

JAS に対応した集成材の製造技術に関する研究 — シミュレーションによる岡山県産スギ集成材の強度予測 —

野上英孝

1. はじめに

平成8年1月に従来の構造用集成材および構造用大断面集成材の日本農林規格が改正、一本化され、「構造用集成材の日本農林規格」(以下 JAS) が制定された。この JAS に対応する集成材の製造技術を検討するために、これまでラミナの強度試験、接着性能試験、実大(中断面)集成材の製造実証試験及び曲げ強度試験を行ってきた。

これまでの結果から、岡山県産スギから JAS に規定される性能を満たす集成材の製造が可能であると思われる。しかし、実大集成材は6体(2種類の強度等級につき各3体)しか作製できず、その曲げ強度試験の結果については十分な信頼性を得られたとは言い難い。また、大量の実大集成材を作製し、強度試験を行うことは極めて困難である。

そこで本年度は、確率・統計的手法を用いたシミュレーションにより、岡山県産スギ集成材の強度予測を行なった。

2. 方法

1) 試験に用いたシミュレーションモデル

木材のようにばらつきの大きな材料を確率的に取り扱う場合に、乱数を用いた手法(モンテカルロ法¹⁾)が極めて有効である。モンテカルロ法を集成材の強度予測に用いたシミュレーションモデルがいくつか提案されているが、最も予測の精度が良く、実用的であると思われる、板垣ら²⁾の提案したモデルを用いた。

2) モンテカルロシミュレーションの流れ

シミュレーションの流れについては次のとおりであるが、シミュレーションに与えたパラメータの詳細については末尾の参考資料に示す。

① 仮想ラミナの作製

過去に行った県産スギラミナの強度性能試験結果等(以下、原データ)により得られる、曲げヤング係数(以下、MOE)の確率分布に従い乱数を発生させ、原データの強度特性(MOE及び曲げ強度、引張強度、圧縮強度)を反映した仮想ラミナを大量に作製した。

② 仮想集成材の作製

実大集成材の曲げ強度試験で用いた試験体の断面構成に従い、仮想ラミナで構成した仮想集成材を作製した。

③ 仮想集成材のMOE

仮想集成材の各ラミナ内ではMOEは均一であると仮定し、等価曲げ剛性の関係式(1)により、仮想集成材のMOEを求めた。

$$EI = \sum_{i=1}^n E_i I_{i-nn'} \quad (1)$$

ここで、

- E : 集成材のヤング係数
- I : 集成材の断面2次モーメント
- E_i : 各層のヤング係数
- $I_{i-nn'}$: 各層の中立軸に関する断面2次モーメント

④ 仮想集成材の曲げ破壊係数

集成材の曲げ破壊は、圧縮側でラミナが圧縮強度に達するまでは完全に弾性で、それ以降は完全塑性になり、その後、集成材引張側の応力が最外層ラミナの曲げ破壊係数と引っ張り強度によって与えられる一定の複合応力に達した際に破壊する^{3),4)}と仮定し、関係式(2)で表される破壊条件を適用した。このとき、積層によるラミナの補強効果²⁾及び材長方向の寸法効果⁵⁾を考慮して、仮想ラミナの引張強度補正を行った。

$$\left(\frac{\sigma_{i-b}}{f_{i-b}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{i-t}}{f_{i-t}} \right)^2 = 1 \quad (2)$$

ここで、

- σ_{i-b} : i 層ラミナの曲げ応力成分
- σ_{i-t} : i 層ラミナの引張応力成分
- f_{i-b} : i 層ラミナの曲げ破壊係数
- f_{i-t} : i 層ラミナの引っ張り強さ

⑤ 仮想集成材の強度予測

上記の行程をコンピューターにより1,000回繰り返して、仮想集成材の強度分布を求めた。

3) 集成材モデル

シミュレートする集成材の断面構成は、平成13年度に実施した実大集成材の製造試験で作製された試験体に従い、第1表の通りとした。

第1表 集成材構成

層	E65-F225	E95-F275
1 最外層	L80	L110
2 外層	L70	L100
3 中間層	L60	L90
4 "	L60	L90
5 内層	L50	L70
6 "	L50	L70
7 "	L50	L70
8 "	L50	L70
9 中間層	L60	L90
10 "	L60	L90
11 外層	L70	L100
12 最外層	L80	L110

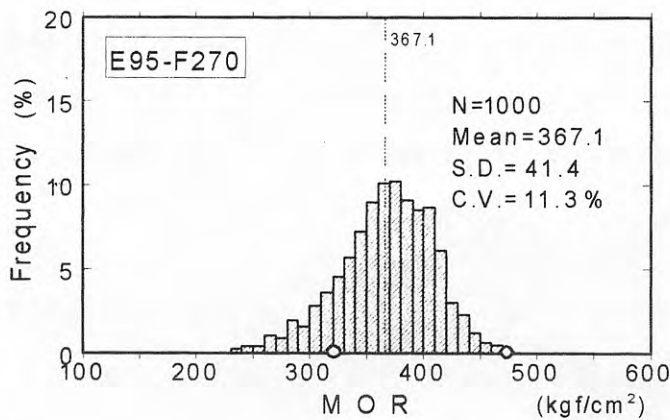
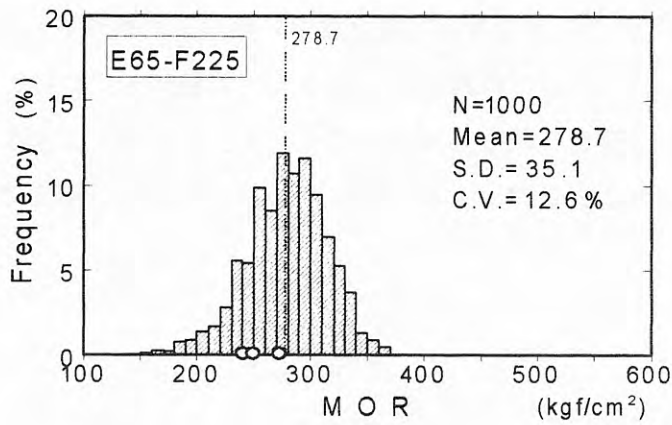
※ラミナ厚 25mm、梁成 300mm、梁幅 125mm

3. 結果

シミュレーションの予測結果の一覧を、実大実験の結果と併せて第2表に示す。またMORの予測分布を実験結果と併せて第1図に示す。

第2表 シミュレーション結果一覧

	E65-F225		E95-F270	
	MOE (tf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)	MOE (tf/cm ²)	MOR (kgf/cm ²)
サンプル数	1000	1000	1000	1000
平均値	75.94	278.7	106.53	367.1
最大値	79.14	367.8	110.22	475.4
最小値	72.74	157.0	102.61	233.6
標準偏差	1.12	35.1	1.49	41.4
変動係数(%)	1.48	12.59	1.40	11.27
MOE平均値せん断補正	72.36	—	101.50	—
MOR5%下限値	—	217.7	—	289.4
実験平均値	72.80	255.0	97.50	374.0



第1図 実大実験結果とシミュレーションによる予測分布

予測結果と既往の実大実験結果との適合性について考察すると、ヤング係数に関しては、予測結果はいずれも実験値より 5 ~ 10%高い値であった。これは、予測値は純モーメントによるヤング係数を表しているのに対し、実大試験結果の方はせん断たわみの影響を含んでいるため、やや低い値になっているといえる。このためせん断たわみの影響を補正して⁵⁾ヤング係数を求めたところ、E65-F225 等級ではほぼ実験値と等しく、E95-F270 等級でも 4tf/cm^2 程度の差であり、かなり良い適合性であった。

また曲げ破壊係数に関しては、平均値はほぼ予測値と適合しているが、E65-F225 等級では実験値が平均値付近に集まっているものの、E95-F270 等級ではかなりばらつきがみられた。実験データが少ないため、適合度の統計的な評価は困難であるが、予測値は実験値と概ね適合していると評価できる。

シミュレーションの結果について、JAS の各等級基準への適合性を評価すると、ヤング係数は

いずれも $6 \sim 7 \text{ tf/cm}^2$ 上回っているものの、曲げ破壊係数については E65-F225 等級で、下限値を 7.5 kgf/cm^2 程度下回っており、若干等級に適合しない集成材が製造される可能性が示された。しかしながら今回のシミュレーションに用いられたラミナ試験データには、節径比が比較的大きいものなどラミナの等級下限値を下回る強度のものも含まれており、このようなラミナをプルーフローディングなど工程上の品質管理によって除外することにより、所定の性能を得ることが出来ると考えられる。

4. 結論

岡山県産スギを用いた集成材についてシミュレーションにより得られた予測分布は、実大曲げ試験結果に概ね適合した。

予測された性能分布より、岡山県産スギ材を用いて製造される異等級対称構成 E95-F270 等級の集成材は等級に適合する性能を有すると考えられた。また異等級対称構成 E65-F225 等級の集成材には若干等級に適合しないものが生じる恐れのあることが示されたが、ラミナの品質管理を確実に行うことにより、等級に適合する性能を得ることが可能であると考えられる。

【参考資料】

以下にシミュレーションモデルに与えたパラメーターについて解説する。

1. 原データMOE分布の確率密度関数へのあてはめ

集成材作製に用いられたラミナ202体の静的ヤング係数 (MOE) データ (これを原データとする) の分布を図1に示す。この分布を確率密度関数にあてはめるため適合度の検定を行った。分布形としては、正規分布、対数正規分布、3-パラメータワイブル分布を仮定し、適合度検定 (goodness of fit test) は Kolmogorov-Smirnov (KS) 検定法を用いた。これらの検定は、堀江が開発した「木材強度データの確率・統計手法」⁶⁾における計算シートを用いた。MOEの累積度数分布及び3つの分布関数へあてはめた場合のそれぞれの累積分布関数を図2に示す。各累積分布関数における d_n 値は、正規分布、対数正規分布、3-パラメータワイブル分布のそれぞれに対して、0.037964、0.077575、0.078724となり、適合レベルは正規分布が最も適合度が高かった。これによりラミナのヤング係数分布を正規分布と仮定した。

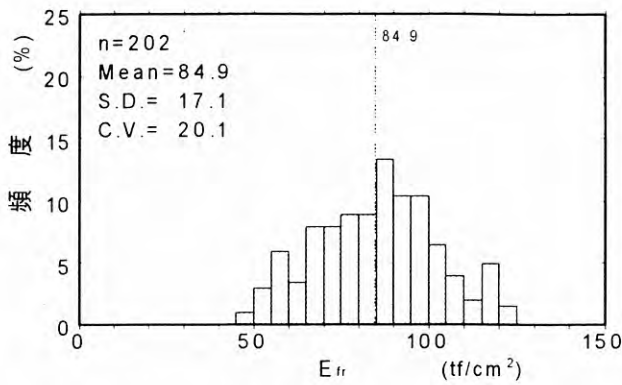


図1 ラミナ原データの MOE 分布

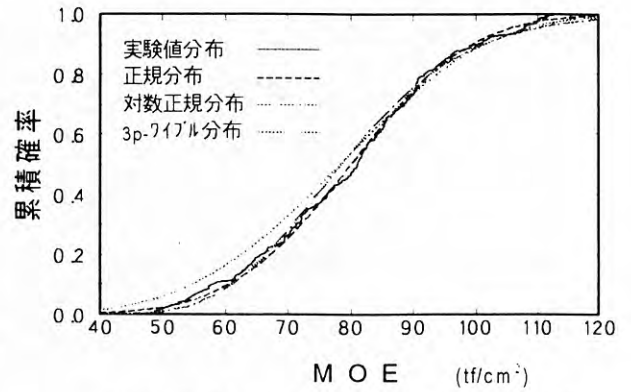


図2 累積度数関数及び各累積分布関数

2. 仮想ラミナの力学的特性

原データヤング係数分布にあてはめた正規分布関数に従う乱数を発生させ、仮想ラミナのヤング係数を決定し、それに対応する強度を決定する。岡山県産スギラミナ（FJ ラミナ）についての引張試験（平成 11 年度実施）および曲げ試験（平成 10 年度実施）結果におけるヤング係数と強度の相関関係を図 3、図 4 に示す。

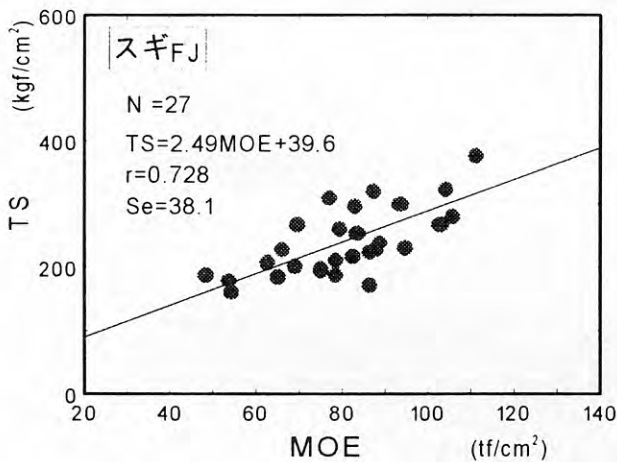


図3 MOEとTSの相関関係

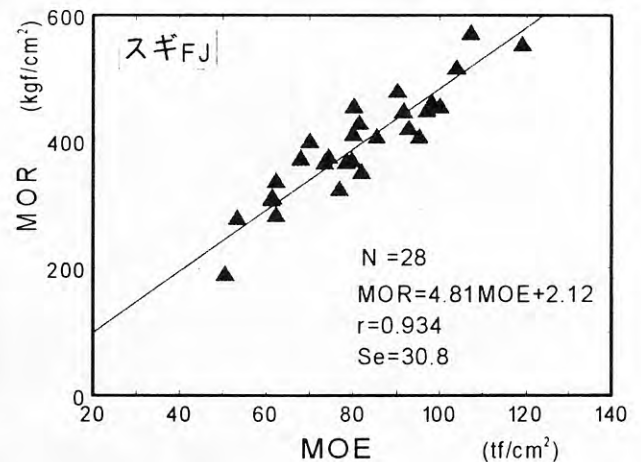


図4 MOEとMORの相関関係

ヤング係数と圧縮強度の回帰データは、以下に示す「エンジニアリングウッド性能評価事業」平成 7 年度報告書第 4 章の梅田らによる圧縮試験結果⁷⁾を用いた。

$$\text{ヤング係数-圧縮強度: } CS=1.39E_r+161.1 \quad r=0.53 \quad Se=26.9$$

また、各強度間の相関関係を考慮した誤差を与えるため、各強度間の相関係数及び各強度のヤング係数に対する残差標準誤差による共分散マトリックスを以下の様に設定した。なお、各強度間の相関データは、前述の「エンジニアリングウッド性能評価事業」平成 7 年度報告書第 4 章の

梅田らによる実験データ⁷⁾を用いた。

$$(MOR, MOR) = 30.8^2$$

$$(TS, MOR) = 0.57 \times 38.1 \times 30.8^2$$

$$(TS, TS) = 38.1^2$$

$$(CS, MOR) = 0.52 \times 30.8^2 \times 26.6$$

$$(CS, TS) = 0.36 \times 26.9 \times 38.1$$

$$(CS, CS) = 26.9^2$$

3. ラミナの積層による補強効果

破壊の確率過程理論より最外層ラミナが片面補強された補強効果は(3)式の様に表示される。

$$\frac{\bar{\sigma}'}{\bar{\sigma}} = 2^{\frac{1}{\hat{a}+1}} \quad (3)$$

$\bar{\sigma}$: ラミナの強度平均

$\bar{\sigma}'$: 片面補強されたラミナの強度平均

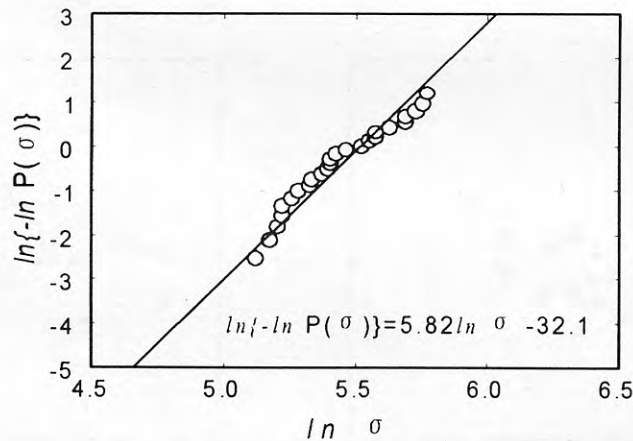


図5 ラミナ引張強度と生存確率の関係

図5はラミナの引張試験の結果より破壊強度とその破壊確率を求め、破壊強度の対数及び生存確率の2回対数を軸にとったものであり、これらの回帰式の傾きより $\beta=4.82$ が求められた。これを

(1)式に代入すると $\bar{\sigma}'/\bar{\sigma}=1.13$ 1.13倍とした。

既往の有限要素法によるモデル解析結果では、片面補強の場合の補強効果が1.13倍であるとき、節径はおよそ2.8cmであり、両面補強の補強効果は1.32倍である。これより両面の補強効果により引張強度を1.32倍とした。

4. 材長方向の寸法効果

引張試験におけるチャック間長さを m 、集成材の曲げ試験における荷重スパンを m' として、寸法効果の一般式における V を m に置き換えて考えると強度比は次のように表される。

$$\frac{\sigma'}{\sigma} = \left(\frac{m}{m'}\right)^{2\alpha} \quad (2)$$

ここで、 σ : チャック間長さが m の時の強度

σ' : チャック間長さが m' の時の強度

「エンジニアリングウッド性能評価事業」の平成8年度実験において、林らはフィンガージョイントラミナと通しラミナについて、引張区間距離を変化させて試験を行い、(2)式の関係における定数 α を3.376と求めている⁸⁾。

この結果に基づき、ラミナ引張試験のチャック間距離と集成材実大曲げ試験の載荷スパン（モーメント最大区間）に応じて仮想ラミナに与える引張強度を補正し、集成材の材長方向における寸法効果を考慮した。

【謝 辞】

本課題の遂行にあたり、秋田県立大学 板垣直行氏に全面的なご指導、ご協力を賜りました。ここに、厚く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 林 知行：“エンジニアードウッド”，日刊木材新聞社，pp. 98-108, 1998
- 2) 平成 10 年度農林水産省補助事業 エンジニアリングウッド性能評価事業報告書，(財) 日本住宅・木材技術センター，1999, pp.19-40
- 3) 小松幸平：“構造用集成材の強度と破壊性状Part II”，木構造設計資料，木構造設計資料編集委員会編，(財) 日本住宅・木材技術センター
- 4) 平嶋義彦，山本幸雄，鈴木滋彦：木材学会誌，“集成材の強度計算モデルおよび確率モデル”，Vol. 40, No. 11, pp. 1178-1179, 1994
- 5) 飯島泰男：“構造用木材—強度データの収集と分析”，日本木材学会木材強度・木質構造研究会，1988, pp1-41
- 6) 堀江和美，木材強度データの確率・統計手法，(有)木質構造研究所，1997
- 7) 平成 7 年度農林水産省補助事業 エンジニアリングウッド性能評価事業報告書，(財) 日本住宅・木材技術センター，1996, pp.49-67
- 8) 平成 8 年度農林水産省補助事業 エンジニアリングウッド性能評価事業報告書，(財) 日本住宅・木材技術センター，1997, pp. 3-16