

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：24402

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13867

研究課題名（和文）集成材有孔梁の耐力評価法の提案

研究課題名（英文）Proposal of strength evaluation method for glued laminated timber beams with holes

研究代表者

岡本 滋史 (Okamoto, Shigefumi)

大阪市立大学・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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：現在、円形孔を有する梁の耐力評価法は確立されていないが、国内や国外でいくつかの耐力評価法が提案されている。しかし、提案されている耐力評価法は均質な木材で検証されているため、国内で主に梁に用いられている対称異等級構成集成材に適用できるかはわからない。そこで本研究では、提案されている耐力評価法が対称異等級構成集成材に適用できるかを実験的に検証しました。そして、FEM解析によって円形孔を有する対称異等級構成集成材の耐力を精度良く推定方法を提案及び検証し、対称異等級構成集成材の耐力評価を可能とする手法を見出した。

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あり、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。日本では梁に集成材を用いる場合は殆どが対称異等級構成集成材であるため、本研究の成果を設計に用いることによって梁に孔を設けて木造建築を経済的に設計することが可能であると考えられる。しかし、耐力評価方法の簡易化はできていないため、今後行っていく予定である。

研究成果の概要（英文）：At present, few strength evaluation methods have been established for timber beams containing round holes but several have been proposed in Japan and overseas. While the proposed strength evaluation method has been verified for homogeneous timbers, it is not clear whether the method can be applied to glulam that is a glued and laminated timber product composed of heterogeneous material grades and is mainly used for beams in Japan and elsewhere. In this study, we experimentally verify that the proposed strength evaluation method can be applied to glulams. Moreover, we verify that the strengths of glulams that also contain round holes can be estimated using finite element analysis.

研究分野：木質構造

キーワード：集成材 梁 円形孔 割裂 有限要素法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建築を経済的に設計する場合には、建築物の高さや階高を抑えて天井高さを確保することが求められるが、梁せいが大きいと梁下部に設備配管等を配置できない場合があり、梁に孔を設けて対応する必要がある。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あり、有孔梁の耐力に関する研究は様々されているが、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。

有孔梁の耐力評価法は国内外でいくつか提案されており、多くの設計式が孔周りに作用する繊維直交方向の引張応力で割裂破壊するときの耐力を求めるものである^{文献}。また、孔周りに作用する繊維直交方向の引張応力は、梁が全て均質の木材であるとして求められている。

日本では、JAS で定められている対称異等級構成集成材を梁に用いることが非常に多い。しかし、対称異等級構成と同一等級構成とした場合で孔の接線方向に作用する引張応力が少し変化する事がわかっており、対称異等級構成集成材に既存の耐力評価法を用いてもよいか分からない。よって、日本で有孔梁の設計を行うには、対称異等級構成集成材に適した耐力評価法を提案する必要がある。

2. 研究の目的

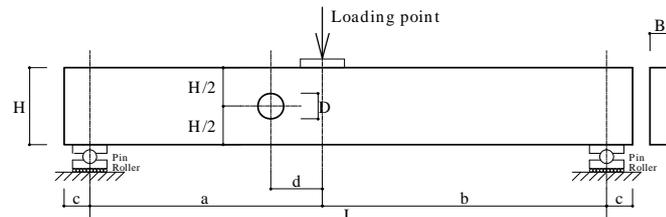
本研究では、対称異等級構成集成材を対象として、FEM 弾性解析を用いた割裂耐力の推定方法の提案を行うことを目的とした。また、対称異等級構成集成材でも既存の有孔梁の耐力評価法が適用可能であるかも確認した。

3. 研究の方法

以下に示す(1)~(4)について検討した。

(1) 曲げせん断実験と材料特性

有孔梁の耐力評価法は主に、せん断強さから算定するものと横引張強さから算定するものがある。そこで、梁の樹種はせん断強さが高く横引張強さが低いカラマツとせん断強さが低く横引張強さが高いオウシュウアカマツの2種類とし、強度等級は同じ対称異等級構成集成材 E105-F300 とした有孔梁の曲げせん断実験を行い、有孔梁の耐力を把握する。試験体仕様を図1に示す。また、有孔梁の耐力評価法に必要なせん断強さ、繊維方向引張強さ、繊維直交方向引張強さと FEM 弾性解析から割裂耐力を推定するのに必要なモード I の破壊エネルギーを調べるための要素実験を行って材料特性を把握する。



Strength grade	Compose	Tree species	B (mm)	H (mm)	L (mm)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)	D (mm)	Number of specimens
E105-F300	Heterogeneous Grade	Scots pine	105	150	1000 (H×20/3)	450 (H×9/3)	550 (H×11/3)	150	-	0 (No hole)	3
									100	30 (H×1/5)	3
									(H×2/3)	50 (H×1/3)	3
									150 (H)	100 (H×2/3)	2
										120 (H×4/5)	2
										0 (No hole)	3
		Larch	105	300	2000 (H×20/3)	900 (H×9/3)	1100 (H×11/3)	150	-	0 (No hole)	3
									30	30 (H×1/10)	3
									60	60 (H×1/5)	3
									100	100 (H×1/3)	3
									300 (H)	200 (H×2/3)	2
										240 (H×4/5)	2
		Scots pine	105	750	5000 (H×20/3)	2250 (H×9/3)	2750 (H×11/3)	150	-	0 (No hole)	2 (Scots pine) 3 (Larch)
									30	30 (H×1/15)	3
									90	90 (H×1/5)	3 (Scots pine) 2 (Larch)
									150	150 (H×1/3)	3
									450 (H)	300 (H×2/3)	2
										360 (H×4/5)	2
	0 (No hole)	2									
	250 (H×1/3)	3									

図1 試験体仕様

(2) 既存の耐力評価法の検証

要素実験で得られたせん断強さ、繊維方向引張強さ、繊維直交方向引張強さを用いて、既存の耐力評価法^{文献}により、曲げせん断実験の耐力の推定を行い、対称異等級構成集成材に既存の耐力評価法を適用できるかの検討を行う。

(3) FEM による応力算定と割裂耐力の推定

FEM 弾性解析で曲げせん断実験の仕様の有孔梁の孔周りの応力度分布を求め、割裂耐力の推定を行う。割裂耐力の推定方法は線形弾性破壊力学の一般化である平均応力法を用いるが、小さな孔を有する梁の耐力を過大に評価してしまうという平均応力法の問題点を解決するために、平均長さの補正方法の提案し、その検証を行う。また、大きな孔を有する梁の場合も耐力を過大に評価するため、寸法効果係数による低減方法を提案し、その検証を行う。

4. 研究成果

以下に示す(1)~(3)の検討結果を示す。

(1) 曲げせん断実験と材料特性

孔を設けていない試験体、梁せいで対して孔径が小さい試験体が孔に亀裂が生じずに曲げ破壊したが、その他の試験体では写真1のように孔に亀裂が生じて破壊した。孔に亀裂が生じた試験体は、多くの場合、最初に加力側上部に短い亀裂が生じ、その後亀裂がある程度の長さまで進展した後に支点側下部に亀裂が生じ、その亀裂が木口まで進展して耐力が低下した。最大荷重と初期クラック荷重を表1に示す。初期クラックが表面に全て現れて目視で確認できるわけではないため、目視で確認できた試験体から、ここでは変位が0.2mm オフセットした時の荷重を

初期クラック荷重として定義した。すべて曲げ破壊した梁せい 450mm で孔径が 30mm の試験体を除くと、孔が大きくなるにつれて耐力が低下する傾向が見られたが、孔径が梁せいの 1/5 以下では曲げ破壊した試験体と同程度の耐力となり、孔径が梁せいの 1/3 であっても同程度か耐力が若干低い程度の結果となった。孔に亀裂が生じて破壊したオウシュウアカマツとカラマツの最大耐力を比較してみると、梁せい 150mm では $D=H \times 2/3$ 以上の場合はオウシュウアカマツの方が高く、梁せい 300mm では $D=H \times 2/3$ 以外はオウシュウアカマツの方が高く、梁せい 450mm では $D=H \times 2/3$ 以下ではオウシュウアカマツの方が高い結果となった。

材料特性は、孔が大きいものを除きほとんどの試験体が L80 の内層ラミナの部分で亀裂が生じて破壊しているため、オウシュウアカマツとカラマツの L80 の材料特性のみを調べることにした。

せん断強さを調べる試験は、JIS Z 2101 に従ったせん断断面が 30mm×30mm のいす型せん断試験とした。各 20 体の実験を行った。繊維方向引張強さを調べる試験は、断面が 105mm×25mm で長さが 1000mm の試験片の材端を 200mm ずつチャックで固定し、単調引張加力試験とした。試験体にはくびれを設けずに断面を一様としたため、材端のチャック部分で破壊したものは試験体数にはカウントせずに除外し、各 20 体の実験を行った。繊維直交方向引張強さを調べる試験は、ISO 13910 に示されている繊維直交方向の引張で破壊する曲げ試験とした。ISO 13910 では繊維直交方向引張強さを求める際に M_{max}/Z で求められる曲げ強さに寸法効果係数が考慮されているが、材せいが 150mm であれば応力勾配による寸法効果の影響が少ないことが確認できたので、材せい $H=150\text{mm}$ として M_{max}/Z で繊維直交方向引張強さを求めた。オウシュウアカマツが 6 体、カラマツが 3 体の実験を行った。モード I の破壊エネルギー G_{IC} は、Schematic diagram of single-edge-notched bending (SENB) test の試験方法で求めた。オウシュウアカマツは 10 体、カラマツは 6 体の実験を行った。各要素実験から得られた材料特性を表 2 に示す。

(2) 既存の耐力評価法の検証

表 2 の平均値を用いて文献 ~ の耐力算

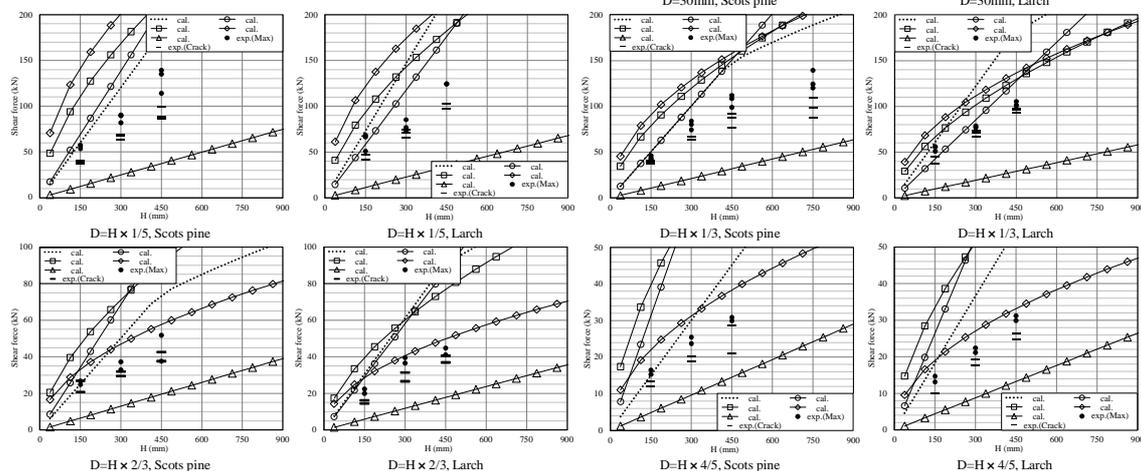


図 2 実験値と耐力評価法による計算値の比較



写真 1 破壊状況

表 1 最大荷重と初期クラック荷重

H (mm)	D (mm)	Scots pine												Larch											
		Maximum load (kN)				Initial crack load (kN)				Maximum load (kN)				Initial crack load (kN)											
		No.1	No.2	No.3	Mean	No.1	No.2	No.3	Mean	No.1	No.2	No.3	Mean	No.1	No.2	No.3	Mean								
150	0 (No hole)	118.2	123.7	116.7	119.5									99.8	99.6	115.4	104.9								
	30 (H×1/5)	97.2	104.5	102.1	101.3	73.3	72.2	66.8	70.8	124.2	92.7	120.9	112.6	76.7	75.0	85.1	78.9								
	50 (H×1/3)	84.0	79.1	76.7	80.0	73.1	68.4	72.9	71.4	101.8	101.2	92.7	98.5	82.4	81.4	67.2	77.0								
	100 (H×2/3)	48.7	45.2		46.9	48.7	37.6		43.1	40.7	36.2		38.5	29.5	26.3		27.9								
	120 (H×4/5)	29.9	27.8			28.9	24.5	22.1		23.3	26.8	23.9		25.3	18.1	18.2	18.1								
300	0 (No hole)	163.2	142.8	162.8	156.3									161.3	134.8	127.7	141.3								
	30 (H×1/10)	186.3	160.0	169.8	172.0	123.7	117.2	125.6	122.2	136.3	159.9	167.8	154.7	122.4	148.7	139.4	136.9								
	60 (H×1/5)	148.9	164.0	163.0	158.6	122.1	125.0	115.0	120.7	133.8	139.5	155.1	142.8	129.4	119.1	134.9	127.8								
	100 (H×1/3)	135.2	145.8	152.6	144.6	122.1	115.1	121.1	119.4	139.5	132.9	142.7	138.4	120.9	132.2	128.9	127.3								
	200 (H×2/3)	59.7	67.8		63.7	53.5	58.1		55.8	66.4	71.9		69.1	57.1	48.3		52.7								
	240 (H×4/5)	46.3	43.1		44.7	34.0	36.6		35.3	38.4	40.8		39.6	31.9	34.8		33.4								
450	0 (No hole)	205.7	191.2		198.5					250.5	211.5	223.4	228.5												
	30 (H×1/15)	199.8	229.6	214.5	214.6	154.6	152.8	163.7	157.0	257.5	255.7	258.5	257.3	215.0	206.3	198.9	206.7								
	90 (H×1/5)	245.6	253.2	207.5	235.4	160.6	180.7	156.1	165.8	226.5	226.0		226.3	186.4	177.1		181.7								
	150 (H×2/3)	197.3	179.9	203.6	193.6	138.9	167.0	159.4	155.1	184.3	191.6	177.6	184.5	175.5	168.3	176.4	173.7								
	300 (H×2/3)	68.4	94.1		81.3	68.4	77.4		72.9	81.4	74.7		78.0	73.7	67.1		70.4								
	360 (H×4/5)	54.4	56.1		55.2	52.0	38.3		45.1	54.4	56.7		55.5	48.1	45.1		46.6								
750	0 (No hole)	246.6	282.6		264.6	189.4	177.7		183.5																
	250 (H×1/3)	253.5	218.4	226.0	232.7	198.2	178.5	158.3	178.3																

Note: Initial crack load is the 0.2mm offset load. No crack

表 2 材料定数

	Tree species	AVE.	MAX.	MIN.	C.V.
		Shear strength parallel to the grain	F_d (N/mm ²)	Scots pine 7.17	8.38
	Larch	8.72	10.09	7.52	0.079
Tension strength parallel to the grain	F_t (N/mm ²)	Scots pine 22.30	28.58	16.23	0.168
	Larch	20.31	26.16	16.34	0.126
Tension strength perpendicular to the grain	F_{t90} (N/mm ²)	Scots pine 2.15	2.46	1.88	0.094
	Larch	1.98	2.01	1.94	0.019
Fracture energy (Mode I)	G_{IC} (N·m/m ²)	Scots pine 375	475	243	0.238
	Larch	280	314	223	0.127

Note: * Fig.8 test results. Strength grade: L80

定方法で曲げせん断実験の耐力を求めた。実験値と計算値の比較を図 2 に示す。文献 ~ では最大耐力よりも過大に評価され、文献 では初期クラック時の耐力よりも安全側に評価する結果となった。実験値では、梁せいが大きくなるにつれて耐力が増加しにくくなっているが、寸法効果を考慮している文献 , でも同じような傾向が見られ、耐力算定には寸法効果を適切に評価する必要があることがわかった。文献 ~ の耐力算定方法は、文献 でも様々な研究で行われた有孔梁の曲げせん断実験の結果と比較がされており、こちらでは概ね計算値が安全側に評価できていることが示されている。しかし、有孔梁はすべて同一のスプルースのラミナで構成された集成材であり、横引張強さは実験値を用いたわけではなく、 $F_{t90} = 0.5\text{N/mm}^2$ として設計用の強度を用いて計算している。よって、今回のような対称異等級構成集成材に適用する場合や適切に低減された設計強度を用いない場合には、何らかの調整係数が必要となる。

(3) FEM による応力算定と割裂耐力の推定

FEM による有孔梁の割裂耐力の推定方法として、平均応力法が文献 で提案されており、図 3 に示すように破壊する位置の繊維直交方向引張とせん断の繊維方向の応力度分布を用いて割裂耐力を推定するものである。平均長さを式(2)で求め、FEM で得られた繊維方向の平均応力を用いて式(1)で破壊の検定するものである。

$$(\bar{\sigma}/F_{t90})^2 + (\bar{\tau}/F_s)^2 \leq 1.0 \quad (1)$$

$$a_{ms} = \frac{2 E_I \cdot G_{Ic}}{\pi F_{t90}^2}$$

ここで $\bar{\sigma}$: 平均横引張応力度 $\bar{\tau}$: 平均せん断応力度
 a_{ms} : 潜在的な破壊領域の一定長さ

$$E_I = \sqrt{\frac{2 \cdot E_x \cdot E_y}{\frac{E_x}{E_y} + \frac{E_x}{2 \cdot G_{xy}} - \nu_{xy}}}$$

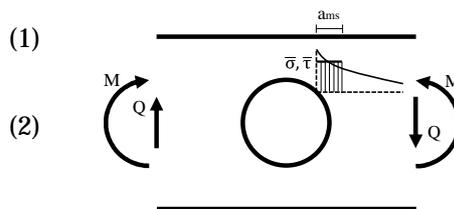


図 3 平均応力法

この方法を用いると、小さな孔を有する梁の耐力を過大に評価してしまい、大きな孔を有する梁の場合も耐力を過大に評価する可能性がある。そこで本研究では、式(2)で求めた平均長さの補正を式(3)で行い、応力が大きい部分のワイブル最弱リンク理論による寸法効果を考慮した式(4)で破壊の検定をする方法を提案した。

$$a_{ms}' = \frac{a_{ms}}{1 + \frac{a_{ms}}{\alpha \cdot D}} \quad (3)$$

ここで D : 有孔梁の孔径

α : $D=H \times 4/5$ の場合 0.55、 $D=H \times 2/3$ の場合 0.7、 $D=H \times 1/3$ 以下の場合 1.0

$$\sqrt{(\bar{\sigma}/F_{t90})^2 + (\bar{\tau}/F_s)^2} / \left(\frac{30}{\min(0.2D, 30)} \right)^k \leq 1.0 \quad (4)$$

ここで $k=0.14$

曲げせん断実験の各試験体の孔周りに作用する応力度は 2 次元の FEM により求めて、式(1) ~ (4)の検証を行った。割裂破壊する位置は、有孔梁の孔周りに作用する繊維直交方向引張応力度が最大となる位置であると仮定した。解析モデルは、図 4 のように孔の部分が曲げせん断実験と同様の応力状態となるように設定した。木材を 4 節点平面要素とし、要素分割は 1 辺を 10mm、孔周りは節点が 1 度以下の配置になるように 10mm 程度の範囲のみ細かく分割した。曲げせん断実験に用いた梁は対称異等級構成集成材 E105-F300 であるので、要素の材料定数はラミナ毎に定めた。ラミナは厚さ 30mm として集成材の日本農林規格に基づいて配置した。要素の材料定数は、繊維方向のヤング係数 E_x を集成材の日本農林規格に示されているラミナの曲げヤング係数とし、繊維直交方向のヤング係数 $E_y = E_x / 25$ 、せん断弾性係数 $G = E_x / 15$ 、ポアソン比 $\nu_{xy} = 0.4$ を $G = E_x / 15$ 、 $\nu_{xy} = 0.4$ と定めた。解析は孔が割裂破壊した仕様のみ行った。

解析から得られた $D=H \times 1/3$ の孔周りに作用する繊維直交方向の引張応力度 σ を図 5 に示す。全て均質としたときの解析結果も示しているが、 σ の最大値は対称異等級構成の方が 0.85 程度低い結果となった。 $D=H \times 1/3$ の繊維直交方向引張応力度が最大となる位置

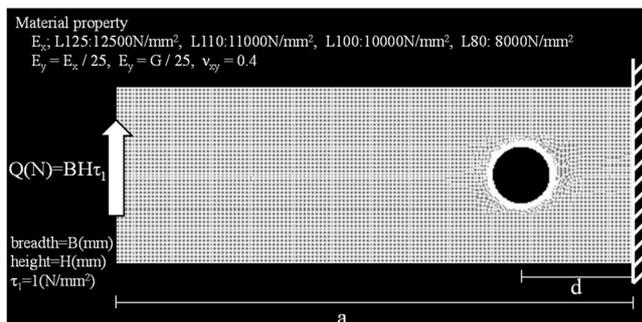


図 4 解析モデル

の繊維直交方向引張とせん断の繊維方向の応力度分布は図6のようになる。

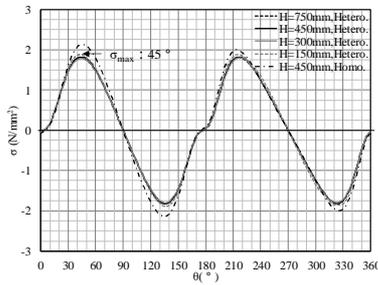
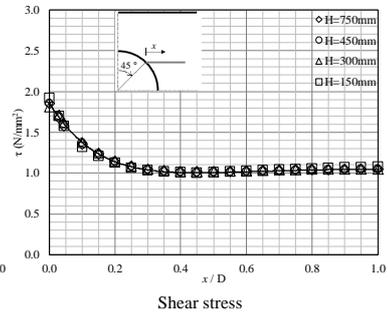
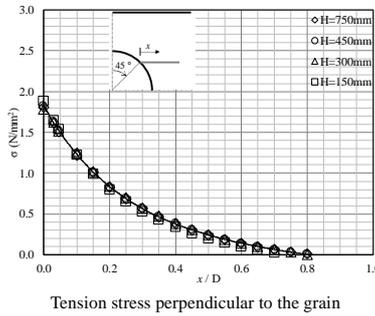


図5 孔周りの応力度分布
(繊維直交方向, $D=H \times 1/3$)



Tension stress perpendicular to the grain

Shear stress

図6 割裂破壊する位置の繊維方向の度分布($D=H \times 1/3$)

表2の平均値を用いて平均応力法により曲げせん断実験の割裂耐力を求めた。実験値と計算値の比較を図7に示す。式(1), (2)による計算値では、孔が大きい場合は精度良く推定しているが、孔が小さい場合には初期クラック荷重を高めめに推定する結果となった。しかし、式(3)で a_{ms} を補正し、応力が大きい部分の寸法効果を考慮した式(4)で破壊の検定をする方法では、孔が小さい場合や大きい場合の初期クラック荷重を精度良く推定できることが確認できた。寸法効果を考慮しないと計算値は梁せいに概ね比例することになるため、梁せいが大きくても孔径が小さい場合にはあまり問題ないが、梁せいが大きくて孔径も大きい場合には、繊維直交方向の寸法効果を考慮する必要がある。

以上のことから、孔の割裂破壊する位置の繊維方向に作用する繊維直交方向引張とせん断の応力度分布さえ定式化すれば、対称異等級構成集成材であっても有孔梁の耐力評価法を提案できる事がわかった。

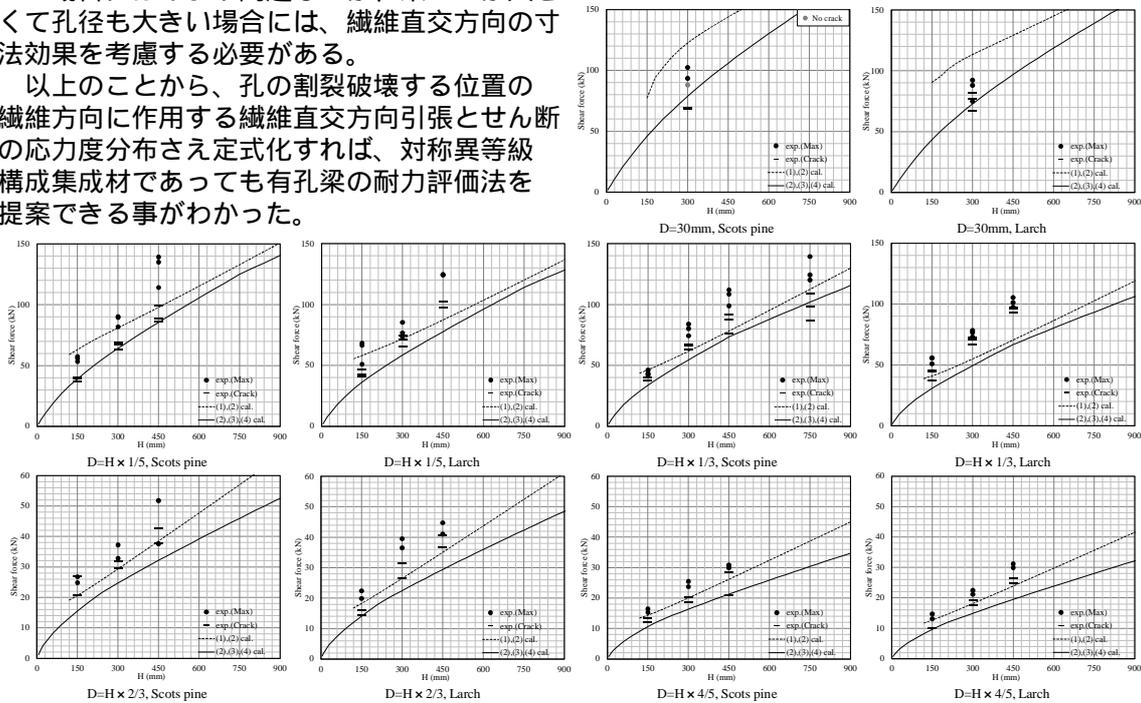


図7 実験値と平均応力法による計算値の比較

< 引用文献 >

O Carling O (2001) Limträhandbok (Glulam handbook). Svenskt Trä, Stockholm.
 DIN EN 1995-1-1/NA (2013): National Annex – Nationally determined parameters – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. DIN, Berlin.
 S Aicher, L Höfflin, HW Reinhardt (2007) Runde Durchbrüche in Biegeträgern aus Brettschichtholz – Teil 2: Tragfähigkeit und Bemessung. Bautechnik 84(12):867-880. doi:10.1002/bate.200710074 (in Germany)
 野口昌宏, 森拓郎, 宮澤健二: せん断及び曲げモーメント複合応力下の木質有孔梁の強度算定式, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第640号, pp. 1121-1129, 2009. 6
 土方和己, 井戸田秀樹, 山岸賢多: 有孔集成材梁の設計耐力式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻, 第673号, pp. 397-406, 2012. 3
 SIMON AICHER: FRACTURE MECHANICS MODELS. FOR STRENGTH ANALYSIS OF TIMBER. BEAMS WITH A HOLE OR A NOTCH. - A Report of RILEM TC-133, LUND University, 2002
 H. Danielsson: The strength of glulam beams with holes. A Survey of Tests and Calculation Methods, TVSM-3068, Lund University, 2007

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 岡本 滋史, 荒木 康弘, 秋山 信彦, 小谷 竜城, 青木 謙治, 稲山 正弘	4. 巻 85
2. 論文標題 円形孔を有する集成材梁の耐力に関する研究 -FEMによる対称異等級構成集成材の割裂耐力の推定-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----