静的水平加力試験に基づく伝統的木造建築の組物の履歴モデルと剛性評価

HYSTERESIS MODEL AND STIFFNESS EVALUATION OF BRACKET COMPLEXES USED IN TRADITIONAL TIMBER STRUCTURES BASED ON STATIC LATERAL LOADING TESTS

藤田 香織^{*1}, 木村 正彦^{*2}, 大橋 好光^{*3}, 坂本 功^{*4}
Kaori FUJITA, Masahiko KIMURA, Yoshimitsu OHASHI
and Isao SAKAMOTO

The aim of this research is to identify the structural performance of bracket complexes used in traditional timber structures. Static vertical and lateral loading tests and shaking table tests were performed on four types of bracket complexes with the most fundamental forms. A hysteresis model of the bracket complexes was proposed based on the results of the static lateral loading tests. The stiffness of the model was evaluated by applying the theoretical stiffness of timber perpendicular to the grain, the result of which gave a fair simulation of the observed hysteretic characteristics.

Keywords: *Static Lateral Loading Test, Hysteresis Characteristics, Multi-linear Model*

静的水平加力試験、復元力特性、マルチリニアモデル

1. 序

わが国の伝統的な建造物の多くは木質構造である。伝統的木造建築の力学的特徴として、大きな変形能力と高い減衰性が挙げられる。そして、「組物」と呼ばれる木材の集合体の部分がその構造特性、特に振動特性に影響があることが従来から指摘されてきたが、関連する研究例も少なく、静的・動的な実験に基づく定量的な検討は十分であるとはいえない。

組物とは、柱或いは台輪の上に設けられ、鉛直荷重を柱に伝達する役割を担っている支承部分の名称である。6世紀末、仏教の伝来とともに、朝鮮半島から渡来した技術者によって日本に伝えられたといわれ、木造の寺院・神社建築に用いられる。斗と肘木という2種類の部材が互いに積層して構成され、様式・年代によってその形状は多様である。

組物の力学的特性については、木造層塔の耐震性に関連して言及されることが多い。元暦2年1185年の地震で法勝寺に所在した日本史上最大の塔婆建築であった九重塔が大きな被害を受けた以外では、大型の塔婆建築の地震被害はほとんど伝えられていない^{*1}。この事実を鑑みて、木造層塔の耐震性に関する考察が行われてきたが、未だ定説はなく、その考察の過程で組物の地震時の効果が指摘されてきた。棚橋は^{*2}、木造層塔の耐震性が高い理由として、大きな塑性変形能力に起因する、高い減衰性を挙げ、組物の大きな変形能力が地震時に振動エネルギーを吸収している可能性を指摘している。山辺・金井は、12基の五重塔の常時微動測定及び、強制

振動試験、地震観測を行った結果から、「五重塔の耐震性は、組物構造による摩擦力が振動が大きくなる程、急激に増加する性質によるところが大い」と解釈できそうである。」と指摘している^{*3}。

組物の実験的研究としては、坂が法隆寺金堂の昭和大修理に伴って行った、一連の研究が最も早い例である。法隆寺金堂の下層1スパン分、1/2大模型の鉛直載荷下における静的水平加力試験を行い^{*4}、柱単体の傾斜復元力に関する実験的研究^{*5}との比較から、胴張り・頭貫・組物がある丸柱は、普通の丸柱と比較すると、引き倒し抵抗力和復元力の差（吸収率）が大きい、この原因として、頭貫の摩擦抵抗、組物のエネルギー吸収、柱の胴張りの影響が挙げられている。更に、骨組み形式が複雑化すればこの吸収率が大きくなり、「この性能こそ、かかる古社寺骨組み構造の動力学的問題を取扱う上に振動の減衰作用として重要な性質で五重塔の耐震性について論議される問題のうち武藤博士がこれを指摘せられている点である。」としている。

西澤は、薬師寺大講堂の復原設計に伴って、組物を含む軸組を対象とした一連の研究を行っている。薬師寺大講堂の組物、小壁部分1スパン分の実物大部分模型の静的水平加力試験とオンライン実験（仮動的実験）の結果から得られた履歴ループの形状が、紡錘形の相似形に近いことから、全ての履歴ループを無次元化し、3次元関数で近似した正規化ループとした履歴モデルを提案している。提案した履歴モデルを用いて、地震応答解析

^{*1} 東京都立大学工学研究科建築学専攻 講師・博士(工学)

^{*2} 東急建設技術研究所 主任研究員・工博

^{*3} 熊本県立大学環境共生学部 助教授・工博

^{*4} 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・工博

Lecturer, Dept. of Arch., Grad. School of Eng., Tokyo Metropolitan Univ., Dr. Eng. Senior Research Engineer, Tokyuu Construction, Dr. Eng.

Assistant Prof., Kumamoto Prefectural University, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Arch., Grad. School of Eng., The University of Tokyo, Dr. Eng.

を行い、オンライン実験結果との比較検討よりその有効性を検証している^{文6}。また、この履歴モデルの精度を上げ、無次元化した履歴ループを最小二乗法で近似した多項関数式により正規化ループを求めている。更に、同じ試験体に対して、この新しく提案された履歴モデルと、完全弾塑性型モデル、バイリニア型モデルに関して地震応答解析を行い、オンライン実験の結果との比較を行っている^{文7}。これより、完全弾塑性型モデル及び、バイリニア型モデルの解析結果はオンライン実験の結果と大きな差は認められないが、初期剛性や線形限界点の設定に応答値が大きく左右されること、より精度の高い応答値を解析的に求めるには、提案された履歴モデルによる解析法が有効であることを指摘している。

林・軽部らは、平城宮跡の大極殿復原計画に伴って一連の実験的研究を行っている^{文8}。大極殿の初重層側通り架構、大斗上の斗組架構、1スパン分の部分模型に関して、鉛直載荷下における静的水平加力試験を行っている。その結果、異なる鉛直荷重に対して降伏点に差違が認められ、結果的に鉛直荷重が大きいほど割線剛性は大きくなっている。荷重変形関係は最大点指向型の紡錘形を示しており、繰返し加力による耐力の低下は小さい。約1/50rad.まで水平変形した結果ダボの変形、斗の圧縮変形、斗の角の曲げ破壊などが観測されている。

以上より、組物の力学的特徴として、荷重変形関係は紡錘形を示す、剛性は鉛直荷重に影響を受けることなどが上げられる。ただし、既往の研究はいづれも特定の建物の修理或いは復原を目的としており、必ずしも一般性が高いとはいえない。また、組物の振動時の特性として指摘されている点に関して、その力学的機構が十分解明されているともいえない。さらに、振動台加振試験のような動的な実験は行われていない。

本研究は、伝統的木造建築の耐震性を定量的に評価するための基礎資料

を得ることを目的として、実物大の組物4種類を対象とした静的水平加力試験・振動台加振試験を行ったものである^{文9～文14}。本文では、静的水平加力試験の結果から得られた、復元力特性及び変形の特徴に関する考察から、組物の力学モデルにもとづいて一般的な組物の履歴モデルを提案する。振動台加振試験の結果及び、提案した履歴モデルを用いた地震応答解析については他稿で詳述する。なお、本文は文9、文13、文14をまとめ、加筆修正したものである。

2. 試験体

試験体は、最も基本的な組物である大斗肘木、平三斗、出三斗、出組の4種類、各1体の実物大模型とした。2m四方の四隅に配された柱（柱頭部分のみ高さ70cm）の上に組物を設置した。形状は一般性の高いものとするため、重要文化財建造物の寺院仏殿建築の3割を占める、三間堂仏殿（図-1）の平部分の模型とした。細部の仕様は三間堂仏殿である喜多院慈眼堂（国指定重要文化財、川越市）を範としている。試験体の形状・寸法と組物の接合方法の例を（図-2）、（図-3）にそれぞれ示した。材料は全てヒノキとし、材料試験より単位重量及び、含水率の平均値はそれぞれ435kg/m³、12.1%であった^{注1}。

3. 実験概要

実験は平成9年9月と平成10年6月に、東急建設技術研究所内の振動台にて行った。振動台加振試験に先立って、試験体を振動台上に設置し、鉄骨反力柱と試験体上の鉄骨治具を梁で繋ぎ、水平1次元正弦波（40s/1 cycle）を入力とした擬似的な静的水平加力試験を行った。上載荷重は三間堂仏殿数棟について柱の軸力を概算した結果、檜皮葺きに相当する柱1

図-1 国宝・重要文化財建造物の構成 (1996年現在)

図-2 試験体形状

図-3 組物の接合方法の例

本当たり 0.5tonf (全 2tonf) とした。水平荷重は、鉄骨治具と反力柱の間に設置したロードセルで測定した (図-4)。

図-4 静加力試験方法

4. 復元力特性

各試験体の荷重変位履歴曲線を図-5に示した。ただし、試験体の水平変形は、試験体ごとの高さが異なる点と、組物以外の変形 (柱のたたなど) を除外する目的で、柱上から桁下の変形角 θ で表した。ここで、 θ は下式のように、桁の振動台からの相対水平変位 ($\delta_{\text{桁}}$) と柱頭と振動台の相対水平変位 ($\delta_{\text{柱}}$)、及び柱上面と桁下面の距離 (H) から算出した。

$$\text{変形角 } \theta = \frac{\delta_{\text{桁}} - \delta_{\text{柱}}}{H} (\text{rad.})$$

図-5 組物試験体の荷重変位履歴曲線

組物試験体の荷重変位履歴曲線の特徴は以下のとおりである。

- ・折線 (①～③) で近似できる、マルチリニア型の復元力特性を示す。
- ・水平荷重約 1tonf で滑りが生じる。この値は、静摩擦力であると考えられ、静摩擦係数にして 0.5 であり、乾燥木材どうしとしてはほぼ妥当な値であるといえる^{文9, 文13}。
- ・滑りはじめと荷重が低下する傾向が認められるのは、静摩擦力 > 動摩擦力のためであると考えられる。
- ・変形角 0.01rad. 以内では、①初期剛性→②滑り (約 1tonf) と、概ねバイリニア型の復元力特性を示す。
- ・変形角 0.01rad. を超えると (試験体 K4 のみ) ③第三剛性が現れ、これは初期剛性よりも低い値である。

・いずれの試験体も、繰り返し加力に対して剛性の低下が認められない。

5. 履歴モデル

4種類の組物の静的水平加力試験から得られた荷重変位履歴曲線の特徴から、組物の復元力特性をその種類によらず図-6のようなマルチリニア型のモデルで近似する。

図-6 組物履歴モデル

①O⇌A (第一剛性 K_1): A点の荷重は動摩擦力、A' 点は静摩擦力とする。A'からはすぐAB上へ移行する。

②A→B (第二剛性 $K_2=0$): 水平力は一定 (動摩擦力) であり、水平変位のみ増え、部材間の滑りが主要な水平変位の要素である。B点は部材間のすき間の総量で決まる値であり、実験からはA→Bは約 4mmであった。AB間での除荷剛性は K_1 とする。

③B→C (第三剛性 K_3): C点の上限値は本実験からは求まっていない。

・C⇌D: 除荷の剛性は第一剛性と第三剛性の平均値と仮定する。

・D→E: 部材間の滑り。E点はB点と同様。

ただし、大斗肘木、平三斗がバイリニア型の復元力特性を示しているのは、水平変位が 0.005rad. 未満であり、履歴モデルのO→A→Bまでしか現れていないためであると仮定した。出三斗に関しては、振動台加振試験では①→②→③とモデルと同様の履歴形状を示していることから^{文11}、静加力試験の際には滑りが生じる前に大斗と斗の回転によりダボのめり込みが一部発生した可能性が考えられる。

6. 変形の特徴

組物の荷重変位履歴曲線をマルチリニア型の履歴モデルで近似した。次に、各段階 (①、②、③) に対応する変形の特徴を試験体ごとに考察する。組物の各部材の振動台に対する相対変位を水平 1ヶ所、鉛直 2ヶ所で測定し、水平変位と回転角を求めた。各段階 (①～③) に対応する 4秒間 (1/10 周期) を選出し、組物の変形角 θ の変化に対する各部材の水平変位の変化の割合を求めた。また、部材の水平変位の要素を、回転と滑りに分けた。回転による水平変位は、部材の回転角と水平変位の測定点の高さから算出し、実測による水平変位との差を部材どうしの滑りとした (図-7) ただし、部材の変形は無視できるものとした。図-7に各部材の「 a'_n 」($n=①\sim③$)」の算出結果を示した。

$$a'_n = \frac{\delta'_{a,n} - \delta'_{a-1,n}}{\delta'_{\text{桁},n} - \delta'_{\text{柱},n}} \times 100(\%)$$

上式は第 n 段階 ($n=①\sim③$) に対応する 1/10 周期 (4秒) 間における

a'_n : 部材 a の相対変位の増分が組物の変形角の増分に占める割合

$\delta'_{a,n}$: 部材 a の水平変位 (振動台との相対変位) の増分

図-7 各部材の変位が全体の水平変位に占める割合と値の算出方法

$\delta'_{a-1,n}$: aの一つ下の部材の水平変位（振動台との相対変位）の増分

$\delta'_{桁,n}$: 桁の水平変位（振動台との相対変位）の増分

$\delta'_{柱,n}$: 柱の水平変位（振動台との相対変位）の増分

組物試験体の各段階（①～③）での変形の特徴は以下のとおりである。

第一段階（① O⇔A）：平三斗を例外にして、大斗・巻斗の水平変位が主要な変形の要素であり、その50～80%は部材の回転による変位である。

第二段階（② A⇔B）：部材どうしの滑りが主要な変形の要素である。滑る部材は試験体によって異なるが、一つの部材の滑りが全体の水平変位の70～100%を占めている。

第三段階（③ B⇔C）：大斗・巻斗（中斗と上斗）の水平変位が主要な変形の要素である。斗の水平変位の60～70%は滑りによる水平変位である。

7. 剛性の算出

履歴モデルの剛性を理論的に算出するために、実験結果をもとに対応する変形の要素を以下のように仮定した（図-8）。

①大斗・斗の底面のめり込みによる回転： $K_1 = \sum$ 大斗・斗の底面のめり込み剛性（三角変位めり込み）

②摩擦を伴う部材間の滑り： $K_2 = 0$

③ダボのめり込みによる大斗・斗の移動： $K_3 = \sum$ 大斗・斗のダボのめり込み剛性（三角変位めり込み）

ただし、木材は異方性があり繊維方向の剛性は繊維直交方向のその20倍～30倍である。これより、繊維方向と繊維直交方向の部材の組合せの場合、繊維方向のめり込みは無視できるものとする。

図-8 出組の変形状態

7-1 第一剛性: K_1 (① $O \leftrightarrow A$)

組物試験体の第一剛性は、大斗・斗の底面のめり込み剛性（三角変位めり込み）の総和とし（図-9）、剛性の算出には以下の仮定を用いた。

1. 第2段階で、大斗・斗が水平に滑っていることが観測されていることから、ダボと大斗・斗のホヅ穴の間にはすき間があり、且つ回転は十分微小であるとし、ダボは水平力に抵抗しないものとする。
2. 目視より、頭貫と大斗の間にはすき間があることが確認されたことから、大斗は柱とのみ接し、頭貫とは接していないものとする。
3. 大斗に対する柱のめり込みは無視できるものとする。
4. 斗底面と肘木のめり込み剛性は、繊維直交方向どうしであるため、そのめり込み剛性は三角変位めり込みの直列パネとする。
5. 大斗・斗の回転中心は、底面中央とする。
6. 各部材のめり込み剛性の総和は、同じ層（高さ）は並列、上下は直列に接続するものとする（図-10）。
7. 実験から①での試験体の変形角は $1/500\text{rad}$ 以内であるため、めり込みは弾性範囲内であるとする。
8. 斗の上面は表面仕上げが粗く、目視から肘木下面との間にはすき間があることが確認されたことから、大斗・斗上面と肘木下面のめり込みは無視できるものとする。
9. 部材のせん断変形及び局所的な滑りの影響は無視できるものとする。

図-9 第一剛性（大斗・斗の底面のめり込み剛性）

図-10 出組の組合せと大斗・斗のパネ

大斗、斗の形状は試験体によらず一定であるため、その弾性剛性及び弾性限界変形角は、稲山の木材の三角変位めり込み理論^{文15}（注2）から次のように求められる。

$$\begin{aligned} K_{\text{大斗底}} &= 161 \text{ (tonf/rad.)} & \theta_{\text{大斗底}} &= 1/110 \text{ (rad.)} \\ K_{\text{卷斗底}} &= 71.3 \text{ (tonf/rad)} & \theta_{\text{卷斗底}} &= 1/101 \text{ (rad.)} \\ K_{\text{方斗底}} &= 41.6 \text{ (tonf/rad)} & \theta_{\text{方斗底}} &= 1/100 \text{ (rad.)} \end{aligned}$$

仮定6より組物一基分の剛性は出組の場合は（式1）のように求められる（図-10 参照）。

$$K_{\text{出組}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{大斗}}} + \frac{1}{3K_{\text{卷斗}} + 2K_{\text{方斗}}} + \frac{1}{6K_{\text{卷斗}} + 3K_{\text{方斗}}}} \quad (\text{式1})$$

試験体は、組物4基が並列に接続しており、試験体全体の剛性は、上式から求められた剛性の4倍とする。図-11に、めり込み剛性から算出した試験体の弾性剛性（以降、理論値と記す）と、静的水平加力試験の荷重変形関係から得られた接線剛性（図一中①～③の接線）を示した。

図-11 第一剛性：実験値と理論値の比較

平三斗以外は、理論値は実験値と良く一致しているが、理論値の方が若干実験値を上回っている。「8. 考察」の項で後述するように、この試験体でのヤング係数が仮定値を上回っているとすれば、両者の剛性値の差は更に開くことが想定できる。この原因としては、現在の仮定では、大斗・斗の底部の三角変位めり込みのみから剛性を算出しているが、実際には部材のせん断変形、各接合部のめり込みなどの影響から剛性値が低くなっていると考えられる。また、平三斗における実験値と理論値の相違に関しては、予想していない部分での抵抗要素が働いた可能性、めり込み剛性を計算する場合のパラメータ値が仮定した値と相違していた可能性等が考えられるが、今後更なる検討を要する。

以上より、試験体に用いた組物の第一剛性は、大斗と斗の底面の三角変位めり込み剛性で概ね近似できることが分かる。ただし、回転の中心を大斗・斗の底の中央としたが、積載荷重が増大すれば浮き上がりが拘束される分、回転の中心はめり込み半径が大きくなる方へ移動し、結果的にめり込み剛性が大きくなることが想定される。本実験及び理論値は積載荷重（0.5tonf/柱）は檜皮葺きに相当する場合である。

7-2 第二剛性: K_2 (② $A \leftrightarrow B$)

部材どうしが水平に滑っているため、剛性 $K_2=0$ とする。各試験体とも、滑りが生じた水平荷重は概ね近い値（約1tonf）。表-1に各試験体の摩擦係数の平均値と滑った部材を示す。

表-1 試験体の摩擦係数と滑った箇所

摩擦(静加力試験)		静摩擦・繰り返し加力の平均値		
フェースD		摩擦力(tonf)	摩擦係数	滑った部材
K1	大斗肘木	1.1	0.55	桁
K2	平三斗	1.2	0.59	枳肘木
K3	出三斗	1.0	0.51	大斗
K4	出組	0.9	0.47	大斗

摩擦係数は表面仕上げに依存するが、実験からそのばらつきは約20%であり、あまり大きくはない。滑った部材が試験体によって異なる点などを考慮すると、最も摩擦係数の小さい位置つまり滑りやすい位置で滑りが生じたものと考えられる。滑る距離は、大斗肘木と平三斗はダボや仕口の無い（摩擦のみの）層があるため、理論的には部材どうしが水平に離れるまで滑り続ける。出三斗と出組は、摩擦のみの層はなく、ダボやいは相欠き

によって接合されているため、滑る量は接合部のすき間の方であり、この値は実験からは約4mmであった。

7-3 第三剛性: K_3 (③ B→C)

試験体の第三剛性は大斗・斗の水平移動に伴うダボの三角変位めり込み剛性の総和とした(図-12)。剛性の算出に当たり、以下の仮定を用いた。

1. ダボのめり込みは三角変位めり込みで近似できるものとする。
2. ダボのせん断変形は無視できるものとする。
3. ダボは第3段階ではじめてめり込むものと仮定し、試験体全体の变形角が1/30rad. 程度の時に大斗、斗の回転角は凡そ1/100rad. であることから、ダボのめり込みは弾性範囲内であるとする。

図-12 第三剛性 (大斗・斗のダボのめり込み)

ダボのめり込み弾性剛性及び、弾性限界変形角は稲山の木材の三角変位めり込み理論¹⁵(注3)から、次のように求められる。ただし、巻斗と方斗のダボの形状は同じであり、材料定数等は第一剛性と同値を用いた。

$$K_{\text{大斗ダボ}} = 18.0 \text{ (tonf/rad.)} \quad \theta_{\text{大斗ダボ}} = 1/111 \text{ (rad.)}$$

$$K_{\text{巻斗ダボ}} = 11.5 \text{ (tonf/rad.)} \quad \theta_{\text{巻斗ダボ}} = 1/111 \text{ (rad.)}$$

組物一基及び、試験体全体の剛性は第一剛性と同様に求められる。実験から得られた接線剛性とダボのめり込みから算出した理論剛性を図-13に示した。理論値と実験値は比較的良く一致していることが分かる。

図-13 第三剛性

7-4 剛性の組合せ

第一剛性 (K_1) と第三剛性 (K_3) の関係は、図-14 のように摩擦要素を介した直列バネとしている。①では部材間、特にダボとダボ穴の間にすき間があるため、ダボは変形せず、剛性は K_1 のみで決まるが、②で滑りが生じ部材間のすき間が吸収される。従って実際には③では、 K_1 と K_3 の直列バネの値になるが、 $K_1 > K_3$ であるためここでは、③は K_3 とした。

図-14 組物のバネ

8. 考察

組物を摩擦要素を介して木材のめり込みバネが直列に接続したモデルと仮定すると、全体の变形角は1/30rad. に達しても、各バネの变形は1/100rad. 程度であり、弾性範囲内であると考えられる。従って、繰り返し加振に対して剛性が低下しないという組物の荷重変位関係の特徴は、滑りによる変形及び滑り要素を介して変形が集中しないことにより、試験体全体は大変形に達しても、各要素レベルは弾性範囲であることに起因しているといえる。

任意の組物に関して、第一剛性については大斗・斗の寸法と数、第二剛性は摩擦係数、第三剛性はダボの数と寸法が与えられれば、その剛性と履歴形状を推定することができるようなモデルを提案した。各パラメータについては以下の点に留意が必要である。摩擦係数は、材料・表面仕上げ・含水率などの影響を受ける値である。しかし、組物は複数の部材が積層して構成されていることから、最も低い摩擦係数の位置で滑りが生じている。つまり、摩擦係数の下限値が分かれば良い。ヤング係数は文献¹⁶から求めているが、実験で使用した材料は、文化財建造物に使用されるような優良な材料であるため、一般の建物で使用されている材料にもとづいて定められた文献¹⁵の値よりも、高い値を示すことが想定できる。めり込み剛性は、ヤング係数に比例するため、理論値はここで示した値よりも高くなると推測できる。第一剛性と第三剛性の繋がり方(図-13)は、摩擦要素を介した直列バネであり、このギャップは部材間、特にダボとダボ穴のすき間または部材間のガタの総量であり、施工精度・老朽化などと密接に関係した値である。この値は、実験値からは4mm程度と得られているが、既存の建造物の場合は定量化が困難であり、建物の老朽化による影響と共に今後の重要な検討課題である。

この履歴モデルは4種類各1体の試験体の実験結果を根拠としているため、その一般性には限界があるといえる。今後はより多くの種類・大きさの組物を対象とした実験を行い、モデルの妥当性の検討を行う必要がある。特に、本実験での最大変形角は約1/30rad. であり、これ以上変形が進んだ際の情報が無い。更に、除荷時の剛性に関する検討も含め今後の検討課題である。

9. 結論

伝統的木造建築に用いられる、組物4体の実物大の部分模型を対象とした静的水平加力試験から組物の復元力特性及び各剛性に対応する変形の特徴を考察した。異なる4種類の組物の共通の特徴より、マルチリニア型の履歴モデルを提案し、剛性を木材のめり込み理論から算出した。実験結果と理論値の比較から、組物の剛性をその形状・材料特性から推定する方法を提案した。

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- ・組物は繰り返し加力に対して剛性の低下が認められない。これは、部材どうしの滑りによる変形及び滑り要素を介して変形が集中しないことにより組物全体が大変形に達しても、各要素レベルでは弾性範囲であることに起因している。
- ・静的水平加力試験より組物の荷重変位履歴曲線は、複数の折線(①~③)で近似できる、マルチリニア型の復元力特性を示す。
- ・履歴モデルの3つの剛性に対応する組物の主要な変形の要素は①大斗・巻斗の回転→②部材どうしの滑り→③大斗・巻斗の滑りである。
- ・3つの剛性はそれぞれ、①大斗・巻斗底面のめり込み剛性の総和、②滑りであるため0、③大斗・巻斗のダボのめり込み剛性の総和、から理論

的に算出したところ、実験値と良く一致する。

・上記の事項に基づいて、応答解析が可能な組物のマルチリニア型の履歴モデルを提案した。

今後は、この履歴モデルを用いた地震応答解析を行い振動台加振試験結果との比較から、モデルの妥当性を検証する。

謝辞

文化庁建造物課清水真一博士、(財)文化財建造物保存技術協会安田一男氏、京都大学西澤英和博士にご指導賜りました。また、実験では近藤信輔氏、亀山央樹氏、近藤哲氏をはじめとする東京大学大学院坂本研究室の大学院生にお世話になりました。ここに記して謝意を表します。

注記

(注1) 試験体の単位重量は、試験片3体の計測値(413kgw/m³, 419 kgw/m³, 464 kgw/m³)の平均値。含水率は、試験体の20箇所を木材水分計(ターク H, Kett Electric Laboratory 製)で計測した値(最小10.2%、最大14.8%)の平均値とした。

(注2) 木材の三角変位めり込み(弾性範囲)の弾性限界変形角 θ_y 、任意の変形角 θ に対するモーメントMは下式から求められる^{文15}。

$$\theta_y = \frac{z_0 f_m}{x_p E_{\perp} \sqrt{C_x C_y C_{xm} C_{ym}}} \quad M = \frac{x_p^3 y_p C_y E_{\perp} \theta}{z_0} \left(C_{xd} + \frac{1}{3} \right)$$

剛性: $K = M / \theta$ とした。

各補正係数は下式から求められるが、詳細は^{文15}を参照。

$$C_x = 1 + \left[\Phi \left(\frac{2x_1}{z_0} \right) + \Phi \left(\frac{2x_2}{z_0} \right) - 1 \right] / \left(\frac{0.8x_p}{z_0} \right)$$

$$C_y = 1 + \left[\Phi \left(\frac{2ny_1}{z_0} \right) + \Phi \left(\frac{2ny_2}{z_0} \right) - 1 \right] / \left(\frac{0.8ny_p}{z_0} \right)$$

$$C_{xm} = 1 + \frac{z_0}{0.8x_p} \quad C_{ym} = 1 + \frac{z_0}{0.8ny_p}$$

$E_{\perp}$: 全面横圧縮ヤング係数、 f_m : めり込み弾性限界応力の上限値、 n : 繊維方向に対する繊維と直交方向の近似値間倍率(木材のポアソン比の異方性を修正して等方性弾性体に近似置換するための倍率。実験結果から $n=5 \sim 7$)^{文15}。 $\Phi(x)$: 標準正規確率変量。

なお、計算にあたって係数は標準値である次の値を用いた。

$$E_{\perp} = 4.0 \text{ (tonf/cm}^2\text{)}, f_m = 0.075 \text{ (tonf/cm}^2\text{)}, n = 6$$

(注3) 大斗、巻斗、方斗は水平移動するが、第一段階で回転し角度がついているため、ダボのめり込み形状は三角変位であると仮定した。

参考文献

- 1) 光井渉: 地震被害と文化財建造物、月刊文化財、第一法規出版株式会社、p. 13、平成8年2月
- 2) Ryo Tanabashi: Earthquake Resistance of Traditional Japanese Wooden Structures, Proc. of the Second World Conference on Earthquake Engineering (Special Lecture), pp. 180-181、1960年7月

- 3) 山辺克好、金井清: 五重塔の耐震性に関する研究、日本大学生産工学部報告(第21巻第2号)、pp. 91-110、1988年12月
- 4) 坂静雄: 金堂構造の安全度判定に関する研究(第八報 社寺骨組の力学研究 第四部法隆寺金堂内陣架構 1/2 模型の引倒し抗力及復原力)、文化庁保存修理課、昭和19年4月
- 5) 坂静雄: 社寺骨組の力学的研究(第1部 柱の安定復原力)、建築学会大会論文集、pp. 252-258、昭和16年4月
- 6) 西澤英和: 伝統的木構造の耐震性に関する基礎研究(斗供及び小壁の力学特性について)、京都大学建築学科、1996年3月
- 7) 山田憲明・西澤英和: 2方向の地震力を受ける立体架構の動的応答解析(伝統的木構造の地震応答解析)、京都大学工学部建築第二学科1996年度卒業論文、1997年3月
- 8) 林知行、軽部正彦: 古代伝統木造架構の実大水平加力実験(その1 概要と斗組架構実験)(その2 実大架構実験と履歴性状)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 269-270、1998年9月
- 9) 坂本功・大橋好光・木村正彦・藤田香織・安田一男・川久保政茂: 伝統的木造建築の組物の振動台実験(その1 概要と静加力試験)、1997年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 37-40、1998年3月
- 10) 木村正彦・藤田香織・坂本功・大橋好光・川久保政茂・安田一男: 伝統的木造建築の組物の振動台実験(その2 組物の振動特性)、1997年度日本建築学会関東支部研究会、pp. 41-44、1998年3月
- 11) 藤田香織・木村正彦・大橋好光・坂本功: 伝統的木造建築の組物の振動台実験(その3 地震波加振)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 263-264、1998年9月
- 12) 木村正彦・大橋好光・藤田香織・坂本功: 伝統的木造建築の組物の振動台実験(その4 組物の上下振動特性)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 265-266、1998年9月
- 13) 藤田香織・木村正彦・大橋好光・坂本功: 伝統的木造建築の組物の振動台実験(その5 出組の静加力試験)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 15-160、1999年9月
- 14) Kaori Fujita, Isao Sakamoto, et al.: Static and Dynamic Loading Tests of Bracket Complexes used in Traditional Timber Structures in Japan, 12WCEE, 2000. 1
- 15) 稲山正弘: 木材のめり込み理論とその応用(靱性に期待した木質ラーメン接合部の耐震設計法に関する研究)、東京大学学位論文、1999. 12
- 16) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説、第2版第1刷、(社)日本建築学会、丸善、p. 17、1995. 1

(2000年5月10日原稿受理、2000年12月21日採用決定)