

ラミナのばらつきを考慮した集成材の曲げ耐荷カシミュレーション

Load carrying capacity simulation of glulam beams subjected to bending moment considering unevenness of laminas

函館工業高等専門学校 ○正員 平沢 秀之 (Hirasawa Hideyuki)

(独)森林総合研究所

宮武 敦 (Miyatake Atsushi)

新潟大学農学部

中村 昇 (Nakamura Noboru)

1. まえがき

近年、環境負荷低減への関心が高まり、様々な産業分野でその取り組みがなされてきている。橋梁建設の分野でも二酸化炭素排出量に関する研究¹⁾やLCCに関する研究²⁾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³⁾。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⁴⁾、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わゆる近代木橋⁵⁾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⁶⁾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。なお、ここでは乱数生成のアルゴリズムとしてMersenne Twister⁷⁾を使用した。

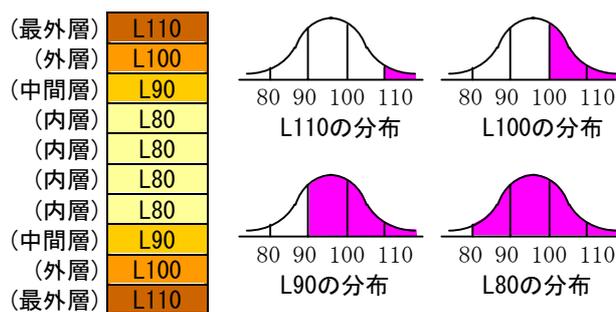
2. 集成材に用いられるラミナ

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 $100[\text{tf}/\text{cm}^2](=9800[\text{N}/\text{mm}^2])$ 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 $100\sim 110[\text{tf}/\text{cm}^2]$ のみではなく、 $110[\text{tf}/\text{cm}^2]$ 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。



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とヤング係数の分布

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⁸⁾。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 μ_{Ei} と標準偏差 σ_{Ei} を求めると、 $\mu_{Ei} = 8858[\text{N}/\text{mm}^2]$ 、 $\sigma_{Ei} = 1905[\text{N}/\text{mm}^2]$ となる。図-2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。

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、図-2の実線のグラフのようになる。ここで確率密度関数の平均値を8400、標準偏差を2100と仮定した。

表-1 供試体ラミナのヤング係数 [N/mm²]

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

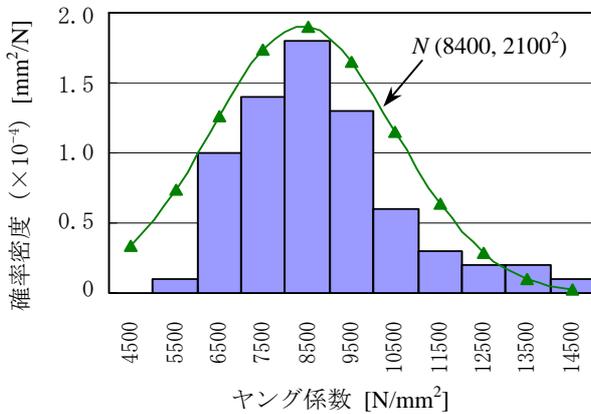


図-2 供試体ラミナのヤング係数分布

3. 集成材の曲げ耐力

3.1 終局曲げモーメント

強度等級がE95-F270の集成材の曲げ耐力を基準曲げ耐力 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 σ_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[N/mm²])である均一断面の M_0 を求める。曲げ強度F270(=27[N/mm²])は、基準曲げ強度の5%下限値(33.9[N/mm²])に各種の調整係数をかけて得られたものである⁴⁾。そこで、ここでは σ_b の値として調整係数をかける前の33.9[N/mm²]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[mm]、150[mm]として、 M_0 を求めると、以下のようになる。

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

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

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 σ_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。

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

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。

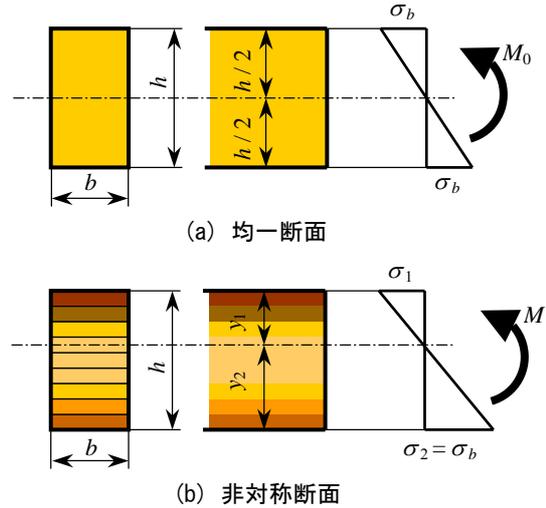
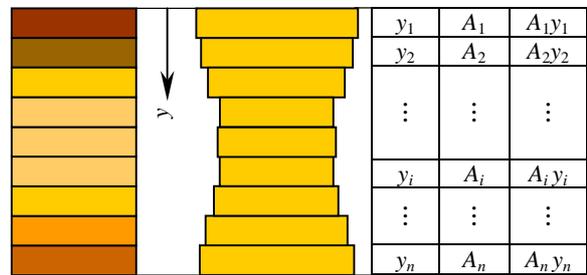


図-3 桁断面の曲げ応力分布



(a) 実際の断面 (b) 換算断面 (c) 距離と換算断面積

図-4 合成断面の断面計算

今、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[N/mm²])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 を用いて、 I_v は次式により求める。

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

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

3.2 曲げ耐力の算定手順

以下の手順に従って、集成材の曲げ耐力を推定する。

(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回繰り返す、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。

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。このとき、ヤング係数は図-2より正規分布 $N(8400, 2100^2)$ に従うと仮定した。

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⁴⁾。

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

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0.15と仮定すると、標準偏差は $5.58[\text{N}/\text{mm}^2]$ となる。これらより、ラミナの曲げ強度は正規分布 $N(37.2, 5.58^2)$ 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9)より $r = 0.74$ と仮定した。

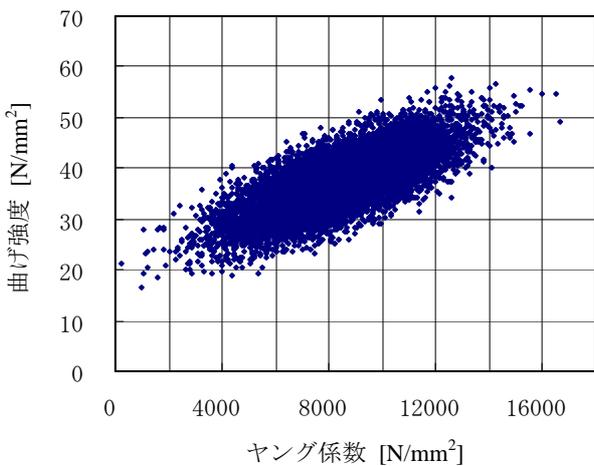


図-5 シミュレーション結果

これらの条件の下で、150本×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1万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。

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、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1.48, 0.17となった。

表-2 集成材の終局曲げモーメント

集成材 No.	終局曲げモーメント M [Nmm]	M/M_0
1	1.414E+08	1.36
2	1.852E+08	1.78
3	1.711E+08	1.65
4	1.471E+08	1.42
5	1.455E+08	1.40
6	1.474E+08	1.42
7	1.620E+08	1.56
⋮	⋮	⋮
10000	1.511E+08	1.46

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-3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。これよりヒストグラムを作成すると、図-6が得られる。

表-3 度数分布表と確率密度関数

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
0.5～0.6	0.55	0	0.0000	5.4579E-16
0.6～0.7	0.65	0	0.0000	4.5239E-11
0.7～0.8	0.75	0	0.0000	1.3570E-07
0.8～0.9	0.85	1	0.0010	4.1387E-05
0.9～1.0	0.95	3	0.0030	0.0024
1.0～1.1	1.05	58	0.0580	0.0428
1.1～1.2	1.15	310	0.3100	0.2975
1.2～1.3	1.25	979	0.9790	1.0091
1.3～1.4	1.35	1915	1.9150	1.9446
1.4～1.5	1.45	2471	2.4710	2.3847
1.5～1.6	1.55	2006	2.0060	2.0292
1.6～1.7	1.65	1242	1.2420	1.2811
1.7～1.8	1.75	611	0.6110	0.6327
1.8～1.9	1.85	255	0.2550	0.2549
1.9～2.0	1.95	106	0.1060	0.0867
2.0～2.1	2.05	30	0.0300	0.0256
2.1～2.2	2.15	9	0.0090	0.0067
2.2～2.3	2.25	4	0.0040	0.0016
2.3～2.4	2.35	0	0.0000	0.0003
2.4～2.5	2.45	0	0.0000	6.9617E-05
2.5～2.6	2.55	0	0.0000	1.3251E-05

る。図中の曲線は、対数正規分布 $LN(0.386, 0.114^2)$ 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。曲げ耐荷力は基準値の1.48倍となり、かなり高めめの値を示している。

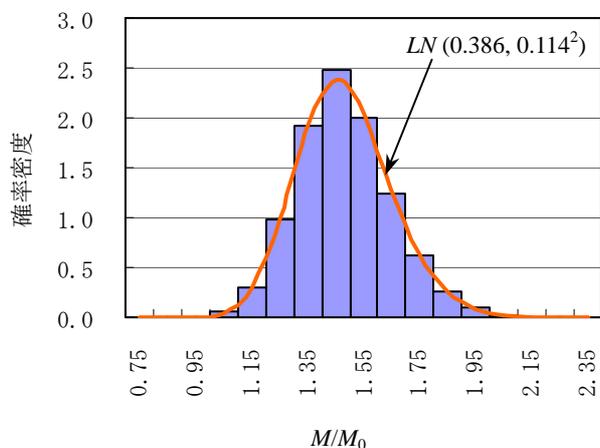


図-6 ヒストグラムと確率密度関数

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かなり高い値を示した。また、耐荷力の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: CO₂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)M. Matsumoto and T. Nishimura: Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation Vol. 8, No. 1, January pp.3-30, 1998.
- 8)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.
- 9)(社)日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, pp.165, 1995.