

1. 序論

1995年阪神淡路大震災では、木造住宅の倒壊が多くの死傷者を出す原因となった。近年、宮城県沖・東海地震等の大地震発生の可能性が高まっている状況において、木造住宅の耐震性の確保・向上は、重要かつ急務な課題となっている。また、建物の倒壊を防止することも重要であるが、中小地震等においても内・外装材が損傷してしまうと修復に費用がかかるため、中小変形時にも耐震性能を向上させることには大きなメリットがあると考えられる。そこで本研究では、木造住宅の耐震性能の向上を目的とし、粘弾性体テープを用いた制振工法の有効性を確認し、評価法を提案することを目的として実験・研究を行った。

2. 工法の概要

本研究で使用する材料は、厚さ1mmのブチルゴム系の粘弾性体である。補強方法としては、テープ自体が接着力を持っており、柱や間柱等の軸組に貼付け、その上から構造用合板や石膏ボード等の面材を取付け釘打ちするだけという簡単なものである。地震等により建物が振動すると、軸組がせん断変形するのに対し、面材は回転変形するので間に相対変形が生じ、両者間のテープはせん断変形して、地震エネルギーを吸収し建物の応答変位を低減できる。また減衰効果と共に耐力・剛性の向上も同時に期待する工法である。

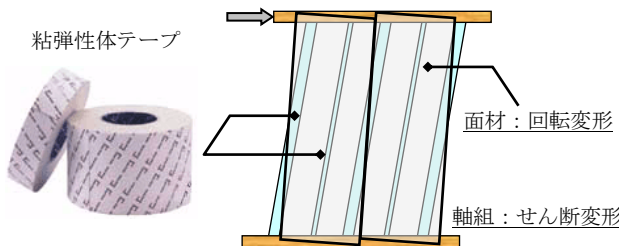


図1 工法の概要

3. 粘弾性体テープ単体加振実験

3.1 実験計画

粘弾性体テープの材料特性を把握するため、写真1に示すインストロン試験機により加振実験を行った。試験体は図2に示すような粘弾性体テープ(30×100×1mm)を、ベニヤ板を取り付けた鋼製治具両面に貼り付け、アングルの治具で挟み上下方向に加振する。実験における加振サイクルを表1に示す。実験は粘弾性体の温度依存性を考慮し、10℃、20℃、30℃、40℃の環境下で行い、ばらつきを考慮して同試験を3体ずつ行っている。



写真1 加振装置

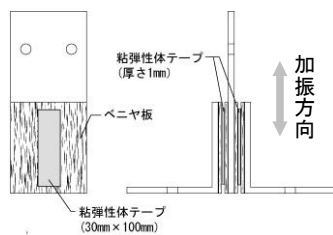


図2 試験体概要

表1 材料実験における加振サイクル

振動数	振幅
1.0Hz	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 6.0 mm
1.5Hz	0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm
3.0Hz	0.5, 1.0, 2.0 mm
6.0Hz	0.5, 1.0 mm

3.2 実験結果

実験結果の一部(20℃)を図3に示す。振幅を一定とし加振振動数を変えるとループの傾きが変化し、また振動数一定とし振幅を変えると同様にループの傾きが変化していく。よって粘弾性体テープには、振動数依存性、振幅依存性があることが確認できる。また、図4から異なる温度の結果を比較すると、温度が低いほど等価剛性 K_1 (式(3))・履歴吸収エネルギー ΔW (図6)が大きく、温度依存性があることについても確認できた。

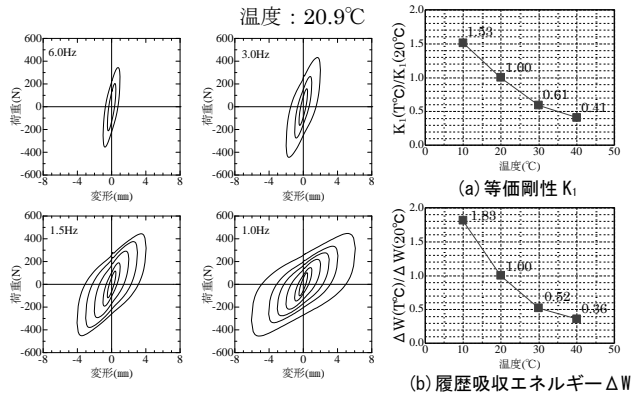


図3 荷重-変形関係 (20℃)

図4 温度依存性

3.3 粘弾性体テープのモデル化

粘弾性体テープの力学モデルの構築を行う。モデル化には図5に示すMaxcell流体モデルにKelvin固体モデルを並列に結合した4要素モデルを用いた¹⁾²⁾。4要素モデルの複素ばね定数の実部 K_1 、虚部 K_2 と等価粘性減衰数 heq を(1)~(5)式、図6に示す。

$$K_1 = \frac{\omega^2 k_M c_M^2}{\omega^2 c_M^2 + k_M^2} + k_K \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{\omega k_M^2 c_M}{\omega^2 c_M^2 + k_M^2} + \omega c_K \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{P_1}{\delta_{\max}} \quad (3)$$

$$K_2 = \frac{P_2}{\delta_{\max}} = \frac{\Delta W}{\pi \delta_{\max}^2} \quad (4)$$

$$heq = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{We} \quad (5)$$

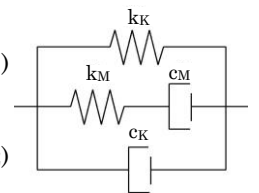


図5 4要素モデル

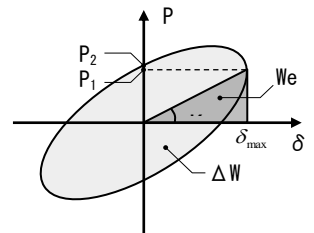


図6 荷重-変形関係

モデル化にあたり、まず温度20℃時における k_K, k_M, c_M, c_K を実験結果より求めた¹⁾²⁾。次に温度20℃におけるモデルを基準として、他の温度Tでの実験結果より温度依存性を求め、以下の式で

表されるように4要素モデルのパラメータを決定した。

$$\begin{aligned}
 k_K &= 17.24\gamma^{-0.628}e^{-0.050T} & \gamma: \text{テープのせん断歪} \\
 k_M &= 628.24\gamma^{-0.471}e^{-0.050T} & \omega: \text{円振動数} \\
 c_M &= 92.32\gamma^{-0.401}e^{-0.050T} & T: \text{温度}(\text{C}) \\
 c_K &= (14.73 - 103.83\gamma^{-0.363}e^{-\frac{\omega}{4.82}})e^{-0.050T}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

(6)式より荷重-変形関係を再現し、実験結果との比較を図7に示す。両者は概ね一致しており、本モデル化より荷重-変形関係を表せることが確認できた。

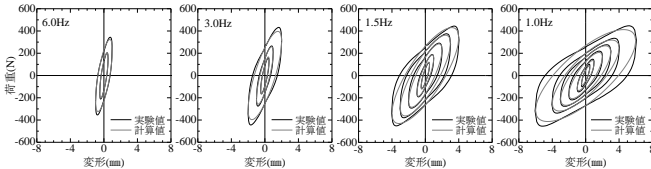


図7 実験値との比較(20°C)

4. 木造架構の振動台加振実験

4.1 正弦波加振実験

4.1.1 試験体概要

本研究では木造住宅を想定して、試験体の仕様は実情に合わせた実大の架構とし、軸組寸法はすべて共通で幅2P×高さ3P程度(P=910mm)の1間の壁とした。試験体の種類は大きく分けて1)内壁の補強として天井・床面を考慮し上下に開口を設けた石膏ボード(GB)試験体(図8(a))、2)外壁を想定した合板(PW)試験体(図8(b))があり、粘弾性体テープ補強の有無を実験パラメータとした。試験体の一覧を表2に示す。粘弾性体テープは石膏ボード試験体には柱・間柱のみに、合板試験体においては柱・間柱に加えて梁・土台にも貼り付け補強している。

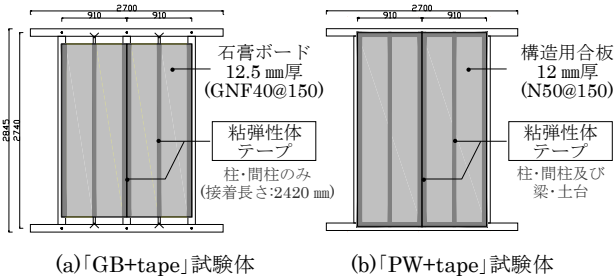


図8 試験体概要

表2 試験体一覧

試験体名	耐力要素	仕様	テープ補強
GB-T	石膏ボード	GNF40	—
GB+tape-T	910×2420×12.5mm	@150	有(629.2×10³mm²)
PW-T	構造用合板	N50	—
PW+tape-T	910×2730×12mm	@50	有(794.3×10³mm²)

- ※1 各試験体の実験を夏(30°C)、冬(10°C)、春(20°C)で実施
- 2 試験体名の「T」は実験時の温度を示す。
- 3 春の実験では各試験体それぞれ3体ずつ実施
- 4 夏に行った「PW+tape-30」試験体についてはテープを柱・間柱のみに接着(接着面積:709.8×10³mm²)

4.1.2 加振装置と加振方法

加振装置を図9に示す。試験体は梁・土台をφ16ボルト6本で治具に固定する。下部治具を固定し、下面にボールベアを設けた上部治具が、振動台を揺らすことにより左右に平行移動し、試験体に逆対称曲げが生じるようにした。片側だけをピン-ピンの鋼材で接合することに

より、加振方向に対し垂直方向にも上部治具が動けるため、柱の抜け出し変形も考慮できるようにした。そのため柱接合部は柱頭を羽子板ボルト、柱脚を25kN用ホールダウン金物で補強している。

加振には正弦波を使用し、実際の建物の挙動に近いように1/120rad.時の固有周期を3Hzとし、表3のように加振サイクルを決定した。

表3 加振サイクル

目標変形角(rad)	振動数(Hz)
1/480	6.00
1/240	4.24
1/200	3.87
1/120	3.00
1/60	2.12
1/30	1.50
1/15	1.06

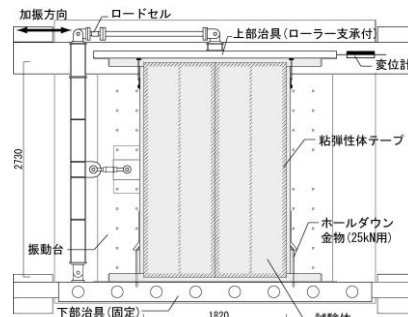
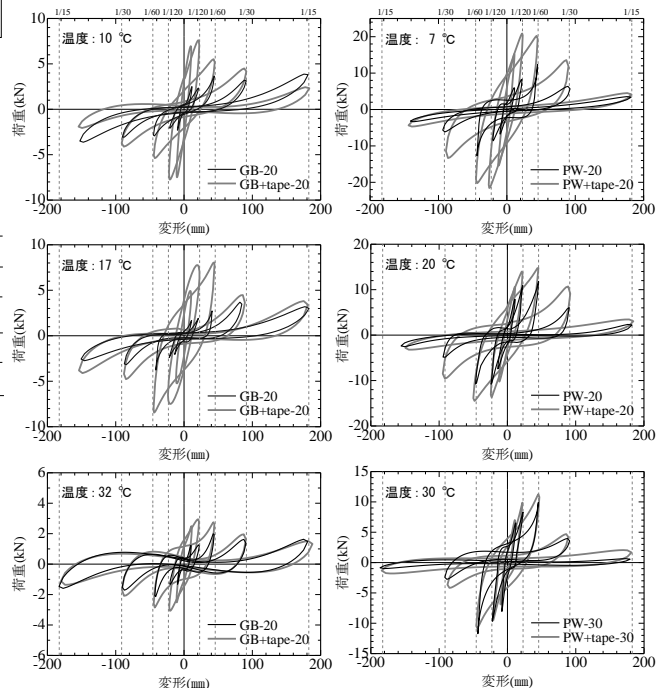


図9 加振装置

4.1.3 荷重-変形関係と破壊に至る挙動

実験結果を図9に示す。破壊に至る挙動は、テープの有無でほとんど変化はなく、石膏ボード試験体においては1/120rad.時にボードの四隅等にひび割れが見られ、釘の引き抜けによる跡が釘穴の周りで目立ち始める。その後の変形では釘穴が広がり、ボードの浮き上がりなどが見られ損傷が大きくなっていった。合板試験体では1/60rad.程度から部分的に釘が抜け出しているものが見られ、1/30rad.になると全体で釘の引き抜けが起り、耐力は低下している。

図9からテープの有無で比較すると、テープ有の「GB+tape」、「PW+tape」試験体は「GB」、「PW」試験体に比べ、耐力が増加し履歴ループも大きくなっており、粘弾性体テープを貼ることにより耐力や履歴吸収エネルギーが増加することが確認できる。特に1/60rad.程度ま



(a) 石膏ボード試験体

(b) 合板試験体

図9 荷重-変形関係の比較

での中小変形時の履歴ループでテープによる大きな補強効果が確認できるが、大変形時の履歴ループではほとんどテープの有無で差は見られない。この理由として、大変形時には粘弾性体テープのせん断歪が一般的な粘弾性体の変形限界とされる500%を大きく超え、テープそのものが損傷したり、木材からの剥がれが生じたりするなど、補強効果が低下していることが考えられる。また、面材自体における損傷も大きく、ボードの浮きや釘の引き抜けなどテープを圧着できなくなる事なども影響してくるものと思われる。ただ中小変形時には大きく耐力や履歴吸収エネルギーが増加しており、粘弾性体テープによる制振工法の有効性が確認できる。

4.1.4 補強性能の比較

(5)式より等価粘性減衰定数 heq を求め、エネルギー吸収能力の比較を図10に示す。「GB」、「PW」試験体が概ね heq が10~15%であるのに対し、テープ補強した「GB+tape」、「PW+tape」試験体では概ね heq が20%以上と高い値を示しており、エネルギー吸収能力の向上が確認できる。各温度においても heq はほぼ同程度である。また、図11に各試験体の等価耐力の比較を示す。等価耐力とは荷重に減衰による応答低減効果を考慮したものであり、耐力に $(1/Fh)$ を乗じて求めた減衰による見かけ上の耐力である。 Fh は次の式より求められる。

$$Fh = 1.5 / (1 + 10heq) \quad (7)$$

テープで補強した試験体の heq は概ね20%以上あり、(7)式から減衰により地震力を50%以上低減できると考えられる。

また等価耐力より等価壁基準耐力及び壁倍率を求め、図12に示す。ここで示す等価壁基準耐力は $1) P_{da1/120}/d$: $1/120$ rad.時等価耐力、 $2) 0.2P_u/Ds/d$: 終局耐力 P_u と韌性により設定される数値の小さい方の値を壁長さ

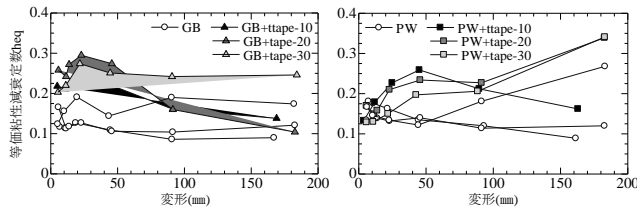


図10 等価粘性減衰定数の比較

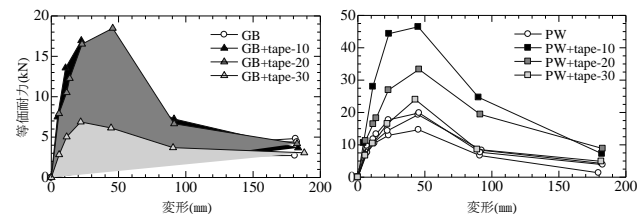


図11 等価耐力の比較

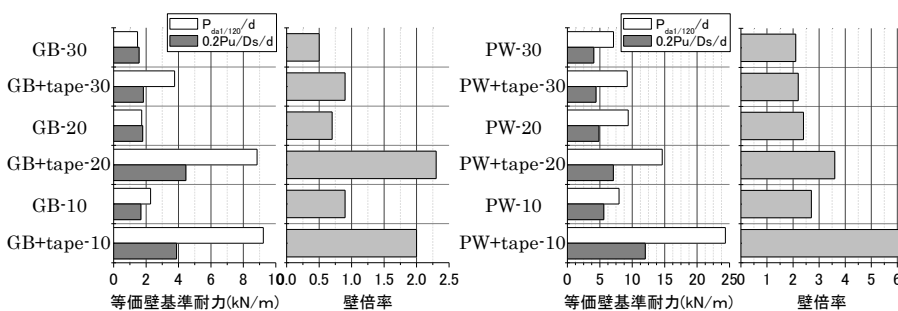


図12 等価壁基準耐力及び壁倍率の比較

($d=1.82m$)で除して求めたものである。³⁾⁴⁾等価壁基準耐力を比較すると、30℃の試験体では温度依存性や大変形時に補強効果か小さいこともあり2)の値ではあまり差が見られないが、1)の値では特に石膏ボードの試験体では2倍程度に増加しており、夏の時期においても補強効果が確認できる。10℃と20℃の試験体においては2)の値においても大きく増加している。壁倍率においてもテープの有無で差が見られ、粘弾性体テープにおける補強の有効性が確認できるものと思われる。

4.2 地震波加振実験

4.2.1 試験体概要

試験体は加振方向1.5間[2730mm]・高さ2730mmで耐力要素として石膏ボード(910×2420×12.5mm)を3枚設置した(図13)。試験体の種類は正弦波加振実験同様、在来の「GB」試験体と柱・間柱に粘弾性体テープを貼り付けた「GB+tape」試験体で、接着長さは2420mmである。試験体上部には鋼製の錘(質量1.66ton)を設置した。入力地震波は、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持つ模擬地震動(以後、告示波)を作成し⁵⁾これを使用した。加振計画は告示波の振幅の20%から開始し、10%ずつ順次振幅を増加させるものとした。

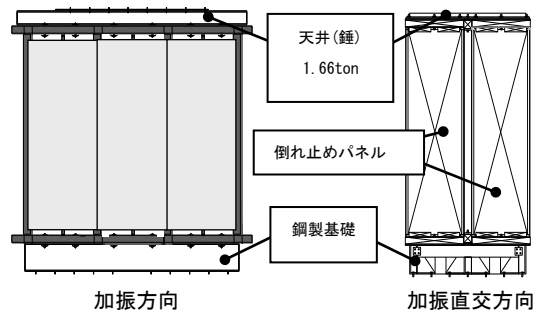
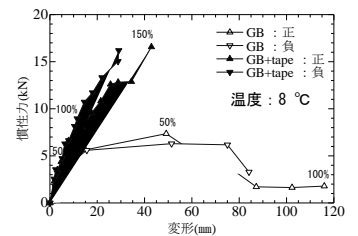


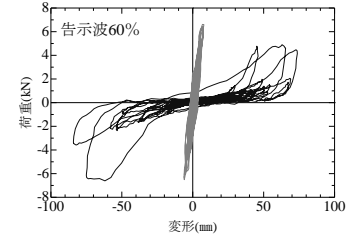
図13 試験体概要

4.2.2 実験結果

荷重-変形関係を図14に示す。「GB」試験体は告示波の50%で大きく変形が進み、石膏ボードの四隅がかかり、釘が引き抜けたりした。告示波の70%以降になるとほとんど耐力もなく、変形だけが進んでいった。それに対して「GB+tape」試験体においては告示波の150%まで加振したが、ほぼ弾性範囲内におさまり、耐力は2倍程度増加し、石膏ボードの損傷もほとんど見られず、内外装材の損傷の防止などに対しても十分な効果があると考えられる。



(a) 荷重-変形関係



(b) 告示波60%

図14 実験結果

5. 補強効果の評価

本研究の粘弾性体テープによる補強架構の耐力及び履歴吸収エネルギーは 1)木造軸組、2)釘打ちした面材、3)粘弾性体テープの各要素別の耐力及び履歴吸収エネルギーの総和になると考えられる。そこで粘弾性体テープによる補強効果を材料実験の結果より求め、耐力及び履歴吸収エネルギーについて評価を行う。

軸組がせん断変形し、面材が回転変形するので、テープは図 15 のように x, y 方向の変形による力が釣り合うように変形する。x 方向の変形による力は軸組のせん断力と釣り合い、テープ補強で増加する耐力である。テープ補強による耐力および履歴吸収エネルギーの増分は以下の式により求められる。

$$\Delta Q = \int_0^h K_1(\gamma_{xy}, \omega, T) \cdot \gamma_x(R, y) \cdot t \cdot b dy \quad (8)$$

$$\Delta W = 2 \times \int_0^h K_2(\gamma_{xy}, \omega, T) \cdot \pi \cdot (\gamma_{xy} \cdot t)^2 \cdot b dy \quad (9)$$

ここで、h: 接着長さ、b: テープ幅、t: テープ厚

テープの力学的特性には振幅依存性があるため、微小区間を考え、それぞれの区間の変形から(6)式の 4 要素モデルよりテープによる補強効果を求め、架構全体の合計の耐力及び履歴吸収エネルギーの増分とした。テープの変形については幾何学的に試験体の層間変形との関係を求め、振動台実験において軸組に対する面材のずれを計測した結果をもとに補正した。

図 16 に材料実験による評価と実験結果との比較を示す。ここで実験結果とは正弦波加振実験の「GB+tape」, 「PW+tape」試験体の耐力及び履歴吸収エネルギーから「GB」, 「PW」試験体の耐力及び履歴吸収エネルギーを引いたもので、テープのみによる性能である。また、図 17 には材料実験による評価(計算値)と実験値との比を示す。

材料実験ではテープと木材を十分均一に接着できるのに対し、実建物を模擬した軸組に貼り付けた試験体の場合であると、テープが架構や面材に十分に接着されていない箇所も点在すると考えられ、材料実験の結果との比較から推定すると、テープの接着に 30%程度ばらつきがあるものと思われる。また、面材の損傷や釘の引き抜け等の損傷により変形が進行するが、この変形の進行に伴うテープの補強効果の低減を図 17 のように近似した。石膏ボードにおいては、1/30rad. (水平変形 91.33mm) 以降はほとんど補強効果がないものと思われ、1/30rad. までの評価とした。

これらの低減をもとに耐力等を求め、荷重-変形関係を再現し、図 18 に実験値との比較を示す。実験値は「GB+tape-20」, 「PW+tape-20」試験体である。概ね実験結果とも近い挙動が得られ、以上をもとにして補強効果

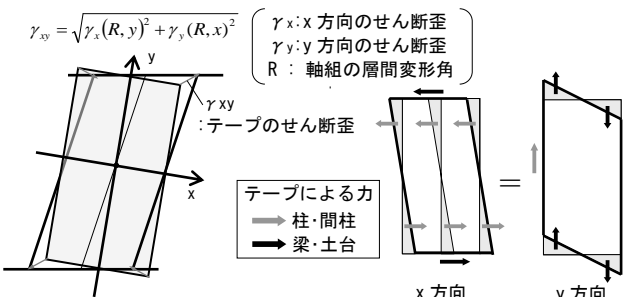


図 15 テープの変形・力の概要

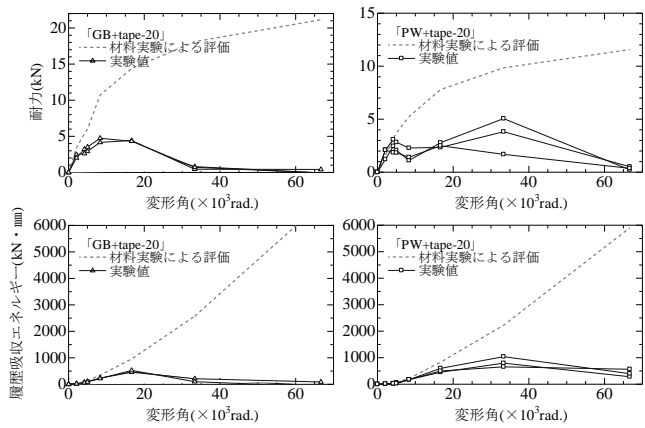


図 16 材料実験による評価と実験値との比較 (1)

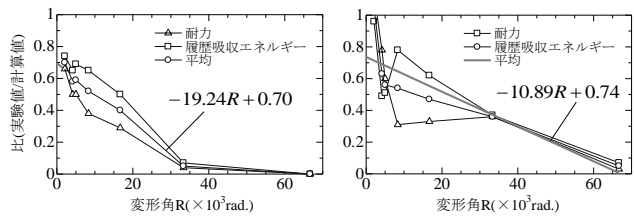


図 17 材料実験による評価と実験値との比較 (2)

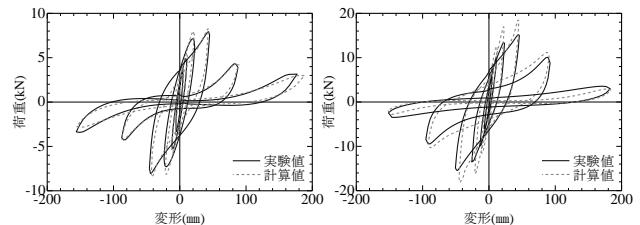


図 18 荷重-変形関係の比較

の評価を行うことができることが確認できた。

6. 結論

粘弾性体テープを用いた制振工法の加振実験を行い、補強効果の確認・評価を行った。本補強工法の特徴として、中小変形時に特に耐力やエネルギー吸収能力の向上が大きく、 h_{eq} も概ね 20%と高い値となった。テープの変形の性能限界、面材の損傷などの影響により大変形時には補強効果が小さくなるものの、10℃と 20℃で行った実験においては等価基準耐力等の増加が見られ、有効性が確認できた。また、地震波による加振においても変形を抑えられ、石膏ボードの損傷を低減できるなど補強による効果が確認できた。また材料実験をもとに耐力や履歴吸収エネルギーについて求め、荷重-変形関係を再現し、補強効果の評価を行った。

【参考文献】

- 1) 船木尚己、竹幸広、川股重也：骨組制振用粘弾性ダンパーの抵抗モデル，東北工業大学情報処理技術研究所紀要 EOS Vol.10 No.1, 1997
- 2) 半澤徹也、佐藤孝典、邵立、寺田岳彦、西村拓也、堀江竜己：スチレン-オレフィン系粘弾性体のモデルと制振効果，日本建築学会技術報告集 第13号 pp63-68, 2001.7
- 3) 財団法人 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法 木造住宅の耐震精密診断と耐震補強(改訂版)，2004.7
- 4) 財団法人 日本建築防災協会：住宅等防災技術評価関連資料，2004.11
- 5) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994