

ポリエステル繊維織物を用いた木造住宅の新しい耐震補強工法の開発

リハビリテーション工学研究室 佐藤 晃章

1. 研究の背景と目的

世界有数の地震国である我が国では、これまで幾多の地震による災害を経験している。1995年の兵庫県南部地震では、現行の耐震基準以前に建築された耐震性能に劣る既存建築物を中心に甚大な被害が生じ、多くの人命・財産が失われた。兵庫県南部地震の犠牲者のうち8~9割は木造住宅の倒壊が原因といわれており、既存木造住宅の耐震改修は地震防災対策として重要な課題である。

兵庫県南部地震を教訓として「耐震改修促進法」が施行され既存建築物の耐震改修が行われているが、経済的課題や耐震診断・改修事業への不信感など様々な理由から改修の進捗率は極めて小さいのが現状である。

そのような現状の中、木造住宅の耐震改修工法として様々な新しい工法が開発されているが、性能が十分に明らかではないもの、工事費用が高額であるものなど課題も多く、耐震改修の促進に寄与しているとは言い難い。

本研究は、このような状況を改善するために、既存木造住宅の耐震改修を想定した木造架構の静的実験及び振動実験を行い、ポリエステル繊維を用いた補強工法の性能を明らかにすることを目的としている。

2 材料の特性と補強工法の概要

研究で対象とする材料は高強度のポリエステル繊維を編みこんだベルト・シート補強材で部材表面に接着剤で貼り付けることにより耐震性能の向上を図るものである。表1に性能規格値を、写真1にベルト補強材を示す。

表1 補強材料の性能規格

材料名	ポリエステル		
	ベルト1(B1)	ベルト2(B2)	シート(S)
規格値(mm)	ベルト材		
厚さ	2.0	4.0	1.1
幅	50.0	45.0	30-2000
実験値(mm)	シート材		
厚さ	2.7	3.6	1.2
幅	51.7	46.3	30-2000
ヤング係数(N/mm ²)	8300	6278	1659
平均値	4500		
下限値	1400		
破断強度(N/mm ²)	654.8	487.7	250.0
破断時歪度(%)	12.4	11.3	14.7

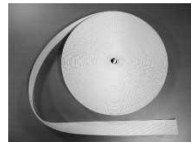


写真1 ベルト補強材(B1)

地震被害を受けた木造住宅の要因としては、筋交いや合板などの耐力壁の不足、柱・梁・土台や筋交いの接合部の緊結不足などが挙げられ、これらを改善するため本補強工法ではポリエステルベルト補強材を既存の軸組みに接着して耐力壁を構成することにより、耐力・変形性能を向上させる補強工法である。

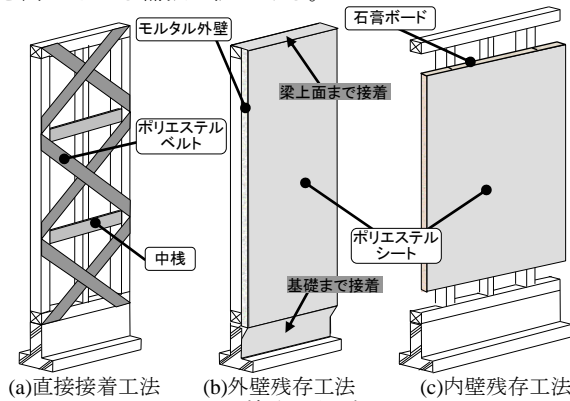


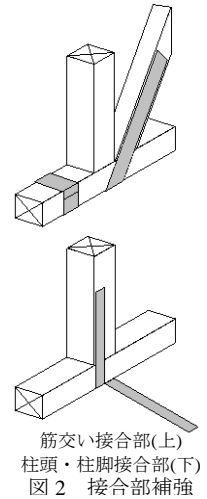
図1 補強工法の概要

本研究の基本的な補強工法は、在来型の補強工法である筋交い工法や合板工法と同じように、壁仕上げ材を撤去し、ポリエステルベルトを櫛がけ状に木造軸組みへ直

接接着して耐力壁を構成する「直接接着工法」である(図1(a))。ポリエステルベルトを筋交い状に櫛がけに貼り付ける際、補強効果が最も発揮されるようにベルトの傾斜角を概ね45°となるよう高さ方向に3層に配置し、反力確保のため水平部材(中棧)を追加する。

次に補強費用の削減、工期の短縮、廃棄物の削減を考慮し、壁仕上げ材を残したままポリエステル補強材を貼り付ける工法についても検討を行った。図1(b)はモルタル外壁の表面にシート補強材を貼り付け、桁梁から基礎までを一体化させ間接的に接合部も補強した「外壁残存工法」であり、図1(c)は室内側の石膏ボードにシートを貼り付け補強する「内壁残存工法」である。

現行基準では接合金物を用いて接合部の緊結を行うが、旧基準の建物では釘打ち程度で強度が不十分であることが多い。また、金物の使用により木材に接合用の穴を開けて弱点になる、大変形時の塑性化により残留変形が生じるなどの問題もある。そこで変形性能に富むポリエステル補強材を柱と梁・土台の接合部、筋交いの仕口部に貼り付ける工法(図2)について検討した。



3. 静的加力実験

補強架構の力学的性状の把握と剛性・耐力・変形性能など耐震診断に用いるデータの獲得を目的に静的加力実験を行った。

3.1 試験体概要

本研究で対象としたのは在来軸組み工法の建物で、試験体軸組みは共通で柱心910mm、高さ3000mmとした。

「直接接着工法」試験体は、ベルト種類・本数、補強材の定着方法、接合部補強方法、開口の有無をパラメータとし

表2 静的実験試験体一覧 (HD: 25kN用引き寄せ金物)

試験体名	耐力要素	接合部要素
筋交・金物なし【単】	両筋交い	釘打ち程度
筋交【単】		羽子板金物(筋交プレート)
筋交・HD【単】	構造用合板	HD金物(筋交プレート)
筋交・HD		HD金物(ベルト1)
筋交・ポリエステル	ベルト1	T型金物
合板・HD【単】		HD金物
合板・HD	ベルト2	HD金物
B ₁ 6接着・箱巻【単】		ベルト箱巻き
B ₁ 6接着・箱巻	ベルト2+シート	ベルト箱巻き
B ₁ 4接着・箱巻		ベルト箱巻き(板貼付)
B ₂ 4接着・箱巻	ベルト2	ベルト箱巻き
B ₂ 4接着・箱巻(板貼付)		ベルト箱巻き(板貼付)
S+B ₂ 4接着・箱巻	モルタル壁	HD金物
B ₂ 4螺旋・箱巻		HD金物
B ₂ 4接着・箱巻(窓開口壁)	モルタル壁+シート	釘打ち程度
B ₂ 4接着・HD(内壁)		HD金物
B ₂ 4接着・HD(内壁・板貼付)	モルタル壁+シート+ベルト2	HD金物
外壁		HD金物
外壁・HD	石膏ボード	釘打ち程度
外壁+S		HD金物
外壁+S・HD	石膏ボード	釘打ち程度
外壁+S+B ₂ 4接着		HD金物
外壁+S+B ₂ 4接着・HD	石膏ボード+シート	HD金物
内壁		HD金物
内壁+S		HD金物

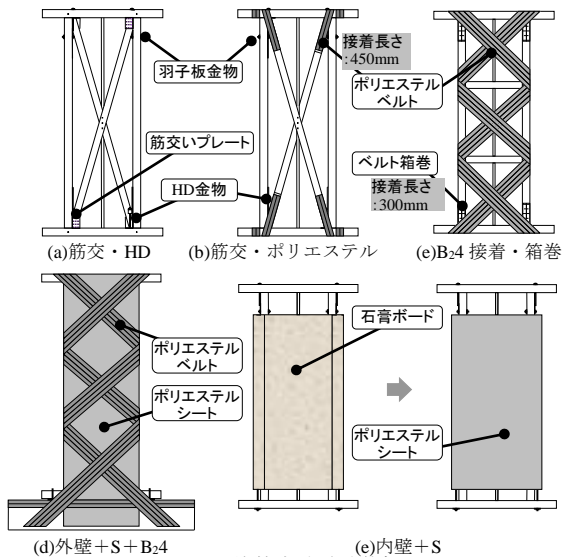


図3 静的実験試験体概要

た 11 体、「外壁残存工法」試験体は、補強材の配置方法、接合部補強方法をパラメータとした 6 体、「内壁残存工法」試験体は、補強の有無による 2 体の計 19 体と、性能比較用在来工法 7 体の実験を行った。試験体一覧を表 2 に、代表的な試験体の概要を図 3 に示す。

3.2 実験方法

実験方法は、試験体の梁・土台をφ16 ボルト 4 本で鋼製治具に固定し、試験体には固定荷重+積載荷重に相当する 200kg の上部治具を載せ水平力を作用させた。水平力は上部治具にワイヤーロープ及び PC 鋼棒を取り付けセンターホールジャッキで荷重した。試験体の水平面外への振れを防止するため、予め左右のワイヤーロープに 10kN の引張力をかけた状態から実験を開始した。

加力は 1 方向単調荷重と正負交番荷重とがあり正負交番荷重では、頂部水平変形を 15,30,60,90,120mm (変形角 0.5,1,2,3,4%) で 2 サイクル荷重後正側に押し切った。

「外壁残存工法」試験体のうち補強を行った 4 体についてはポリエステルシートを基礎へ接着するため下部鋼製治具に代え、コンクリート布基礎を使用した。

3.3 実験結果

図 4(a)~(i) に各試験体の荷重-変形関係を示す。なお、正負交番荷重実験における荷重-変形角関係は、正側の包絡線を示している。

在来筋交い工法では、「金物なし」試験体は接合部の緊結が十分ではなく、早い段階で柱や筋交いが抜け出し、変形が進行した。現行基準に規定する金物補強で耐力・剛性が上昇し、HD 補強でさらに増加することが確認できた。金物を用いた試験体の破壊挙動は、圧縮力を受ける筋交いの座屈によるものであった。

「直接接着工法」試験体の破壊挙動は、いずれもベルト端部の接着の剥がれによる荷重の低下で、主に土台部分で見られた。筋交い工法と比較すると、剛性はやや低いものの、大変形時まであまり剛性低下せずに弾性的な挙動を示した。補強ベルト端部の接着が 1/50rad (70mm) 程度から剥がれ始めるが、荷重の増加が続きほとんどの試験体で[筋交い・HD]より高い最大耐力を発揮した。いずれの試験体でも、1ヶ所のベルト端部で接着破壊が生じると耐力低下するが、完全にせん断抵抗を失うわけではなく、接着が残っているベルトに応力が再配分され、ある程度の耐力は維持しながら変形が進行した。また、開口を有

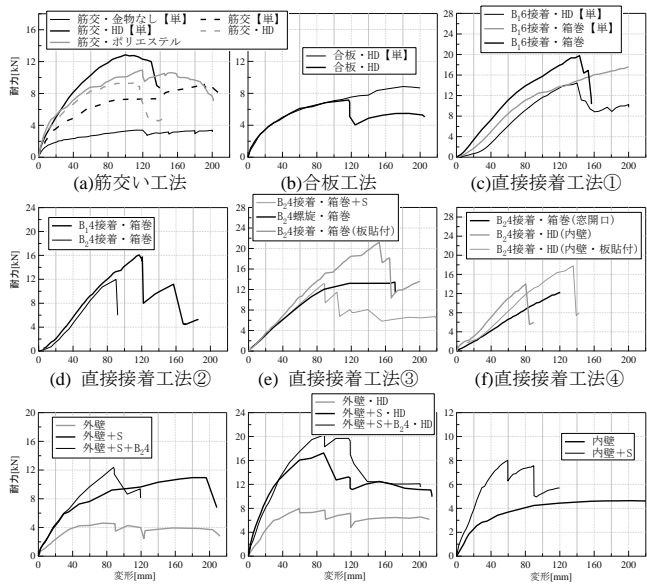


図4 荷重-変形包絡線

する場合も剛性の低下は見られたものの高い耐力と変形性能が得られた。

「外壁残存工法」では無補強の[外壁]は、柱脚の土台からの抜け出しが荷重初期の段階から発生し、変形だけが進行した。[外壁+S]は、シート補強によりモルタルの回転を抑える効果が見られ、[外壁]と比較して最大耐力・剛性を大きく向上させることができた。

[外壁+S+B24]は、シートに加えてベルトの基礎への接着のため、最大耐力が多少増加したが、ベルトと基礎との接着が剥がれた後は、[外壁+S]とほとんど同じ挙動を示した。加力終了後に確認したところモルタル外壁にひび割れが発生していたが、シートを接着したことによりモルタルの剥落・落下は防止された。

「内壁残存工法」では[内壁]で、変形に伴って四隅の木ネジがボードにめり込み、軸組みのせん断変形に対してボードは回転変形したためずれが生じていった。シート補強により加力初期の段階の剛性・耐力が上昇したが、変形角 0.02rad 程度から徐々に接着が剥がれ始め、変形角 0.04rad 以降は、[内壁]と同様の挙動となった。

4. 振動実験

補強架構における地震時の応答性状を把握すること、静的実験の結果が地震時に発揮されるのかを検証することを目的に振動実験を行った。

4.1 試験体概要

試験体の軸組みは加振方向 1.5 間(2730mm)、高さ

表3 振動実験試験体一覧

試験体名	耐力要素	接合部要素	初期周期[s]
筋交い・金物なし	両筋交い	釘打ち程度	0.18
筋交い・金物あり		HD金物(筋交いプレート)	0.16
筋交い・ポリエステル		ベルト箱巻き	0.20
直接接着工法	ベルト2×4	HD金物	0.30
応急補強	ベルト1×2	ベルト巻付け	0.38

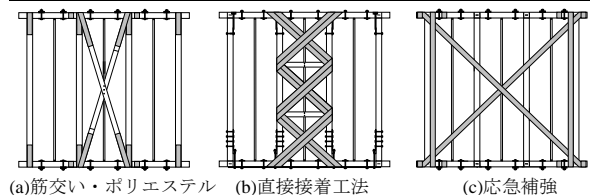


図5 振動実験試験体概要

2730mmで、中央半間部分にのみ耐力壁を設置している。

振動実験では直接接着工法と接合部補強を対象とし、筋交い工法3体、直接接着工法2体の計5体について実験を行った。表3に試験体の諸元と自由振動実験による初期固有周期を、図5に試験体を示す。

4.2 実験方法

実験は各種耐震要素を組み込んだ同一の軸組2体を併設して、倒れ止め用のパネルを直行方向に配置し1体の立体型試験体とした。上部には重り(1.67t)を負荷させた。

使用した加振波は、試験体ごとの周期の違いによる影響がないよう、建築基準法の限界耐力計算を参考に第2種地盤に対する目標加速度スペクトルに近似するような応答スペクトルをもつ模擬地震動(以後告示波)を作成し²⁾使用した。地震波の加速度時刻歴と5%の応答スペクトルを図6に示す。

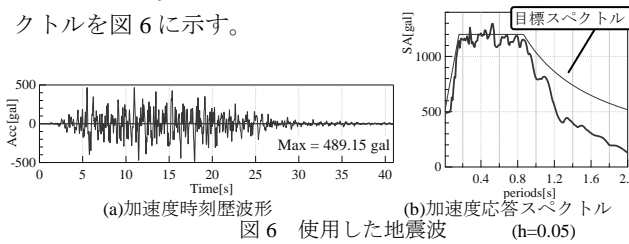


図6 使用した地震波 (h=0.05)

加振計画は告示波を25,50,75,100%と入力し、その後繰り返し影響を確認するため100%の波を2~3回繰り返し入力した。

4.3 実験結果

図7に試験体の最大慣性力-最大層間変形関係を示す。

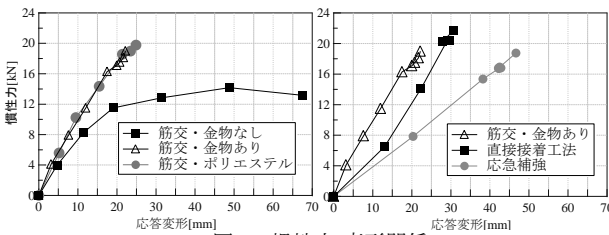


図7 慣性力-変形関係

[筋交・金物なし]では最大で70mm(1/50)まで変形したが、この試験体は、柱接合が十分ではないため筋交い自体の損傷はほとんどなく、最外郭の柱が抜け出し、中央の耐力壁を中心に回転変形した。一方[筋交・金物あり]では応答変形が抑えられ、金物補強の効果が十分に発揮されていることが示され、[筋交・ポリエステル]も[筋交・金物あり]と同程度の剛性を持ち、ポリエステルベルトによる端部補強が金物と同等の効果があることが分かる。

[直接接着工法]試験体は、初期のたわみによる変形が進みベルトに引張力が作用した後の剛性は[筋交・金物あり]と同程度であり、[応急補強]ではベルトの量に応じて剛性は小さいが弾性的な挙動を示した。

図8より、木製筋交いを有する試験体では従来型の金物使用筋交いで6~8%程度、ポリエステルベルトによる端部補強では4%程度の減衰を有して

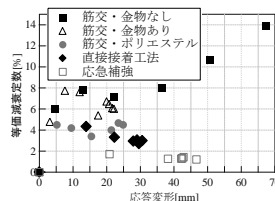


図8 等価減衰定数

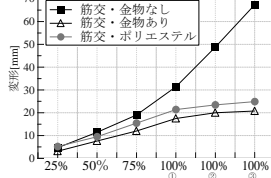


図9 変形性能

いる。一方[直接接着工法]では初期のたわみがあるため軸組みフレーム自体が変形したと考えられおおよそ4%の減衰を有しているが、ベルトに張力が作用した後は約3%と木製筋交いの1/2程度しかない。[応急補強]はベルト本数が減っているため、より減衰が小さく2%程度であった。

図9に示す最大変形から、木製筋交い試験体では1度目の25%加振では変形が小さくその後比例的に100%加振まで増え続ける。壊れ始まっている[筋交・金物なし]だけでなく、その他の2体でも繰り返しの加振により若干ではあるが最大変形の値が更新されている。一方、ポリエステル筋交いの試験体は初期段階での変形は大きい、繰り返しの加振を行っても最大変形はほとんど変わっていないことが分かる。

5. 耐震性能の評価

5.1 静的実験による耐力・剛性・壁倍率の評価

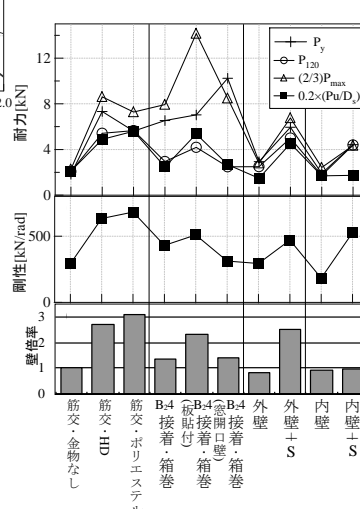


図10 耐力・剛性・壁倍率

静的加力実験の荷重-変形包絡線を用いて要素基準耐力や壁倍率を求め耐震診断基準の規定値との比較検討を行った^{3),4)}。

図10には診断基準に示されている基準耐力及び剛性と、基準耐力の4指標のうち最小値を基準荷重と壁長で規準化した壁倍率を示す。

「直接接着工法」の3試験体は最大耐力や降伏耐力は大きい

が、初期のたわみが大きく剛性が低いため4つの指標のうち(2)の1/120時の耐力が小さいこと、軸組みがほぼ弾性的な挙動を示すため塑性率が小さいので(4)の $0.2(P_u/D_s)$ が小さく、壁倍率による比較でも比較対象の[筋交・HD]の値に達していない。

「外壁残存工法」ではシート補強により最大・降伏耐力で2~2.5倍、剛性も1.5倍程度に増加した。「直接接着工法」と比較しても最大・降伏耐力で同程度を示し(4)の $0.2(P_u/D_s)$ は塑性率が増加したため、結果壁倍率では[外壁]の3倍、「B2接着・箱巻」の2倍程度であり、シート貼り付けの効果は大きいと考えられる。

「内壁残存工法」はシート補強を行った場合でも変形性能に劣るため(4)の $0.2(P_u/D_s)$ の値が小さく、壁倍率の増加はほとんどなかった。

5.2 補強架構の剛性・耐力の評価

木造軸組みにベルトを筋交い状に接着した架構において木材の軸変形を無視した場合のせん断変形角 γ とベルトの歪度 ε との関係は以下の式で定式化される。

$$\gamma = \frac{(H/D)^2 + 1}{H/D} \varepsilon = \frac{\tan^2 \theta + 1}{\tan \theta} \varepsilon \quad \dots(1)$$

H : 架構の高さ, D : 架構の幅

γ に対し ε が最大になるのは $H/D=1$ のときであり、本研究ではベルトを3段に $\theta=45^\circ$ となるような配置を基本とした($\varepsilon=0.5\gamma$)。

実際にはベルトの初期たわみや接着が徐々に剥がれ

ベルトが緩むことを考慮し ε の低減係数 α を導入し、

$$\gamma = \alpha \frac{\tan \theta}{\tan^2 \theta + 1} \varepsilon \quad \dots(2)$$

と表すこととした。また、全体変形角 R に占めるせん断変形角 γ の割合を β とすると

$$\gamma = \beta R \quad \dots(3)$$

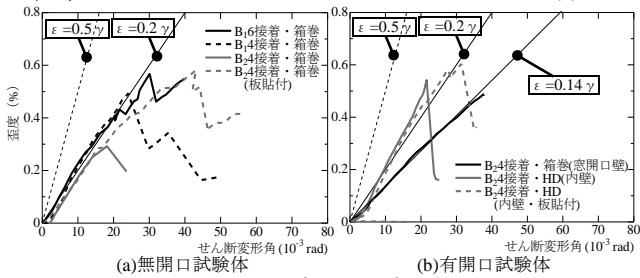


図 11 歪度-せん断変形角関係

図 11 には、静的実験における直接接着工法試験体の歪度とせん断変形角 γ との関係を示す。歪度は 3 段に配置したベルトそれぞれで観測した値の平均値である。ほとんどの試験体で歪度は(1)式における $\varepsilon = 0.5\gamma$ の関係の 40% ほどしか生じておらず、低減係数 α は $0.4 (\varepsilon = 0.2\gamma)$ と考えられる。開口の大きい [B24 接着・箱巻(窓開口壁)] は無補強部分で大きくせん断変形し歪度は小さく α を $0.28 (\varepsilon = 0.14\gamma)$ とした。

また、 β の値に関しては、試験体によって変動はあるものの概ね 70% 程度であり $\beta = 0.7$ とした。

ここで、ポリエステルベルトと歪度の関係は

$$T = nE_s A_s \varepsilon \quad \dots(4)$$

$$Q = T \cos \theta \quad \dots(5)$$

n : ベルト本数, E_s : ヤング係数, A_s : ベルト断面積

(2)~(5)式より、せん断剛性 K を求めると、

$$K = \frac{Q}{\gamma} = \alpha \beta (nE_s A_s) \frac{\tan^2 \theta + 1}{\tan \theta} \cos \theta \quad \dots(6)$$

また、ベルトの破断強度は十分に大きい場合最大耐力 Q_{max} は接着強度 τ_a を用いて決まる。

$$T = \tau_a b l_a \quad \dots(7)$$

$$Q_{max} = nT \cos \theta = n(\tau_a b l_a) \cos \theta \quad \dots(8)$$

τ_a : 接着強度, b : ベルト幅, l_a : 接着長さ

(4),(7)式より接着がはがれた際の歪度(最大歪度)からベルトの平均接着強度を求めると、 $0.55 \sim 0.65 \text{ N/mm}^2$ に分布しており、ばらつきは小さかった。

図 12 において、剛性・最大耐力について(6),(8)式を用いた計算値と実験値の比較を行う。(6)式において有効係

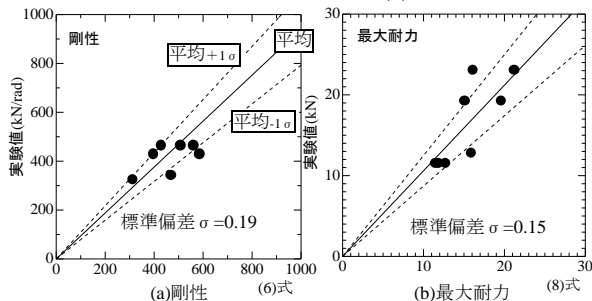


図 12 歪度-せん断変形角関係

数 $\alpha = 0.4$, $\beta = 0.7$ とし、(8)式の接着強度は試験体全体の平均値 0.61 N/mm^2 を用いた。

標準偏差はそれぞれ 0.19, 0.15 とばらつきは小さく

(6),(8)式により、補強架構の剛性・耐力が評価できる

5.3 動的実験と静的実験の比較

動的実験では大変形時まで実験ができない場合が多く、静的実験と動的実験の結果を比較することにより、静

の実験から把握する耐震性能の妥当性を検証する。

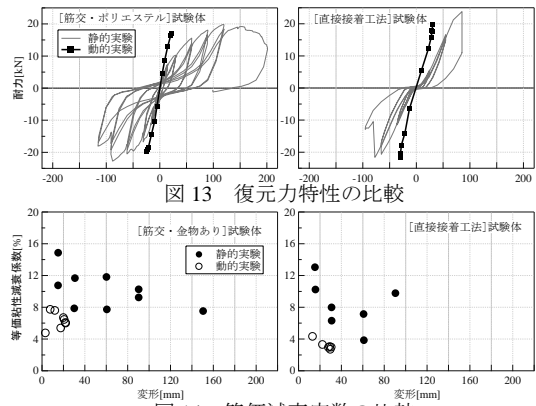


図 13 復元力特性の比較

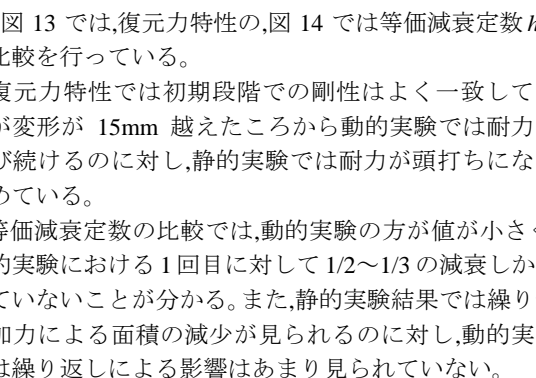


図 14 等価減衰定数の比較

図 13 では、復元力特性の、図 14 では等価減衰定数 h_{eq} の比較を行っている。

復元力特性では初期段階での剛性はよく一致しているが変形が 15mm 越えたところから動的実験では耐力が伸び続けるのに対し、静的実験では耐力が頭打ちになり始めている。

等価減衰定数の比較では、動的実験の方が値が小さく、静的実験における 1 回目に対して 1/2~1/3 の減衰しか有していないことが分かる。また、静的実験結果では繰り返し加力による面積の減少が見られるのに対し、動的実験では繰り返しによる影響はあまり見られていない。

この原因としては、最大荷重付近に長く停滞する静的実験ではほぼ部分におけるめり込みによるスリップ特性が顕著となるといった載荷速度の違いや、加力方向の試験体長さが静的実験は半間、動的実験は 1 間半といったプロポーシヨンの違いによって転倒モーメントの影響が異なることが考えられる。

6. 研究のまとめ

直接接着工法において在来型の両筋交いと比較すると剛性がやや低いものの、変形性能に富み高い耐力が期待できること、最大耐力はベルト端部の接着破壊に支配されるため、接着面積を増加させることで耐力が上昇することが分かった。また、開口部を有する軸組みに対しても補強効果があることが確認できた。外壁残存工法では、シート補強により耐力・剛性が向上し、外装材の撤去を行うことなく耐震補強を行えることが示された。居ながら施工や改修費用などの点から今後の耐震補強工事の有効な方法のひとつになり得るものと考えられる。

ベルト筋交いのせん断抵抗機構をモデル化して実験結果に基づき検討を行うことで補強架構の剛性・耐力の評価法を示すことができた。

動的実験から、ポリエステル補強試験体では減衰の値は小さいものの、繰り返し加振を行った際の最大変形はほとんど変わらず、余震など繰り返しの地震に対して効果が大きいと考えられる。

動的・静的実験の比較により、初期の剛性はほとんど差が見られないのに対し、載荷速度や転倒モーメントの影響により復元力特性では動的実験結果が上回ることで、エネルギー吸収能力は静的実験の結果が大きいことが分かった。

- 1) 日本建築学会：木質構造設計基準・同解説
- 2) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門
- 3) 建築基準法施工令 46 条：構造耐力上必要な軸組み当
- 4) 協会住宅の耐震精密診断と補強方法(改訂版)