

## 歴史的木造建物の耐震性を向上させる改修技術の開発 -雑壁の耐震性能評価法の提案-

宇都宮直樹\*<sup>1</sup>, 大西泰弘\*<sup>2</sup>, 高橋繁二\*<sup>2</sup>, 戸塚元雄\*<sup>2</sup>, 越智隆行\*<sup>3</sup>, 宮本慎宏, 松島 学\*<sup>4</sup>

これまで歴史的木造建物に用いられる土壁の耐力変形関係の推定について, 土質力学に基づき壁長さ 910mm 及び 1820mm の検討を行ってきた. 本研究では壁長さ 1820mm の垂壁や腰壁で構成された土壁の耐力変形関係の推定を行う. 耐力の推定は, 壁土の要素実験から粘着力とせん断抵抗角の算定を行う. 変形の推定は要素実験における応力度とひずみ度の関係から行う. 実大実験を行い, 推定式の妥当性の検討を行った結果, 推定式の有効性を確認した.

**Keywords** : 歴史的木造建物, 腰壁, 垂れ壁, 土壁, 耐震性能評価.

### 1. はじめに

土壁に用いられる壁土は, 建物を建設する地域で採取され, 粘性のある土と稲藁などの繊維材を混ぜ合わせて製造される. 土壁に作用する地震などの水平荷重の大部分は壁土が負担するため<sup>1)</sup>, 土壁を用いた歴史的木造建物の耐震性能を評価する上で壁土の粘着力やせん断抵抗角の強度定数を把握することは重要である. 壁土の強度特性は, 土の採取地や繊維材の混合量によってことなるため<sup>2)</sup>, 地域ごとの土壁の耐力変形関係を把握するためには, 実大実験や部分壁体試験を行う必要がある. 壁土のせん断強度に影響を及ぼす粘着力やせん断抵抗角などの強度定数を要素実験から把握し, 実大土壁の耐力変形関係を推定できれば, 多くの時間と費用を要する実大実験を行うことなく, 歴史的木造建物の耐震性能評価が可能となる.

本研究では, 壁土の強度定数を要素実験から把握し, 土質力学に基づいて, 垂壁や腰壁等の雑壁で構成された土壁の耐力変形関係推定式の構築をすることを目的とする. 2章では, 壁長さ 1820mm の垂壁や腰壁で構成された土壁の静的水平載荷実験を行い, 荷重変形関係や破壊モードを把握する. 3章では, 静的水平載荷実験における破壊モードから土質力学に基づいて力学モデルを構築し, 土壁の耐力低下域に至るまでの耐力変形関係推定式を構築する. 4章では, 推定値と実験値の比較から提案した推定式の妥当性を検討する.

### 2. 土壁の静的水平載荷実験

本章では, 垂壁のみで構成された土壁と垂壁に腰壁が付加された土壁の破壊モードを把握するため, 実大土壁の静的水平載荷実験を行う.

**2.1 実大試験体概要** 本実験に用いた試験体概要図を図 1 に示す. 試験体は長さ 1820mm, 高さ 2767.5mm の土壁である. 垂壁および腰壁は試験体の内法高さに対し 1/3 である. 木材の材種はすべてスギである. 部材寸法は柱と土台は 105×105mm, 横架材は 105×180mm, 横貫は 15×180mm である. 横貫と柱の仕口は大入れとし, 楔(材種:ヒノキ)で留める. 窓台及び窓まぐさは 50×105mm である. 窓台と窓まぐさは土

壁の生じる応力を十分に伝達できるようにするために, 短期許容耐力 3.6kN の仕口金物で柱と接合する. 柱と土台や横架材の仕口は, 接合部のモーメント抵抗を除去し, できるだけ壁土の影響のみを把握するため, 図 2 に示すように抵抗方向にそれぞれ 5mm のクリアランスを設け, 直径 15mm の込み栓(樹種:カシ)で接合する. 図 3 に示すように, 左官施工は小舞搔きを行った後に荒壁塗りを行い, 乾燥収縮に伴うひび割れが終了してから裏返し塗り, 大直し塗りを行う. 中塗りは下地が十分に乾燥してから大直し塗りの上に片面塗りとする.

表 1 に各試験体の壁土塗厚さを示す. 荒壁は横貫側から塗り, 小舞下地側まではみ出して塗り付けられるが耐震性能に及ぼす影響は少ないと考え, 荒壁の塗り厚さを貫の厚さとしている. 裏返しは縦貫の表面からの厚さとしている.

**2.2 壁土の要素実験** 実大試験体に用いた壁土の強度定数を把握するため, 要素実験として図 4 に示す一軸圧縮試験を行う<sup>3)</sup>. 各壁土の仕様を表 2 に示す. すべての壁土は香川県内で産出されたものである. 荒壁, 裏返し, 大直しは壁土製造業者によって繊維材の稲藁のすさを混合したものである. 中塗りは香川県内で市販されている粒の細かい「おろし土」を使用し, 壁土に適した状態となるように香川県の左官職人 1 名に経験的に土ともみすさの繊維材と砂を混合してもらった.

壁土の一軸圧縮試験には図 4 に示す円柱供試体を用いる. 繊維材を混合した壁塗り直前の状態の壁土を直径 125mm, 高さ 250mm の円筒形型枠に入れて供試体を成形し, 2 週間程度の気中養生を行う. 脱型後に再び気中養生を行い, 気中養生中に計測する質量に変化が見られなくなった時点で終了する. 実験条件を一定とするため, 既往の文献<sup>4)</sup>に準じて毎分 1% の圧縮ひずみが生じる割合で加力を行い, 最大荷重とせん断破壊面の角度から壁土の強度定数を求める.

各壁土の圧縮応力度 $\sigma$ ひずみ度関係の平均値を図 5 に示す. 試験後に既往の評価法<sup>3)</sup>に基づいて, 粘着力  $c$ , せん断抵抗角  $\phi$  及び弾性係数  $E_{50}$  を算定した結果の平均値を一覧にして表 2 に示す. 試験体数は各 5 体である

\*<sup>1</sup> 住居環境科

\*<sup>2</sup> NPO 法人土壁ネットワーク

\*<sup>3</sup> 四国職業能力開発大学校 住居環境科

\*<sup>4</sup> 香川大学工学部 安全システム建設工学科

が、試験結果における圧縮強度の最大値と最小値を除いた3体の平均値とする。中塗りは他の壁土の圧縮強度と比べ1.6~1.9倍となる。これは中塗りに用いる繊維材の形状が厚さ0.1~0.3mm、幅1mmと扁平であり、他の壁土で用いられている稲藁のすさは直径7mm程度のストローの形状と比べ、供試体中の土粒子の体積の減少が抑えられ、土粒子間の結合が低下しなかったことが要因と考えられる。

**2.3 荷重及び計測方法** 荷重装置の概要を図1に示す。試験体の土台の左右をM16の六角ボルトで固定し、横架材にサーボアクチュエーターを介して水平荷重を与える。荷重方法はタイロッド式とし、加力サイクルは既往の文献<sup>5)</sup>を参考に、真のせん断変形角 $\gamma_0$ が1/600, 1/450, 1/300, 1/200, 1/150, 1/100, 1/75, 1/50radで繰り返し、履歴の同一変形段階で3回の正負交番繰り返し加力とする。終局は1/10radまでの片引きとする。試験体に作用する荷重はサーボアクチュエーターの先端に取り付けたロードセルで計測する。変位計H1で横架材の水平方向変位、H2で土台の水平方向変位、変位計V3とV4で柱脚の鉛直方向変位を計測する。

## 2.4 実大実験結果

**2.4.1 荷重変形角関係** 各試験体の荷重変形角関係を図6に示す。垂壁試験体は1/12.5rad時、垂壁腰壁試験体は1/20.7rad時に最大耐力となる。実験結果の一覧を表3に示す。降伏耐力 $P_{ey}$ と初期剛性 $K_e$ は既往の文献<sup>5)</sup>に準じて求めている。土壁の面積が大きくなると最大耐力、初期剛性ともに大きくなる。

**2.4.2 破壊性状** 各試験体の中塗り側のひび割れを図7に示す。黒色は+方向(紙面左方向)加力時、灰色は-方向(紙面右方向)加力時に発生したひび割れである。

垂壁試験体は軸組のせん断変形の進行に伴い、1/100rad時に土壁の軸組と壁土の境界面に、横架材や土台の支圧力によって隅角部の壁土が圧壊してひび割れが生じる。1/20rad時に垂壁にせん断ひび割れが生じる。垂壁腰壁試験体は軸組のせん断変形の進行に伴い、1/600rad時に土壁の軸組と壁土の境界面に、横架材や土台の支圧力によって隅角部の壁土が圧壊してひび割れが生じる。1/30rad時に垂壁にせん断ひび割れが生じ、1/10.5rad時に腰壁にせん断ひび割れが生じる。

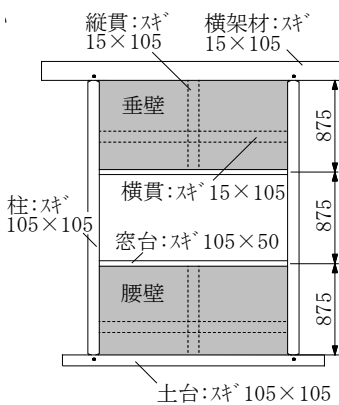
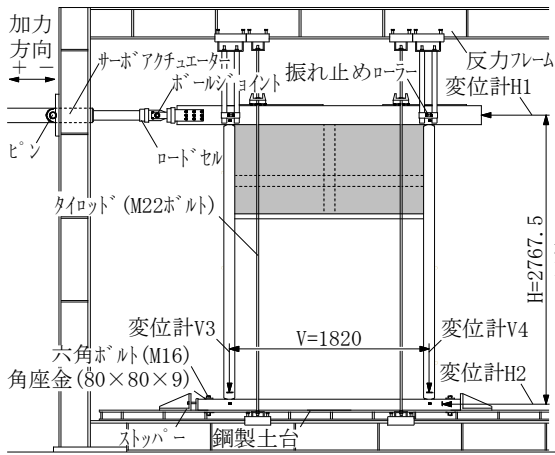


図2 仕口詳細図

図1 試験体概要図および試験装置

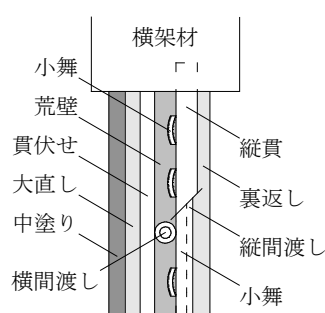


図3 断面詳細図



図4 一軸圧縮試験

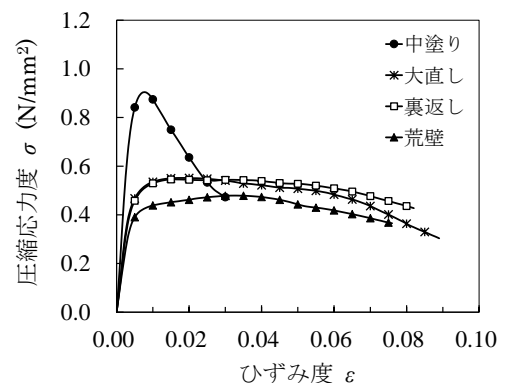


図5 圧縮応力度 - ひずみ度関係

表1 壁土塗厚

| 試験体名 | 荒壁<br>(mm) | 裏返し<br>(mm) | 貫伏せ<br>(mm) | 大直し<br>(mm) | 中塗り<br>(mm) |
|------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 垂壁   | 15         | 9           | 9           | 13          | 6           |
| 垂壁腰壁 | 15         | 10          | 10          | 12          | 7           |

表2 要素実験結果

| 壁土種類       | 圧縮強度 $\sigma_u$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 $E_{50}$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 粘着力 $c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | せん断抵抗角 $\phi$<br>(°) | 推定せん断強度 $s$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 繊維材混合量<br>kg/100% |
|------------|---|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------------|
| 荒壁         | 0.47                                    | 111.7                                 | 0.20                            | 9                    | 0.23                                | 1.5               |
| 裏返し<br>大直し | 0.55                                    | 127.5                                 | 0.21                            | 14                   | 0.26                                | 1.8               |
| 大直し        | 0.53                                    | 127.2                                 | 0.19                            | 18                   | 0.25                                | 1.7               |
| 中塗り        | 0.90                                    | 229.9                                 | 0.26                            | 31                   | 0.39                                | 2.2               |

### 3. 雑壁を有する土壁の耐力変形推定式の提案

#### 3.1 耐力変形推定フロー 図4に示す壁土の一軸圧縮

試験を行い、圧縮応力度-ひずみ度関係から弾性係数  $E_{50}$ 、圧縮強度  $\sigma_u$  と要素実験のせん断破壊面の角度  $\alpha_f$  から壁土の粘着力  $c$  とせん断抵抗角  $\phi$  を求める。水平荷重を受ける土壁は軸組から拘束力を受け、拘束力の増加により図8に示すA点およびD点の隅角部から、それぞれB点およびC点に向けて壁土にせん断ひび割れが生じ、圧縮ストラットが形成される。荷重は圧縮ストラットにより伝達され、圧縮ストラットのB-C面がせん断破壊する時に最大耐力となる。本推定式ではせん断面B-Cが保有する壁土のせん断耐力を超えると土壁がせん断破壊すると仮定する。

提案する耐力変形角関係のモデルは図9に示すように、降伏耐力  $P_y$  の後、最大耐力  $P_u$  となる2段階の剛性を持つとしている。最大耐力直後は著しい低下を生じないことから、最大耐力を保持する変形角  $\gamma_u'$  を考慮する。最大耐力保持以降は変形の増加に伴う耐力低下をモデル化し、要素実験の応力度-ひずみ度関係を用いて連続的に土塗壁の耐力変形関係の推定を行う。本報では最大耐力、降伏耐力、降伏変形および最大耐力時の変形について述べる。

#### 3.2 力学モデル 実大実験より破壊モードが壁土のせ

表3 実験値と推定値の最大耐力比較

| 試験体名 | 降伏耐力 $P_{ey}$ (kN) | 初期剛性 $K_e$ (kN/rad) | 最大耐力 $P_{eu}$ (kN) |
|------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 垂壁   | 2.17               | 91                  | 4.17               |
| 垂壁腰壁 | 4.37               | 450                 | 7.54               |

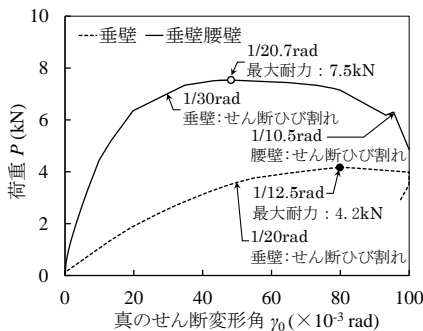


図6 荷重変形角関係

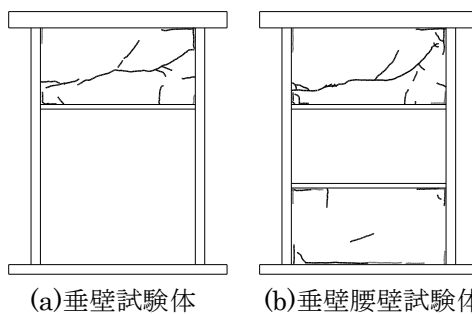


図7 ひび割れ図(1/10rad時)

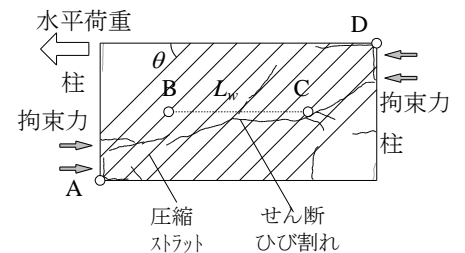


図8 土壁の抵抗機構

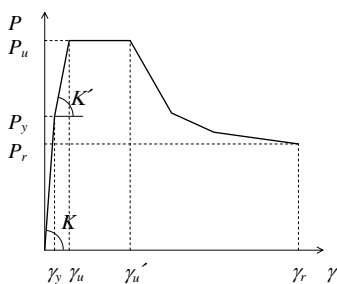


図9 力学モデルの荷重変形角関係

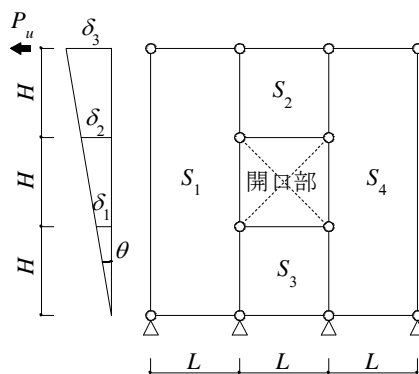


図10 土壁架構の一例

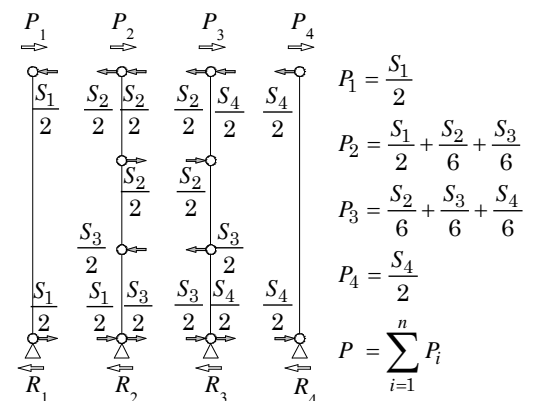


図11 柱のせん断力

ん断破壊であったことから既往の文献(6)に基づいて、図10に垂壁および腰壁を有する土壁架構の一例を示す。4つの土壁があり、中央に開口を設けている。土壁はせん断力のみにより変形し、曲げ変形はしないものと仮定する。垂壁および腰壁を有する土壁に作用する水平荷重は、横架材を通して柱に伝達し、柱が土壁に力を伝達して抵抗すると仮定する。横架材に作用する水平荷重は土壁両端にある柱に1/2ずつ分担されると仮定すると図11に示すように各土壁から柱にせん断力  $S_i$  が作用する。各土壁のせん断力  $S_i$  によるモーメントと各柱が分担する水平力  $P_i$  によるモーメントが釣り合う。土壁架構の水平力  $P$  は、柱の分担する水平力  $P_i$  を合計することで求めることができる。ここで、 $R_i$  は反力である。

3.3 最大耐力の推定 図8に示すように土壁のせん断破壊時に抵抗するB-C間の長さ  $L_w$  は内法長さから内法高さを減じた値とし、せん断ひび割れの角度  $\theta$  を  $\pi/4$ 、水平荷重による拘束力は柱から伝達されると仮定している。せん断ひび割れは隅角部を支点として土壁中央部に向かって生じるため、せん断ひび割れ角度  $\theta$  は試験体形状の影響を受け、壁土の強度定数による影響は小さいと考えられる。土壁のせん断破壊時の最大耐力  $P_u$  は、表1に示す各層の壁土塗厚  $t_{wi}$  にせん断抵抗する長さ  $L_w$  と壁土内部に生じるせん断応力度  $\tau_i = c_i + \sigma \tan \phi_i$  を乗じたものであり、式(1)となる。

$$P_u = \sum_{i=1} (t_{wi} \cdot L_w \cdot \tau_i) = \sum_{i=1} \{ t_{wi} \cdot L_w \cdot (c_i + \sigma \cdot \tan \phi_i) \} \quad (1)$$

ここで、 $c_i$  は壁土の粘着力、 $\phi_i$  は壁土のせん断抵抗角である。 $\sigma$  は圧縮ストラットに垂直に作用する応力度であることから、 $P_u \cdot \cos \theta / (L_w \cdot t_{wi})$  であり式(1)を整理すると式(2)となる。

$$P_u = \sum_{i=1} \left( \frac{c_i \cdot t_{wi} \cdot L_w}{1 - \cos \theta \cdot \tan \phi_i} \right) \quad (2)$$

3.4 降伏耐力の推定 既往の実験結果<sup>7)-9)</sup>より、破壊モードがせん断破壊となる試験体の最大耐力  $P_u$  に対する降伏耐力  $P_y$  の比の平均値が  $P_y/P_u \cong 0.64$  であることから式(3)とする。

$$P_y = 0.64 \cdot P_u \quad (3)$$

3.5 降伏変形角の推定 弾性域において各層の壁土内部に生じるせん断応力  $\tau_1$  とせん断弾性係数  $G$ 、せん断変形角  $\gamma$  の関係は  $\tau_1 = G \cdot \gamma$  である。せん断弾性係数  $G$  は土質力学に基づき壁土の弾性係数  $E_{50}$ 、ポアソン比  $\nu$  より式(4)で示され、これらの関係からせん断応力度  $\tau_1$  は式(5)となる。

$$G = \frac{E_{50}}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (4)$$

$$\tau_1 = \frac{E_{50} \cdot \gamma}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (5)$$

ここで、壁土のポアソン比  $\nu$  を 0.2 とする。壁土の弾性係数  $E_{50}$  は文献 4) に基づき圧縮強さ  $\sigma_u$  の 1/2 と原点を結ぶ直線の傾きとする。

水平荷重  $P$  と壁土内部に生じる平均せん断応力度  $\tau_2$  の関係は、せん断面積  $A$  を壁土塗厚  $t_{wi}$  と内法長さ  $L$  を乗じた  $A = t_{wi} \cdot L$  とすると式(6)となる。

$$\tau_2 = \frac{P}{t_{wi} \cdot L} \quad (6)$$

$\tau_1 = \tau_2$  であることからせん断変形角  $\gamma$  について整理すると式(7)となり降伏変形角  $\gamma_y$  を求めることができる。

$$\gamma_y = \frac{2 \cdot P_y \cdot (1 + \nu)}{t_{wi} \cdot L \cdot E_{50}} \quad (7)$$

3.6 最大耐力時の変形角の推定 初期剛性  $K$  に対する降伏耐力  $P_y$  から最大耐力  $P_u$  までの第2剛性  $K'$  の比は、既往の実験結果<sup>7)-9)</sup>の平均値から  $K'/K \cong 0.38$  とする。

最大耐力時の変形角  $\gamma_u$  は、降伏変形角  $\gamma_y$  を用いて式(8)と示すことができる。

$$\gamma_u = \frac{(P_u - P_y)}{K'} + \gamma_y \quad (8)$$

#### 4. 実大実験結果と耐力変形推定値の比較

提案した耐力変形関係の推定式の有効性を検討するため、実大実験結果との比較を行う。

4.1 耐力変形関係の比較 3章で提案した式によって雑壁を有する土壁の耐力変形関係と実験結果の比較を図 11 に示す。垂壁試験体は初期剛性の差があるが、最大耐力後の耐力低下域に至るまで概ね実験値を再現出来ている。表 4 に示すように推定した最大耐力は実験値の 0.93~1.05 倍であることが確認できる。以上より、提案した耐力変形関係の推定式の有効性が示された。

#### 5. まとめ

本研究では、雑壁で構成された土壁の静的水平載荷実験を行い、耐力変形関係と破壊モードの確認を行った。壁土の要素実験から得られた強度定数を用いて、土壁の耐力変形関係推定式を提案した。実験値と推定値の比較を行い、推定式の有効性を確認した。

#### 6. 謝辞

本研究は国土交通省の歴史的風致維持向上推進等調査「景観を特徴づける歴史的木造住宅の居住性、耐震性、快適性を向上させる改修技術の開発」の一環として行われた。ここに記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 中尾方人, 山崎裕, 田中純: 土塗り壁のせん断耐力の評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, vol.49B, pp.573-578, 2003.3.
- 奥石直幸, 位田達哉: 主要産出地における荒壁土および中塗土の性質, 日本建築学会構造系論文集, 第 631 号, pp.1467-1474, 2008.9.
- 宇都宮直樹, 山中稔, 松島学: 藁スサを混合した新しい供試体の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 664 号, pp.1119-1124, 2011.6.
- 土の一軸圧縮試験法, JIS A 1216: 2009
- 技術解説書作成編集委員会: 土塗壁・面格子壁・落とし込み板壁の壁倍率に係る技術解説書, 日本住宅・木材技術センター, pp.83-91, 2004.2.
- 宇都宮直樹, 宮本慎宏, 山中稔, 松島学: 土質力学に基づく土塗壁の耐力変形推定式の提案 - 壁土のせん断破壊が卓越する場合 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 684 号, pp.363-368, 2013.2.
- 土壁ネットワーク: 土壁の耐震性向上のための技術的研究 2006・2007・2008 年度報告書, 2009.3
- 今西達也他: 小舞下地の仕様の違いが土塗壁の耐力に及ぼす影響について その 2 面内せん断試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp.349-350, 2010.9
- 宇都宮直樹, 宮本慎宏, 山中稔, 松島学, 大橋好光: 下地構成材の仕様が土塗壁の耐震性能に及ぼす影響, 構造工学論文集 vol.58B, pp.287-292, 2012.3

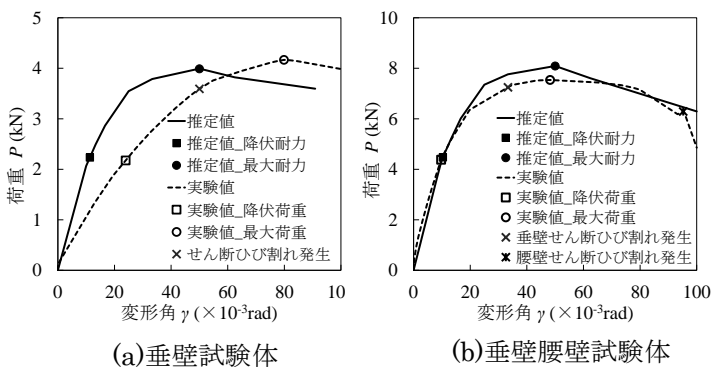


図 11 実験値と推定値の荷重変形角関係比較

表 4 実験値と推定値の最大耐力比較

| 試験体名 | 実験値<br>$P_{cu}$ (kN) | 推定値<br>$P_{cu}$ (kN) | $P_{cu}/P_{cu}$ |
|------|----------------------|----------------------|-----------------|
| 垂壁   | 4.17                 | 3.99                 | 1.05            |
| 垂壁腰壁 | 7.54                 | 8.09                 | 0.93            |