集成材有孔梁の構造特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON STRUCTURAL PERFORMANCE OF GLULAM BEAMS WITH ROUND HOLES

楠 寿博 ——— * 1   大野正人 ——— * 2
畔柳 歩 ——— * 3

Toshihiro KUSUNOKI — * 1   Masahito OHNO ——— * 2
Ayumu KUROYANAGI — * 3

キーワード：
集成材，円形孔，梁，曲げ実験，有限要素法解析

Keywords:
Glulam, Round hole, Beam, Bending tests, Finite element analyses

In order to investigate the structural performance of glulam beams with holes, full-scale bending tests and FEM analyses were carried out. Two 9m long glulam beams with 9 round holes were used. The parameter of the tests was hole placement, the deviation of hole center was 1/7.2 of beam height.

As a result, shear failure occurred in both beams, and the effect of the deviation on strength was considered to be small.

Comparing between tests results and FEM results, we found that we could grasp the situation of tests using FEM results. But that's the problem that the assessment of shear collapse is not established.

1. はじめに

現在我が国には木造の有孔梁に関してオーソライズされた設計手法は存在しないが、これまで野口や井戸田らにより、有孔梁の強度の評価法について研究が進められ、耐力算定式が提案されている¹⁾～³⁾。また、野口らは最近の研究で撓みの計算方法も提案している⁴⁾。但し、これらの研究は有孔梁の基本的な条件に対して行われており、孔の数が多い場合や孔の位置が梁せいの上下に偏る場合等の特殊なケースについては、未だ手付かずの状況にある。

本実験研究では、大スパンに渡す比較的多くの孔を有する有孔梁を前提として、孔の位置が断面中央と曲げ圧縮側に偏っている場合の2つのケースを取り上げ、実大試験体を用いた曲げ載荷実験を実施した。それぞれのケースにおける耐力性状を把握し、FEM解析結果との比較検討を行ったのでその結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体には外形寸法 200 mm×900 mm×9000 mm のカラマツ異等級対称構成構造用集成材 (E105-F300) を使用し、図1に示すように9個の孔 (直径 200 mm) の位置を変数とする2体を製作した。BH-1は孔が試験体断面中心線上に等間隔に設けられており、BH-2は孔の中心線が断面中心から上方に 125 mm 離れている。孔の直径、数、間隔は実際の建物の配管計画に基づいて決め、BH-2の孔心のずれは、BH-1に対する曲げ剛性の低下が10%以内に収まることを想定し、曲げ圧縮側に断面せいの1/4に相当する部分が残るようにした。

2.2 載荷および測定方法

実験装置構成を図2、写真1に示す。試験体の支持スパン (8.0 m) の三等分点位置で載荷し、個々の載荷点にロードセルを設けて荷重

図1 試験体形状

を把握した。載荷中に試験体が面外に変形しないように、試験体の載荷点近傍2ヶ所に倒れ止めを設けた。また、載荷装置についても、加力梁が面外に回転しないように中央近傍2ヶ所に振れ止めを設けた。載荷は破壊までの単調載荷とした。

測定については、載荷点および中央のたわみを把握し、支持点のめり込み量で補正した。また、純曲げ区間での軸方向の歪分布を調べるため、試験体片面のみ孔の周囲に歪ゲージを貼付した。

3. 実験結果

3.1 荷重－変形関係と破壊性状

両試験体の荷重と中央たわみの関係を図3に示す。図4、図5、写真2、写真3に各試験体の最大耐力時のひび割れ状況を示す。BH-1は300 kN前後から、BH-2は250 kN前後からそれぞれパキパキという割れが断続的に発生し始めた。この音は孔回りに小さな割れが入った際の発生音と考えられる。BH-1では最大耐力となる457.5 kNに達した直後に大きな音とともに瞬間的に試験体全体にせん断破壊が発生した。一方、BH-2は400 kNおよび425 kNを過ぎたあたりで

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⁾ 榎竹中工務店大阪本店設計部 主任

³⁾ 榎竹中工務店技術研究所 研究員

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

²⁾ Chief, Structural Engineering Section, Building Design Dept., Osaka Main Office, Takenaka Corporation

³⁾ Researcher, Research and Development Institute, Takenaka Corporation

図2 実験装置構成

写真1 実験装置構成

孔回りの割れの発生の影響とみられるが、耐力が一時的に低下する。そして最終的に435.4 kNに達した直後に大きな音とともに瞬間的に試験体全体にせん断破壊が発生した。両試験体とも最大耐力まで荷重－変形関係はほぼ線形に推移している。せん断破壊は後述するように、全長の約2/3に亘って試験体を上下二つに分断する形で発生しているが、梁としての曲げ耐力を完全に失わせるものではないため、除荷の際に試験体中央のたわみが大きく戻る。図5に示すように、BH-2では南側載荷点近傍下端のフィンガージョイントから割れが入ったが、最大荷重時の破壊の衝撃で付随的に生じたものである。

孔位置での図心に対する断面二次モーメントについてみると、BH-1に対するBH-2の比は0.93であり、無孔の場合に対するBH-1の比は0.99である。実験では両者の剛性（荷重－変形関係の直線部分について算出）比は0.96であった。なお、無孔の場合の中央たわみ δ を式(1)により計算し、比較のために図3中に点線で示した。

$$\delta = \frac{P}{2} \left\{ \frac{a(3L^2 - 4a^2)}{24EI} + \kappa \frac{a}{GA} \right\} \quad (1)$$

ここに、 P は荷重、 L , a は全スパン長およびせん断スパン、 A , I は断面積と断面二次モーメント、 κ は断面の形状係数（ $=6/5$ ）、 E はヤング係数（ $=10.5 \text{ kN/mm}^2$ ）、 G はせん断弾性係数（ $=E/15$ ）である。

表1に最大耐力時の荷重とたわみを示す。最大耐力に自重を考慮する場合は、荷重値に8.0 kNを加えればよい。BH-2の最大耐力はBH-1の95%となり、孔心位置の耐力への影響は小さかったと言える。同表に単純に孔の断面欠損を考慮した場合の終局耐力計算値を参考値として示した。曲げ耐力（曲げ引張側）については、JASに規定された最外層ラミナ（L125）の引張強度平均値を用いた。せん断耐力は、孔位置の断面積に告示によるせん断基準強度の1/1.5倍を乗じた値である。実験最大耐力は、公称強度を用いて計算したせん断耐力の65～68%、曲げ耐力の80～88%に相当している。

3.2 歪分布

図6に歪ゲージの貼付位置および両試験体の最大耐力時における軸方向歪の分布を示した。孔のある断面（a、c、e、g、i）と孔のない断面（b、d、f、h）に分けて見ると、BH-1ではどちらの断面においても概ね平面保持が成立していると見ることができる。一方、BH-2では平面保持は成立していないが、特徴的な点として、孔のな

図3 荷重－変形関係

表1 実験結果と断面欠損を考慮した計算耐力

試験体	最大耐力時				計算耐力（参考）	
	荷重 (kN)	北側載荷点荷重 (kN)	南側載荷点荷重 (kN)	中央たわみ (mm)	終局曲げ耐力 (kN)	終局せん断耐力 (kN)
BH-1	457.5	229.8	227.7	33.6	570.7	672.0
BH-2	435.4	220.3	215.1	38.5	493.4	

い断面（b、d、f、h）での歪分布を見ると、孔の中心線上での歪が殆どゼロになっていることがわかる。この現象は、曲げモーメントが作用する有孔梁では孔の側方で軸応力が殆ど流れない部分が生じるとする野口の論文¹⁾の記述と合致する。南側の断面aのみ孔直上の歪が圧縮側に反転しているが、最大耐力時に以前に発生していた孔回りのひび割れの影響によるものと考えられる。

4. 解析的検討

4.1 解析方法

本実験についての解析的検討を以下の方針の下に行う。

- 1) 解析プログラムには、Nastran Ver.10.2.0を使用する。
- 2) 解析は線形弾性解析とする。
- 3) モデルは、プレート要素を使用する。

図4 BH-1のひび割れ状況（最大荷重時）

写真2 BH-1 最北端孔破壊状況

図5 BH-2のひび割れ状況（最大荷重時）

写真3 BH-2 最南端孔破壊状況

（歪ゲージ貼付位置：BH-1）

（歪ゲージ貼付位置：BH-2）

※歪ゲージ貼付位置

- ・断面上下端の測定用は、集成材の上面と下面に貼付。
- ・側面の孔の上下に貼付するものは孔縁から30 mm 離す。

図6 純曲げスパン内の歪分布

表2 各層のヤング係数

層区分	等級	ヤング係数 (kN/mm ²)
最外層	L125	12.5
外層	L110	11.0
中間層	L100	10.0
内層	L80	8.0

- 4) 材料特性は、直交異方性材料としてモデル化する。
- 5) ラミナ構成はJASに示される等級構成とし、各層ごとに各等級の平均ヤング係数を与える。繊維直交方向のヤング係数は、繊維方向の1/25とする。
- 6) 境界条件は、一方はピン支持、他方はピンローラー支持とする。
- 7) 孔周辺部分については、円形に近い形となるよう要素を小さくして解析精度を高める。

4.2 解析モデル

BH-1、BH-2ともにカラマツ異等級対称構成構造用集成材E105-F300であるため、ラミナの等級の構成は図7のようになる。ここで各層のラミナのヤング係数を表2に示すように与えた。BH-1、BH-2の解析モデル全体図を図8に示す。

荷重は、自重と2点集中荷重をモデル化する。集中荷重は弾性限荷重時とする。

図7 ラミナ構成モデル化

図 8 FEM 解析モデル

4.3 解析結果

図 9 に BH-1 の変形図を示す。最大変形は梁中央の 36.4mm であり、実験結果の 33.6mm の 1.09 倍であった。BH-2 の最大変形は梁中央で 34.9mm であり、実験結果の 33.2mm の 1.05 倍であった。

図 9 BH-1 変形図

BH-1 の主応力度図を図 10 に示す。黒丸で示した箇所は、孔周囲の引張応力が大きい箇所であり、割裂が発生しやすい箇所と考えられる。実験結果から、孔間のひび割れが左右どちらかの孔の黒丸部分と一致していることがわかる。右から一番目の開孔周囲の主引張応力度最大値は 13.94N/mm²であった。

図 10 BH-1 主応力度図

図 11 BH-2 主応力度図

BH-2 の主応力度図を図 11 に示す。BH-1 と同様に黒丸で示した箇所は、孔周囲の引張応力が大きい箇所である。実験結果から BH-1 と同様に、孔間のひび割れが左右どちらかの孔の黒丸部分と一致していることがわかる。左から一番目の開孔周囲の主引張応力度最大値は 11.13N/mm²であった。

図 12 に純曲げスパン部分の主応力度ベクトル分布図を示す。黄色の矢印は主引張応力度、橙色の矢印は主圧縮応力度を示す。孔周囲では主応力度の方向が円周方向になっていることがわかる。孔間の孔中央高さの歪が 0 に近いのは実験結果に対応している。

図 12 BH-2 主応力度ベクトル分布図

FEM の解析結果と実験結果との比較より、FEM 解析により有孔梁の変形や応力だけではなく、ひび割れが発生する箇所を概ね把握できることがわかった。しかし、現状では割裂の終局耐力の評価法が確立されておらず、解析結果との関係付けが困難な状況にある。孔周囲の主応力度の方向が様々であるのに対して、割裂の条件を適切に設定することが今後の課題であると考えられる。

5. まとめ

貫通孔を設けた集成材梁の耐力性状を把握することを目的として実大試験体（外形寸法 200×900×9000）を用いた曲げ破壊実験を実施した。直径 200 mm の孔を 9 個、孔心間隔 600 mm で断面せいを中心線上に設けたものと、断面せい中心線から 125 mm 上の位置に設けたものの 2 体を試験体とした。本実験により以下の知見を得た。

- 1) 2 体の試験体はいずれも孔回りに発生したひび割れが徐々に拡大進展し、その一つがせん断割れを引き起こして破壊した。
- 2) 孔心をずらした試験体の最大耐力は、孔心が中心にある試験体の 95%を示し、孔心位置のずれの耐力への影響は小さかった。
- 3) 最大耐力は、孔の断面欠損を考慮して公称強度を用いて計算したせん断耐力の 65～68%、曲げ耐力の 80～88%に相当した。
- 4) FEM 解析により、たわみや応力を概ね把握できることを示した。しかし破壊の判定法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)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
- 5)D. Henrik : The Strength of Glulam Beams with Holes. A Survey of Tests and Calculation Methods, TVSM-3068, Lund University, 2007

[2012 年 10 月 17 日原稿受理 2013 年 1 月 22 日採用決定]