

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^{*1}

中谷 誠^{*2}, 小松幸平^{*2}

Mechanism of Pull-out Performance in Lagscrewbolted Timber Joints II[†]

Development of a theory of pull-out properties parallel to the grain^{*1}

Makoto NAKATANI^{*2} and Kohei KOMATSU^{*2}

Lagscrewbolts were developed as a simple and economical moment-resisting connector for glulam frame constructions. This new type of connector is expected to show high pull-out resistance due to the shear resistance between the top of the thread and the glulam. In order to quantify this performance, a theory of pull-out resistance of an embedded lagscrewbolt parallel to the grain direction was developed on the basis of Volkersen theory, which was originally developed for the shear stress analysis of rivet joints. The applicability of our theoretical approach was verified based on experimental results. Shear strength f_v and shear stiffness Γ , both necessary parameters of the theoretical formula, were determined by pull-out tests of thin 15-mm glulam specimens, assuming that in thin specimens the shear stress distribution would be almost uniform. Verification experiments were conducted using three kinds of Lagscrewbolts, with top thread diameters of 25, 30 and 35 mm, and the influence of various embedment depths ranging from 60 to 450 mm on the pull-out properties was examined. The developed theory predicted maximum pull-out load and slip modulus well.

Keywords: Lagscrewbolt, pull-out resistance, Volkersen model, thin plate specimens.

本研究は、集成材の繊維方向に対し平行に埋込まれたラグスクリューボルトの引抜き性能の理論式を導き、その妥当性を評価することを目的とした。繊維方向に対し平行に埋込まれたラグスクリューボルトの引抜き抵抗は、ラグスクリューボルトのねじ山頂部と集成材の間で起こるせん断に起因する。この引抜き挙動の理論式を、Volkersenモデルを適用して導いた。理論式に必要なラグスクリューボルト特有の物理常数である引抜きせん断強度 f_v と引抜きせん断剛性係数 Γ は、引抜き時にラグスクリューボルトの長さ方向で起こるせん断応力分布がほぼ均一化されると仮定できる15 mm厚の薄板試験体の引抜き実験から導いた。また理論式の妥当性を評価するため、直径の異なるラグスクリューボルトを3種類用い、埋込み深さを段階的に変化させ、引抜き実験を行った。その結果、本理論式はラグスクリューボルトの引抜き性能を推測できることがわかった。

1. 緒 言

ラグスクリューボルトは、木質ラーメン構造の接合部を最小限の金物で構成するために開発された新

しい接合具である。この接合具は、鋼棒の外側にねじが加工されており、先穴を設けた木質部材に埋込み、その引抜き抵抗に接合具としての性能を期待するものである。本研究の第1報¹⁾において、先穴直

[†] Report I: This journal 51, 125-130 (2005).

^{*1} Received November 16, 2004; accepted May 6, 2005. この報告の一部は 8th World Conference on Timber Engineering で発表した。

^{*2} 京大大学生存圏研究所 Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University, Uji 611-0011

径, 縁距離, 集成材の繊維方向に対する埋込み方向, 埋込み深さが引抜き抵抗に及ぼす影響等について実験的考察を行った。

日本建築学会の木質構造設計規準では, ラグスクリーや木ねじなどのねじ型接合具は, 木材の繊維方向に対し平行に埋込み使用することを避けるように指導している²⁾。しかし, ラグスクリーボルトを木質ラーメン構造に適用する場合には, 繊維平行方向に埋込むことが避けられない。本報では, 繊維平行方向に埋込んだラグスクリーボルトの引抜き性能を理論的に推定できる式の誘導を目的とした。そして, 引抜き実験を行い, 理論値と実験値の比較と検討を行った。

2. 理 論

木材の繊維方向に対し平行に埋込んでラグスクリーボルトの引抜き理論は, ラップジョイントにおける Volkersen モデル³⁻⁶⁾ を適用した Johannsson ら⁷⁾ による鋼棒挿入接着接合の引抜き理論, また小泉と Jensen ら⁸⁻⁹⁾ による木ダボの引抜き理論を参考にした。Volkersen モデルでは, 接着層のせん断を完全弾性と仮定している。本理論では, ラグスクリーボルトのねじ山と木質部材の間で起こる引抜きを, 完全弾性と仮定した。また, ラグスクリーボルトの引抜きにおいても, 接着理論と同様に, 接着層の厚さにあたる部分が不明である。そこで, 木ダボの引抜き理論⁸⁾ を参考にして, せん断ひずみを定義する代わりに, 部材の相対変位がラグスクリーボルトと木材の界面に働くせん断応力 τ に比例すると仮定し, それらの関係を以下のように定義した。

$$\tau = \Gamma(u_w - u_s) \quad (1)$$

ここで, τ : せん断応力, Γ : せん断剛性係数, u : 各部材の変位量。

添字 w : 木材, s : ラグスクリーボルト。

また, Hooke の法則より,

$$\sigma_w = \frac{du_w}{dx} E_w \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{du_s}{dx} E_s \quad (3)$$

ここで, σ : 軸応力, E : ヤング率。

次に, 任意点での微小部分 dx について, 軸方向での釣合いから, 以下の微分方程式を導ける。

$$\frac{d^2 \tau}{dx^2} - \tau k^2 = 0 \quad (4)$$

ここで k は,

$$k = \sqrt{\Gamma \pi R \left(\frac{1}{E_w A_w} + \frac{1}{E_s A_s} \right)} \quad (5)$$

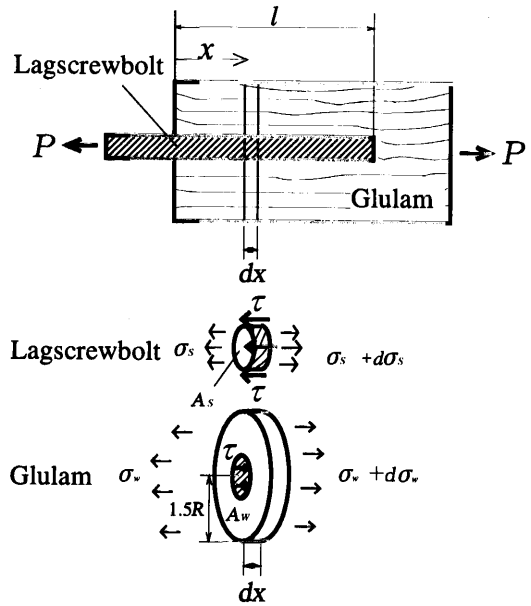


Fig. 1. Geometry of Lagscrewbolted joint and equilibrium of stresses at infinitesimal region dx .

となる。

A : 有効断面積, R : ラグスクリーボルトの山側直径。

木質部材の有効断面積 A_w は, Fig. 1 に示すように $1.5R$ を半径とする領域を仮定した。これは, 先の報告¹⁾ より, 縁距離を $1.5R$ 以上とした場合にはラグスクリーボルト引抜き実験の終局状態において, 木質部材に破壊が生じなかったことから, 応力の影響範囲が先穴の中心から半径 $1.5R$ 以内であると便宜的に仮定できるためである。また, ラグスクリーボルトの有効断面積 A_s は谷側直径の断面積とした。

実際の使用条件では, Fig. 1 に示すような加力条件が予測される。このときの, 境界条件として以下のように仮定できる。

$$x=l \text{ のとき } \sigma_s = 0, \sigma_w = \frac{P}{A_w} \quad (6)$$

$$x=0 \text{ のとき } \sigma_s = \frac{P}{A_s}, \sigma_w = 0 \quad (7)$$

(6)式, (7)式の条件について, (4)式を解くと, せん断応力の分布は次式で表せる。

$$\tau = \frac{Pk}{\pi R} \left(\frac{E_s A_s E_w A_w}{E_s A_s + E_w A_w} \right) \frac{1}{\sinh kl} \left(\frac{\cosh(kl - kx)}{E_s A_s} + \frac{\cosh kx}{E_w A_w} \right) \quad (8)$$

ここで, l : 埋込み深さ。

Fig. 1 に示す加力条件では, $x=0$ もしくは $x=l$ のと

きせん断応力 τ が最大値をとる。つまり、木質部材の木口面もしくはラグスクリューボルトの最深部におけるせん断応力 τ が、ラグスクリューボルトと木質部材の界面のせん断強度 f_v となると、最大引抜き荷重 (P_{max}) を示すこととなる。これより最大引抜き荷重 (P_{max}) は(9)式により表せる。

$$P_{max} = \begin{cases} \frac{f_v \pi R (E_w A_w + E_s A_s) \sinh kl}{k (E_s A_s \cosh kl + E_w A_w)} & (E_w A_w \leq E_s A_s) \\ \frac{f_v \pi R (E_w A_w + E_s A_s) \sinh kl}{k (E_w A_w \cosh kl + E_s A_s)} & (E_s A_s \leq E_w A_w) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 f_v : せん断強さ (N/mm²)。

一方、すべり係数 (K_s) は、(10)式により表せる。

$$K_s = \begin{cases} \frac{\Gamma \pi R (E_w A_w + E_s A_s) \sinh kl}{k (E_s A_s \cosh kl + E_w A_w)} & (E_w A_w \leq E_s A_s) \\ \frac{\Gamma \pi R (E_w A_w + E_s A_s) \sinh kl}{k (E_w A_w \cosh kl + E_s A_s)} & (E_s A_s \leq E_w A_w) \end{cases} \quad (10)$$

(9)式、(10)式により、任意の深さに埋込んだラグスクリューボルトの引抜き性能を算出できる。これらの式はこれまでに示されている報告^{8,9)}と同じ内容になった。ここで、ラグスクリューボルトの引抜き特有の物理常数である f_v 、 Γ を新たに求めなくてはならない。

3. 材料と実験方法

3.1 f_v 、 Γ を算出するための実験

先に導いた理論式を用いるには、ラグスクリューボルトの引抜き特有の物理常数である f_v 、 Γ を新たに求めなくてはならない。そこで f_v 、 Γ を求めるために、Volkersen モデルは埋込み深さ l をより浅くすると、引抜きせん断応力 τ がより均一化される傾向が認められることから、薄板による引抜き実験を行った。試験体は、ラグスクリューボルトのねじが1ピッチ以上(1ピッチが10mm)試験体に埋込まれるよう、厚さ15mmの薄板集成材とした。試験体の寸法をFig.2に示す。集成材にはベイマツ(*Pseudotsuga menziesii*) JAS 異等級対称構成構造用集成材 E105-F300を、ラグスクリューボルトにはS45C鋼材(ヤング率:210GPa)を用いた。実験に使用した3種類のラグスクリューボルトの概要をFig.3に、また詳細をTable1に示す。この実験では試験体が薄いことから、ラグスクリューボルトの全

長は全て150mmとした。先穴の直径は、先の報告¹⁾から谷側直径に山側直径と谷側直径の差の4割を足した値とした。Fig.4に実験方法を示す。実験は、容量100kNの電動ネジ式材料試験機を用い、試験機に引張治具を取り付けて行った。薄板試験体を試

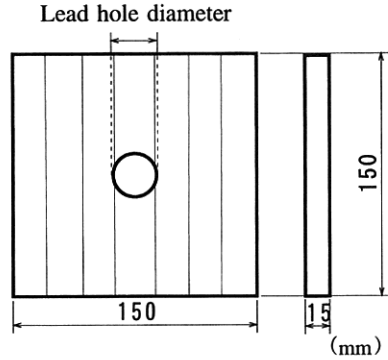


Fig. 2. Details of a thin wood plate specimen.

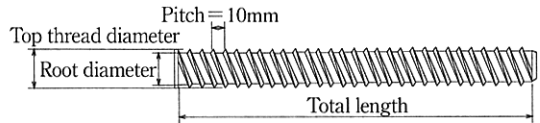


Fig. 3. Geometry of Lagscrewbolts.

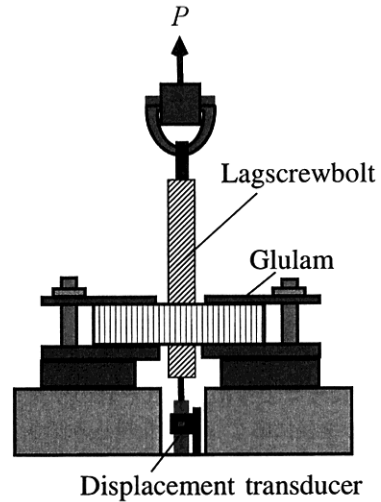


Fig. 4. Pull-out test method of thin plate specimens.

Table 1. Dimensions of Lagscrewbolts.

(mm)

Top thread diameter	Root diameter	Lead hole diameter	Total length
25	20	22	300
30	25	27	400
35	30	32	500

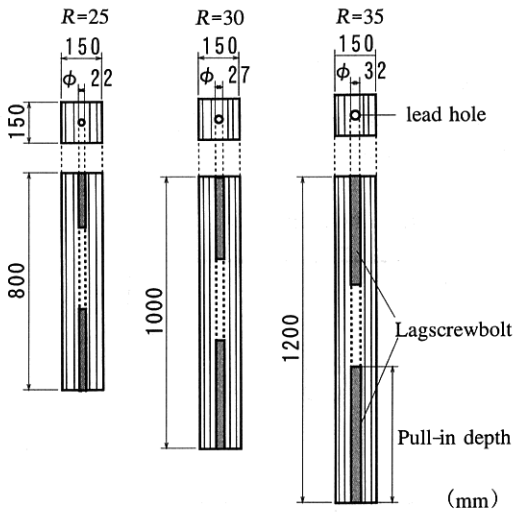


Fig. 5. Dimensions of pull-out specimens.
Legend: R is the top thread diameter.

験機下部の固定台に鋼板とボルトを用い固定し、埋込んだラグスクリューボルトを上部に引張ることで引抜き実験を行った。ここで、固定用の鋼板に空けた穴の大きさは、ラグスクリューボルトの山側直径より5 mm大きいものとした。この5 mmのクリアランスによる薄板のせん断変形は、引抜き量に対し相対的に小さいことを計算により確認している。引抜き荷重は引張治具上部に取り付けた容量50 kNのロードセルによって測定した。また、ラグスクリューボルトと集成材の相対変位を引抜き量として変位計で測定した。引抜き速度は0.2 mm/分とし、実験は各条件ごとに9体、合計27体行った。

3.2 理論式の検証実験

理論式の検証を目的に、ラグスクリューボルトの引抜き実験を行った。ラグスクリューボルトは、薄板実験と同じく Table 1 に示す3種類を用いた。先穴の直径も薄板実験と同様の谷側直径に山側直径と谷側直径の差の4割を足した値とした。埋込み深さは Table 3 に示すように、それぞれのラグスクリューボルトの全長に応じ、多様な埋込み深さとなるよう段階的に変化させた。実験は、各山側直径ごとに9体、合計27体について行った。試験体の寸法を、ラグスクリューボルトの山側直径ごとに Fig. 5 に示

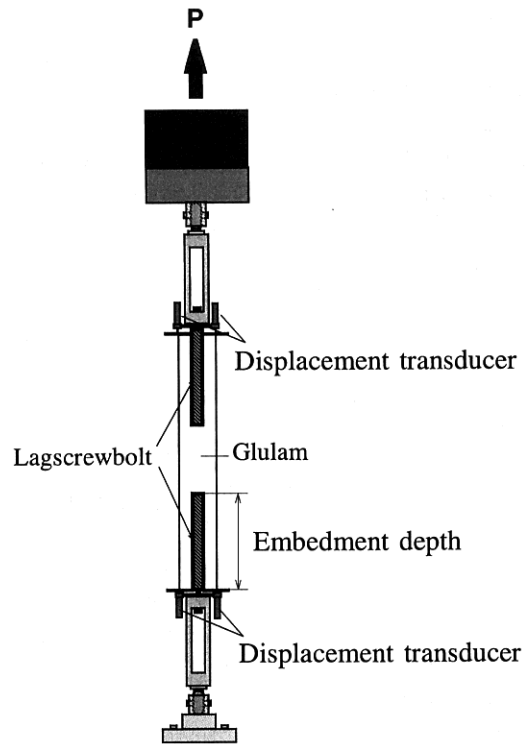


Fig. 6. Pull-out test method.

す。集成材は、先の薄板実験と同じベイマツ (*Pseudotsuga menziesii*) JAS 異等級対称構成構造用集成材 E105-F300を用いた。ラグスクリューボルトの集成材への埋込みは電動トルクレンチを用いて行った。引抜き実験は、Fig. 6 に示すように、材料試験機 (インストロン社モデル8050) を用い、集成材の上下に埋込んだラグスクリューボルトを引張ることで行った。ここで、上側のラグスクリューボルトは固定用とし、下側を Table 2 で設定した埋込み深さとした。このとき上側の埋込み深さを下側より50 mm 以上深くすることで、下側の測定側で引抜き破壊を起こすようにした。しかしながら、ラグスクリューボルトの全長に対して測定側の埋込み深さが深くなり、上下で埋込み深さの差を設定できない試験体については、どちらか引抜け破壊した方を測定側とした。引抜き荷重は、上部治具に取り付けた容量

Table 2. Embedment depth of all specimens.

(mm)

Top thread diameter	Embedment depth								
25	61	90	90	120	180	210	239	240	251
30	100	150	200	200	270	270	322	347	350
35	86	170	170	250	250	350	445	450	450

1000 kN のロードセルで測定した。引抜き変位は、上下のラグスクリューボルトに取付けた2本の変位計により木口面との相対変位を測定し、その平均値とした。引抜き速度は0.2 mm/分とした。

4. 結果と考察

4.1 薄板実験の結果 (f_v , Γ の算出)

Fig. 7に、典型的な引抜き荷重と引抜き変位の関係を示す。すべり係数は、図中の点線で示すように、引抜き荷重と引抜き変位が目視により比例関係にあると判断できる直線域の傾きより算出した。Table 3に最大引抜き荷重 P_{max} とすべり係数 K_s の結果を示す。この最大引抜き荷重とすべり係数を、Fig. 8で示すラグスクリューボルトのねじ山頂部と集成材の界面でせん断を起こすと考えられる面積で除し、

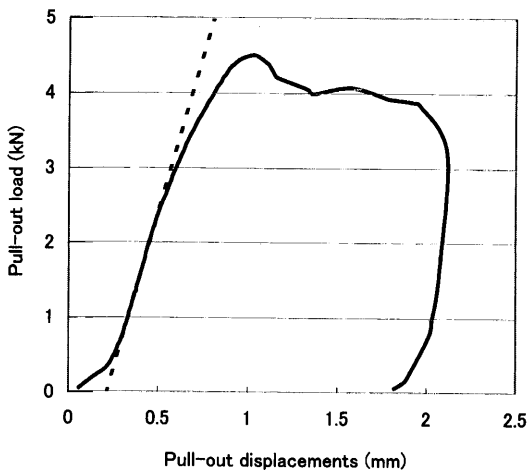


Fig. 7. Typical result of thin plate pull-out tests.

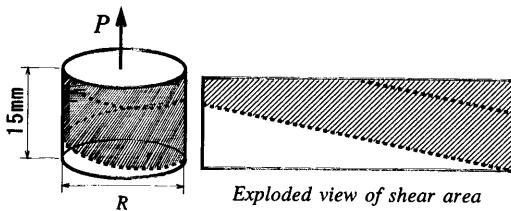


Fig. 8. Shear area of thin plate specimens.
Note: Shaded area shows shear area.

Table 3に示す引抜きせん断強さ f_v と引抜きせん断弾性係数 Γ を導いた。これらの平均値である $f_v = 5.43 \text{ N/mm}^2$ と $\Gamma = 9.08 \text{ N/mm}^3$ を、本研究で用いたラグスクリューボルト特有の物理常数とした。

4.2 検証実験の結果

Fig. 9に典型的な引抜き荷重と引抜き変位の関係を示す。すべり係数の算出は、先の薄板実験と同じ目視による方法で行った。Fig. 10にラグスクリューボルトの山側直径ごとの最大引抜き荷重と埋込み深さの関係を示す。また、Fig. 11にラグスクリューボルトの山側直径ごとのすべり係数と埋込み深さの関係を示す。最大引抜き荷重とすべり係数ともに、埋込み深さが深くなると、その値が比例して増加した。

4.3 理論値と検証実験結果の比較

先の薄板実験から算出したせん断強度 f_v とせん断剛性係数 Γ を、(9)式と(10)式に代入し、最大引抜き荷重とすべり係数の理論値を導いた。ラグスクリューボルトの直径、最大引抜き荷重、そしてすべり係数ごとの理論値と実験値の比較を Fig. 12に示す。最大引抜き荷重とすべり係数ともに理論値は実験値を予測できていると思われる。これは、ラグスクリューボルトのねじ山頂部と集成材のせん断面に生じるせん断応力の不均衡を、ラップジョイントの

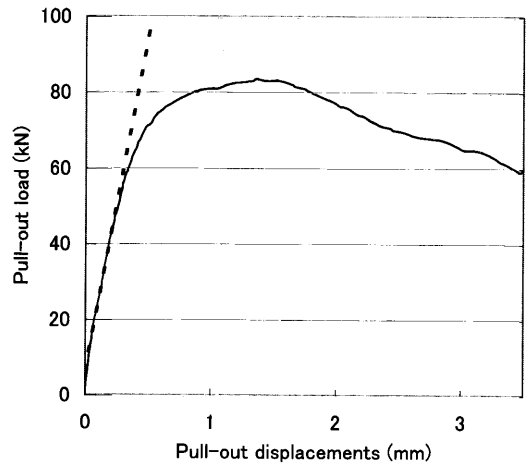


Fig. 9. Typical relationship between pull-out load and displacement.

Table 3. Results of thin plate pull-out tests.

Top thread diameter	P_{max} (kN)	f_v (N/mm ²)	K_s (kN/mm)	Γ (N/mm ³)
25	4.12	5.24	7.11	9.05
30	5.08	5.39	9.83	10.4
35	6.22	5.66	8.51	7.75
Average		5.43		9.08

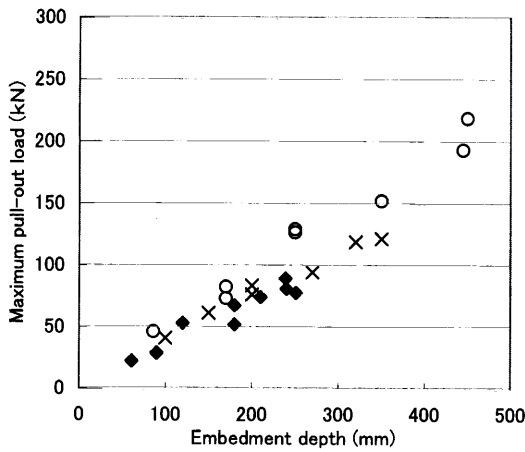


Fig. 10. Relationship between embedment depth and maximum pull-out load.

Legend : ◆ : Top thread diameter $R = 25$ mm
 × : Top thread diameter $R = 30$ mm
 ○ : Top thread diameter $R = 35$ mm.

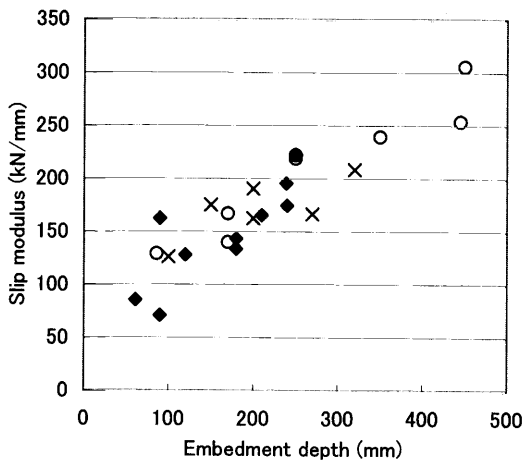


Fig. 11. Relationship between embedment depth and slip modulus.

Legend : ◆ : Top thread diameter $R = 25$ mm
 × : Top thread diameter $R = 30$ mm
 ○ : Top thread diameter $R = 35$ mm.

解析モデルである Volkersen モデルを適用することで推測でき、それによりラグスクリューボルトの引抜き性能を推測可能であるためだと考える。

5. 結 論

集成材の繊維方向に対し平行に埋込んだラグスクリューボルトの引抜き性能に関する理論式を、ラップジョイントの解析モデルである Volkersen モデルを参考に導いた。この理論式を用いて任意埋込み深

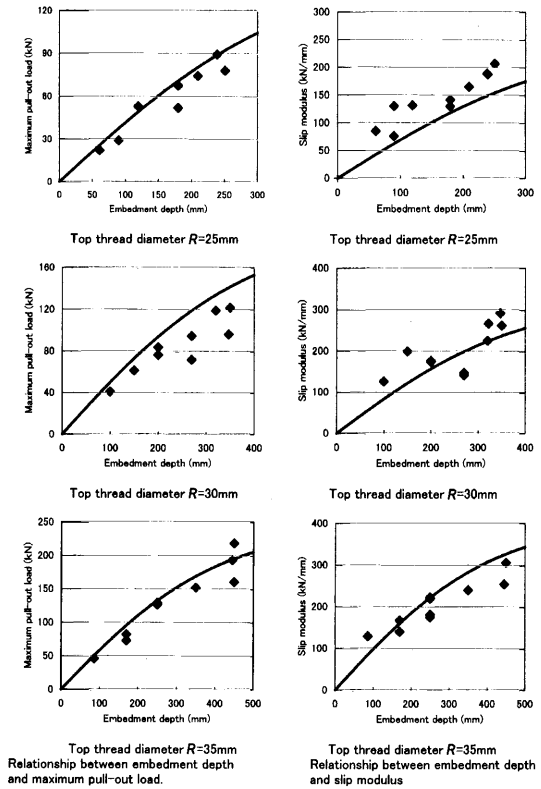


Fig. 12. Comparisons between theoretical results and experimental results.

Legend : ◆ : Experimental results
 - : Theoretical results.

さのラグスクリューボルトの最大引抜き荷重とすべり係数を予測するためには、ラグスクリューボルトの引抜き性能特有の物理常数であるせん断強度 f_p とせん断剛性係数 Γ が必要となる。そこで、これらの値を埋込み方向のせん断応力が均一に分布すると仮定できる15 mm厚の薄板実験から求めた。導いた各値を理論式に代入して算出した理論値と、山側直径25 mm, 30 mm, 35 mmのラグスクリューボルトを用い、様々な埋込み深さについて引抜き実験を行った結果を比較すると、比較的よく一致した。様々な木質材料について、ラグスクリューボルトの引抜き性能特有の物理常数である f_p と Γ の基準値を設けることで、この理論式を用いて、多様な条件で構成されるラグスクリューボルトの最大引抜き荷重とすべり係数を推測できると考える。

文 献

1) 中谷 誠, 小松幸平 : 木材学会誌 51, 125-130 (2005).

- 2) “木質構造設計規準・同解説”, 日本建築学会編, 1995, pp. 249-251, pp. 261-265.
- 3) 宮入裕夫: 接着 14, 82-87 (1970).
- 4) 宮入裕夫: 接着 14, 164-169 (1970).
- 5) 宮入裕夫: 接着 14, 275-280 (1970).
- 6) 宮入裕夫: 接着 14, 359-365 (1970).
- 7) Johansson, C.J., Serrano, E. Gustafsson, P.J., Enquist, B.: Proc. 28th Meeting CIB W18A, Copenhagen, Denmark, 1995, pp. 1-13.
- 8) 小泉章夫, ヨルゲン・イエンセン, 佐々木貴信, 飯島泰男, 田村靖夫: 木材学会誌 44, 41-48 (1998).
- 9) Jensen, J.L., Koizumi, A., Sasaki, T., Tamura, Y.: *Wood Science and Technology* 35, 73-83 (2001).