木質接着パネル構法における立体建物の水平抵抗機構に関する研究

A STUDY ON LATERAL RESISTANCE MECHANISM
OF THREE-DIMENSION BUILDING BY WOODEN PANELS CONSTRUCTION梶川 久光*¹, 野口 弘行*²

Hisamitsu KAJIKAWA and Hiroyuki NOGUCHI

The purpose of this study is to elucidate the lateral resistance mechanism of wooden space building and to evaluate the method of calculation for wooden structure, so two direction lateral loading tests of full scale building with two-storey is carried out. Size of the test models is 6P × 8P × two-storey (5,460 × 7,280 × 5,606), and four type models (setback type, none-eccentricity, uniaxial-eccentricity, biaxial-eccentricity) were carried out. We weighed the experiment values against the calculated values by the finite element method analysis, and deepened our consideration of lateral behavior, especially two direction load, three-dimension effect, torsional stiffness, of wooden building.

Keywords: Full Scale Test, Two Direction Load, Wooden Panels Construction, Finite Element Method, Three-dimension Effect, Torsional Stiffness

実大建物実験、2方向加力、木質接着パネル構法、有限要素法、立体効果、ねじり剛性

1 研究目的

現在に至るまで、木質構造において耐力壁のせん断実験及び実大建物の水平加力実験が多数行われ、水平力に対する抵抗機構の解明が行われてきた。しかし、単体としての耐力壁、床構面の水平力に対する力学的性状については明らかになりつつあるが、立体建物としての水平抵抗機構に関する研究はまだ不十分である。また、木質構造における構造設計においても仕様規定的で簡便なものが主流となっており構造計算と現実建物の力学的性状との整合性がよく見えてないのが現実である。そこで、本研究においては、木質接着パネル構法による立体建物実験⁴⁾⁵⁾⁶⁾、耐力壁単体実験⁷⁾¹¹⁾及び有限要素法解析を行い、木質立体建物の水平抵抗機構の解明及び、木質構造計算方法の評価を研究目的に置き次の項目について考察及び検討を行う。「立体建物におけるせん断耐力及び変形の評価」建物の水平せん断耐力を正確に評価するに際して耐力壁の荷重・変位関係の足し合わせ方法の提案及び立体建物の性状との比較検討を行う。「立体効果」立体建物の水平せん断耐力を評価する場合に、立体実験(3次元)のデータで評価する場合と単体耐力壁実験(2次元)のデータで評価する場合の違いを立体効果とし、考察及び検討を行う。「建物に斜めに水平力を受ける場合(2方向加力)の検討」斜めより水平力を受ける木質立体建物の力学的性状について考察・検討を行う。また、斜めより水平力を受ける場

合に、X方向・Y方向の足し合わせによりその性状を再現できるのかどうかを明確にしその範囲を示す。

図1 実験概要図

*¹ ミサワホーム(株)構造技術グループ 工博
*² 明治大学理工学部建築学科 教授・工博

Structural Design Group, Misawa Home Co., Ltd., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture School of Science Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.

2 実大2層立体建物における水平加力実験

2.1 試験体等

2.1.1 座標軸及び通り名

座標軸、通り名及び原点は図1に示す通りである。

2.1.2 試験体

試験体を図2に示す。試験体は木質接着複合パネル¹⁾により構成される6P×8P×建物高さ(5,460mm×7,280mm×5,606mm;1P=910mm)の2層箱形建物である。試験体の種類は、各壁面を窓型開口としたセットバック形状のもの、各壁面を窓型開口とした無偏心のもの、X8通りの壁面をドア型開口とし、その他の壁面を窓型開口とした片偏心(偏心率:Rex=0.00, Rey=0.38)のもの、X8通り及びY6通りの壁面をドア型開口とし、その他の壁面を窓型開口とした両偏心(偏心率:Rex=0.18, Rey=0.41)のものの4種類があり、それぞれフェーズ・1(セットバック)、フェーズ・2(無偏心)、フェーズ・3(片偏心)、フェーズ・4(両偏心)と設定した。また、床構面には固定荷重、積載荷重として想定したおもりを図1に示すように設置した。なお、偏心率は「3.単体耐力壁せん断実験」の結果より初期剛性を用いて算出した。各壁面の構造形状を表1に示す。又、緊結ボルト及びアンカーボルトの納まりを表2に示す。

1) 合板-JAS 構造用合板 1 級 (壁パネル:両面張り ϕ 4.0-5.5 床パネル:片面張り ϕ 12)
芯材-JAS 針葉樹構造用製材の甲種構造材 2 級 (スプルース)

図2 試験体図

2.2 実験方法

2.2.1 加力方法

加力は図1に示す反力壁に水平に並列して設置した油圧ジャッキを用い、反力床の上に設置した試験体のR階床を押し引きして行った。加力の種類は、1方向加力(等価の3点加力)、2方向加力(各方向それぞれ等価の3点加力)の2種類とし、1方向加力はX方向加力、Y方向加力を行った。加力は変位量が最大となる壁面の層間変形角で制御し(比例限度内、フェーズ・4の2方向加力のみ破壊に至るまで加力)、表3に示す加力スケジュールに従い行った。

表1 各壁面の構造形状

	X通り耐力壁	Y通り耐力壁
窓型開口		
ドア型開口		
セットバック		

・緊結ボルト設置箇所
・アンカーボルト設置箇所
(但し、R階床はアンカーボルトのみ設置)

表2 各接合部の納まり

RF 床		
2F 床		
1F 床		

表3 加力方向と加力スケジュール

	加力方法	加力スケジュール
1方向加力	X方向 	
	Y方向 	
2方向加力		

2.2.2 測定方法

測定機器の配置を図3に示す。水平荷重は、H鋼と油圧ジャッキの間に取付けた「200kN用ロードセル（2箇所：図1参照）」によって測定した。緊結ボルトの引抜力は、「100kN用ロードセル（8箇所）」を設置して測定した。変位量は、各点に変位計（148箇所）を設置して測定した。面材・枠材のせん断歪みは、「歪みゲージ（476箇所）」によって測定した。アンカーボルトの引抜力は、「ボルト用歪みゲージ（80箇所）」を用い、「土台」と「布基礎相当H型鋼」との「アンカーボルトの引抜力」を測定した。（※計測機器は全て東京測器研究所ものを使用）

図3 測定機器図例（フェーズ・2）

2.3 実験結果

2.3.1 荷重-層間変形角の関係

図4にフェーズ・4、2方向加力試験の水平荷重-層間変形角関係を、表4に剛性の低い方の耐力壁（表中の網掛け部分）の層間変形角が1/300[rad.]時における各試験体の水平荷重と各壁面の層間変形角の関係を示す。なお、フェーズ・4の2方向加力における最大耐力はX方向Y方向それぞれ146.75kN（45°方向では207.54kN）であった。

表4 荷重と層間変形角との関係

加力方法	水平荷重[kN]	2層[rad.]				1層[rad.]			
		X0	Y0	X4	Y6	X0	Y0	X8	Y6
フェーズ・1 1方向加力	X方向	48.8	X0 0.00002	X4 0.00003	X0 0.00001	X8 0.00000	Y0 0.00137	Y6 0.00137	Y0 0.00137
	Y方向	77.1	X0 0.00301	X4 0.00256	X0 0.00333	X8 0.00330	Y0 0.00012	Y6 0.00001	Y0 -0.00045
	2方向加力	65.1	X0 0.00236	X4 0.00194	X0 0.00276	X8 0.00248	Y0 0.00330	Y6 0.00333	Y0 0.00088
			Y0 0.00008	X8 0.00004	X0 -0.00004	X8 0.00009	Y0 0.00333	Y6 0.00318	Y0 0.00315
フェーズ・2 1方向加力	X方向	107.7	X0 0.00333	X4 0.00326	X0 0.00312	X8 0.00317	Y0 -0.00003	Y6 -0.00003	Y0 0.00004
	Y方向	94.2	X0 0.00330	X4 0.00333	X0 0.00312	X8 0.00314	Y0 0.00268	Y6 0.00268	Y0 0.00261
	2方向加力	106.6	X0 0.00009	X8 -0.00004	X0 0.00001	X8 0.00001	Y0 0.00333	Y6 0.00319	Y0 0.00305
			X0 0.00198	X8 0.00333	X0 0.00188	X8 0.00289	Y0 0.00030	Y6 -0.00045	Y0 0.00029
フェーズ・3 1方向加力	X方向	109.6	X0 0.00199	X8 0.00333	X0 0.00188	X8 0.00309	Y0 0.00156	Y6 0.00072	Y0 0.00149
	Y方向	47.4	X0 0.00017	X8 -0.00045	X0 0.00013	X8 -0.00065	Y0 0.00286	Y6 0.00333	Y0 0.00267
	2方向加力	51.5	X0 0.00191	X8 0.00333	X0 0.00175	X8 0.00290	Y0 0.00027	Y6 -0.00059	Y0 0.00027
			X0 0.00204	X8 0.00333	X0 0.00187	X8 0.00297	Y0 0.00161	Y6 0.00102	Y0 0.00158
フェーズ・4 1方向加力	X方向	85.1	X0 0.00161	Y6 0.00102	Y0 0.00158	V6 0.00077			
	Y方向	43.4							
フェーズ・4 2方向加力	X方向	48.1							
	Y方向								

2.3.2 破壊性状

表5にフェーズ・4の2方向加力試験を行った時の破壊性状を示す。表中の①～④は図4に示す箇所における破壊性状を示す。破

図4 水平荷重-層間変形角曲線（フェーズ・4）

壊はX8通りの壁構面がローリングシヤー破壊（せん断力が働く方向が単板の繊維方向と直角をなすときに、直角方向の繊維をころがすような形で起こる破壊）^{1) pp259-261}を起こし、最大荷重後、原点の脚部において柱の引き抜けや土台へのめり込みが起こった。最大耐力を決定する破壊性状としては、合板のローリングシヤー破壊が挙げられる。

表5 破壊性状

破壊性状	
①	耐力壁の小壁（垂壁・腰壁）の接合部が開く。
②	X8通り壁パネルの合板の面外屈曲及びローリングシヤー破壊（Pmax）
③	(X0,Y0)の脚部においてホールダウン金物の釘が破壊し柱が引き抜けた。
④	X8通り側の柱が破壊し2F床の胴差しが折れ曲がった。

2.3.3 引き抜き力

表 6 に各試験体の脚部引き抜き力 (同位置に緊結ボルト、アンカーボルトが数本ある場合はその合計) を示す。水平荷重は X 方向加力及び Y 方向加力の場合は 40kN、XY 方向加力の場合は各方向において 40kN である。

表 6 各試験の脚部引き抜き力 [kN]

	位置	X方向加力	Y方向加力	XY方向加力
フェーズ・1	X0, Y0	10.60	13.73	21.40
	X0, Y6	5.42	-4.67	-0.50
	X8, Y0	-2.82	-0.80	-2.60
	X8, Y6	-2.29	0.47	-1.08
フェーズ・2	X0, Y0	7.62	11.70	18.30
	X0, Y6	4.76	-4.81	-1.98
	X8, Y0	-3.08	-0.38	-2.80
	X8, Y6	-3.09	2.29	-2.48
フェーズ・3	X0, Y0	6.63	16.06	21.57
	X0, Y6	5.09	-5.54	-2.99
	X8, Y0	-2.68	-0.10	-2.04
	X8, Y6	-2.61	2.25	-1.10
フェーズ・4	X0, Y0	7.45	16.45	24.02
	X0, Y6	4.41	-5.02	-2.49
	X8, Y0	-2.53	1.35	-1.44
	X8, Y6	-3.62	3.08	-0.79

3 単体耐力壁せん断実験

3.1 実験概要

本実験は耐力壁の力学的性状を解明する為及び実大建物と単体壁の相関性を検証する為に独立法人森林総合研究所実験棟において計 17 体⁷⁾、明治大学理工学部構造物試験棟において計 10 体¹¹⁾の合計 27 体行われた。加力方法としては正負交番繰り返し載荷と単調載荷の 2 種類とし、壁面の見掛けのせん断変形角により制御し、破壊に至るまで行った。測定は「変位計・歪みゲージ・ロードセル」を用い、各点を測定した。

図 5 実験概要図

3.1.1 実験結果

実験結果として本検証「5.1 及び 5.2」で用いる試験体の荷重-せん断変形角曲線 (包絡線) を図 6 に示す。

4 有限要素法解析

4.1 解析モデル

解析モデルを図 7 に示す。解析モデルは実大実験の試験体形状及び試験体寸法を基本とし床構面のせん断弾性係数を変化させた有限要素法解析による立体解析モデルである。パラメータとして、壁長を 6P 及び 8P の 2 種類、偏心率として無偏心、片偏心及び両偏心の 3 種類、床構面のせん断弾性係数を 49.03[N/mm²](在来軸組構法相当)、147.10[N/mm²](枠組壁工法相当)、392.27[N/mm²](木

図 6 荷重-せん断変形角曲線

質接着パネル構法相当)、1177.80[N/mm²](木質接着パネル構法相当の 3 倍) の 4 種類、加力方法として X 方向加力、Y 方向加力及び 2 方向同時加力の 3 種類、脚部のバネ剛性として緊結ボルトのバネ剛性を 18.6[kN/mm](M-18 相当)、9.3[kN/mm](M-18 相当の 1/2)、1.9[kN/mm](M-18 相当の 1/10) の 3 種類を設定した。モデル化において、土台、枠材、胴差、パネル芯材等を置換したフレーム材要素、壁パネル合板、床合板等を置換した長方形双一次要素、緊結ボルト、アンカーボルト等を置換したバネ要素を用いた。また、鉛直荷重については自重及び固定荷重を想定して設定した。

図 7 解析モデル

4.2 解析方法

解析方法は荷重増分法とし、各要素の変位量 (バネ要素) 及び応力度 (面材要素) により剛性を変化させた弾塑性解析を用いた。

4.3 入力データ

解析で用いた材料定数を表 7 に示す。材料定数は、部材実験及び「木質構造設計基準・同解説¹⁸⁾」の値を参考にして決定した。めり込みバネ要素の剛性は柱の土台へのめり込みの初期剛性を求める計算式¹²⁾を参考した。但し、実験で、パネル芯材が壁の回転により局部的にめり込みが集中していることから、初期剛性算定式に 1/2 を乗じた。

表 7 入力データ

要素名	部材名	区分 ^{※1}	K(N/mm) ^{※2}	E _x (kN/mm ²) ^{※3}	E _y (kN/mm ²) ^{※4}	G(N/mm ²) ^{※5}	ν ^{※6}
フレーム材	土台	弾性要素	-	13.6	-	453	-
	柱材	弾性要素	-	13.6	-	453	-
	梁材	弾性要素	-	13.6	-	453	-
	パネル芯材	弾性要素	-	13.6	-	453	-
長方形双一次	壁/パネル合板	弾性要素	-	10.5	7.3	392.27	0.04
		弾性要素	-	10.5	7.3	198.13	0.04
		弾性要素	-	10.5	7.3	98.07	0.04
		弾性要素	-	10.5	7.3	98.07	0.04
パネ	緊結ボルト	0.0~1.0	9316.32	-	-	-	-
		1.0~3.0	8237.59	-	-	-	-
		3.0~5.0	6864.66	-	-	-	-
		5.0~7.0	2942.00	-	-	-	-
	アンカーボルト	7.0~10.0	1961.33	-	-	-	-
		10.0~25.0	178.52	-	-	-	-
		0.0~1.5	4249.71	-	-	-	-
		1.5~19.2	581.53	-	-	-	-
	めり込みパネ	19.2~20.0	9.81	-	-	-	-
		0.0~9.0	9806.65	-	-	-	-
		9.0~40.0	1961.33	-	-	-	-
		40.0~2.0	4707.19	-	-	-	-
開口パネ	開口パネ	2.0~10.0	1.00	-	-	-	-

※1 長方形双一次要素は応力度(N/mm²)、パネ要素は伸び量(mm)

※2 K剛性

※3 E_x縦断方向のヤング係数※4 E_y横断方向のヤング係数

※5 Gせん断弾性係数

※6 ν ポアソン比

4.4 実験結果と解析結果の比較・検討

実験値と解析値をフェーズ・4試験体の2方向加力での「荷重-層間変形角関係」及び「変形挙動」について比較・検討する。

4.4.1 荷重-層間変形角関係

図8にX8通りにおける各層の荷重-層間変形角関係を示す。図8より、実験値と解析値とがよく一致しているのが確認された。

図 8 荷重-層間変形角関係:X8 通り

4.4.2 変形挙動

図9にX8通りにおける層間変形角が1/200[rad.]時の変形図を示す。実際の変形は微小であり、比較が困難なため変形を20倍にして示す。

図 9 変形挙動 (変形量 20 倍)

4.4.3 本解析方法の有効性

本解析は、初期から中期剛性までは非常に良く挙動を再現できている。最大荷重時の変形性状は若干の差異が見られた。今後の課題としては最大荷重時のローリングシヤー破壊モードの導入及び最大荷重時以降の解析表現が挙げられるが、本研究目的に挙げる立体建物の「立体効果」、「斜めにより水平力を受けた時の挙動」を検討する為には有効な手段であると言えよう。

5 考察及び検討

5.1 立体効果

本研究における立体効果とは、図10に示すように立体建物(3次元)の荷重-変位関係と、立体建物(3次元)の変形とその時の耐力壁単体(2次元)のせん断耐力を用いて算出された荷重-変位関係との違いとしている。立体効果が小さいと2次元のデータで立体建物を評価できており、逆に大きいと評価できていない(構造計算にプラス α の余裕がある)ということになる。本研究で定義した立体効果が、偏心率、床構面のせん断弾性係数を変化させるとどのような性状を示すのかを検討し、立体建物の水平せん断耐力および変形状の評価方法について提案を行いたい。

図 10 立体効果の考え方

5.1.1 偏心率の違いが立体効果に及ぼす影響 (実験結果の検証)

偏心率の違いが立体効果に及ぼす影響について検証する。表8に偏心率と立体効果の関係を示す。また、フェーズ・4、2方向同時加力により破壊に至るまで行った結果を図11及び図12に示す。

表 8 偏心率と立体効果の関係 [kN]

	X方向	立体建物	足し合わせ(耐力壁)	立体効果
フェーズ・2 Rex 0.00	1/960 [rad.]	47.6	43.9	8%
	1/750 [rad.]	58.6	56.1	4%
	1/600 [rad.]	73.4	68.8	7%
	1/450 [rad.]	94.6	90.0	5%
フェーズ・2 Rey 0.00	1/960 [rad.]	40.6	39.2	4%
	1/750 [rad.]	50.8	47.4	7%
	1/600 [rad.]	62.1	56.4	10%
	1/450 [rad.]	81.1	71.4	14%
フェーズ・3 Rex 0.00	1/960 [rad.]	47.4	43.9	8%
	1/750 [rad.]	59.5	56.1	6%
	1/600 [rad.]	73.0	69.4	5%
	1/450 [rad.]	94.6	90.1	5%
フェーズ・3 Rey 0.38	1/960 [rad.]	30.3	26.7	14%
	1/750 [rad.]	37.0	32.4	14%
	1/600 [rad.]	44.6	38.5	16%
	1/450 [rad.]	49.9	43.4	15%
フェーズ・4 Rex 0.18	1/960 [rad.]	41.1	37.1	11%
	1/750 [rad.]	51.5	46.7	10%
	1/600 [rad.]	62.8	55.7	13%
	1/450 [rad.]	81.4	72.7	12%
フェーズ・4 Rey 0.41	1/960 [rad.]	27.6	26.8	3%
	1/750 [rad.]	34.4	32.2	7%
	1/600 [rad.]	42.4	38.6	10%
	1/450 [rad.]	46.4	41.8	11%

表8より、立体効果はフェーズ・2(無偏心)では4~14%、フェーズ・3(片偏心)ではX方向で5~8%、Y方向で14~16%、フェーズ・4(両偏心)ではX方向で10~13%、Y方向で3~11%となっ

	層間変形角(rad.)															
	1/2364	1/1440	1/1071	1/688	1/507	1/398	1/282	1/220	1/184	1/166						
(1) 立体建物	20.1	30.6	40.3	55.7	79.4	100.0	129.0	143.3	155.1	161.4						
(2) (3)~(4)	16.0	24.9	32.2	46.6	62.9	78.8	104.6	129.2	149.0	160.3						
(3) 8P型開口	12.4	20.0	25.9	33.8	50.5	64.6	86.1	107.5	127.2	141.2						
(4) 8P型開口	5.3	7.7	9.9	18.0	19.4	23.0	30.1	36.0	38.4	36.9						
(5) 立体効果	26%	23%	25%	20%	26%	27%	23%	11%	4%	1%						

単位: kN

図 11 立体建物と足し合わせ（耐力壁）の相関性
（両偏心：2 方向加力：荷重心の X 方向変形角）

	層間変形角(rad.)															
	1/1138	1/723	1/548	1/363	1/250	1/191	1/128	1/98	1/81	1/65	1/37					
(1) 立体建物	20.1	30.6	40.3	55.7	79.4	100.0	129.0	143.3	155.1	161.4	129.3					
(2) (3)~(4)	21.7	30.5	37.8	53.0	70.6	86.6	119.1	142.2	154.2	149.6	107.3					
(3) 8P型開口	14.8	20.5	25.0	35.1	46.9	57.3	78.9	93.8	105.8	108.5	74.5					
(4) 8P型開口	6.9	10.1	12.8	18.0	23.7	29.3	40.2	48.5	48.4	41.2	32.8					
(5) 立体効果	-7%	0%	7%	8%	13%	15%	8%	1%	8%	20%	20%					

単位: kN

図 12 立体建物と足し合わせ（耐力壁）の相関性
（両偏心：2 方向加力：荷重心の Y 方向変形角）

た。偏心率が大きいと立体効果も大きくなり、偏心率が小さいと立体効果も小さくなる傾向にある。これは偏心率が大きいと直交壁及び床構面がねじれを抑制する効果が大きくなる為だと考えられる。

図 11 及び図 12 の荷重-層間変形角関係を見ると立体建物 (3 次元) の場合と、耐力壁の足し合わせ (2 次元) では立体効果において最大 20% の違いが見受けられるが、立体建物の構造計算を行う上では、耐力壁の足し合わせ (2 次元) は、立体建物 (3 次元) を充分再現できると考えられる。

5.1.2 脚部のバネ剛性の違いが立体効果に及ぼす影響 (解析結果の検証)

ここでは、2 層立体建物の解析モデルにおける脚部 (緊結ボルト) のバネ剛性を 1.9[kN/mm] ($\phi 18$ 相当の 1/10)、9.3[kN/mm] ($\phi 18$ 相当の 1/2)、18.6[kN/mm] ($\phi 18$ 相当) と変化させたモデル解析データを用いて脚部のバネ剛性が立体効果に及ぼす影響についての検証を行う。表 9 に脚部のバネ剛性と立体効果の関係を示す。表 9 より、立体効果は脚部のバネ剛性が緊結ボルト径 $\phi 18$ 相当の 1/10 のタイプで 8~19[%]、 $\phi 18$ 相当の 1/2 で 2~11[%]、 $\phi 18$ 相当のタイプで 1~8[%] と脚部のバネ剛性が小さいと立体効果は大きくなり、脚部のバネ剛性が大きいと立体効果は小さくなる傾向にある。

これは、脚部 (緊結ボルト) のバネ剛性が小さいと立体建物において脚部の回転に占める直交壁のアンカーボルトの抵抗が占める割合が大きくなり、直交壁の壁脚部反力を考慮しない「耐力壁の足し合わせ (2 次元)」と比較すると、立体効果は大きくなると考えられる。脚部 (緊結ボルト) のバネ剛性が大きい場合は、脚部の変

形は緊結ボルトがほとんど抵抗するため、直交壁の壁脚部反力を考慮しない「耐力壁の足し合わせ (2 次元)」と比較しても、立体効果はほとんど現れていないと考えられる。

表 9 脚部の剛性と立体効果の関係 [%] (層間変形角 1/750[rad.] 時)

試験体	床剛性 [N/mm ²]	脚部バネ剛性		
		1/10	1/2	1/1
フェーズ・2	X 方向	49.03	16	11
		147.10	16	11
		392.27	16	11
		1176.80	16	11
	Y 方向	49.03	30	20
		147.10	30	20
フェーズ・3	X 方向	49.03	15	10
		147.10	15	10
		392.27	15	10
		1176.80	15	10
	Y 方向	49.03	37	27
		147.10	36	26
フェーズ・4	X 方向	49.03	13	9
		147.10	13	9
		392.27	13	9
		1176.80	13	9
	Y 方向	49.03	36	26
		147.10	36	26

5.2 立体建物におけるせん断耐力及び変形の評価

「5.1 立体効果」における検証により、偏心率及び床剛性の変化により立体効果は変化するものの実験値においては最大 16%、解析値においては最大 11% 程度という結果であり、立体建物 (3 次元) の荷重-層間変形角関係は立体建物 (3 次元) の変形を考慮した耐力壁 (2 次元) の足し合わせにより充分再現できると考えられる。

5.3 建物に斜めに水平力を受ける場合 (2 方向加力) の検討

5.3.1 水平荷重と各構面の層間変形角との関係

表 10 に X 方向加力と Y 方向加力の足し合わせに対する 2 方向加力の層間変形角の割合 (実験値及び解析値：水平荷重 40kN 時) を示す。実験値、解析値共に偏心率の違いにより、若干の差異 (実験値においては 1~2 割程度小さい、解析値においては 0.1~0.7 割程度) が見られたものの、整合性が取れていると思われる。また、有限要素法解析により床構面のせん断弾性係数を (49.03[N/mm²] ~ 1177.80[N/mm²]) と変化させたが、床構面のせん断弾性係数が層間変形角の割合に与える影響は見受けられない。よって建物に斜めに水平力を受ける場合に、X 方向 Y 方向の足し合わせによりその性状を再現できると考えられる。

5.3.2 床構面における変形図

図 13 に 2 方向同時加力及び X 方向加力と Y 方向加力の足し合わせの 2 階床構面及び R 階床構面の変形図 (実験値及び解析値：水平荷重 40kN) をフェーズ・4 試験体について示す。(見やすくする為に変形を 10 倍としている。) X 方向、Y 方向の足し合わせの変形と 2 方向同時加力における変形は似通った性状を示した。

表 10 足しあわせに対する 2 方向加力の層間変形角の割合 [%]

	層	実験値	解析値 (床剛性: N/mm ²)			
			49.03	147.10	392.27	1177.80
フェーズ・1	X0 2層	92.6	-	-	-	-
	X0 1層	93.7	-	-	-	-
	X8 2層	88.4	-	-	-	-
	X8 1層	83.5	-	-	-	-
	Y0 2層	70.4	-	-	-	-
	Y0 1層	65.2	-	-	-	-
フェーズ・2	Y6 2層	79.8	-	-	-	-
	Y6 1層	84.4	-	-	-	-
	X0 2層	86.3	101.3	101.3	101.4	101.4
	X0 1層	83.1	100.4	100.5	100.5	100.5
	X8 2層	82.7	102.1	101.9	101.8	101.7
	X8 1層	86.6	101.1	101.1	101.1	101.1
フェーズ・3	Y0 2層	86.9	102.3	102.4	102.4	102.4
	Y0 1層	86.6	102.0	102.1	102.1	102.1
	Y6 2層	92.2	102.9	102.7	102.6	102.4
	Y6 1層	92.3	101.3	101.3	101.3	101.3
	X0 2層	90.9	102.2	102.3	102.2	102.2
	X0 1層	89.5	101.4	101.5	101.2	101.3
フェーズ・4	X8 2層	91.2	102.1	101.8	101.6	101.4
	X8 1層	96.1	101.4	101.3	101.2	101.2
	Y0 2層	83.9	95.9	96.6	97.0	97.3
	Y0 1層	94.6	98.7	98.7	98.9	98.8
	Y6 2層	81.1	96.8	96.2	95.8	95.5
	Y6 1層	75.4	96.7	95.8	95.8	95.7
フェーズ・4	X0 2層	93.3	101.6	101.9	102.1	102.1
	X0 1層	89.0	100.5	100.6	100.5	100.5
	X8 2層	95.8	103.2	103.1	102.9	102.8
	X8 1層	101.5	101.8	101.7	101.8	102.0
	Y0 2層	86.4	96.1	96.6	97.0	97.2
	Y0 1層	92.6	98.3	98.2	98.0	97.9
フェーズ・4	Y6 2層	88.5	96.9	95.8	94.9	94.4
	Y6 1層	78.6	94.8	93.9	93.6	93.6

実験値

解析値

図 13 床構面の変形図 (変形量 10 倍)

5.3.3 脚部の引き抜き力

表 11 に 2 方向加力に対する X 方向加力と Y 方向加力の足しあわせの引き抜き力の割合 (実験値及び解析値: 水平荷重 40kN) を示す。また、現行の構造計算方法の検証として実験値及び解析値を用いて、X 方向と Y 方向で水平力が 40kN として独立検討した引き抜き力と斜め 45° 方向に水平力が 40kN 相当とした 2 方向加力

($1/\sqrt{2}$ 倍) との比較を表 12 に示す。表中の網掛けは各試験体において引き抜き力が最大を示した箇所を示す。これによると、X 方向、Y 方向の引き抜き力よりも斜めの外力の方が厳しくなる場合があり注意が必要である。

表 11 2 方向加力の足しあわせに対する引き抜き力の割合

		実験値	解析値 (床剛性: N/mm ²)			
			49.03	147.10	392.27	1177.80
フェーズ・1	①足し合わせ [kN]	24.33	-	-	-	-
	②2方向加力 [kN]	21.40	-	-	-	-
	②/① [%]	87.96	-	-	-	-
フェーズ・2	①足し合わせ [kN]	19.32	17.34	17.34	17.35	17.34
	②2方向加力 [kN]	18.30	22.17	22.19	22.20	22.21
	②/① [%]	94.72	127.84	127.96	128.00	128.07
フェーズ・3	①足し合わせ [kN]	22.69	23.52	25.11	25.99	26.36
	②2方向加力 [kN]	21.57	28.16	29.77	30.56	30.95
	②/① [%]	95.06	119.74	118.56	117.60	117.45
フェーズ・4	①足し合わせ [kN]	23.90	25.17	27.00	27.86	28.27
	②2方向加力 [kN]	24.02	29.66	31.49	32.36	32.77
	②/① [%]	100.50	117.83	116.62	116.14	115.90

表 12 1 方向加力と 2 方向加力の引き抜き力における相関性

試験体	検討方向	実験値	解析値 (床剛性: N/mm ²)			
			49.03	147.10	392.27	1177.80
フェーズ・1	X方向	10.60	-	-	-	-
	Y方向	13.73	-	-	-	-
	斜め45° 方向	14.70	-	-	-	-
フェーズ・2	X方向	7.62	6.72	6.71	6.72	6.72
	Y方向	11.70	10.62	10.63	10.63	10.62
	斜め45° 方向	13.06	14.07	14.08	14.09	14.10
フェーズ・3	X方向	6.63	7.04	7.04	7.05	7.05
	Y方向	16.06	16.48	18.07	18.94	19.30
	斜め45° 方向	14.61	18.31	19.43	19.99	20.27
フェーズ・4	X方向	7.45	8.94	9.41	9.64	9.76
	Y方向	16.45	16.23	17.58	18.22	18.52
	斜め45° 方向	16.82	19.36	20.65	21.26	21.55

6 まとめ

6.1 立体建物におけるせん断耐力及び変形の評価

荷重-層間変形角関係において立体建物 (3 次元) と、耐力壁の足し合わせ (2 次元) では立体効果において最大 20% の違いが見受けられるが、立体建物の構造計算を行う上では、立体建物 (3 次元) の変形を考慮した耐力壁 (2 次元) の足し合わせにより立体建物 (3 次元) を充分再現できると考えられる。

6.2 立体効果

- ・偏心率においては、若干ではあるが偏心率が大きい方が立体効果が大きい。
- ・立体効果に及ぼす床剛性の影響はほとんど無い。
- ・立体効果に及ぼす影響が最も大きい因子は脚部接合部の剛性である。(直交壁の壁脚部反力及び変形が立体建物 (3 次元) の水平変位に大きく影響していると考えられる。)

6.3 建物に斜めに水平力を受ける場合 (2 方向加力) の検討

水平力に対する耐力壁のせん断力の検討等においては、X 方向 Y 方向それぞれの検討を行えばよい。

水平力に対する耐力壁脚部の検討は斜めからの水平力を受ける場合を X 方向 Y 方向の足しあわせで表現できることを実大建物に

おける実験及び有限要素法を用いた解析で確認できた。また、水平力に対する脚部接合部の引き抜き力の検討においては X,Y 方向より斜めの外力の方が厳しくなる場合があり、注意が必要である。(木質パネル構法においては出隅の緊結ボルト及びアンカーボルトが X 方向,Y 方向の 2 方向に期待している為)

なお、本研究の一部は、平成 10 年～14 年度の文部省学術フロンティア推進事業の重点研究費：「激震動を受ける建築構造物及び機器・装置の耐震性能の向上化」(研究代表者：洪忠憲)及び平成 12 年度よりの文部科学省科学研究費補助金(基盤研究 A)：「直下地震に対する部材、架構の耐震性能向上に関する研究」(研究代表者：野口弘行)によった。

謝辞

本研究の実験実施にあたり、小林幹大氏・富居勝宏氏・渦波きさら氏・福岡崇博氏・1999 年度の卒業研究生諸氏・及びミサワホーム 技術部所員の方々に多大なご協力を得た。また、本論文をまとめるにあたり、小川春彦氏にご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 杉山英男:建築構造学大系 22 木構造, 株式会社 彰国社, 1971.
- 2) 杉山英男, 松本忠史: Empirical Equations for Estimation of Racking Strength of a Plywood-Sheathed Shear Wall with Openings, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.89～90, 1994.9
- 3) 秋山真一, 村上雅英: 立体効果を考慮した振れ変形の簡易評価モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.203～204, 1997.9

- 4) 野口弘行, 梶川久光, 富居勝宏, 平田俊次: 実大 2 階建木質パネル住宅の 2 方向加力実験に関する研究～その 1・研究目的及び実験概要～, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.185～186, 2000.9
- 5) 富居勝宏, 野口弘行, 梶川久光, 中尾行宏: 実大 2 階建木質パネル住宅の 2 方向加力実験に関する研究～その 2・現設計法との比較・検討～, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.187～188, 2000.9
- 6) 梶川久光, 野口弘行, 老岐俊英: 実大 2 階建木質パネル住宅の 2 方向加力実験に関する研究～その 3・2 方向火力による影響について～, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.189～190, 2000.9
- 7) 神谷文夫, 杉本健一, 三井信宏, 平田俊次, 老岐俊英, 梶川久光: 面材接着耐力壁のせん断耐力に及ぼす壁長さ, 壁高さ, 開口率の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.387～388, 2001.9
- 8) 福岡崇博, 本岡淳一, 梶川久光, 富居勝宏, 平田俊次, 野口弘行: 木質立体建物のねじれ挙動に関する研究～その 1・耐力壁せん断実験及び解析検証～, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.225～226, 2001.9
- 9) 富居勝宏, 梶川久光, 野口弘行: 木質立体建物のねじれ挙動に関する研究～その 2・立体効果について(実験的検証)～, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.227～228, 2001.9
- 10) 梶川久光, 富居勝宏, 野口弘行: 木質立体建物のねじれ挙動に関する研究～その 3・床剛性を考慮したねじれ挙動について～, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.229～230, 2001.9
- 11) 福岡崇博, 梶川久光, 野口弘行: 木質接着パネル構法による開口を有する耐力壁のせん断挙動に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.323～324, 2002.8
- 12) 稲山正弘: 木材のめり込み理論とその応用-靱性を期待したラーメン接合部の耐震設計法に関する研究-, 東京大学工学部坂本松村研究室 1991 年学位論文, 1991.12
- 13) 日本建築学会(編): 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), 1990
- 14) 木質構造研究会(編): 木質構造建築読本, 1994
- 15) 日本建築学会(編): 木質構造設計ノート, 1995
- 16) 杉山英男: 木質構造 第 3 版, 2001
- 17) 菊池重昭: 建築学構造シリーズ 建築木質構造, 2001
- 18) 日本建築学会(編): 木質構造設計規準・同解説, 2002
- 19) 日本ツーバイフォー建築協会: 2002 年 枠組壁工法建築物構造計算指針, 2002

(2003 年 5 月 9 日原稿受理, 2004 年 4 月 6 日採用決定)