

短い軸組斜材を使用した木造耐震補強枠組壁の性能評価

坪山 宗由*・岩井 哲**・佐藤 立美**

(平成24年10月31日受付)

Evaluation of earthquake-resistant improvement capacity of wooden framed walls using short diagonal members

Muneyoshi TSUBOYAMA, Satoshi IWAI and Tatsumi SATO

(Received Oct. 31, 2012)

Abstract

This study aims for earthquake-resistant improvement to reuse timber members pulled down from old existing houses. Totally seven type of specimens were used to horizontally static loading test. The load carrying capacity, deformability, hysteretic energy absorption capacity, and failure mode of the specimens were investigated to compare each other. It is confirmed that the specimens installed three sets of crossed short-diagonal members subjected to both tension and compression with steel joint plates and bolts, those were about 2.0 of wall unit multiplier, had some range of deviation on the load-carrying capacity and other earthquake-resistant properties. On the other hand, the test specimens with diagonal members subjected to only compression and no tension, had relatively high load-carrying capacity that show about 4.0 of wall unit multiplier and also large hysteretic energy absorption quantities.

Key Words: wooden frame, earthquake-resistant improvement, static loading test, wall amount multiplier, hysteretic energy absorption, failure property

1. 研究目的

本研究は、木造の解体家屋から得た柱・はり材などの資材を既存建物の耐震改修用に再使用することを目指したものである。耐震改修用に資材を数多く提供することが見込めるように、できるだけ短い軸組材を用いることにした。

解体家屋から得た資材(古材)は新しい建築資材(新材)より強度が高く、耐力壁として十分使用できるものである。しかし、古材を利用した耐力壁の研究は行われていない。木材の耐力壁利用という点では、広島県立総合技術研究所 林業技術センターが、間伐材を利用した耐力壁の製作を行っている¹⁾。間伐材を利用した壁でも十分な耐力を持つ壁の製造ができることが確認されている。小松ら²⁾は、既存の柱にラグスクリュー4本で留め付けるという簡単な

施工ができる耐震箱を提案している。しかし、柱に対して貫やボルト接合をすると施工性能は上がるが、柱の断面欠損による折損が心配される。

著者らが施行した研究³⁾では、耐震性能を調査することを目的とするため、古材ではなく新材を使って7種の軸組耐力壁を用意し、破壊に至るまでの水平力荷重実験を行った。これらの壁体は、壁倍率で約2.0を得ることができ、粘り強い変形能力をもつ壁体となった。試験体の種別ごとに1体しか荷重実験を行わなかったため、材料・施工のばらつきの影響をみることができなかった。木材は同じ1本の木からとった材でも強度や粘りに良し悪しが出る。良質な木材でも大工技術が未熟だと壁の耐力低下を招く原因となる。

ばらつきの影響と適正な壁倍率の算定のために、本研究

* 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

** 広島工業大学工学部建築工学科

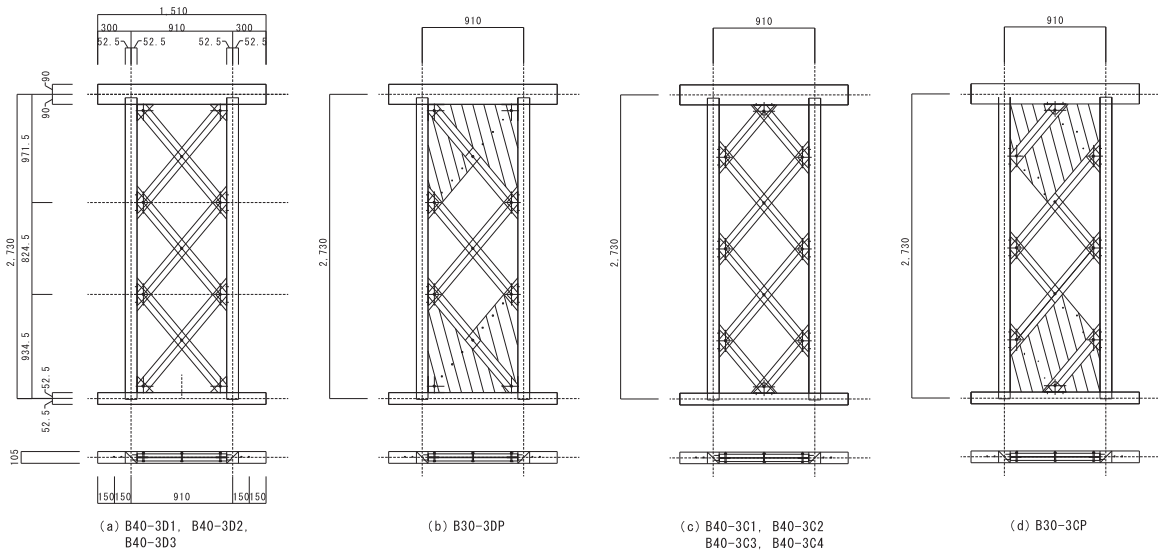


図1 対角留め，合板貼り対角留め，中央留め，合板貼り中央留め

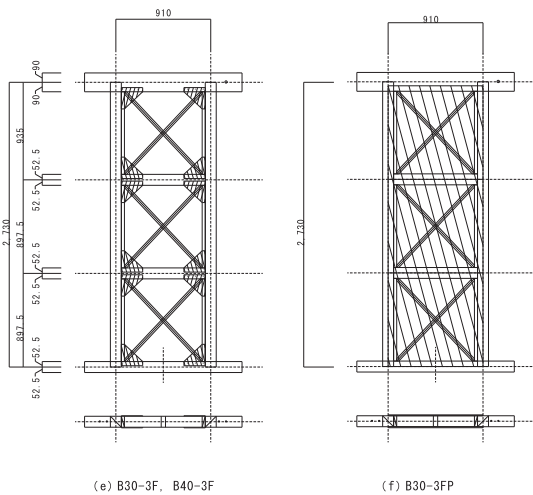


図2 耐震補強枠組，合板貼り耐震補強枠組

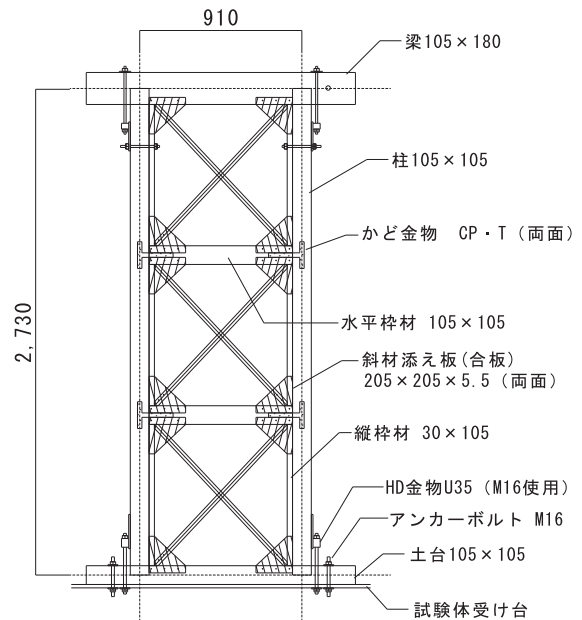


図3 共通寸法と試験体の接合金物

表1 試験体の詳細

実験グループ	試験体名	斜材 (mm)	構造用合板取り付けの有無	斜材設置形態
D	B40-3D1	40×105	無し	対角留め
	B40-3D2	40×105	無し	対角留め
	B40-3D3	40×105	無し	対角留め
	B30-3DP	30×105	有り	対角留め
C	B40-3C1	40×105	無し	中央留め
	B40-3C2	40×105	無し	中央留め
	B40-3C3	40×105	無し	中央留め
	B40-3C4	40×105	無し	中央留め
	B30-3CP	30×105	有り	中央留め
F	B40-3F	40×105	無し	圧縮のみ
	B30-3F	30×105	無し	圧縮のみ
	B30-3FP	30×105	有り	圧縮のみ

では同種の2体の実験を追加し、性能を比較した。しかし、斜材を接合金物を使ってボルト接合しており、大変形域ではその部分から割裂が起り、斜材が縦に割れ脆性破壊を生じた。これを解決するため、耐震箱²⁾を参考に、斜材が圧縮でのみ耐力を発揮し、割裂破壊の原因となる斜材を引張接合しない壁体を作製した。耐震補強枠組を軸組架構にはめ込む形態を考案したものである。

2. 実験計画

2.1 試験体

図1, 2に示す形状の試験体を7種計9体用意した。既往の研究³⁾で検証しているが、B40-3D1, B40-3C1, B40-3C2も合わせて計12体の比較を行った。適正な壁倍率の算定のためには最低3体分のデータが必要なことから、

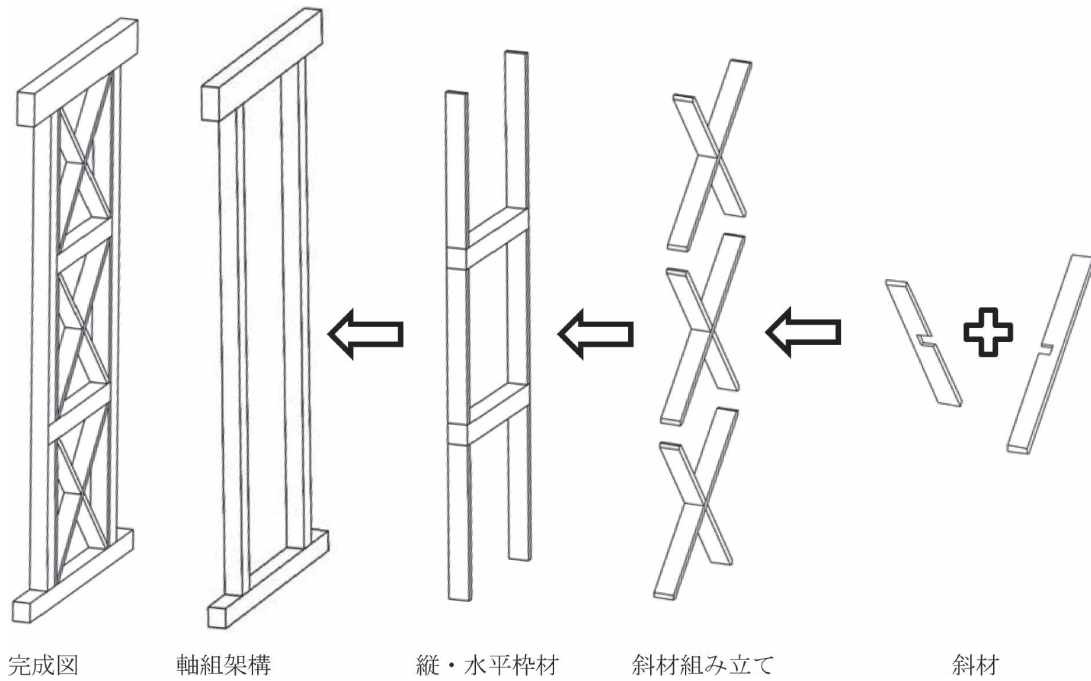


図4 耐震補強枠組壁の組み立て

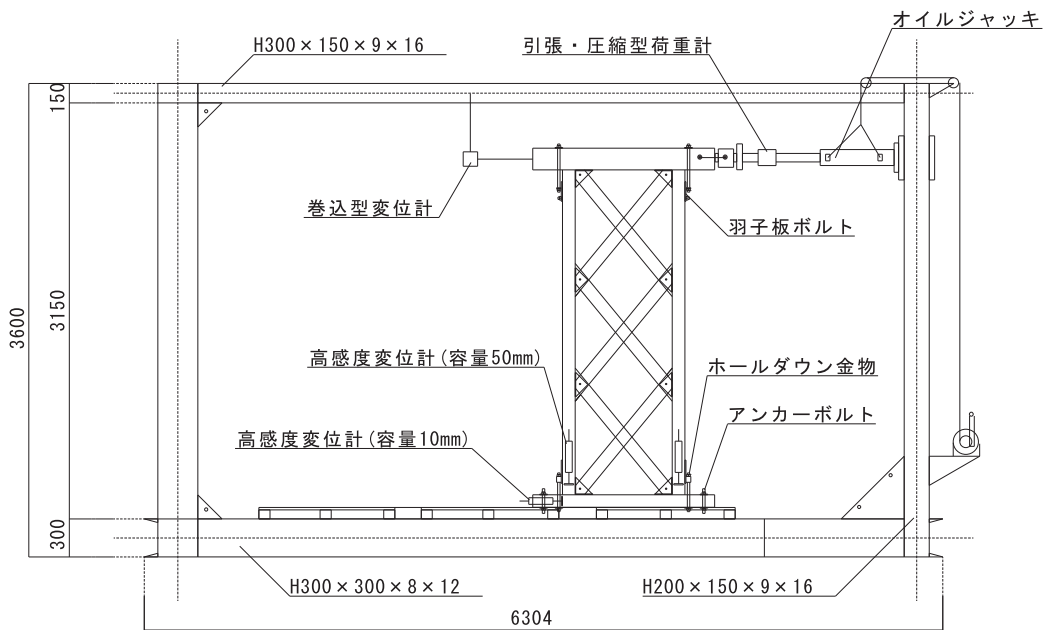


図5 荷重並びに計測の方法

[D 試験体] [C 試験体] について同一形状の試験体を新たに2体ずつ用意した。表1に試験体名と形状の詳細を示した。斜材を図1(a)のように対角にボルト接合した〔これをD試験体と称する。以下、同様に表現〕1種3体と(c)のように中央にボルト接合した〔C試験体〕1種4体、(e)のように斜材は対角に挿入しただけで、圧縮材としてのみ働くようにした〔F試験体〕の斜材厚さを変えた2種2体、合わせて4種計9体とした。さらに初期剛性を高めるために、試験体隅角部に構造用合板を配置した壁体の実験を行った。〔D試験体〕と〔C試験体〕に構造用合板12.5mmを斜材の間に1面挟んだ〔DP試験体〕〔CP試験体〕を2種

2体、〔F試験体〕には構造用合板9.0mmを両面に貼った〔FP試験体〕を1種1体用意した。

図3に共通寸法と使用した接合金物を示す。すべての試験体は、柱芯間距離を910mm、土台-はり芯間高さを2,730mmとした。部材断面は柱と土台に105mm×105mm、はりに105mm×180mmを用いた。斜材段組数はすべて高さ方向に3段組とし、斜材断面は40mm×105mm〔B40試験体〕あるいは30mm×105mm〔B30試験体〕の2種を用いた。材種は〔D試験体〕と〔C試験体〕はすべてスギとした。〔F試験体〕は土台にヒノキを用いた以外の材はすべてスギを用いた。土台にはヒノキを使用するとい

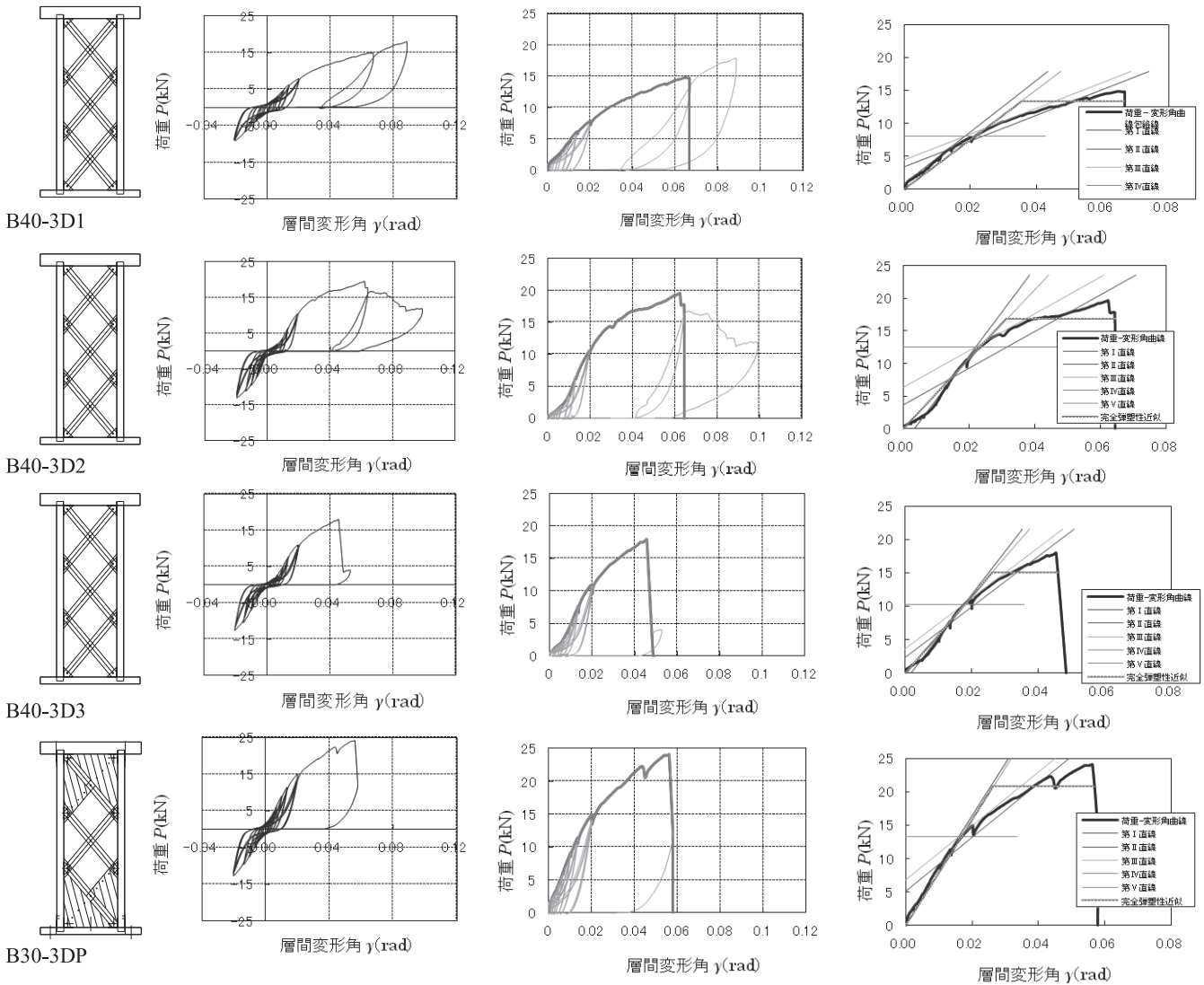


図6 実験値のグラフ化 (a) 試験体形状, (b) 荷重—層間変形角関係, (c) 荷重—層間変形角包絡曲線, (d) 完全弾塑性表示

う通常の仕様に合わせたためである。

図2の耐震補強枠組壁は斜材が圧縮材としてのみ働く壁体として製作した。図4に耐震補強枠組壁の試験体の組み立て方法を示した。割裂破壊の原因となるボルト接合は行わず、斜材上部を柱、はり、水平枠材、縦枠材と釘などで接合しないことによって、斜材には引張力を作用させず、圧縮力に対してのみ抵抗する形態にした。また、[D 試験体]や[C 試験体]のように、斜材の断面の幅面を面外方向に向けると面外に座屈する可能性がある。図4のように断面の厚みを面外に向け、面内で座屈を起こさせる斜材の配置にしている。縦枠材は斜材が柱を壊さないようにするため、圧縮を突っ張る役割をしている。水平枠材は両脇の柱材を繋ぐ引張材となる。T型金物で柱と接合しており、柱を欠損させないように、ほぞなどは使用していない。柱にほぞ孔やボルト孔を通すと、断面欠損により柱が曲げ破壊を起こし、折損の原因となることを避けたからである。

2.2 実験装置と加力方法

全ての載荷実験は広島県立総合技術研究所・林業技術センター（三次高平施設木材実験棟）で行った。載荷装置は図5に示す壁体内せん断試験機（100 kN 用）を用いた。実験方法ならびに短期基準せん断耐力 P_0 、短期許容せん断耐力 P_d の評価方法は「柱脚固定式の鉛直構面の面内せん断試験」⁴⁾ によっている。試験体上部のはりに油圧ジャッキにより、正負繰り返し加力を見かけの層間変形角で、1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50 rad で、水平変位を制御して与えた。同一変形域で繰り返しを各3回行った。最大荷重に達した後の加力は、破壊によって最大荷重の80%まで低下するか、層間変形角が 1/15 rad 以上に達するまでとした。

3. 実験結果

3.1 荷重—層間変形角関係

前年度の B40-3D1, B40-3C1, B40-3C2 も合わせた試験

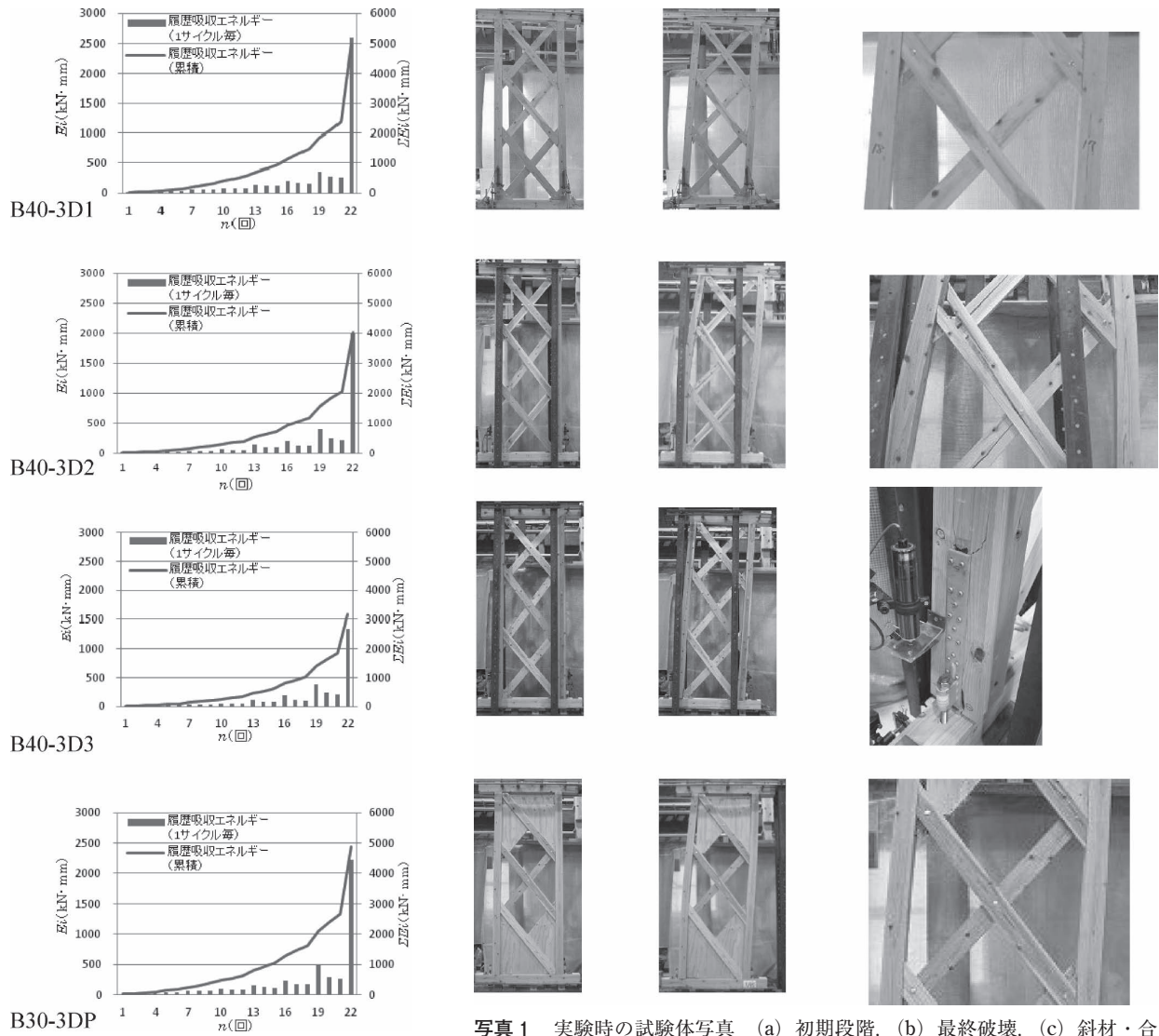


図7 エネルギー吸収量

写真1 実験時の試験体写真 (a) 初期段階, (b) 最終破壊, (c) 斜材・合板・柱の詳細

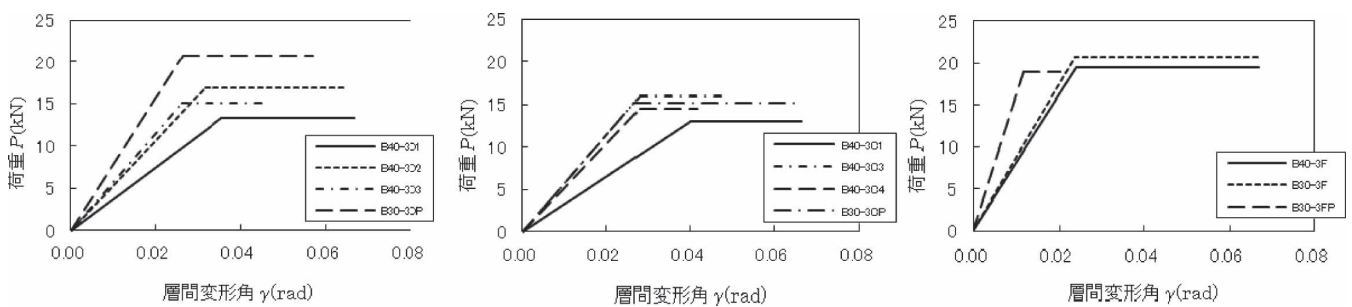


図8 [D試験体] (左) と [C試験体] (中), [F試験体] (右) の荷重—層間変形角包絡曲線の比較

体全7種計12体について図6, 9, 11に, (a) 試験体形状, (b) 荷重—層間変形角関係, (c) 層間変形角 1/15 rad までの荷重—層間変形角関係の包絡曲線, (d) 完全弾塑性モデルによる荷重—層間変形角関係, 降伏耐力および終局耐力の表示を示す。図9の B40-3C1 は後に, B30-3C の骨組架構と接合金物を再使用して, 斜材だけを新規に入れ替えた B40-3C2 を用意し, 層間変形角 1/50 rad の繰り返し載荷を 1 回だけ行ってから 1/15 rad の載荷を開始した。断

面寸法 40×105 mm の B40 斜材が破壊に到るまでの経緯を確認するためである。

図8に [D試験体] と [C試験体], [F試験体] の荷重—層間変形角包絡曲線の比較を示す。B40-3C2 は 1/50 rad まで B40-3C1 と同一のデータのため, 図7には表示していない。[D試験体] の初期剛性は高い値を得ることができたが, 剛性のばらつきが大きい。[C試験体] は B40-3C1 以外ほぼ同じ初期剛性となっている。[CP試験体] は [DP試

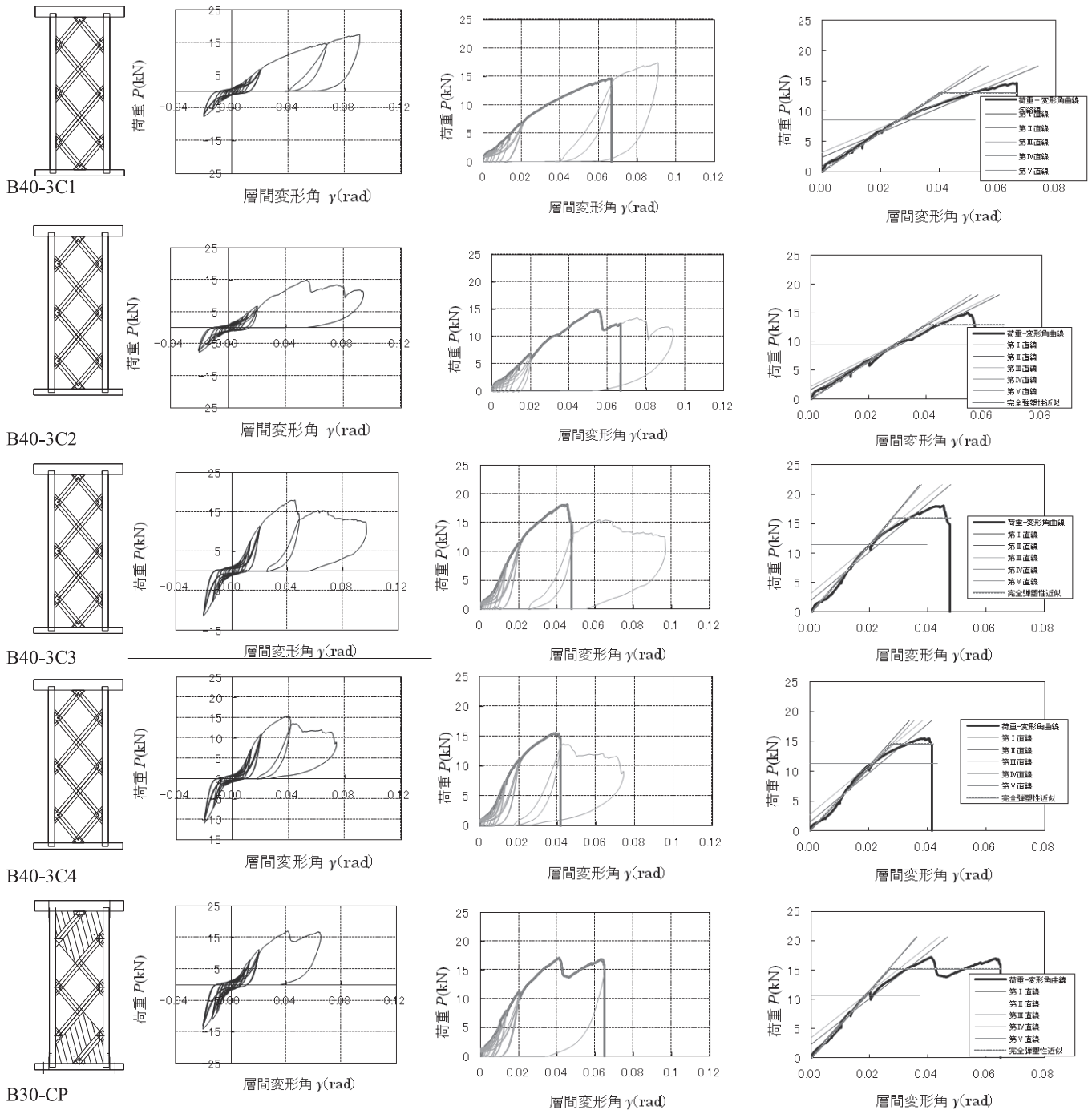


図9 実験値のグラフ化 (a) 試験体形状, (b) 荷重—層間変形角関係, (c) 荷重—層間変形角包絡曲線, (d) 完全弾塑性表示

験体]と比べて初期剛性は高くなっていないが、耐力は向上しており、補剛効果は出ている。

3.2 壁倍率の評価方法

試験体の壁倍率の計算式⁴⁾を示す。短期許容せん断耐力 P_a [kN] は

$$P_a = P_0 \cdot (1 - CV \cdot k) \quad \dots (1)$$

で与えられる。但し、 P_0 [kN] は短期基準せん断耐力で、①「降伏耐力 P_y 」、②「終局耐力 $P_u \cdot (0.2/D_s)$ 」、③「最大荷

重 P_{max} の2/3」、④「特定変形 (1/120 rad) 時の耐力」の4つの値の中で最も小さい値、 CV は変動係数、 k は信頼水準75%における50%下限許容限界値を求めるための係数で0.471とした。(1)式の P_a を使って壁倍率を(2)で求める。

$$\text{壁倍率} = P_a \cdot (1/1.96) \cdot (1/L) \quad \dots (2)$$

ここで、1.96 [kN/m] は壁倍率 = 1 を算定する数値、 L [m] は壁の長さである。

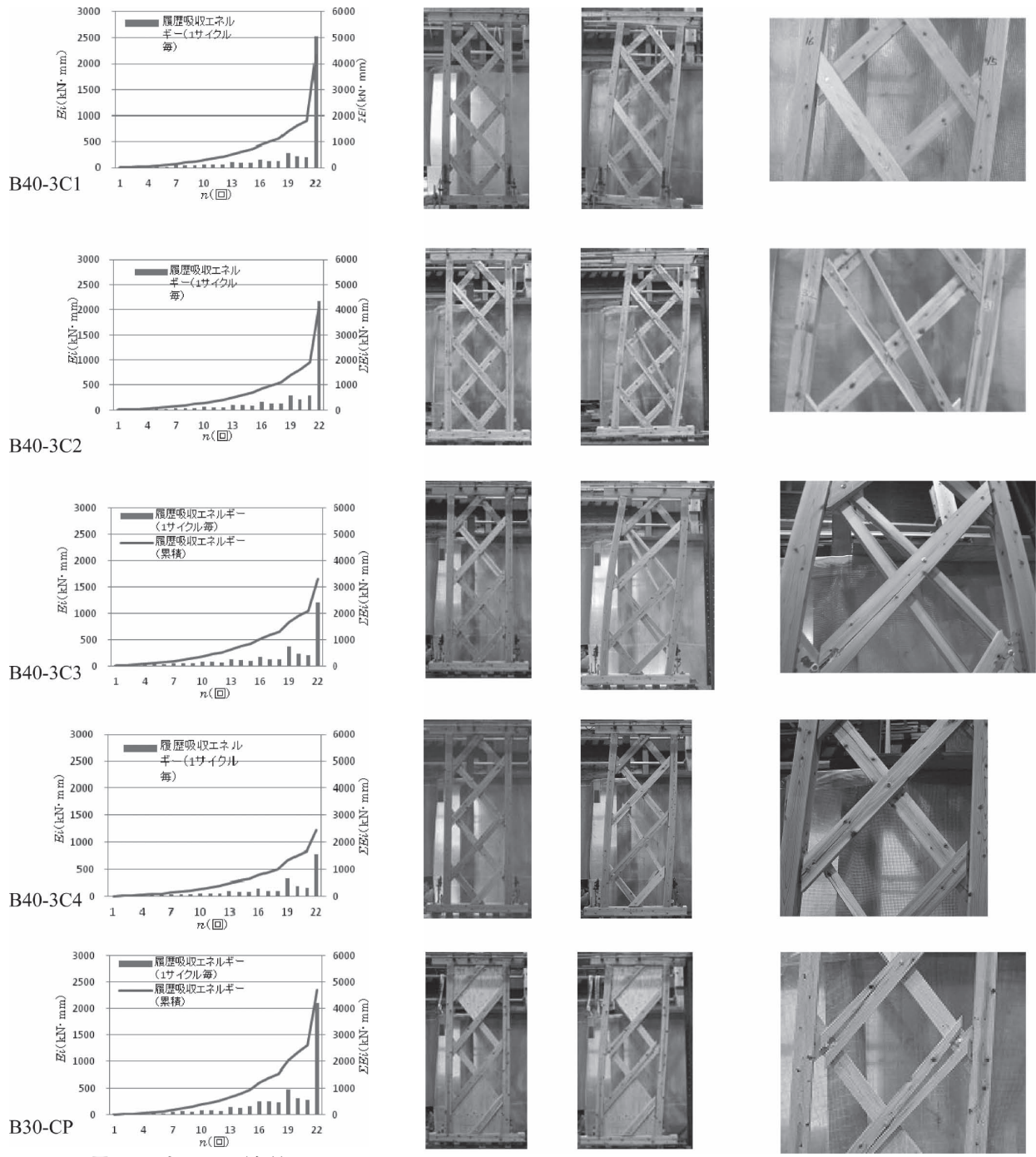


図10 エネルギー吸収量

写真2 実験時の試験体写真 (a) 初期段階, (b) 最終破壊, (c) 斜材・合板・柱の詳細

3.3 壁倍率

実験による各種耐力と壁倍率の一覧を表2に示す。斜材を対角にボルト接合した [D 試験体] は、壁倍率1.96, 1.13, 1.51で、高い壁倍率を得ることができたが、ばらつきが大きい壁体である。中央にボルト接合した [C 試験体] は壁倍率1.50, 1.60, 1.49を得ており、安定した壁体であるが、[D 試験体] ほど高い壁倍率が得られる壁体ではない。[DP 試験体] は合板による補剛効果がよく現れており、壁倍率3.84を得ている。[CP 試験体] は壁倍率2.18で合板の補剛効果で1.3倍以上性能が上がっている。

[F 試験体] は初期剛性が高く、粘りもあり、壁倍率4.16, 4.48を得ている。[FP 試験体] は高い初期剛性を示したが、1/50 radで柱が引き抜き力で破断しており、スギ柱では弱かった。初期剛性が高くなり、補剛効果はみられたが、壁倍率は2.44で、壁倍率が向上したわけではない。

3.4 履歴吸収エネルギー

図7, 10, 12に試験体のエネルギー吸収量を示した。棒グラフは履歴ループの1サイクル毎のエネルギー吸収量 E_i (左軸で値表示) の推移を、折れ線グラフは累積エネルギー

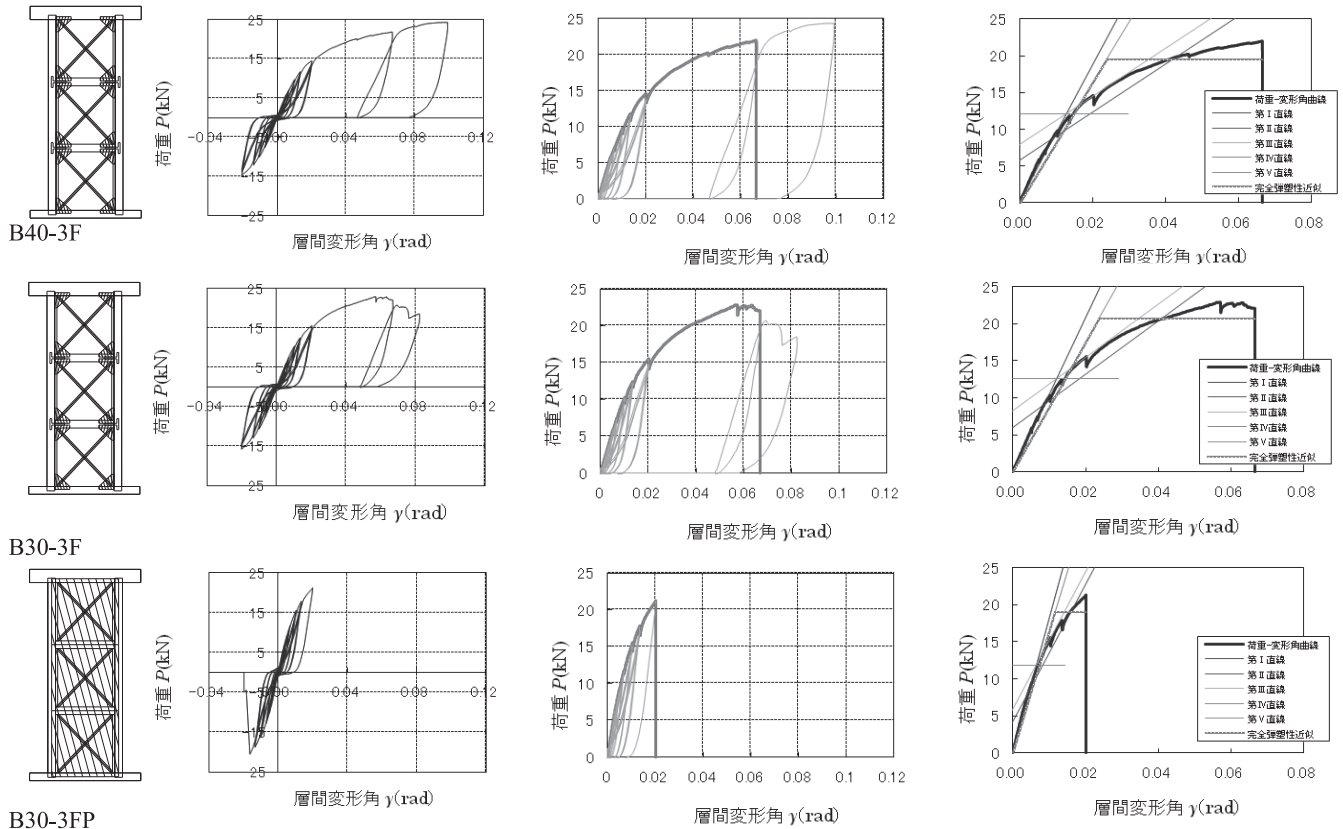


図11 実験値のグラフ化 (a) 試験体形状, (b) 荷重—層間変形角関係, (c) 荷重—層間変形角包絡曲線, (d) 完全弾塑性表示

表2 各種耐力と壁倍率

試験体名	B40-3D1	B40-3D2	B40-3D3	B30-3DP	B40-3C1	B40-3C2	B40-3C3	B40-3C4	B30-3CP	B40-3F	B30-3F	B30-3FP
降伏耐力 P_y (kN)	8.02	12.52	10.27	13.24	8.48	9.34	11.38	11.31	10.62	12.12	12.58	11.82
終局耐力 $P_u \cdot (0.2/\text{構造特性係数 } D_s)$ (kN)	4.42	6.04	4.78	7.58	3.97	3.97	6.12	4.57	5.97	8.37	8.87	5.97
最大荷重 $P_{max} \cdot 2/3$ (kN)	9.90	13.08	11.95	16.05	9.75	10.05	12.06	10.3	11.44	14.62	15.23	14.17
特定変形 (1/120 rad) 時の耐力 (kN)	3.86	2.77	3.72	7.56	2.95	2.95	3.93	3.67	4.28	8.23	8.77	13.34
短期基準せん断耐力 P_0 (kN)	3.86	2.77	3.72	7.56	2.95	2.95	3.93	3.67	4.28	8.23	8.77	5.97
短期許容せん断耐力 P_a (kN)	3.50	2.51	3.37	6.85	2.67	2.67	3.56	3.32	3.88	7.45	7.94	5.41
壁倍率 (変動係数20%)	1.96	1.13	1.51	3.84	1.50	1.50	1.60	1.49	2.18	4.16	4.48	2.44

吸収量 ΣEi (右軸で値表示) の推移を表した。表4に試験体形状ごとの層間変形角 1/100 rad, 1/50 rad, 1/15 rad における各サイクル毎のエネルギー吸収量 Ei と累積エネルギー吸収量 ΣEi を示す。

斜材を対角にボルト接合した [D 試験体] は1/15 rad 時の累積エネルギー吸収量が高く、粘りがある。中央にボルト接合した [C 試験体] は最終的な累積エネルギー吸収量は、[D 試験体] と較べると小さいものが多いが、十分粘りのある試験体である。

斜材を対角に挿入しただけで、圧縮材としてのみ働く [F 試験体] は粘りがあり、最終的なエネルギー吸収量は [D 試験体] と [C 試験体] と較べて大きい。

[DP 試験体] と [CP 試験体], [FP 試験体] は1サイク

ル毎のエネルギー吸収量 Ei も 1/50 rad までの累積エネルギー吸収量 ΣEi も、構造用合板の補剛効果が現れていて大きい。B40-3C2 の1サイクル毎のエネルギー吸収量は構造用合板を貼ったものより大きい。これは 1/50 rad 時から载荷を始めたため、他の試験体と較べて载荷による損傷が少なく、エネルギー吸収量が大きくなっていることが考えられる。

3.5 破壊状況

写真1, 2, 3の (b), (c) に各試験体の最終破壊状況を示し、表3にその破壊状況をまとめた。B40-3D3 は柱の節部分にホールダウン金物を接合したため、柱破壊が起き、斜材の破壊まで至らなかった。斜材を対角にボルト接

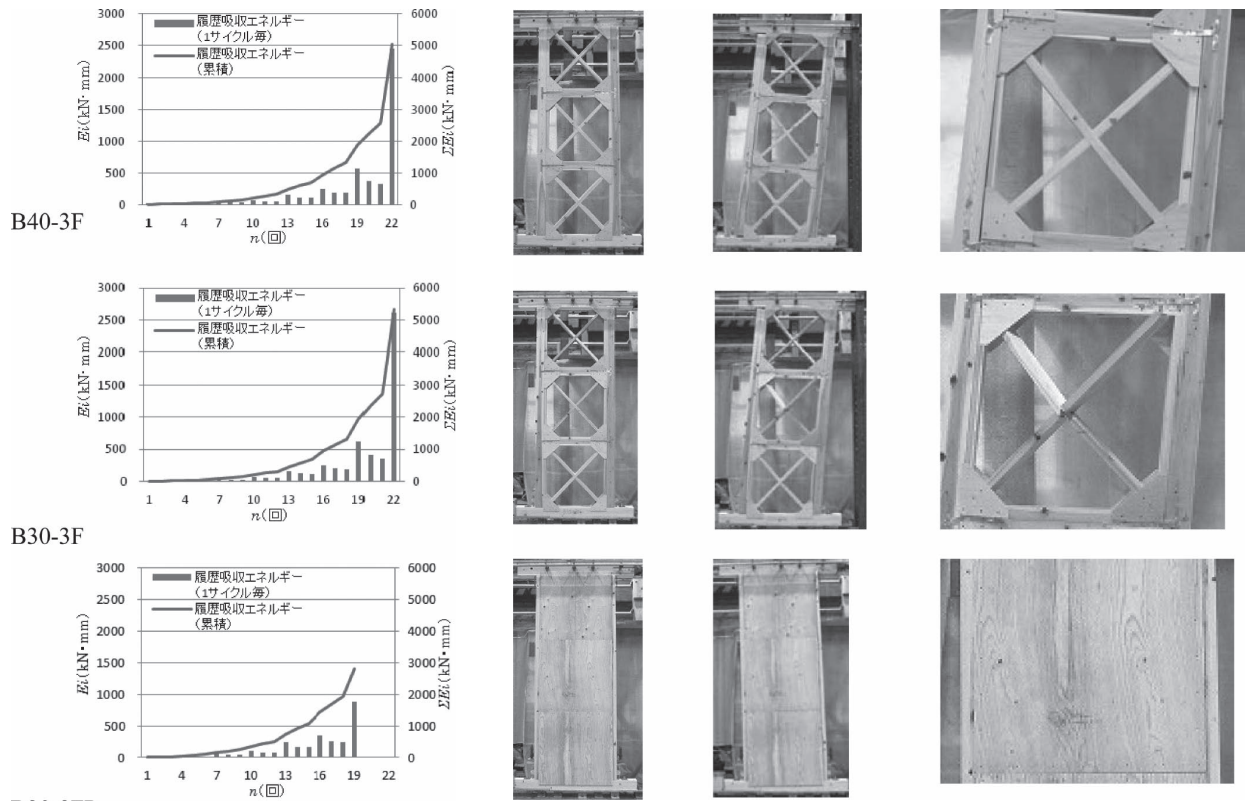


図12 エネルギー吸収量

写真3 実験時の試験体写真 (a) 初期段階, (b) 最終破壊, (c) 斜材・合板・柱の詳細

表3 最終破壊状況

試験体名	破壊状況
B40-3D1	土台が割裂破壊
B40-3D2	斜材が割裂破壊
B40-3D3	左側柱の HD 金物部分で柱破壊
B30-3DP	ボルト接合部で斜材が割裂破壊
B40-3C1	土台が割裂破壊
B40-3C2	斜材が割裂破壊
B40-3C3	斜材が割裂破壊
B40-3C4	斜材が割裂破壊
B30-3CP	中段部斜材が割裂破壊
B40-3F	下段斜材が少し座屈
B30-3F	中段斜材が座屈破壊
B30-3FP	右側柱の HD 金物接合部分で柱破壊

合した [D 試験体] と中央にボルト接合した [C 試験体] は、引張りを受けた際に個々の材が接合金物のボルトにより徐々に損傷し、個材が一つずつ破壊していく過程を経ており、破壊性状として好ましい。この試験体の問題点は、斜材をボルト接合していることによって接合部が割裂し、脆性破壊を生じたことであった。これを改善するために考案した [F 試験体] は、载荷の終了（約 1/10 rad）時まで斜材が割裂破壊を起こすことはなかった。B40-3F は試験体の各部に変形・損傷が分散され三段組の下段斜材で少し座

屈変形が見られた程度である。B30-3F は 1/50 rad で構面外に座屈し始め、1/17 rad で中段斜材が大きく横に座屈破壊を起こした。[F 試験体] に構造用合板を両面に貼った [P 試験体] は、1/50 rad 载荷の繰り返し 1 回目の押しで引張の HD 金物接合のビス部分で柱が引張破断を起こした。水平耐力が過大になり、スギ柱の引張耐力が足りなかったと考えられる。

4. 結論

- 復元力の履歴曲線を比較すると、斜材を対角にボルト接合した [D 試験体] の初期剛性は高い値を得ることができ、粘りもあるが、剛性のばらつきが大きい。中央にボルト接合した [C 試験体] は B40-3C1 以外ほぼ同じ初期剛性となっている。[D 試験体] よりばらつきは少なく、粘りもある。[CP 試験体] は [DP 試験体] より初期剛性の向上は少ないが、耐力は大きくなっており、補剛効果は出ている。
- 壁倍率の評価では、斜材を対角に挿入しただけで、圧縮材としてのみ働く [F 試験体] が、壁倍率 4.16、4.48 で優れている。これに構造用合板を両面に貼った [FP 試験体] では、壁倍率 2.44 となった。合板補強が強過ぎてスギ材の引張耐力が足りなかったためである。1/50 rad で柱が引張破壊を起こし、耐力が十分にでなかった。

表4 試験体形状ごとの各サイクル毎のエネルギー吸収量 E_i と累積エネルギー吸収量 ΣE_i

試験体名	B40-3D1		B40-3D2		B40-3D3		B30-3DP		B40-3C1		B40-3C2	
	δ/H (rad)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)
1/100	140	702	136	541	108	452	164	799	102	514	同左	
1/50	357	1838	403	1587	385	1399	489	2108	288	1400		
1/15	1452	3827	1987	4047	1344	3180	2216	4884	1344	3161	2175	4079
							(1/22 rad で破壊)		(1/17 rad で破壊)			

試験体名	B40-3C3		B40-3C4		B30-3CP		B40-3F		B30-3F		B30-3FP	
	δ/H (rad)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)	ΣE_i (kN・ mm)	E_i (kN・ mm)
1/100	125	644	97	490	144	676	154	477	157	464	238	748
1/50	371	1670	329	1325	476	2038	568	1888	615	1947	880	2810
1/15	1208	3306	785	2457	1770	4392	2457	5039	2616	5333	-	-
			(1/21 rad で破壊)		(1/24 rad で破壊)		(1/16 rad で破壊)					

3) 累積エネルギー吸収量では [C 試験体] よりも [D 試験体] が大きい。斜材を対角に挿入しただけで、圧縮材としてのみ働く [F 試験体] は1サイクル毎のエネルギー吸収量 E_i も、累積エネルギー吸収量 ΣE_i も、他の試験体と比べて大きい。

4) 斜材の破壊は、[D 試験体] と [C 試験体] は個材が一つずつ破壊していく過程を経ており、破壊性状として好ましいが、最終的には斜材が割裂で脆性破壊を生じた。これを改善した斜材を対角に挿入しただけで、圧縮材としてのみ働く [F 試験体] は中段部斜材が大きく横に座屈破壊を起こし、想定していた座屈破壊を起こすことができた。ただし、斜材が面外方向へ座屈することや、施工に時間がかかり、大工の製作技術に頼る部分が大きい点に問題があり、改善の余地があると考える。

謝 辞

本研究において、広島県立総合技術研究所・林業技術センターの藤田和彦氏には実験の計画ならびに実施に関し

て、親切丁寧な示唆と、ご協力を頂きました。また、有限会社アクト建築設計事務所の土岡民明氏には数々のご援助とご指導を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- 1) 広島県立総合技術研究所 林業技術センター：間伐材を利用した壁面体の製造，pp. 1-14. (2001年3月)
- 2) 小松幸平，北守顕久，村上 了，三宅英隆，山口秋生，川瀬 博：変形性能と施工性に考慮した新しい木造家屋の震補強工法の提案：その4 耐震箱を組み入れた枠組み耐震壁の静的繰り返し加力実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造Ⅲ，pp. 455-456. (2010年9月)
- 3) 岩井 哲，佐藤立美，坪山宗由：短い軸組材を使用した木造壁体の耐震改修性能評価，広島工業大学紀要研究編，第46巻，pp. 31-37. (2011)
- 4) (財)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 (2008年版)，pp. 561-574. (2008)