複数の孔を有する集成材梁の耐力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON STRENGTH OF GLULAM BEAMS WITH PLURAL ROUND HOLES

楠 寿博 — * 1 上角充広 — * 2

Toshihiro KUSUNOKI — * 1 Mitsuhiro JOKAKU — * 2

キーワード：
集成材, 円形孔, 梁, 曲げ実験, 割裂破壊

Keywords:
Glulam, Round hole, Beam, Bending test, Splitting failure

As for the glulam beams with plural round holes, there are very few studies at present. The authors conducted full-scale bending tests using 14 types of specimens and proposed the strength calculation methods of glulam beams with plural round holes based on the results of the tests. The ratio of hole diameter to beam height (d/h) are 0.3, 0.4 and 0.5. As a result, the relationship between cracking angle of holes and ratio of d/h was found. It was also found that the lower limit values of the effective section modulus at the hole could be approximated by using Hankinson's formula.

1. はじめに

近年、都市部でも複層の事務所や商業施設を集成材を用いた木造で建設する事例が見られるようになったが、これらの建物では特に階高を有効に使うことが求められるため、梁断面が大きい場合には梁に孔をあけて設備配管を通す必要性が生じる。

現在、木造の有孔梁に関して世界的に広く認められた設計手法は存在しないが、我が国では野口らや土方らにより耐力や剛性の計算方法が提案されている^{1)~3)}等。海外ではスウェーデンやドイツなどで独自の計算方法がみられる^{4),5)}が、EUROCODEには有孔梁に関する規定はない。海外の計算方法に拠った場合、実験結果に対してかなり安全側になる場合があるので注意が必要である。我国では野口らにより孔が2個の場合の耐力の計算方法について、木材の破壊エネルギーに立脚した計算式が提案されている²⁾。

筆者らは複数の孔をもつ有孔梁について、比較的簡便な計算式で破壊耐力を評価する手法の可能性を探るために検討を行ってきた。本稿では有孔梁の曲げ耐力を求めるために考えた計算方法と実大試験体を用いた曲げ破壊実験結果との対応について報告する。

2. 有孔梁の計算方法

2.1 孔配置と破壊形態

有孔梁の破壊形態は、野口らの研究²⁾によれば、孔径や梁せいによって破壊形態の違いはなく、孔どうしが関与せず、個々の孔別に割裂破壊が生じるケースと、2つの孔の間の部分にせん断破壊が生じ、それが引き金となって全体に割れが進展するケースの2通りが実験において観察されたとしている。さらに同研究によれば、割裂破壊は孔間隔（心心間隔ではなく孔縁間隔）が梁せいの1.0倍および1.3倍の場合に、せん断破壊は孔間隔が梁せいの0.25倍および0.5

倍の場合にそれぞれ観察されたとしている。写真1にそれぞれの破壊形態の例を示す。

(a) 割裂破壊の例

(b) せん断破壊の例

写真1 有孔梁の破壊形態

孔の配置条件については、Limträhandbok⁴⁾（スウェーデンの設計規準）とドイツ工業規格 DIN 1052⁵⁾に、表1（参考図：図1）のような規定がある。複数の孔の場合の孔間隔（図1の d_3 ：以降、孔縁間隔と呼ぶ）については、梁せいまたは梁せいの1.5倍以上となっている。有孔梁に関する設計方法は、孔が単一の場合について扱ったものが殆どで、これらスウェーデンやドイツの規定でも、この孔配置の規定を守れば、孔が複数（2個以上）の場合についても単一孔の計算方法で対処できるとみなしていると思われる。本研究では孔単独で耐力を評価できる割裂破壊の場合に的を絞り、野口らの研究と表1の海外規定を参考に、最小孔縁間隔を梁せい以上とする場合を検討対象とした。孔は梁断面の中心線上に配し、孔径については、梁せいの0.3倍、0.4倍、0.5倍の3種類とした。支持点と支持点に最も近い孔までの距離（図4の d_1 ）についてはDIN 1052に準じた。

表1 孔配置規定

	Limträhandbok	DIN 1052-2004	DIN 1052-2008
d_1	—	0.5H以上	0.5H以上
d_2	—	H以上	H以上
d_3	H以上	300mmかつH以上	300mmかつ1.5H以上
孔径	0.5H以下	0.4H以下	0.4H以下

図1 孔配置規定

¹⁾ 榎竹中工務店技術研究所 主任研究員・博士（農学）
〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1

²⁾ 榎竹中工務店技術研究所 研究員・修士（工学）

¹⁾ Chief Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corporation, Dr. Agr.

²⁾ Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corporation, M. Eng.

2.2 耐力計算方法

ここでは2点集中荷重を受ける有孔梁のせん断スパン内の孔が割裂破壊する場合を対象とする。割裂破壊は個々の孔回りに関する破壊形態である。図2に本計算方法の基本的な考え方を示す。破壊条件としてせん断力と曲げモーメントを考慮する。

図2 孔回りのせん断力と曲げモーメントに対する応力

予め、図2(a)に示すように最も梁断面が小さい部分(h_1 、 h_2)について最大せん断応力の確認をしておく。孔の上下の梁部分はせん断力により上下方向にずれる変形をする。この部分は変断面なので、簡便のため同図に示すように長方形断面abcdおよびa'b'c'd'に置き換える。ここでabとa'b'の位置は孔中心角度 α により定まる。角度 α は孔縁のひび割れ発生点に対応する。 h_U 、 h_L は角度 α により定まる置換断面せいである。上下方向のずれ変形によりad、bc、a'd'、b'c'の各面には図2(b)に示すような曲げ応力が生じる。一方、孔回りには支持点反力による曲げモーメントも作用しており、これを偶力 P_c と P_t に置き換えて長方形断面部中心に作用させる。 h_m は偶力間距離である。ここで引張力 P_t を受ける下の長方形部分のうち、割裂破壊の可能性が最も高くなるのは孔側の曲げ引張部a'である。この部分の曲げ応力を σ_m とし、 P_t による引張応力を σ_t とすると、

それぞれ(1)式、(2)式で表わされる。(1)式は学会規準⁸⁾の切欠きのある曲げ材の算定方法を参考としており、a'd'部の断面係数 Z_L に調整係数 β を乗じている。ここで破壊条件は σ_m と σ_t の和が梁材の引張強度 F_t に達した時点と考えることができ、(3)式で表現できる。角度 α および調整係数 β は実験結果に基づいて設定する。

$$\sigma_m = \frac{M_s}{\beta \cdot Z_L} = \frac{3Q \cdot D}{2\beta \cdot b \cdot h_L^2} \quad (1)$$

$$\sigma_t = \frac{P_t}{b \cdot h_L} = \frac{Q \cdot L_c}{b \cdot h_L \cdot h_m} \quad (2)$$

$$\sigma_m + \sigma_t = F_t \quad (3)$$

ここで、 M_s :せん断力 Q によりa'd'部に作用する曲げモーメント、 D :孔径、 L_c :支持点から孔中心までの距離(図3参照)

図3 記号の説明

3. 実験方法

3.1 試験体

試験体には外形寸法120mm×600mm×8000mmのカラマツ異等級対称構成構造用集成材(E105-F300)を使用した。

孔配置のパターンは図4に示す14種類である。試験体は孔径に応じてA、B、Cの3タイプに区分しているが、それぞれ孔径が梁せいの0.3倍(180mm)、0.4倍(240mm)、0.5倍(300mm)であることを示している。孔の配置によりタイプAは6種類、BおよびCは4種類に分けられる。A-1、A-3、B-1、C-1の4つのタイプは2体ずつ製作し、他はすべて1体ずつ製作した。よって試験体数は合計で18体である。

図4 孔配置と荷点位置

図 6 荷重－中央変位関係

表 2 実験結果と破壊状況

試験体	孔 径 (mm)	梁 幅 (mm)	実験最大 荷重 (kN)	最大耐力 (kN)	破 壊 状 況	ひび割れ発生角度 $\alpha(^{\circ})$		
						第1孔	第2孔	平 均
A-1-1	180	180	151.7	156.2	第2孔から第1孔に向けてひび割れが発生し、その直後に材端まで進展。	—	52	49.0
A-1-2			189.3	193.8	ほぼ同時に第2孔から第1孔および材端を結ぶひび割れが発生。	50	49	
A-2			168.6	172.4	第1孔に向けて第2孔にひび割れが発生し(この時第1孔には変化なし)、直後に材端まで割れが進展。	—	46	
A-3-1			228.7	233.2	下端から2枚目のラミナの試験体中央近傍のFJが破断し、ここが起点となって曲げ破壊に至った。	—	—	
A-3-2			235.5	240.1	載荷点下の曲げ引張側ラミナが破断して曲げ破壊に至った。	—	—	
A-4			176.1	180.7	ほぼ同時に第2孔から第1孔および材端を結ぶひび割れが発生。	48	49	
A-5	240	120	164.6	169.1	第2孔から第1、第3孔に向けてひび割れが発生し、その直後に第3孔から材端までつながる割れに進展。	—	49	39.8
A-6			224.6	229.2	純曲げ区間内の引張側下端の節位置を起点としてラミナが破断し、一瞬で全体破壊に至る。	—	—	
B-1-1			165.0	168.7	第2孔と第1孔の下方にほぼ同時にひび割れが発生し、その直後に材端に進展。	40	42	
B-1-2			176.7	180.5	第1孔から第2孔、材端に達するひび割れが発生。	30	—	
B-2			185.4	189.1	第1孔から材端に達するひび割れと、第2孔に向かう割れが発生。	53	—	
B-3			141.9	145.6	第1孔から第2孔と材端に向かうひび割れが発生し、ほぼ同時に材端および第2孔まで割れが進展。	28	—	
B-4	300	120	136.7	140.4	第1孔から第2孔、第3孔および材端を結ぶひび割れが発生。	46	—	30.3
C-1-1			135.4	139.2	第2孔の下方にひび割れが発生し、その直後に一瞬で材端まで進展。	—	14	
C-1-2			119.7	123.5	第1孔、第2孔に個別にひび割れが入るが、その直後に第2孔から材端までつながる割れに進展。	24	27	
C-2			151.9	155.6	第1孔にひび割れが発生し、約1秒後に第2孔から材端までつながる割れに進展。	30	—	
C-3			130.2	133.9	第2孔の下方にひび割れが発生したが、約15秒後に第1孔から材端および第2孔につながるひび割れが発生。	37	—	
C-4			113.7	117.4	北側(破壊側)第2孔の下方にひび割れが発生し、その直後に第3孔から材端までつながる割れに進展。 先に南側(非破壊側)第3孔下方にひび割れが発生していたが、ここからは破壊に至らなかった。	—	50	

算出された β の値を表 3 に示した。試験体の集成材 (E105-F300) は 20 枚のラミナを積層したものであるが、内層ラミナとして内側 10 枚のラミナの品質はすべて L80 であり、すべてのタイプの試験体において孔は同じ品質条件のラミナ内に位置している。なお、同表中の純曲げ区間曲げ破壊時計算耐力の算出には、前記の曲げ強度値 41.6N/mm^2 を用いており、梁自重を等分布荷重として考慮している。

孔におけるひび割れの発生は、図 8 に示すような孔縁の接線方向に生じる引張応力による割裂破壊である。この割裂破壊は繊維傾斜を有する材の引張破壊に相当すると考えられるため、調整係数 β は Hankinson 式による引張強度の変化に対応すると推測された。同式

を用いれば、孔縁の接線方向引張応力 σ_{ts} は (4) 式により表現できる。繊維方向に対する傾斜角はひび割れ発生位置の角度 α と同じである。引張強度 σ_{t0} ($=F_t$) を 27.7N/mm^2 とし、学会規準を参考に $n=2$ 、 $\sigma_{t90}/\sigma_{t0}=0.07$ とした場合の Hankinson 式による強度との比 ($=\sigma_{ts}/\sigma_{t0}$) と調整係数 β との対応を示したものが図 9 である。調整係数 β の下限がほぼ Hankinson 式に対応していることがわかる。凡例中に計算対象の試験体数と孔の個数を示した。

4.3 本計算方法による耐力試算

ひび割れ発生角度 α の試験体タイプ毎の平均値は、表 2 に示した

図 7 最終ひび割れ状況

表 3 実験結果に適合する β 値

試験体名	孔 径 (mm)	梁 幅 (mm)	せん断 スパン (mm)	孔 配 置			最大耐力 (kN: 全体の 1/2)	純曲げ区間曲げ 破壊時計算耐力 (kN: 全体の1/2)	最大耐力に適合するβ値						
				せん断スパン内		純曲げ区間内 個数(個)			第 1 孔		第 2 孔				
				個数(個)	孔心間隔(mm)				α(°)	β	α(°)	β			
A-1-1	180	120	2400	2	780	0	78.1	114.4	—	—	52	0.15			
A-1-2							96.9		50	0.15	49	0.21			
A-2					1170		86.2		—	—	46	0.20			
A-3-1					1560		116.6		—	—	—	—			
A-3-2							120.0		—	—	—	—			
A-4					780		90.4		48	0.19	49	0.28			
A-5				3	84.5	—	—	49	0.17						
A-6				0	—	3	114.6	111.2	—	—	—	—			
B-1-1	240		2400	2	840	0	84.4	114.4	40	0.24	42	0.32			
B-1-2							90.2		30	0.30	—	—			
B-2				2	1680		107.7	94.6	53	0.23	—	—			
B-3								840	28	0.32	—	—			
B-4								840	70.2	46	0.18	—	—		
C-1-1				300	2400		2	900	0	69.6	114.4	—	—	14	0.67
C-1-2										61.8		24	0.35	27	0.55
C-2					1800		2	77.8		101.7	30	0.42	—	—	
C-3	67.0		37			0.42		—			—				
C-4			3	900	58.7		—	—	50	0.26					

ように孔径が大きくなるにつれて低下する傾向がみられるが、グラフで示すと図 10 のようになる。孔径比 (= 孔径/断面せい) に対してタイプ毎の平均値はほぼ線形に低下している。孔径比が大きくなるほどひび割れ発生角度のばらつきが大きくなっているが、これは孔径が大きくなるにつれて節や年輪の乱れといった欠点が孔縁に存在する確率が高くなることが一因として考えられる。

図 8 割裂を生じさせる引張応力と角度 α の関係

図 9 ひび割れ発生角度 α と調整係数 β の関係

図 10 孔径比とひび割れ発生角度 α の関係

一方、調整係数 β については、前節で述べたように Hankinson 式で下限値をおさえられる可能性があり、同式を用いることで調整係数 β を安全側に評価することができると考えられる。

ここで上記の知見を踏まえ、(1) 式～(3) 式により各試験体の耐力を試算する。ひび割れ発生角度 α は試験体タイプ別に表 2 に示した平均値を用い、調整係数 β には図 9 に示した Hankinson 式による強度比の値を用いる。集成材の引張強度 F_t を 27.7N/mm² とし、自重を考慮して (3) 式を満足する耐力を試験体毎に求めた。この計算耐力と実験耐力との比を図 11 に示す。実験耐力は計算耐力の 1.2 倍から 1.8 倍の間でばらついているが、安全側の評価が得られている。なお、引張強度に関する Hankinson 式について、学会規準⁸⁾では $n = 1.5 \sim 2$ 、 $\sigma_{190} / \sigma_{10} = 0.04 \sim 0.07$ としているが、ここで用いた $n = 2$ 、

$\sigma_{190} / \sigma_{10} = 0.07$ は σ_{190} について最も高い値を与えるものである。

図 11 計算耐力に対する実験耐力の比

5. まとめ

孔配置に関して次の条件を設けた集成材有孔梁の耐力に関して簡便な計算方法を考案し、その検証のためにカラマツ異等級対称構成構造用集成材 (E105-F300) を用いた曲げ載荷実験を実施した。

- ・ 孔は梁断面の中心線上に配置
- ・ 梁断面寸法: 幅 120mm×せい 600mm (せい幅比=5)
- ・ 孔径: 梁せいの 0.3 倍 (180mm) ～0.5 倍 (300mm)
- ・ 孔縁間隔 (孔と孔の間の部分の長さ): 梁せい以上
- ・ 支持点に最も近い孔と支持点の間の長さ: 梁せいの 1/2 以上
- ・ 孔が位置するラミナの等級はすべて同一

以下に得られた知見を記す。但し、これらは上記の条件を満足しない場合には適合しないことも考えられるので注意が必要である。

- 1) ひび割れ発生角度 α の平均値は孔径比の増大につれてほぼ線形に低下した。また、孔径比毎の α のばらつきは孔径比の増大につれて大きくなった。
- 2) 観察された α に基づいて算出した調整係数 β の下限値は引張強度に関する Hankinson 式を用いて表すことができる可能性がある。
- 3) 孔径比別の α 平均値と、Hankinson 式により下限値として求めた調整係数 β を用いて各試験体の耐力を算出すると、実験耐力は計算耐力の 1.2 倍から 1.8 倍の間でばらついた。
- 4) 孔径比が 0.3 で孔縁間隔が梁せいの 2.3 倍の試験体では、純曲げ区間での曲げ破壊が孔の割裂破壊に先行して発生した。孔の割裂破壊先行を回避しうる条件については今後の課題である。

参考文献

- 1) 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 640 号, pp.1121～1129, 2009.6
- 2) 野口昌宏, 中村昇: 2 つの孔を持つ木質有孔梁の強度算定法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 663 号, pp.927～934, 2011.5
- 3) 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 673 号, pp.397～406, 2012.3
- 4) Carling O.: Limträhandbok (Glulam Handbook), Svenskt Limträ AB, 2006
- 5) DIN 1052 2004-08 および 2008-12 (DIN 1052 2008-12 は現在廃止され、有孔梁に関する部分は DIN EN 1995-1-1/NA 2013-08 に吸収されている。)
- 6) D. Henrik: The Strength of Glulam Beams with Holes. A Survey of Tests and Calculation Methods, TVSM-3068, Lund University, 2007
- 7) 野口昌宏, 中村昇: 木質有孔梁の撓みに関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第 38 号, pp.131～134, 2012.2
- 8) 日本建築学会編: 木質構造設計規準・同解説, 日本建築学会, 2006 年

[2016 年 2 月 1 日原稿受理 2016 年 5 月 6 日採用決定]