

## 水平加力実験による飾り組子欄間の構造性能

Structural Performance of Muntin Decorated Traditional Wooden Frame on Static Loading Test

須田達<sup>1</sup>・棚橋秀光<sup>2</sup>・中村友輔<sup>3</sup>・鈴木祥之<sup>4</sup>

Tatsuru Suda, Hideaki Tanahashi, Yusuke Nakamura and Yoshiyuki Suzuki

<sup>1</sup>金沢工業大学講師 建築学部建築系建築学科 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1)

Assistant Professor, Kanazawa Institute of Technology, Department of Architecture

<sup>2</sup>立命館大学 客員研究員, 衣笠総合研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Visiting Researcher, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

<sup>3</sup>金沢工業大学大学院生 工学研究科建築学専攻 (〒921-8501 石川県野々市市扇が丘7-1)

Graduate Student, Graduate School of Engineering, Kanazawa Institute of Technology,

<sup>4</sup>立命館大学教授 衣笠総合研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

The traditional wooden frame decorated with elaborate muntins in Higashi Honganji Goei-do Mon is expected to be structural element. Therefore, static loading tests of a full scale specimen were carried out in order to make clear the structural performance. The test results showed that the wooden muntin frame has high performances of deformability and restoring force. The structural mechanisms of wooden muntins are suggested by considering the bending moments, compressive and tensile stresses acting on the wooden members. Based on the mechanisms, the restoring force characteristics were estimated by Elasto-plastic Pasternak Model analysis.

**Keywords :** *traditional wooden structure, static loading test, axial force, restoring force characteristics, Pasternak Model, Higashi Honganji*

### 1. はじめに

伝統構法による社寺建築物は我が国の建築文化を代表する建築物の一つであり、歴史、文化遺産に対する関心が高まりつつある中で、その価値は高く、今後も保全すべき建築物であると言える。伝統構法による社寺建築物の保全は、歴史的、文化的価値に加えて意匠的な価値も含めて、建築物の価値を損なわないことが求められる。一方で近年は各地において大地震が多発しており、設計用の地震力を上回る地震動も観測されている。長期間にわたって高い構造性能が維持される必要があり、耐震性能を評価して安全性に対する十分な構造的対策が必要であると言える。その為には建築物を構成する構造要素の力学的メカニズムを把握しなければならない。伝統構法による社寺建築物は、構造部材だけでなく、装飾的な部材についても精度の高い技術を用いて建築されているため、装飾的な部材であっても耐震性能に寄与する場合がある。

飾り欄間は意匠性が重要視され、一般的に構造要素としての性能を期待できない。しかし、東本願寺御影堂門に用いられた飾り組子欄間は、構成する部材も大きく、伝統技術によって精巧に作られており、構造要素としても期待できる。御影堂門の外観を図1、飾り組子欄間を図2に示す。

本研究では東本願寺御影堂門の組子欄間の静的載荷実験に基づいて得られた構造特性と耐力を発揮する力学メカニズムについて報告する。



図1 東本願寺御影堂門



図2 飾り組子欄間

## 2. 試験体

東本願寺御影堂門は上層部分と下層部分があり、下層部分の主な軸組は柱と頭貫、虹梁、内法貫、腰貫、地貫で構成されている。飾り組子欄間は下層の妻面の板壁上部に設けられており、柱と内法貫、腰貫に囲われている。実際の状況を確認し、各部の採寸調査に基づいて、実大の試験体を作成した。

飾り組子欄間試験体は方形の枠組に5行6列の縦横の格子と斜め十字の組子とし、縦棧は通し材とし、横棧は縦棧にほぞ差しである。組子は合い欠きとし縦棧・横棧の仕口にはほぞ差しである。材種は全てケヤキである。試験体の規模は高さ2203mm、幅2578mm、断面寸法として、大枠材は125×170mm、縦棧および横棧は70×60mm、組子材は42×60mmである。飾り組子欄間試験体の立面および断面を図3、詳細を図4に示す。なお図4の詳細1、2は図3中に示す各部に対応する。

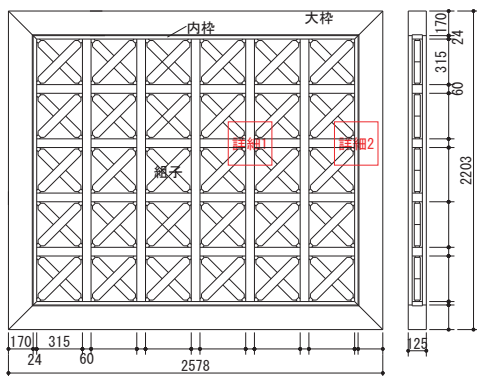


図3 飾り組子欄間試験体の立面と断面

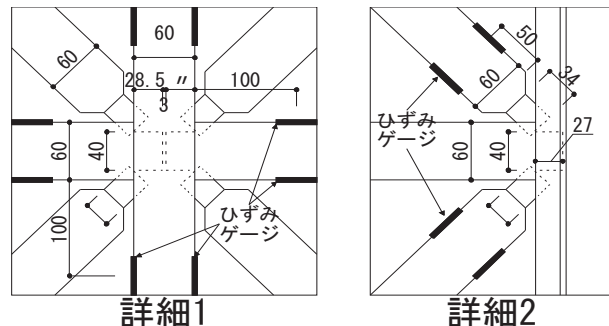


図4 組子の接合部詳細

## 3. 水平加力実験

実験日程は2013年7月7日から8月2日とし、場所は金沢工業大学やつかほりサーチキャンパス地域防災環境科学研究所にある構造実験室で実施した。加力は2回に分けて実施しており、1回目は小から大変形に至るまでの荷重変形角関係や履歴特性など、基本的な性状を把握することを目的に2013年7月11日に実施し、2回目は荷重変形角関係における終局状態や最終的な破壊性状を確認するため、同年8月2日に実施した。また実験終了後に各部の損傷状況を確認するため、同年8月27日に解体、目視調査を実施した。

試験体の設置は、試験体がせん断変形するように鋼製治具を作成し、試験体を鋼製治具にはめ込んで行った。その際に試験体の脱落防止用のプレートを取り付けているが、ボルト等による接合はしていない。せん断変形用の鋼製治具は、土台を反力フレームにボルトで接合し、頂部をアクチュエータ先端と接合した。試験体の設置状況を図5に示す。

実験の方法は目標変形角ごとに正負交番繰り返しによる静的载荷とした。変形の制御は頂部に取り付けたアクチュエータのジャッキストロークで行った。目標変形角は1/480、1/240、1/120、1/80、1/60、1/40、1/30、1/20、1/15、1/10、1/7radとし、2回目の加力では、1/30、1/20radを加力した後、一方向に押し切りとした。载荷方向は図6の右に引く方向を正とした。表1に载荷スケジュールを示す。

計測器は、図6に示すように、試験体の対角と頂部にワイヤー変位計DP-1000DS (W)、上下左右に接触型変位計SDP-100C (D)、試験体背面にレーザー変位計ILD1700-750、油圧ジャッキの先端にロードセル(L)を取り付けた。計測器を示す記号および番号は図6と対応する。部材の応力は、組子の9箇所(01~09)、格子4箇所(10~13)の両側面にひずみゲージを取り付けて計測した。図4に貼り付け位置を示す。

表1 荷重スケジュール

実験	1回目											2回目		
目標変形角(rad)	1/480	1/240	1/120	1/80	1/60	1/40	1/30	1/20	1/15	1/10	1/7	1/30	1/20	押し切り
荷重速度(mm/s)	0.5			1.0										
繰り返し(回)	3											1	—	



図5 試験体の設置状況

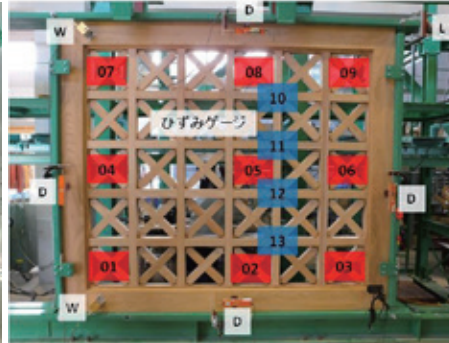


図6 計測器設置箇所



図7 ひずみゲージの貼付

## 4. 実験結果

### (1) 荷重－変形角関係

実験時の試験体の変形状況を図8、実験から得られた荷重変形角関係および包絡線、特定変形角時の耐力を実験1、2回目をまとめて図9に示す。1回目の実験では、変形角約1/25radまで正負交番荷重しておりほぼ正負対称、荷重時はピーク指向型であり、戻り剛性はほとんど傾きが無く除荷されて原点に戻る履歴特性を示した。2回目の実験では変形角1/25rad以降の単調荷重であり、急激に耐力が上昇した後に、1/20rad以降は緩やかになるが耐力低下はない。最大耐力は99.8kN、最大変形角1/11.6radであった。



図8 大変形時の試験体

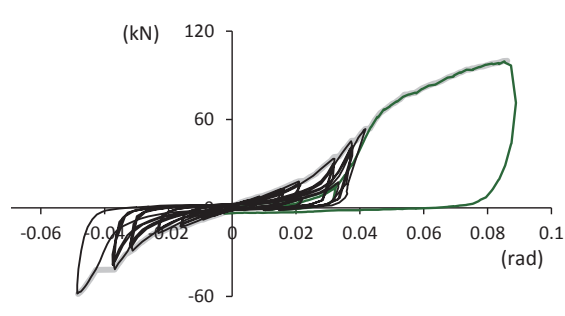


図9 荷重－変形角関係

変形角	耐力(kN)
1/480	3.22
1/240	4.73
1/120	7.48
1/80	10.46
1/60	13.77
1/40	21.29
1/30	34.57
1/20	70.10
1/15	86.50

### (2) 部材の応力

ひずみゲージによる計測データから部材に生じる応力を算出し、一例として、組子(ブロック02)の軸力と格子(ブロック11)の軸力および曲げモーメントをそれぞれ図10~12に示す。その際、けやきのヤング係数は11.8GPa<sup>1)</sup>、部材の断面寸法は設計寸法とし、同図の横軸は試験体の変形角である。なお各図のブロック番号と凡例記号は図6の設置箇所、図13の加力方向と部材記号に対応する。同様に各ブロックのひずみデータから特定変形角における軸力を算出して、組子の軸力を図14に示し、格子の軸力を図15に示す。ただし図15のd材ブロック10は材下端のひずみゲージ不良である。

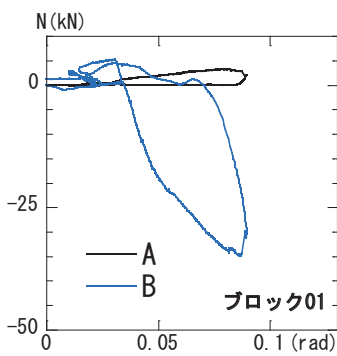


図10 組子の軸力

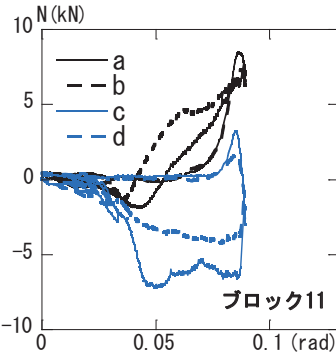


図11 格子の軸力

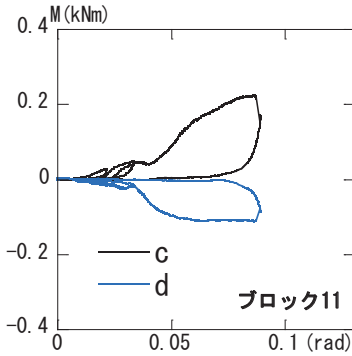


図12 格子の曲げモーメント

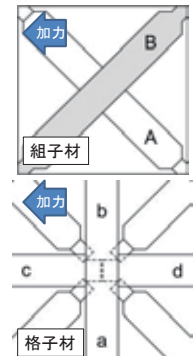


図13 部材記号

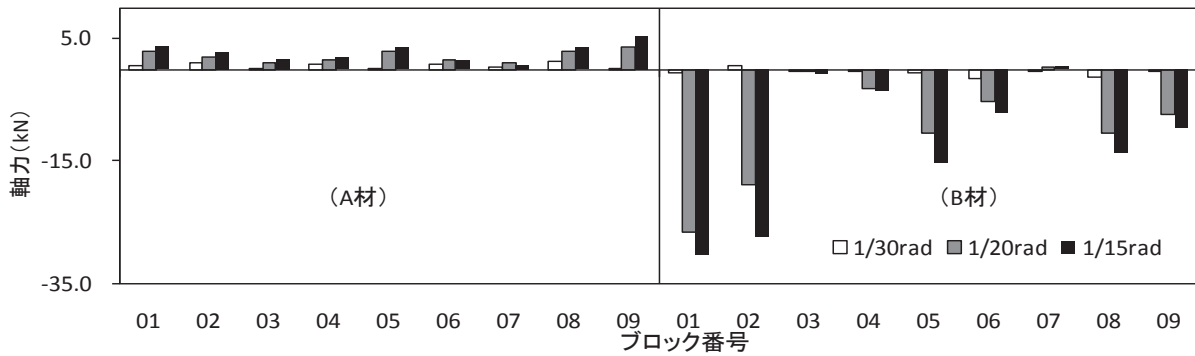


図14 特定変形角時における組子の軸力

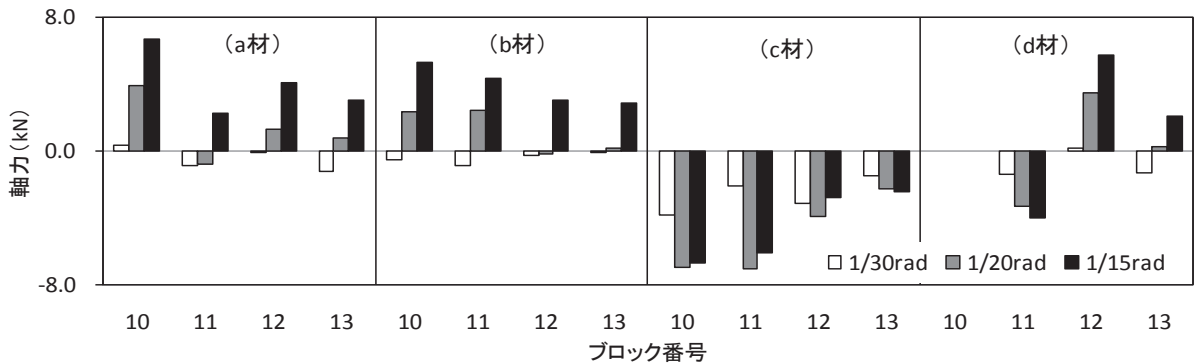


図15 特定変形角時における格子の軸力

図10に示すように組子の軸力は、A材に引張、B材に圧縮を生じている。また図14に示すように、変形が進むにつれて両材ともに軸力は増加するが、A材の引張は変形角1/15radにおいても概ね5kN以下であり、B材の圧縮は、壁全体が平行四辺形に変形するため対角線上のブロック01、05、09を中心に大きく作用し、最大で30kNを超えて支配的となる。同図において、組子の曲げモーメントについては規則性がなく、軸力に比べて極めて小さいため壁全体の耐力に影響ないと考えられる。

格子の軸力は、組子軸力が小さいブロック周辺において軸力正負でばらつくが、主たる応力メカニズムとしてa、b材に引張、c、d材に圧縮を生じている。図15に示すように、組子材と同様に、変形と共に増大していることが分かる。図12は格子の曲げモーメントであり、c材とd材で対称の曲げモーメントが生じていることが分かる。各ブロックの格子の曲げモーメントは最大約0.2kNm～0.4kNm程度であった。

### (3) 損傷状況

実験载荷中においては、小変形から大変形にかけて変形はするものの組子部材、格子部材ともに損傷はほとんど目視で確認出来なかった。実験終了直後には枠材に若干の隙間を確認した。実験終了後に部材を丁寧に解体し、各接合部の損傷状況を確認した。折損等の大きな損傷は無く、組子のほぞ部分に若干の亀裂が生

じており、数本の組子で確認した。また組子のほぞおよび横棧のほぞ部分でめり込み痕が確認された。図16、17、18にそれぞれの損傷状況を示す。



図16 枠材の隙間



図17 めり込み痕



図18 ほぞ小口の亀裂

## 5. 力学メカニズム

### (1) 格子のメカニズム

図19に示す様に、横棧のほぞが縦棧に回転しつめり込む回転めり込み抵抗  $M_t$  と横棧が縦棧に胴付きでめり込むことによる回転めり込み抵抗  $M_c$  を考える。横棧は、圧縮力  $R_1$  とばね  $k_c$  で相互に押し合いながら回転し、その押し合う圧縮力は、欄間壁の両側の柱の曲げ抵抗（柱上下仕口を支点とする）の反力と釣り合うことで抵抗力を発揮する。実際に図8のように、柱がピア樽のようなはらみ出す変形と横棧の実測圧縮力の存在で裏付けられる。このメカニズムを解析的にシミュレーションする上で、ばね  $k_c$  の設定は難しいため、実験の目視で確認できためり込みの接触長さ  $L_\theta = 15\text{mm}$  を目安として弾塑性パステルナーク・モデル（EPM）解析<sup>2)</sup>により弾性復元力を推定する。

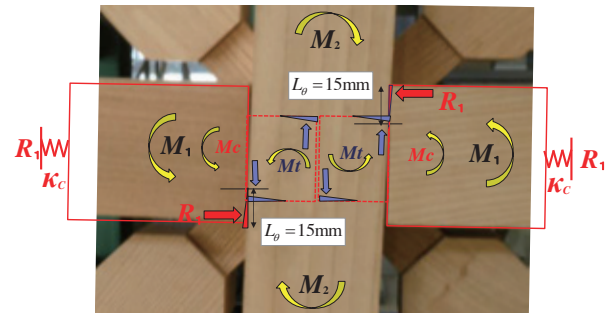


図19 格子の力学メカニズム

縦棧の片側の回転めり込み抵抗  $M_1$  は、胴付の抵抗  $M_c$  と短ほぞの抵抗  $M_t$  に相当し、 $M_c$ 、 $M_t$  は各々回転めり込みのモーメント  $M_R$  と摩擦によるモーメント  $M_F$  よりなる。

$$M_c = \frac{1}{2}(M_R + M_F) = \frac{1}{2} \left( \frac{2EBL_\theta^3}{3H} \zeta_R \theta + \mu \frac{EBL_\theta^2}{2} \zeta_F \theta \right) = 14.2\theta \text{ [kNm]} \quad (1)$$

ここで、 $B=70\text{mm}$ ：格子幅、 $H=60\text{mm}$ ：格子高さ、 $E=800\text{MPa}$ ：ケヤキの横圧縮ヤング係数、

$\gamma H = 0.003E + 2.4 = 4.8$ ：無次元特性値、 $L_\theta = 15\text{mm}$ ：実測接触長さ、 $n=24$ ：格子仕口数、 $h = 2.2\text{m}$ ：壁高さ

$\rho = (L - L_\theta) / L_\theta = (30 - 15) / 15 = 1$ ：回転めり込みの剛性増大率において接触長さの変化を考慮する係数

$\gamma L_\theta = \gamma H \times L_\theta / H = 1.2$ 、 $\mu = 0.5$ ：摩擦係数、

$$\text{回転めり込みの剛性増大率：} \zeta_R = 1 + 1.5\rho + \frac{3}{\gamma L_\theta} \left( 1 + \rho + \frac{1}{\gamma L_\theta} \right) = 9.58$$

$$\text{摩擦に関する剛性増大率} \zeta_F = 1 + \frac{2}{\gamma L_\theta} = 2.67$$

$$M_t = \frac{2EBL_t^3}{3H_t} \zeta_R \theta + \mu \frac{EBL_t^2}{2} \zeta_F \theta = 7.1\theta \text{ [kNm]} \quad (2)$$

ここで、 $B=30\text{mm}$ ：ほぞ幅、 $H_t=40\text{mm}$ ：ほぞ高さ、 $L_t=28.5/2=14.25\text{mm}$ ：ほぞ長さの1/2、

$\rho=0$ 、 $\gamma L_t = \gamma H \times L_t / H_t = 1.71$ 、 $\zeta_R = 1 + 1.5\rho + \frac{3}{\gamma L_t} \left( 1 + \rho + \frac{1}{\gamma L_t} \right) = 3.78$ 、 $\zeta_F = 1 + \frac{2}{\gamma L_t} = 2.27$

$$M_1 = M_c + M_t = 14.2\theta + 7.1\theta = 21.3\theta \text{ [kNm]} \quad (3)$$

$$\text{弾性剛性：} K_1 = M_1 / \theta = 21.3 \text{ [kNm/rad]} \quad (4)$$

$$\therefore \text{全体せん断剛性：} K_G = \frac{2nK_1}{h} = \frac{2n \times 21.3}{2.2} = 19.3n \text{ [kN/rad]} \quad (5)$$

ブロック 10-13 の 4 個所の実測値は最大値 0.2~0.4 kNm で  $M_1$  に対応し、初期の剛性は小さいが 0.03rad 付近から立ち上がる弾性剛性は 8~10kNm/rad 程度で  $K_1$  とオーダーは合うが差はかなりあり、ひずみ測定位置と格子点のずれがその主要因と推察する。

## (2) 組子のメカニズム

X 型の組子では正方形の格子が菱形に変形しても対角線の組子の直交関係は変化しないため、合欠きの交差部では回転めり込みは起こらないが、組子が圧縮力を受けて押し込まれる場合は、組子の木口のほぞとの接触により圧縮筋かいとして抵抗する。一方、引張時には、図 20 のように、ほぞを挟んでいる格子材の回転に伴う挟み込む力  $R_2$  の摩擦力により拔出しに抵抗するメカニズムを考える。

このメカニズムを確認するために図 21 に示す簡単な模型実験を行った。4 箇所をボルトでピン接合した井桁ヒノキ格子材の対角にヒノキの筋かいを挟み込んで上下に引張るだけの簡単な模型実験である。その実験結果では、図 22 のように実際に抵抗力は回転角に伴い増加する。初期の高剛性は摩擦滑りが発生する前の筋かいの引張剛性で、伸びの増大とともに滑りがおこると Stick-Slip の振動<sup>3)</sup>を繰り返しつつ引張力が増大し、12mm の変形で引張抵抗が最大 0.25 kN で降伏し、その後挟み込み部分が外れて抵抗がなくなった。これにより組子の新たな引張抵抗のメカニズムが確認できた。筋かいの引張・圧縮抵抗の剛性・強度は図 23 に中央部のブロック 05 の一例を示す。壁全体のなかでブロックの占める位置により軸力分布はばらつくが、概ね引張：圧縮=1:2~6 程度となっている。

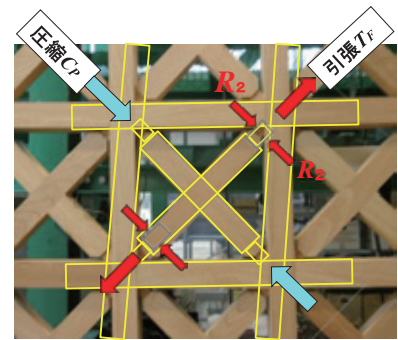


図 20 組子の力学メカニズム

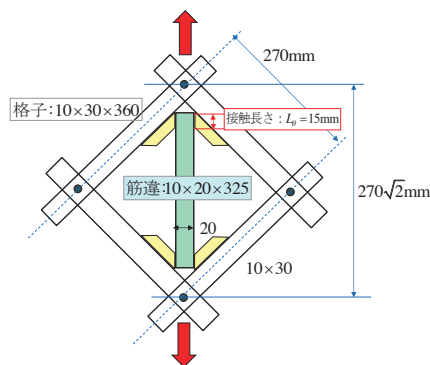


図 21 組子の単体模型実験セットアップ

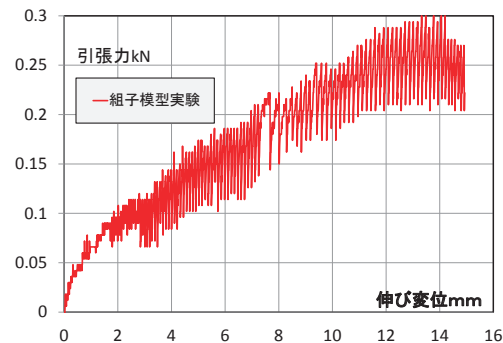


図 22 組子単体模型の復元力特性

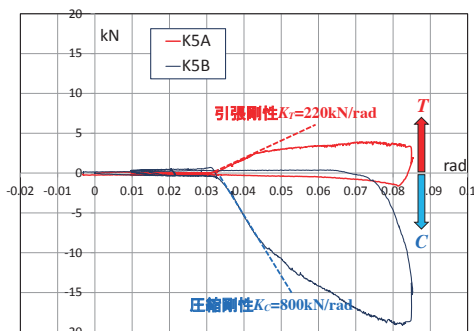


図 23 ブロック 05 の組子の実測軸力と剛性

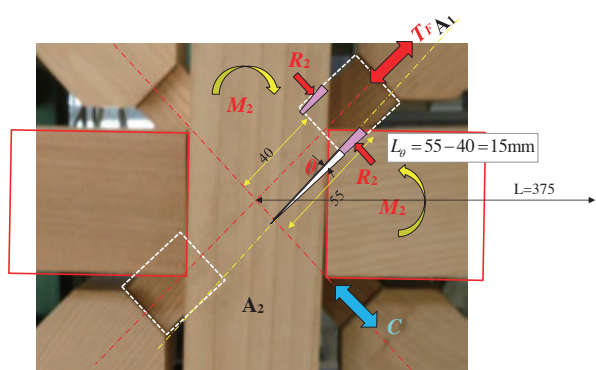


図 24 組子のメカニズムにおけるパラメータ設定

### a) 組子の引張剛性の試算

図 24 のようにパラメータを設定して、接触長さ  $L_{01}$  と  $L_{02}$  の回転めり込み反力の差が、格子材の回転により挟まれて発生するめり込み反力  $R_2$  と考え、摩擦による引張抵抗力  $T_F = \mu R_2$  の算定を試みる。 $B=30\text{mm}$ : 組子木口幅、 $H=13.5\text{mm}$ : 組子木口高さの 1/2、 $E=650\text{MPa}$ : 横圧縮ヤング係数(繊維傾角  $45^\circ$  を考慮)と仮定して回

転角  $\theta$  の時の挟み込みに有効な角度は  $\theta/2$  となるので、

$$\gamma H = 0.003E + 2.4 = 4.35, \quad \gamma L_\theta = \gamma H \times L_\theta / H = 4.35 \times (55 - 40) / 13.5 = 17.7 : 12.9$$

$$T_F = \mu R_2 = \mu \frac{EB(L_{\theta 1}^2 - L_{\theta 2}^2)}{2H} \zeta_N \theta = 0.5 \frac{650 \times 30 \times (55^2 - 40^2)}{2 \times 13.5} \zeta_N \theta / 2 = 275 \theta \text{ [kN]} \quad (6)$$

ここで、 $\zeta_N = 1 + \frac{2}{\gamma L_\theta} / 2 = (1.06 + 1.08) / 2 = 1.07$  (めり込み片側のみの剛性増大率の平均)

組子 1 個の回転角あたりの摩擦による引張剛性：

$$K_{\theta F} = \frac{T_F}{\theta} = 275 \text{ [kN/rad]} \quad (7)$$

これを  $K_{\theta T} = K_{\theta F} / \sqrt{2}$  (付録) の関係を用いて回転角あたりの水平せん断剛性  $K_{\theta T}$  に換算すると、

$$K_{\theta T} = 275 / \sqrt{2} = 194 \text{ [kN/rad]} \quad (8)$$

### b) 組子の圧縮剛性の試算

圧縮抵抗は斜材先端の断面が細った木口のめり込み剛性<sup>4)</sup>と中央部の断面の圧縮剛性が複合する部材として検討する。通常の節点がピン接合では圧縮剛性は極めて大きく図 23 の実験事実とあわないが、節点部のめり込みによる変形集中により圧縮剛性が低下すると考える。

座屈耐力は十分大きく、検討は省き、単純圧縮剛性： $A = 2520 \text{ mm}^2$ 、 $E = 12000 \text{ MPa}$

$$K_N = AE / l = 2520 \times 12000 \times 10^{-3} / 445 = 68 \text{ [kN/mm]} \quad (9)$$

両端の木口のめり込み剛性： $B = 30 \text{ mm}$ ：載荷幅、 $2L = 27 \text{ mm}$ ：載荷長さ、圧縮部の等価な圧縮ヤング係数は  $E = 200 \text{ MPa}$ 、 $\gamma H = 2.0$  と仮定、 $2H = 70 \text{ mm}$ ：圧縮厚さとして、

$$K_P = \frac{C_P}{\delta} = \frac{2BLE\zeta_p}{2H} = \frac{810 \times 200 \zeta_p}{70} / 1000 = 5.3 \text{ [kN/mm]} \quad (10)$$

ここで、 $\gamma L = \gamma H \times L / H = 0.77$ 、 $\zeta_p = 1 + \frac{1}{\gamma L} = 1 + \frac{1}{0.77} = 2.3$

単体の筋かいとして木口のめり込みと軸圧縮による圧縮剛性は直列のばねとして、

$$K_C = \frac{1}{1/K_N + 1/K_P} = \frac{1}{1/68 + 1/5.3} = 4.9 \text{ [kN/mm]} \quad (11)$$

これを  $K_{\theta C} = 0.4K_C H$  の関係(付録)を用いて回転角あたりの水平せん断剛性  $K_{\theta C}$  に換算する。

$$K_{\theta C} = 0.4K_C H = 0.4 \times 4.9 \times 375 = 735 \text{ [kN/rad]} \quad (12)$$

$$\therefore K_{\theta T} + K_{\theta C} = 194 + 735 = 929 \text{ [kN/rad]} \quad (13)$$

参考に 剛性実測値はブロック05で  $(220+800)/\sqrt{2} = 723 \text{ [kN/rad]}$  程度である。

### (3) 全体の復元力特性のシミュレーション

引張と圧縮の合計が組子の復元力となるが、周辺架構の拘束、がたつき、ブロックの占める位置により抵抗力の発生はばらつきと考えられ、各所にその条件を加味して全体の復元力を推定するのは難しい。そこで格子・組子のブロック数  $n=24$ 、並列  $m=6$  列の複合剛性と格子の回転めり込みによる水平剛性の合計に、剛性低下率  $\alpha$  を導入して全復元力を近似的に(14)式で表す。初期のスリップ状の低剛性ではこの  $\alpha$  が小さく、かみ合わせが増大し弾性剛性が発揮されると  $\alpha$  が増大し、変形が進むとめり込みの降伏が起きて  $\alpha$  は小さくなる。すなわち、 $\alpha$  は変形の各段階で実験結果の復元力特性に合うように逆算した弾性剛性の低下比率でもあり、 $\alpha = 1$  であれば、設定した剛性が実験結果の弾性剛性と一致する。

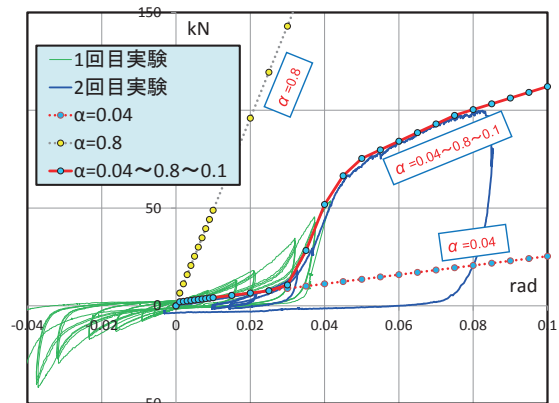


図 25 飾り組子欄間の復元力特性のシミュレーション

メカニズムの異なる格子と組子の初期剛性の立ち上がり、降伏レベルが同じとは限らないので、まとめて  $\alpha$  で一律にコントロールできる根拠はないが、格子と組子の全体が初期の低剛性状態から剛性が増大し、降伏により剛性低下する挙動を表す一つの試みである。

$$\Sigma Q = \Sigma(19.3n + 929m)\alpha\Delta\theta + Q_F = \Sigma(463 + 5574)\alpha\Delta\theta + Q_F = \Sigma 6037\alpha\Delta\theta + 1.8 \quad (14)$$

ここで、 $\Delta\theta$  は回転角の増分(rad)、 $Q_F=1.8\text{kN}$  (一定値) は初期の摩擦抵抗である。

全体の復元力特性は図 25 のようになり、 $\alpha$  を 0.04~0.8 の範囲で調整することで 2 回目実験の復元力特性をシミュレーションできる。格子・組子のユニットが全体として試算値の 4% から最大 80% の耐力を発揮し、0.05rad 以降は降伏すると 10% 程度の剛性となると解釈できる。この算定では、全体の抵抗に占める比率は、格子 8%、組子の引張抵抗 19%、圧縮抵抗 73% 程度である。このシミュレーションの試みも一定の妥当性があると考えられる。

## 6. まとめ

伝統的な飾り組子欄間の試験体を製作して水平加力実験を行った。その結果、変形に伴い復元力は大幅に向上し、大変形時には降伏後も低下しないで大きな耐力を有することが分かった。耐力を発現する力学メカニズムとして、組子の斜材に作用する圧縮力が主たる要素であるが引張力も作用し、同時に格子材には曲げモーメントも作用していることを定量的に確認した。飾り組子欄間は、構成する部材数が多く、安定した復元力特性を示し、大変形においても大きな損傷が生じないことを確認した。

実験結果をもとに、格子のほぞと胴付きの仕口の回転めり込みメカニズム、組子の引張は挟み込みの回転めり込みのメカニズム、組子の圧縮は断面が細った先端の均等めり込みのメカニズムを適用し、弾塑性パステルナーク・モデルによる定量的なシミュレーションを試みた。現段階では、主に弾性剛性の評価にとどまるが、弾塑性特性は実験結果に合うように剛性低下率を用いて評価した。これによれば、全体の抵抗に占める比率は、格子 8%、組子の引張抵抗 19%、圧縮抵抗 73% 程度である。設定した要素の剛性は全体にやや過大であり、引き続き弾塑性にわたる精度よいシミュレーションを検討する。

**謝辞:** 本研究は、東本願寺御影堂門耐震調査研究の一環として行われたもので、東本願寺ならびに耐震調査研究委員会の関係各位のご協力に感謝します。

## 参考文献

- 1) 木材工業ハンドブック：森林総合研究所 改定4版，2004.3.
- 2) 棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造仕口の回転めり込み弾塑性特性と十字型通し貫仕口の定式化，日本建築学会構造系論文集，Vol.76, No.667, pp.1675-1684, 2011.9.
- 3) 曾田範宗：摩擦と潤滑，岩波，pp.71, 1954.
- 4) 棚橋秀光・大岡優・伊津野和行・鈴木祥之：木材のめり込みメカニズムとめり込み弾塑性変位の定式化，日本建築学会構造系論文集，Vol.76, No.662, pp.811-819, 2011.4.

**付録)** 本研究で扱う木造のトラスでは節点は理想的なピンとはならないが、ピンと仮定して、付図 1 のトラスを参照して、仮想仕事の原理により、

$$\text{水平変位: } \Delta_H = \frac{2\sqrt{2}QH}{A_1E} + \frac{QH}{A_2E}, \quad \text{斜材の変位: } \delta_1 = \frac{\sqrt{2}Q\sqrt{2}H}{A_1E} = \frac{2QH}{A_1E} \text{ [mm]}$$

$$\text{回転角あたりの水平せん断剛性: } K_\theta = \frac{Q}{\theta} = \frac{Q}{\Delta_H / H} = \frac{QH}{\frac{2\sqrt{2}QH}{A_1E} + \frac{QH}{A_2E}} = \frac{E}{\frac{2\sqrt{2}}{A_1} + \frac{1}{A_2}} \text{ [kN/rad]}$$

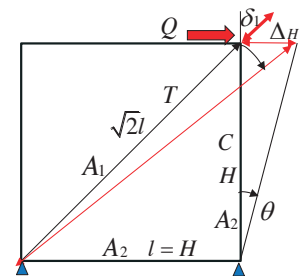
$$\text{斜材の軸変形剛性: } K_T = \frac{T}{\delta_1} = \frac{A_1E}{\sqrt{2}H} \text{ [kN/mm]}$$

$$A_1 = 42 \times 60 = 2520, \quad A_2 = 60 \times 70 = 4200 \text{ の場合, } A_1 / A_2 = 0.7 \text{ より, } K_\theta / K_T = \frac{\sqrt{2}A_2H}{(2\sqrt{2}A_2 + A_1)} \cong 0.4H$$

$$\therefore K_\theta = 0.4K_T H \text{ [kN/rad]} \quad \text{または} \quad 0.4K_C H \text{ [kN/rad]}$$

回転角あたりの引張剛性 $K_{or}$ (圧縮剛性 $K_{oc}$ ) を回転角あたりの水平せん断剛性 $K_\theta$ で表すと

$$K_{or} = \frac{T}{\theta} = \frac{\sqrt{2}Q}{\theta} = \sqrt{2}K_\theta \text{ [kN/rad]}$$



付図 1 変位算定図