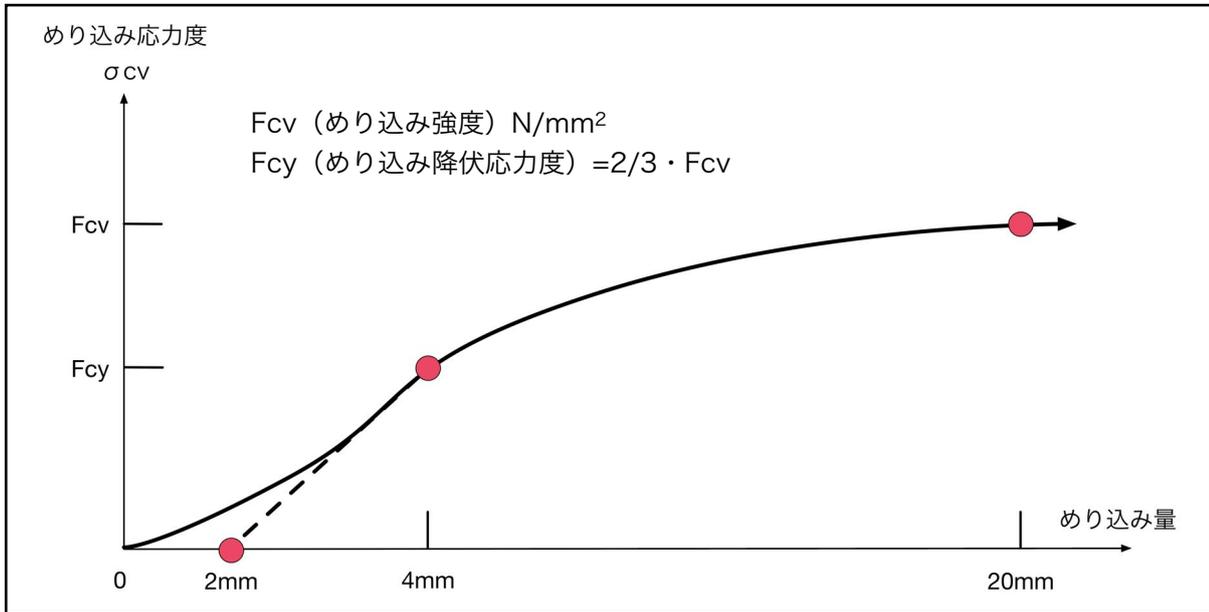


# 木材のめり込み特性にもとづく貫・差鴨居の復元力特性

## (1) 木材のめり込み特性について

貫材の復元力特性などを求めるため、木材のめり込み特性を下記のように定義する



木材のめり込み特性 (定義)

注1) 材料の標準をスギ・ヒノキ材とし、基準めり込み強度として建築基準法告示 (無等級材・スギ) の値を採用。

$$F_{cv} = 6.0 N/mm^2$$

$$F_{cy} = 4.0 N/mm^2$$

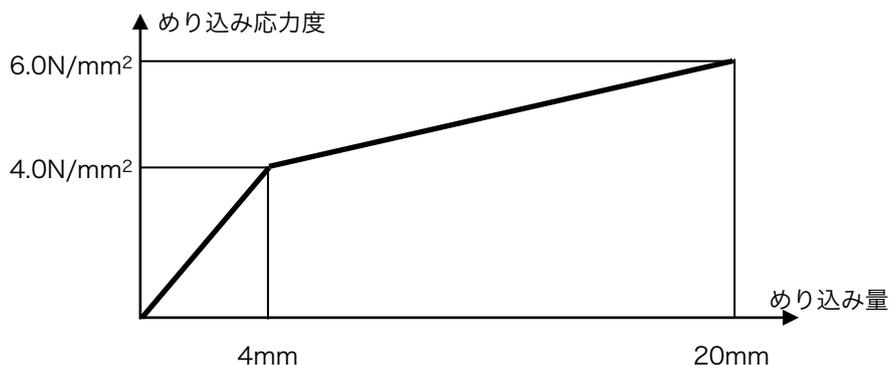
注2) 曲線立ち上がり部のオフセット2mmは、日本住木センター「構造用木材の強度試験法」2012年による。

ただし、 $F_{cy} = 4.0 N/mm^2$ については試験結果によって異論あり、暫定値とする。

住宅の土壁内貫やほぞのような小断面部材ではオフセット (初期のガタ) を見込まない。

注3) 試験における載荷版は90mm四方の大きさであり、めり込み強度は載荷版の大きさ (幅) に関する (たとえば野口弘之 (1999) など) という研究がある。

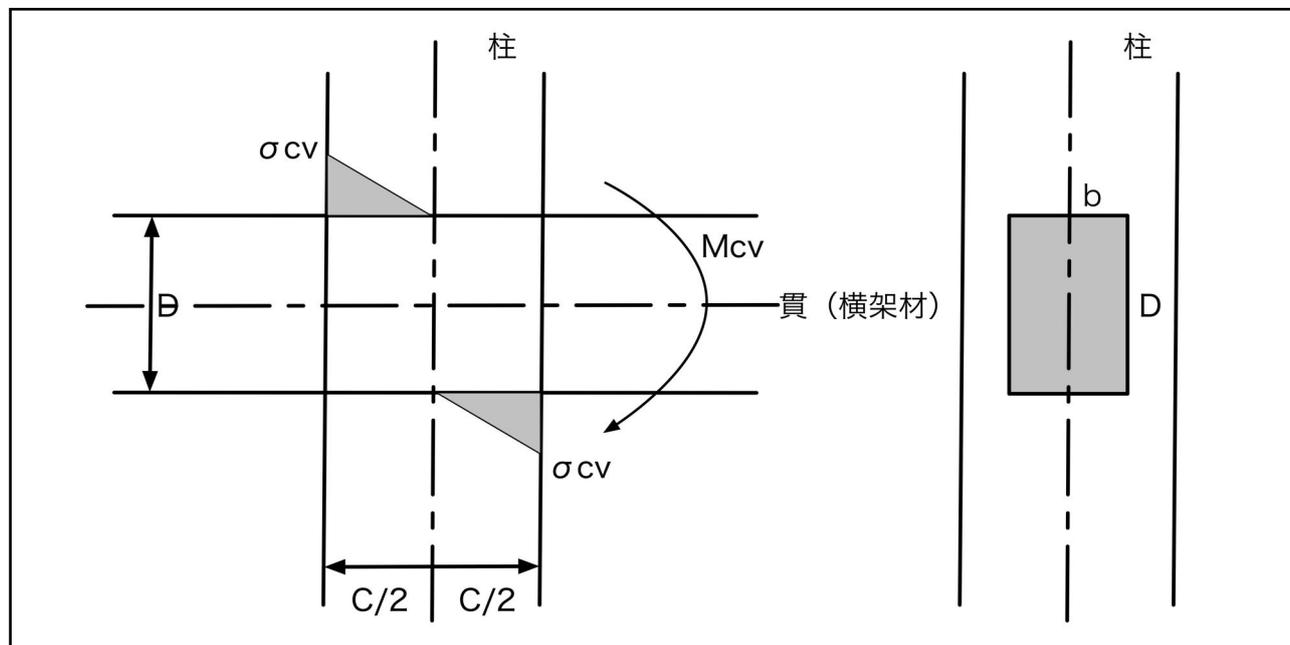
注4) 告示では材種別にめり込み強度を定めているが、現実には材料が同じでも強度のバラツキが大きく、また経年変化の度合いや含水率によっても異なる。したがって、耐震診断や改修設計に当たっては (設計段階で当該部材の抜き取り試験をしない限り)、安全を見てスギ材のめり込み強度 (めり込み量20mmに対して $6.0 N/mm^2$ ) を採用して、下記のめり込み特性に基づき貫材などの復元力特性を設定する。



## (2) 木材のめり込み特性にもとづく大断面貫材の復元力特性設計式

### 1) めり込み応力度が三角形分布の場合（めり込み降伏までの弾性範囲）

下図に示すように、弾性理論に基づき、平面保持の仮定の下に貫材のめり込み応力度が柱材内で幅  $b$  等分布かつ柱奥行きに対して三角形で分布していると仮定する。



貫材端部の応力度分布（弾性範囲）

節点モーメント  $M$  に対して貫材の応力度（柱最外縁部）は、 $\sigma = M/Z$  となり、この  $\sigma$  は貫のめり込み応力度になる。貫材の柱節点の回転角は、 $\theta = \delta_{cv} / (C/2)$  で表せる。ここで  $\delta_{cv}$  はめり込み量である。めり込み応力によって柱材と貫材の節点に生じる曲げモーメント（ $M_{cv}$ ）は以下の式で表せる。

$$M_{cv} = \sigma_{cv} \times \frac{C}{2} \times \frac{1}{2} \times b \times \frac{(2/3 \times C/2)}{C/2} \times 2 \quad (1式)$$

（注）第1項はめり込み応力度、第2項は応力度分布、第3項は応力中心距離、第4項は貫上下2面を示す

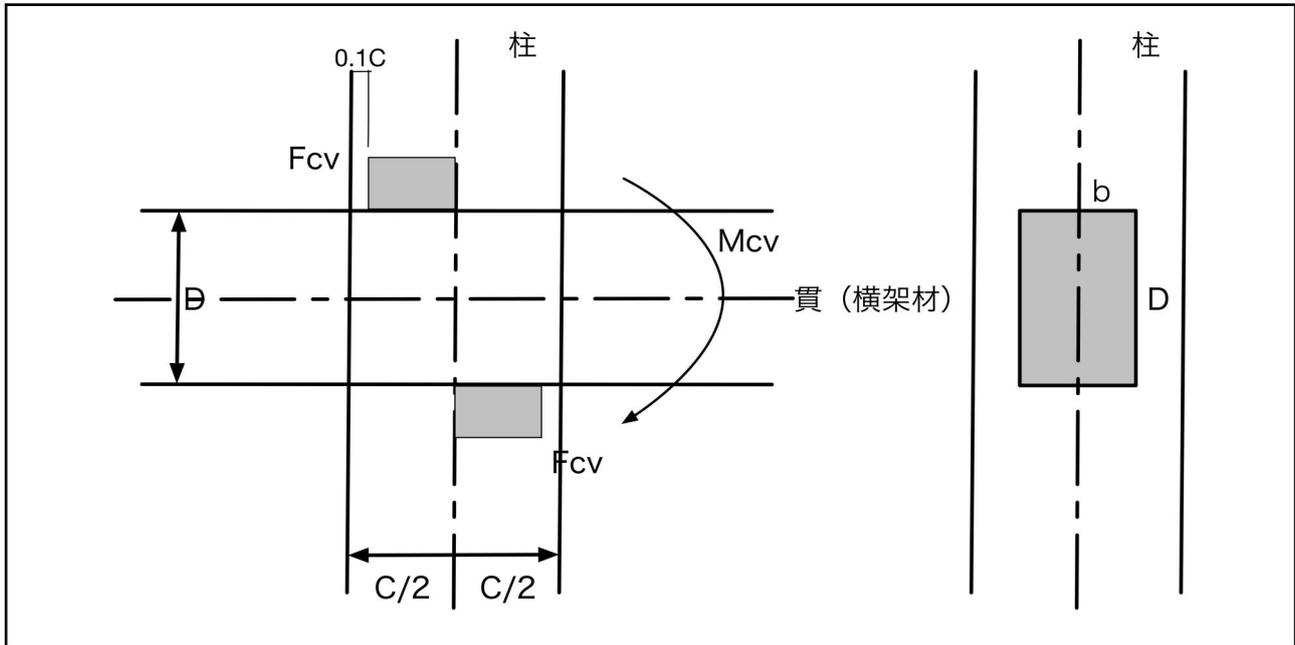
またこのときの節点回転角は、

$$\theta = \delta_{cv} / (C/2)$$

以上の数式に木材のめり込み特性（めり込み応力度・めり込み量）を代入すれば、貫材のめり込みによるモーメント・回転角関係（復元力特性）が計算できる。ただし、 $\sigma_{cv}$  が降伏応力度（ $F_{cy}$ ）までの範囲とする。水平力を受ける伝統的な木造軸組架構の水平変形はほとんど節点の復元力特性に支配されるが、節点の曲げモーメントに対する部材の折損検討は不可欠である。

## 2) むり込み降伏後終局状態

節点回転が進み、むり込み降伏を超えると平面保持の仮定が崩れだし、応力度は矩形分布に近づくと考え。柱最外縁もむり込みを受け止める柱部分が損傷するので、0.1Cほどの部分を除いて貫のむり込み応力度が終局に漸近すると考える（坂静雄博士の「社寺骨組の力学的研究」（昭和16年）のうち第2論文（貫の耐力）にならっている）。



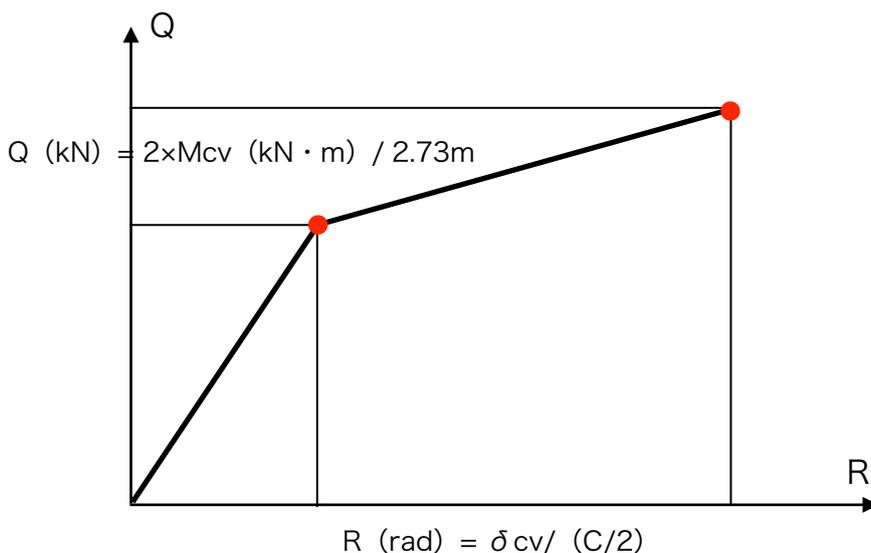
貫材端部の応力度分布（終局状態）

この場合の節点モーメントは弾性範囲と同様に下記で計算できる。また、節点回転角は同式である。

$$M_{cv} = \sigma_{cv} \times 0.4C \times b \times 0.2C \times 2 = 0.16 \times \sigma_{cv} \times b \times C^2 \quad (2式)$$

## 3) 単位フレームの復元力特性（通し貫1段）

以上の式で求まる  $M_{cv}$  と  $\theta$  の関係を単位フレームの復元力特性に置き換えると下図のようになる。

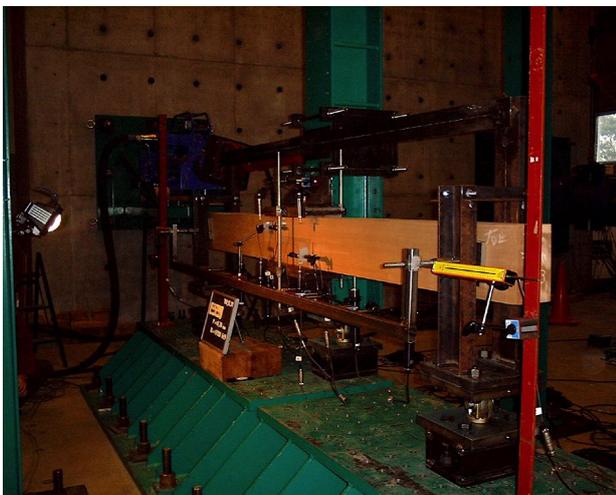
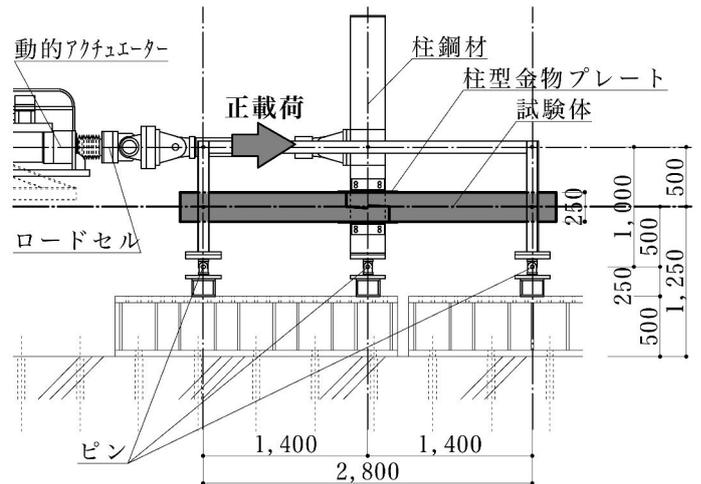


注) 柱・梁架構は節点ピンで部材の曲げ剪断変形はないものとしている。また貫材の曲げ剪断変形も考慮せず、貫材と柱の節点でのみむり込みによる回転が起こるものと仮定している。ただし当然、柱が折損しないことを検証しなければならない。

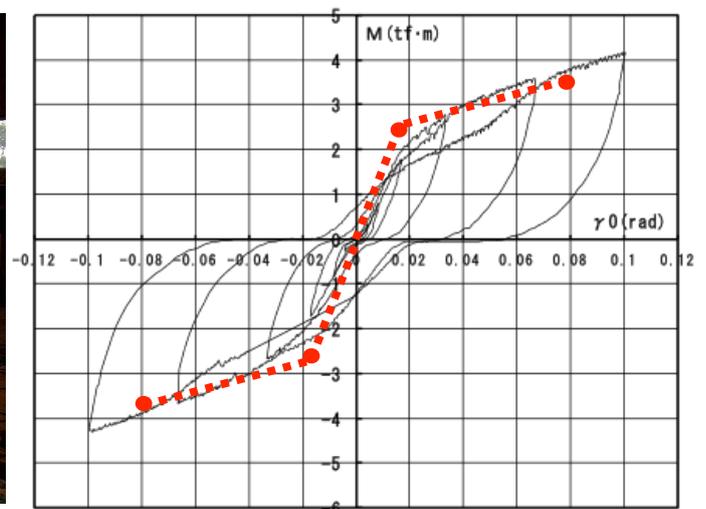
#### 4) 貫材の曲げ実験と設計式の検証

実験は、柱の変形を除外するために、鋼材で代用した治具（柱鋼材）に水平力を与え、貫の変形状態が目視で観察できるようにした。このため、柱鋼材に取り付けた柱幅（50cm）に相当する柱型金物プレートを継手部の上下に挟んだ。加力は、柱の変形角で制御し、 $\pm 1/240$ ,  $\pm 1/120$ ,  $\pm 1/60$ ,  $\pm 1/30$ ,  $\pm 1/15$ ,  $\pm 1/10$ radで各1回正負に繰り返して静的に載荷した。貫材試験体の断面は15×25cmとし、材種はシオジである。略鎌継手には、マツ、カツラ、サクラ、ケヤキで加工した試験体も製作した。

（「伝統的木造建築物における継手部の構造実験 その1」2001年度日本建築学会大会梗概集より）



貫材のめり込み回転実験（鴻池組2000-2001年）



通し貫材の実験結果（曲げモーメント・回転角関係）

（数値検証）

柱断面  $C \times C = 500\text{mm} \times 500\text{mm}$  貫材断面  $b \times D = 150\text{mm} \times 250\text{mm}$

めり込み降伏応力度  $F_{cy} = 4.0\text{N/mm}^2$  めり込み強度  $F_{cv} = 6.0\text{N/mm}^2$

降伏時（1式より）

$$\theta_y = 4\text{mm} / (500/2)\text{mm} = 1/62.5\text{ (rad)}$$

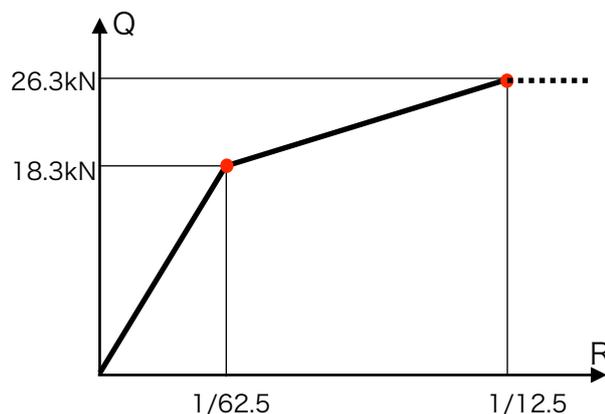
$$M_{cy} = 4.0 \times 500/2 \times 1/2 \times 150 \times (2/3 \times 500/2) \times 2 = 25 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm} = 25 \text{ kN}\cdot\text{m} \text{ (約2.5tm)}$$

終局時（2式より）

$$\theta_{cv} = 20\text{mm} / (500/2)\text{mm} = 1/12.5\text{ (rad)}$$

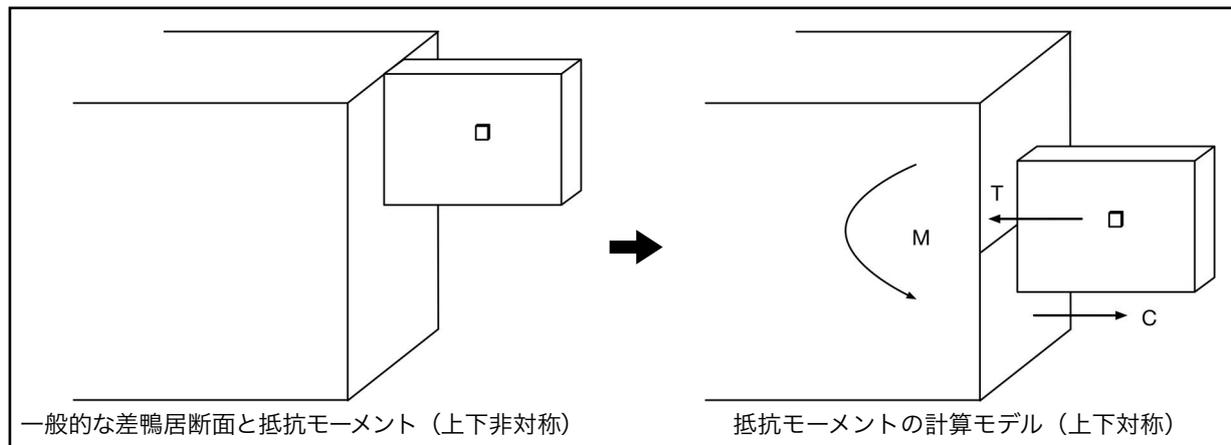
$$M_{cv} = 6.0 \times 0.4 \times 500 \times 150 \times 0.2 \times 500 \times 2 = 36 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm} = 36 \text{ kN}\cdot\text{m} \text{ (約3.6tm)}$$

（貫材の節点モーメント・回転角関係を上記の実験結果に破線で解析値を示す。）  
また単位フレーム（1.82m幅×2.73m高）の貫材端部のめり込みだけによる復元力特性は右図のようになる。  
ただし柱部材や貫部材が折損しないという仮定である。



### (3) 木材のめり込み特性にもとづく大断面差鴨居の復元力特性設計式

#### 1) 差鴨居の抵抗機構モデル



差鴨居の抵抗機構モデル

注1) 一般的な差鴨居差し口の形状は上図（左）のようになっており、従来は差し口部分を貫と同様に見なし前項と同様に復元力特性を求めていた。差し口が2段、3段にわたる場合は込栓のだぼ抵抗で復元力特性を求めるケースもあった。しかし成が300mmを超える大断面の差鴨居が古来の民家などで見られ、耐震診断にあたって解体して差し口を確認せずに復元力特性を求めることが困難なケースがあるので、簡単な抵抗機構から復元力特性を求めることが必要となった。

注2) 本稿で仮定する抵抗機構によれば、引張力は込栓の曲げせん断抵抗で、圧縮力は差鴨居表面の柱へのめり込み反力からなり、この引張力と圧縮力のトルクが差鴨居端部の抵抗モーメントなる。しかし、引張力と圧縮力はそれぞれ変形特性が異なり、抵抗モーメントは上下非対称となる。左右から水平力を受ける場合は非対称のモーメント・変形角関係が実験でも得られるため設計には不便である。（実際の差鴨居架構では左端と右端でそれぞれ+側と-側のモーメントなので、架構としては非対称モーメントの平均値が架構の抵抗剪断力として求められる。したがって、計算モデルとしては（応力中心距離が若干小さくなるが）上図（右）のように込栓位置が差鴨居の中心高さにあるものとし、差鴨居半分がめり込み圧縮反力を受けるとして計算する。

注3) 込栓の曲せん断抵抗で決まる差鴨居の復元力特性に関する実験的研究は、2006年に大橋ほか（武蔵工大）で行われ、2012年・2015年に林ほか（京大）で報告されている。しかし、材料や施工仕様によるバラツキ（特に既存調査では解体しないと不明な条件）ゆえに実用的には困難な場合が多々ある。

注4) 本稿では差鴨居表面の柱へのめり込みによって発生する抵抗モーメントから復元力特性を求める。

注5) このとき、込栓は剛体とし破損も変形もしない不動の回転軸として扱う。

注6) 木材のめり込み特性は、貫の復元力特性を求める際に使用した応力度-めり込み量関係を用い、計算を簡略にするため、めり込み応力度はめり込み圧縮部全域につき矩形分布とする。

（仕口・差鴨居に関する参考論文）

- 1) 内田祥三「木造仕口の実験的研究」建築学会論文集、昭和11年7月
- 2) 早崎・大野・大橋「差鴨居構法の強度性能に関する研究-その3 垂れ壁付き独立柱の面内せん断実験」日本建築学会大会梗概集、2006年9月
- 3) 横田・多幾山・林「静的加力実験に基づく柱-差鴨居接合部の復元力特性評価」日本建築学会技術報告集、2015年6月

## 2) 差鴨居の復元力特性一般式

差鴨居が柱面に対してめり込む領域は、差鴨居断面積の半分から差し込み部の断面積を差し引いた面積であるから、

$$Acv = (b \times D - b' \times D') / 2$$

めり込みによる抵抗モーメントは、

$$M = Acv \times \sigma_{cv} \times D/4$$

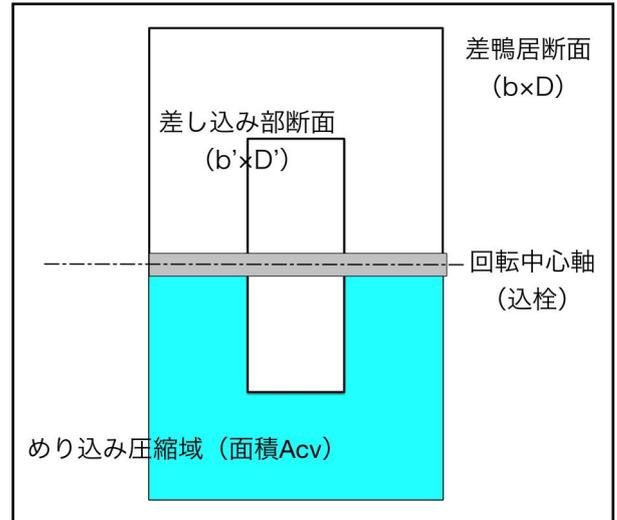
めり込み量 ( $\delta$ ) と節点回転角 ( $\theta$ ) の関係は次式で表せる。

$$\theta = \delta / D$$

なお、差鴨居や柱の曲げ変形を無視すれば、節点回転角と架構の部材回転角（したがって層間変形角）は等しい。

以上の単純な数式で差鴨居-柱節点の復元力特性が求まり、架構の復元力特性（耐力）は節点の数に乗じて、これを階高で割ることによって得られる。

以下に標準的な差鴨居断面について復元力特性を求める。



a) 差鴨居 120×270 (差し込み部30×90) の場合

$$Acv = 14,850 \text{ mm}^2$$

$$Ry = 4\text{mm}/270\text{mm} = 1/67.5 \quad \rightarrow \quad 1/60$$

$$My = 14850 \times 4 \times 270 / 4 = 4,009,500 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad \rightarrow \quad 4.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Ru = 20/270 = 1/13.5 \quad \rightarrow \quad 1/15$$

$$Mu = 14850 \times 6 \times 270 / 4 = 6,014,250 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad \rightarrow \quad 6.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

b) 差鴨居 120×300 (差し込み部30×90) の場合

$$Acv = 16,650 \text{ mm}^2$$

$$Ry = 4\text{mm}/300\text{mm} = 1/75 \quad \rightarrow \quad 1/60$$

$$My = 16650 \times 4 \times 300 / 4 = 4,995,000 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad \rightarrow \quad 5.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Ru = 20/300 = 1/15 \quad \rightarrow \quad 1/15$$

$$Mu = 16650 \times 6 \times 300 / 4 = 7,492,500 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad \rightarrow \quad 7.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

c) 差鴨居 135×360 (差し込み部45×120) の場合

$$Acv = 21,600 \text{ mm}^2$$

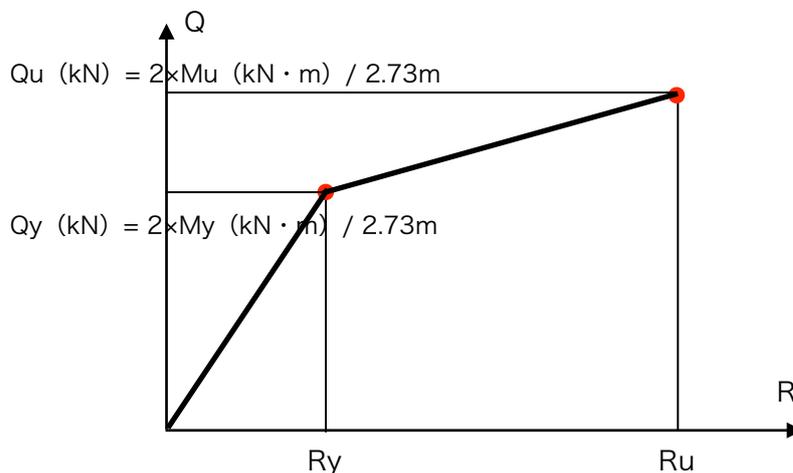
$$Ry = 4\text{mm}/360\text{mm} = 1/90 \quad \rightarrow \quad 1/90 \text{ (or } 1/120)$$

$$My = 21600 \times 4 \times 360 / 4 = 7,776,000 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad \rightarrow \quad 7.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$Ru = 20/360 = 1/18 \quad \rightarrow \quad 1/15$$

$$Mu = 21600 \times 6 \times 360 / 4 = 11,664,000 \text{ N} \cdot \text{mm} \quad \rightarrow \quad 11.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

単位フレームの復元力特性（差鴨居1段）



注) 柱・梁架構は節点ピンで部材の曲げ剪断変形はないものとしている。また差鴨居の曲げ剪断変形も考慮せず、差鴨居と柱の節点でのみめり込みによる回転が起こるものと仮定している。ただし当然、断面欠損を考慮して、柱が折損しないことを検証しなければならない。