鋼棒挿入接着接合部の引抜耐力算定式の提案

PROPOSAL OF CALCULATION FORMULA FOR PULL-OUT STRENGTH
OF GLUED-IN ROD JOINT梶川久光^{*1}, 平賀祥大^{*2}

Hisamitsu KAJIKAWA and Shota HIRAGA

Glued-in rod joint are a type of joint used in timber structures and exhibit high rigidity and high strength. However, since a calculation formula for pull-out strength of glued-in rod joint has not been established, experiments are required to determine the pull-out strength and rigidity before actual use. For this study, we conducted a full-scale pull-out test with glued-in rod joint. To verify accuracy of the proposal formula, we compared that formula to the experimentally determined pull-out strength and the average shearing stress at the wood boundary. Additionally, a parameter study of the pull-out strength formula was conducted.

Keywords: Glued-in Rod Joint, Full Scale Test, Pull-out Strength, Calculation Formula, Parameter Study

鋼棒挿入接着接合部, 実大実験, 引抜耐力, 算定式, パラメトリックスタディ

1 はじめに

近年世界的に、地球環境問題の観点から、木質構造による中大規模建築物が盛んに推し進められている。しかし、構造的には、建築物の規模が大きくなってくると、接合部に生じる応力も大きくなり、高耐力・高剛性を発揮できる接合部が必要となってくる。木質構造分野では、長年この課題に悩まされている。そこで筆者らはこれらの問題を解決できるであろう鋼棒挿入接着接合（以降 GIR と呼ぶ）に着目することとした。

GIR は、木材に先穴を開け、そこに接着剤を注入して、さらにその中に全ねじボルトや異形鉄筋などの鋼棒を挿入して固めたものである。Fig.1 に本論文で扱う GIR の概要及び施工手順を示す。この接合方法は接着剤を充填していることにより、がた・あそびが少なく、接着層と木材の境界で木材がせん断破壊するまで耐力を維持することができ、高耐力・高剛性を実現している。

Fig. 1 Outline of Glued-in Rod and Manufacturing Approach

GIR の破壊性状には、a. 鋼棒の引張破断、b. 木材の引張破断、c. 木材と接着層の境界での木材のせん断破壊、d. 接着層のせん断破壊、e. 鋼棒が木材（接着剤）を引張荷重に対して垂直方向に押し広げる力による木材の割裂破壊が考えられるが、本論文で研究の対象としている引抜耐力とは、主に c についてのものである（d についても一部含まれる）。

GIR の引抜耐力の既往研究としては、Johansson、Gustafsson らの研究¹⁾があげられる。この研究では、Gustafsson が Volkersen モデル（リベット接合のせん断性能を評価するためのモデル²⁾）を用いて、ラップジョイントの引張性能の算定式³⁾に応用した手法を用いて GIR の引抜性能の評価を行っている。実験値と比較検証を行い良い整合性を得ている。しかし、ラップジョイントの評価式で接着層の厚みを無次元化しており、そのまま適用しているので GIR のモデル化の際に接着層に厚みを持たせていない。このことは、大きな課題として残っていると考える。この研究と同様の手法で、小泉らは縦継ぎ接合具としての木ダボの引抜き性能を⁴⁾、中谷らはラグスクリーボルトの引抜き性能を⁵⁾⁶⁾評価している。その他の研究としては、田中らの研究⁷⁾、野口らの研究⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾があるが、GIR 内部のせん断応力度分布を考慮した評価式の提案には至っていない。また、これらいずれの研究においても、埋込長さが浅い場合（500mm まで）のものしか扱っていないのが現状である。

他方で、現行の木質構造設計規準・同解説¹¹⁾では、GIR の強度性能は実験により確認することが望ましいとしている。

これらの状況を踏まえると、800mm 程度の埋込長さまで対応することができ、かつ、接合部内部のせん断応力度を考慮した GIR の

*1 明治大学理工学部建築学科 准教授・博士(工学)

*2 明治大学大学院理工学研究科建築・都市学専攻 大学院生

Assoc. Prof., Dept. of Arch., School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr.Eng.
Grad. Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ.

そこで、本論文では、以下のような研究目的を掲げる。Johansson、Gustafsson らの算定式¹⁾を改良して、Volkersen モデルを用いて接着層を円形に厚みを持たせた GIR のモデル化を行うことにより、引抜耐力算定式の提案を行う。さらに、埋込長さ (25mm~800mm)、母材断面、接着剤種類、鋼棒径をパラメータとした GIR の引抜実験を行いその引抜耐力を明らかにし、提案式と比較検証することでその適用性に関して明らかにする。加えて、提案式において各パラメータが引抜耐力に与える影響についてその特性を明らかにする。

ここでは、新しく提案する GIR の引抜耐力算定式 (以下、算定式と呼ぶ) についての導出を行う。GIR の引抜耐力算定用モデルを Fig.2、各部材 (接着層、木材、鋼棒) の変位量を Fig.3 に、各部材の応力度を Fig.4 に示す。導出に先立ち、各変数を以下に示す。

引抜荷重 P により、GIR の木材と鋼棒には引張応力度、接着層にはせん断応力度が生じる。これは、フックの法則により式 1、式 2 で表せ、接着層の平均せん断応力度は式 3 で表すことが出来る。式 1、式 2 の補足説明を付録 A：微小部分のひずみに示す。

$$\tau_{ave}(x) = G \frac{U_w(x) - U_s(x)}{t} \quad (3)$$

Fig. 3 Displacement amount of Each Element

$$(\sigma_s(x) + d\sigma_s(x) - \sigma_s(x))A_s = -\tau_s(x)2r_s\pi dx \quad (5)$$
$$\frac{d\sigma_s(x)}{dx} = -\frac{\tau_s(x)2r_s\pi}{A_s} \quad (7)$$
$$\frac{d^2 U_s(x)}{dx^2} = -\frac{\tau_s(x) 2r_s \pi}{E_s A_s} \quad (9)$$
$$\frac{d^2\tau_{ave}(x)}{dx^2} = \frac{G}{t} \left\{ \frac{\tau_w(x)2(r_s + t)\pi}{E_w A_w} + \frac{\tau_s(x)2r_s\pi}{E_s A_s} \right\} \quad (10)$$

ここで、 $\tau_{ave}(x)$ 、 $\tau_w(x)$ 、 $\tau_s(x)$ の関係を考えると、 $\tau_{ave}(x)$ は $\tau_w(x)$ と $\tau_s(x)$ の平均値なので、式 11 となる。

$$\tau_{ave}(x) = \frac{\tau_w(x) + \tau_s(x)}{2} \quad (11)$$

また、 $\tau_w(x)$ 、 $\tau_s(x)$ の関係は、Fig.2 の木材に開けた先穴の周長と、鋼棒の最外径の周長の比から考えて、式 12 となる。

$$\frac{\tau_w(x)}{\tau_s(x)} = \frac{2r_s\pi}{2(r_s+t)\pi} = \frac{r_s}{r_s+t} \quad (12)$$

式 11、式 12 より $\tau_w(x)$ 、 $\tau_s(x)$ は $\tau_{ave}(x)$ を用いて式 13、式 14 となる。

$$\tau_w(x) = \frac{2r_s}{2r_s+t} \tau_{ave}(x) \quad (13)$$

$$\tau_s(x) = \frac{2(r_s+t)}{2r_s+t} \tau_{ave}(x) \quad (14)$$

式 10 に式 13、式 14 を代入すると式 15 となる。

$$\frac{d^2 \tau_{ave}(x)}{dx^2} = \frac{G}{t} \left\{ \frac{4r_s(r_s+t)\pi}{2r_s+t} \left(\frac{1}{E_w A_w} + \frac{1}{E_s A_s} \right) \right\} \times \tau_{ave}(x) \quad (15)$$

ここで、式 16 の様に k とおくと、式 15 は式 17 と表せる。

$$k = \sqrt{\frac{G}{t} \cdot \frac{4r_s(r_s+t)\pi}{2r_s+t} \left(\frac{1}{E_w A_w} + \frac{1}{E_s A_s} \right)} \quad (16)$$

$$\frac{d^2 \tau_{ave}(x)}{dx^2} - k^2 \tau_{ave}(x) = 0 \quad (17)$$

ここで、式 17 は微分方程式となっており、A と B を任意定数とすると、その一般解は式 18 となる。

$$\tau_{ave}(x) = A \cosh(kx) + B \sinh(kx) \quad (18)$$

式 3 より、

$$U_w(x) = \frac{t}{G} \tau_{ave}(x) + U_s(x) \quad (19)$$

式 19 を x で微分すると式 20 となる。

$$\frac{dU_w(x)}{dx} = \frac{t}{G} \cdot \frac{d\tau_{ave}(x)}{dx} + \frac{dU_s(x)}{dx} \quad (20)$$

式 20 に式 1、式 2 を代入すると、式 21 となる。

$$\sigma_w(x) = E_w \left(\frac{t}{G} \cdot \frac{d\tau_{ave}(x)}{dx} + \frac{\sigma_s(x)}{E_s} \right) \quad (21)$$

式 18 を、式 21 に代入すると、式 22 となる。

$$\sigma_w(x) = E_w \left\{ \frac{tk}{G} (A \sinh(kx) + B \cosh(kx)) + \frac{\sigma_s(x)}{E_s} \right\} \quad (22)$$

ここで、引抜荷重 P が加わる場合の境界条件として、 $x=0$ の時 $\sigma_s(x) = \frac{P}{A_s}$ 、 $\sigma_w(x) = 0$ 、 $x=L$ の時 $\sigma_s(x) = 0$ 、 $\sigma_w(x) = \frac{P}{A_w}$ を式 22 に代入すると、 A 、 B が求まり、式 23、式 24 となる。

$$A = \frac{PG}{tk \sinh(kL)} \left\{ \frac{1}{E_s A_s} \cosh(kL) + \frac{1}{A_w E_w} \right\} \quad (23)$$

$$B = -\frac{PG}{tk E_s A_s} \quad (24)$$

式 18 に式 23、式 24 を代入すると式 25 となる。

$$\tau_{ave}(x) = \frac{PG}{tk} \left\{ \frac{1}{\sinh(kL)} \left(\frac{1}{E_s A_s} \cosh(kL) + \frac{1}{A_w E_w} \right) \cosh(kx) - \frac{1}{E_s A_s} \sinh(kx) \right\} \quad (25)$$

また、式 16 を次のように変形させ、

$$\frac{G}{t} = \frac{(2r_s+t)k^2}{4r_s(r_s+t)\pi} \cdot \frac{E_s A_s E_w A_w}{E_s A_s + E_w A_w} \quad (26)$$

式 25 に式 26 を代入すると、式 27 となる

$$\tau_{ave}(x) = \frac{Pk}{\pi} \cdot \frac{2r_s+t}{4r_s(r_s+t)} \cdot \frac{E_s A_s E_w A_w}{E_s A_s + E_w A_w} \cdot \frac{1}{\sinh(kL)} \times \left(\frac{\cosh(kL) \cosh(kx) - \sinh(kL) \sinh(kx)}{E_s A_s} + \frac{\cosh(kx)}{E_w A_w} \right) \quad (27)$$

加法定理を用いると式 27 は式 28 となる。

$$\tau_{ave}(x) = \frac{Pk}{\pi} \cdot \frac{2r_s+t}{4r_s(r_s+t)} \cdot \frac{E_s A_s E_w A_w}{E_s A_s + E_w A_w} \cdot \frac{1}{\sinh(kL)} \times \left(\frac{\cosh(kL-kx)}{E_s A_s} + \frac{\cosh(kx)}{E_w A_w} \right) \quad (28)$$

式 13、式 14 に式 28 を代入すると、 $\tau_s(x)$ 、 $\tau_w(x)$ はそれぞれ式 29、式 30 で表される。

$$\tau_s(x) = \frac{Pk}{\pi} \cdot \frac{1}{2r_s} \cdot \frac{E_s A_s E_w A_w}{E_s A_s + E_w A_w} \cdot \frac{1}{\sinh(kL)} \times \left(\frac{\cosh(kL-kx)}{E_s A_s} + \frac{\cosh(kx)}{E_w A_w} \right) \quad (29)$$

$$\tau_w(x) = \frac{Pk}{\pi} \cdot \frac{1}{2(r_s+t)} \cdot \frac{E_s A_s E_w A_w}{E_s A_s + E_w A_w} \cdot \frac{1}{\sinh(kL)} \times \left(\frac{\cosh(kL-kx)}{E_s A_s} + \frac{\cosh(kx)}{E_w A_w} \right) \quad (30)$$

$x=0$ もしくは $x=L$ の時、せん断応力度 $\tau_{ave}(x)$ 、 $\tau_s(x)$ 、 $\tau_w(x)$ は最大値となる。また、木材のせん断強度が鋼棒や接着層のそれと比べ低い場合、 $\tau_w(x)$ が $F_{s(w)}$ に達したとき引抜耐力 P_{max} となる。よって式 30 の P に P_{max} を、 $\tau_w(x)$ に木材のせん断強度 $F_{s(w)}$ を代入し整えることで、式 31、式 32 で表せる。

$E_s A_s \leq E_w A_w$ の時、

$$P_{max} = \frac{F_{s(w)} \pi 2(r_s+t) (E_s A_s + E_w A_w) \sinh(kL)}{k(E_w A_w \cosh(kL) + E_s A_s)} \quad (31)$$

$E_s A_s \geq E_w A_w$ の時、

$$P_{max} = \frac{F_{s(w)} \pi 2(r_s+t) (E_s A_s + E_w A_w) \sinh(kL)}{k(E_w A_w + E_s A_s \cosh(kL))} \quad (32)$$

なお、基本的に式 31、式 32 で GIR の引抜耐力は決まるが、接着層が高温となるなどして、接着層のせん断強度が木材のせん断強度より低くなるとき、GIR の引抜耐力は接着層のせん断強度によって決まる。その場合、式 29 の P に P_{max} を、 $\tau_s(x)$ に接着層のせん断強度 $F_{s(a)}$ を代入し整えることで、式 33、式 34 で表せる。

$E_s A_s \leq E_w A_w$ の時、

$$P_{max} = \frac{F_{s(a)} \pi 2r_s (E_s A_s + E_w A_w) \sinh(kL)}{k(E_w A_w \cosh(kL) + E_s A_s)} \quad (33)$$

$E_s A_s \geq E_w A_w$ の時、

$$P_{max} = \frac{F_{s(a)} \pi 2r_s (E_s A_s + E_w A_w) \sinh(kL)}{k(E_w A_w + E_s A_s \cosh(kL))} \quad (34)$$

3 鋼棒挿入接着接合部の引抜実験 12)13)14)15)

3.1 実験概要

Fig.5 に実験概要を示す。Base の H 形鋼の上に 2 つの支点を設け、1 つの支点にはセンターホール形の油圧ジャッキを取り付け、もう一方は試験体に取り付けた側材を引っ掛けるための反力点としている。加力は理研機器株式会社製の 500kN センターホール油圧ジャッキ (DC5-200) を用いて、ホールに通したボルトを押し出す形で行った。また、理研機器株式会社製の油圧ユニット (MP-6ALS-A) を用いてほぼ一定の速度を心掛け加力した。加力方法は単調引張とし、埋込長さが 100mm 以下の試験体は、1kN/sec、その他の試験体は 2kN/sec を目途に行った。最大荷重を迎え、GIR の引抜破壊が生じ、荷重がほぼ無くなったところで終了した。計測方法については、荷重は 500kN 圧縮センターホール型荷重計 (CLC-500KNA) を用いて測定し、変位はひずみ式変位計 (CDP-50) を用いて、鋼棒の木口面から 30mm の位置と木口面から 100mm の木材の位置 (試験体の埋込長さが 100mm 未満のものは、木口面の位置とした) の相対変位を測定した。変位計は試験体の左右に取り付いており、2 つの平均を取って、鋼棒及び木材の変位とした。各計測データの集積はデジタル動歪み計測器 (DRA-101C) によって 1msec 毎に行った。なお、計測器はすべて株式会社東京測器研究所の製品である。

3.2 試験体

試験体一覧を Table1、試験体名を Fig.6、試験体詳細図を Fig.7 に示す。試験体のパラメータは Table1 に示すように、鋼棒の埋込長さ、鋼棒径、木材断面、接着剤種類とした。埋込長さについては 25、50、100、200、300、400、600、800mm の 8 種類、木材断面は 90mm 角と 120mm 角の 2 種類 (JAS 同一等級構成構造用集成材、E120-F375)、鋼棒は M24、M27 全ねじボルト (JIS G4052、SCM-435H) の 2 種類、接着剤は株式会社オーシカ製のオーシカダイナ TE243-L2 (エポキシ樹脂接着剤) と日本 HILTI 株式会社製の RE-500 (エポキシ樹脂接着剤) の 2 種類とし、各 3 体ずつ計 120 体の実験を行った。接着層の厚みは鋼棒径に関わらず 2mm とした。木材の中心に鋼棒が M24 の場合は直径 28mm、M27 の場合は 31mm の先穴を開け、先穴に接着剤を一定量入れたのちに鋼棒を先穴に対してまっすぐ差し込み製作した。反力用の側材は、厚さ 38mm のスプルース材をウレタン系接着剤で固定した。

3.3 実験結果

破壊性状を Photo1 に示す。すべての試験体の破壊性状は、木材と接着層の境界で、木材がせん断破壊を生じる「引抜破壊」であった。これは、接着層の破壊面に木材が多く付着していることから確認をした。また、埋込長さが深いと、引抜破壊が生じた後に木口面が割れることもあった。埋込長さが深いほど応力集中が大きくなることが原因ではないかと考える。

荷重変位関係を Fig.8 に示す。例として GLT-DF090-E120-M24-O-50-3 及び GLT-DF120-E120-M27-O-800-2 を示す。埋込長さが浅いものは荷重変位関係は、比例関係を保ったまま最大荷重を迎えるが、埋込長さが 200mm 以上のものは、荷重変位関係が荷重低下をしないで真横に横すべりする現象が確認された。これは、ある荷重で接合部内部の一部にせん断破壊が生じたものの、即座にせん断応力が再分配されていると考えられる。変形能に関しては、埋込長さ

Fig. 5 Outline of Pull-out Test

Table 1 Parameter and Number of Test Specimens

		Timber Rod	Cross Section [mm] Nominal Diameter	90 × 90		120 × 120	
				M24	M27	M24	M27
A d h e s i v e	HILTI RE-500	Embedment Length [mm]	300	3	3	3	3
			400	3	3	3	3
			600	3	3	3	3
			800	3	3	3	3
	Oshikadine TE-243 L2	Embedment Length [mm]	25	3		3	
			50	3		3	
			100	3		3	
			200	3		3	
			300	3	3	3	3
			400	3	3	3	3
			600	3	3	3	3
			800	3	3	3	3
			25	3		3	
			50	3		3	
			100	3		3	
			200	3		3

Fig. 6 Name of Test Specimens

Fig. 7 Detail View of Pull-out Test Specimens

Photo 1 Destruction Property

Fig. 8 Load-Displacement relationship

Fig. 9 Comparisons of Average $\tau_{w(x)}$ between Test Results and Proposal Formula(Fit)

が深くなるにつれ一部がせん断破壊し再分配される個所が多くなるため上がっていくと考えられる。

接着層と木材の境界における付着面積あたりのせん断応力度（この値は、 $\tau_{w(x)}$ の平均であり、以降、木材境界の平均せん断応力度と呼ぶ）と埋込長さの関係を Fig.9 に示す。また、最大荷重（引抜耐力）と埋込長さの関係を Fig.10 に示す。凡例は、黒点が実験値、白丸が実験値の平均値、実線が算定式である。また、グラフの中に決定係数 R^2 、接着層のせん断弾性係数 G [N/mm²]、木材のせん断強度 $F_{s(w)}$ [N/mm²] の値を示す。さらに、実験におけるパラメータの影響を考察する目的で、Fig.9、Fig.10 の中に示している算定式の値をまとめたものを Fig.11 に示す。算定式は、実験値との相関関係が非常に良いため実験値の比較検証に用いることとした。なお、ここでは、実験結果についてのみ考察し実験値と算定式の比較検証は4章で行うこととする。

木材境界の平均せん断応力度は、すべての試験体で埋込長さが深

Fig. 10 Comparisons of Pull-out Strength between Test Results and Proposal Formula(Fit)

Fig. 11 Parameter Comparisons of Test Result (Proposal Formula)

くなるにつれて小さくなった。このことから埋込長さが深くなるにつれて、接合部内部の応力度分布に大きく偏りが生じていると考えられる。理論（2章）と合わせて考察すると、木口面付近と埋込長さが一番深い位置に応力集中が生じ、埋込長さが深くなるほど、中

Table 2 List of Test Result

Name of Test Body	No	Moisture Content [%]	Temper- ture [°C]	Adhesion area [mm²]	Pull-out Strength							Average Shear Stress			
					Test Result [kN]	Average [kN]	Proposal Formula [kN]	Average/ Proposal Formula	Statistics			Test Result [N/mm²]	Average [N/mm²]	Proposal Formula [N/mm²]	Average/ Proposal Formula
									Standard Devita- tion	Confidence interval 75%					
										95% Lower Tolerance Limit	50% Lower Tolerance Limit				
GLT-DF090-E120- M24-SC-O-25	1	5.2	22.8	2199	16.84	19.61	19.30	1.02	2.31	12.33	18.53	7.66	8.92	8.78	1.02
	2	5.0	22.7		19.50							8.87			
	3	5.6	22.9		22.51							10.24			
GLT-DF090-E120- M24-SC-O-50	1	6.5	23.8	4398	39.51	38.78	38.33	1.01	2.17	31.95	37.76	8.98	8.82	8.71	1.01
	2	6.7	24.2		35.84							8.15			
	3	6.0	24.6		41.00							9.32			
GLT-DF090-E120- M24-SC-O-100	1	5.2	23.6	8796	80.85	75.24	74.52	1.01	4.85	59.95	72.96	9.19	8.55	8.47	1.01
	2	6.3	19.6		75.85							8.62			
	3	6.9	20.9		69.01							7.85			
GLT-DF090-E120- M24-SC-O-200	1	4.8	21.3	17593	117.69	129.80	134.62	0.96	14.07	85.48	123.19	6.69	7.38	7.65	0.96
	2	4.6	21.8		122.19							6.95			
	3	3.6	23.7		149.53							8.50			
GLT-DF090-E120- M24-SC-O-300	1	4.9	23.6	26389	157.37	158.64	175.64	0.90	15.07	111.18	151.56	5.96	6.01	6.66	0.90
	2	5.4	22.2		140.86							5.34			
	3	6.9	27.5		177.70							6.73			
GLT-DF090-E120- M24-SC-O-400	1	6.6	22.3	35186	220.88	191.60	200.88	0.95	25.43	111.47	179.65	6.28	5.45	5.71	0.95
	2	5.2	22.7		195.04							5.54			
	3	5.5	22.7		158.87							4.52			
GLT-DF090-E120- M24-SC-O-600	1	5.1	21.5	52779	263.39	249.50	223.85	1.11	10.54	216.30	244.54	4.99	4.73	4.24	1.11
	2	6.8	22.5		247.22							4.68			
	3	5.3	22.6		237.88							4.51			
GLT-DF090-E120- M24-SC-O-800	1	※1													
	2	5.6	22.9	70372	266.55	267.89	231.02	1.16	-	-	-	3.79	3.81	3.28	1.16
	3	6.1	23.2		269.22							3.83			
GLT-DF120-E120- M24-SC-O-25	1	5.7	22.7	2199	22.67	18.72	18.00	1.04	2.86	9.72	17.38	10.31	8.51	8.19	1.04
	2	6.4	22.6		17.50							7.96			
	3	6.0	22.7		16.00							7.28			
GLT-DF120-E120- M24-SC-O-50	1	6.2	22.1	4398	35.34	33.56	35.82	0.94	1.37	29.24	32.91	8.04	7.63	8.14	0.94
	2	5.2	21.7		32.00							7.28			
	3	5.9	22.1		33.34							7.58			
GLT-DF120-E120- M24-SC-O-100	1	5.6	22.4	8796	73.18	72.01	70.21	1.03	5.57	54.46	69.39	8.32	8.19	7.98	1.03
	2	6.4	22.0		64.68							7.35			
	3	6.0	21.8		78.18							8.89			
GLT-DF120-E120- M24-SC-O-200	1	6.2	22.7	17593	145.70	134.36	130.29	1.03	8.71	106.93	130.27	8.28	7.64	7.41	1.03
	2	5.8	22.7		124.53							7.08			
	3	5.7	22.5		132.86							7.55			
GLT-DF120-E120- M24-SC-O-300	1	5.8	22.8	26389	182.87	166.42	175.51	0.95	12.37	127.45	160.61	6.93	6.31	6.65	0.95
	2	5.3	22.0		153.03							5.80			
	3	5.6	22.2		163.37							6.19			
GLT-DF120-E120- M24-SC-O-400	1	5.6	22.5	35186	173.37	194.82	206.61	0.94	18.51	136.51	186.12	4.93	5.54	5.87	0.94
	2	6.0	22.3		192.54							5.47			
	3	6.0	22.7		218.54							6.21			
GLT-DF120-E120- M24-SC-O-600	1	5.6	22.9	52779	250.05	247.16	239.56	1.03	9.21	218.13	242.83	4.74	4.68	4.54	1.03
	2	6.9	23.3		234.71							4.45			
	3	6.0	23.0		256.72							4.86			
GLT-DF120-E120- M24-SC-O-800	1	7.1	22.7	70372	276.22	273.94	252.25	1.09	8.39	247.51	270.00	3.93	3.89	3.58	1.09
	2	6.5	22.1		262.72							3.73			
	3	6.9	23.6		282.89							4.02			
GLT-DF090-E120- M24-SC-H-300	1	9.8	11.8	26389	148.17	138.72	138.06	1.00	7.76	114.29	135.08	5.61	5.26	5.23	1.00
	2	8.6	12.6		138.83							5.26			
	3	9.6	13.6		129.17							4.89			
GLT-DF090-E120- M24-SC-H-400	1	8.6	11.2	35186	137.50	149.00	159.90	0.93	9.07	120.43	144.74	3.91	4.23	4.54	0.93
	2	8.4	11.0		159.67							4.54			
	3	8.8	11.0		149.83							4.26			
GLT-DF090-E120- M24-SC-H-600	1	8.7	7.0	52779	184.83	184.78	181.15	1.02	1.98	178.55	183.85	3.50	3.50	3.43	1.02
	2	8.9	11.6		187.17							3.55			
	3	9.3	8.4		182.33							3.45			
GLT-DF090-E120- M24-SC-H-800	1	8.4	12.8	70372	218.17	205.11	188.44	1.09	21.11	138.61	195.19	3.10	2.91	2.68	1.09
	2	9.5	17.5		221.83							3.15			
	3	9.8	15.2		175.33							2.49			
GLT-DF120-E120- M24-SC-H-300	1	8.9	9.1	26389	171.67	158.39	158.73	1.00	23.53	84.28	147.33	6.51	6.00	6.01	1.00
	2	8.5	8.2		178.17							6.75			
	3	9.4	9.0		125.33							4.75			
GLT-DF120-E120- M24-SC-H-400	1	8.6	15.0	35186	185.33	183.44	180.31	1.02	16.65	130.99	175.62	5.27	5.21	5.12	1.02
	2	9.5	10.4		162.17							4.61			
	3	6.8	8.4		202.83							5.76			
GLT-DF120-E120- M24-SC-H-600	1	9.1	9.9	52779	180.50	183.94	199.21	0.92	8.00	158.74	180.18	3.42	3.49	3.77	0.92
	2	10.3	9.8		195.00							3.69			
	3	8.0	10.2		176.33							3.34			
GLT-DF120-E120- M24-SC-H-800	1	9.7	14.2	70372	240.83	222.39	204.82	1.09	17.52	167.19	214.15	3.42	3.16	2.91	1.09
	2	10.3	15.1		227.50							3.23			
	3	8.0	15.0		198.83							2.83			

Table 2 List of Test Result(continued)

Name of Test Body	No	Moisture Content [%]	Temperature [°C]	Adhesion area [mm²]	Pull-out Strength							Average Shear Stress			
					Test Result [kN]	Average [kN]	Proposal Formula [kN]	Average/ Proposal Formula	Statistics			Test Result [N/mm²]	Average [N/mm²]	Proposal Formula [N/mm²]	Average/ Proposal Formula
									Standard Deviation	Confidence interval 75%					
										95% Lower Tolerance Limit	50% Lower Tolerance Limit				
GLT-DF090-E120-M27-SC-O-300	1	5.7	9.9	29217	136.03	155.73	158.42	0.98	13.96	111.77	149.17	4.66	5.33	5.42	0.98
	2	6.4	9.9		165.20							5.65			
	3	6.0	10.0		166.03							5.68			
GLT-DF090-E120-M27-SC-O-400	1	6.2	7.4	38956	166.53	178.20	182.04	0.98	12.61	138.49	172.28	4.27	4.57	4.67	0.98
	2	5.2	7.9		172.37							4.42			
	3	5.9	9.4		195.71							5.02			
GLT-DF090-E120-M27-SC-O-600	1	5.6	7.3	58434	191.37	184.87	204.48	0.90	11.50	148.64	179.46	3.27	3.16	3.50	0.90
	2	6.4	5.8		168.70							2.89			
	3	6.0	7.0		194.54							3.33			
GLT-DF090-E120-M27-SC-O-800	1	6.2	8.0	77911	241.88	248.47	212.08	1.17	13.83	204.91	241.97	3.10	3.19	2.72	1.17
	2	5.8	7.4		235.88							3.03			
	3	5.7	7.9		267.72							3.44			
GLT-DF120-E120-M27-SC-O-300	1	5.8	8.9	29217	167.03	173.93	177.42	0.98	6.93	152.10	170.68	5.72	5.95	6.07	0.98
	2	5.3	7.5		171.37							5.87			
	3	5.6	8.7		183.37							6.28			
GLT-DF120-E120-M27-SC-O-400	1	5.6	9.0	38956	200.40	212.63	208.78	1.02	12.32	173.81	206.84	5.14	5.46	5.36	1.02
	2	6.0	9.8		229.55							5.89			
	3	6.0	9.4		208.40							5.35			
GLT-DF120-E120-M27-SC-O-600	1	5.6	7.2	58434	218.54	212.60	242.13	0.88	25.05	133.70	200.83	3.74	3.64	4.14	0.88
	2	6.9	8.2		179.37							3.07			
	3	6.0	9.5		239.88							4.11			
GLT-DF120-E120-M27-SC-O-800	1	7.1	10.6	77911	285.39	299.05	255.15	1.17	-	-	-	3.66	3.84	3.27	1.17
	2	6.5	7.5		312.73							4.01			
	3				※2										
GLT-DF090-E120-M27-SC-H-300	1	9.8	14.8	29217	180.50	150.37	153.03	0.98	24.66	72.69	138.78	6.18	5.15	5.24	0.98
	2	8.6	10.0		120.10							4.11			
	3	9.6	7.6		150.50							5.15			
GLT-DF090-E120-M27-SC-H-400	1	8.6	11.8	38956	170.70	177.07	174.51	1.01	9.15	148.26	172.77	4.38	4.55	4.48	1.01
	2	8.4	10.9		170.50							4.38			
	3	8.8	11.0		190.00							4.88			
GLT-DF090-E120-M27-SC-H-600	1	8.7	11.8	58434	209.70	198.67	194.12	1.02	11.38	162.81	193.32	3.59	3.40	3.32	1.02
	2	8.9	11.6		203.30							3.48			
	3	9.3	8.3		183.00							3.13			
GLT-DF090-E120-M27-SC-H-800	1	8.4	6.4	77911	185.80	194.83	200.41	0.97	7.43	171.43	191.34	2.38	2.50	2.57	0.97
	2	9.5	9.6		194.70							2.50			
	3	9.8	8.5		204.00							2.62			
GLT-DF120-E120-M27-SC-H-300	1	8.9	9.8	29217	158.20	140.23	152.23	0.92	13.54	97.57	133.87	5.41	4.80	5.21	0.92
	2	8.5	9.8		125.50							4.30			
	3	9.4	11.0		137.00							4.69			
GLT-DF120-E120-M27-SC-H-400	1	8.6	11.7	38956	174.90	190.67	176.09	1.08	13.75	147.36	184.21	4.49	4.89	4.52	1.08
	2	9.5	10.1		208.40							5.35			
	3	6.8	9.8		188.70							4.84			
GLT-DF120-E120-M27-SC-H-600	1	9.1	10.3	58434	229.70	219.53	199.36	1.10	8.17	193.80	215.69	3.93	3.76	3.41	1.10
	2	10.3	11.7		209.70							3.59			
	3	8.0	10.4		219.20							3.75			
GLT-DF120-E120-M27-SC-H-800	1	9.7	8.9	77911	171.70	174.27	207.43	0.84	12.66	134.38	168.31	2.20	2.24	2.66	0.84
	2	10.3	8.3		160.20							2.06			
	3	8.0	7.9		190.90							2.45			

※2:Defective Construction

間部には応力があまり発生せずにその差が大きくなっていると考えられる。埋込長さが無限大になると木材境界の平均せん断応力度は0に漸近すると考えられる。また、埋込長さが0の場合の値、すなわち平均値と最大値が同じ値となっているこの値は、接着層と木材の境界におけるせん断強度、今回の場合では木材のせん断強度と考えられる。

引拔耐力と埋込長さの関係については、引拔耐力は埋込長さが100mm 程度まで埋込長さに比例して上がっている。埋込長さが100mm を超えたのちは、その後緩やかなカーブを描くように上がっていき、埋込長さ 800mm の辺りでほぼ横ばいとなった。このことから埋込長さを深くしても、ある一定の深さで引拔耐力はほぼ頭打ちになり、長さ当たりの耐力（長さ効率）は大きく低下していく。また、接着剤の違いによる引拔耐力への影響は、RE-500(日本 HILTI 株式会社)よりも TE-243L2(株式会社オーシカ)を用いた試験体の引

抜耐力が大きくなる傾向になった。木材のせん断強度 $F_{s(w)}$ が異なると、引拔耐力の比較を行うことは困難であるが、GLT-DF120-M24-SC-O($F_{s(w)} = 8.2$, $G = 20.4$) と GLT-DF120-M24-SC-H($F_{s(w)} = 8.1$, $G = 31.3$) の場合においては、木材のせん断強度 $F_{s(w)}$ はほぼ同じで、接着層のせん断弾性係数 G が1.5 倍となっており、比較することが出来る。埋込長さが浅い範囲ではせん断剛性による引拔耐力への影響は小さいが、埋込長さが深いと、その影響が顕著に表れ、接着層のせん断弾性係数 G が小さいと引拔耐力は大きくなり、埋込長さ 800mm の時は、約 50kN 程の差が生じている。接着層のせん断弾性係数 G の影響は、木材境界の平均せん断応力度でも同じことが言える。接着層が周辺部材より相対的にせん断剛性が小さいと、接着層内部に応力度集中が生じにくくなる影響であると考えられる。木材の断面の違いによる引拔耐力への影響は、ほとんど見られなかった。これは、木材の断面には、せん断応力度が生じる範囲（上限）が

あり、今回のパラメータの場合はそれがおよそ 90 角の内接円の範囲であったのではないかと考えられる。中谷らの研究⁵⁾⁶⁾の木材の影響範囲は先穴の 3 倍程度であるという研究は、本実験でも妥当な結果となった。今後、この応力の影響範囲については、FEM 解析及び実験によって検証する必要がある。鋼棒径の違いによる引抜耐力への影響は、木材のせん断強度がばらついているために、少し傾向は表れているが、はっきりとした差は見られなかった。今後、本実験の試験体において材料実験を行い、ばらつきを補正し特性を検証する予定である。

実験結果一覧を Table2 に示す。表には、試験体の含水率、試験時の温度、接着層と木材の境界における付着面積（先穴の周長に埋込長さを乗じたもの）、引抜耐力（実験値）、その平均値、引抜耐力（提案式）、実験値と提案式の比、標準偏差、信頼水準 75%の 95%下側許容限界値、50%下側許容限界値、木材境界の平均せん断応力度（実験値）、その平均値、木材境界の平均せん断応力度（提案式）、実験値と提案式の比を示している。引抜耐力と木材境界の平均せん断応力度については、すでに、Fig.9、10、11 で考察をしているので、ここでは、統計処理した値（標準偏差、許容限界値）について考察を行う。

ここで、標準偏差、信頼水準 75%の 95%及び 50%下側許容限界値の算出は、木質構造接合部設計マニュアル¹⁶⁾に記載されている式 35、式 36 により行った。定数 K は、95%下側許容限界値のとき 3.152、50%下側許容限界値のとき 0.471 である。試験体不良及び施工不良だった試験体のデータは、同じパラメータの残りの 2 体の平均値とし、実験平均値、標準偏差、許容限界値を算出した。また、算定式の値の算出方法については 4 章で説明する。

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{35}$$

$$TL = x_i - K \cdot s \tag{36}$$

s : 標本標準偏差 n : 標本数
 x_i : 実験値 $\bar{x}$: 実験値の平均値
 TL : 許容限界値 K : 試験体数に応じた定数

引抜耐力の標準偏差は低いものは 1.37、高いものは 25.43 となっており、その差が非常に大きい。同じロッドの材料を用い同じ様な環境で試験体を作成したが、筆者たちによる手作業での施工ではどうしてもばらつきに差が生じてしまった。GIR は、工場等において、材料、環境を管理し施工することが、ばらつきを抑えるには重要であると考えられる。特に接着剤に関する施工管理が大きく影響を及ぼしていると考ええる。また、接着剤には温度依存性があるため、せん断強度やせん断弾性係数には実験時の気温が大きく影響してくる。特に GIR の引抜耐力には接着層のせん断弾性係数が大きく影響を及ぼすと考えられるので、気温によるばらつきに関しても今後検討する必要がある。

設計用の値として、許容限界値についても示した。ばらつきが同程度ある想定的设计値となっていると考ええる。今後は、施工管理におけるばらつきも考慮して、算定式を用いて設計を行うことを考えており、算定式の精度に関しては 4 章で証明しているが、設計における材料定数の入力値に関しては今後の課題となっている。

4 算定式の検証

4.1 算定式の精度に関する検証

Table3 に算定式の入力値を示す。鋼棒及び木材のヤング係数 E_s 、 E_w には公称値を使用する。木材の半径 r_w は、木材の中心から一番近い縁までの距離と先穴の半径の 3 倍の小さい方の値とした。鋼棒の半径 r_s は、ねじの山側の最外径とした。接着層の厚みは、実験で使った試験体と合わせ、2mm とした。木材のせん断強度 $F_{s(w)}$ 及び接着層のせん断弾性係数 G は算定式と実験値に対する差が最も小さくなる値とした。ここで、木材のせん断強度 $F_{s(w)}$ は木材工業ハンドブック¹⁷⁾に載っているペイマツのせん断強度、7.8N/mm² に近い値を示し、概ね値は正しいと考えられる。また、接着層のせん断弾性係数は一般的に明らかとなっていないが、本検証の結果 20.0~30.0N/mm² の間にせん断弾性係数の値があると考えられる。接着層のせん断弾性係数の検証は今後の課題である。

Table 3 Input Data

	$F_{s(w)}$ [N/mm ²]	G [N/mm ²]	E_w [N/mm ²]	A_w [mm ²]	E_s [N/mm ²]	A_s [mm ²]	r_s [mm]	r_w [mm]	t [mm]
GLT-DF090-E120-M24-SC-O	8.8	28.9	1.20 × 10 ⁴	4926.0	2.05 × 10 ⁵	353	12.0	42.0*	2.0
GLT-DF120-E120-M24-SC-O	8.2	20.4							
GLT-DF090-E120-M24-SC-H	6.7	24.9							
GLT-DF120-E120-M24-SC-H	8.1	31.3							
GLT-DF090-E120-M27-SC-O	7.1	26.1		5607.0		459	13.5	45.0	
GLT-DF120-E120-M27-SC-O	7.5	21.8		6038.1				46.5*	
GLT-DF090-E120-M27-SC-H	7.0	28.6		5607.0				45.0	
GLT-DF120-E120-M27-SC-H	6.7	26.9		6038.1				46.5*	

※Reach the limit

Fig.9、Fig.10 の実線は、算定式を示しており、決定係数 R^2 の数値をグラフ中に示した。Fig.9 についての実験値と算定式を比較すると、どの試験体も決定係数 R^2 の値が 0.95 を超えており、算定式はかなり高い精度で実験値を表現できていると考えられる。Fig.10 の引抜耐力についても同様で、決定係数 R^2 の値は低いもので約 0.948、高いものでは 0.998 となっており、算定式は GIR の引抜耐力をかなり高い精度で表現できている。このことより、本提案式は、設計に十分に適用できる精度を持っていると考えられる。今後は設計に用いる際の入力値の検証を行っていく必要があると考える。

4.2 算定式によるパラメトリックスタディ

Fig.12 に木材境界の平均せん断応力度及び引抜耐力についてのパラメトリックスタディの結果を示す。 $F_{s(w)}$ 、 G 、 t 、 $E_w A_w$ 、 $E_s A_s$ をそれぞれ変化させた場合に、算定式による木材境界の平均せん断応力度及び引抜耐力に与える影響について検証を行った。各パラメータは、Table3 で示した GLT-DF120-E120-M24-SC-O を基準値として変化させた。ヤング係数と各部材の断面積は算定式中で $E_w A_w$ 、 $E_s A_s$ とセットで表れているので一つの係数と考えた。また、実際には、木材のせん断強度が変われば木材のヤング係数が変わったり、接着層の厚みが変われば、木材の断面積が変化したりするが、今回は各パラメータの影響のみを検証するために、変化させるパラメータ以外のものは変化しないと仮定して検証を行った。

Fig. 12 Parameter Study of Proposal Formula (L:Average Shear Stress,R:Pull-out Strength)

木材のせん断強度 $F_s(w)$ の比較検証は基準値と基準値の 1.5 倍、1/2 倍の場合で行った。木材のせん断強度が大きくなればなるほど、比例的に接合部の引抜耐力は大きくなった。当然ではあるが、木材のせん断強度が接合部の引抜耐力に及ぼす影響は非常に大きい。

接着層のせん断弾性係数 G の比較検証は、樹脂系材料のせん断弾性係数の範囲及び温度依存によって考えられる値の変化を考慮して、基準値の 1/60 倍～3 倍の範囲で行った。せん断弾性係数が大きいほど、GIR の引抜耐力は小さくなり、せん断弾性係数が小さいほど引抜耐力は大きくなった。これは、その周辺部材に対して接着層のせん断剛性が相対的に大きいと、接合部内部で応力集中が生じやすくなるのが原因と考えられる。また、せん断弾性係数が相対的に 0 に近づくと、引抜耐力は埋込長さに対して比例的に大きくなり

高耐力の接合部が期待できる。このことは、せん断強度は木材より大きく、そして、せん断弾性係数なるべく小さくした接着剤の開発が、GIR の引抜耐力を向上させるということである。特に、埋込長さが深いと顕著な差がでる。

接着層の厚み t の比較検証は、基準値と基準値を 2 倍、1/2 倍した場合で行った。接着層の厚みが厚くなるほど、引抜耐力は大きくなった。これは接着層の厚みが厚くなることにより、せん断力を負担する付着面積が大きくなるからである。また、接着層の厚みを厚くすることにより、相対的に接着層のせん断剛性が小さくなり、引抜耐力が大きくなる影響もあると考える。

木材のヤング係数及び断面積 E_wA_w の比較検証は基準値と基準値の 2 倍、1/2 倍の場合で行った。 E_wA_w の値が大きくなるほど引抜耐力は大きくなった。しかし、 E_wA_w が E_sA_s の値を超えてからは耐力の大きくなる量は少なくなっていった。

鋼棒のヤング係数及び断面積 E_sA_s の比較検証は基準値と基準値の 2 倍、1/2 倍の場合で行った。 E_sA_s が 7.24×10^7 のとき、引抜耐力は大きくなった。 E_sA_s の値が大きくなれば、耐力が大きくなるといった傾向は表れなかった。なお、提案式の理論と合わせて考察すると、 E_wA_w 及び E_sA_s については、その値がほぼ同じとなる時、先端と奥端のせん断応力が同じような値となるために最も効率が良くなると考えられる。

今後の課題は、FEM 解析と算定式による、GIR 内部のせん断応力度分布を考慮した詳細なパラメトリックスタディにより比較検証を行っていく予定である。

5 まとめ

GIR の引抜実験及び引抜耐力算定式の提案に関する検証において、明らかとなった知見を以下に示す。

- Volkersen モデルを用いて接着層を円形に厚みを持たせた GIR モデルを考案し、引抜耐力算定式の導出を行った。
- GIR の引抜実験から引抜耐力及び木材境界の平均せん断応力度と埋込長さの関係を明らかにした。また、接着剤の施工管理が重要であることを示唆するとともに、今回の施工管理状況における標準偏差、許容限界値を示した。
- 実験値と算定式の引抜耐力を比較検証し、算定式が実験値を高い精度で再現できることを明らかにした。
- 算定式によるパラメトリックスタディを行い、算定式中の各変数が引抜耐力及び木材境界の平均せん断応力度にどのような影響を与えるのかについて明らかにした。特に、接着層のせん断弾性係数が小さいほど引抜耐力は大きくなり、埋込長さが深いほどその影響は顕著に表れる。

今後の課題としては、算定式を設計に用いる場合の入力値の検証が挙げられ、特に接着層のせん断強度、せん断弾性係数、及び温度依存性などの各種依存性については検証が必要である。また、FEM 解析により GIR 内部のせん断応力度分布を明らかにし、算定式の精度に関して検証を行う予定である。そして、引抜耐力だけでなく引抜剛性に関する算定式の提案も行っていく予定である。

謝辞

鋼棒挿入接着接合部の引抜実験を実施するにあたり、接着剤の提供については(株)オーシカ様、木材の提供については(株)ミサワホーム総合研究所様、施工指導については同研究所小川春彦氏、実験では、明治大学梶川研究室の卒業生である松山遊氏、佐藤優成氏、木村遼太郎氏、佐藤浩暉氏及び学生諸氏に心より感謝申し上げます。

参考文献

- Johansson, C.J. et al.: Axial strength of glued-in bolts. Calculation model based on non-linear fracture mechanics -A preliminary study, Proc. 28th Meeting CIB W18A, Copenhagen, 28-7-9, pp. 1-13, 1995
- Volkersen, O. et al.: Die Neitkraftverteilung in zugbeanspruchter Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten, Luftfahrtforschung, 15, pp. 42-47, 1938
- Gustafsson, P.J. et al.: Analysis of Generalized Volkersen-joints in Terms of Non-linear Fracture Mechanics, in: Verchery, G. and Cardon, A.H, Mechanical Behavior of Adhesive Joints, Pluralis, 1987
- Koizumi, A. et al.: Withdrawal Properties of Hardwood Dowels in End Joints I. Evaluation of shear performance of adhesives, Mokuzai Gakkaishi, Vol. 44, No.1, pp. 41-48, 1998
小泉章夫、他 4 名、縦継ぎ接合具としての木ダボの引抜き性能 (第 1 報) 接着剤のせん断性能の評価, 木材学会誌 Vol. 44, No.1, pp. 41-48, 1998
- Nakatani, M. et al.: Mechanism of Pull-out Performance of Lagscrew-bolted Timber Joints I. Effects of lead hole diameter, embedment depth, embedment direction and edge distance on pull-out performance, Mokuzai Gakkaishi, Vol. 51, No. 2, pp. 125-130, 2005
中谷誠、他 1 名: ラグスクリューボルトの引抜き性能発現機構 (第 1 報) 先穴直径、埋込み深さ、埋込み方向、縁距離が引抜き性能に与える影響, 木材学会誌 Vol. 51, No. 2, pp. 125-130, 2005
- Nakatani, M. and et al.: Mechanism of Pull-out Performance of Lagscrew-bolted Timber Joints II. Development of a theory of pull-out properties parallel to the grain, Mokuzai Gakkaishi, Vol. 51, No. 5, pp. 311-317, 2005
中谷誠、他 1 名: 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 Vol. 51, No. 5, pp. 311-317, 2005
- Tanaka, K. et al.: Proposal of Calculating Method for Ultimate Strength of Glued-in Rod Joint Using Material Strength of Wood, Journal of Structural Engineering, Vol. 56B, pp. 303-308, 2010.3
田中圭、他 4 名: 木材の材料強度を考慮した GIR 継手接合部の耐力算定法の提案, 構造工学論文集 Vol. 56B, pp. 303-308, 2010.3
- Motooka, J. et al.: Research on basic properties of Bonding Joint part where screw bolt was buried, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures-III, pp. 67-68, 2007.7
本岡淳一、他 4 名: 全ねじボルト埋込接着接合部の基本性状に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, 構造-III, pp. 67-68, 2007.7
- Motooka, J. et al.: Research on basic properties of Bonding Joint part where screw bolt was buried Part2. The Effect of Adherence Area on Pull Out Load, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures-III, pp. 315-316, 2008.7
本岡淳一、他 4 名: 全ねじボルト埋込接着接合部の基本性状に関する研究 (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, 構造-III, pp. 315-316, 2008.7
- Motooka, J. et al.: Research on basic properties of Bonding Joint part where screw bolt was buried Part3. Estimation approach of maximum tensile load with FEM, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures-III, pp. 115-116, 2009.7
野口弘行、他 3 名: 全ねじボルト埋込接着接合部の基本性状に関する研究 (その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, 構造-III, pp. 115-116, 2009.7
- Architectural Institute of Japan.: Standard for Structural Design of Timber Structures, Architectural Institute of Japan, Fourth edition, pp. 316, 2013.10
日本建築学会 (編): 木質構造設計標準・解説 第 4 版第 4 刷, 日本建築学会, pp. 316, 2013.10
- Shota, H. Hisamitsu, K. et al.: Study on Pull-out Strength and Rigidity of Glued-in Rod Joints. Part1 Experiment of Pull-out of Glued-in Rod Joints Using Long Fully Threaded Bolt, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures-III, pp. 575-576, 2018.7
平賀祥大、梶川久光、他 1 名: 鋼棒挿入接着接合部の引き抜き耐力及び剛性に関する研究, その 1 全ねじ長尺ボルトを用いた鋼棒挿入接着接合部の引き抜き実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, 構造-III, pp. 575-576, 2018.7
- Shota, H. Hisamitsu, K. et al.: Study on Pull-out Strength and Rigidity of Glued-in Rod Joints. Part2 Comparison of Yield Strength Evaluation Formula by Volkersen Method and Experimental Value, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures-III, pp. 151-152, 2019.7
平賀祥大、梶川久光、他 1 名: 鋼棒挿入接着接合部の引き抜き耐力及び剛性に関する研究, その 2 Volkersen 理論を用いた耐力評価法と実験値の比較, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, 構造-III, pp. 151-152, 2019.7
- Shota, H. Hisamitsu, K. et al.: Study on Pull-out Strength and Rigidity of Glued-in Rod Joints. Part3 Pull-out Experiment of Glued-in Rod Joints, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, C-1, Structures-III, pp. 125-126, 2020.7
平賀祥大、梶川久光、他 1 名: 鋼棒挿入接着接合部の引き抜き耐力及び剛性に関する研究, その 3 鋼棒挿入接着接合部の引き抜き実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1 分冊, 構造-III, pp. 125-126, 2020.7
- Hisamitsu, K. Shota, H. et al.: Study of Pull-out Strength of Glued-in Rod Joints. World Conference on Timber Engineering, 2018.8
- Architectural Institute of Japan.: Design Manual for Engineered Timber Joints, Architectural Institute of Japan, First edition, pp. 316, 2009.11
日本建築学会 (編): 木質構造接合部設計マニュアル, 日本建築学会, 第 1 版, pp. 316, 2009.11
- Forestry and Forest Products Research Institute.: Mokuzai Kogyo Handbook, Maruzen Publishing, 2004
(独) 森林総合研究所: 木材工業ハンドブック, 丸善株式会社, 2004

付録 A: 微小部分のひずみ

微小部分のひずみの関数 $\varepsilon(x)$ と、移動量の関数 $U(x)$ の関係を考える。Fig13 に微小部分の変形前、変形後について示す。

Fig. 13 Before and After Deform of Minute Part

微小部分 (変形後) の長さ $dx(1 + \varepsilon(x))$ は、微小部分 (変形前) の長さ dx に、微小部分の伸び $U(x + dx) - U(x)$ を足したものである。式 37 とする。

$$dx(1 + \varepsilon(x)) = dx + U(x + dx) - U(x) \quad (37)$$

両辺を dx で割り、 $\varepsilon(x)$ で整理すると、

$$\varepsilon(x) = \frac{U(x + dx) - U(x)}{dx} \quad (38)$$

dx が微小であるため、式 38 の両辺を、 $dx \rightarrow 0$ の極限をとると、

$$\lim_{dx \rightarrow 0} \varepsilon(x) = \lim_{dx \rightarrow 0} \frac{U(x + dx) - U(x)}{dx} \quad (39)$$

$$\Rightarrow \varepsilon(x) = \frac{dU(x)}{dx} \quad (40)$$

PROPOSAL OF CALCULATION FORMULA FOR PULL-OUT STRENGTH OF GLUED-IN ROD JOINT

Hisamitsu KAJIKAWA ^{*1} and *Shota HIRAGA* ^{*2}

^{*1} Assoc. Prof., Dept. of Arch., School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr.Eng.

^{*2} Grad. Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ.

In recent years, the construction of medium- to large-scale buildings with timber structures is being promoted enthusiastically around the world from the perspective of global environment issues. However, in terms of the structure, as the scale of the building increases, the stress on the joints also increases, presenting the need for joints with high strength and rigidity. This issue has long been a concern in the field of timber structures. Based on these circumstances, the authors decided to focus on glued-in rod joint. Currently, since a formula to calculate the pull-out strength of glued-in rod has not been established, experiments are required to determine the pull-out strength and pull-out rigidity before actual use.

This paper contains the following research objectives. A formula to calculate the pull-out strength is proposed by improving the formula of Johansson, Gustafsson, et al. to model a glued-in rod with an adhesive layer that has a round thickness using the Volkersen model. Furthermore, the pull-out strength is clarified through pull-out test of the glued-in rod joint with embedment length (25mm~800mm), base material cross section, adhesive type, and rod diameter as the parameters, in order to verify the results against the proposed formula to shed light on its applicability. In addition, the properties of the impact that each parameter in the proposed formula has on pull-out strength are clarified.

The insights that became clear through pull-out test of glued-in rod joint and verification of the proposed formula for calculating pull-out strength are as follows. A calculation formula for pull-out strength was derived by devising a model for glued-in rod inserted with an adhesive layer that has a round thickness using the Volkersen model. The relationship between pull-out strength, the average shear stress at the wood boundary per unit of adhesion area when under maximum proof stress, and embedment length was clarified through pull-out test of the glued-in rod joint. By comparing the values from the experiment with the pull-out strength from the proposal formula, it was confirmed that the proposal formula can be recreated with good precision. Its applicability was proven. The parameters for the formula were studied to clarify how each variable in the formula affect pull-out strength and the average shear stress at the wood boundary per unit of adhesion area when under maximum proof stress. To be specific, the smaller the modulus of rigidity of the adhesive layer, the greater the pull-out strength, and the deeper the embedment length, the more significant the impact.

Future tasks include the proposal of a formula to calculate pull-out rigidity in addition to pull-out strength and verification of the input values when using the calculation for design.

(2020 年 7 月 10 日原稿受理, 2020 年 12 月 7 日採用決定)