一間幅全面塗り京土壁の繰り返し載荷実験に基づく履歴曲線のモデル化

HYSTERESIS CURVE MODEL FOR KYOTO MUD WALL BASED ON CYCLIC LOADING TESTS

村本 真^{*1}, 午來 嵩顕^{*2}*Makoto MURAMOTO and Takaaki GORAI*

This paper proposes a hysteresis model with only the maximum load point as a parameter. This model is a regression curve using the load-deformation angle relationship normalized based on the maximum load point and unloading point. These curves are based on the statistical procedures of the experimental results of Kyoto mud wall. The virgin loading curve consisted of the polynomial and the hyperbola. The return curve was modeled by a polynomial, and the reloading curve was by a hyperbola. It is possible to construct a hysteresis model corresponding to different wall lengths and other region walls by collecting data.

Keywords : *Kyoto Mud wall, Japanese traditional building, Cyclic-loading test,**Hysteresis curve model, Maximum strength*

京土壁, 伝統構法, 繰り返し載荷実験, 履歴曲線モデル, 最大耐力

1. はじめに

木造住宅等に用いられる耐力壁の履歴曲線モデルは荒木らによるパイリニア・スリップモデル¹⁾をはじめとして、佐藤らによるBouc-Wenの連続関数モデル²⁾、松永らによる拡張NCLモデル³⁾、人見らによる改良EPHMモデル⁴⁾などが提案され、木造建物のシミュレーションに活用されている。これらのモデルは面材や筋かい耐力壁、制震装置を有する木造建物に適用されている。

伝統的な木造住宅では、耐力要素の一つに土壁がある。軸組部材の断面積や架構の大きさにもよるが、住宅規模においては土壁の耐力負担割合は大きく、構造評価上、その性能を把握しモデル化することは重要である。土壁の履歴曲線モデルは、文献1)のパイリニア・スリップモデルに繰り返し載荷による耐力劣化を加えた荒木らのモデル⁵⁾、梅村による曲線型モデル⁶⁾、拡張NCLモデル^{7), 8)}などがある。拡張NCLモデルでは高知県の荒壁⁷⁾、荒木田土の土壁⁸⁾へ適用した場合が報告されている。土壁の解析用モデルは地域毎に検討される必要があるが、京土壁における履歴曲線を提案したものは見当たらない。

筆者の一部は、文献9)において、土壁の履歴曲線モデルを検討する第一段階として、既往の実験報告を統計的に検討した上で、荷重-変形角包絡曲線を簡便に推定する方法を述べた。本論文では、これに引き続き、土壁を有する木造住宅等の構造性能の詳細な検討を可能にするべく、土壁の履歴モデルを曲線式で構築する方法を提案

する。ここでは、筆者の一部が実施した一間幅京土壁の繰り返し載荷実験^{10), 11)}の結果を整理し、これを統計処理することにより履歴曲線をモデル化する。この履歴曲線モデルは大変形領域までを対象とし、簡便な数式で表現される。できるだけ少ないパラメータとなるようにモデルを検討した結果、提案するモデル化手法は、最大荷重点のみをパラメータとして与えれば良い特徴がある。

また、提案した履歴曲線のうちの骨格曲線（処女載荷曲線）モデルを用いて、他研究者らによる実験を推定した結果を示し、さらに設計用モデルとしても利用できることを述べる。

なお、土壁の壁長が異なる場合や壁土材料が異なる他地域の土壁の場合の履歴モデルについて検討される必要があるが、本論文はモデル化における手法の提案に重点をおいており、本論文と同様に統計処理することで壁長、地域に応じたモデルが構築できる。本論文は、文献12)を加筆・修正したものである。

2. 京土壁の履歴曲線のモデル化の方法

2.1 モデル化の方針

本論文では、土壁の履歴曲線を処女載荷曲線、戻り曲線、再載荷曲線の3種類でモデル化する。

土壁の繰り返し載荷実験^{10), 11)}は両柱頭から19.6 kNの鉛直荷重を与えた載荷式の面内せん断試験であり、載荷履歴は $\pm 1/480$, $\pm 1/240$, $\pm 1/120$, $\pm 1/90$, $\pm 1/60$, $\pm 1/45$, $\pm 1/30$ radを2回、その

^{*1} 京都工芸繊維大学デザイン・建築学系
准教授・博士(学術)

^{*2} 宮城県庁土木部 修士(工学)
(元京都工芸繊維大学大学院生)

Assoc. Prof., Faculty of Design and Architecture, Kyoto Institute of Technology, Ph.D.

Public Works Dept., Miyagi Prefectural Government, M.Eng.

後 +1/15 rad を 2 回繰り返す、最終 +1/10 rad までの一方向载荷である。

試験体は Fig.1 に示すような一間幅 1.82 m の軸組で、軸組の柱は 105 mm 角のヒノキ、土台は 105 mm または 120 mm 角のヒノキ、桁は 105×210 mm のベイマツである。貫は 15×105 mm のスギの差し込み貫が 3 段で、柱に釘 2 本で留めている。柱-土台と柱-桁仕口は長柄込み栓打ちである。土壁は中塗り仕上げである。異なる事業所が製作しており、竹小舞、貫伏せの詳細は各事業所が受け継いできた京土壁の施工である。いずれもチリ廻りにひげこや布連は用いていない。壁厚は最終的な塗り厚を 55 mm 程度を目標とし、総塗り厚は 55 ～ 59 mm であった。壁土の調査は事業所毎に異なるが、原土は京都深草産である。壁土強度は、事業所毎に製作した円柱試験体 ($\phi 120 \times 250$ mm) 6 体による結果が、荒壁土 $0.44 \sim 0.76$ N/mm² (変動係数 0.02 ～ 0.09)、中塗り土 $0.53 \sim 0.94$ N/mm² (変動係数 0.02 ～ 0.05) であった。以降の履歴曲線の提案モデル式は上記の仕様の場合に適用される。

土壁を有する架構の数値解析では、軸組が梁-柱有限要素^{13)～15)}等の棒材でモデル化されているものとする。軸組の影響を除去した土壁のみの履歴モデルが必要となる。京土壁の繰り返し载荷実験から得られた曲線は軸組の影響が含まれている。ここでは、土壁試験体から軸組のみの試験体耐力を差し引いて壁土のみの履歴曲線のモデル化を示す。ただし、载荷途中で軸組が破壊した可能性がある履歴を荷重-変形角関係から判断し、これらの試験体の結果は用いない。以降のモデル化に用いる試験体は 7 体であり、それらの全荷重点が Fig.2 に描かれている。同様の方法で、同じ実験結果に基づいて軸組を含む場合についてモデル化した結果を付録に示してある。

モデル化に使用する実験の荷重-変形角包絡曲線、それらの実験荷重が変形角毎に正規分布に近いと仮定して実験荷重の平均値 μ と標準偏差 σ より算定した $\mu \pm 2\sigma$ を結ぶ線を描くと Fig.3 となる。統計分析に使用する実験値は実験荷重の平均曲線を挟んで $\mu \pm 2\sigma$ を結ぶ線の範囲内に概ね含まれている。

Fig.2 の正側のみとしても十分にデータ数があることから、以下ではこれらの値を処理することで履歴曲線のモデル化を行う。ここでは、上記に示したような仕様であれば、試験体の仕様が異なっても履歴曲線の様相が類似していることを利用して、京土壁の繰り返し履歴特性を一括して扱うこととする。

まず、履歴毎に基準とする実験値で除し、基準化した履歴に変換する (以下、この変換を基準化と呼ぶ)。そして、基準化した履歴曲線を回帰分析することで曲線式と係数を定める。

各履歴曲線の基準化の方法は、以下の通りである。Fig.4 の上段に実験曲線の概要、下段に実験曲線から基準化曲線を作成するときの対応を示す。

- [1] 処女载荷曲線 Fig.4(a) に示すように処女载荷曲線は凸型となり、耐力低下領域が表れる。そこで、最大荷重 $P_{\max}$ とその時の変形角 $\theta_{\max}$ で実験値を除して基準化する。Fig.5 に示すように最大荷重が 1.0 kN/kN、変形角が 1.0 rad/rad となる (以下、この点を基準点と呼ぶ)。
- [2] 戻り曲線 Fig.4(b) に示すように戻り曲線は双曲線に近い様相を示す。Fig.6 に示すように実験値を除荷時の荷重 P_r とその時

Fig.1 Basic dimension of Kyoto mud wall

Fig.2 Restoring force characteristics

の変形角 θ_r で除し、基準点とする。

- [3] 再载荷曲線 Fig.4(c) に示すように再载荷曲線は S 字形の様相を示す。ここでは、直前に経験した戻り曲線の除荷時の荷重 P_r とその時の変形角 θ_r で除し、基準点とする。基準化すると Fig.7 のようになる。

2.2 処女载荷曲線

処女载荷曲線は文献 6) ではひと続きの曲線としてモデル化されている。文献 6) を筆者らのこれまでの京土壁の実験結果で検討したが、一間幅京土壁の荷重-変形角関係を十分に表現できない場合があった。また、モデル式の簡潔さから多項式による回帰曲線の作成を試みたが、8 次関数としても基準化荷重を押さえることができず、実験に比べると不自然な履歴曲線となった。

これらの試行を経て、ここでは最大荷重点近くまでと耐力低下の領域に分割してモデル化を行うこととした。ただし、耐力低下が小さい試験体 1 つを統計処理から除いた。Fig.5 に示した基準化した値を用い、最大荷重点近くまでの領域を式 (1) の多項式、耐力低下領域を式 (2) の双曲線で回帰する。

$$\bar{P} = \sum_{k=1}^n a_k \bar{\theta}^k \quad (n = 3, 4, 5 \dots) \quad (1)$$

$$\bar{P} = \frac{a_1}{a_2 - \bar{\theta}} + a_3 \quad (2)$$

Fig.3 Average envelope curve and variation

(a) Virgin loading curve (b) Reverse curve (c) Reloading curve
Fig.4 Outline of Normalization

Fig.5 Normalized virgin loading curves

Fig.6 Normalized reverse curves

Fig.7 Normalized reloading curves

ここに、 $\bar{P}$ は実験荷重を実験最大荷重で除した基準化荷重 kN/kN、 $\bar{\theta}$ は実験変形角を最大荷重時の変形角で除した基準化変形角 rad/rad、 $a_1 \sim a_n$ は曲線の形を決める係数である。Fig.5 をこれらの式で回帰した結果を Fig.8(a), (b) に示す。ただし、それぞれの回帰式の範囲は以下のように定めている。

処女載荷曲線を 2 つの曲線でモデル化するため、式 (1) と式 (2) の切り替え点を検討する必要がある。ここでは、式 (1) は基準化変形角が 0 ～ 2.0 まで、式 (2) では 1.0 以上の範囲でそれぞれ回帰し、回帰領域を一部重ねることでモデル曲線の変更点を考える。式 (1) の次数を検討した結果、決定係数 R^2 が大きく、回帰曲線の次数が小さい $n=3$ とした。式 (1), (2) の切り替えは両式の交点より $\bar{\theta} = 1.76$ rad/rad である。

耐力低下領域の回帰曲線の決定係数は最大荷重点までの回帰曲線より小さい。回帰した 2 つの曲線を繋げた処女載荷曲線は Fig.8(c) のようになり、耐力低下する実験曲線の様相を表せている。

最後に、回帰式を基準化に用いた最大荷重点 $(\theta_{\max}, P_{\max})$ を与えて、処女載荷曲線のモデル式 (3), (4) を得る。

$$P = P_{\max} \sum_{k=1}^3 a_k \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}} \right)^k \quad (3)$$

$$P = P_{\max} \left\{ \frac{a_1}{a_2 - \theta/\theta_{\max}} + a_3 \right\} \quad (4)$$

ここで用いる $a_1 \sim a_3$ の値を Table1 に示す。

2.3 戻り曲線

Fig.6 に示したように、戻り曲線は小変形領域から大変形領域に至るまで双曲線の様相を描くが、除荷時の変形角によって双曲線の曲率が変わっている。そこで、基準化前の変形角で 3 つの領域に分けて回帰曲線を作成する。ここでは、Fig.6 を実験の載荷履歴毎に描いた上で、それらの曲線の形状をグループ化するように検討した結果、小変形領域 ($\theta < 1/90$ rad)、中間変形領域 ($1/90 \text{ rad} \leq \theta \leq 1/45$ rad)、大変形領域 ($1/45 \text{ rad} < \theta$) の 3 つに分けることとした。戻り曲線の回帰式には双曲線、

$$\bar{P} = \frac{a_1}{a_2 - \bar{\theta}} + a_3 \quad (5)$$

を用いた。Fig.9 に回帰した結果を示す。いずれも回帰結果は良好である。

処女載荷曲線と同様に除荷時の変形角と荷重 (θ_r, P_r) を与えると、以下の戻り曲線モデル式 (6) を得る。

$$P = P_r \left\{ \frac{a_1}{a_2 - \theta/\theta_r} + a_3 \right\} \quad (6)$$

ここで用いる $a_1 \sim a_3$ の値を Table2 に示す。解析中の現在の変形角に応じて表の係数を使い分ける。なお、 P_r および θ_r は履歴モデルの除荷時の荷重点であるから、除荷すると自動的に決定されるため、予め決定するパラメータではない。

Fig.8 Normalized virgin loading curves and regression curves

Fig.9 Normalized reverse curves and regression curves

Fig.10 Normalized reloading curves and regression curves

2.4 再載荷曲線

Fig.7に示したように、再載荷曲線は基準化変形角の範囲に差がみられる。また、基準化荷重が増加しない履歴がある。これらの特徴は、戻り曲線と同様に基準化前の除荷時の実験変形角により異なる。そこで、戻り曲線と同様に基準化前の変形角で3つの領域に分けて回帰する。回帰式には多項式、

$$\bar{P} = \sum_{k=0}^n a_k \bar{\theta}^k \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

を用いた。いずれの領域においても、回帰式の決定係数が大きく、次数が小さくなる場合を採用することとする。ここで、中間変形領域と大変形領域は式(7)で回帰させた場合、高次式としても実験結果に適合しない凹凸を持つ曲線となった。そこで、モデル化手法の簡潔さより実験曲線の形状の再現を優先し、Fig.10(b)と(c)に示すように、まず式(8)の曲線式

$$\bar{P} = b_0 + \frac{b_1}{1 + \exp\left(\frac{b_2 - \bar{\theta}}{b_3}\right)} \quad (8)$$

を用いて回帰した。ここで $b_0 \sim b_3$ は式(8)の形状を決める係数である。回帰式の係数は図中に示した。さらに、この回帰曲線式(8)を式(7)で回帰して曲線モデルを決定した。Fig.10(d)と(e)に示すように、式(8)の回帰結果および式(7)による式(8)の回帰結果も良好である。以上の手順で基準化曲線の回帰式(7)の係数が決定され

Table1 Coefficients of virgin loading curve

Coef.	Eq.(3)	Eq.(4)
a_1	2.497	-0.5168
a_2	-1.961	0.2328
a_3	0.4389	0.3764

Table2 Coefficients of reverse curve

Coef.	$\theta < 1/90$	$1/90 \leq \theta \leq 1/45$	$1/45 < \theta$
a_1	0.3689	0.2093	0.05875
a_2	1.268	1.166	1.052
a_3	-0.3785	-0.2601	-0.1212

Table3 Coefficients of reloading curve

Coef.	$\theta < 1/90$	$1/90 \leq \theta \leq 1/45$	$1/45 < \theta$
a_0	0.07300	0.02917	0.08854
a_1	0.4598	0.3733	-0.2402
a_2	0.4150	-1.041	3.8763
a_3	-0.08132	3.876	-19.26
a_4		-3.161	47.23
a_5		0.7727	-56.27
a_6			34.68
a_7			-10.73
a_8			1.325

た。

これまでと同様に、除荷時の基準点 (θ_r, P_r) を与えて再載荷曲線モデル式(9)が得られる。

$$P = P_r \sum_{k=0}^n a_k \left(\frac{\theta}{\theta_r} \right)^k \quad (n = 3, 5, 8) \quad (9)$$

ここで、モデルの次数 n は小変形領域で3、中間変形領域で5、大変形領域で8とした。ここで用いる $a_0 \sim a_8$ を Table3 示す。なお、 P_r および θ_r は再載荷時は既に除荷を経験していることから、戻り曲線を選択した時点で自動的に決定されている。

3. 履歴曲線モデルと繰り返し載荷実験結果の比較

3.1 仕様が異なる京土壁の繰り返し載荷実験との比較

2.の方法で作成した履歴曲線モデルを仕様が異なる京土壁の繰り返し載荷実験結果と比較し、提案した履歴曲線モデルの再現性を検討する。比較する試験体は、文献(10)、(11)で実施した施工事業所が異なり仕様が異なる京土壁4種類である。提案履歴曲線モデルでは、軸組の耐力を除いていることから、土壁の実験荷重から別途行った軸組のみの実験荷重を除いている。

提案履歴曲線モデルでは Table1～3の係数をそれぞれの式で用いるほか、Table4の試験体毎の最大荷重点を与えればよい。Fig.11に試験体毎の実験値とモデルを比較して示す。ただし、モデルでは実験載荷履歴の変形角毎に1回のみの繰り返し載荷とした。

Fig.11 Experimental results and hysteresis curve models

Table4 Maximum strength points

Specimen	B-2P2	C-2P2	D-2P2	E-2P2
Maximum strength $P_{\max}$ [kN]	16.84	15.39	14.80	16.08
Deformation angle $\theta_{\max}$ [rad]	0.01430	0.01480	0.02183	0.02210

提案履歴曲線モデルは、試験体によっては大変形時の耐力に違いが見られるものの、壁土のみとした実験履歴を概ね再現できている。耐力低下域における履歴も概ね良好である。以上は、提案履歴曲線モデルの統計分析に使用した実験データとの比較である。

次に、既往文献に示された京土壁の繰り返し載荷実験の結果¹⁶⁾と提案履歴曲線モデルとの比較を行う。試験体 16) の試験体の壁長は一間幅 1.82 m、壁厚は 55 mm 程度であるが、文献 10)、11) と異なる。

Fig.12 Experimental results of reference 16) and hysteresis curve model

Fig.13 Hysteresis loops of experiments and models

Table5 Accuracies of hysteresis loops

Angle [rad]	B-2P2	C-2P2	D-2P2	E-2P2	Average
1/240	1.05	1.33	0.85	1.17	1.10
1/120	1.25	1.34	1.00	1.22	1.20
1/90	1.37	1.33	1.12	1.31	1.28
1/60	1.34	1.39	1.20	1.32	1.31
1/45	0.88	1.22	1.07	1.16	1.08
1/30	1.17	1.12	1.19	1.20	1.17
1/15	0.64	0.79	1.21	1.00	0.91

Fig.14 Maximum strength point of mud walls

Fig.15 Maximum strength and wall thickness

りチリ廻りに布連打ちが施されている。また、タイロッド式の繰り返し載荷実験であり、軸組のみの実験荷重は不明である。そのため提案履歴曲線モデルとの比較においては、文献 10) と軸組耐力が同じであると仮定し、付録に示す軸組を含む場合のモデル曲線式 (A1) ～ (A4) を用いる。軸組を含む場合の土壁の履歴曲線モデルを検討するため、曲線式の係数は Table1 ～ 3 と異なり、付録の TableA1 ～ A3 を用いている。なお、これらのモデル化手法は 2. と同じ実験結果に基づいている。

文献 16) の実験結果との比較を Fig.12 に示す。ここで、提案履歴曲線モデルに与えたパラメータは、最大荷重点¹⁶⁾の 0.01316 rad 時に 16.02 kN のみである。処女載荷曲線の最大荷重点までの剛性は実験値がモデルより大きく、1/15 rad までの最終載荷履歴でモデルの耐力が大きいく。これらは、軸組耐力の仮定、布連打ちがある場合は耐力低下が急となる¹⁷⁾ことが影響していると思われる。

3.2 繰り返し載荷実験と変形角毎の履歴ループの比較

各繰り返しループについて実験値と提案モデルの履歴ループが囲む面積を比較する。Fig.13 に 1/120, 1/60, 1/15 rad 時の場合について実験と提案モデルの履歴を Fig.11 の正側から抽出して示す。その他の変形角時には省略した。再載荷曲線は実験値をよく再現している。戻り曲線は小変形領域でモデル耐力が過小評価されるが、1/45 rad 以降の大変形時は実験値を良く再現できる結果となっている。

モデルと実験値の繰り返しループが囲む面積を比較した結果を Table5 に示す。推定精度は、それぞれの試験体について提案モデルでの計算値を実験値で除して比較している。変形角毎に推定精度の平均値も示した。1/90, 1/60 rad 時の推定精度に 30 % 程度の差があるが、4 試験体を比較した全体の推定精度は 15 % 程度提案モデルの履歴面積が大きい。提案モデルは危険側となっていることに留意しておく必要がある。

Fig.16 Variation of maximum strength and virgin loading curve models

Fig.17 Variation of deformation angle at maximum strength and virgin loading curve models

Fig.11 ～ 13 の比較から、京土壁の履歴曲線モデルとしては提案モデルは妥当であるといえる。なお、京土壁を対象とした繰り返し載荷時の複数サイクルによる耐力低下のモデル化、ランダム載荷実験^{3), 18)}の結果の検討は、今後の課題である。

4. 土壁の骨格曲線（処女載荷曲線）モデルの検討

次に、既往の実験報告の荷重-変形角包絡曲線や設計資料の骨格曲線と提案処女載荷曲線モデルを比較する。土壁の骨格曲線は提案履歴曲線のうちの処女載荷曲線モデルに対応する。実験報告では架構の耐力を含むため、以下の提案モデルでは付録に示す軸組を含む場合の履歴曲線モデル式とその係数を用いる。

4.1 最大荷重点の変動と骨格曲線（処女載荷曲線）モデル

提案した処女載荷曲線モデルは最大荷重点の情報のみをパラメータとし、これを設定値として与えればよい。そこで、最大荷重点の変動が処女載荷曲線モデルに与える影響を確認する。

文献 9) と 19) で調べられた土壁実験 137 体（京土壁 33 体）の実験報告の整理によると、一間幅の土壁の最大荷重点は Fig.14 のようになる。土壁 137 体の最大荷重点の平均値は 0.01926 rad 時に 15.00 kN、京土壁 15 体^{10), 11)}では 0.01972 rad 時に 16.27 kN である。いずれも最大荷重およびその時の変形角にはばらつきがあり、それぞれの変動係数は 0.22 と 0.48 である。また、壁厚が最大荷重に影響すると思われるが、137 体の実験結果をまとめると、Fig.15 に示すようになる。最大荷重は壁厚のみで決定されない。

Fig.15 より京土壁の実験結果は、最大荷重が極端に大きな 2 点を除くと、壁厚 55 ～ 65 mm 程度で 12 ～ 18 kN であり、京土壁はこの領域では最大荷重の変動幅は 6 kN 程度と想定される。

提案処女載荷曲線モデルにおける最大荷重点の差 6 kN は京土壁 15 体の実験平均値の ±20 % 程度となる。そこで、Fig.16 に京土壁の最大荷重点が実験平均値から ±20 % で変動した場合の提案処女載荷曲線

(a) B-2P2

(b) C-2P2

(c) D-2P2

(d) E-2P2

Fig.18 Envelope curve models of reference 9) and virgin loading models

(a) Reference 20)

(b) Reference 21)

Fig.19 Estimation of other experiments of mud walls

モデルの変化を示す。図中で実験平均値を最大荷重としたモデルを平均荷重モデルとしている。この提案モデルでは最大荷重が小さくなると 1/10 rad 時までの耐力低下が小さくなるモデルとなる。

次に、最大荷重時の変形角が変動する場合の処女載荷曲線モデルの変化を調べる。Fig.14 で壁長が一間幅の場合、京土壁の最大荷重時の変形角は 0.0085 ～ 0.030 rad 程度である。これは、実験平均値から $\pm 55\%$ 程度の変動である。Fig.17 に最大荷重時の変形角を変化させたときのモデルの変化を示す。これらのモデルでは最大荷重は同じとしているので、1/10 rad 時の耐力は概ね同じとなっている。

最大荷重点を既往の実験結果に基づいて、Fig.16 と Fig.17 のように変化した。これらの組み合わせにより、京土壁の骨格曲線（処女載荷曲線）モデルが描かれる。

4.2 土壁の実験データベースに基づく荷重-変形角包絡曲線モデルとの比較

筆者の一部は、文献 9) で既往の土壁実験結果を収集したデータベースを作成し、それらの統計分析に基づき、各変形角時の割線剛性の相関と壁土強度から土壁の荷重-変形角関係包絡曲線を作成する方法を提案した。本論文の提案処女載荷曲線モデルと文献 9) の荷重-変形角関係包絡曲線モデルの比較を Fig.18 に示し、それぞれ実験結果と比較した。文献 9) のモデルでは最大耐力が実験荷重に対応

しない場合がみられたが、提案モデルでは Table A4 に示した最大荷重点を直接与えることから、試験体毎の実験結果に概ね対応している。最大荷重点近くの履歴はかなり精度が良い。

4.3 他研究者らによる土壁実験の荷重-変形角包絡曲線の推定

次に、提案処女載荷曲線モデルを他研究者らの実験の推定に用いた結果を示す。ここでは、実験結果の荷重-変形角包絡曲線を付録に示した軸組を含む処女載荷曲線モデルで推定する。軸組耐力は付録のモデルと同じと仮定する。

Fig.14 にプロットされた実験報告から京土壁で壁厚が極端に厚くない場合で、最大または最小荷重となっている岡本らの実験²⁰⁾およびそれら間で最大荷重となる鈴木・中治の実験²¹⁾について検討した。Fig.19 に実験包絡曲線との比較を示す。なお、実験結果は文献掲載図を数値化した上で描いている。Fig.19(a) の 2P-2 試験体との比較では、1/30 rad 程度までは良好に対応し、耐力低下域では実験値より提案モデルの荷重が大きい。2P-4 は縦貫の貫伏せを実施しない試験体である。この場合は、耐力低下域で実験値より提案モデルの荷重が小さい。2. でモデル化に用いた実験結果では貫伏せを実施していることから、貫伏せがない仕様は提案履歴曲線モデルの適用範囲とはいえない。Fig.19(b) では、最大荷重点までは良好に対応しており、その後はモデルの荷重が小さいが、最終耐力は概ね同等と

Fig.20 Load deformation curves for design and virgin loading curve model

なっている。

4.4 設計用荷重-変形角関係モデルとの比較

これまでに、土壁の設計用荷重-変形角関係モデルは文献 22) ~ 24) などで提案されている。Fig.20 にそれらの荷重-変形角関係モデルと提案処女載荷曲線モデルを比較した結果を示す。図中の荷重-変形角関係の算定にあたり壁長は一間幅 1.82 m, 壁厚 60 mm とした。提案モデルでは、文献の中で最大荷重となっていた伝統構法データベース²³⁾のモデルの最大値を与えた。

Fig.20 より提案処女載荷曲線モデルは、他の文献荷重-変形角関係と初期剛性は同等である。また、耐力低下を有するモデルに比べると変形角が大きくなるに従って耐力低下勾配が緩やかになる特徴がある。文献 22) は小変形角時から他のモデルより剛性低下しているが、耐力低下後の 1/15 rad 時の耐力は提案モデルと同等となる。なお、文献 23) が最も耐力低下するモデルとなっている。文献 23) のモデルにおける耐力低下の傾向は、他地域の土壁の実験を基にして作成されているためと考えられる。

提案モデルでは最大荷重を設計上の特徴点として与えることで、Fig.16 で示したように土壁性能を最大荷重の変化に対応させて検討でき、安全率を考慮することで設計用のモデルとすることもできる。

5. おわりに

本論文では、京土壁の繰り返し載荷実験結果の統計処理に基づいた履歴曲線モデルの作成方法を提案した。提案したモデルの基本曲線は、処女載荷曲線、再載荷曲線、戻り曲線の 3 種類である。実験値の最大荷重点または除荷点により基準化することで、モデル曲線式を作成した。処女載荷曲線モデルの形状は、最大荷重点のみに依存するため簡潔である。

提案した履歴曲線モデルと仕様の異なる京土壁の実験結果との比較により提案モデルが検証されたが、貫伏せを行わない仕様の場合については提案処女載荷曲線モデルと実験包絡曲線は異なっていた。統計処理に使用した実験仕様と概ね同じ場合については、他研究者らの繰り返し載荷実験も概ね推定できる。

また、既往文献の荷重-変形角関係モデルと提案した骨格曲線（処女載荷曲線）モデルの比較を行った。最大荷重点を設計耐力として与えることで、既往モデルにも対応するモデルを得ることができる。

本論文では一間幅の京土壁を対象として土壁の履歴曲線モデルの作成方法を提案したが、提案手法は他地域の場合も同様に適用できる。壁長が異なる場合についても同様である。また、全国の土壁実験結果を十分に得ることができれば、それらによる土壁の履歴曲線

モデルの作成も可能である。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (15K18153) の助成を受けたものです。また、京都工芸繊維大学森迫清貴学長から京土壁の実験データおよび有益な助言を頂きました。ここに感謝してお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Araki, Y. et al.: A Study on Hysteresis Model for Earthquake Response Analysis of Timber Structures, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 69, No. 579, pp. 79-85, 2004. 5 (in Japanese)
荒木康弘, 腰原幹雄, 大橋好光, 坂本 功: 木造住宅の地震応答解析のための復元力モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 579 号, pp. 79-85, 2004. 5
- 2) Sato, T. et al.: Seismic Simulation Analyses for Woodframe Houses -Modeling of Hysteretic Characteristics and The Verification with Shaking-table Test-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 73, No. 631, pp. 1569-1576, 2008. 9 (in Japanese)
佐藤利昭, 井口道雄, 真崎雄一: 木造軸組構法住宅の地震応答シミュレーション-履歴特性のモデル化と振動台実験による検証-, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 631 号, pp. 1569-1576, 2008. 9
- 3) Matsunaga, H. et al.: A Universal Modeling Method for Wooden Shear/Nonshear Walls, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 74, No. 639, pp. 889-896, 2009. 5 (in Japanese)
松永裕樹, 宮津裕次, 曾田五月也: 木造軸組耐力壁 / 非耐力壁の汎用モデル化手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 639 号, pp. 889-896, 2009. 5
- 4) Hitomi, Y. et al.: Hysteresis Model of Wood Shear Wall Considering of Large Displacement and Deterioration of Cyclic Load -Study on Seismic Behavior of Wooden Construction Part 2-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 74, No. 646, pp. 2299-2306, 2009. 12 (in Japanese)
人見祐策, 五十田博, 河合直人: 大変形と繰り返しによる劣化を考慮した木造壁の復元力特性モデル-木造建物の地震時挙動に関する研究その 2-, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 646 号, pp. 2299-2306, 2009. 12
- 5) Araki, S. et al.: Hysteresis Model for Wooden Shear Walls Considering Strength Deterioration under Cyclic Loading -Part 2 Proposal and Verification of Hysteresis Model-, AIJ Toukai Chapter Architectural Research Meeting, No. 45, pp. 229-232, 2007. 2 (in Japanese)
荒木 智, 井戸田秀樹, 梅村 恒: 等変位繰返し載荷による耐力劣化を考慮した木造耐力壁の復元力モデル-その 2 復元力モデルの提案と検証-, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第 45 号, pp. 229-232, 2007. 2
- 6) Umemura, H.: Curvilinear Hysteresis Model for Wooden Structures, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp. 133-134, 2008. 7 (in Japanese)
梅村 恒: 木質構造物のための曲線型復元力特性モデル, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造 III, pp. 133-134, 2008. 7
- 7) Soda, S. et al.: Analytical Evaluation for Seismic Performance of Traditional Tosa's Wooden Frame, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp. 569-570, 2009. 7 (in Japanese)
曾田五月也, 松永裕樹, 宮津裕次: 土佐派荒壁の耐震性能に関する解析的評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造 III, pp. 569-570, 2009. 7
- 8) Soda, S. et al.: Analytical Evaluation for Seismic Performance of Traditional Arakida's Wooden Frame, Proceedings of AIJ Shikoku Chapter Architectural Research Meeting, No. 10, pp. 31-32, 2010. 4 (in Japanese)
曾田五月也, 亀森淳也, 松永裕樹: 荒木田土を用いた伝統土壁構造の耐震性能に関する研究-その 2 地震応答計算用解析モデルの構築とその精度検証-, 日

- 本建築学会四国支部研究報告集，第10号，pp. 31-32, 2010. 4
- 9) Muramoto, M. and Tanabe, Y.: Estimation of The Envelope Curve Calculated by Statistical Correlation of Cyclic Loading Tests of Mud Walls, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 82, No. 739, pp. 1391-1401, 2017. 9 (in Japanese)
村本 真, 田邊雄太: 一間幅全面土壁の静的繰り返し載荷実験の統計的検討に基づく土壁の荷重-変形角包絡曲線の推定方法, 日本建築学会構造系論文集, 第82巻, 第739号, pp. 1391-1401, 2017. 9
 - 10) Muramoto, M. et al.: Cyclic-Loading Tests of Traditional Mud Walls Constructed by Three Plasterers in Kyoto, AIJ Journal of Technology and Design, Vol. 23, No. 53, pp. 103-108, 2017. 2 (in Japanese)
村本 真, 平田 良, 午來嵩頭, 森迫清貴: 左官事業所が異なり仕様に違いがある京土壁の繰り返し載荷実験, 日本建築学会技術報告集, 第23巻, 第53号, pp. 103-108, 2017. 2
 - 11) Fujimoto, Y. et al.: Experience Difference of Plasterer Skill on Load Bearing Capacity of Kyoto Mud Wall, Proceedings of AIJ Kinki Chapter Architectural Research Meeting, No. 56, pp. 585-588, 2016. 6 (in Japanese)
藤本ゆかり, 牛谷和弥, 村本 真, 森迫清貴: 京土壁の性能における左官技能の経験差, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第56号, pp. 585-588, 2016. 6
 - 12) Gorai, T. and Muramoto, M.: Cyclic Hysteresis Model Based on Loading Tests of Mud Walls by Traditional Plastering in Kyoto, Proceedings of AIJ Kinki Chapter Architectural Research Meeting, No. 57, pp. 389-392, 2017. 6 (in Japanese)
午來嵩頭, 村本 真: 京土壁の載荷実験に基づく繰り返し履歴曲線のモデル化, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第57号, pp. 389-392, 2017. 6
 - 13) Inoue, S. and Muramoto, M.: A Proposal for Beam-column Fem Model of Wooden Framework, Journal of Structural Engineering, Vol. 65B, pp. 247-255, 2019. 3 (in Japanese)
井上祥子, 村本 真: 木造軸組解析のための梁-柱有限要素モデルの提案, 構造工学論文集, Vol. 65B, pp. 247-255, 2019. 3
 - 14) Sakon, T. and Morisako, K.: Numerical Analysis Method with Connection Spring Model Large Deflection Behavior of Traditional Wooden Frame, Proceedings of AIJ Kinki Chapter Architectural Research Meeting, No.53, pp. 225-228, 2013. 5 (in Japanese)
左近竜也, 森迫清貴: 接合部履歴ばねモデルを用いた伝統木造軸組の大変形挙動解析法, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第53号, pp. 225-228, 2013. 5
 - 15) Matsunaga, M. et al.: Numerical Method Introducing Mechanical Properties of Semi-rigid Joints for Large Deflection Behavior of Traditional Spatial Wooden Frame, Proceedings of AIJ Kinki Chapter Architectural Research Meeting, No. 47, pp. 225-228, 2007. 5 (in Japanese)
松永昌之, 村本 真, 森迫清貴: 接合部履歴特性を考慮した伝統木構造の大変位立体骨組解析法, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第47巻, pp. 381-384, 2007. 5
 - 16) Morisako, K. et al.: Studies on Load-Deflection Curve Model of Mud Walls Built by Traditional Plastering in Kyoto, Journal of Structural Engineering, Vol. 55B, pp. 101-108, 2009. 3 (in Japanese)
森迫清貴, 嶋瀬裕之, 青野弘和, 佐藤ひろゆき: 京土壁の荷重変形関係モデルの検討, 構造工学論文集, Vol. 55B, pp. 101-108, 2009. 3
 - 17) Muramoto, M. et al.: Cyclic-Loading Tests for Evaluating Bearing Capacity of Mud Walls Built by Traditional Tosa Plastering, Journal of Structural Engineering, Vol. 57B, pp. 343-348, 2011. 3 (in Japanese)
村本 真, 小田憲史, 西岡建雄: 土佐漆喰壁の耐力評価のための繰り返し載荷実験, 構造工学論文集, Vol. 57B, pp. 343-348, 2011. 3
 - 18) Ishiguro, T. et al.: Hysteresis Model for Wooden Shear Walls Considering Strength Deterioration under Cyclic Loading -Part4 Reproduction of Force-Deformation Relations under Complex Deformation Input-, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp. 23-24, 2011. 7 (in Japanese)
石黒貴裕, 梅村 恒, 井戸田秀樹, 小島崇徳: 繰り返し載荷による耐力劣化を考慮した土壁および面材壁の復元力モデル-その4 複雑な変形入力に対する再現-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造 III, pp. 23-24, 2011. 7
 - 19) Muramoto, M. and Tanabe, Y.: Statistical Study on Coefficient of Effective Wall-length Based on Cyclic Loading Tests of Kyoto Mud Wall, Proceedings of AIJ Kinki Chapter Architectural Research Meeting, No.56, pp. 597-600, 2016. 6 (in Japanese)
村本 真, 田邊雄太: 京土壁の静的繰り返し載荷実験に基づく壁倍率の統計的検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第56号, pp. 597-600, 2016. 6
 - 20) Okamoto, S. et al.: Structural Performance Evaluation and Verifications for Mud Walls Based on Their Resistance Mechanism -Prat 2 Verification for Mud Walls Constructed with Kyoto Specifications-, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures III, pp. 407-408, 2004. 7 (in Japanese)
岡本滋史, 村上雅英, 鈴木 有, 稲山正弘: 耐荷機構に基づいた土壁の構造性能評価法とその検証-その2 京壁による要素試験法の検証-, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, 構造 III, pp. 407-408, 2004. 7
 - 21) Suzuki, Y. and Nakaji, H.: Reexamination of Seismic Resistance of Mud-Plastered Walls in Wood Houses Based on Full-Scale Tests, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 64, No. 515, pp. 115-122, 1999. 1 (in Japanese)
鈴木祥之, 中治弘行: 木造住宅土塗り壁の実大実験による耐震性能の再検討, 日本建築学会構造系論文集, 第64巻, 第515号, pp. 115-122, 1999. 1
 - 22) Agency for Cultural Affairs: Implementation Guidance for Basic Seismic Assessment of Important Cultural Properties (Buildings), 2012. 6
文化庁: 重要文化財(建造物)耐震基礎診断実施要領, 2012. 6
 - 23) Investigation Committee on the Database of Traditional Wood Building: The Database of Traditional Wood Building, 5.1 Mud Wall, <http://www.denmoku-db.jp/files/libs/114/201703290516458273.pdf>, (in Japanese, accessed 2019.4.28)
伝統的構法データベース検討委員会: 伝統的構法データベース, 5.1 土塗壁, <http://www.denmoku-db.jp/files/libs/114/201703290516458273.pdf>, (2019.4.28 参照)
 - 24) The Editorial Committee on the Manual of Seismic Design of Timber Structure: Dentoukouhou wo Ikasu Mokuzou Taishin Sekkei Manual, Gakugei Shuppansha, 2004 (in Japanese)
木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会: 伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル-限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法-, 学芸出版社, 2004
- 付録 軸組を含む京土壁の履歴曲線モデル
- 本論文のモデル化手法を土壁の単位架構の実験結果^{10), 11)}を直接用いて, 軸組を含む場合の履歴曲線モデルを作成した。以下にモデル式と実験結果との比較についてその概要を示す。
- モデル化する履歴曲線式は, 処女載荷曲線, 戻り曲線, 再載荷曲線の3種類である。2.と同様の手法により以下の(A1)～(A4)のモデル曲線を得た。
- 処女載荷曲線は以下の2式である。
- $$P = P_{\max} \sum_{k=1}^3 a_k \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}} \right)^k \quad (A1)$$
- $$P = P_{\max} \left\{ \frac{a_1}{a_2 - \theta/\theta_{\max}} + a_3 \right\} \quad (A2)$$
- 戻り曲線は,
- $$P = P_r \left\{ \frac{a_1}{a_2 - \theta/\theta_r} + a_3 \right\} \quad (A3)$$
- 再載荷曲線は,
- $$P = P_r \sum_{k=0}^n a_k \left(\frac{\theta}{\theta_r} \right)^k \quad (n = 3, 5, 8) \quad (A4)$$
- である。これらの式の係数はTableA1～A3に示す通りである。
- Fig.11と同様に, 仕様の異なる京土壁の実験結果とモデル式を比較するとFig. A1となる。ここで, 最大荷重点是実験結果よりTableA4のように与えた。

Fig.A1 Experimental results and hysteresis curve models

TableA1 Coefficients of virgin loading curve

Coef.	Eq.(A.1)	Eq.(A.2)
a_1	2.42063	-0.59888
a_2	-1.7879	-0.015353
a_3	0.36727	0.42905

TableA2 Coefficients of reverse curve

Coef.	$\theta < 1/90$	$1/90 \leq \theta \leq 1/45$	$1/45 < \theta$
a_1	0.54118	0.24712	0.051428
a_2	1.3538	1.1899	1.0458
a_3	-0.52962	-0.3013	-0.122882

TableA3 Coefficients of reloading curve

Coef.	$\theta < 1/90$	$1/90 \leq \theta \leq 1/45$	$1/45 < \theta$
a_0	0.031148	0.035821	0.075562
a_1	0.64148	0.31772	-0.19685
a_2	0.27156	-0.88142	3.3953
a_3	-0.057803	3.6091	-16.311
a_4		-2.9642	39.919
a_5		0.71928	-47.36
a_6			28.998
a_7			-8.9082
a_8			1.091

TableA4 Maximum strength points

Specimen	B-2P2	C-2P2	D-2P2	E-2P2
Maximum strength $P_{\max}$ [kN]	17.80	16.26	16.01	17.29
Deformation angle $\theta_{\max}$ [rad]	0.01860	0.01480	0.02183	0.02219

HYSTERESIS CURVE MODEL FOR KYOTO MUD WALL BASED ON CYCLIC LOADING TESTS

Makoto MURAMOTO^{*1} and *Takaaki GORAI*^{*2}

^{*1} Assoc. Prof., Faculty of Design and Architecture, Kyoto Institute of Technology, Ph.D.

^{*2} Public Works Dept., Miyagi Prefectural Government, M.Eng.

To evaluate the performance of buildings constructed by the traditional construction method, it is necessary to accurately evaluate the hysteresis model of mud walls. By combining the hysteresis model of the mud wall with the frame analysis method, the numerical analysis of the frame with the mud walls can be realized. The hysteresis model of the mud wall has three curves of virgin load curve, return curve and reloading curve. In the previous model, it was necessary to adjust the parameter of the curve equation individually based on the experiment.

In this paper, we propose a hysteresis model with the maximum load point as a parameter. The analyzing data were generated by subtracting the experimental load of the frame only from the experimental load of the mud wall. We used the experimental data of 7 specimens of Kyoto mud walls.

The proposed model is based on the statistical processing of the experimental results of the Kyoto mud walls, and it becomes a regression curve using the load-deformation angle relation normalized based on the maximum load point and unloading point. The virgin loading curve consists of two polynomial and hyperbolic curves up to the maximum load point and in the strength lowering region. The return curve is modeled as a polynomial, and the reloading curve is modeled as a hyperbola. These equations are covered by dividing the deformation angle θ into three regions, $\theta < 1/90$ rad, $1/90 \text{ rad} \leq \theta \leq 1/45$ rad and $1/45 \text{ rad} < \theta$.

In spite of such a simple modeling method, it was confirmed that the result of the cyclic loading experiments of Kyoto mud walls could be expressed well. The experimental result of other researchers was also expressed well. The area of the hysteresis loop of the proposed model was 15% larger than that of the experimental results. The reloading curve had almost the same history as the experimental result, and the return curve was well reproduced after $1/45$ rad, although the load of the model was underestimated in the area of small deformation angle.

The variations of the virgin loading curve model concerning the maximum load points were shown in Fig.16 and 17. By these combinations, virgin loading curve models of various mud walls were drawn. By giving the maximum load point, the envelope curve of the load-deformation angle of the experimental results of other researchers could be estimated well up to the vicinity of the maximum load point. Furthermore, the virgin loading curve model also showed the correspondence with the load-deformation angle relations for the design which were shown in reference 22) to 24).

It is also possible to construct a hysteresis model corresponding to different wall lengths or other regions' mud walls by collecting cyclic loading experimental data.

(2019年5月1日原稿受理, 2019年11月8日採用決定)