

第4章 高倍率、高階高耐力壁と接合金物を組み合わせた 解析モデル

4. 高倍率、高階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。要素実験、金物接合部実験、材料の規格値などから各要素（線材及びばね要素）の特性を設定し解析モデルを構築する。解析結果と柱脚固定式耐力壁試験 No. 19（MDF 片面大壁）、No. 20（合板 24mm 片面真壁）の実験結果を比較してモデルの妥当性を検証する。

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。
- ・壁面材は壁実験結果（面材対角変位）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、図 4.2-2 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。

表 4.2-1 解析モデルの構成要素

	MDF 片面大壁 (No. 19)	合板 24mm 片面真壁 (No. 20)
せん断ばね①-1	桁と面材の接合具→要素試験 (CNZ65@100mm 2列千鳥)	—
せん断ばね①-2	—	桁と受け材の接合具→要素試験 (STS6.5F-180@75mm)
せん断ばね①-3	—	受け材と面材の接合具→要素試験 (CNZ75@75mm 2列千鳥)
せん断ばね②-1	面材と受け材の接合具→要素試験 (CNZ65@100mm 2列千鳥)	面材と受け材の接合具→要素試験 (CNZ75@75mm 2列千鳥)
せん断ばね②-2	受け材と土台の接合具→要素試験 (STS6.5F-180@75mm)	受け材と土台の接合具→要素試験 (STS6.5F-180@75mm)
せん断ばね③-1	柱と面材の接合具→要素試験 (CNZ65@100mm 2列千鳥)	—
せん断ばね③-2	—	柱と受け材の接合具→要素試験 (STS6.5F-180@75mm)
せん断ばね③-3	—	受け材と面材の接合具→要素試験 (CNZ75@75mm2列千鳥)
壁面材 (ブレース)	壁面材をブレース化→壁実験 (構造用 MDF 9mm)	壁面材をブレース化→壁実験 (構造用合板 24mm)
柱脚引張ばね①	柱脚金物を引張ばね→金物試験 (柱脚金物 HD-D9)	
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	

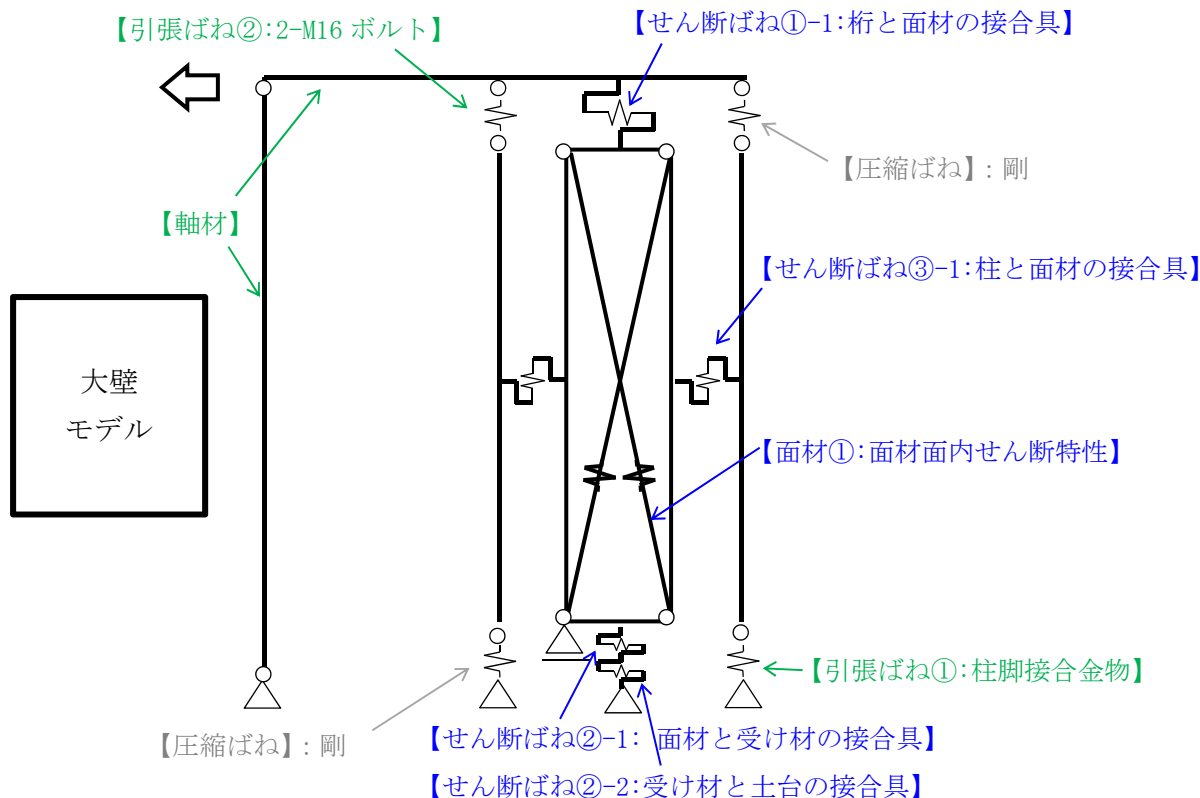


図 4.2-1 大壁仕様 (No. 19) の解析モデル概要

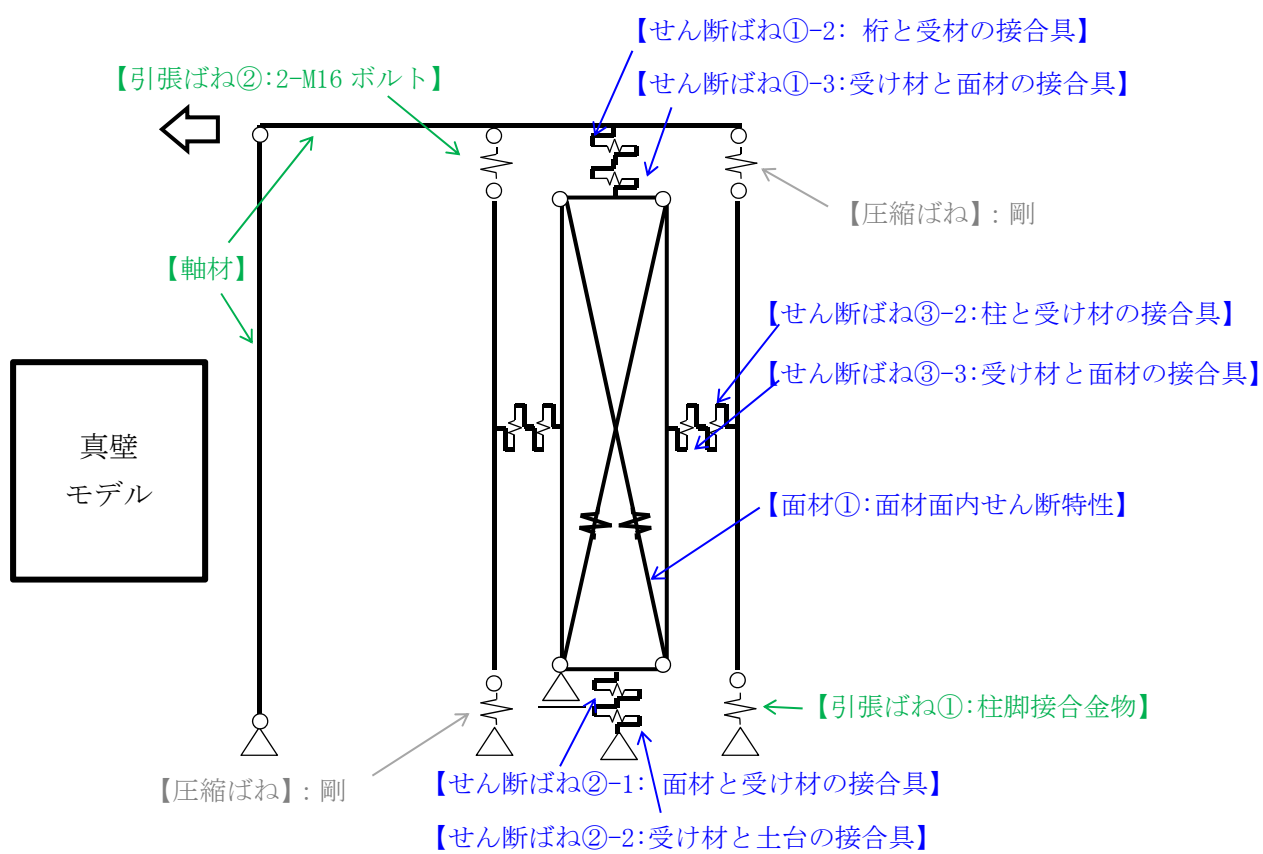


図 4.2-2 真壁仕様 (No. 20) の解析モデル概要

4.3 各要素の特性

4.3.1 試験体 No. 19 (MDF 片面大壁) の各要素の特性

(1) せん断ばね①-1(桁と面材の接合具)

2.5 節の要素試験(釘、ねじの一面せん断試験)より、試験体 No. 6 (MDF、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

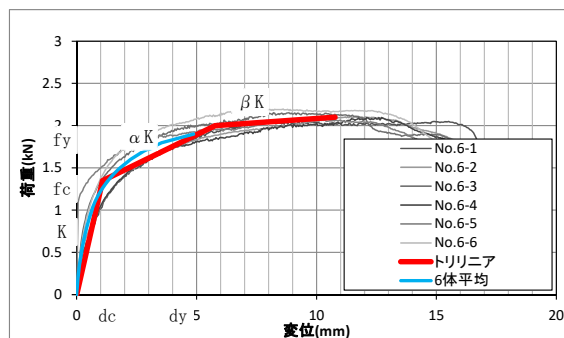
主材：構造用 MDF (壁面材)

側材：ヒノキ集成材 (柱)

$$f_c = 1.35 [\text{kN}], d_c = 1.1 [\text{mm}]$$

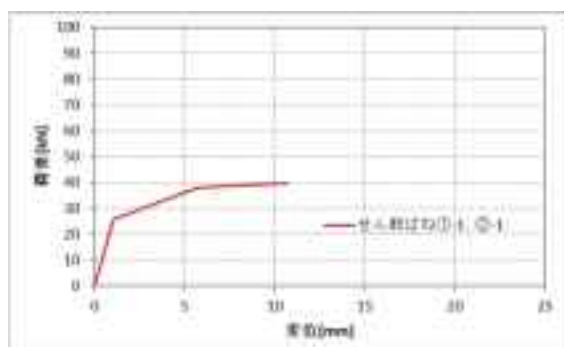
$$f_y = 2.0 [\text{kN}], d_y = 5.8 [\text{mm}]$$

$$K = 1.25 [\text{kN/mm}], \alpha = 0.110, \beta = 0.016$$



<一面せん断試験 No. 6>

上記特性値を釘本数倍(水平方向に19本)してせん断ばね①-1とする。



<せん断ばね①-1、②-1>

(2) せん断ばね②-1(面材と受け材の接合具)

特性は(1)せん断ばね①-1と同じとする。

(3) せん断ばね②-2(受け材と土台の接合具)

2.5節の要素試験(釘、ねじの一面せん断試験)より、試験体No. 1(ヒノキ集成材、STS6. 5F-180)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

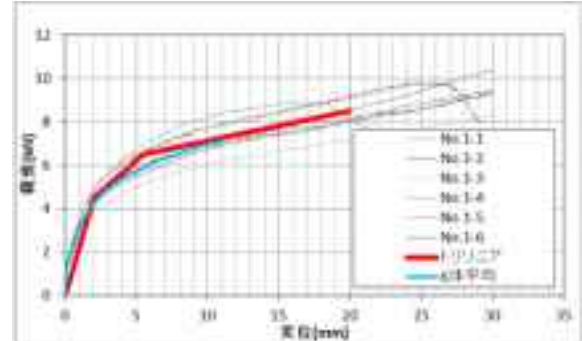
主材：ヒノキ集成材(受け材)

側材：ヒノキ集成材(柱)

$f_c=4.5$ [kN], $d_c=2$ [mm]

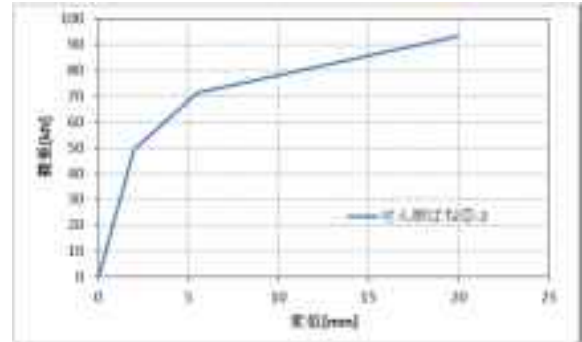
$f_y=6.5$ [kN], $d_y=5.5$ [mm]

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



<一面せん断試験 No. 1>

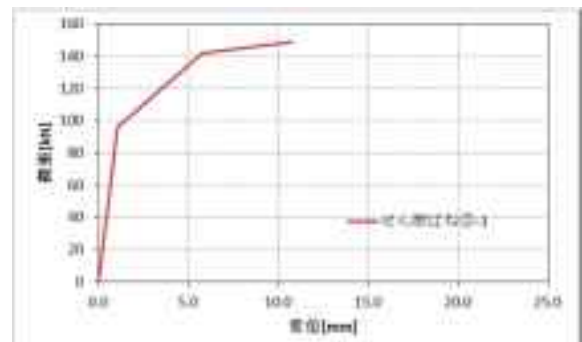
上記特性値をビス本数倍(水平方向に11本)してせん断ばね②-1とする。



<せん断ばね②-1>

(4) せん断ばね③-1(柱と面材の接合具)

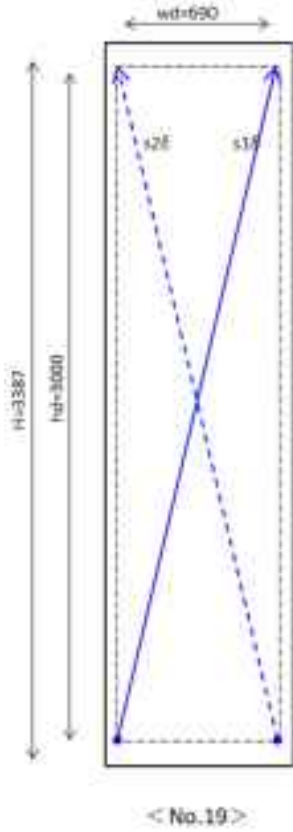
特性は(1)せん断ばね①-1に示した釘1本あたりの特性値を釘本数倍(71本)したものである。



<せん断ばね③-1>

(5) 壁面材ブレース(MDF)

図 4.3-1 に示すように、耐力壁試験において壁面材の対角変位を計測した。面材のせん断モデルは、計測された対角変位から下式によりせん断変形（計測区間と釘配列の高さ方向の補正を考慮）を算定する。



$$x_s = \sum \left\{ \frac{L_{di}(s_1\delta_i - s_2\delta_i)}{2w_d} \times H_i/h_{di} \right\}$$

ここで、

- x_s : せん断変形量
- $s_1\delta_i, s_2\delta_i$: 面材の対角方向の変形量
- L_{di} : 計測区間の対角線長さ
- w_d : 計測区間の水平長さ
- h_{di} : 計測区間の鉛直長さ
- H_i : 釘配列の区間の長さ

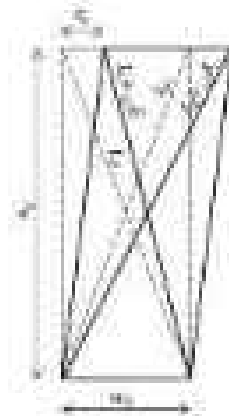


図 4.3-1 壁面材対角方向変位の計測位置とせん断変形量の算定式

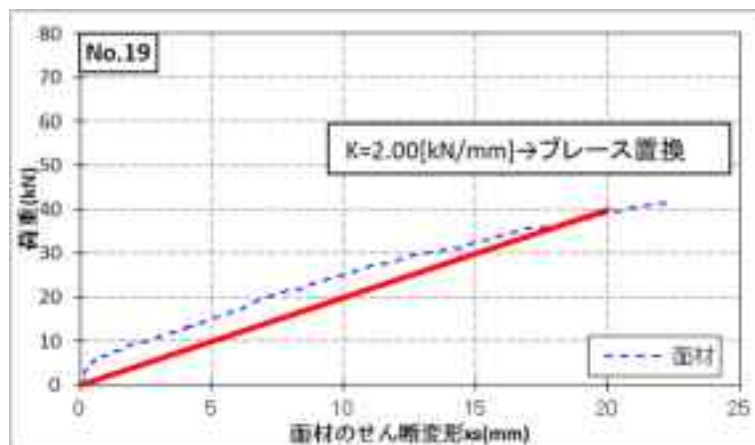
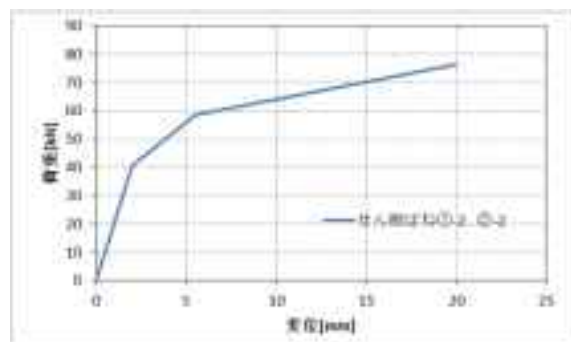


図 4.3-2 壁面材のせん断変形量

4.3.2 試験体 No. 20（合板 24mm 片面真壁）の各要素の特性

(1) せん断ばね①-2(桁と受け材の接合具)

特性は 4.3.1(3)せん断ばね②-2 に示したビス 1 本あたりの特性値をビス本数倍（9 本）したものとす。



<せん断ばね①-2、②-2>

(2) せん断ばね①-3(受け材と面材の接合具)

2.5節の要素試験(釘、ねじの一面せん断試験)より、試験体No. 4(ヒノキ集成材、STS6.5F-180)の結果より、せん断ばね①-3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

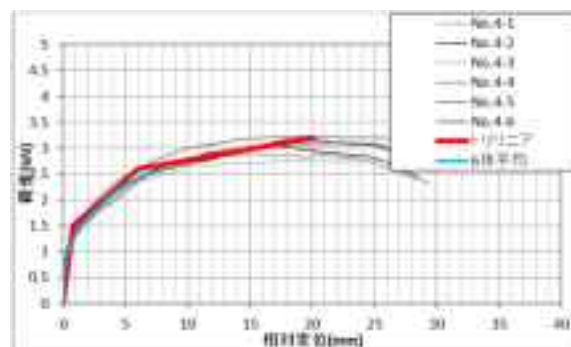
主材：構造用合板 24mm（壁面材）

側材：ヒノキ集成材（受け材）

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

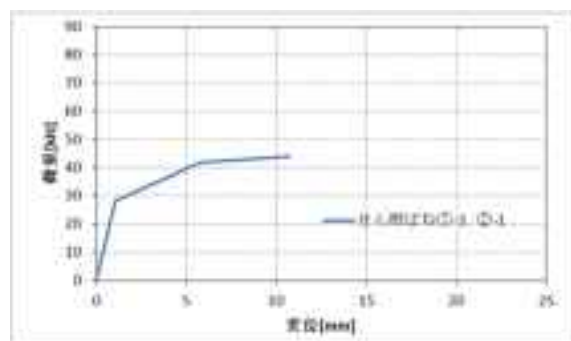
$$f_y = 2.6 \text{ [kN]}, d_y = 6.5 \text{ [mm]}$$

$$K = 1.4 \text{ [kN/mm]}, \alpha = 0.156, \beta = 0.019$$



<一面せん断試験 No. 4>

上記特性値を釘本数倍（水平方向に 21 本）してせん断ばね②-1 とする。



<せん断ばね①-3、②-1>

(3) せん断ばね②-1(面材と受け材の接合具)

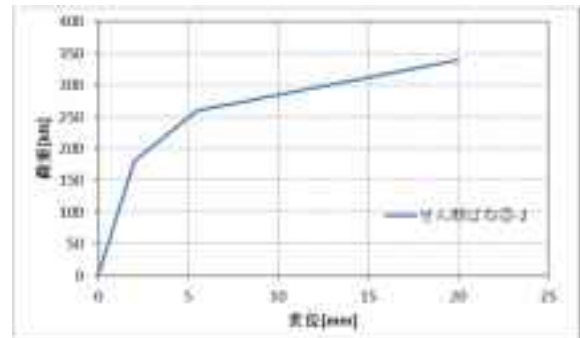
特性は(2)せん断ばね①-3と同じとする。

(4) せん断ばね②-2(受け材と土台の接合具)

特性は(1)せん断ばね①-2と同じとする。

(5) せん断ばね③-2(柱と受け材の接合具)

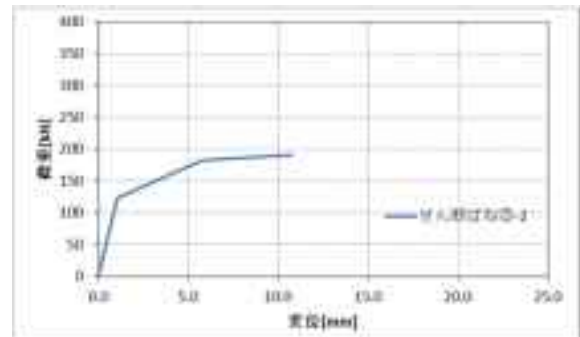
特性は4.3.1(3)せん断ばね②-2に示したビス1本あたりの特性値をビス本数倍(40本)したものとする。



<せん断ばね③-2>

(6) せん断ばね③-3(受け材と面材の接合具)

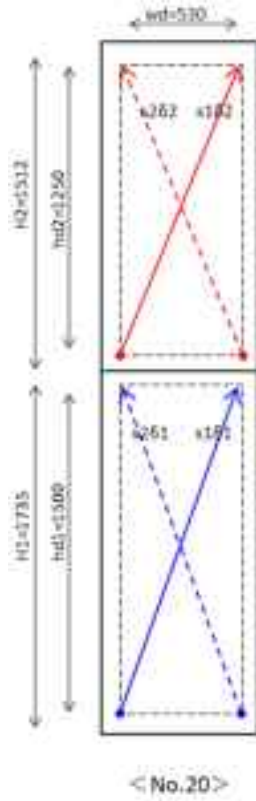
特性は(2)せん断ばね①-3に示した釘1本あたりの特性値を釘本数倍(91本)したものとする。



<せん断ばね③-3>

(7) 壁面材ブレース(合板 24mm)

図 4.3-3 に示すように、耐力壁試験において壁面材の対角変位を計測した。面材のせん断モデルは、計測された対角変位から下式によりせん断変形（計測区間と釘配列の高さ方向の補正を考慮）を算定する。



$$x_s = \sum \left\{ \frac{L_{di}(s_1\delta_i - s_2\delta_i)}{2w_d} \times H_i/h_{di} \right\}$$

ここで、

x_s : せん断変形量

$s_1\delta_i, s_2\delta_i$: 面材の対角方向の変形量

L_{di} : 計測区間の対角線長さ

w_d : 計測区間の水平長さ

h_{di} : 計測区間の鉛直長さ

H_i : 釘配列の区間の長さ

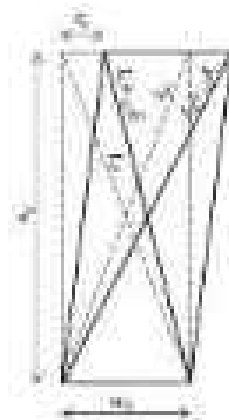


図 4.3-3 壁面材対角方向変位の計測位置とせん断変形量の算定式

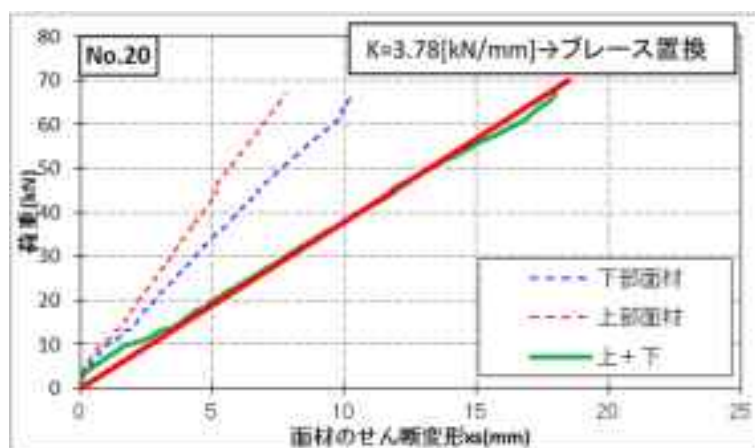
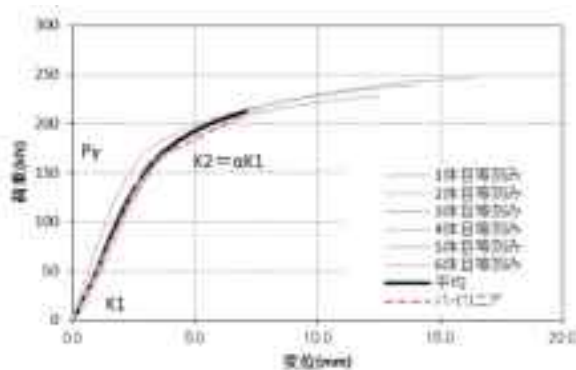


図 4.3-4 壁面材のせん断変形量

4.3.3 試験体 No. 19、No. 20 共通の各要素の特性

(1) 引張ばね①(柱脚金物)

引張ばね①の特性は、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 4.3-5 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。

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

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

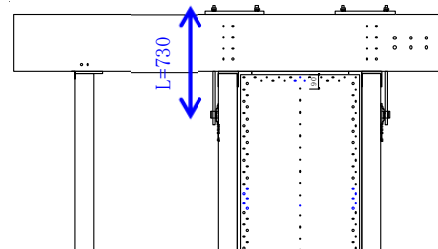
$$L = 730 \text{ [mm]}$$

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

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

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

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



4.4 解析結果

4.4.1 実験結果との比較

各耐力壁の解析結果と実験結果の比較を図 4.4-1、図 4.4-2 に示す。前項に示した要素の特性からなる解析モデルの解析結果は、柱脚固定式試験の結果と概ね整合することが確認された。

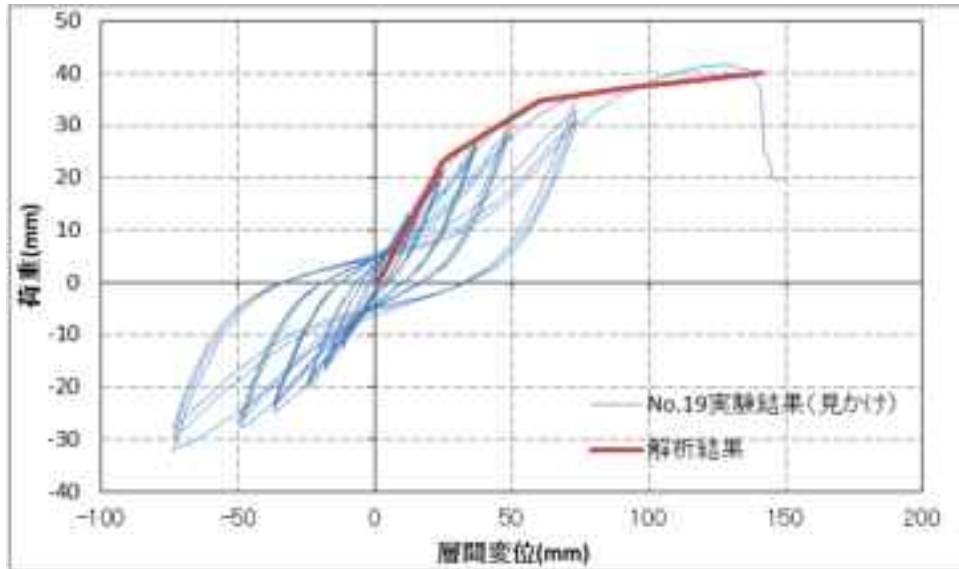


図 4.4-1 No. 19 (MDF 片面大壁) と解析結果の比較

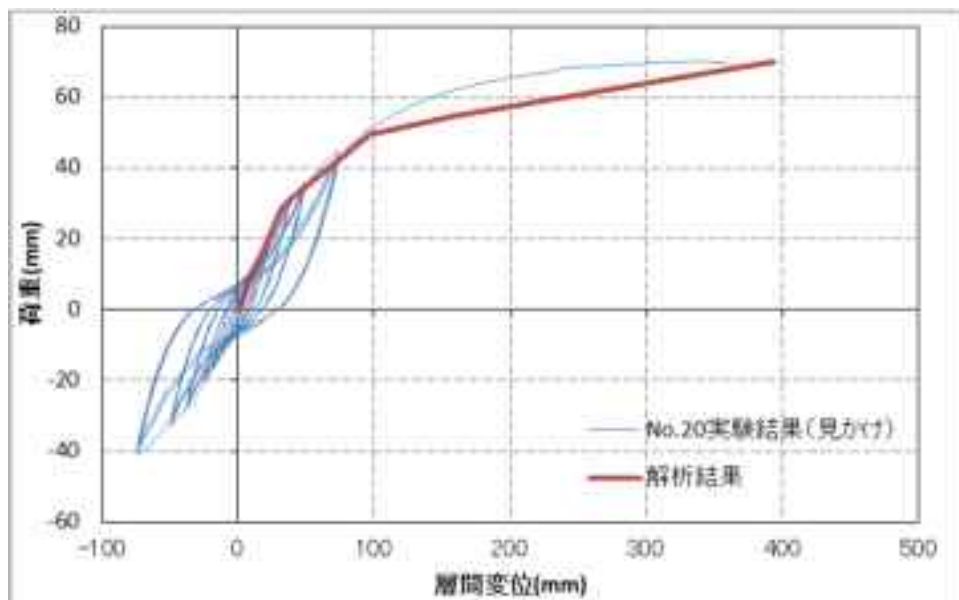


図 4.4-2 No. 20 (24mm 合板片面真壁) と解析結果の比較

4.4.2 解析結果の短期基準せん断耐力の試算

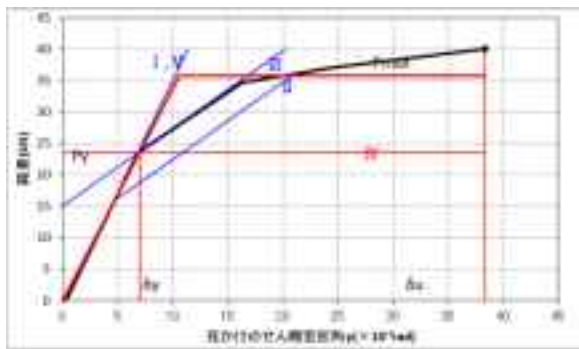
前項の解析により得られた荷重変形関係から短期基準せん断耐力の試算を行った結果を表 4.4-1 図 4.4-3 に示す。また、表 4.4-2 に柱脚固定式の耐力壁試験の結果も併せて示す。

MDF 片面大壁仕様は実験結果に対し 1.0 倍、合板 24mm 片面真壁仕様は実験に対し 0.86 倍という評価結果となった。

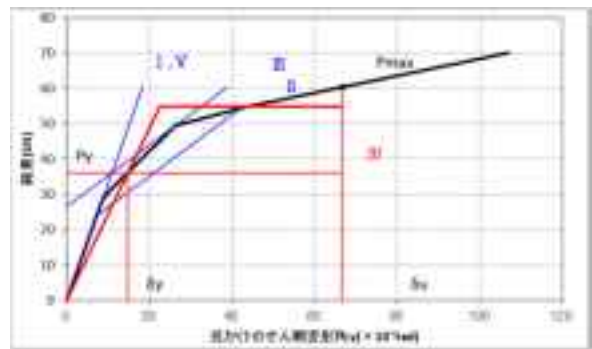
表 4.4-1 特性値

	No.19	No.20
降伏荷重 P_y	[kN] 23.5	36.1
降伏変位 θ_y	[rad. $\times 10^{-3}$] 6.98	14.77
最大荷重 P_{max}	[kN] 40.0	60.3
最大荷重時変位 $\theta(P_{max})$	[rad. $\times 10^{-3}$] 38.34	66.67
2/3 P_{max}	[kN] 26.7	40.2
2/3 P_{max} 時変位 $\theta(2/3P_{max})$	[rad. $\times 10^{-3}$] 9.47	18.29
終局荷重 P_u	[kN] 35.7	54.9
終局変位 θ_u	[rad. $\times 10^{-3}$] 38.3	66.7
初期剛性 K	[kN/rad. $\times 10^{-3}$] 3.37	2.45
仮想降伏点変位 θ_v	[rad. $\times 10^{-3}$] 10.6	22.4
塑性率 μ	3.6	3.0
構造特性係数 D_s	0.40	0.45
0.1 P_{max}	[kN] 4.0	6.0
0.1 P_{max} 時変位	[rad. $\times 10^{-3}$] 1.39	1.83
0.4 P_{max}	[kN] 16.0	24.1
0.4 P_{max} 時変位	[rad. $\times 10^{-3}$] 4.73	7.33
0.9 P_{max}	[kN] 36.0	54.3
0.9 P_{max} 時変位	[rad. $\times 10^{-3}$] 20.98	41.99
0.2 P_u/D_s	[kN] 17.8	24.4
P(1/120rad時)	[kN] 25.3	27.4

短期基準せん断耐力	[kN] 17.8	24.4
壁長さ1mあたり	[kN/m] 19.6	26.8
相当壁倍率	10.0	13.7



<No. 19>



<No. 20>

図 4.4-3 解析結果及び完全弾塑性モデル

表 4.4-2 【参考】耐力壁試験特性値 (No. 19, 20)

評価項目 \ 試験体No	No. 19	No. 20
短期基準せん断耐力 (kN)※	17.8	28.2
壁長さ1mあたり (kN/m)※	19.6	31.0
相当壁倍率※	10.0	15.8

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。

(1) MDF 片面大壁(No.19)

MDF 片面大壁モデルの増分解析結果における各要素の変形状態を図 4.4-4 に示す。耐力壁の構造特性（剛性）に対して、受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。

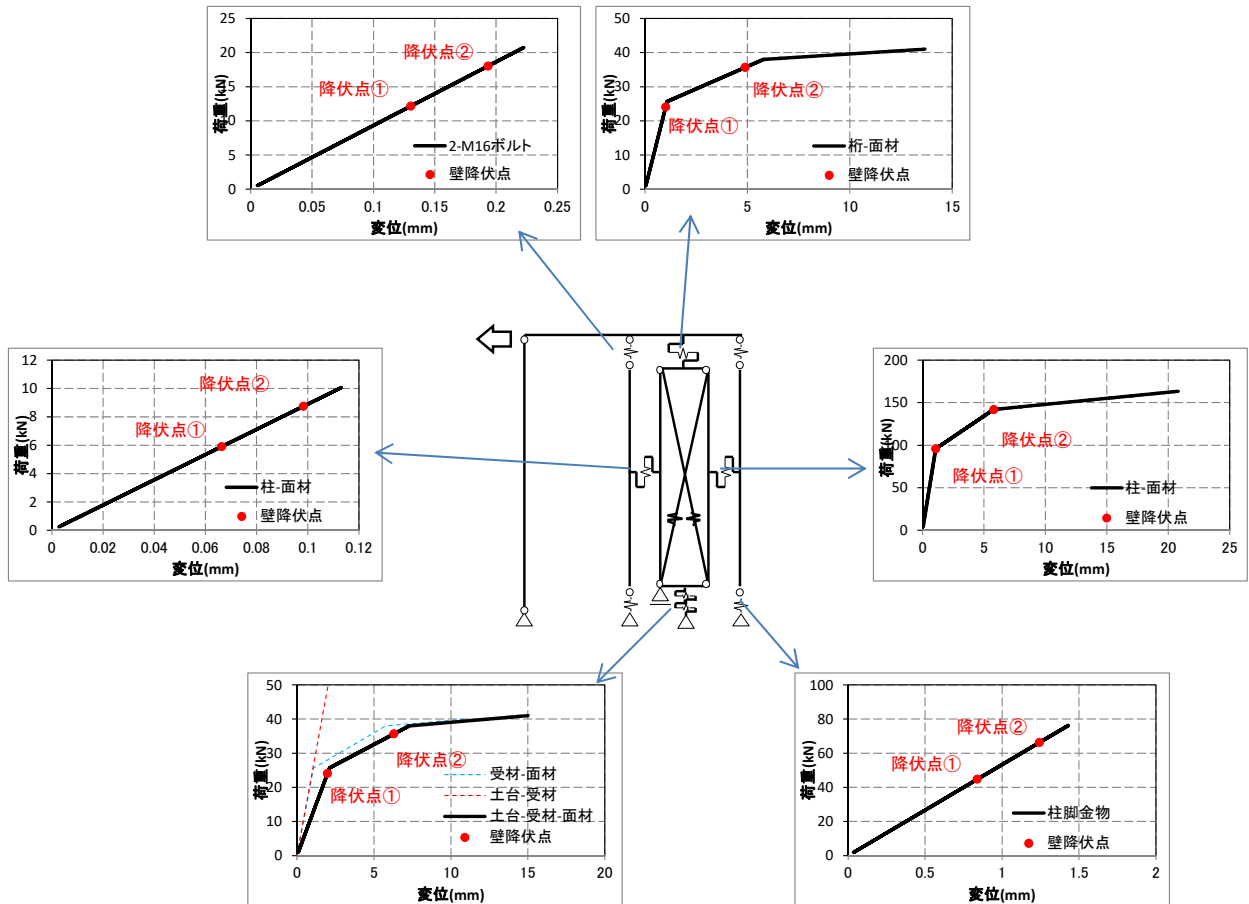


図 4.4-4 各要素の変形状態

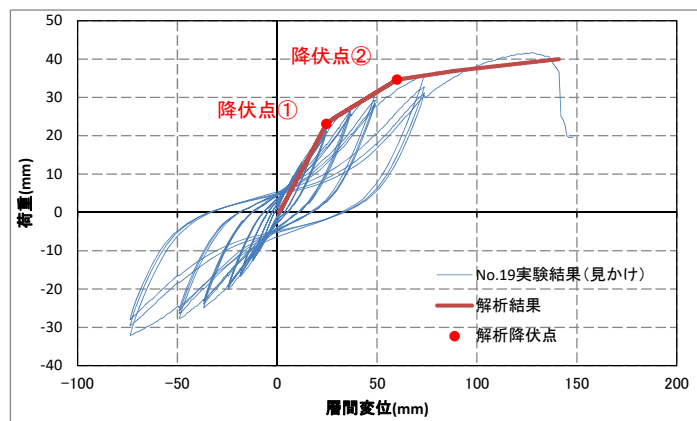


図 4.4-5 増分解析結果とその降伏点

(2) 合板 24mm 片面真壁 (No.20)

合板 24mm 片面真壁モデルの増分解析結果における各要素の変形状態を図 4.4-6 に示す。先に示した MDF 片面大壁モデルと同様、耐力壁の構造特性（剛性）に対しては、たて方向の受け材のビスや面材の釘の特性の寄与度が大きいことがわかった。

実験結果と解析結果の比較より、耐力壁の終局部分の剛性評価の精度が良くないことが分かる。各要素の特性をポリリニアやそれ以上とすることで、終局部分の評価も可能になると思われる。

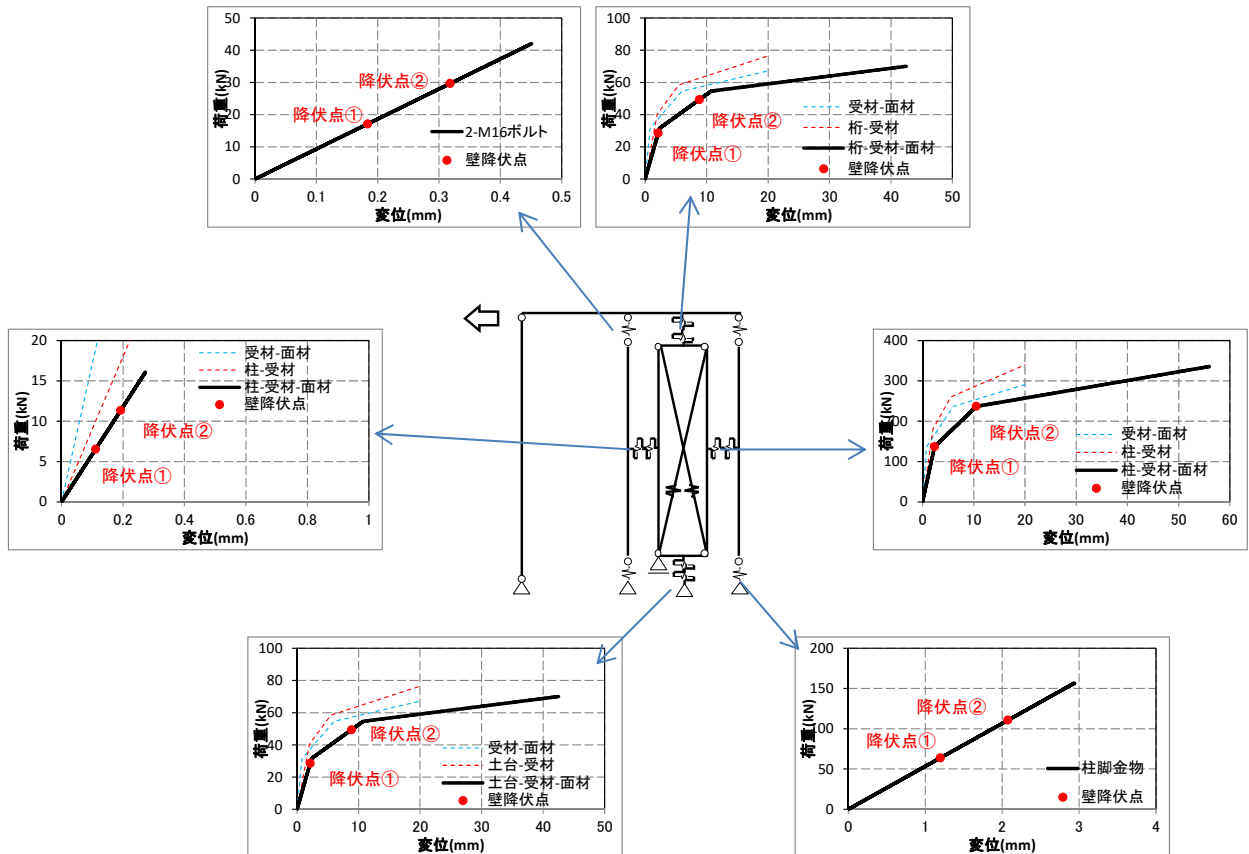


図 4.4-6 各要素の変形状態

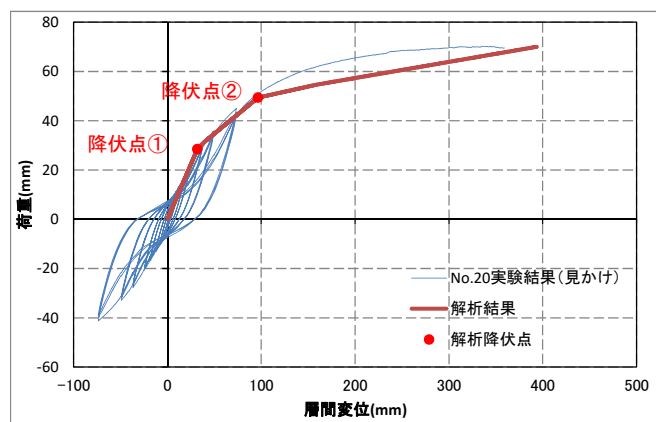


図 4.4-7 増分解析結果とその降伏点

4.5 まとめ

(1) 柱脚固定式耐力壁試験を模擬する解析モデルの構築

柱脚金物試験や釘、ビスの一面せん断試験などの要素試験のデータから各要素のばねを設定し構築した解析モデルは、柱脚固定式耐力壁試験の結果を概ね再現できることがわかった。

(2) その他の要素の組合せによる耐力壁特性の推定

ここでは壁実験を再現する解析を行い、要素試験のデータから柱脚固定式試験の特性を推定できることがわかった。今回用いたものとは別の柱脚金物の要素試験データがあれば、その金物を耐力壁に組み込んだ際の構造特性を推定可能になる。