奨励研究助成実施報告書

2020 年度		
木材が繊維方向めり込み抵抗する接合部の剛性評価法		
戸塚 真里奈		
東京大学大学院 農学生命科学研究科 木質材料学研究室		
(千葉大学大学院 工学研究院 助教)		
奨励研究		
その他		
80 万円		

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

()は、報告書提出時所属先。

大林財団 2 0 20 年度奨励研究助成実施報告書

所属機関名 千葉大学(元東京大学) 申請者氏名 戸塚真里奈

研究課題

木材が繊維方向めり込み抵抗する接合部の剛性評価法

近年増加する中大規模木質構造では接合部に高い剛性が求められる。木材の圧縮剛性は繊維直交方向よりも繊維方向が高いため、繊維方向圧縮で抵抗する引きボルト接合部やドリフトピン接合部は中大規模木質構造によく用いられる。この場合、座金やドリフトピンの直下にある木材の繊維方向のめり込み剛性(または部分圧縮剛性、面圧剛性:本報では同義とする)が重要になる。しかし、現状では引きボルト式接合部や直径の大きいドリフトピンを用いた場合の剛性評価法は確立されていない。本研究では理論的なアプローチ(ダメージゾーン理論)によりさまざまな形状・寸法の接合部に適応できる木材の繊維方向めり込み剛性評価法を提案した。また、引きボルトとドリフトピンの単一接合部の剛性が提案する評価法で評価できることを示した。

1. 研究の目的

2010年の「公共建築物等における木材利用の促進」法公布を受け、中高層の木質構造建物が増加している。中高層の木質構造では、低層で使われていた仕様規定の接合部ではなく新たに開発された性能規定の接合部が多く用いられる。この場合、接合部の剛性・耐力を正確に把握する必要がある。木材の繊維方向めり込み剛性 & は平井・小松式(式 1) 1)で算出されている。

$$k_0 = \frac{E_0}{(31.6 + 10.9d)} \tag{1}$$

ここで、 E_0 は木材の繊維方向ヤング係数、dは接合具(ドリフトピンなど)の直径。式 1 は直径 3.3 ~18mm の丸鋼と丸鋼直径の 2~10 倍の厚さの木材による面圧試験に基づき提案された式である。しかし、引きボルト接合部の座金による木材の繊維方向めり込み剛性(図 1)や上記の寸法を超える範囲のドリフトピンなどの丸鋼接合部においても使用されている現実がある。そこで、本研究では理論的なアプローチによりさまざまな形状・寸法の接合部に適応できる木材の繊維方向めり込み剛性評価法の確立を目指す。

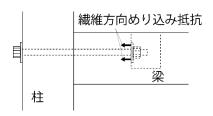


図1 引きボルト接合部

【参考文献】

1) 日本建築学会:木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法- (2006)

2. 研究の経過

1.課題の整理

既往文献調査をもとに、木材の繊維方向のめり込み剛性を評価する上での課題点を整理した。結果は「3.研究の成果」で示す。

2.木材の繊維方向のめり込み剛性評価法の提案

課題点をふまえて木材の繊維方向のめり込み剛性評価法を最強リンクモデルによるダメージゾーンの評価法をもとに考案した。結果は「3.研究の成果」で示す。

3.引きボルト接合部とドリフトピン接合部の剛性評価法

本研究では中高層木質構造によく用いられる2種類の接合方法(引きボルト接合,ドリフトピン接合)を対象に実験的研究を行った。研究期間内(1年間)では基本となる単一接合具(引きボルト1式,ドリフトピン1本)の繊維方向めり込み剛性の評価法を確立した。

引きボルト接合部の実験風景と試験体一覧を図 2,表 1 に示す。引きボルト接合部の実験は単調引張 載荷とした。試験体数は 18 体である。

ドリフトピン接合部の実験風景と試験体一覧を図 3,表 2 に示す。ドリフトピン接合部の実験は単調 圧縮載荷とした。試験体数は 93 体である。

表 1 引きボルト接合部試験体一覧

		Size of steel plate		PC steel bars
Series	Processing	a×b	Thickness	Diameter
		$[mm^2]$	[mm]	[mm]
K40ceT	Hollow	40×40	16	13
K78ceT	Chisel	78×78	22	23
K150ceT	mortiser	150×150	32	23
H40ceT		40×40	16	13
H78ceT	Hundegger	78×78	22	23
H150ceT		150×150	32	23

表 2 ドリフトピン接合部試験体一覧

Series	Species	Diameter of pin	Thickness	
Series		[mm]	[mm]	
9-30		9	30	
9-60			60	
9-90			90	
9-120			120	
12-30	.	12	30	
12-60	Japanese		60	
12-90	ceder,		90	
12-120	Japanese cypress, Douglas fir, Pinus		120	
16-30		• •	16	30
16-60			60	
16-90	sylvestris		90	
16-120	Sylvesuls	50115	120	
20-30		20	30	
20-60			60	
20-90			90	
20-120			120	



図 2 引きボルト式接合 部引張試験



図 3 ドリフトピン接合 部圧縮試験

3. 研究の成果

1.課題の整理

木材の繊維方向のめり込み剛性を評価する上で、最も基本的な課題は下記の二つに整理される。

第一は、金物と接触する部分の木口面付近に生じる低剛性部分(ダメージゾーン 2)、図 4)をどのように評価するかである。ダメージゾーンは木材を切断した際に、繊維が切断され表面が凸凹することが原因で生じると思われる。筆者はダメージゾーンの長さは接触面積が大きくなるほどばらつき、かつ、平均値が長くなることを示した 3)。また、この寸法効果は、ワイブル分布を用いた Strongest link model (最強リンクモデル) 4 により説明できることを示した 6)。

第二は、接触部分以外の周辺部(余長)の影響をどのように評価するかである。筆者らは繊維方向 圧縮では繊維直交方向圧縮と異なり、接触部分以外の周辺部が剛性に与える影響は小さいことを指摘 した⁵⁾。

以上の点を踏まえ、本研究では、

- ①接触部分の木口付近に生じるダメージゾーンの変形が、座金やドリフトピンの直下にある木材の繊維方向のめり込み変形と等しい
- ②接触部分以外の周辺部はめり込み剛性にほぼ影響しない

と仮定し、ダメージゾーン理論を用いた引きボルト接合部および曲げ降伏型接合部のめり込み剛性評価法を提案した。また、提案する評価法を引きボルト接合部や曲げ降伏型接合部の実験に適用し、評価法の妥当性を検証した。

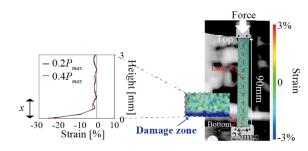


図4 繊維方向圧縮される木材のダメージゾーン

2.木材の繊維方向のめり込み剛性評価法の提案

木材の繊維方向のめり込み剛性評価法を下記の手順で考案した。

2.1 ダメージゾーンの長さ x (図 4)

図 5 にダメージゾーンの繊維の凹凸(図 6)のモデル図を示す。ダメージゾーンの長さは接触断面が増加するとばらつきが大きくなり、その平均値は長くなる寸法効果がある 3 。この寸法効果は Strongest link model 4)により評価できる。 Strongest link model は Weakest link model(最弱リンクモデル) 6 の対極のモデルであり、 Fig. 2 のようにある特性(本研究ではダメージゾーンの長さ)が最も強い(長い)要素によって決まるモデルである。単位面積における要素の長さ y が長さ x 以下になる確率は次式の 2 パラメータワイブル分布になるとする。

$$\mathbf{E}(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m} \tag{2}$$

ここで、xo:尺度パラメータ m:形状パラメータ

Fig. 2 のようなモデルではすべての要素長さyが長さx以下となる場合、ダメージゾーンの長さはxになる。よって、n個の要素が存在するとき、すべての要素長さyが長さx以下となる確率E(x)は次式の累積分布関数で表される。

$$E(x) = \left\{1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m}\right\}^n \tag{3}$$

接触面積 Aの試験体の場合,n は A に置き換えることができ,ダメージゾーンの長さが x になる,すべての要素長さ y が長さ x 以下となる確率 E(x) は次式で表される。

$$E(x) = \left\{1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m}\right\}^A \tag{4}$$

また、Weakest link model では異なる接触面積 A_1,A_2 について、同じ確率 E(x)では次式が成立することが知られる。

$$\int_{A_1} \left(\frac{x}{x_0}\right)^m dA = \int_{A_2} \left(\frac{x}{x_0}\right)^m dA \tag{5}$$

$$\frac{x_1}{x_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{-\frac{1}{m}} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^k \tag{6}$$

ここで、 x_1, x_2 : それぞれ接触面積 A_1, A_2 のダメージゾーン長さ k: 寸法効果パラメータ

Strongest link model では接触面積 A_1,A_2 におけるダメージゾーンの長さの関係を下記のような手順で算出できる。まず、式 4 より次式が得られる。

$$E(x)^{\frac{1}{A}} = 1 - e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m} \tag{7}$$

$$1 - E(x)^{\frac{1}{A}} = e^{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m} \tag{8}$$

$$\ln\left\{1 - \boldsymbol{E}(x)^{\frac{1}{A}}\right\} = -\left(\frac{x}{x_0}\right)^m\tag{9}$$

$$\left[-\ln\left\{1 - E(x)^{\frac{1}{A}}\right\}\right]^{\frac{1}{m}} = \frac{x}{x_0}$$
 (10)

接触面積 A_1,A_2 における m,x_0 , E(x) が等しい場合, 接触面積 A_1,A_2 の試験体のダメージゾーンの長さ x_1,x_2 の関係は次式になる。

$$\frac{x_1}{x_2} = \left[\frac{\ln\left\{1 - E(x)^{\frac{1}{A_1}}\right\}}{\ln\left\{1 - E(x)^{\frac{1}{A_2}}\right\}} \right]^{\frac{1}{m}} = \left[\frac{\ln\left\{1 - E(x)^{\frac{1}{A_1}}\right\}}{\ln\left\{1 - E(x)^{\frac{1}{A_2}}\right\}} \right]^k$$
(11)

よって、接触面積Aのダメージゾーンの長さxは次式で表される。

$$x = \left[\frac{\ln\left\{1 - E(x)^{\frac{1}{A_1}}\right\}}{\ln\left\{1 - E(x)^{\frac{1}{A_2}}\right\}} \right]^k x_s$$
 (12)

ここで、E(x): 累積確率 x_s : 基準試験体のダメージゾーン長さ A_s : 基準試験体の接触面積 ただし、基準試験体のダメージゾーン長さ x_s と寸法効果パラメータ k は加工方法により変化する。 確率 E(x)を 50%、基準試験体の接触面積を 25mm 角(ASTM D143 7 の繊維方向圧縮試験より)とした場合、式 12 は次式になる。

$$x = \left\{ \frac{\ln\left(1 - 0.5^{\frac{1}{A}}\right)}{-6.8} \right\}^{k} x_{s} \tag{13}$$

例えば、丸鋸機械加工では x_s =約 0.9mm、 k=0.42~0.62、卓上丸鋸手加工では x_s =約 0.9mm、 k=3.5 となる 6 。

2.2 ダメージゾーンのヤング係数

弾性域におけるダメージゾーンのひずみは Fig.1 に示すように、木口面へ近づくほど大きくなる。本報では評価を簡易にするため、ダメージゾーンのヤング係数を一定とみなす。このとき、ダメージゾーンのヤング係数 $E_{L,d}$ は次式で表される。

$$E_{L,d} = \alpha E_L \tag{14}$$

 α は文献 6 よりスギ、ヒノキ、スプルースで約 0.018 であった。

2.3 繊維方向のめり込み剛性 (ダメージゾーンの剛性)

式14より繊維方向のめり込み剛性(ダメージゾーンの剛性) Ka は次式で表される。

$$K_0 = \frac{\alpha E_L A}{x} \tag{15}$$

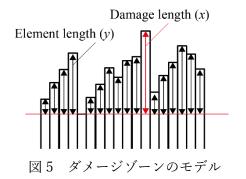




図6 木口面(ダメージゾーン)のマイクロ写真

3.引きボルト接合部およびドリフトピン接合部への適応性

Strongest link model に基づく引きボルト接合部の座金のめり込み剛性(式 16-18)を提案し、提案式は実験を精度よく評価出来ることを示した(図 7)。

$$K_0 = \frac{0.018E_L A}{x} \tag{16}$$

角ノミ
$$x = \left\{ \frac{\ln\left(1 - 0.5^{\frac{1}{A}}\right)}{-6.8} \right\}^{4.7}$$
 2.3 (17)

$$\mu - \beta - \chi = \left\{ \frac{\ln\left(1 - 0.5^{\frac{1}{A}}\right)}{-6.8} \right\}^{2.6} 4.6$$
(18)

また、ドリフトピン接合部のめり込み剛性は接合具径および材厚が大きくなると減少する寸法効果を持ち、その寸法効果を Strongest link model に基づきダメージゾーンとして評価出来ることを示した(図 8)。提案する評価式を下記に示す。

$$K_0 = k_0 A' = \frac{0.018 E_L A'}{r} \tag{19}$$

$$x = \left\{ \frac{\ln\left(1 - 0.5^{\frac{1}{A'}}\right)}{-6.8} \right\}^{3.4}$$
 (20)

ただし、基準試験体のダメージゾーン長さ xsと寸法効果パラメータ k は加工方法により変化する値で

ある。従って、今後も実験データを蓄積し検討することが望ましい。

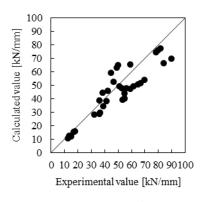


図 7 提案式による計算値と実験値の比較(引きボルト接合部の初期剛性)

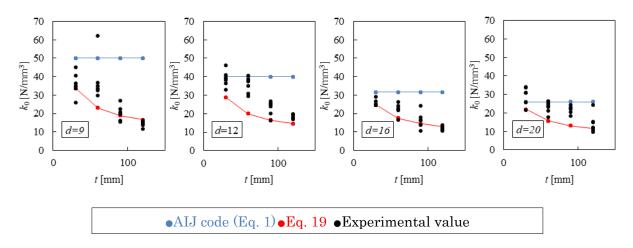


図8 提案式による計算値と実験値の比較(ドリフトピン接合部のめり込み係数)

【参考文献】

- 2) Xavier, J., de Jesus, A. M. P., Morais J. J. L. and Pinto J. M. T.: Stereovision measurements on evaluating the modulus of elasticity of wood by compression tests parallel to the grain. Construction and Building Materials, Vo.26, No.1, pp.207–215, 2012.1
- 3) 戸塚真里奈:構造用木質材料における縦圧縮の力学特性、東京大学大学院農学生命科学研究科博士論文、2021.3
- 4) Gustafsson P. J., Jockwer R., Serrano E. and Steiger R.: A strongest link model applied to fracture propagating along grain, Proceedings of Meeting 48. International network on timber engineering research, Timber Scientific, pp. 351-366, 2015.8
- 5) Totsuka M., Jockwer R., Aoki K. and Inayama M.: Experimental study on partial compression parallel to grain of solid timber, J. Wood Sci., Vo.67, No.39, 2021.5
- 6) Weibull W.: A statistical theory of the strength of materials, R. Swedish Inst. Eng. Res., No.151, pp.1-45s, 1939
- 7) ASTM D143-14, Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

4. 今後の課題

本研究では引きボルトとドリフトピンの単一接合部における繊維方向めり込み剛性について新たな評価法を提案した。今後は接合部全体としての評価に応用する予定である。また、申請者が提案した Strongest link model によるダメージゾーン理論は木材が繊維方向に圧縮される様々な接合部の剛性評価に適用できると考えられ、引き続き検討を進める予定である。