

木造軸組大壁耐力壁の面材相互の接触を考慮した抵抗機構と耐力に関する解析的研究

Analytical study on resistance mechanism and bearing capacity of sheathed shear walls considering contact between structural panels

加藤 百合子*1、五十田 博*2、今西 達也*3

1. はじめに

「木造軸組工法住宅の許容応力度設計¹⁾」には、面材張り大壁耐力壁の許容せん断力を計算する方法が記載され、構造設計に用いられている。この計算法は、くぎ配列とくぎ接合具モデルを用いて計算されている村上、稲山²⁾の研究を基に取りまとめられた手法であるが、くぎ接合具モデルはくぎの耐力低下を考慮していない弾塑性モデルである。村上らは、大壁面材高さ方向の継ぎ目部の受材と軸材(柱)間の仕口接合部のせん断検定式を提案しており³⁾、その検討中にくぎ接合具にマルチシアスプリングモデルを用いて面材1枚の大壁の解析をしている。くぎ接合具のせん断試験結果をモデルに用いた大壁耐力壁の解析結果は、試験結果の荷重 P -変形 δ 関係を最大耐力近くまで概ね再現できており、大壁耐力壁の構造性能を計算する際に、くぎ接合具の性能が直接影響することはこれらの研究からも明らかである。ほかにも、Richard、安村らの研究⁴⁾において、接合具をばねに置換した耐力壁の有限要素解析が行われている。しかし、いずれの研究においても面材相互の接触は考慮されていない。

耐力壁の面内せん断試験では、同じ仕様の試験体を丁寧に製作しても荷重変形関係や最大耐力には大きく違いが生じることがある。しかし、試験結果に影響するばらつきの各種原因は、材料強度、軸組の節などの欠陥、施工の精度、試験の精度など広範囲に及ぶ。そのために、仕様の違いによる性能差を面内せん断試験だけで明らかにしようとしても、ばらつきの中に埋もれてしまい困難になることが多い。

一方で、解析は意図した変動因子としてばらつきの要因を与え、違いを示すことができる。例えば、面材を高さ方向に継ぎ張りした(以下、縦継張りとする)耐力壁の面内せん断試験を行なうと、面材相互に隙間を設けても、最終的に接触した面材の隅角部が圧縮破壊する場合や損傷しない場合があり、試験だけではばらつきの原因を調べるのは困難である。

本報では、縦継張りの大壁直張耐力壁の面材4枚の相互の接触に着目し、面材相互のすべりの方向が最大耐力や耐力低下に及ぼす影響を解析により検討する。

2. 要素試験と解析モデルの構築

耐力壁の解析モデルは、軸組および面材に等方性弾性の3Dソリッド要素を用い、くぎ接合具はせん断ばねとした。軸組の剛性は材料の規格値を用い、くぎ接合具のせん断ばねの特性および、面材の面内方向剛性は本章の要素試験によりそれぞれ決定した。要素試験に用いた材料は、後述する耐力壁の試験で使用した材料と同一ロットのものをを用い、材料の剛性・強度が結果に与える影響を小さくするようにした。

なお、解析には三次元有限要素法解析ソフト Marc (ver. 2018.1.0) を用いた。

2.1 くぎ接合具のせん断特性

本節では、耐力壁のFEM解析に用いるくぎ接合具のせん断特性について示す。

耐力壁が繰り返し変形を受けると、面材を留め付ける接合具が軸材から抜け出し、載荷中に軸組と面材間に隙間が生じることがある。面材と木材のくぎ接合部のせん

*1 KATO Yuriko : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部 構造試験室 修士(工学)

*2 ISODA Hiroshi : 京都大学生存圏研究所 教授 博士(工学)

*3 IMANISHI Tatsuya : (一財)日本建築総合試験所 試験研究センター 構造部 構造試験室 博士(工学)

断性能に関しては数多く研究されている。たとえば、小川らの研究⁵⁾では、くぎの引き抜けが顕著に現れない場合、くぎ頭が面材に埋没してくぎ接合具のせん断耐力が最大になる耐力発現機構を示している。一方で、くぎの引き抜け機構とせん断力の関係は明確になっていない。

そこで、面材と軸材の隙間を因子に、くぎ接合具のせん断試験を行い、耐力壁に用いるくぎ接合具のせん断特性を確認する。

また、繰り返し加力回数の違いが、接合具の最大耐力時の変形や、その後の剛性低下に影響することが考えられるため、繰り返し回数を因子にくぎ接合具のせん断試験を行い、繰り返し回数の影響を確認する。

2.1.1 くぎ接合具試験体

図-1に試験体の形状・寸法および試験装置を示す。試験体は105角の軸材に、厚さ9mmの構造用合板2枚(D-fir, JAS特類2級)を、くぎ(N50)各2本、計4本で留め付けたものである。くぎ接合具の試験方法は、参考文献1の「4.4 継手・仕口接合部の試験」4.4.2 (1)～(4)の試験に準じたが、繰り返し载荷は正負交番とした⁶⁾。なお、表層単板の繊維方向は加力方向と平行になるよう

表-1 くぎ接合具試験体一覧

試験体名	面材と軸材の隙間(mm)	軸材		面材		面材留付けくぎ ピッチ	载荷方法	繰り返し回数	試験体数
		寸法(mm)	樹種	厚さ(mm)	面材樹種				
C-0	0	105×105	すぎ	9	D-fir. (3ply)	N50 @ 65	繰り返し + 単調 (予備)	1	各3体 + 予備1体
C-2	2								
C-4	4								
C-0'	0							3	

表-2 材料密度と含水率の平均値

	軸材 (標準偏差)	面材 (標準偏差)
密度 g/cm ³	0.464 (0.014)	0.537 (0.012)
含水率 %	13.4 (2.2)	8.6 (0.3)

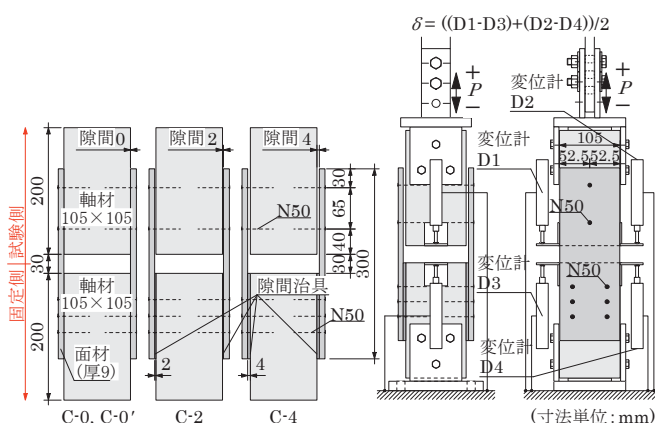


図-1 試験体の形状・寸法および試験装置

に面材を配置した。

繰り返し回数の影響を確認するため、2種類の繰り返し回数の試験を行なった。繰り返し回数は1回（同振幅で1回ずつ繰り返す漸増振幅载荷）または3回（同振幅で3回ずつ繰り返す漸増振幅载荷）とした⁷⁾。

くぎ接合具試験体一覧を表-1に、試験体の材料密度と含水率を表-2に示す。繰り返し回数を各1回、面材と軸材の間の隙間を0mmとした試験体C-0を基本とし、隙間を2mmとしたC-2、隙間を4mmとしたC-4がある。また、隙間を0mmとし、繰り返し回数を3回としたC-0'を用意した。なお、隙間のある試験体の固定側は、隙間治具を入れ、試験側は隙間治具と同じ厚さの板を入れて施工し、試験時には取り除いた。

2.1.2 くぎ接合具試験結果

図-2にくぎ接合具試験の P - δ 関係を、表-3にくぎ接合具試験から求めたくぎ1本当たりの諸量の比較を示す。図-1の測定方法では、 δ には下側のくぎの変形が含まれるが、試験後に下側接合部が動いていないことを罫書き線により確認している。

表-3中の δ_u は最大荷重の8割まで荷重が低下した時の変位である。なお、くぎ接合具試験では、最終的にはくぎ頭のめりこみや接合くぎの破断で耐力が決まった。

2.1.2.1 繰り返し回数による影響

図-2(a), (b) から、C-0とC-0'を比較すると、単調载荷、繰り返し回数1回、3回の順に最大耐力後の耐力低下が早期に始まり、剛性低下も激しい。また、表-3の δ_{Pmax} , δ_u が示すように、繰り返し3回のC-0'は繰り

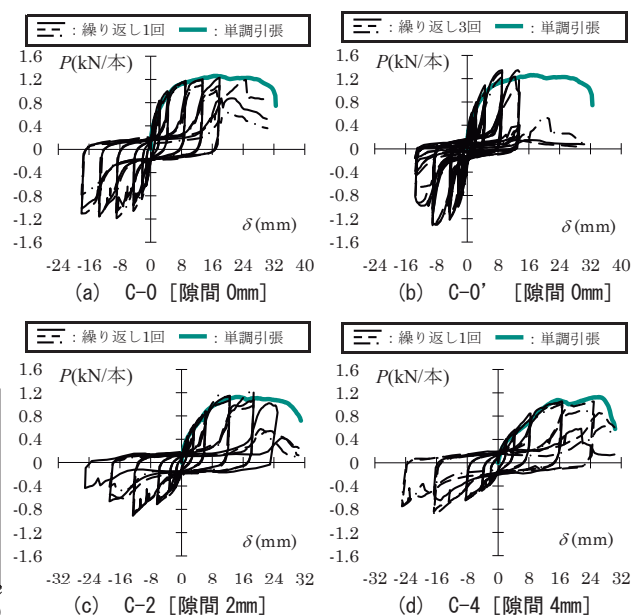


図-2 P - δ 関係

返し1回のC-0の変形に比べ、6割程度と小さい。

2.1.2.2 隙間による影響

図-2の(a)と(c), (d)から、隙間があるC-2, C-4は隙間がないC-0と比べ初期剛性が小さい。表-3の初期剛性 K は、C-0と比べC-2, C-4の順に低く、C-4はC-0の3割程度であった。ただし、 $P_{\max}$, $\delta_{P_{\max}}$ および δ_u のC-4の平均値は、C-0の85%, 88%, 117%で、初期剛性と比べて差が小さい。最大荷重時にも写真-1のように面材と軸材の隙間が無くなるため、 $P_{\max}$, $\delta_{P_{\max}}$ および δ_u への影響が小さかったと考えられる。

2.1.2.3 くぎ接合具試験結果のまとめ

隙間を因子としたくぎ接合具試験結果では、隙間4mmの場合でも、大きな変形時には面材と軸材の隙間が無くなった。耐力壁の面内せん断試験においても同様に、最大荷重時までの繰り返し1回目では、面材と軸組は隙間がなくなると考えられる。そのため、解析に用いるくぎ接合具のモデル化は隙間0mmの結果をもとに作成した。

なお、繰り返し回数3回のC-0'の履歴は、耐力壁のくぎ挙動に比べ変形量が過剰であり、最大荷重以降荷重が急落した。

2.1.3 くぎ接合具のモデル化

くぎ接合具のモデル化を図-3に示す。くぎ1本に対し放射状のばね16本のマルチスプリングにモデル化しXY方向に変形するようにした。

C-0の試験結果と、履歴特性設定値および、図-3に

表-3 くぎ1本あたりの諸量の比較(繰り返し3体平均)

		C-0	C-0'	C-2	C-4
平均	K (kN/mm)	0.40	0.39	0.23	0.13
	$P_{\max}$ (kN)	1.21	1.31	1.15	1.03
	$\delta_{P_{\max}}$ (mm)	18.70	10.40	14.61	16.51
	δ_u (mm)	20.24	13.61	21.38	23.60
	P_y (kN)	0.67	0.67	0.55	0.51
	$2/3 P_{\max}$ (kN)	0.81	0.87	0.77	0.69

注)記号の定義を以下に示す。

K :初期剛性 $P_{\max}$:最大荷重
 $\delta_{P_{\max}}$:最大荷重時変位 δ_u :終局変位
 P_y :降伏耐力

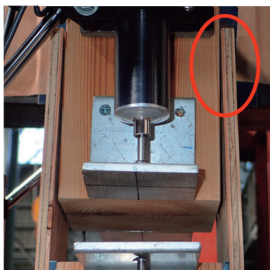


写真-1 試験終了時 (C-4)

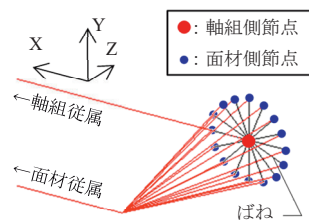


図-3 くぎ1本を16本のばねに分割したモデル

示すモデルで解析した荷重変形関係との比較を図-4に示す。くぎモデルの初期剛性は $K_1=480\text{N/mm}$, 降伏耐力は $P_y=1200\text{N}$ とし、 $P=600\text{N}$ 以上で $K_2=K_1/4.5$ の二次勾配を、 $\delta=14.6\text{mm}$ 以降で $K_3=-K_1/12$ の負勾配を設定した。ばね1本あたりでは初期剛性は $K_1=60\text{N/mm}$, 降伏耐力は $P_y=120\text{N}$ とし、 $P=60\text{N}$ 以上で $K_2=K_1/4.5$ の二次勾配を、 $\delta=13\text{mm}$ 以降で $K_3=-K_1/10.1$ の負勾配となる。なお、作成したくぎの履歴特性は、同材料を用い実施した参考文献1の「4.5 面材くぎ等1本あたりの面内せん断特性を算定するための試験」から得られた結果と同程度となった。そこで、くぎが面材表層単板・軸材の繊維方向と平行方向に変形する場合の試験結果を用いた。

2.2 構造用合板の圧縮試験

本節では、耐力壁のFEM解析に用いる構造用合板のモデル化について示す。耐力壁の解析では、面材の隅角部が相互に接触し局部的に大きな応力が発生することで、面材の全体に広範囲に応力が伝達する可能性がある。その場合、面材の剛性が解析結果に影響すると考え、面材の面内方向剛性を圧縮試験より求めた。

2.2.1 試験体

試験体の形状・寸法および試験装置図を図-5に示す。試験では、面材上下端は完全固定にせず、ストッパーとしてマグネットで挟み込む程度とした。試験体数は各6体とし、表層単板の繊維直交方向に圧縮力を加えるX-iおよび繊維方向に圧縮を加えるY-iの2種類とした。試験は切り出した面材に、面内方向に単調な圧縮力をかける方法とした。

2.2.2 試験結果

表-4に圧縮試験結果一覧を、図-6に応力 σ -ひずみ ε 関係を示す。なお、応力 σ は、荷重 P を試験体断面A ($A: 63 \times 9\text{mm}$) で除した値を示し、ひずみ ε は面材中央の裏表に貼り付けたひずみゲージの平均値を示している。表-4より、面材の表層単板が繊維直交方向のヤング係数の平均は 6332N/mm^2 であり、繊維平行方向の

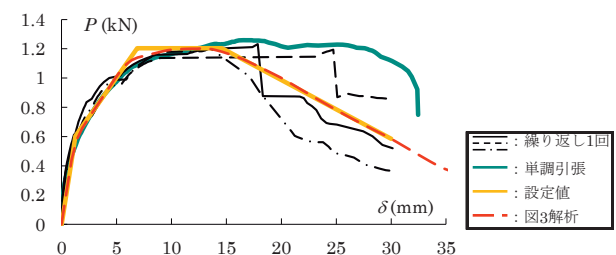


図-4 くぎ1本あたりの試験結果と履歴特性設定値と解析結果の比較

ヤング係数の平均は8778N/mm²であった。

2.2.3 構造用合板のモデル化と解析結果

構造用合板は、ソリッド要素とし、1つの要素のサイズは後に示す耐力壁の解析の面材の要素サイズと同じで、厚さ方向に2分割とした25×25×4.5mmとした。図-5の試験体と同形状の解析モデルを作成し、圧縮力を与えた結果を図-6に示す。解析に用いる面材は、試験結果から直交異方性と確認できるが、与条件として直交異方性を設定するのに必要な係数がそろっていないため、等方性弾性とした。面材のヤング係数は表層単板繊維平行方向と繊維直交方向のヤング係数の平均値をもとに7550N/mm²とし、ポアソン比を0.3とした。せん断弾性係数は $G=E/(2(1+\nu))=2903\text{N/mm}^2$ となる。

なお、解析ソフトの性質上、ポアソン比は0.5より小さくなければならないため、ポアソン比を0.1~0.45に変更した耐力壁の解析をおこなっている。その結果、ポアソン比の違いによる荷重の差は、 P_y 以前で2%、最大荷重時で0.3%程度であり影響は小さいことを確認した。

耐力壁の試験では、面材の隅角部が相互に当たると、隅角部が局部的に塑性化し正負の繰り返し変形の中で潰れるが、本解析では収束安定性を優先し、面材を弾性にモデル化した。

3. 耐力壁の試験とその解析

大壁耐力壁のFEM解析の妥当性を検証するために、

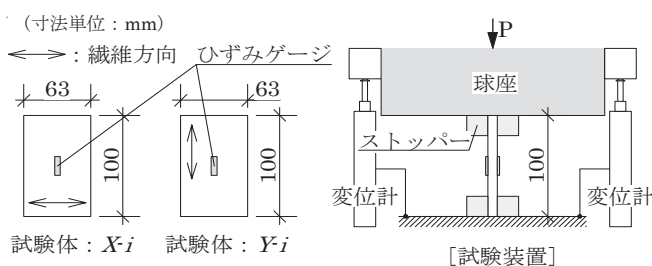


図-5 構造用合板圧縮試験試験体の形状・寸法および試験装置

表-4 圧縮試験結果一覧

	試験体番号	ヤング係数(N/mm ²)	最大応力(N/mm ²)
直交方向	X-1	4443	9.74
	X-2	7365	9.12
	X-3	7188	10.45
	平均	6332	9.77
平行方向	Y-1	9459	27.20
	Y-2	7602	22.70
	Y-3	9274	21.70
	平均	8778	23.87

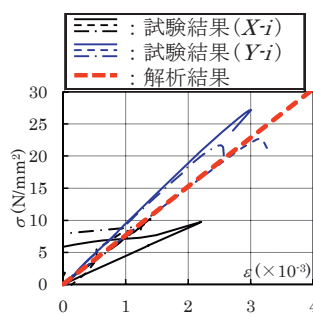


図-6 面材の面内方向σ-ε関係

面材相互の隙間の大小をパラメータとした面材大壁面内せん断試験を行なった⁸⁾。なお、耐力壁の試験および解析では面材の挙動に着目するため、軸組の影響は排除することとし、試験結果からはフレームのみの耐力を減じ、解析結果と比較を行なった。

3.1 大壁耐力壁の面内せん断試験

3.1.1 試験方法

試験は、図-7及び表-5の試験体一覧（大壁）に示す5体を作製した。以下、上下の面材の隙間の寸法を s_1 、左右の面材の隙間の寸法を s_2 とする。試験体の種類は、面材間に隙間のない試験体（ $s_1=0\text{mm}$ ）、試験などで一般的な施工状況として用いられることの多い2mmの隙間を想定した試験体（ $s_1=2\text{mm}$ ）、面材同士が大変形時まで接触しないと考えられる試験体（ $s_1=5\text{mm}$ ）の3種とした。

くぎピッチは告示仕様より高倍率となることを意図し、告示仕様の1/1.5倍のN50@100mmとした。面材のへりあきを12mm、胴つなぎの見付け高さが45mmとすると、前述の $s_1=5\text{mm}$ がくぎのせん断性能に影響を与えず接触が生じない隙間である。また、ばらつきの影響を見るために $s_1=0\text{mm}$ の試験体は3体とした。

面材の変形については、画像処理法で変位の計測を行なった。同計測方法は図-8の●で示す位置に貼り付けた画像計測用ターゲットを、3台のカメラで撮影し、視

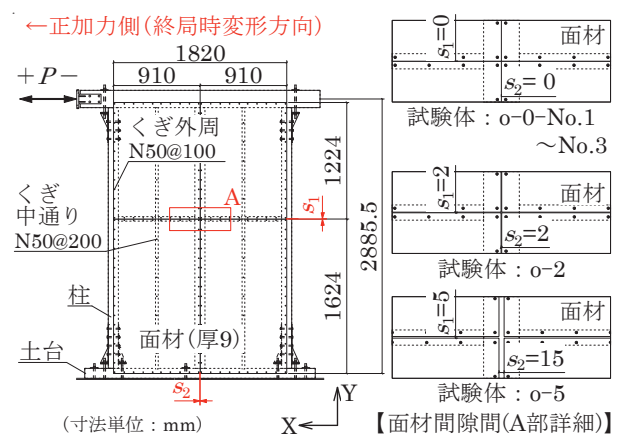


図-7 試験体の概要（大壁）

表-5 試験体一覧

試験体名	横架材間内法(mm)	面材幅(mm)	面材間隙間(mm)		試験体数
			s_1	s_2	
o-0-i	2743	1820	0	0	3
o-2	(面材高さ: 1624+1224)	(910+910)	2	2	1
o-5			5	15	1

注) 試験体名: $\boxed{o} - \boxed{0} - \boxed{i}$
大壁実験 試験体番号($i=1\sim3, o-0$ のみ)
面材間隙間 $s_1(0, 2, 5)$

差からX, Y, Z方向の変位を求める方法である。なお、大壁 P_{oi} 点のX方向変位を δ_{xoi} 、Y方向変位を δ_{yoi} 、Z方向変位を δ_{zoi} とした。 i はターゲット番号を示す。

3.1.2 試験結果

試験から得られた荷重変形角関係は、図-7に示す正加力時の包絡線を示し、発生現象は正加力時の現象について述べる。荷重変形角関係を図-9に示し、試験終了時の面材の接触状況を写真-2に示す。図-9に示すように、o-0-1~3はある程度最大荷重がばらついた。最大荷重が低めとなったo-0-2および同程度の最大荷重であったo-2では、初期に面材同士のめり込みが生じるものの大変形時に縦方向に大きくすべりが生じた(写真-2(b))。一方、最大荷重が高めであったo-0-1, o-0-3では、面材同士のめり込みが優勢で、縦方向にあまりすべりが生じなかった(写真-2(a))。なお、o-5では面材間の接触が終局時まで生じなかった。

3.2 耐力壁の解析モデル

解析モデルの概要を図-10に示す。図-10に示すように、試験で用いた梁がJAS機械等級区分E110、柱・土台がJAS機械等級区分E70であったので、解析モデルの梁・柱・土台は木材のヤング率と合わせた。なお、継手間柱・間柱・胴つなぎは柱・土台と同じE70とした。くぎ接合具は、図-4の解析モデルを用い、面材は図-6の解析モデルを用いた。部材間の接触については、面材同士は接触することとし、面材相互の摩擦を0とした。そ

他の部材間では接触を考慮していない。

解析パターン一覧を表-6に示す。寸法や面材間の隙間およびくぎ位置は試験体と同じとした。弾性解析では、写真-2(a)のような角が潰れるような破壊を再現できなかった。そこで、めり込みが生じた状態を①縦方向にすべりが生じる状態と②縦方向にすべりが生じない(水平方向にすべりが生じる)状態の間にあると考え、接触が生じたo-0-i, o-2に対し①, ②それぞれの状態となる解析モデルを作成し試験結果と比較を行なった。表-6中のすべり方向は、右上面材が左下面材に乗り上げるように短辺で接触し水平方向に相対変位を生じさせる場合を水平(X)方向すべり、右上面材と左下面材が長辺で接触し鉛直方向に相対変位を生じさせる場合を鉛直(Y)方向すべりとした。

なお、面材間隙間の基準値が0mmのa-0は試験体と同じ隙間とすると、面材の角頂点同士で当たり接触の処理ができなかったので、 s_1, s_2 をそれぞれ0.4mm振ることで水平(X)方向すべりと鉛直(Y)方向すべりとなるモデルを作成した。面材間隙間の基準値が2mmのa-2は試験体と同じ隙間とすると、鉛直(Y)方向すべりとなった。そのため s_1 を0.6mm, s_2 を0.4mm調整し水平(X)方向すべりとなるモデルを作成した。隙間が5mm×15mmの解析では、試験と同様に1/15radまで面材相互の接触が生じなかった。

図-10に示すように、境界条件は土台の下面のX, Y,

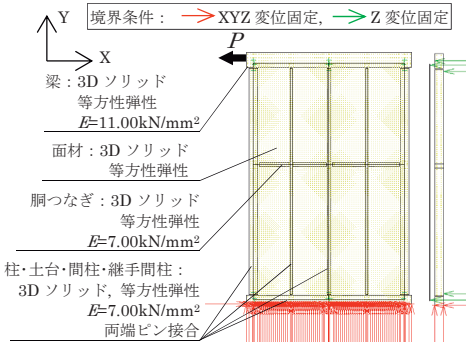
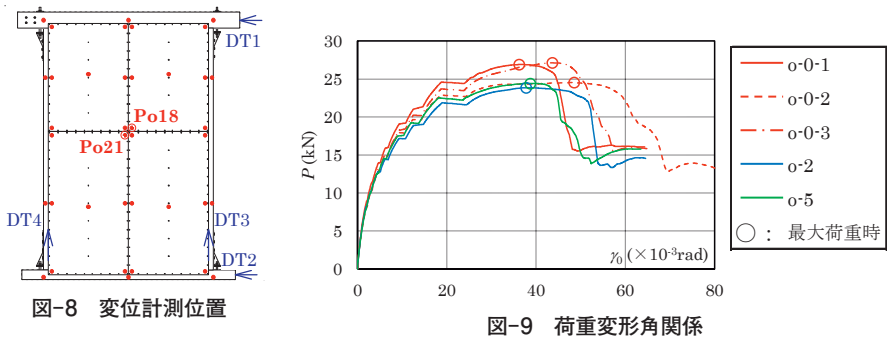
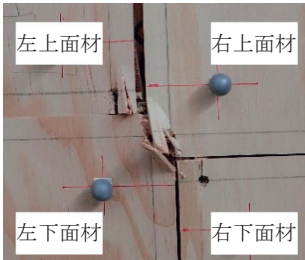


表-6 解析パターン一覧

試験体名	面材間隙間 (mm)				面材間のすべり方向
	s_1 (基準値)	s_2 (基準値)	s_1 (基準値)	s_2 (基準値)	
a-0-x	0	(0)	0.4	(0)	X方向
a-0-y	0.4	(0)	0	(0)	Y方向
a-2-x	1.4	(2)	2.4	(2)	X方向
a-2-y	2	(2)	2	(2)	Y方向
a-5	5	(5)	15	(15)	接触無

注) 試験体名: a-0-x, y
面材間隙間 s_1 (0, 2, 5)
すべり方向(X, Y,)



(a) 水平(X)方向すべり (めりこみ) [o-0-1]



(b) 鉛直(Y)方向すべり [o-2]

写真-2 面材の接触状況

Z方向変位を拘束し、柱、継手間柱および間柱の上下端、梁の両端および中央、面材の四隅のZ方向変位を拘束した。軸組の影響を考慮しないので、軸組の柱・間柱・継手間柱と梁・土台の接合部はピン接合とし、梁の片側端部中央に強制変位を与えた。

なお、軸組は等方性弾性としたが、接合部がピン接合であることや、比較を行う試験結果は軸組の影響を差し引いたものであることから、直交方向の剛性の影響はないと考えている。加えて、土台の柱のめり込みの影響を確認するため、土台に木材の部分圧縮試験から得られた剛性を用いて耐力壁の解析を行なった。その結果、土台の剛性の違いによる P_y の差は0.6%程度、最大荷重の差は0.05%程度であり、差が小さいことを確認している。

3.3 解析結果と試験結果の比較

3.3.1 面材接触部の変形状況と面材の応力状況

図-11に解析結果による最大変形時の面材接触部の変形図を示し、図-12に最大荷重時の相当応力のコンター

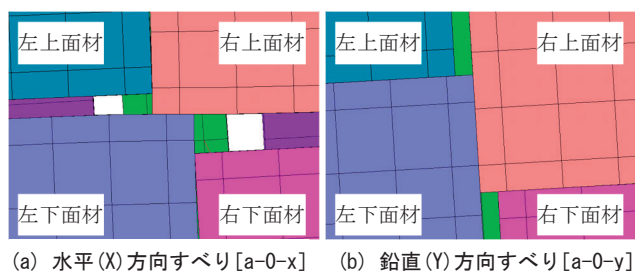


図-11 面材接触部の変形図 (最大変形時)

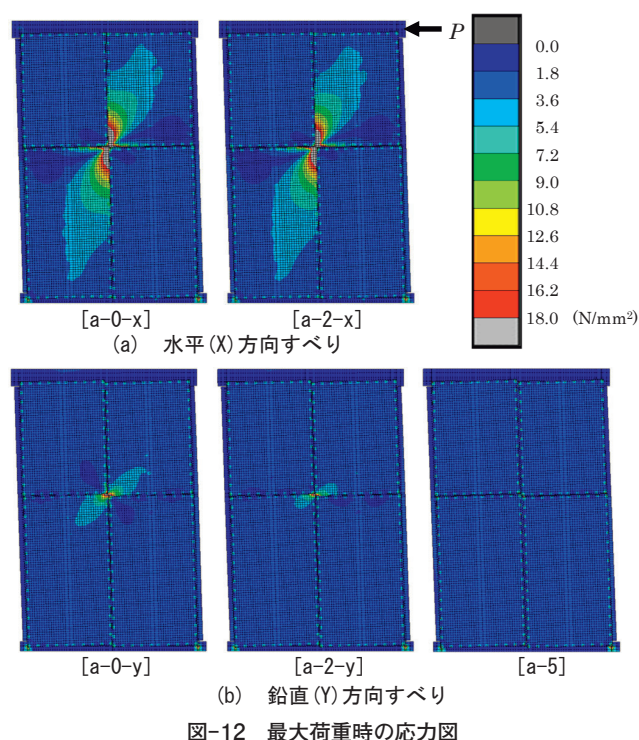


図-12 最大荷重時の応力図

図を示す。それぞれ (a) が水平 (X) 方向にすべる解析結果で、(b) が鉛直 (Y) 方向にすべる解析結果である。

図-12によると、面材が水平 (X) 方向にすべる場合は鉛直方向に応力が広がる。一方鉛直 (Y) 方向にすべる場合は水平方向に応力が広がる。水平 (X) 方向にすべり、鉛直方向に応力が生じる場合は、鉛直 (Y) 方向にすべり水平方向に応力が生じる場合と比べ、右上面材と左下面材の接触部を中心に応力が大きく生じ、力が伝達されていることがわかる。これは、図-11(a) に示すように、右上面材と左下面材の回転を妨げる方向に接触していること、横方向に比べ縦方向にくぎが多く留め付けられていることにより、水平 (X) 方向にすべる場合に大きな抵抗力が生じたためと考えられる。

3.3.2 荷重変形関係の比較

図-13に荷重 P -変形角 γ 関係 (試験結果の包絡線と解析結果の比較) を示す。黒線が試験結果を示し、赤線が解析結果を示す。図中には最大荷重 $P_{\max}$ 時に○印を記載した。

3.3.2.1 解析結果と試験結果の比較

試験結果のうち、o-0-1とo-0-3はX方向すべりモデルと類似の荷重変形関係であり、o-0-2とo-2はY方向すべりモデルと類似の荷重変形関係であった。なお、面材同士の動きの比較は3.4.3項に記載する。

図-14に試験結果と、解析結果から求めた木造耐力壁の短期基準せん断耐力算出に用いる4指標¹⁾の比較を示す。4指標の比較からも、隙間の大きさに係わらず、解析結果は試験結果を概ね再現できていることがわかる。特に $2/3P_{\max}$ は、解析と試験の対応が良い。

3.3.2.2 初期剛性の影響

図-13の解析結果によると、変形前の隙間に係わらず、面材のすべり方向の違いによる初期剛性の差は、最大荷重の差に比べると小さい。しかし、変形が大きくなるとすべり方向の違いで剛性の差が生じ、その影響は隙間が0mmなど小さい場合に早期に発生する。つまり、面材相互の隙間が大きい場合には、大きな変形まですべり方向の影響が生じにくい。

3.3.2.3 最大耐力の比較

図-13の最大耐力 (図中○印) は、隙間の大小にかかわらず水平 (X) 方向にすべる場合 (赤色実線) の方が、鉛直 (Y) 方向にすべる場合 (赤色破線) に比べ大きい。つまり、面材がどの方向にすべるかは最大耐力に影響し、X方向にすべる場合の方が大きくなる。なお、詳しい面材接触の影響については、4.3節で説明する。

3.3.2.4 すべり方向による隙間影響の比較

図-15に荷重 P -変形角 γ 関係(解析結果の比較)を示す。(a)が水平(X)方向すべりの解析結果で、(b)が鉛直(Y)方向すべりの解析結果であり、最大荷重時を○印で示した。

(a)の水平(X)方向すべりの解析結果は、 $P=10\text{kN}$ 程度から最大荷重までの剛性に差が生じ、面材相互の隙間が大きいと剛性が小さくなった。しかし、図-13に示すような面材のすべり方向の違いと比べ、隙間の間隔は影響が小さい。また、(b)の鉛直(Y)方向すべりの解析結果は面材相互の隙間に係らず荷重変形関係の差が小さかった。

3.4 面材の相対変位

図-16に図-7のA部詳細位置の面材相互の相対変位(Δx , Δy)と真のせん断変形角 γ_0 の関係を示す。図中には最大荷重時に○を記載した。

3.4.1 定義

図-16に示す面材相互の相対変位は、初期の隙間を考慮し図-7に記載した面材間の隙間 s_1 と s_2 を用いて以下の式で求めた。なお、解析結果については、 P_{018} と P_{021} と同じ位置の節点の変位から相対変位を求めた。

$$\Delta x = \delta_{x018} - \delta_{x021} - s_2 \quad (1)$$

$$\Delta y = \delta_{y021} - \delta_{y018} - s_1 \quad (2)$$

面材の傾きやめり込みが生じるため正確ではないが、 $\Delta x \geq 0$ かつ $\Delta y \geq 0$ 時に面材が接触しており、 $\Delta x > 0$ 時

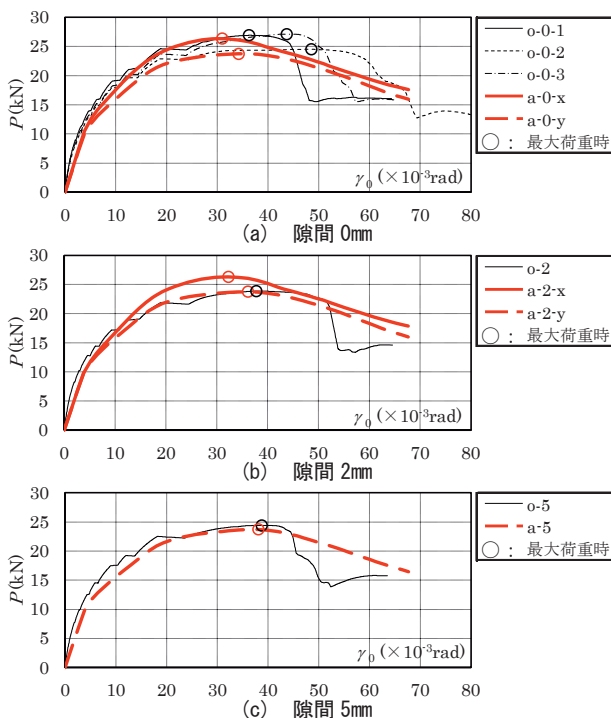


図-13 荷重 P -変形角 γ 関係(試験結果と解析結果の比較)

に水平(X)方向すべり、 $\Delta y > 0$ 時に鉛直(Y)方向にすべりが生じている。つまり $\Delta x > 0$ 時では図-11(a)のように右上面材と左下面材が接触し、 $\Delta y > 0$ 時では、図-11(b)のように右上面材と左下面材が接触する。

3.4.2 解析結果

水平(X)方向へのすべりを想定した解析(a-0-x, a-2-x)では、 γ_0 の増加と共に Δx が20mm程度まで漸増するが、 Δy は0mmから増加しない。鉛直(Y)方向へのすべりを想定した解析(a-0-y, a-2-y)では、 γ_0 の増加と共に Δy が増加し続けるが、 Δx は0mm以上にはならない。図-11(b)に示すように、 Δy 方向の変位は、右上面材と左下面材の回転を妨げない方向であり、Y方向にすべる解析の場合 Δy の増加が頭打ちにならない。

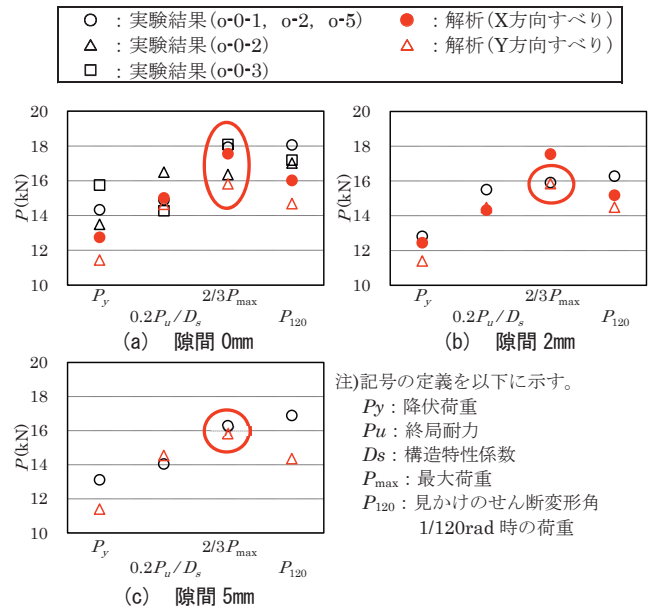


図-14 試験結果と解析結果から求めた4指標の比較

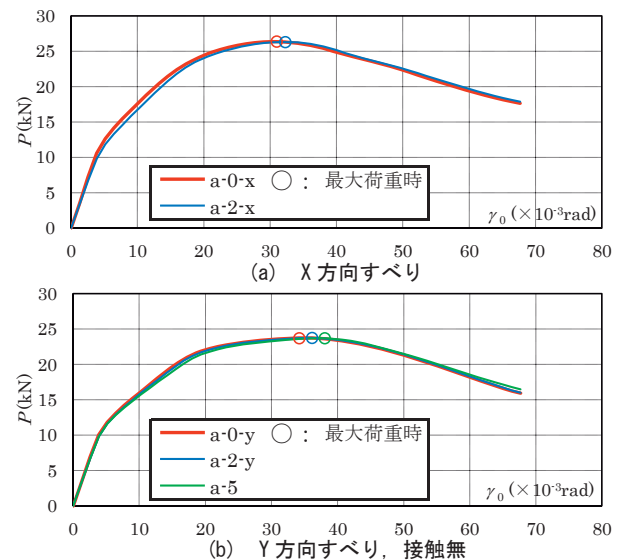


図-15 荷重 P -変形角 γ_0 関係(隙間の影響解析)

3.4.3 解析結果と試験結果の比較

図-16(a) の隙間0mmの場合、試験 (o-0-1, o-0-2, o-0-3) は Δx が水平 (X) 方向すべりの解析 (a-0-x) に近く、 Δy が鉛直 (Y) 方向すべりの解析 (a-0-y) に近い傾向を示した。

試験 (o-0-1, o-0-2, o-0-3) の Δx が大きく生じているのは水平 (X) 方向のすべりの影響だけでなく、写真-2(a) に示すように繰り返し加力中に面材の先端が圧縮破壊していることにも起因する。

Δy を詳しく見ると、図-16(a) で示すように解析 (a-0-y) は $\gamma_0=65 \times 10^{-3}$ radまで試験 (o-0-2) を再現している。一方で、試験 (o-0-1, o-0-3) は解析 (a-0-y) より Δy が小さく、最大荷重時以降に鉛直 (Y) 方向すべりの増加が止まっており、水平 (X) 方向のすべり (a-0-x) と鉛直 (Y) 方向すべり (a-0-y) の中間的な挙動を示している。

図-16(b) の隙間2mmの場合、試験 (o-2) の Δx は解析 (a-2-x) と解析 (a-2-y) の中間的なすべり量である。一方で、 Δy は概ね解析 (a-2-y) が試験 (o-2) を再現で

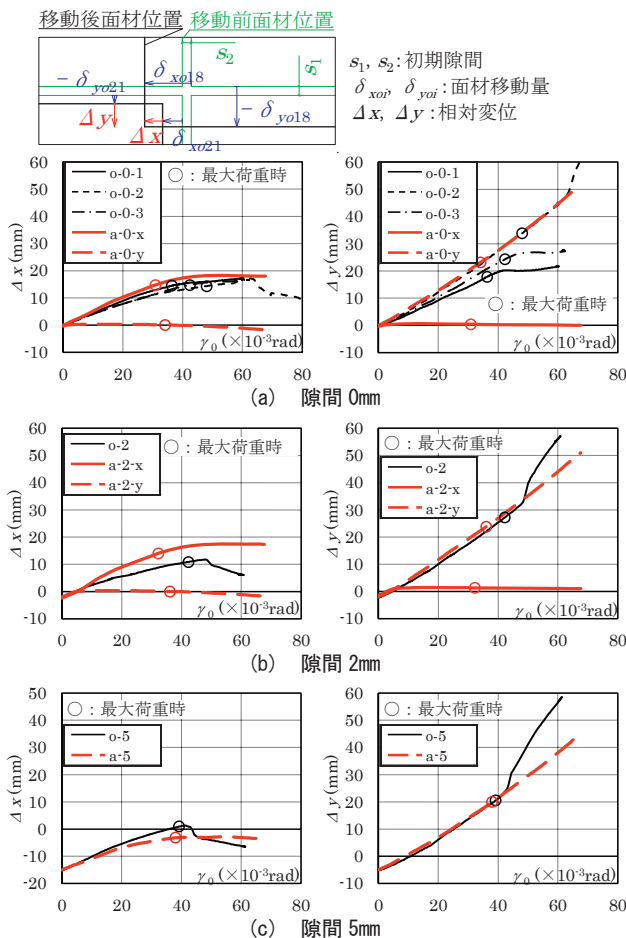


図-16 面材間のすべり量 Δx , Δy と真の変形角の関係

きている。 $\gamma_0=50 \times 10^{-3}$ rad程度から試験 (o-2) の Δy が解析より大きくなっているのは、写真-2(b) に示すように試験時に面材が面外方向に浮き、面材相互の接触抵抗が減少したことによる。

以上から、 Δy で比較すると試験 (o-0-2, o-2) はY方向すべりモデルと類似しており、試験 (o-0-1, o-0-3) はX方向すべりとY方向すべりの間であると考えられる。

図-16(c) の隙間5mmの場合、解析 (a-5) が試験 (o-5) の面材相互のすべり量を再現できている。これは、 s_2 が15mmと大きく、試験時に Δx 方向の接触がなかったことに起因する。

4. 解析結果に基づく各面材の抵抗機構と耐力

解析結果から、4枚の面材それぞれの負担せん断力を調べ、面材接触により生じる各面材の負担力と抵抗要素を検討した。

4.1 記号の定義

面材には図-17のように、それぞれにくぎのx方向荷重とy方向荷重によって、面材図芯位置まわりのモーメント M_x , M_y と、面内方向力 P_x , P_y が生じる。 M_x , M_y および P_x , P_y は、以下の式により求めた。

$$lM_x = \sum l P_{nxi} \times (ly_i - ly_0) \quad (3)$$

$$lM_y = \sum l P_{nyj} \times (lx_j - lx_0) \quad (4)$$

$$lP_x = \sum l P_{nxi} \quad (5)$$

$$lP_y = \sum l P_{nyj} \quad (6)$$

ここで、 l は面材の番号

lP_{nxi} は面材 l 内の i 位置のくぎの水平方向荷重

lP_{nyj} は面材 l 内の j 位置のくぎの鉛直方向荷重

lx_j , ly_i は原点から各くぎ配列までの距離

lx_0 , ly_0 は面材 l 内の水平および鉛直方向の中立軸位置

図-18のように、面材の中央に lP_x , lP_y が生じているとすると、各面材が負担する耐力壁の梁位置のせん断力は以下の式により求まる。

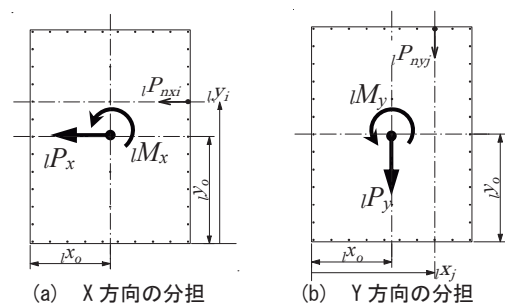


図-17 各面材の図芯まわりのモーメントおよび面内方向力

$${}_lP = \frac{{}_lM_x + {}_lP_x \times ({}_ly' - {}_ly'_0)}{2{}_ly'_0} = \frac{{}_lM_y + {}_lP_y \times ({}_lx' - {}_lx'_0)}{2{}_ly'_0} \quad (7)$$

$$P' = \sum {}_lP \quad (8)$$

ここで、 ${}_lP$ は一枚の面材が負担するせん断力($l=1\sim4$)

P' は面材が負担する耐力壁の梁位置せん断力

$2x'_0$, $2y'_0$ は耐力壁の最外くぎ留め間距離

以上より求めた面材が負担する耐力壁の梁位置のせん断力 P' と、耐力壁の梁水平荷重 P の比較を図-19に、各面材が負担するせん断力 ${}_lP$ を図-20に、面材の抵抗要素の比較を図-21に示す。図-19、図-20および図-21には、面内方向力が生じない場合の比較をするため、a-0-xと同じくぎ位置のモデルで、面材相互が接触せず貫通する解析を新たに行ない結果(a-n)を併記した。

4.2 面材が負担する耐力壁の梁位置のせん断力

耐力壁の梁水平荷重 P と面材が負担する耐力壁の梁位置のせん断力 P' は一致するはずであるが、図-19によると完全には一致しなかった。柱部材の曲げ等の影響で、 P' の算出に用いた距離が実際は多少変化していることに起因していると考えられるが、この原因については今後の検討課題とし、以降、それぞれの壁の負担について水平(X)方向にすべる場合や鉛直(Y)方向にすべる場合の違いを示し検討を進める。

4.3 面材接触により生じる各面材の負担力

図-20によると、(b)右上面材と(c)左下面材の最大負担せん断力は、a-0-xが大きく、a-0-y, a-nの順に小さくなった。これは、図-12で示した面材の圧縮応力の大きい順と符合する。(a)左上面材と(d)右下面材はa-0-yの最大耐力がa-0-xよりやや小さいが右上面材と左下面材の結果に比べると違いが少なかった。

接触を考慮しない解析(a-n)は左右の面材の荷重変形関係に差がない。一方で、接触を考慮した水平(X)方向にすべる解析(a-0-x)では、(b)右上面材と(c)左下面材の最大負担せん断力は、接触を考慮しない解析(a-n)の最大負担せん断力と比べて23~29%大きく、面材接触により左右の面材の抵抗機構に差がある事を示した。

4.4 面材の抵抗要素の耐力比較

図-21はa-0-xとa-nの解析結果について、面材の回転抵抗成分(実線)と、鉛直抵抗成分(破線)に荷重を分離して示している。図-21によると、右上と左下の面材の、面材が負担するせん断力に対する各成分の割合は、最大耐力時で回転抵抗成分は47%~59%、鉛直抵抗成分は53%~41%を占めている。水平(X)方向にすべる場合、図-11(a)のように左下面材と右上面材の回転が

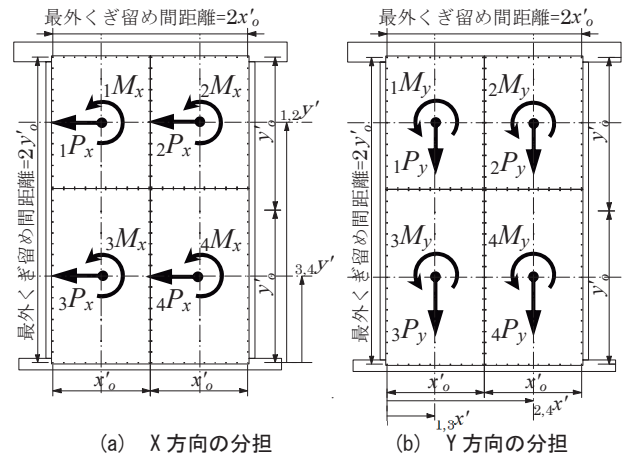


図-18 各面材が負担する耐力壁の梁位置のせん断力

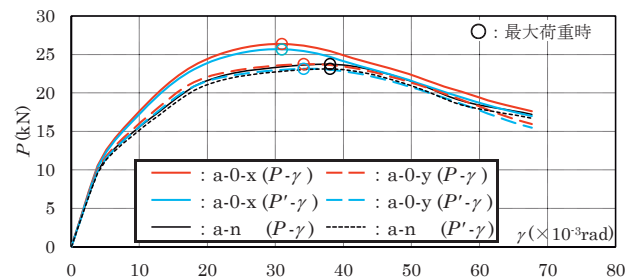


図-19 面材が負担する耐力壁の梁位置のせん断力 P' と梁水平荷重 P の比較

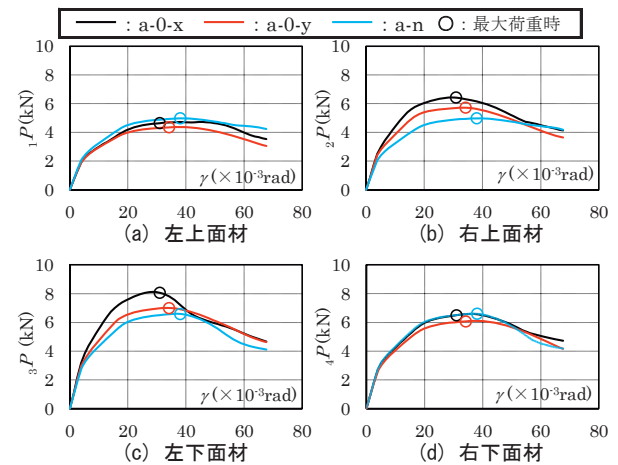


図-20 各面材が負担するせん断力 ${}_lP$

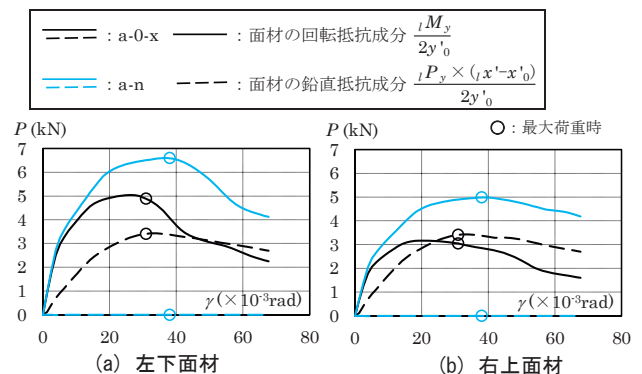


図-21 面材の接触により生じる抵抗要素の比較

抑え込まれるが、図-12(a)に示す鉛直方向の応力と共に面材全体が鉛直方向に変位した。つまり、鉛直方向の抵抗を面材くぎ全体が負担することで、面材1枚当たりの鉛直抵抗成分が大きく生じ、耐力が高くなったと考えられる。

接触を考慮し、水平(X)方向にすべる解析(a-0-x)を用いて、図-21(b)右上面材と図-21(a)左下面材の抵抗要素を回転成分と鉛直成分に分離して示し、面材が水平(X)方向にすべる場合に耐力壁の最大耐力が高くなる抵抗機構を示した。

4.5 くぎのせん断力分布

図-22に最大荷重時の左下面材のくぎせん断力分布を示す。図には回転中心位置からくぎせん断力の合力を太い矢印で併記した。なお、くぎせん断力に対して合力が大きくなるため、合力の矢印の長さをくぎせん断力に比べ1/4倍にして記載している。また、解析では胴つなぎを柱・間柱・継手間柱に留め付けていないことから、胴つなぎ位置の面材接合具のせん断力分布が乱れた。

参考文献1の詳細計算法では、面材張り大壁の許容せん断耐力の計算法を示している。単体の面材大壁で構成された耐力壁の水平力 P から生じる外力モーメントとくぎ接合具の合力の抵抗モーメントは釣り合うことから、面材のみの力の釣り合いより、 $P \cdot H = M_x = M_y$ として解いている。この際、面材のくぎを対称配置とすると、くぎのせん断力分布による中立軸位置は面材中央になる。

同様に、接触がないa-nの場合はせん断力分布が概ね対称となるため、回転中心位置は中立軸位置と同じ面材中央である。一方で、面材が接触し水平(X)方向にすべるa-0-xの場合、継ぎ目側に回転を打ち消す方向に圧縮力がかかることで、水平方向回転中心位置が継ぎ目反対側に移動する。

くぎの鉛直方向荷重(図-17(b)に示した iP_{nyj})に着目すると、図-22の全てのケースで、最大荷重時には継ぎ目反対側のくぎは全て降伏しており、a-0-xとa-0-yやa-nは同等のせん断力となる。しかし、a-0-xでは回転中心位置からの距離が近くなった分だけ生じるモーメントは小さくなる。また、回転中心位置からの距離が離れる継ぎ目側は、接触により変形が押さえつけられ、くぎのせん断力が小さくなる。その結果、a-0-xの回転抵抗成分の総和は接触しないa-nより小さくなる。

しかし、a-0-yやa-nでは水平方向回転中心位置のくぎの鉛直方向荷重(iP_{nyj})が小さいのに対し、a-0-xでは中通りを含め大きな鉛直方向荷重が生じている。これによりa-0-xは、面材の回転抵抗成分が減少するものの鉛

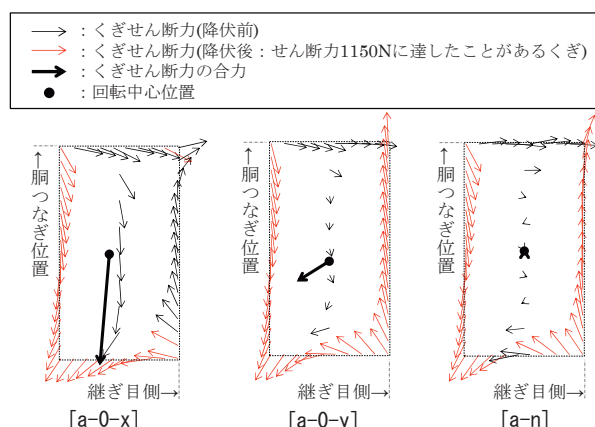


図-22 最大荷重時の左下面材のくぎせん断力分布

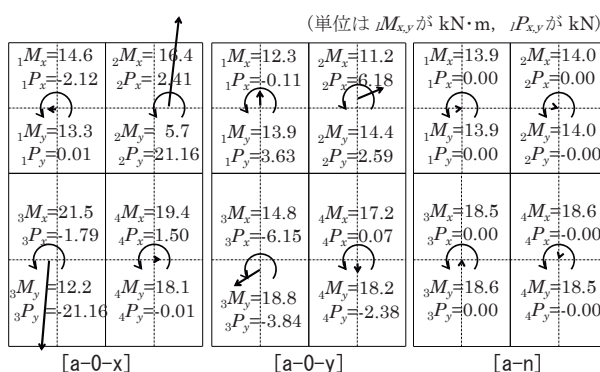


図-23 各面材の抵抗要素(最大荷重時)

直抵抗成分が上昇し、結果として耐力壁としての耐力が上昇する。

4.6 面材の接触による各面材の抵抗機構の変化

図-23に各面材の抵抗要素を示す。図中の記号は図-18に示したものであり、単位は $iM_{x,y}$ が $\text{kN} \cdot \text{m}$ 、 $iP_{x,y}$ が kN である。

面材が接触しないa-nでは、 iM_y 、 iM_x が同じモーメントであり、 $iP_x=0$ 、 $iP_y=0$ である。面材が接触するa-0-x、a-0-yでは、接触が生じる右上面材と左下面材の iP_x 、 iP_y それぞれがほぼ釣り合っている。a-0-xの右上左下面材では iP_y が大きく生じることで、 iM_y が小さくなり、a-0-yの右上左下面材では iP_x が大きく生じることで、 iM_x が小さくなっている。

式(7)に示すように、 iM_x と $iP_x \times (y'-y'_0)$ の和と、 iM_y と $iP_y \times (x'-x'_0)$ の和が釣り合うため、a-0-xでは iM_x が大きくなり、a-0-yでは iM_y が大きくなっている。

5. まとめ

縦継張りの大壁耐力壁の面材4枚の相互の接触を考慮したFEM解析を行い、面材相互の接触が大壁の荷重変形関係に及ぼす影響を検討した。その結果、以下の知

見が得られた。

- ・提案の解析モデルで試験時のすべり挙動や荷重変形角関係を再現できることを示した。
- ・面材が接触し水平方向にすべると鉛直方向にすべるより耐力壁の最大耐力が大きくなることを解析と試験で示した。
- ・面材が鉛直にすべる場合に比べ水平にすべる場合に、耐力壁の最大耐力が大きくなる一因が、対角に圧縮しあう面材の負担力が大きくなることであると解析で示した。
- ・面材相互が接触し水平にすべると、面材の回転抵抗成分に加え鉛直抵抗成分が発生することを示すことで、面材が接触し水平にすべると対角に圧縮しあう面材の負担力が大きくなる耐力発生機構を示した。

以上のように、面材相互の接触を考慮した解析により、面材間のすべり方向が耐力壁の荷重変形関係に及ぼす影響とその抵抗機構を示した。

謝辞

本研究の一部は、建築基準整備促進事業S2の一環として行われたものであり、対象の試験について試験体製作費用をサポートいただきました。ここに感謝の意を表します。

【付記】

本稿は、日本建築学会構造系論文集に掲載された既報⁹⁾を再構成したものです。

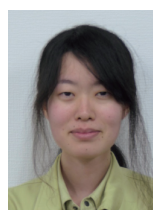
【参考文献】

- 1) 日本住宅・木材技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計2017年度版, 2017.
- 2) 村上雅英, 稲山正弘：任意の釘配列で打たれた面材壁の弾塑性挙動の予測式, 日本建築学会構造系論文集, 第519号, pp.87-93, 1995
- 3) 村上雅英, 灰原和人：面材張り大壁の受材・間柱と柱の仕口のせん断検定法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第798号, pp.780-788, 2022
- 4) Nicolas Richard, Motoi Yasumura, Luc Davenne : Prediction of seismic behavior of wood-framed shear walls with openings by pseudodynamic test and FE model, Journal of Wood Science 2003 49:23, 145-151, 2003
- 5) 小川敬多, 原田真樹, 渋谷龍也, 宮本康太：各種構造用面材を用いた釘接合部の一面せん断特性と変形状の把握, 木材学会誌, 64巻, 4号, pp.149-148, 2018
- 6) 日本ツーバイフォー建築協会：2018年枠組壁工法建築物構造計算指針, 丸善出版, 2018
- 7) 加藤百合子, 五十田博, 今西達也：木造耐力壁の解析モデル作成のためのくぎの性能確認試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造III, pp.231-232, 2020

演梗概集, 構造III, pp.231-232, 2020

- 8) 加藤百合子, 五十田博, 今西達也：面材耐力壁の挙動の見え化と抵抗機構, 日本建築学会技術報告集, 第26巻, 第64号, pp.934-939, 2020
- 9) 加藤百合子, 五十田博, 今西達也：木造軸組大壁耐力壁の面材相互の接触を考慮した抵抗機構と耐力に関する解析的研究, 日本建築学会構造系論文集, 88巻814号, pp.1674-1683, 2023

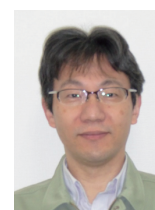
【執筆者】



*1 加藤 百合子
(KATO Yuriko)



*2 五十田 博
(ISODA Hiroshi)



*3 今西 達也
(IMANISHI Tastuya)