

伝統木造仕口の回転めり込み反力分布についての考察

Consideration on the Reaction Distribution of Rotational Embedment in Traditional Wooden Joints

棚橋秀光¹・鈴木祥之²

Hideaki Tanahashi and Yoshiyuki Suzuki

¹立命館大学客員研究員 衣笠総合研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町 58)

Visiting Researcher, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

²立命館大学教授 衣笠総合研究機構 (〒603-8341 京都市北区小松原北町 58)

Professor, Ritsumeikan University, Kinugasa Research Organization

Some formulations are proposed in order to formulate the rotational resistance of traditional wooden joints, which is significant for the evaluation of the restoring force characteristics of traditional timber buildings. The keypoint is the reaction distribution of the outside area of the loading block. Another keypoint is where to determine the loading point of reactions of the outside area. Some researchers set the loading point of reactions at the edge of loading block for the reaction of the outside area. The authors discuss the proposed models and the distributions of embedment reactions of rotational embedment and suggest some problems.

Keywords : *traditional wooden joint, rotational embedment, embedment reaction, reaction distribution*

1. はじめに

伝統木造建築物の耐震性能評価のためには、通し貫仕口や差し鴨居仕口の復元力特性の評価が重要な検討事項となる。その復元力特性の基本となる通し貫仕口には回転中心を軸とする三角形のめり込みが発生する。その三角形回転めり込みの場合、载荷ブロックの直下の反力分布は、三角形のめり込み反力分布となり、解析上問題となることはない。しかし、直接めり込みを受けない载荷ブロックの外側（縁端部、余長部ということがある）のめり込み分布や反力の重心の扱いが研究者の間で異なった考えが見られる。特に、縁端部の分布反力の合力を反力の重心ではなくて、载荷ブロックのエッジに負荷させている提案が見られる。それらの提案では、力学的に整合性がないだけでなく、めり込み抵抗モーメントの算定において、過小評価の可能性はあるが、その理論的根拠や合理的な説明は見当たらない。本考察では、提案されている主要な3つの力学モデルについて、めり込み分布や反力の負荷点の扱いについて考察を行い、著者の見解を述べる。

2. 回転めり込みの力学モデル

(1) 通し貫仕口の回転めり込みの概要と問題点

a) 回転めり込みの概要

通し貫仕口の回転めり込みの変形の概要を図1に示す。この図では見付幅 $2L$ の柱に奥行 B 、高さ H の貫が柱のほぞ穴を貫通して隙間なく嵌合しているとする。柱の回転力 M_C により柱が θ だけ回転すると、貫に比べ柱の圧縮剛性が十分大きいことから、貫に三角形のめり込み変形がおこる。その際、柱は P 点を中心に回転するため、柱と貫の接触長さ L_θ は幾何学的関係から $dL = 0.5H \tan(\theta/2)$ だけ増加し、回転めり込み抵

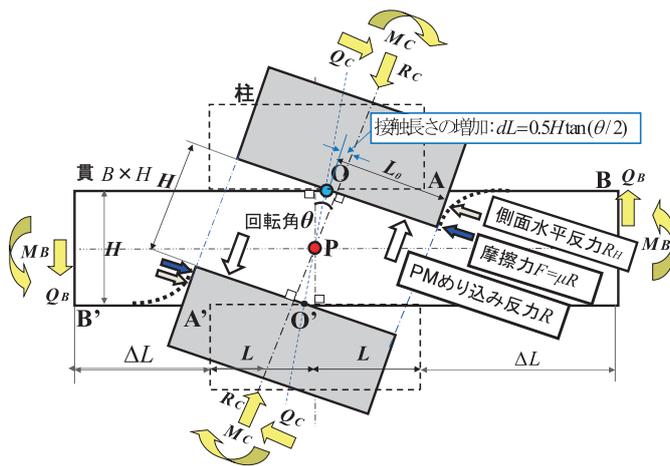


図1 通し貫仕口の回転めり込みの変形状況と外力、反力

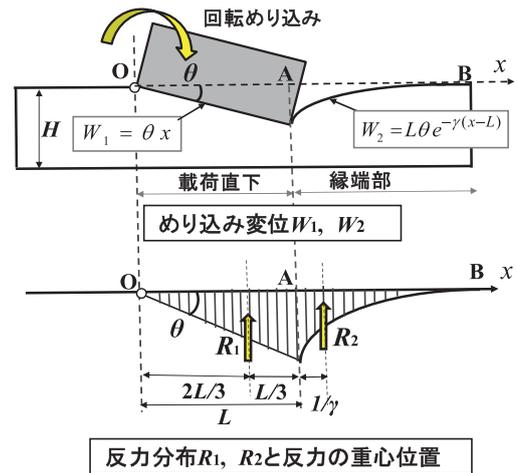


図2 回転めり込みとめり込み反力

抗を増大させるが、ここでは近似的に $dL=0$ とする。

接触部分の直下OAには三角形のめり込みが生ずるが、その外側の接触のない部分AB（縁端部と称する）も、木材の連続性から引きずり込まれるようなカーブを成してめり込みが生ずる。その部分もめり込み変位に応じた反力が発生する。OAB間の反力の合力を R とする。

接触面に垂直な反力 R に応じて、接触面に沿って摩擦力 $F = \mu R$ が抵抗する。さらに、柱の回転により、めり込みカーブに食い込む柱の動きに貫のめり込み側面で食い込みに抵抗する側面水平反力 R_H が発生する。このようにして、柱の回転に抵抗する要素には、 R 、 F 、 R_H の3種類があることに注意されたい。ここではその評価方法等の詳細は文献²⁾に譲ることとし、本考察では、問題を絞って接触面に垂直に作用するめり込み反力 R のみを対象とする。

b) 回転めり込みの力学モデル

反力 R の部分だけ取り出して、幅 B 、高さ H の長方形断面の無限長の通し貫に柱の载荷ブロックが回転しながらめり込む力学モデルを簡潔に示すと図2のようになる。ただし、ここでは図1に示す接触長さの増加分 dL は簡単にするために省き、 O を回転中心とみなして考察する。载荷直下OAでは回転中心 O から回転角 θ の直線的なめり込み変形がおこり、三角形形状の変位をもたらす。その反力の合力を R_1 とする。载荷直下を超えて縁端部ABに入ると、木材の連続性からカーブを描いてめり込み変形が起こる。この部分の反力の合力を R_2 とすると、 $R = R_1 + R_2$ である。

この縁端部めり込み表面変形をどのようにモデル化して、定式化するかが、仕口の復元力特性の評価に直結し、伝統木造の耐震性能評価を左右するめり込み問題の最大の課題である。この点ではいくつかの力学モデルの提案があり、主なものは指数関数で表現するものに稲山モデル¹⁾と棚橋のパステルナーク・モデル（PMと略す）²⁾、直線と仮定する坂田モデル³⁾がある。ここでは、3つの力学モデルの定式化について、比較検討を行い、問題点を考察する。

c) 回転めり込みの課題

この課題を考察するうえで、二つの問題があると考えられる。ひとつは縁端部のめり込み変位分布をどのように設定するかという問題である。これには、実際のめり込み表面変位に適合する関数をどう仮定するかという問題と変位の収斂程度の分布を決めるパラメータの決め方の問題が存在する。

もうひとつは、めり込み表面変位が決まれば、圧縮変位に比例した弾性ひずみとめり込み反力が発生し、反力の重心位置は力学的に決まる。しかし、稲山、坂田の提案では、縁端部のめり込み反力の合力 R_2 を载荷ブロックのエッジA点に集中反力として作用させる考え方をとっている。縁端部の反力はエッジより外側のみ作用し、その重心はエッジより一定離れた点にあることは明らかで、エッジに作用させる合理的根拠はないと考えられる。このことは回転めり込みモーメントの算定で過小評価につながる。反力分布とともに、この点に看過できない問題があると著者は考え、3つの回転めり込みモデルを対象に考察を行う。

(2) 稲山モデル

稲山は縁端部（余長部）のめり込み変位を指数関数に仮定し、エッジより離れるに従い表面変位が減少し、エッジから高さの1.5倍程度の距離までで変位がほぼゼロに収束するとみなして、指数関数によるめり込み変位の定式化を行った¹⁾。このモデルは日本建築学会木質構造設計基準・同解説⁵⁾に取り入れられ、日本建築学会木質構造基礎理論⁶⁾に詳細な解説がある。その際、指数関数による変位は距離とともに減少するが、理論上は無限の距離まで続くため、高さの1.5倍の距離でめり込み反力の合計の90%が生ずるとの仮定に基づいて指数関数のパラメータを $1.5/H$ に設定した⁴⁾。この仮定が実情に即しているかどうかが問題となる。

ここでは、簡潔にするために無限長の部材の2次元めり込みに限定し（部材の幅方向のめり込みは考慮しない）、等変位めり込み、回転めり込みに共通の前提で、稲山モデルの回転めり込みではめり込み変位分布を図1を参照して(1)、(2)式で表している¹⁾。ただし、貫の幅 B 、高さ H 、载荷ブロック長さ L 、 O 点を回転中心として回転角 θ の場合で、 O 点を原点として長さ方向に距離 x をとる。

$$\text{载荷直下変位} : W_1 = \theta x : 0 \leq x \leq L \quad (1)$$

$$\text{縁端部変位} : W_2 = L\theta e^{-\frac{1.5}{H}(x-L)} : L < x \quad (2)$$

無限長の貫の場合の稲山モデルの回転めり込み抵抗モーメント¹⁾は、

$$M = \frac{x_p^3 y_p C_y E_{\perp} \theta}{3Z_0} \left(1 + \frac{2Z_0}{x_p}\right) = \frac{BL^3 \theta}{3H} E \left(1 + \frac{2H}{L}\right) = \frac{BL^3 \theta}{3H} E \zeta_{RI} \quad (3)$$

$$\text{ここで、} E \zeta_{RI} = E \left(1 + \frac{2H}{L}\right) : \text{稲山モデルの等価横圧縮ヤング係数} \quad (4)$$

$$\zeta_{RI} = 1 + \frac{2H}{L} : \text{稲山モデルの回転めり込みの剛性増大率} \quad (5)$$

なお、 $x_p = L$ 、 $y_p = B$ 、 $C_y = 1$ 、 $Z_0 = H$ と置換しており、横圧縮ヤング係数 $E_{\perp} = E$ は縦圧縮ヤング係数 E_{\parallel} の $1/50$ に設定している。 ζ_R は回転めり込みの剛性増大率²⁾で、縁端部の剛性増大の効果を示す指標で、稲山モデル、PM、坂田モデルの剛性増大率を各々 ζ_{RI} 、 ζ_{RP} 、 ζ_{RS} とする。等価横圧縮ヤング係数は縁端部の剛性増大効果を含めた見かけの横圧縮ヤング係数である。

(4)式に無限長の場合の(2)式に見られる指数関数のパラメータが登場しないのは、稲山モデルでは無次元特性値（後述）を $\gamma H = 1.5$ と固定値⁵⁾に定めていることが背景にあり、表に顕れないことに注意されたい。

稲山モデルの問題点としては、この指数関数のパラメータの設定とともに、縁端部の反力の合力 R_2 を反力の重心ではなく図2のエッジA点に負荷させることで、(4)式が得られていることがある。これらの問題点は3章で検討する。

(3) PM（パステルナーク・モデル）

棚橋ほかは連続体の部分圧縮に適したパステルナーク・モデルを直交異方性木材のめり込みに適用し、等変位めり込み、および回転めり込み共に、縁端部のめり込み変形曲線が指数関数となることを理論的に明らかにした²⁾⁶⁾。ただし、有限層厚連続体の部分圧縮の厳密解はまだ求められていないので、PMは近似解であることをお断りしておく。そのうえで、回転めり込みの反力および抵抗モーメントをめり込み反力の積分により(6)～(16)式のように求め、(17)式でその重心位置を求めると、エッジより $1/\gamma$ の外側の位置にあることが分かる。ここで、 γ はPMの特性値と称し、指数関数の変位低減の程度を決めるパラメータで長さ分の1の次元をもち、 γH を無次元特性値と呼び、 $1/\gamma$ は距離となる。

$$\text{载荷直下変位} : W_1 = \theta x : 0 \leq x \leq L \quad (6)$$

$$\text{縁端部変位} : W_2 = L\theta e^{-\gamma(x-L)} : L < x \quad (7)$$

(2)式は(7)式の γ を $1.5/H$ 、したがって $\gamma H = 1.5$ と置いたことになり、(7)式の特殊な場合であることが明らかとなる。

横圧縮ヤング係数 E 、幅 B 、高さ H の部材において、 EB/H はめり込みばね定数に相当するから、これに変位 W がかかって、反力 R_1 、 R_2 が得られる。

$$R_1 = \int_0^L \frac{EB}{H} W_1 dx = \int_0^L \frac{EB}{H} \theta x dx = \frac{EBL^2 \theta}{2H} \quad (8)$$

$$R_2 = \int_L^\infty \frac{EB}{H} W_2 dx = \int_L^\infty \frac{EB}{H} L \theta e^{-\gamma(x-L)} dx = \frac{EBL\theta}{H\gamma} \quad (9)$$

$$R = R_1 + R_2 = \frac{EBL^2 \theta}{2H} \left(1 + \frac{2}{\gamma L}\right) = \frac{EBL^2 \theta}{2H} \zeta_N \quad (10)$$

$$\text{ここで、} \zeta_N = 1 + \frac{2}{\gamma L} : \text{反力の剛性増大率} \quad (11)$$

回転めり込み抵抗モーメント M_1 、 M_2 :

$$M_1 = \int_0^L \frac{EB}{H} W_1 x dx = \int_0^L \frac{EB}{H} \theta x^2 dx = \frac{EBL^3 \theta}{3H} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} M_2 &= \int_L^\infty \frac{EB}{H} W_2 x dx = \int_L^\infty \frac{EB}{H} L \theta x e^{-\gamma(x-L)} dx \\ &= \frac{EBL^2 \theta}{H\gamma} \left(1 + \frac{1}{\gamma L}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$M = M_1 + M_2 = \frac{BL^3 \theta}{3H} E \left[1 + \frac{3}{\gamma L} \left(1 + \frac{1}{\gamma L}\right)\right] = \frac{BL^3 \theta}{3H} E \zeta_{RP} \quad (14)$$

$$E \zeta_{RP} = E \left[1 + \frac{3}{\gamma L} \left(1 + \frac{1}{\gamma L}\right)\right] : \text{PMの等価横圧縮ヤング係数} \quad (15)$$

$$\zeta_{RP} = 1 + \frac{3}{\gamma L} \left(1 + \frac{1}{\gamma L}\right) : \text{PMの回転めり込みの剛性増大率} \quad (16)$$

そして、 R_2 の重心の回転中心からの距離 r は、

$$r = \frac{M_2}{R_2} = L + \frac{1}{\gamma} \quad (17)$$

すなわち、縁端部の反力の重心はエッジより $1/\gamma$ の位置にあることが分かる。ここで、(4)、(15)式の等価横圧縮ヤング係数は、載荷直下のみ三角形回転めり込みの抵抗モーメント M_1 に対して、縁端部の抵抗を含む全モーメント M を、横圧縮ヤング係数で割り増すとした場合の見かけの横圧縮ヤング係数との解釈もできる。

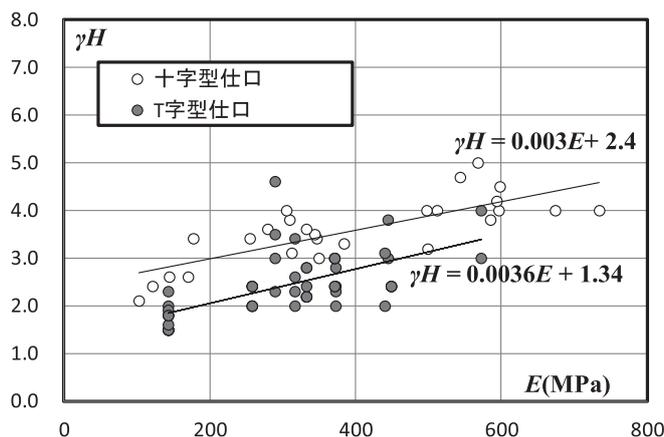


図3 無次元特性値 γH と横圧縮ヤング係数 E の相関関係⁷⁾

なお、弾性剛性・回転めり込み抵抗モーメントの評価にあたっては、図3の実験結果に基づく相関式⁷⁾が得られており、横圧縮ヤング係数 E を決めて、無次元特性値 γH を求め（十字型通し貫と差し鴨居を含む T 字型仕口を区別していることに注意）、(14)式により回転めり込み抵抗モーメントを算定できる。

(4) 坂田モデル

坂田モデル³⁾では、図4のように、貫の高さに関係なく縁端部の反力分布を載荷幅 L の半分の三角形分布としているが、その反力の作用点は三角形分布の重心ではなくエッジ A 点に設定しており、全抵抗モーメントは (18) 式になり、等価横圧縮ヤング係数は $1.75E$ となる。この係数 1.75 は坂田モデルの剛性増大率に相当する。ただし、(18) 式では比較しやすいようにパラメータを統一している。

$$M = \frac{7x_0^3 y_0 \theta E_1}{12z_0} = \frac{7BL^3 \theta E}{12H} = \frac{BL^3 \theta}{3H} E \zeta_{RS} \quad (18)$$

$$E \zeta_{RS} = 1.75E: \text{坂田モデルの等価横圧縮ヤング係数} \quad (19)$$

ここで、 $E_1 = E$ は横圧縮ヤング係数

$$\zeta_{RS} = 1.75: \text{坂田モデルの剛性増大率} \quad (20)$$

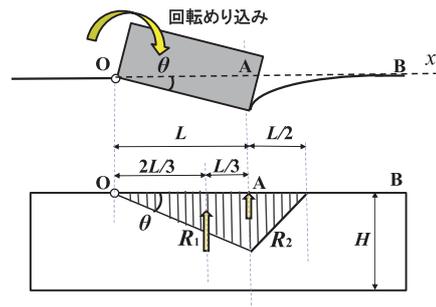


図4 回転めり込みの変形状況と坂田モデル

3. 各モデルの問題点

稲山モデルで縁端部のめり込み表面変位を指数関数に仮定したことは、近似モデルとして PM により理論的に裏付けられたが、指数関数の変位低減を決めるパラメータである特性値 γ は $1.5/H$ 、したがって無次元特性値は $\gamma H = 1.5$ の定数に固定している。著者の貫、差し鴨居の仕口実験結果の相関関係図3より、横圧縮ヤング係数と無次元特性値 γH との線形関係が認められることから、定数に設定することは実情とはかなりずれがある。しかも、図3から分かるように、稲山モデルで $\gamma H = 1.5$ に固定していることは、無次元特性値を最小値に設定していることとなる。このことは (15) 式から分かるように、剛性増大率を最大に評価することを意味し、剛性の過大評価の可能性がある。

また、縁端部の反力の合力をエッジに設定して定式化を行っている点も、先に指摘したとおりである。

横圧縮ヤング係数の扱いに関しては、日本建築学会木質構造設計規準・同解説⁵⁾では年輪傾角に関係なく縦圧縮ヤング係数の $1/25$ に規定しており、縦圧縮ヤング係数の $1/50$ に設定していることは、年輪傾角に無関係に最も小さめに評価することとなり、剛性評価としては、(過大の剛性増大率) × (過小の横圧縮ヤング係数) の結果として算定が適切かどうかの問題点を秘めている。この点では、北守¹⁰⁾が稲山モデルの横圧縮ヤング係数と特性値の設定を実験的、解析的に検証して問題提起しているが、縁端部の反力の載荷点をエッジとしている点は触れられていない。

横圧縮ヤング係数の評価に関して言えば、針葉樹の横圧縮ヤング係数は、図5の主な樹種の年輪傾角と横圧縮ヤング係数の関係¹¹⁾に示すように年輪傾角に大きく左右される。図5の年輪傾角 α が 45° に相当する追根 (LTR) の部材の横圧縮ヤング係数は半径方向圧縮 (RT) や接線方向の圧縮 (LT) の部材に比べ、数分の1になることがあり、横圧縮ヤング係数を一律に評価することは実情と大きく異なるという事実があり、めり込み問題を考える場合には、縦圧縮ヤング係数の $1/25$ あるいは $1/50$ と決めるなど年輪傾角に無関係に規定することも問題がある。さらに、広葉樹では追根は年輪傾角による変化は比較的緩やかで、横圧縮ヤング係数は縦圧縮ヤング係数の $1/50$ ではなく、 $1/15 \sim 1/20$ 程度が妥当な値との報告⁸⁾もある。

坂田モデルでは、めり込み表面変位を直線で評価することは実際の変形状と比べて、不自然さを免れない。しかもその反力の作用位置を稲山モデルと同様に、エッジに設定していることは、実情とはかなりの乖離があると推察される。また、横圧縮ヤング係数 E_1 は横圧縮試験結果と解釈され、妥当と考えられる。

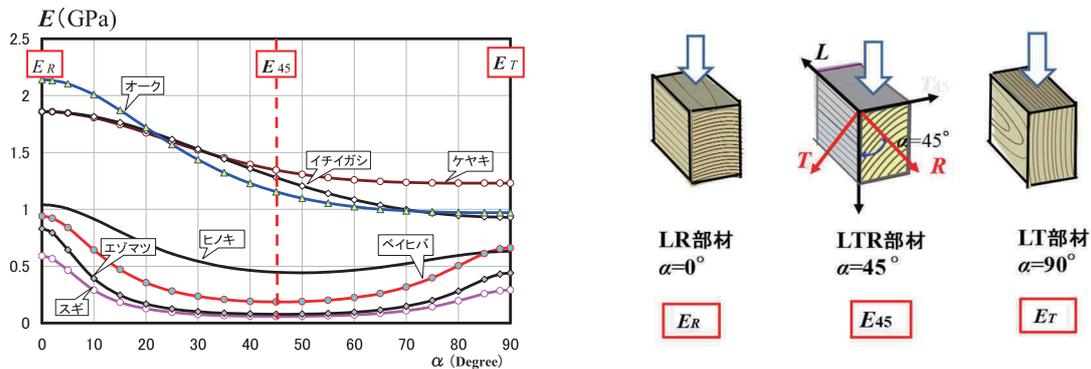


図5 主な樹種の年輪傾角 α による横圧縮ヤング係数 E の変化¹¹⁾

一方 PM では、指数関数を用いた近似解による縁端部の理論的な定式化を行っていることである。さらに図3の通り貫および差し鴨居仕口の実験相関式によって、横圧縮ヤング係数から無次元特性値 γH を決定することができ、回転めり込み抵抗モーメントが算定できることで最も整合の取れた定式化となっている。ただし、横圧縮ヤング係数を材料試験などで求めることが前提となっており、材料試験で年輪傾角を考慮して求めれば、精度よい算定が期待できる。図5に示すように、スギ、ヒノキなどの針葉樹では、年輪傾角により横圧縮ヤング係数が半径方向圧縮 (RT) > 接線方向圧縮 (LT) > 追桁 (LTR) の傾向¹¹⁾があり、特にスギの追桁の横圧縮ヤング係数は 100MPa 程度のものも少なくなく、縦圧縮ヤング係数から推定することは大きな誤差を伴うことから、材料試験から横圧縮ヤング係数を求めるか、またはデータベースなどから推定するなどの対応が望ましい。

4. 回転めり込み剛性の比較

ここでは、各モデルの回転めり込み算定のための等価横圧縮ヤング係数をまとめて表1に示す。各案が実際にどのような値になるかを比較するために、既往の十字型通し貫仕口実験²⁾、およびT字型仕口実験⁹⁾の結果より、縁端部 $L \geq 150 \text{ mm}$ の十分長い試験体を選んで (付録参照) 等価横圧縮ヤング係数を求めたものである。試験体寸法はシリーズ4以外は $L=60 \text{ mm}$ 、 $H=100 \text{ mm}$ であり、シリーズ4は $L=50 \text{ mm}$ 、 $H=100 \text{ mm}$ である。

また、横圧縮ヤング係数は材料試験の結果を用いることとし、縦圧縮ヤング係数が得られていないシリーズ2~4では、基準弾性特性値⁵⁾のヒノキ 9.0GPa を用いた。なお、この実験データは、十字型通し貫、およびT字型通し貫の実験によるもので、側面水平反力を摩擦力に含めて摩擦係数 0.6 とした回転めり込みのみによる算定を前提としていることをお断りしておく。

さらに、表1の結果を横軸に横圧縮ヤング係数、縦軸に等価横圧縮ヤング係数をとった分布を図6に示す。稲山モデルでは縦圧縮ヤング係数が 7~12 GPa の範囲の 1/50 として横圧縮ヤング係数を用いて図示した。図6には線形相関式を記入し、横圧縮ヤング係数と等価横圧縮ヤング係数の関係はいずれも右上がりのほぼ直線的な関係にあり、(20)~(22)式で表される。相関係数は $R=0.941 \sim 1.0$ で、線形の相関はかなり良好である。

$$\text{稲山モデル} : E\zeta_{RI} = \begin{cases} 5.0E \text{ (MPa)} : L/H = 0.5 \\ 4.33E \text{ (MPa)} : L/H = 0.6 \end{cases} \quad R = 1.0 \quad (20)$$

$$\text{PM} : E\zeta_{RP} = 2.26E + 296 \text{ (MPa)}, \quad R = 0.941 \quad (21)$$

$$\text{坂田モデル} : E\zeta_{RS} = 1.75E \text{ (MPa)}, \quad R = 1.0 \quad (22)$$

稲山モデルでは、横圧縮ヤング係数を縦圧縮ヤング係数の 1/50 と仮定していることから、ヒノキの場合、縦圧縮ヤング係数の 1/50 は 140~240MPa 程度となるため、プロットの点は局部に集まり、等価横圧縮ヤング係数は PM より全体に大きい。

坂田モデルでは、(19)式で示す直線上にプロットされるのは当然のことであるが、PM に比べて、傾向は似ているが、30%~60%程度の小さい値に分布しており、全体にかなり小さめの評価となっている。

PM の等価横圧縮ヤング係数は、横圧縮ヤング係数を適切に設定すれば、(21)式でかなりの精度で簡単に求めることができる。ただし、仕口の寸法関係 (L 、 H など) に依存することに注意されたい。

表1 回転めり込みの等価横圧縮ヤング係数 $E\zeta_R$ (MPa)の比較

シリーズ	試験体名	$E_0/50$ (GPa)	E (MPa)	γH	$E\zeta_{RI} = E(1 + \frac{2H}{L})$	$E\zeta_{RP} = E[1 + \frac{3}{\gamma L}(1 + \frac{1}{\gamma L})]$	$E\zeta_{RS} = 1.75E$	備考
シリーズ1 ベイヒバ (十字型)	LR-1	242	512	4.0	1049	1419	896	文献2)
	LR-2		598	4.5		1509	1047	
	LR-3		498	4.0		1380	872	
	LR-4		384	3.3		1260	672	
	LT-1		347	3.4		1107	607	
	LT-2		344	3.5		1069	602	
	LT-3		333	3.6		1010	583	
	LT-4		309	3.8		894	541	
シリーズ2 ヒノキ (十字型)	LR-1	180	585	3.8	780	1692	1024	文献2)
	LR-3		543	4.7		1326	950	
	LR-8		568	5.0		1325	994	
	LT-1		313	3.1		1089	548	
	LT-2		350	3.0		1257	613	
	LT-4		280	3.6		849	490	
	LTR-1		171	2.6		711	299	
	LTR-2		145	2.6		603	254	
	LTR-5		122	2.4		553	214	
	PT-1		674	4.0		1868	1180	
	PT-2		596	4.0		1651	1043	
	PT-3		594	4.2		1582	1040	
	シリーズ3 ヒノキ (十字型)		LR1	180		499	3.2	
LR2		734	4.0		2034	1285		
LT1		305	4.0		845	534		
LT2		255	3.4		814	446		
LTR1		178	3.4		568	312		
LTR2		103	2.1		543	180		
シリーズ4 ヒノキ (T字型)	G-1	180	372	3.0	900	1612	651	文献9)
	G-2		372	3.0		1612		
	G-3		372	3.0		1612		

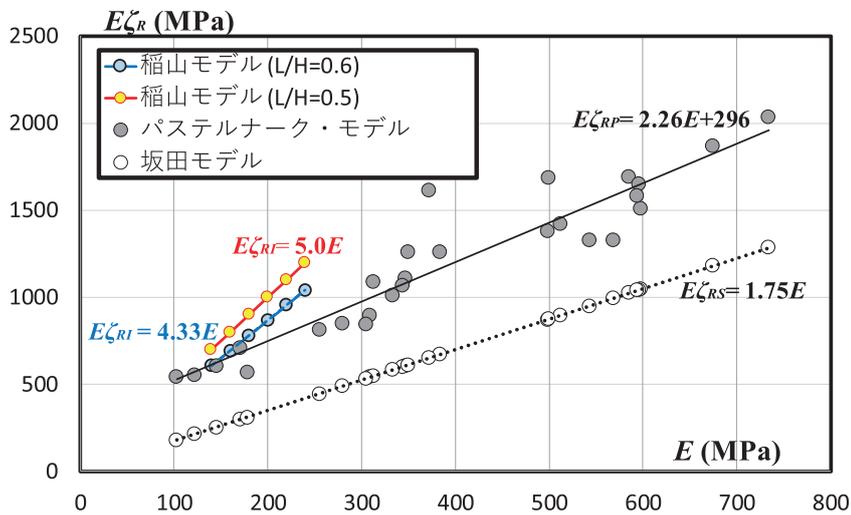


図6 横圧縮ヤング係数 E と等価横圧縮ヤング係数 $E\zeta_R$ の相関関係

5. まとめ

通し貫仕口などの回転めり込みにおける縁端部の反力分布とその合力の位置の設定について、既往の回転めり込みの3つのモデルについて分析し、その問題点と剛性増大率について考察した。

稲山モデルでは、めり込み変位分布を指数関数に設定したことは評価できるが、縁端部の反力の合力の作用位置を、エッジに設定していることを紹介し、力学的合理性を欠くという問題点を指摘した。また、無次

元特性値を 1.5 の固定値に設定したことで剛性増大率が最大となること、横圧縮ヤング係数を縦圧縮ヤング係数の 1/50 に仮定していることで、下限値に近い数値に仮定していることが複合して、PM の相関式に比べ、大きめになっていることを示した。

坂田モデルでは、縁端部のめり込み変形分布を三角形と仮定したことの不自然さを指摘するとともに、縁端部反力の合力の作用位置を、稲山モデルと同様、エッジに設定していることの問題点を指摘した。

各モデルで算定される剛性の比較により、PM に比べ、稲山モデルでは大きめの評価となること、坂田モデルでは、横圧縮ヤング係数に比例するがかなり小さめに評価されることを指摘した。

PM では、縁端部のめり込み変形の分布が理論的に指数関数になることを解明し、変位の低減をきめる無次元特性値は仕口接合部の実験結果から横圧縮ヤング係数と線形の相関関係にあることを示した。その結果、横圧縮ヤング係数を決めれば、無次元特性値をを求めることができ、剛性評価が容易に行える定式化であることを示し、現段階では最も合理的な力学モデルであることを示した。

なお、本考察では無限長部材の弾性段階の回転めり込みの剛性評価に限定し、有限長部材や弾塑性段階の問題には触れなかったが、復元力特性全体の評価には弾塑性段階も重要な課題であり、それは別の機会にゆずりたい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：木質構造基礎理論，2010.10.
- 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) 坂田弘安・山崎義弘・宇田川洋隆・大橋好光：曲げせん断を受ける長ほぞ差し込み栓打ち接合部の力学的挙動に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.77, No.671, 45-54. 2012.1.
- 4) 稲山正弘：木材のめり込みに関する研究 その4：等変位めり込みの弾性剛性の計算式の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1, pp. 907-908, 1993.
- 5) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，2006.12.
- 6) 棚橋秀光・清水秀丸・鈴木祥之：パステルナーク・モデルに基づく直交異方性木材の部分圧縮による弾性表面変位，日本建築学会構造系論文集，No. 609, pp.129-136, 2006.11.
- 7) 棚橋秀光・鈴木祥之：載荷ブロックを用いた伝統木造 T 字型仕口の回転めり込み特性と定式化，日本建築学会構造系論文集，Vol.84, No. 756, pp. 227-236, 2019.2.
- 8) 藤田克則・稲山正弘・安藤直人：接合部に用いられる広葉樹材の横圧縮性能，木材学会誌，Vol.58, No.4, pp.181-192, 2012.
- 9) 棚橋秀光・大岡優・鈴木祥之：伝統木造 T 字型仕口の回転めり込み特性と定式化，日本建築学会構造系論文集，Vol.82, No. 739, pp. 1403-1411, 2017.9.
- 10) 北守顕久・森拓郎・片岡靖夫・小松幸平：木材の部分横圧縮における余長効果の影響 支持条件における違いの影響，日本建築学会構造系論文集，Vol.74, No. 642, pp.1477-1485, 2009.8.
- 11) 棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造仕口の主要なタイプとめり込みメカニズム，歴史都市防災論文集，Vol. 5, pp.171-178, 2011.7.

付録：縁端部の長さ ΔL が有限長の貫の回転めり込みの剛性増大率は、文献 7) で $dL=0$ として、

$$\zeta_r = 1 + 1.5\rho + \frac{3}{\gamma L} \left[\left(1 + \rho + \frac{1}{\gamma L}\right) (1 - e^{-\gamma \Delta L}) - e^{-\gamma \Delta L} \frac{\Delta L}{L} \right] \quad (1a)$$

$L = 50\text{mm}$ 、 $H = 100\text{mm}$ 、 $\gamma H = 3$ 、 $\rho = (L - L_\theta) \cong 0$ 、 $\Delta L = 150\text{mm}$ の場合と $\Delta L = \infty$ の場合を比較すると、 $\gamma L = \gamma H \times L / H = 3 \times 50 / 100 = 1.5$ 、 $e^{-\gamma \Delta L} = e^{-3 \times 150 / 100} = 0.011$

$$\Delta L = 50\text{mm} : \zeta_r = 1 + \frac{3}{\gamma L} \left[\left(1 + \frac{1}{\gamma L}\right) (1 - e^{-\gamma \Delta L}) - e^{-\gamma \Delta L} \frac{\Delta L}{L} \right] = 1 + \frac{3}{1.5} \left[\left(1 + \frac{1}{1.5}\right) (1 - 0.011) - 0.011 \frac{150}{50} \right] \\ = 4.26$$

$$\Delta L = \infty : \zeta_r = 4.33$$

したがって、 $\Delta L \geq 150\text{mm}$ でほぼ無限長と見なせる。すなわち $\Delta L / H \geq 1.5$ でほぼ無限長の貫と見なせる。言い換えれば、めり込み変形は高さの1.5倍でほぼ収束することが確認できる。