

# 木材半径方向におけるLSBの単位長さあたりの引抜き性能算定式の検討

村上 了

## Study for equation on pull-out performance of LSB per unit area in the radial direction of wood

Satoru MURAKAMI

**Keywords:** Screw, Lagscrewbolt, partial bearing effect, Finite Element Analysis  
スクリュー, ラグスクリューボルト, 局部面圧現象, 有限要素解析

ラグスクリューボルト (LSB) の木材の半径方向における単位長さあたりの引抜き初期剛性と降伏耐力を求める算定式を導いた。算定式は実験結果とよく一致し、LSBの形状を決定するための資料となることを確認した。

### 1. はじめに

ねじ, ラグスクリュー, ラグスクリューボルト (LSB) 等, ねじ山の付いた接合具は木造建築物において構造要素として多く用いられており, 施工が容易であり, かつ高い耐力性能を持つことから, 今後重要性が増すと考えられる。これらスクリュー型接合具は, ねじ山が木材に引っかかることにより, 引抜かれる力に対して大きい抵抗力を発揮する。現状その性能は試験により求めなくてはならないため, 指標となるべき力学モデルが求められている。

これまでの検討で有限要素解析 (FEA) と局部面圧係数を組み合わせ, LSBの木材半径方向の引抜き初期剛性, 降伏耐力を導き, 実験結果と比較したところ, 互いに満足できる一致を示した<sup>2)</sup>。

そこで本研究では, LSB引抜き性能のFEA結果から, 簡易な近似解を導き, その近似解と局部面圧係数を組み合わせ, 任意のLSB引抜き性能を評価する手法について検討した。

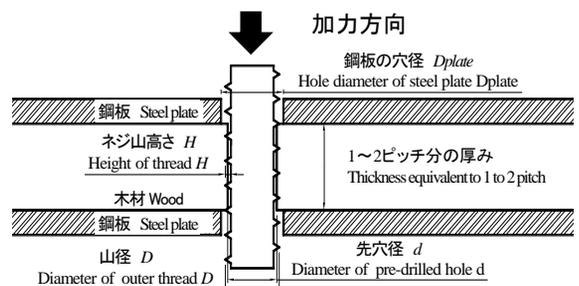
### 2. LSB引抜き性能の算定式

#### 2.1 単位面積あたりのLSB引抜き剛性の算定式

中谷ら<sup>2)</sup>によると単位面積あたりの引抜き初期剛性, 降伏強度が既知であるなら任意のLSBの引抜き初期剛性と降伏強度はVolkerson理論を用いて求めることができる。

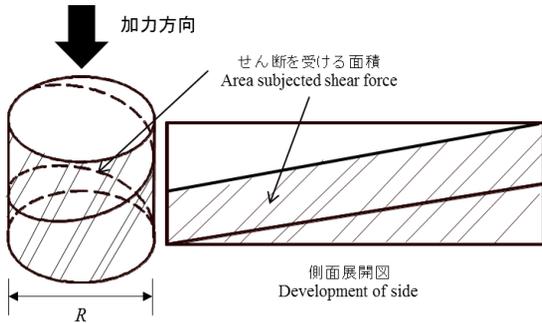
中谷ら<sup>3)</sup>は単位面積あたりの引抜き初期剛性, 降伏強度を求めるにあたり, 薄板の形状をした木材を鋼板で挟み, 挿入したLSBを引抜いて求めるよう指示している (第1図)。LSBが引き抜かれることによって木材がせん断を受けている面積 (第2図) はねじ一周り分以上になる。

木材の各方向がどのように変形するのかを把握し, ねじ山高さ $H$ とねじ山ピッチ $t$ との関係を知るため, 汎用構造解析プログラム (MSC. MARC: ver. 2010) を用いて, ねじ山1ピッチ分の厚みを持つ木材へ, ねじ山をモデル化した剛体により強制変位を与えた (第3図, 第4図)。解析上, 1ピッチ分の木材をスクリューの山径の穴を持つ剛体で挟み, 斜線で示したねじ山上部に $0.1\text{mm}$ の変位を加えた。

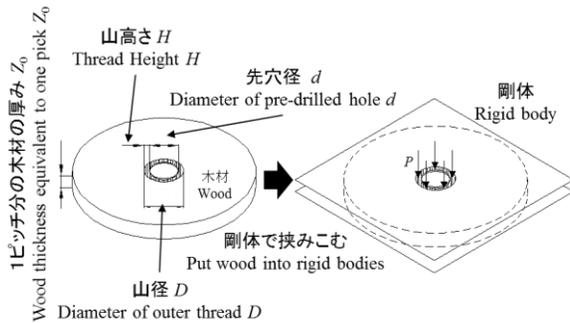


第1図 薄板試験

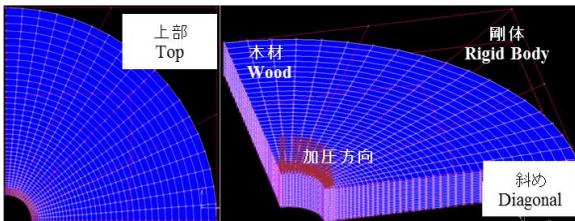
Fig. 1. Thin plate specimens



第2図 薄板試験のせん断面積  
Fig. 2. Shear area of thin plate specimens



第3図 1ピッチ分のモデル  
Fig. 3. Model corresponding to the thickness of one pitch



第4図 FEAモデル  
Fig. 4. Analysis model for FEA

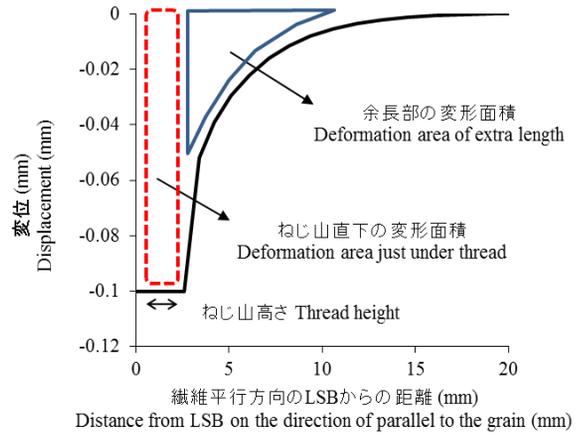
スクリーウの山径 $D$ は15.2mm，木材の先孔径 $d$ は11mmとし，1ピッチ分の木材の高さ $z_0$ は2, 5, 10, 15mmの4条件で解析を行った。スギの弾性定数をFEAに入力した。スギの各種弾性定数は第1表に示す文献値<sup>4)</sup>を参照した。第1表の $E$ ,  $G$ ,  $\mu$ はそれぞれヤング率，せん断剛性，ポワソン比を示し，下付きの $L$ ,  $R$ ,  $T$ はそれぞれ木材の繊維平行方向，半径方向，接線方向を示している。

1ピッチ分の木材の高さ $z_0$ が10mmで半径方向に0.1mm変形した時の上部の繊維平行方向の変位分布を第5図に示す。第6図にその模式図を示した。均一に変形を受けるねじ山直下の変形とその余長部の変形の傾向は異なるため，ねじ山直下のめり込みに起因する反力とその余長部のせん断に起因する抵抗を並列のバネとし，両者を分けて考える。

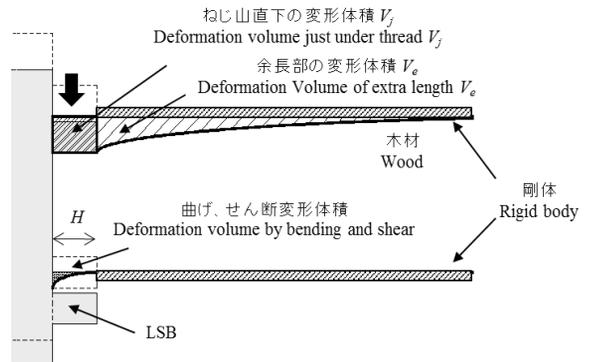
第1表 解析に用いた弾性定数  
Table. 1. Material constants used in FEA

$E_L$	7350	$G_{TL}$	343	$\mu_{RT}$	0.90
$E_R$	590	$G_{LR}$	637	$\mu_{TR}$	0.44
$E_T$	290	$\mu_{LR}$	0.40	$\mu_{TL}$	0.02
$G_{RT}$	15	$\mu_{RL}$	0.03	$\mu_{LT}$	0.60

\* $E$ と $G$ の単位は $N/mm^2$   
Unit of  $E$  and  $G$  is  $N/mm^2$



第5図 繊維平行方向の木材の上部変形分布  
Fig. 5. Distribution of top deformation of wood in the direction parallel to the grain

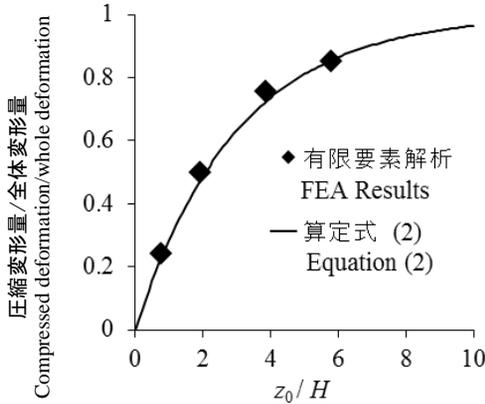


第6図 木材の変形モデル  
Fig. 6. Model for deformation of wood

(a) ねじ山直下の圧縮変形体積

はじめにねじ山直下の圧縮変形量について，本研究では純粋な圧縮変形量がねじ山高さ $H$ と1ピッチ分の木材の高さ $z_0$ の比に対し，どのように変化するかをFEAの結果を元に検討し，結果を近似できる関数を当てはめることによって決定する。

ねじ山直下の純粋な圧縮による変形体積 $V_j$ は1ピッチ分下方の方向の変形体積 $V_{BS}$ （曲げとせん断による変形体積）と加力部の変形体積 $V$ （全体の変形体積）との差分をFEA結果より求めた。圧縮変形



第7図 圧縮変形量と全体変形量との比と $z_0/H$   
Fig. 7. Comparison between the ratio of compressed deformation to whole deformation and  $z_0/H$

体積と全体変形体積の比 $q$ を $z_0/H$ を変数としてプロットしたものを第7図に示す。

この時、 $q$ はおおよそ、指数関数状にピッチとねじ山高さの比が大きくなるにつれ、1に収束するようであった。このため、 $q$ を以下の式によって表すことができる。

$$0 \leq z_0/H \leq 1 \quad q = 0 \quad (1)$$

$$1 \leq z_0/H \quad q = 1 - \exp\left(-\frac{z_0 - H}{nH}\right) \quad (2)$$

$n$ は異方性材料である木材を近似的に等方性と見なすために、接線方向の応力の広がりをもとにしたときの定数で、稲山によって定義されている式(3)で求めることができる。

$$n = \sqrt{E_L/E_T} \quad (3)$$

ここで、 $E_L$ は繊維平行方向のヤング率、 $E_T$ は接線方向のヤング率をそれぞれ示す。通常転造ねじの場合 $z_0/H$ が1以下になることはないので、以後は式(2)を用いるものとした。1mm変形時のねじ山直下の木材の変形体積 $V_j$ はFEA結果から近似して以下の式によって求めることができる。

$$V_j = \pi \frac{D^2 - d^2}{4} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{z_0 - H}{nH}\right) \right\} \quad (4)$$

ここで、 $D$ はねじ山直径、 $d$ は先穴径である。1ピッチあたりのねじ山直下の反力 $p_j$ はフックの法則より変位量 $\delta$ を用いて以下のように表すことができる。

$$p_j = \frac{V_j E_R}{z_0} \delta \quad (5)$$

(b)余長部の圧縮変形体積

繊維平行方向の余長部の変位はめり込み理論<sup>5)</sup>を参考に次のような指数関数として表す。

$$f(x) = \delta e^{-a|x|} \quad (6)$$

ここで、 $\delta$ はスクリーの変位量、 $a$ は支持条件により変わる係数である。余長部のめり込み変形はおおよそピッチの1.5倍の点においてほとんど0に近くなる。このため、スクリーの周りの木材がピッチの1.5倍以上の余長長さを持つ場合、余長長さを無限と考えても差し支えない。接線方向の余長部の変位は以下の式で表すことができる。

$$g(y) = \delta e^{-a|y|} \quad (7)$$

ねじ山先端を $x = 0$ と置き、余長部が無限の場合、繊維平行方向の余長部の変形面積 $A(x)$ と接線方向の変形面積 $B(y)$ は以下のように表すことができる。

$$A(x) = \int_0^\infty f(x) dx = \frac{\delta}{a} \quad (8)$$

$$B(y) = \int_0^\infty g(y) dy = \frac{\delta}{an} \quad (9)$$

パラメータ $a$ は北守による研究の考察より $5.5/z_0$ とした<sup>6)</sup>。すなわち、繊維平行方向の単位変位量あたりでピッチあたりの変形面積 $S_0$  (mm)は以下のように表すことができる。

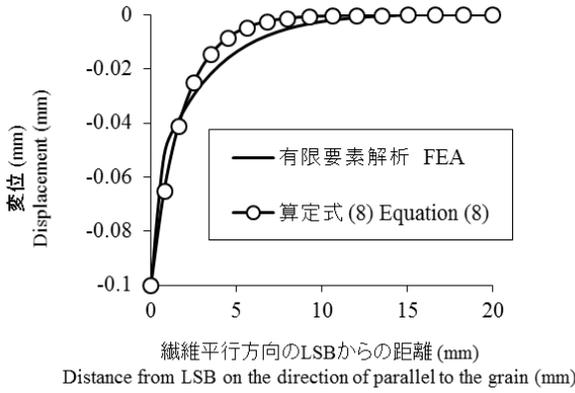
$$S_0 = \frac{z_0}{5.5} \quad (10)$$

また接線方向の単位変位量でのピッチあたりの変形面積 $S_{90}$ は以下のように表すことができる。

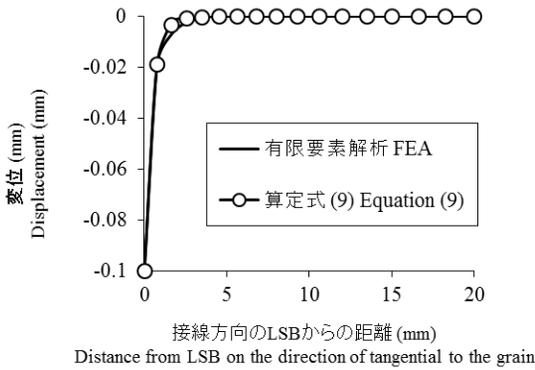
$$S_{90} = \frac{z_0}{5.5n} \quad (11)$$

これをそれぞれの $z_0 = 10$  mmの時のFEA結果と併せてみると第8図と第9図のようになる。FEA結果と算定式とがよく合っていることが分かる。

次にFEAによって求めた $z_0 = 10$  mmで上部が0.1 mm変形したときの繊維平行方向に対する各角度における単位長さあたりの余長部の変形面積の分布を第10図に示す。単位長さあたりの余長部の変形面積分布はおおよそ三角関数状に分布することが解析により分かった。すなわち、任意の角度の変位分布は



第8図 FEM結果と算定式(8)  
Fig. 8 Comparison between the FEM results and equation (8)



第9図 FEM結果と算定式(9)  
Fig. 9. Comparison between the FEM results and equation (9)

FEAの結果を近似して以下の式によって表すことができる。

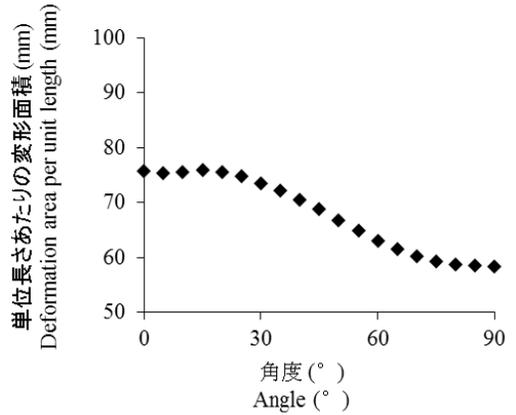
$$S_{\theta} = \frac{S_0 - S_{90} \cos 2\theta + S_0 + S_{90} + D}{2} \quad (12)$$

第11図は余長部の各角度断面の変位面積を接合具径の円から放射上に配置したものである。この斜線で覆われた面積が余長部の変形体積 $V_e$ となる。 $S_{\theta}$ を $360^{\circ}$ 積分すると $V_e$ を得ることができる。

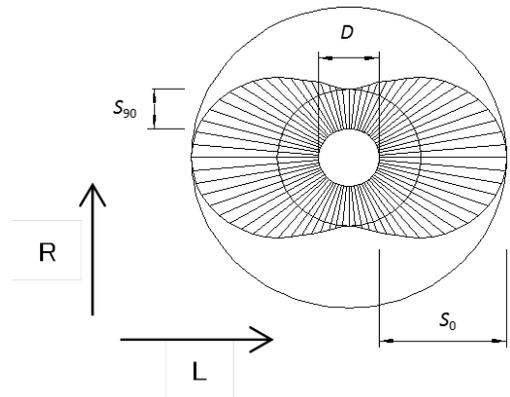
$$\begin{aligned} V_e &= 4 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{A_0 - A_{90}}{2} \cos 2\theta + \frac{A_0 + A_{90} + d}{2}} S_{\theta} dS_{\theta} d\theta \\ &= \frac{1}{8} \{ 3A_0^2 + 2A_0A_{90} + 3A_{90}^2 + 4(A_0 + A_{90})D \} \pi \quad (13) \end{aligned}$$

余長部のピッチあたりの反力 $p_e$ はフックの法則を用いて以下のように表すことができる。

$$p_e = \frac{V_e E_R}{z_0} \delta \quad (14)$$



第10図 繊維平行方向から接線方向までの各角度における変形面積分布  
Fig. 10. Distribution of deformation area for each angle between the direction of parallel and tangential to the grain



第11図 変形面積の分布モデル  
Fig. 11. Model for deformation area of each angle

$z_0$ は安全側の設計になるよう配慮して、ねじ山高さ $H$ とネジピッチ間隔 $t$ を用いて式(15)のように表した。

$$z_0 = t - H \tan \alpha \quad (15)$$

この時、 $\alpha$ はねじ山角度を表す。

単位面積あたりのねじ山の抵抗力 $p_A$ と初期剛性 $k_A$ は以下のように表せる。

$$p_A = p_j + p_e = k_A \cdot \delta \quad (16)$$

$$k_A = \left[ \frac{1}{8} \{ 3S_0^2 + 2S_0S_{90} + 3S_{90}^2 + 4(S_0 + S_{90})D \} + \frac{D^2 - d^2}{4} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{z_0 - H}{nH}\right) \right\} \right] \frac{E_R}{tDz_0} \quad (17)$$

半径方向のLSB引抜き初期剛性はFEAの結果と局局面圧現象の直列のバネ（式(18)）と考え、局局面圧現象の定数 $\beta$ を考慮に入れた単位面積あたりの引抜き初期剛性 $k_{sf}$ を算出する。

$$\frac{1}{\pi D t k_{sf}} = \frac{\gamma}{\beta E_R A_{Thread}} + \frac{1}{K_{LSB}} \quad (18)$$

$$K_{LSB} = k_A \pi D t \quad (19)$$

$$A_{Thread} = \frac{D^2 - d^2}{4t} \pi L \quad (20)$$

ここで $\gamma$ は局局面圧現象の有効距離、 $E_R$ は半径方向のヤング率、 $A_{Thread}$ はLSBねじ山と木材が接触している面積、 $K_{LSB}$ は式(19)より求められたLSB1ピッチあたりの引抜き初期剛性、 $A_{Contact}$ は固定用の鋼板が木材に対して反力として接触している面積（片面のみ）、 $L$ はLSB挿入長さをそれぞれ示す。 $A_{Thread}$ は式(20)に示すよう、接触しているねじ山の投影面積を用いて近似的に求めている。

$A_{Contact}$ に関してはFEA結果とめり込み理論<sup>5)</sup>に基づいて定義する。木材の変形は第11図の様に分布する。この領域の投影面積を $A_{Contact}$ とした。

上部の変形分布はおよそ第8図、第9図のように指数関数上に分布し、且つ繊維平行方向においては材せいの2.5倍、接線方向においては材せいの0.5倍離れた箇所まで表面変位がほぼ0と見なせるようになる。

ここでは、材せいの1.5倍、0.3倍までの領域において、およそ8~9割の反力を負担しているものとした。繊維平行方向と接線方向において反力を負担する限界距離をそれぞれ $\lambda$ 、 $\omega$ とし、めり込み理論<sup>5)</sup>を用いて以下の式により表す。

$$\lambda = 1.5Z, \quad \omega = 1.5Z/n \quad (21)$$

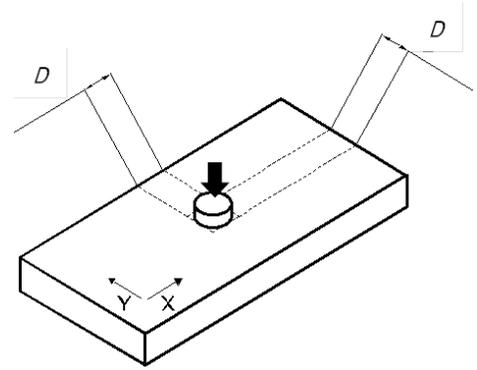
ここで、 $Z$ は試験体半径方向の厚みを示す。

$$\delta(\theta) = \frac{\lambda \omega}{\lambda \sin^2 \theta + q \cos^2 \theta} + \frac{d}{2} \quad (22)$$

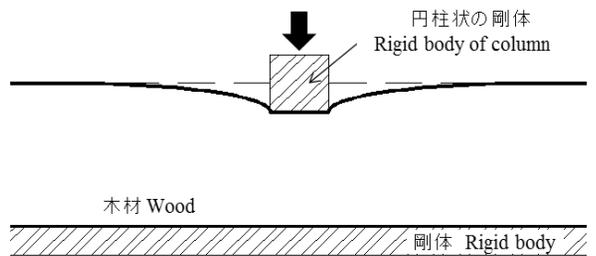
これを積分し、且つ鋼板の穴の面積を差し引くことにより、 $A_{Contact}$ を得ることができる。

$$A_{Contact} = 4 \int_0^{\pi/2} \frac{\delta(\theta)^2}{2} d\theta - \frac{D_{Plate}^2}{4} \pi = \frac{\pi}{4} \left( \frac{2\lambda\sqrt{\lambda\omega} + 2\omega\sqrt{\lambda\omega}}{+4\omega\sqrt{\lambda\omega} + d^2 - D_{Plate}^2} \right) \quad (23)$$

ここで、 $D_{Plate}$ は鋼板の穴の直径である。



第12図 円柱状剛体のめり込みモデル  
Fig. 12. Embedment model with rigid of column type



第13図 円柱状剛体のめり込み断面図  
Fig. 13. Cross-section of embedment with rigid body of column type

## 2.2 単位面積あたりのLSB引抜き降伏耐力の算定式

めり込み理論を用いて降伏耐力の算定式を導く。降伏は圧縮を受けるねじ山部直下の木材が圧縮降伏応力に達した時とする。

この時のめり込み降伏変位は第12図、第13図に示すように剛体上の木材に円柱状の剛体がめり込む時の降伏変位とした。直方体が木材にめり込む時の耐力 $p_R$ 、めり込み降伏変位 $\delta_{Ry}$ は以下のように表すことができる（ただし、端縁距離は無限大と見なすことができる、 $\lambda = 5.5/Z$ ）。

$$p_R = \frac{x_p y_p C_{xm} C_{ym} E_R}{z_0} \delta \quad (24)$$

$$\delta_{Ry} = \frac{z_0 F_m}{E_R C_{xm} C_{ym}} \quad (25)$$

ここで $x_p$ 、 $y_p$ はLSBのねじ山が繊維平行方向と接線方向にめり込んでいる距離、 $C_{xm}$ は繊維平行方向の端距離を無限大としたときの割増係数、 $C_{ym}$ は接線方向の縁距離を無限大としたときの割増係数、 $F_m$ は材中間部におけるめり込み基準材料強度をそ

れぞれ示す。めり込み理論<sup>5)</sup>とは異なり、木材の局部的な圧縮破壊が生じた時をスクリー-接合部全体の降伏とした。この時の $E_R C_{xm} C_{ym}$ は端縁距離が無限大の時の見かけの木材繊維直交方向のヤング率となる。円柱が木材にめり込む場合のめり込み耐力 $p_p$ は余長部の反力 $p_e$ とねじ山直下の反力 $p_U$ を併せて以下の式で表すことができる。

$$p_p = p_e + p_U$$

$$= \frac{\pi E_R}{8z_0} \left\{ 3S_0^2 + 2S_0 S_{90} + 3S_{90}^2 + 4(S_0 + S_{90})D \right\} \delta + \frac{\pi D^2 E_R}{4z_0} \delta \quad (26)$$

式(24)の $x_p y_p$ は直方体の接触面積を表すため $x_p y_p$ は円柱の円の面積で置換する。 $p_R = p_p$ としたとき、 $C_{xm} C_{ym}$ は以下の式で表すことができる。

$$C_{xm} C_{ym} = \frac{1}{2D^2} (3S_0^2 + 2S_0 S_{90} + 3S_{90}^2) + \frac{2}{D} (S_0 + S_{90}) + 1 \quad (27)$$

よって、めり込み降伏変位 $\delta_{cy}$ は以下のように表すことができる。

$$\delta_{cy} = \frac{z_0 F_m}{E_R \left\{ \frac{1}{2D^2} (3S_0^2 + 2S_0 S_{90} + 3S_{90}^2) + \frac{2}{D} (S_0 + S_{90}) + 1 \right\}} \quad (28)$$

このめり込み降伏変位は曲げ、せん断の影響を無視している。全体の降伏変位 $\delta_y$ 、単位面積あたりの引抜き降伏耐力 $p_y$ をそれぞれ以下に示す。

$$\delta_y = \delta_{cy} k_A / k_{sf} \quad (29)$$

$$p_y = \delta_y k_{sf} \quad (30)$$

### 3. 結果

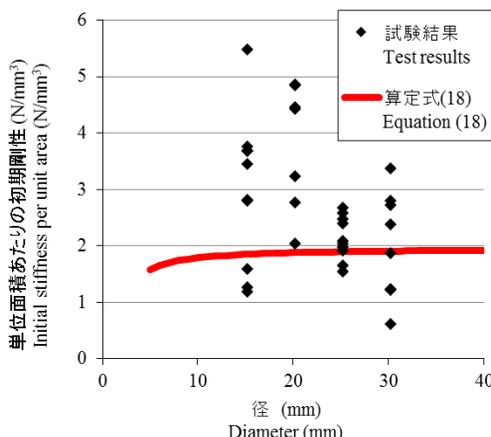
#### 3.1 算定に代入した値

算定式に代入するにあたり、繊維方向のヤング率 $E_L$ は第1図に示した値を用いた。半径方向のヤング率 $E_R$ と、局部面圧現象の定数 $\beta$ および局部面圧現象の有効距離 $\gamma$ は別途圧縮試験 ( $R 40 \times T 20 \times L 20$ mm, 年輪幅 $3.8 \pm 1.4$ mm 含水率 $9.9 \pm 0.5\%$ , 全乾密度 $351.1 \pm 38.7$  kg/m<sup>3</sup>, ひずみの測定に東京測器PFLW-30-11を使用)の結果から、それぞれ1089 N/mm<sup>2</sup>, 0.14および3.8(平均年輪幅)mmを代入することとした。めり込み基準材料強度 $F_m$ は木質構造設計規準<sup>7)</sup>に基づき4.8 N/mm<sup>2</sup>とした。その他、LSBの径、ピッチ、ねじ山高さを変数として、様々な条件で

LSBの単位面積あたりの引抜き初期剛性、降伏耐力を求めた。なお、解析上接する剛体の穴の径 $D_{Plate}$ は比較の都合上、LSBのねじ山径 $D$ プラス1mmとした。

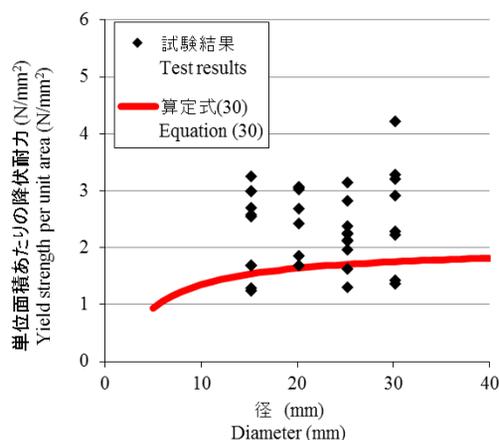
#### 3.2 算定結果と実験結果との比較

算定結果と以前著者らが行った文献値<sup>8)</sup>と比較を行った。第14図、第15図に径が変化した場合の単位面積あたりの引抜き初期剛性、降伏耐力の試験結果と算定式の結果をそれぞれ示す。径が大きくなるにつれ、算定式による初期剛性、降伏耐力はいずれも大きくなっている。そして実験結果に対して算定式の結果はおよそその傾向と合致している。



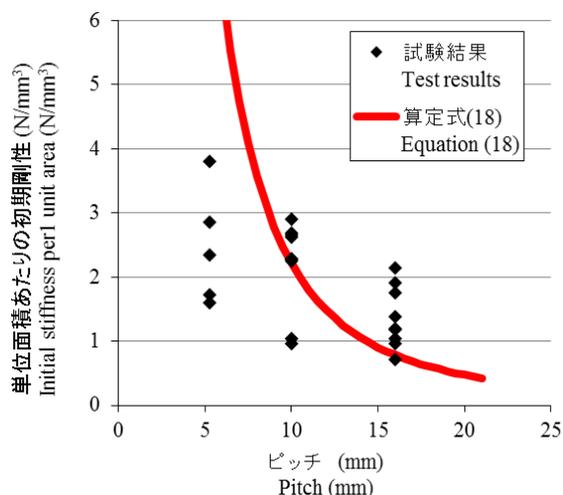
第14図 径と単位面積あたりの引抜き初期剛性の関係(ピッチ10mm, 山高さ1.6mm)

Fig. 14. Relationship between diameter of LSB and initial stiffness per unit area (Pitch interval 10mm, Thread height 1.6mm)



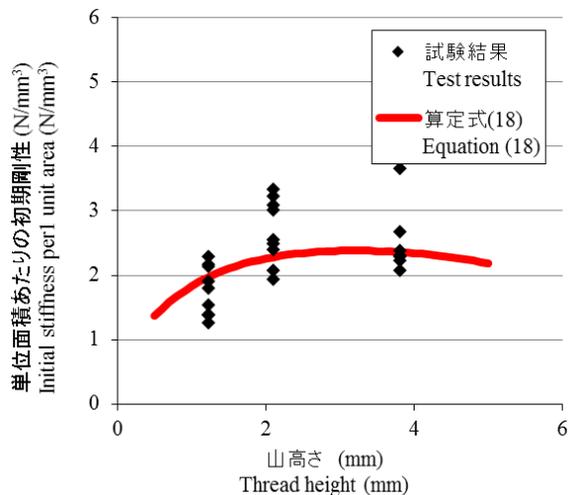
第15図 径と単位面積あたりの引抜き降伏耐力の関係(ピッチ10mm, 山高さ1.6mm)

Fig. 15. Relationship between diameter of LSB and yield strength per unit area (Pitch interval 10mm, Thread height 1.6mm)



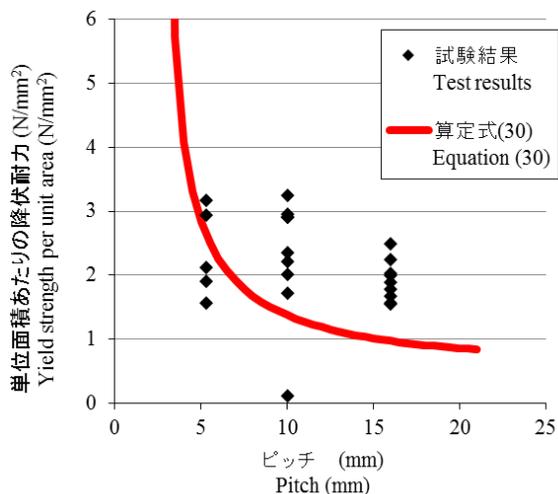
第16図 ピッチと単位面積あたりの引抜き初期剛性の関係(径30.2mm, 山高さ1.6mm)

Fig. 16. Relationship between pitch interval of LSB and initial stiffness per unit area (Diameter 30.2mm, Thread height 1.6mm)



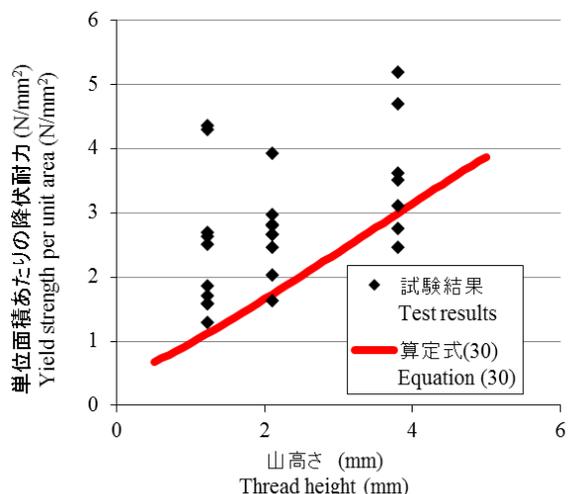
第18図 ねじ山高さと単位面積あたりの引抜き初期剛性の関係(径25.2mm, ピッチ10mm)

Fig. 18. Relationship between thread height of LSB and initial stiffness per unit area (Diameter 25.2mm, Pitch interval 10mm)



第17図 ピッチと単位面積あたりの引抜き降伏耐力の関係(径30.2mm, 山高さ1.6mm)

Fig. 17. Relationship between pitch interval of LSB and yield strength per unit area (Diameter 30.2mm, Thread height 1.6mm)



第19図 ねじ山高さと単位面積あたりの降伏耐力の関係(径25.2mm, ピッチ10mm)

Fig. 19. Relationship between thread height of LSB and yield strength per unit area (Diameter 25.2mm, Pitch interval 10mm)

第16図, 第17図にピッチが変化した場合の単位面積あたりの引抜き初期剛性, 降伏耐力の試験結果と算定式の結果をそれぞれ示す。ピッチが大きくなると指数関数的に算定式の初期剛性, 降伏耐力いずれも下がっている。単位面積あたりの初期剛性において, ピッチが小さい時, 試験結果と算定式の結果がはずれている。これはピッチが小さすぎるとLSB挿入時木材を圧壊させすぎてしまうからと考えられている。また, ピッチが小さすぎるとLSBの製造時,

転造の際にねじ山が綺麗に立たない影響も考えられる。転造の場合, 元の転造前の体積と転造後の体積は等しいため任意のねじ山で限界のピッチが存在すると考えられる。

降伏耐力は算定結果が実験結果の傾向と一致している。

第18図, 第19図にねじ山高さが変化した場合の単位面積あたりの引抜き初期剛性, 降伏耐力の試験結果と算定式の結果をそれぞれ示す。算定式による初

期剛性は山高さがが変化した場合、上に凸の形になる。これは山高さが大きくなるにつれ、局部面圧現象が生じる接触面積が大きくなるためと考えられる。算定結果と試験結果は初期剛性、降伏耐力共に算定結果が下回っているが、よく傾向をつかんでいる。

#### 4. おわりに

FEAの結果からLSBの単位面積あたりの引抜き初期剛性、降伏耐力を求める算定式を導いた。算定式は試験結果と同様の傾向を示したことから、今後のLSBの形状を決定する際に参考とできると考えられる。

#### 謝 辞

この研究は2012年度 LIXIL住生活財団若手研究助成を受けて行いました。ここに感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 吉識雅夫, 竹鼻三雄: 木船構造接手の研究(第2報), 造船協会論文集 102, 251-259 (1958).
- 2) 村上了: スクリュー軸方向性能の木質構造接合部

への活用, 京都大学学位論文 (2012).

- 3) 中谷誠, 小松幸平: ラグスクリューボルトの引抜き性能発現機構 (第2報) 繊維平行方向引抜き理論の構築, 木材学会誌51(5), 311-317 (2005).
- 4) 独立行政法人森林総合研究所: 木材工業ハンドブック, 2.4.2 弾性定数, p134-135 (2004).
- 5) 稲山正弘: 木材のめりこみ理論とその応用, 東京大学学位論文(1992).
- 6) 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検討, 日本建築学会構造系論文集 642, 1477-1485 (2009).
- 7) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説 一 許容応力度・許容耐力設計法一, 403. 4 設計応力状態と許容応力度, 162-163, 丸善 (2010).
- 8) 村上了, 鄭基浩, 中谷誠, 北守顕久, 小松幸平: スクリュー型接合具の引抜き抵抗の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1構造Ⅲ, 富山 (2010).

—利用部 資源・システムグループ—  
(原稿受理: 15.12.7)