

令和 5 年 5 月 31 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04796

研究課題名（和文）円形孔を複数有する集成材梁の孔配置と耐力に関する研究

研究課題名（英文）A study on hole arrangement and bearing capacity of glued laminated timber beams with multiple round holes

研究代表者

岡本 滋史 (Okamoto, Shigefumi)

大阪公立大学・大学院生活科学研究科・講師

研究者番号：20769806

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、円形孔を複数設けた集成材梁の割裂耐力の設計法を確立することを目的としている。最初に、孔間距離が短くなるにしたがって孔周りに作用する繊維直交方向の最大引張応力度が増加する割合を有限要素解析を行って定式化し、割裂耐力の設計法を提案した。そして、円径孔を1つまたは2つ設けた集成材梁の3点曲げ試験を実施し、実験値と計算値を比較することにより、提案した設計法の妥当性を確認した。また、耐力が低下しない孔間距離の提案も行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の有孔梁の指針類は、「枠組壁工法建築物設計の手引」か「JIS A 3301」に示されている仕様規定制限のみで、有孔梁の耐力算定方法が確立されていないのが現状である。住宅などの建築現場では安全性の検討を行わずに切り欠きや孔が設けられ場合があり、適切な評価法が望まれてきた。本研究では、円径孔が一つの場合と二つの場合の耐力算定方法を提案し、この成果を応用することにより有孔梁の簡易な設計法や配置基準を検討することができ、安全な建築物の普及が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to establish a design method for the splitting strength of glued laminated timber beam with multiple round holes. First, a design method for splitting strength is proposed by formulating the ratio of the maximum tensile stress perpendicular to the grain acting around the hole as the distance between the holes decreases, using finite element analysis. Then, a three-point bending tests were conducted on a glued laminated wood beam with two round holes, and the experimental and calculated values were compared to confirm the validity of the proposed design method. In addition, we proposed a distance between the holes that would not reduce the bearing capacity.

研究分野：木質構造

キーワード：円形孔 集成材 割裂

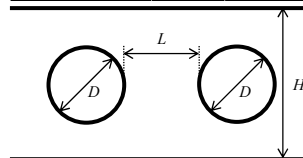
様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

集成材の梁に孔を設ける場合、国内外の指針などでは孔の配置基準が規定されているため、その基準に従って孔を設けることになる。配置基準をまとめると表1のとおりである。孔を複数設けた場合の耐力の低減方法は定められていないため、国内外の指針などで規定されている配置基準は孔の間隔は耐力が低下しないための最低限の距離であるといえる。しかし、指針で定められている孔間隔は様々であり、孔径によらず一定の値であるため、孔径ごとに耐力が低下しない孔間隔についての正しい値がわからない。また、円形孔を複数設けた場合の耐力に関する研究は非常に少ないが、表1の配置基準を守って孔を複数設けると耐力低下することが報告されている。以上のことから、集成材梁に円形孔を複数有する場合には、配置基準の見直し、または、現行の配置基準による割裂耐力の低減方法を定める必要があるといえる。

表1 孔の配置基準

Design code	D (mm)	L (mm)
Limträhandbok <sup>1)</sup>	$\leq 0.5H$	$\geq H$
DIN 1052: 2004-08 <sup>2)</sup>	$\leq 0.4H$	$\geq H$ $\geq 300\text{mm}$
DIN 1052: 2008-08 <sup>3)</sup>	$\leq 0.15H$	$\geq 1.5H$ $\geq 300\text{mm}$
DIN EN 1995-1-1/NA <sup>4)</sup>	$\leq 0.15H$	$\geq 1.5H$ $\geq 300\text{mm}$
2018年 枠組壁工法建築設計の手引き <sup>5)</sup>	$\leq H/3$	$\geq H$
JIS A 3301: 2015 <sup>6)</sup>	$\leq H/4$ $\leq 150\text{mm}$	$\geq 2D$ $(D \leq 30\text{mm})$



2. 研究の目的

本研究では、円形孔を2つ設けた場合の孔径Dと孔間距離Lに応じた割裂耐力の低減率と孔径に応じて耐力がほぼ低下しない孔間距離を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

以下に示す(1)、(2)について検討した。

(1) 円形孔を2つ設けた場合の割裂耐力の推定

試験体仕様を表2に、試験体図を図1に示す。試験体は梁幅Bが105mm、梁せいHが150mm、300mm、600mmのオウシュウアカマツ同一等級構成集成材E105-F345とした。孔径Dは0.4H、0.2H、0.1Hの3種類とし、孔間距離Lは0.2H~Hの間で孔径毎に設定した。比較のため用意した孔が1つの試験体は図2の加力点側の①の孔のみ設けた。試験体は各3体である。変位は加力点の梁のたわみを計測した。孔周りの亀裂の発生については目視で確認を行った。

表2 試験体仕様

B (mm)	H (mm)	D	Number of holes	L	a (mm)	b (mm)	c (mm)	
105	300	0.4H	1	-	-	-	-	
			2	H	880	510	770	
				0.5H	(2.93H)	(1.70H)	(2.57H)	
		0.2H	1	-	-	-	-	-
			2	H	790	480	700	
				0.4H	(2.63H)	(1.60H)	(2.33H)	
	0.1H	1	-	-	-	-	-	
		2	0.5H	595	465	585		
			0.2H	(1.98H)	(1.55H)	(1.95H)		
	600	0.4H	1	-	-	1760	1020	1540
			2	H	(2.93H)	(1.70H)	(2.57H)	
		0.4H	1	-	-	440	255	385
2			H	(2.93H)	(1.70H)	(2.57H)		

Glued laminated timber composed of homogeneous-grade  
Strength grade: E105-F345  
Wood species: Scots pine (*Pinus sylvestris*)

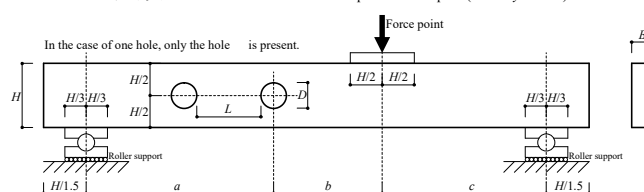


図1 試験体

実大実験で得られた割裂耐力は、文献9)で提案した円形孔が1つの場合の割裂耐力算定式に円形孔を2つ設けた場合の応力割増率を考慮して推定した。応力割増率は、実大実験の仕様の有孔梁の孔周りに作用する横引張応力度 $\sigma$ とせん断応力度 $\tau$ を図2に示す2次元有限要素解析で求め、(孔が2つの場合の最大応力度) / (孔が1つの場合の最大応力度) を応力割増率として設定した。有孔梁の耐力評価法に必要な繊維直交方向引張強さ $F_{t90}$ は文献7)、モードIの破壊エネルギー $G_{Ic}$ は文献8)の要素実験を実大実験に用いた材料から切り出して行った。

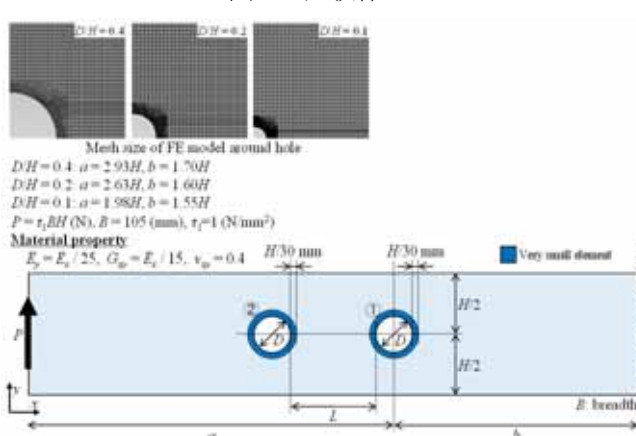


図2 実大実験仕様の有限要素解析

(2) 円形孔を2つ設けた場合の割裂耐力の低減率及び耐力がほぼ低下しない孔間距離の提案

孔径Dと孔間距離Lを変数とした円形孔を1つ及び2つ設けた集成材梁の孔周りに作用する横引張応力度 $\sigma$ とせん断応力度 $\tau$ を図3に示す2次元有限要素解析により求め、最大応力度の割増率を定式化する。D/Hは0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、Lは0.2H、0.3H、0.4H、0.5H、0.75H、1.0H、1.25H、1.5H、1.75H、2.0H、2.25H、2.5Hとした。

4. 研究成果

以下に(1)、(2)の検討結果を示す。

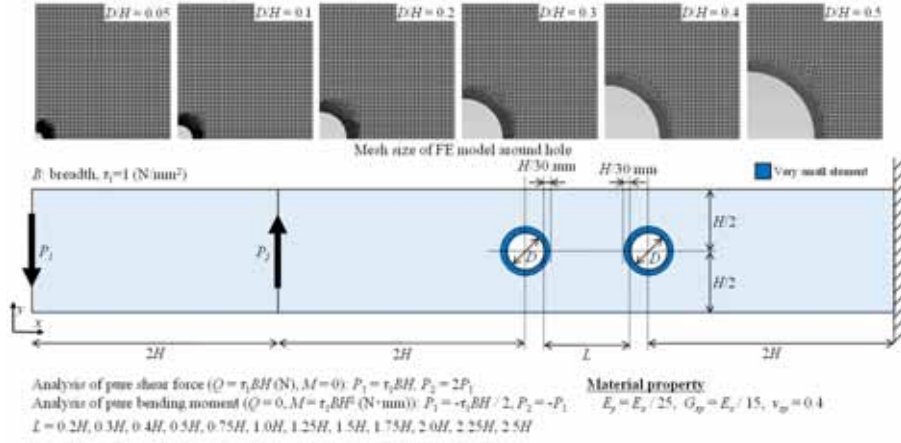


図3 様々な仕様の有限要素解析

(1) 円形孔を2つ設けた場合の割裂耐力の推定

割裂耐力の推定式は、文献9)で提案した円形孔が1つの場合の割裂耐力算定式に円形孔を2つ設けた場合の応力割増率  $k_L$  を考慮した式(1)を用いた。

$$\frac{k_\tau \cdot \bar{\sigma}_{\max} \cdot k_L}{F_{t90} \cdot k_{\text{vol}}} \leq 1 \quad (1)$$

$$k_\tau = 1.025 + 0.050 \cdot e^{-0.1 \frac{M}{QH}} \dots (F_s/F_{t90} = 3.0) \quad , \quad k_{\text{vol}} = \left( \frac{30}{\max(0.2D, 30)} \right)^{1/k}$$

$$\bar{\sigma}_{\max} = \sigma_{Q,\max} \cdot k_{Q,\text{ms}} \cdot k_{Q,\text{comp}} + \sigma_{M,\max} \cdot k_{M/Q} \cdot k_{M,\text{ms}} \cdot k_{M,\text{comp}}$$

$$\sigma_{Q,\max} = \frac{3 \cdot (D/H)^2 + 2}{B \cdot H} \cdot Q \quad , \quad \sigma_{M,\max} = \frac{D/H}{1.5 \cdot B \cdot H^2} \cdot M$$

$$k_{M/Q} = \frac{0.7}{\frac{Q \cdot H}{M} \cdot \frac{H}{D} + 1} + 0.3 \quad , \quad k_{Q,\text{ms}} = \frac{1}{1 + 1.8 \cdot x/D} \quad , \quad k_{M,\text{ms}} = 1.6 \cdot k_{Q,\text{ms}} - 0.6$$

$$x = \frac{a_{\text{ms}}}{1 + \frac{a_{\text{ms}}}{D}} \quad , \quad a_{\text{ms}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{G_{1c}}{F_{t90}^2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_x \cdot E_y}{\frac{E_x}{E_y} \cdot \frac{E_x}{2 \cdot G_{xy}} - \nu_{xy} \cdot \frac{E_x}{E_y}}}$$

ここで、 $B$ ：梁幅、 $H$ ：梁せい、 $D$ ：孔径（ただし、 $D \leq 0.5H$ ）、 $Q$ ：孔の中心に作用するせん断力、 $M$ ：孔に作用する曲げモーメント、 $E_x$ ：繊維平行方向のヤング係数（ $= 11000\text{N/mm}^2$ ）、 $E_y$ ：繊維直交方向のヤング係数（ $= E_x/25$ ）、 $G_{xy}$ ：せん断弾性係数（ $= E_x/15$ ）、 $\nu_{xy}$ ：ポアソン比（ $= 0.4$ ）、 $G_{1c}$ ：モードIの破壊エネルギー、 $F_{t90}$ ：横引張強さ、 $F_s$ ：せん断強さ（ $F_s/F_{t90}=3.0$ ）、 $1/k$ ：最弱リンク理論による横引張強さの寸法効果係数（ $= 0.14$ ）、 $k_\tau$ ：せん断応力度の影響による割増係数、 $k_{Q,\text{comp}}$ 、 $k_{M,\text{comp}}$ ：ラミナ構成による亀裂発生位置に作用する応力度の同一等級構成の場合に対する低減係数で、同一構成集成材の場合は1.0。

$k_L$ は図2の有限要素解析で得られた孔周りに作用する横引張応力度  $\sigma$  とせん断応力度  $\tau$  から式(2)で求めた  $k_\tau \cdot \sigma$ （式(1)と同様に  $\sigma$  と  $\tau$  の複合応力をせん断応力度の影響による応力割増を考慮した  $\sigma$  で表現した値）の最大値を用いて、 $k_L = (\text{孔が2つの場合の } k_\tau \cdot \sigma_{\max}) / (\text{孔が1つの場合の } k_\tau \cdot \sigma_{\max})$  として求めた。

$$k_\tau \cdot \sigma = \sqrt{\sigma^2 + (\tau/3)^2} \quad (2)$$

要素実験で得られた  $F_{t90}$  と  $G_{1c}$  の最大値、平均値、最小値を用いて式(1)で計算した割裂耐力の推定値と実験結果の比較を図4に示す。割裂耐力の推定値と実験の初期クラック荷重を比較すると、初期クラック荷重と材料強度の平均値を用いた計算値は概ね一致しており、初期クラック荷重にばらつきがある場合でも計算値の最大値から最小値の範囲でばらつく結果となった。以上のことから、割増率  $k_L$  を考慮することで孔が2つの場合の初期クラック荷重を概ね推定できることがわかった。

(2) 円形孔を2つ設けた場合の割裂耐力の低減率及び耐力がほぼ低下しない孔間距離の提案

孔径  $D$  と孔間距離  $L$  を変数とした円形孔を2つ設けた集成材梁の孔周りに作用する横引張応力度  $\sigma$  とせん断応力度  $\tau$  を図4に示す2次元有限要素解析により求め求めた。得られた横引張応力度の最大値  $\sigma_{\max}$  と式(2)で求めた  $k_\tau \cdot \sigma_{\max}$  を図4に示す。図4には孔が1つの場合の  $\sigma_{\max}$  及び

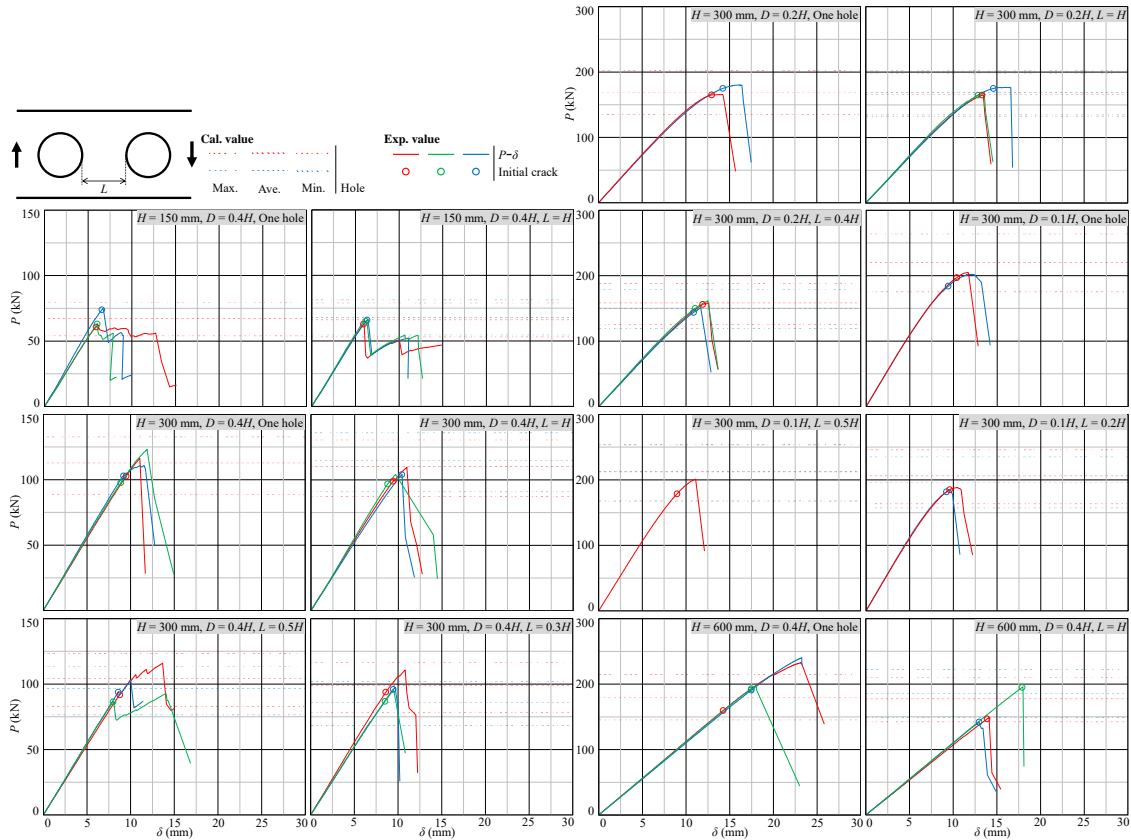


図4 実験値と推定値の比較

$k_t \cdot \sigma_{\max}$  に最大応力度の割増率  $k_L$  を乗じた計算値も示している。 $k_L$  は孔が2つの場合の  $\sigma_{\max}$  及び  $k_t \cdot \sigma_{\max}$  を安全側に推定できる簡易な式となるように試行錯誤して作成した。 $\sigma_{\max}$  と  $k_t \cdot \sigma_{\max}$  の  $k_L$  が同じであっても計算値は概ね精度よく安全側に推定できていることから、図5の  $k_L$  は  $L/H \geq 0.2$  かつ  $F_s/F_{t90} \geq 3.0$  の範囲で適用可能であるといえる。以上のことから、集成材梁のせいを中心に円形孔を2つ設けた場合は、孔の最大応力度を図5の  $k_L$  を考慮して求めることで割裂耐力を推定することが可能であり、式(1)に図5の  $k_L$  を考慮した式(3)で割裂耐力を推定することができる。また、式(3)ではせん断力と曲げモーメントの大きさと向きを考慮して2つの孔の最大応力度を求める必要があるが、最大応力度の割増率をすべて  $k_{L,2-1}$  として作用するせん断力と曲げモーメントが大きい孔のみの検定を行うことで安全側に設計することが可能である。その場合は、式(1)の  $k_L$  を  $k_{L,2-1}$  にすればよい。

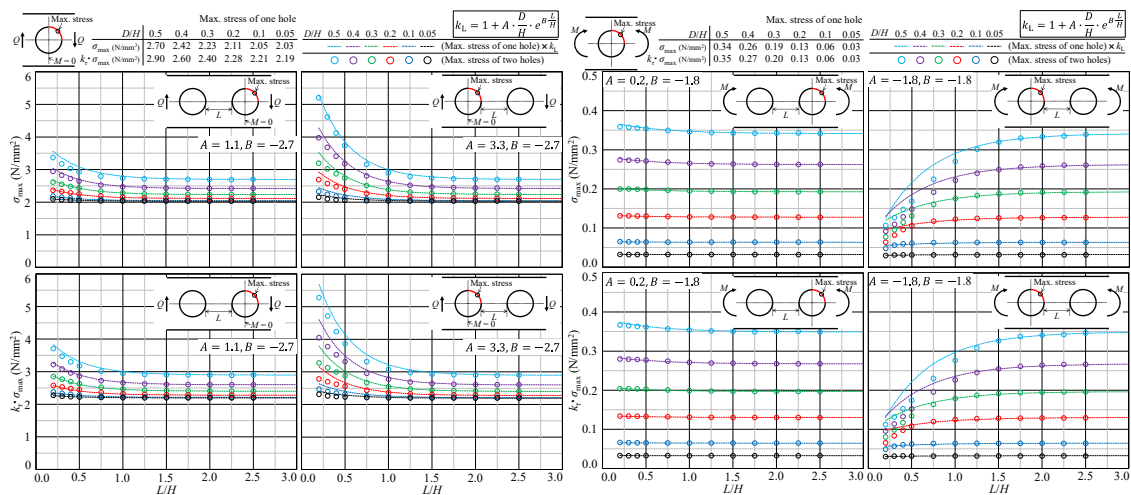


図5 孔周りに作用する最大応力度

$$\frac{k_t \cdot \bar{\sigma}_{\max}}{F_{t90} \cdot k_{vol}} \leq 1 \quad (3)$$

$$\bar{\sigma}_{\max} = \max(\bar{\sigma}_{\max,①}, \bar{\sigma}_{\max,②})$$

$$\bar{\sigma}_{\max,①} = \sigma_{Q,\max,①} \cdot k_{L,1-1} \cdot k_{Q,ms} \cdot k_{Q,comp} + \sigma_{M,\max,①} \cdot k_{L,1-2} \cdot k_{M/Q,①} \cdot k_{M,ms} \cdot k_{M,comp}$$

$$k_{L,1-1} = 1 + 1.1 \cdot \frac{D}{H} \cdot e^{-2.7 \frac{L}{H}} \quad , \quad k_{L,1-2} = 1 + 0.2 \cdot \frac{D}{H} \cdot e^{-1.8 \frac{L}{H}}$$

$$\bar{\sigma}_{\max,②} = \sigma_{Q,\max,②} \cdot k_{L,2-1} \cdot k_{Q,ms} \cdot k_{Q,comp} + \sigma_{M,\max,②} \cdot k_{L,2-2} \cdot k_{M/Q,②} \cdot k_{M,ms} \cdot k_{M,comp}$$

$$k_{L,2-1} = 1 + 3.3 \cdot \frac{D}{H} \cdot e^{-2.7 \frac{L}{H}} \quad , \quad k_{L,2-2} = 1 - 1.8 \cdot \frac{D}{H} \cdot e^{-1.8 \frac{L}{H}}$$

円形孔が 1 つの場合と耐力が変わらない孔間距離を考える際、孔に作用するせん断力と曲げモーメントの大きさや向きを制限することは難しいので、様々な応力状態の中から最大の耐力低下の割合を考える必要がある。図 5 からわかるように孔の中心にせん断力のみ作用する場合が最大応力度の割増が一番大きいので、 $1/k_{L,2-1}$  が孔間距離に応じた耐力低下の割合の最大値となる。孔間距離と  $1/k_{L,2-1}$  の関係を図 6 に示す。横軸は  $L/H$ 、縦軸は耐力低下の割合の最大値  $1/k_{L,2-1}$  の 0.90~1.00 までの範囲としている。図 7 は  $1/k_{L,2-1}$  が 0.90~0.99 の時の  $D/H$  と  $L/H$  の関係を示したものである。図 6 からわかるように孔が 1 つの場合と耐力がまったく変わらない孔間距離を定めることは難しいが、あらかじめ  $F_{90}$  に若干の低減を考慮しておくことで、図 7 に示す孔径に応じて耐力がほぼ低下しない孔間距離を定められることが可能である。

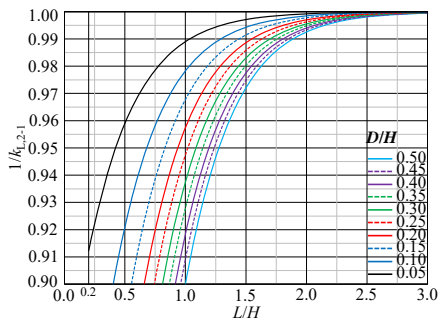


図 6 孔間距離と  $1/k_{L,2-1}$  の関係

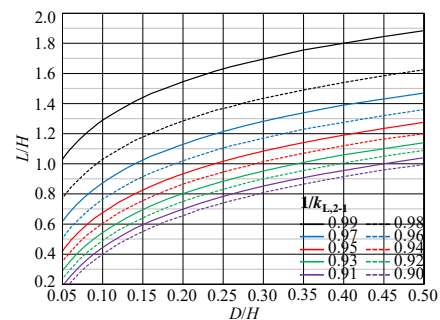


図 7 耐力低下割合ごとの  $D/H$  と  $L/H$  の関係

以上のことから、円形孔を 2 つ設けた場合の割裂耐力は式(1)で求めることができ、耐力がほぼ低下しない孔間距離については図 7 をもとにして提案することができる。ただし、孔が 3 つの場合は 2 つの場合に対して極端に耐力低下することが本研究の最終年度の実験でわかっており、式(1)や図 7 を適用することができない。孔が 3 つに対しての割裂耐力の計算法や耐力低下しない孔間距離については、今後の課題として科研費 (23H01553) で取り組んでいる。

#### <引用文献>

- 1) Carling O.: Limträhandbok (Glulam handbook), 2001
- 2) DIN 1052:2004-08: Design of timber structures - General rules and rules for buildings, 2004
- 3) DIN 1052:2008-12: Design of timber structures - General rules and rules for buildings, 2008
- 4) DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08: National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, 2013
- 5) 日本ツーバイフォー建築協会: 2018 年枠組壁工法建築物設計の手引, 丸善, 2018. 11
- 6) 日本規格協会: JIS A 3301:2015 木造校舎の構造設計標準, 2015. 4
- 7) Okamoto S., Akiyama N., Nakamura N., Aoki K., Inayama M.: Estimation of the tension perpendicular to the grain strength of glued laminated timber of Scots pine via three-point bending tests, Journal of Wood Science, Vol. 67, No. 33, pp. 1–11, 2021.4
- 8) Nordtest Method : NT BUILD 422, Wood: fracture energy in tension perpendicular to the grain, 1993
- 9) Okamoto S., Akiyama N., Araki Y., Aoki K., Inayama M.: Study on the strength of glued laminated timber beams with round holes : proposal of the design experimental study on strength of glulam beams with plural round holes formula for the splitting strength, Journal of Wood Science, Vol. 68, No. 6, pp. 1–18, 2022.1

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Okamoto Shigefumi, Akiyama Nobuhiko, Araki Yasuhiro, Aoki Kenji, Inayama Masahiro	4. 巻 68
2. 論文標題 Study on the strength of glued laminated timber beams with round holes: proposal of the design formula for the splitting strength	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Wood Science	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s10086-022-02013-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto Shigefumi, Akiyama Nobuhiko, Araki Yasuhiro, Aoki Kenji, Inayama Masahiro	4. 巻 67
2. 論文標題 Study on the strength of glued laminated timber beams with round holes: difference in structural performance between homogeneous-grade and heterogeneous-grade timber	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Wood Science	6. 最初と最後の頁 1-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s10086-021-01941-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto Shigefumi, Akiyama Nobuhiko, Nakamura Noboru, Aoki Kenji, Inayama Masahiro	4. 巻 67
2. 論文標題 Estimation of the perpendicular-to-the-grain tensile strength of Scots pine glued laminated timber via three-point bending tests	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Wood Science	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s10086-021-01966-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 OKAMOTO Shigefumi, NISHIMURA Yuta, NAKATANI Makoto, AKIYAMA Nobuhiko, AOKI Kenji, INAYAMA Masahiro	4. 巻 88
2. 論文標題 STUDY ON STRENGTH OF GLUED LAMINATED TIMBER BEAMS WITH TWO ROUND HOLES	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)	6. 最初と最後の頁 826 ~ 834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.88.826	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西村悠汰, 岡本滋史, 中谷誠, 秋山信彦
2. 発表標題 二つの円形孔を有する集成材梁の耐力に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会2022年度大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------