壁1か所あたりの面内せん断剛性	K=	1260	[kN/m]	$= \left[ \frac{K_w \cdot K_L}{K_w + K_L} \right] / H^2 \times$ 剛性低減係数 $C_k$
剛性Kの耐力	P0'	23.1	[kN]	P0'=K×H×r (実験P0の変形角時相当)
		11.8	[倍]	
剛性Kの耐力 短期許容せん断耐力	Pa'	20.8	[kN]	Pa'=P0'×低減係数α(α=0.90と仮定)
		10.5	[倍]	

表 4.5-4 試験体 No. 29 の計算結果

引張金物の剛性	kt=	60	[kN/mm]	
圧縮剛性	kc=	100	[kN/mm]	
壁長さ	Lc=	1.00	[m]	
耐力壁のロッキング剛性	KL=	37500	[kN・m/rad]	$= \frac{1000 \cdot L_c^2}{1/k_t + 1/k_c}$
壁高さ	H=	3.8	[m]	
実験結果の層間変形角を真のせん断変形角で評価し、完全弾塑性モデルに置換した結果の初期剛性	K0=	11300	[kN/rad]	実験結果(3体の平均)
壁の許容耐力	P0=	52.8	[kN]	実験結果(短期基準せん断耐力)
		26.9	[倍]	
	1/r=	214	[1/rad]	Pa時の変形角
耐力壁の回転剛性	Kw=	42940	[kN・m/rad]	$= K_0 \times H$
ロッキングを考慮した耐力壁1か所あたりの面内せん断剛性	K=	1386.3	[kN/m]	$= \left[ \frac{K_w \cdot K_L}{K_w + K_L} \right] / H^2 \times$ 剛性低減係数 $C_k$
剛性Kの耐力	P0'	24.6	[kN]	P0'=K × H × r (実験P0の変形角時相当)
		12.6	[倍]	
剛性Kの耐力 短期許容せん断耐力	Pa'	22.2	[kN]	Pa'=P0'×低減係数α(α=0.90と仮定)
		11.3	[倍]	

#### 4.6 まとめ

- ・タイロッド式耐力壁試験で性能を確認した 3 仕様について、柱頭柱脚金物を配置した場合の耐力壁特性を確認した。
- ・タイロッド式試験を行った耐力壁仕様に柱頭柱脚金物を配置した場合の耐力壁特性は、耐力は 27~30kN/m（壁倍率 14~15 倍）程度、剛性は 3.4~3.8[10<sup>3</sup>kN/rad]となり、試験の真のせん断変形角評価に比べ耐力、剛性ともに 50%程度低下することが確認された。
- ・荷重変形関係はおおむね実験の見かけの変形角評価と一致することが確認された。
- ・解析結果とロッキングを考慮した特性は、剛性はロッキングを考慮した特性、耐力は解析結果が高くなる結果であった。

表 4.6-1 実験結果（真のせん断変形角評価）との性能比較

	真のせん断変形角評価		解析結果	
	耐力[kN]	剛性[10 <sup>3</sup> kN/rad]	耐力[kN]	剛性[10 <sup>3</sup> kN/rad]
No. 27	45.0	10.5	24.9	3.6
No. 28	44.9	9.3	26.5	3.4
No. 29	52.8	11.3	27.4	3.8

表 4.6-2 ロッキングを考慮した特性との性能比較

	ロッキングを考慮した特性		解析結果	
	耐力[kN]	剛性[10 <sup>3</sup> kN/rad] <sup>※</sup>	耐力[kN]	剛性[10 <sup>3</sup> kN/rad]
No. 27	21.8	4.9	24.9	3.6
No. 28	23.1	4.9	26.5	3.4
No. 29	24.6	5.3	27.4	3.8

※単位を揃えるため、 $K' = K \times H$  とする