

## 曲げを受ける集成材の耐荷力分布について

### Load carrying capacity distribution of glulam beams subjected to bending moment

○平沢 秀之\* 宮武 敦\*\* 中村 昇\*\*\*

HIRASAWA Hideyuki, MIYATAKE Atsushi and NAKAMURA Noboru

\*博(工学) 函館工業高等専門学校 (〒042-8501 函館市戸倉町14-1)  
\*\*農修 (独)森林総合研究所 (〒305-8687 茨城県つくば市松の里1)  
\*\*\*農博 新潟大学農学部 (〒950-2181 新潟市五十嵐二の町8050)

**ABSTRACT** Mechanical quality of glued laminated timber is quite high in general and is appropriate to bridges as well as architectural structures. Performance of glued laminated timber depends on each lamina even though a strength grade is given to the glued laminated timber. In this study, the effect of unevenness of lamina's strength on the distribution of load carrying capacity of glulam beams is investigated. Glulam beams consist of laminas given by simulation as normal distribution, without too low strength laminas. As a result of analysis, it is obtained that the load carrying capacity distribution of glulam beams fits log-normal distribution. Analytical results will become basic data in limit state design method.

**Keywords** : 集成材、ラミナ、限界状態設計法、正規分布  
*glulam beam, lamina, limit state design method, normal distribution*

#### 1. まえがき

ここ数年、製造業や非製造業を問わず多くの産業分野で環境負荷低減への取り組みや、研究開発が行われてきている。橋梁建設の分野でも二酸化炭素排出量に関する研究<sup>1)</sup>やLCCに関する研究<sup>2)</sup>等、環境問題を対象とした研究が活発化している。橋梁に使用される構造材料を環境負荷の観点から見た場合、木材は著しい省エネルギー性、資源の循環活用、温暖化防止効果の面で非常に有利な材料と言える<sup>3)</sup>。資源の持続的循環を可能とする社会を形成するために、橋梁の材料として木材を使用することは有効な方法の一つとなりうる。

木材は生物材料であるため、樹種毎に品質のばらつきが見られ、節などの欠点が存在することもある。一方、木材を薄い挽き板に加工し、接着剤を使って積層した集成材は、強度のばらつきが減少し、大断面部材も製作可能であるため、構造材料として非常に優れている。集成材は日本農林規格(JAS)により強度等級が規定されており<sup>4)</sup>、ラミナの配置による断面構成から、所定の強度を有する部材を製作することができる。日本では、この集成材を橋梁に使用したいいわゆる近代木橋<sup>5)</sup>が、この17,8年の間に建設されるようになった。

集成材の強度は、一般に製材の強度よりばらつきが小さいが、断面を構成する各ラミナの強度とヤング係数に依存するため、その値は変動する。木橋を合理的に設計するには、集成材の耐荷力の分布を把握する必要がある。本研究の目的は木橋の限界状態設計法確立のための基礎資料を提示することであり、集成材の曲げ耐荷力の確率分布を求める計算をモンテカルロシミュレーション<sup>6)</sup>により実施したものである。解析対象とした集成材は、強度等級がE95-F270のカラマツ集成材である。集成材に使用されるラミナ1枚1枚の強度とヤング係数について、過去のデータに基づいて5通りの分布を仮定し、それらのラミナから構成される集成材の耐荷力が強度等級の値に対してどの程度の変動を有するかについて検討を行っている。

## 2. 集成材に用いられるラミナ

### 2.1 ラミナ構成とヤング係数分布

本研究で検討対象とする集成材は、積層数を10層とし、異等級構成でE95-F270のカラマツ集成材である。この強度等級の性能を発現させるための各ラミナの条件は、JASにより図-1のように規定されている。図中のL100とは、ラミナの繊維方向ヤング係数が100 [tf/cm<sup>2</sup>](=9800[N/mm<sup>2</sup>])であることを意味する。これらの値は通常下限値であり、基準値を超えていれば強度等級を満たしていることになる。従って、ラミナのヤング係数は、図-1のようなばらつきを持った値となる。例えば、L100のラミナはヤング係数が100~110[tf/cm<sup>2</sup>]のみではなく、110[tf/cm<sup>2</sup>]以上のラミナが含まれていることもある。

集成材の製造過程において、10体の10プライ集成材に必要なラミナ100枚を製作すると仮定して、国産の原木丸太から利用する場合を考える。ラミナの製材の段階では、例えば歩留まりを考えて150枚ラミナを製材することになる。集成材の断面を構成するとき、なるべく多くの材を使いたいので、L110のラミナが必要な箇所に実際はL130等のような材も紛れ込むことがあり得る。本研究では、このような状況を考慮して数値シミュレーションを行うこととする。

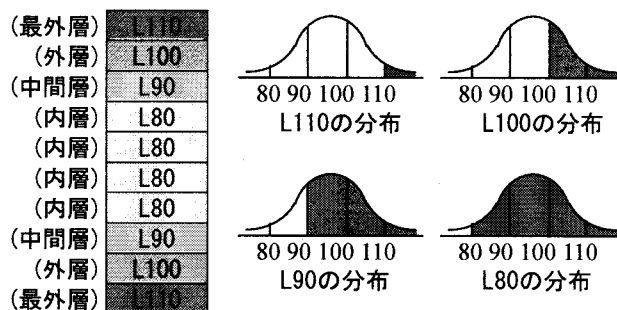
### 2.2 ヤング係数の実測データ

北海道大学において、集成材の耐荷力実験が実施されている<sup>7)</sup>。このとき製作された集成材は、幅150[mm]、桁高350[mm]、全長4600[mm]の寸法を有し、厚さ35[mm]のラミナ10層から成るものである。供試体の数は全部で7体であり、これらは全てE95-F270のカラマツ集成材である。

各供試体のラミナのヤング係数は、ラミナの製造工程で使用されるグレーディングマシンにより、表-1のように得られている。これらのデータから平均値 $\mu_{Ei}$ と標準偏差 $\sigma_{Ei}$ を求めると、 $\mu_{Ei} = 8858[N/mm^2]$ 、 $\sigma_{Ei} = 1905[N/mm^2]$ となる。図-2の棒グラフは表-1のデータをヒストグラムとして表したものである。

表-1 実験供試体ラミナのヤング係数の実測値 [N/mm<sup>2</sup>]

		供試体名			
		TYPE-1	TYPE-2	...	TYPE-7
ラミナ	1	13720	12250		10094
	2	8918	8036		8036
	3	8820	7938		6762
	4	6958	8330		6272
	5	6762	7350		7840
	6	7350	8526		7644
	7	7644	7448		8820
	8	8918	9212		7644
	9	9898	9310		8526
	10	13622	11956		9800



#### ラミナ構成の定義

- 最外層：両外側から1/16以内の部分
- 外層：両外側から1/16を越え、1/8以内の部分で最外層以外
- 中間層：最外層、外層、内層以外の部分
- 内層：両外側から1/4以上

図-1 集成材のラミナ構成(積層数10層)

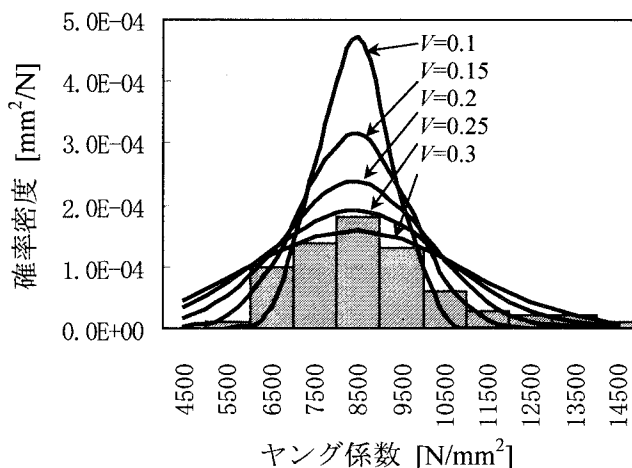


図-2 ラミナのヤング係数分布

これらの分布を正規分布と仮定し、更にヤング係数の値が小さくて使用されなかったラミナ(図-2の左端の領域)も考慮して確率密度関数を描くと、平均値を8400、変動係数を $V=0.25$ とする場合に良くフィットする。本研究では、ラミナのばらつきが集成材の耐荷力に及ぼす影響を調べるため、 $V=0.25$ のほか、図-2の実線で示すような $V=0.1\sim 0.3$ の全部で5通りの分布を仮定し、シミュレーションを実行する。

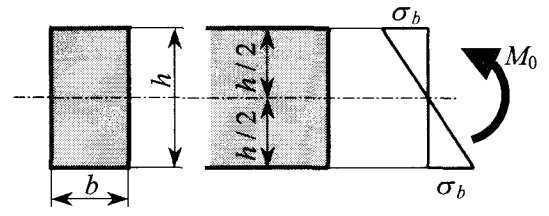
### 3. 集成材の曲げ耐荷力

#### 3.1 終局曲げモーメント

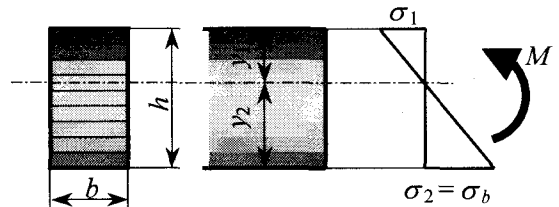
強度等級がE95-F270の集成材の曲げ耐荷力を基準曲げ耐荷力 $M_0$ とする。集成材の終局状態は、桁断面の引張縁部が曲げ強度 $\sigma_b$ に達したときと仮定する。図-3(a)のように、ヤング係数がE95( $=9310[\text{N/mm}^2]$ )である均一断面の $M_0$ を求める。曲げ強度F270( $=27[\text{N/mm}^2]$ )は、基準曲げ強度の5%下限値( $33.9[\text{N/mm}^2]$ )に各種の調整係数をかけて得られたものである<sup>4)</sup>。そこで、ここでは $\sigma_b$ の値として調整係数をかける前の $33.9[\text{N/mm}^2]$ を採用するものとする。集成材断面の高さ $h$ と幅 $b$ をそれぞれ $350[\text{mm}]$ 、 $150[\text{mm}]$ として、 $M_0$ を求めると、以下ようになる。

$$M_0 = \left\{ \frac{1}{2} \sigma_b \left( \frac{h}{2} \right) b \frac{2}{3} \left( \frac{h}{2} \right) \right\} \times 2$$

$$= \frac{1}{6} b h^2 \sigma_b = 1.038 \times 10^8 [\text{Nmm}] \quad (1)$$



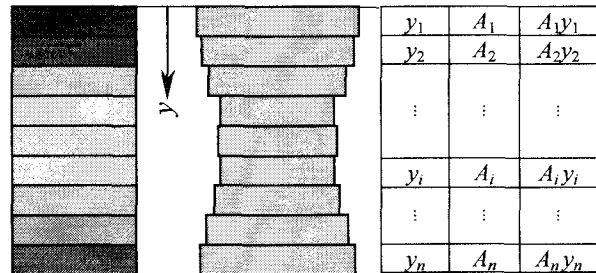
(a) 均一断面



(b) 非対称断面

上式は断面が均一なものとして計算した曲げモーメントである。断面内の各ラミナのヤング係数が異なることを考慮した場合は、断面が上下非対称となり、応力分布は図-3(b)のようになる。中立軸の位置 $y_1, y_2$ は、10種類の異なるヤング係数から成る合成断面と見なして算定することができる。桁断面の引張縁部が曲げ強度 $\sigma_b$ に達するときの曲げモーメント $M$ は次式のようになる。

$$M = \frac{\sigma_b I_v}{y_2} \quad (2)$$



(a) 実際の断面 (b) 換算断面

図-4 合成断面の断面計算

ここで、 $I_v$ はラミナのヤング係数を考慮した合成断面としての断面2次モーメントであり、図-4のような換算断面を考えることで求めることができる。

この $I_v$ を算出するために、断面上端から各ラミナまでの距離を $y_i$ とし、換算断面積を $A_i$ とおく。 $A_i$ はラミナのヤング係数を基準値( $=9310 [\text{N/mm}^2]$ )で除した値(ヤング係数比)を実際の断面積にかけて得ることができる。これらの $y_i$ と $A_i$ を用いると、 $I_v$ は次式により求めることができる。

$$y_1 = \frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i} \quad (3)$$

$$I_v = \sum A_i y_i^2 - y_1^2 \sum A_i \quad (4)$$

### 3.2 曲げ耐荷力の算定手順

以下の手順に従って、集成材の曲げ耐荷力を推定する。

- (1)150枚のラミナのヤング係数と曲げ強度を疑似乱数により決定する。
- (2)ヤング係数 $E_1, E_2, \dots, E_{150}$ を大きい順に並べ替え、最初の20枚をL110用に、次の20枚をL100用に、以下同様にして100枚のラミナの配置を割り当てる。ここで、L110の20枚は、集成材10本に対してランダムに割り当てるものとする。L100, L90, L80も同様である。
- (3)集成材10本の断面が決定する。
- (4)(1)~(3)を1000回繰り返し、集成材を1万本作製する。
- (5)集成材1本について、断面計算を行い、中立軸の位置と断面2次モーメントを算出する。
- (6)その集成材の終局曲げモーメント $M$ 、及びその無次元化量 $M/M_0$ を計算する。
- (7)(5)~(6)を集成材の本数だけ、すなわち1万回繰り返す。
- (8) $M/M_0$ のヒストグラムを作成し、確率分布を求める。

以上の一連の手順を、図-2のように5通りに仮定したラミナの変動係数について実行する。

## 4. モンテカルロシミュレーション

### 4.1 ラミナのヤング係数と曲げ強度

曲げ耐荷力の算定手順(1)において、ラミナのヤング係数と曲げ強度の2変数を、多変量相関乱数により決定する。例えば $V=0.1$ のとき、ラミナのヤング係数は正規分布 $N(8400, 840^2)$ に従うと仮定している。

曲げ強度に関しては、ヤング係数から推定する以下のような式が導かれている<sup>4)</sup>。

$$y = \begin{cases} 3x+12 & (x \leq 14 [\text{GPa}]) \\ 4.5x-9 & (x > 14 [\text{GPa}]) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $x, y$ はそれぞれヤング係数[GPa]、曲げ強度[MPa]である。式(5)を用いると、曲げ強度の平均値は $37.2[\text{N}/\text{mm}^2]$ となる。また、曲げ強度の変動係数を0.1と仮定すると、標準偏差は $3.72[\text{N}/\text{mm}^2]$ となる。これらより、ラミナの曲げ強度は正規分布 $N(37.2, 3.72^2)$ に従うものとした。また、ヤング係数と曲げ強度の相関係数 $r$ は、文献8)より $r=0.74$ と仮定した。

これらの条件の下で、150本 $\times$ 1000回=15万本分のラミナに関するシミュレーションを行う。図-5は、このうち1000本分のラミナに関するヤング係数と曲げ強度の分布を表したものである。なお、15万本のうち集成材に使用されるのは、歩留まりを考慮して、ここでは10万本としている。

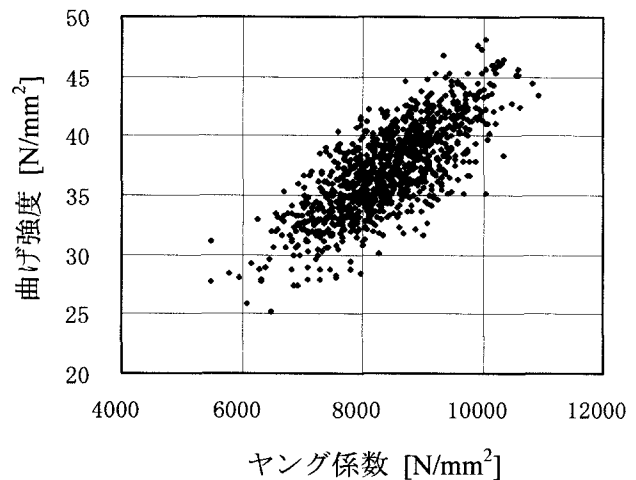


図-5 シミュレーション結果

表-2 集成材の終局曲げモーメント ( $V=0.1$  のとき)

集成材 No.	終局曲げモーメント $M$ [Nmm]	$M/M_0$
1	1.200E+08	1.16
2	1.446E+08	1.39
3	1.380E+08	1.33
4	1.232E+08	1.19
5	1.235E+08	1.19
6	1.234E+08	1.19
7	1.327E+08	1.28
⋮	⋮	⋮
10000	1.259E+08	1.21

### 4.2 終局曲げモーメントの算定

曲げ耐荷力の算定手順(5)~(6)において、ラミナの変動係数が0.1のとき、集成材1万本分の終局曲げモーメントを計算した結果、表-2のようになった。終局曲げモーメントの無次元化量 $M/M_0$

の平均値及び標準偏差はそれぞれ1.23, 0.092となった。同様にしてラミナの変動係数が0.1~0.3までの解析をそれぞれ実行し、 $M/M_0$ の平均値及び標準偏差を求めると表-3の通りとなる。ラミナの平均値は一定値としているが、変動係数が増加するに連れて $M/M_0$ の平均値は増加していることが分かる。 $M/M_0$ の標準偏差は当然ながら増加している。

表-3 終局曲げモーメントの平均値と標準偏差

ラミナの変動係数 $V$	$M/M_0$ の平均値	$M/M_0$ の標準偏差
0.1	1.23	0.092
0.15	1.35	0.14
0.2	1.49	0.20
0.25	1.63	0.26
0.3	1.78	0.33

### 5. 曲げ耐荷力の確率分布

表-2から度数分布表を作成すると、表-4のようになる。確率密度の欄は、相対度数を階級の幅で除して算出している。表-4はラミナの変動係数が0.1の場合の結果であるが、その他の場合についても同様に度数分布表と確率密度を得ることができる。図-6は表-4からヒストグラムを作成したものである。図中の曲線は、対数正規分布 $LN(0.201, 0.075^2)$ の確率密度関数を表している。シミュレーションにより得られたヒストグラムは、対数正規分布に非常によくフィットしている。

表-4 度数分布表と確率密度関数 ( $V=0.1$  のとき)

$M/M_0$ の階級	$M/M_0$ の階級値	度数	確率密度	対数正規分布による確率密度
0.7~0.8	0.75	0	0.0000	0.0000
0.8~0.9	0.85	1	0.0010	0.0000
0.9~1.0	0.95	35	0.0350	0.0185
1.0~1.1	1.05	716	0.7160	0.6330
1.1~1.2	1.15	3197	3.1970	3.3087
1.2~1.3	1.25	4005	4.0050	4.0937
1.3~1.4	1.35	1686	1.6860	1.6487
1.4~1.5	1.45	323	0.3230	0.2739
1.5~1.6	1.55	36	0.0360	0.0225
1.6~1.7	1.65	1	0.0010	0.0010
1.7~1.8	1.75	0	0.0000	0.0000

図-7はラミナの変動係数が0.1~0.3として得られた $M/M_0$ の分布を対数正規分布として描いたものである。この図ではヒストグラムが省略されているが、対数正規分布と非常に良くフィットする結果が得られている。

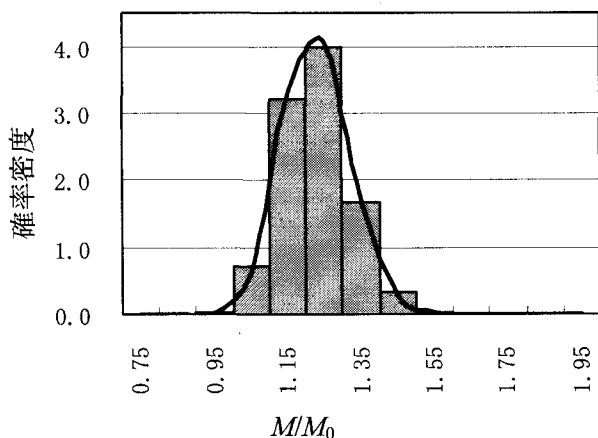


図-6 ヒストグラムと確率密度関数

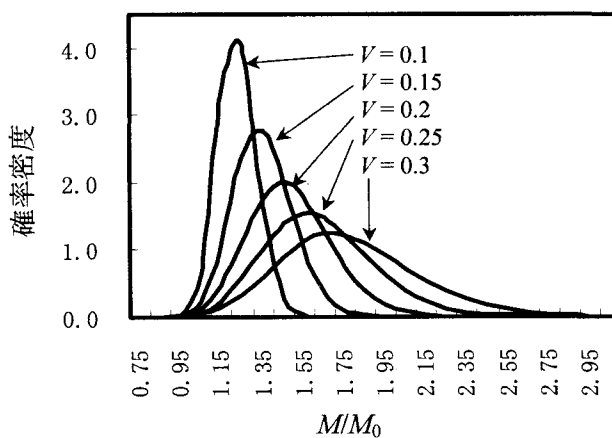


図-7 ラミナの変動係数と耐荷力分布

### 6. あとがき

集成材を構成するラミナには、ヤング係数と曲げ強度のばらつきが存在することを考慮して、集成材の曲げ耐荷力をモンテカルロシミュレーションにより算定した。その結果、強度等級で示

される曲げ強度から求めた基準耐荷力より高い値を示した。ラミナのヤング係数と曲げ強度を一定としても、変動係数を増加させると集成材の曲げ耐荷力は増大し、変動係数=0.3のときでは曲げ耐荷力は基準値の1.78倍となった。また、集成材の耐荷力分布は対数正規分布に非常によく一致する結果となった。

今後はラミナの実測データの数を増やし、より実際の状態に近いシミュレーションを行う予定である。また、カラマツ以外の樹種や他の強度等級の集成材についても検討したいと考えている。今回は集成材1本の曲げ耐荷力を対象としたが、今後更に橋梁全体としての終局耐力を算定したいと考えている。

#### 参考文献

- 1)米沢栄二, 三輪恭久, 中原勝也, 中村俊一:CO<sub>2</sub>発生量に着目した鋼橋の環境負荷, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1075-1082, 2001.
- 2)伊藤義人, 梅田健貴, 西川和廣:少数主桁橋梁と従来型橋梁のライフサイクル環境負荷とコストの比較研究, 構造工学論文集, pp.1261-1272, 2000.
- 3)有馬孝礼:なぜ、いま木材か、木橋か, 土木学会平成16年度全国大会研究討論会研-7資料, pp.2-6, 2004.
- 4)構造用集成材の日本農林規格:平成15年2月27日農林水産省告示第235号.
- 5)林野庁:近代木橋の時代, 龍源社, 1995.
- 6)星谷勝, 石井清:構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.
- 7)平沢秀之, 及川昭夫, 小林朗, 入江康孝:炭素繊維プレートによる集成材の性能向上と橋梁への適用について, 第3回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp. 155-160, 2004.
- 8)(社)日本建築学会:木質構造設計規準・同解説, pp.165, 1995.