

木材強度・木質構造研究会 2000年度春期研究会
「限界状態設計法学習会」

4月5日（水） 13:00～16:00

京都大学農学部 第7会場（W502）

座長：原田真樹（森林総合研究所）

第Ⅰ部（13:00～15:00）

1. 限界状態設計法の基礎

森林総合研究所木材利用部 林 知行

2. 材料研究者からみた限界状態設計法

秋田県立大学木材高度加工研究所 飯島 泰男

第Ⅱ部（15:00～16:00）

3. 限界状態設計法 <さわり> Q&A

（有）木質構造研究所 堀江 和美

4. 限界状態設計法による建築物の例

名古屋大学大学院 生命農学研究科 平嶋 義彦

1 信頼性

「信頼性」という用語は、一般には非常に広い意味に用いられているが、信頼性工学では比較的厳密な定義の下で用いられている。例えば、JIS Z 8115 信頼性用語では、信頼性とは「アイテムが与えられた条件で規定の期間中要求された機能を果たす性質」とであると定義されている。同様に、信頼度とは「アイテムが与えられた条件で規定の期間中要求された機能を果たす確率」である。また、アイテムとは「信頼性の対象となるシステム（系）、サブシステム、機器、装置、構成品、部品、素子、要素などの総称またはいずれか」である。なお、信頼性も信頼度も英語ではReliabilityである。

一方「構造信頼性」に関する定義は現在のところ存在しないが、上の定義に従えば「構造信頼性とは、構造部材や構造物が与えられた条件で規定の期間中要求された機能を果たす確率あるいは性質」ということになる。これを現実的な対象物に即して理解するならば、例えば50年間使用する目的で作った建築物がその期間内に地震や強風等によって破壊したり、あるいは変形が大きくなって使えなくなる確率やメカニズムということになる。

2 構造信頼性

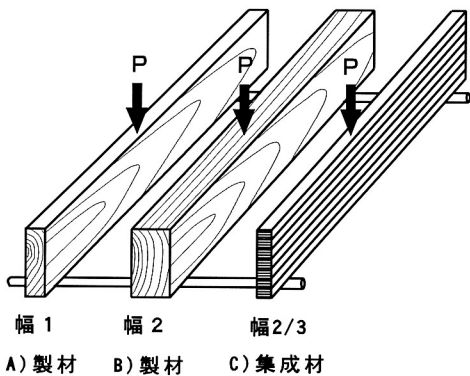


図2.1 木製梁の安全性の比較

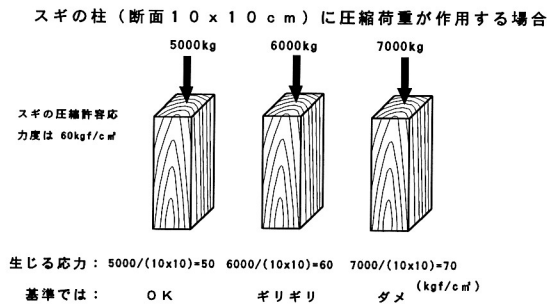
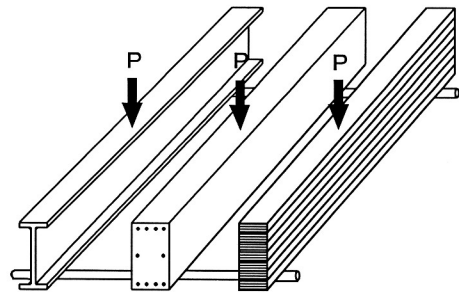


図2.2 許容応力度の考え方(圧縮の場合)



A) I型鋼 B) R C C) 集成材

図2.3 異材料との安全性の比較

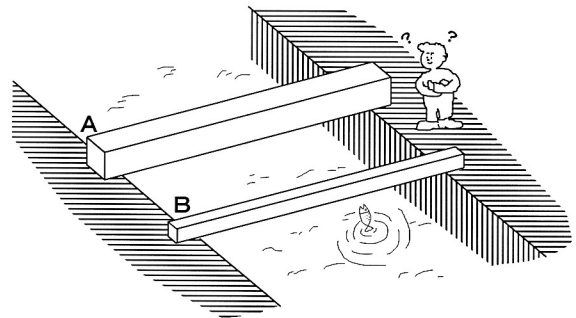


図2.4 川を渡るなら、どちらがどれくらい安全か？

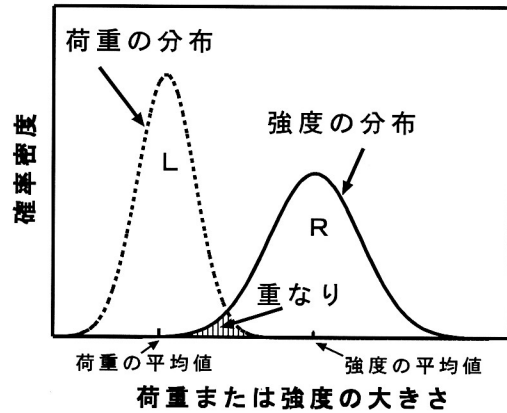


図2.5 構造信頼性の基礎概念(L-Rモデル)

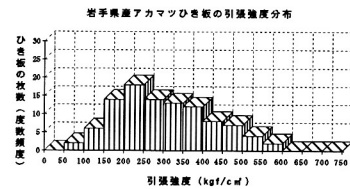


図2.6 ヒストグラムの例 (アカマツラミナの引張強度)

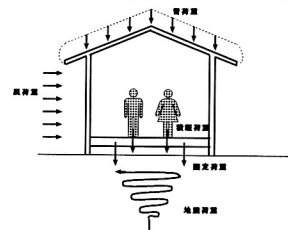


図2.7 住宅に作用する色々な荷重



図2.8 足場板の破壊

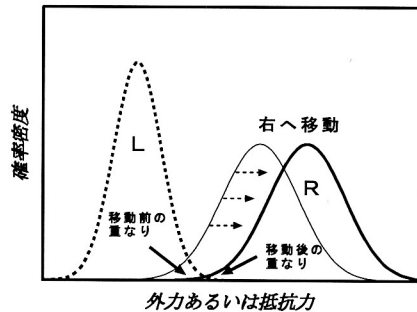


図2.9 構造信頼性の向上(Rの右方向への移動)

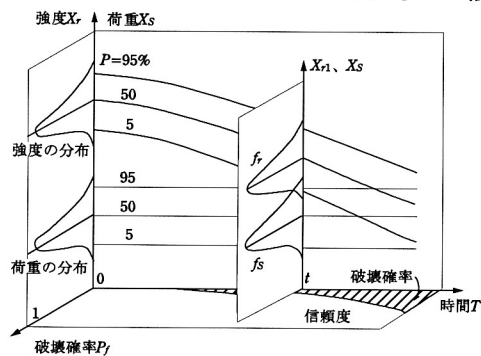


図2.10 強度特性の劣化と破壊確率の増加

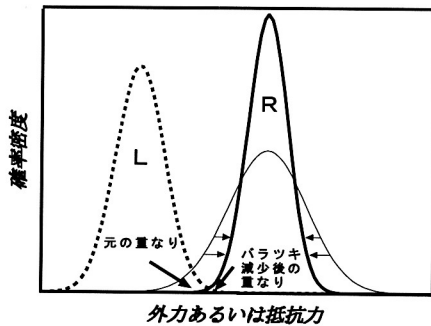


図2.11 構造信頼性の向上方法(Rのバラツキの減少)

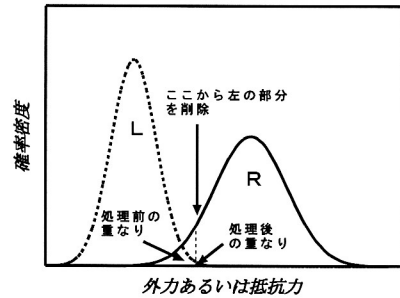


図2.12 プルーフローディングの概念

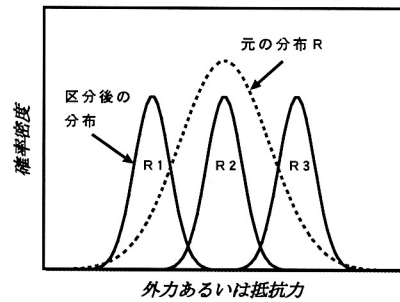


図2.13 等級区分の概念

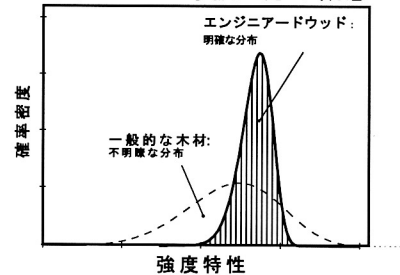


図2.14 一般的な木材とエンジニアードウッドの強度特性分布の比較

破壊の確率 P_f は図2.15に示したようなL-Rモデルの関係から、次式で表わされる。

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(x) f_s(x) dx \quad (1)$$

$$P_f = \int_0^{\infty} \{1 - F_s(x)\} f_R(x) dx \quad (2)$$

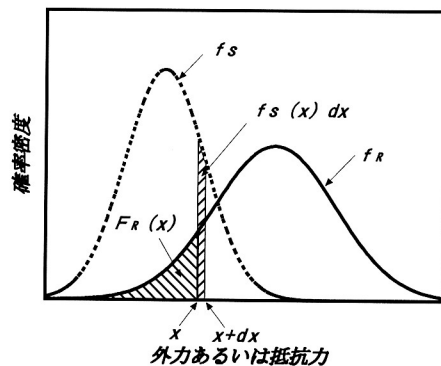


図2.15 L-Rモデルと破壊の確率

いま、RからLを引いた関数

$$Z = R - L \quad (3)$$

を考え、これを性能関数（パフォーマンスファンクション）とする。RもLもバラツキをもった確率変数であるため、Zも確率変数となる。

ここで、RとLを

$$R = N(\mu_R, \sigma_R^2), L = N(\mu_L, \sigma_L^2) \quad (4)$$

と仮定すると、

$$Z = N(\mu_R - \mu_L, \sigma_R^2 + \sigma_L^2) \quad (5)$$

となる。ただし、 $N(\mu, \sigma^2)$ とは平均値が μ で標準偏差が σ の正規分布関数の意味である。

破壊とは荷重が強度を上回ったとき、すなわち、 $Z = R - L < 0$ のときであるから、Zの値が0より左側の斜線部分の面積である。逆に破壊が生じないのは $Z > 0$ の部分である。これら両者の境界すなわち $Z = 0$ が限界状態である。後述する限界状態設計法という用語はこれに由来する。

破壊の確率、すなわち斜線部分の面積は、

$$\beta = (\mu_R - \mu_L) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2} \quad (6)$$

を計算し、これを標準正規分布の上方確率表で求めれば、簡単に得ることが出来る。

一例として、

$$R = N(40, 2^2), L = N(30, 3^2)$$

の場合には、 $\beta = 2.77$ となり、破壊確率は $P_f = 2.8 \times 10^{-3}$ となる。

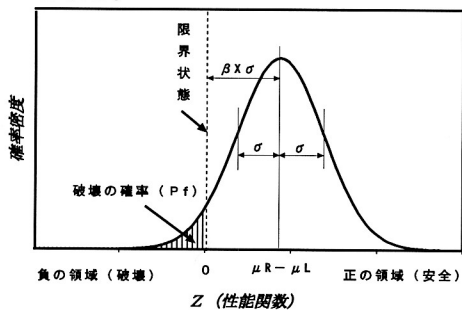
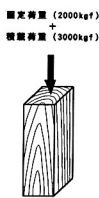


図2.16 性能関数と限界状態

スギの短柱（断面10×10cm）に圧縮荷重が作用する場合



- ① 許容応力設計法なら
 応力 = 荷重 / 断面積であるから、生じる応力は
 $(2000 + 3000) / (10 \times 10) = 50 \text{ kgf/cm}^2$
 となる。一方、スギの圧縮許容応力（長期）は
 40 kgf/cm^2 であるから、
 許容応力 > 生じる応力
 となり、設計はOK。
- ② 限界状態設計法（LSD）なら
 荷重効果は
 $1.1 \times 2000 + 1.6 \times 3000 = 7000 \text{ kgf}$
 となる。一方、柱の設計耐力は性能係数（木材の圧縮
 なら0.9）に、スギの強度特性値（圧縮なら
 40 kgf/cm^2 と仮定）と断面積（ $10 \times 10 \text{ cm}^2$ ）を乗じて
 得られるので、
 $0.9 \times 40 \times 100 = 3600 \text{ kgf}$ となる。
 設計耐力 > 荷重効果
 であるから、設計はOK。

3. エンジニアードウッド化技術

バラツキ減少のための技術

- 3.1 強度等級区分
- 3.2 集成加工による積層効果
- 3.3 原料エレメントの細分化

強度向上のための技術

- 3.4 たて継ぎ
- 3.5 配向

強度性能明確化のための技術

- 3.6 プルーフローディング
- 3.7 実大実験
- 3.8 シミュレーション

図3.1 エンジニアードウッド化技術の原理

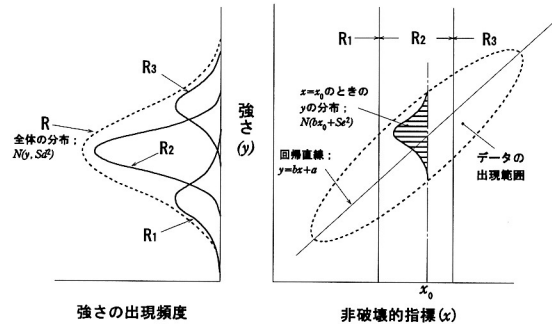


図3.2 等級区分の概念

強度等級区分法	区分因子	方法
目視等級区分法	肉眼的欠点	肉眼
		画像解析
		γ線 X線CT
機械的等級区分法	静的ヤング係数	小荷重積載法
		グレーディングマシン
	動的ヤング係数	たわみ振動法（横振動）
		応力波法（縦振動透過速度）
その他	かたさ 微小歪エネルギー 保証応力負荷	打撃音法（縦振動共振周波数）
		ピロディン
		AE（アコースティック・エミッション）法
		保証荷重法

図3.3 木材の強度等級区分法の分類

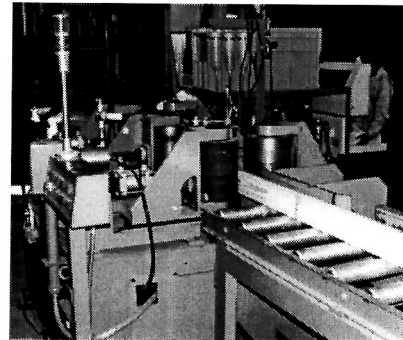


写真3.1 水平加力方式のグレーディングマシン

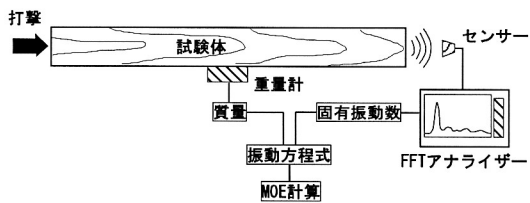
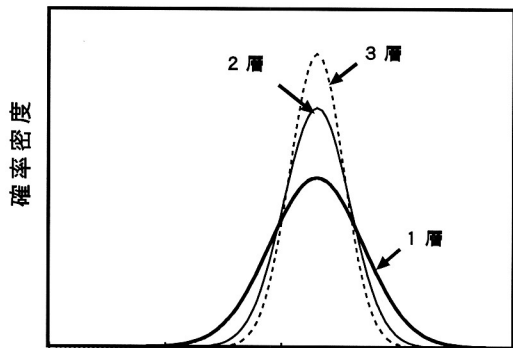


図3.4 縦振動法によるMOEの測定

中心極限定理

確率論の大定理である中心極限定理を、上で述べた関係と関連づけてごく大まかに述べれば、母集団の分布がどのような形態であっても、確率変数の和 $X_1+X_2+\dots+X_n$ の分布の形は、 n が大であるときには、大略、正規分布と考えるよいということになる。

いいかえれば、母集団の平均、分散を μ 、 σ^2 とすると、母集団の分布が何であっても、標本の大きさ n が大であるときは、大略、 $S_n=X_1+X_2+\dots+X_n$ は、平均値が $n\mu$ で分散が $n\sigma^2$ である正規分布（以下、 $N(n\mu, n\sigma^2)$ と表す）に、また、 $\bar{X}=(X_1+X_2+\dots+X_n)/n$ は $N(\mu, \sigma^2/n)$ に従うと考えてよい。



曲げヤング係数 (MOE)

図3.5 積層効果によるMOEのバラツキの減少

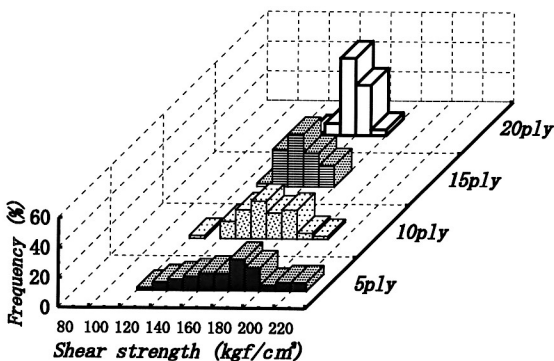


図3.6 ブロックせん断強度に及ぼす積層数の影響

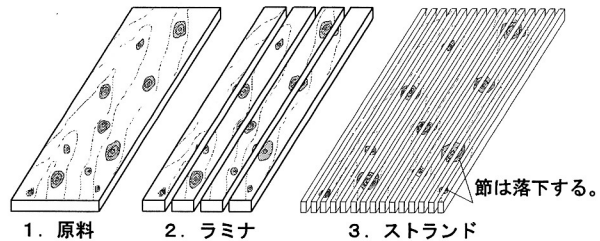


図3.7 細分化における節と元素の相対的大小

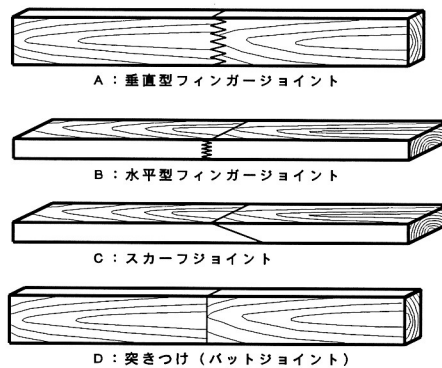
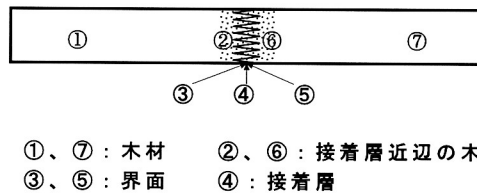


図3.8 たて継ぎの種類



①、⑦：木材 ②、⑥：接着層近辺の木材
③、⑤：界面 ④：接着層

図3.9 フィンガージョイント(FJ)材の構成

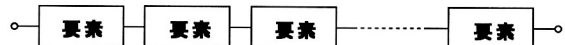


図3.10 直列系(最弱リンク)

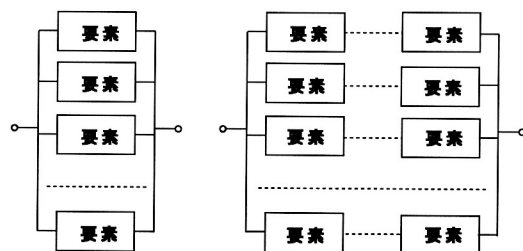


図3.11 並列系(左)と複合系(右)

4. モンテカルロシミュレーション

4.1 シミュレーションとは

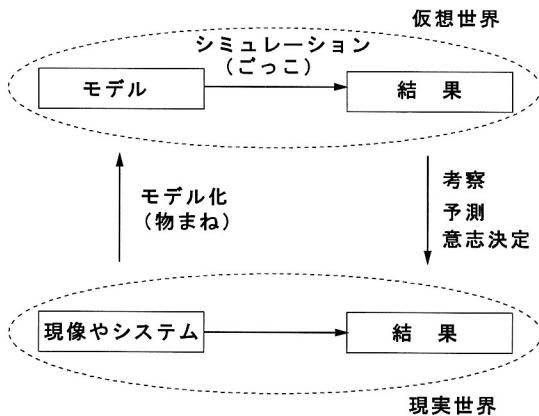


図4.1 シミュレーションの概念

4.2 モンテカルロシミュレーション

乱数

一様乱数

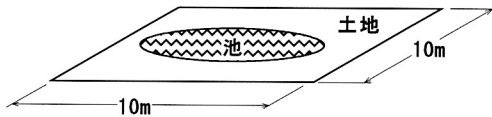
10 A=RND(2)

20 PRINT A,

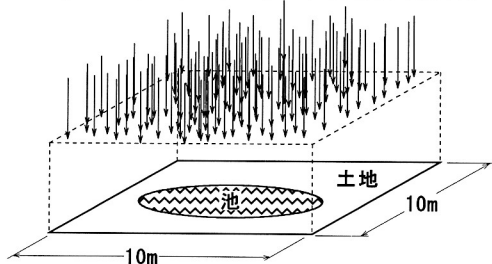
30 GOTO 10

要点：近似解である。

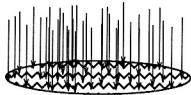
① 池の面積を知るには？



② 土地の中にランダムに矢を投げ込む。



③ 池の中に落ちた矢の数を数える。



④ 計算

$$\text{池の面積} = \text{土地の面積} \times \frac{\text{池に落ちた矢の数}}{\text{投げ込んだ矢の数}}$$

1000本投げ込んで600本池に落ちたとすると

$$\text{池の面積は、}(10 \times 10) \times \frac{600}{1000} = 60 \text{ A. } 60\text{m}^2$$

図4.2 モンテカルロシミュレーションの原理

4.3 正規乱数

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2}$$

標準正規乱数 $N(0, 1^2)$ の発生方法

$$x_1 = \sqrt{-2 \log r_1} \cos 2\pi r_2$$

$$x_2 = \sqrt{-2 \log r_1} \sin 2\pi r_2$$

ただし、 r_1, r_2 はRND

この値 X_1, X_2 に標準偏差 σ をかけて、平均値 μ を加えれば任意の正規乱数となる。

エクセルなどでは乱数発生関数が組み込まれている。

4.4 逆関数法

ワイブル関数の場合

$$f(x) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^m \right\} \quad (\gamma \leq x < \infty)$$

m : 形状パラメータ、 η : 尺度パラメータ、 γ : 位置パラメータ

$$F(x) = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^m \right\} = r$$

$$x = F^{-1}(r) = \eta \{-\ln(1-r)\}^{1/m} + \gamma$$

4.5 任意分布乱数

4.6 相関を持つ乱数

4.7 中心極限定理

5. モンテカルロシミュレーションの応用

5.1 定積分

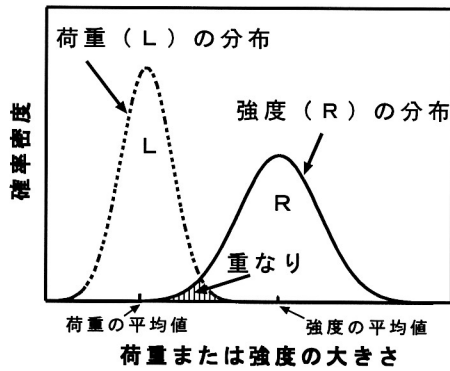
$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(r_i)$$

$$\int_0^1 f(x) dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(r_i)$$

$$f(x) = x^2$$

$$\int_0^1 x^2 dx = \left[\frac{1}{3} x^3 \right]_0^1 = \frac{1}{3} = 0.333$$

5.2 破壊の確率



L-Rモデル(S-Sモデル)

5.3 確率関数同士の計算

$$X = (A+B) \times (C-D) / E$$

Xの分布を求めるためには・・・乱数発生を繰り返す



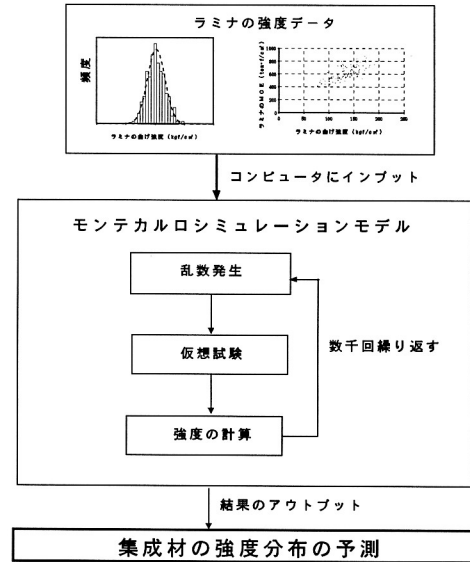
注) 確率変数の

$$\text{平均値} : E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx$$

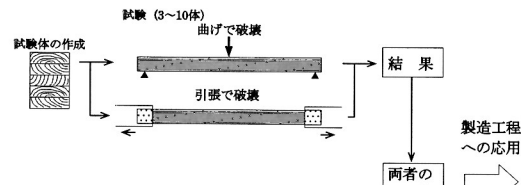
$$\text{分散} : V(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - E(x))^2 f(x) dx$$

5.4 集成材の強度分布の予測

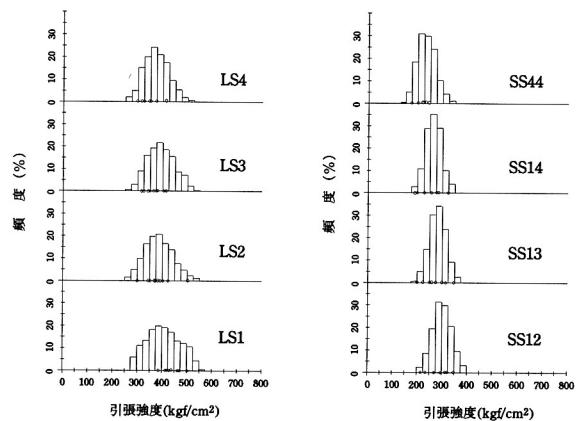
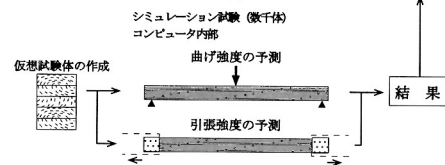
必要性：実大実験には費用、時間、人手が必要。
色々の種類の製品に対応する必要。



(1) 実大実験



(2) 確率モデルによる予測



○印が実大実験結果、ヒストグラムがシミュレーション結果

付録

1. 確率・統計の基礎の基礎

平均 (\bar{X})
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

分散 (S^2)
$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

標準偏差 (S)
$$S = \sqrt{S^2}$$

変動係数 (CV)
$$CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

相関

相関係数 (γ)
$$-1 \leq \gamma \leq 1$$

回帰直線

確率変数、確率分布

離散型、連続型

確率密度関数 (Probability Density Function)

$$f(x), P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x) dx$$
$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad f(x) \geq 0 \quad \text{かつ} \quad \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$$

正規分布 $N(\mu, \sigma^2)$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

$\sigma = 1$	$0.6827 \doteq \frac{1}{3}$
$\sigma = 2$	$0.9545 \doteq \frac{1}{20}$
$\sigma = 3$	$0.9973 \doteq \frac{3}{1000}$

$$x_{0.05} = \bar{x} - 1.645 \times \sigma$$

一様分布 $f(x) = 1 \quad (0 \leq x \leq 1)$

累積分布関数 (Cumulative Distribution Function)

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(u) du \quad F'(x) = f(x)$$

その他の分布、f、t、カイ自乗、対数正規、ワイブル分布

担当 林 知行

2000年木材強度・木質構造研究会 限界状態設計法学習会
 基礎編 2. 材料屋として何をすべきか、どう考えるか

秋田県立大学木材高度加工研究所 飯島泰男

1. 「信頼性設計」「限界状態設計法」→下限値だけではなく、ばらつきも重要
 破壊確率は信頼性指標 β から求める。

◆LR とも正規分布の場合：
$$\beta = (\mu_R - \mu_L) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}$$

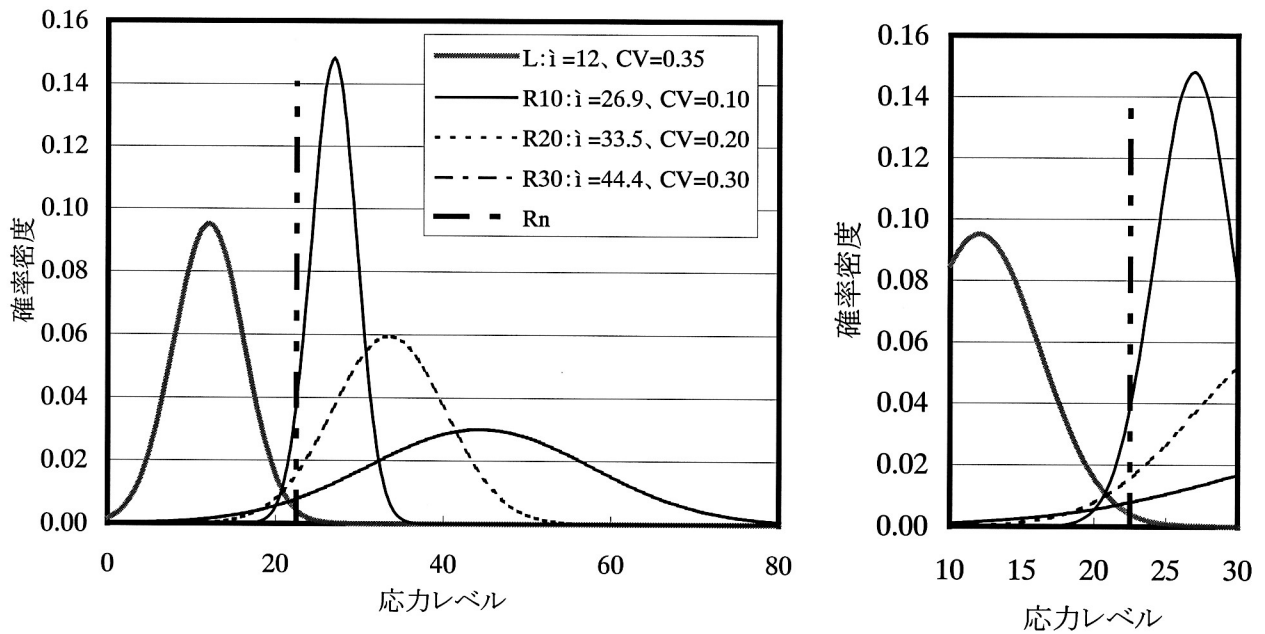


図1. 耐力 R と外力 L の関係の例（応力換算, N/mm²）

例として図1のように同じ R_n 値（ここでは5%下限値として、22.5 N/mm²）で CV が異なる R 分布の場合の β 試算例を示す。ただし、LR とも正規分布と仮定する。

L—平均：12、CV：0.35

R10—平均：26.9、CV：0.10、R20—平均：33.5、CV：0.20、R30—平均：44.4、CV：0.30

R10 の場合：
$$\beta = (26.9 - 12) / \sqrt{(26.9 \times 0.10)^2 + (12 \times 0.35)^2} = 2.992 \rightarrow 0.14\%$$

R20 の場合：
$$\beta = (33.5 - 12) / \sqrt{(33.5 \times 0.20)^2 + (12 \times 0.35)^2} = 2.721 \rightarrow 0.33\%$$

R30 の場合：
$$\beta = (44.4 - 12) / \sqrt{(44.4 \times 0.30)^2 + (12 \times 0.35)^2} = 2.320 \rightarrow 1.02\%$$

◆LR のいずれかが正規分布ではない場合→計算の方法が異なり、同じ R_n であっても β は変動する。

2. 「木質構造限界状態設計」における「I.材料」について

◆内容：各種材料の公称値および調整係数に関する検討を行い、各数値を提案する。

◆材料についての基本的な考え方は以下のとおりである。

1) 終局限界耐力の公称値 R_n 、変動係数 CV の決定方法

①実験データによらない場合の公称値、変動係数は基準公称値による。

②実験データによる場合は以下の方法によって、別途定めることができる。

・弾性または剛性係数：試料数 $n \geq 40$ の 100%データフィットの正規分布あてはめによる。公称値は平均値または 75%信頼水準 5%下限値とする。

・強さ：公称値は原則として、試料数 $n \geq 40$ の 100%データフィットによる対数正規分布あてはめ、または $n \geq 50$ の下限 15%データフィットによる 2P ワイブル分布あてはめの、75%信頼水準 5%下限値とする。

・平均値、変動係数：上記の実験から求められた値、下限 15%データフィットによる場合はその換算値とする。

③実証実験を伴うシミュレーションによる場合は、上記②と同様の方法で別途定めることができる。

2) 使用限界耐力

使用限界耐力の公称値は、前項終局限界耐力の公称値に $2/3$ を乗じた値とする。

3) 耐力の調整係数

耐力の調整係数は以下の 8 種類とする。

- ・時間影響係数 (K_T)：木材強度が荷重継続時間に影響を受けることに対処する係数。
- ・含水率係数 (K_M)：材料の初期含水率および使用環境条件による含水率影響に対する係数。
- ・処理影響係数 (K_P)：防腐処理や難燃処理を施した材料に対する係数。
- ・材料寸法調整係数 (K_S)：曲げ材および引張材に対する寸法効果係数。
- ・荷重影響係数 (K_L) およびスパン梁せい影響係数 (K_H)：曲げ材の荷重条件による係数。
- ・横座屈影響係数 (K_B)：横座屈を起こすおそれのあるせいの大きい曲げ材に対する係数。
- ・湾曲影響係数 (K_C)：湾曲材の湾曲部分の検定に適用する。

◆上記の基準公称値等の誘導法

1) 製材

①曲げ強さおよび曲げヤング係数

・ベイマツ、ダフリカカラマツ、アカマツ、エゾマツ・トドマツ、カラマツ、ヒノキ、ヒバ、スギについては実験データを引用

・機械等級区分については、ベイマツ・ダフリカカラマツ・アカマツ・エゾマツ・トドマツのグループ (S1)、カラマツ・ヒノキ・ヒバのグループ (S2)、およびスギ (S3) に区分。

・ f_m 公称値は 100%データフィットによる対数正規分布あてはめ、またはデータ数が多い場合には下限 15%データフィットによる 2P ワイブル分布あてはめによる、75%信頼水準 5%下限値 $f_{b,0.05}$ とするのが適

当。

- ・ E_m 公称値は 100%データフィットによる正規分布あてはめから誘導するのが適当。
- ・ 実験データの不足している区分の材については、当該の樹種・等級に与えられている長期許容応力度（建設省住指発第 16 号、針葉樹の構造用製材の取扱いについて、平成 4 年）の 3 倍の値を参考にした。ただし、この許容応力度は概ね梁せい 105mm の材のデータから誘導されているため、寸法調整係数として、 $(105/150)^{0.2}=0.93$ を乗じ、1.5MPa ごとの安全側に丸めた値を採用した。

②縦圧縮および縦引張強さ

縦圧縮強度 f_c および縦引張強度 f_t の実験データのうち、「データベース」所収の、曲げとの比率が明らかになっている目視等級区分材の実験結果から、CV および $f_{0.05}$ の曲げに対する比率を、圧縮では 0.85、0.75、引張では 1.40、0.55 とした。

③せん断強さ

せん断強さ f_s は実大材に対する標準試験法が策定中のため、暫定的に、公称値は建築基準法施行令における長期許容応力度の 3 倍の値、変動係数は曲げ強さでの値を準用。また、割裂きを伴わないせん断の場合には、1.5 倍まで増すことができる。

④横圧縮強さ（めり込み）

実大材の横圧縮強さに関する標準試験法では、材端部めり込み（余長のない状態）、材中間部めり込み、の 2 種類の方法を規定しており、得られた荷重と変形の関係から、めり込み強さ ($f_{c,90}$)、めり込み降伏強さ ($f_{c,90,y}$) およびめり込み剛性 ($K_{c,90}$) を特性値として求めることとしている。したがって、終局限界耐力には $f_{c,90}$ 、使用限界耐力には $f_{c,90,y}$ の適用が妥当。

実験結果を概観した結果から、終局限界耐力には $f_{c,90}$ の下限値として、含水率 15%時密度 R_{15} (kg/m^3) をパラメータとし、それを 100 で除した値（単位：MPa）、使用限界耐力にはその 2/3 を用いた。また、変動係数は 0.20 とした。また、めり込み剛性 ($K_{c,90}$ 、単位： N/mm^3) についても R_{15} をパラメータとし、下式から平均値を求めることとした。また、変動係数は 0.35 とする。

$$K_{c,90}=0.015R_{15}-4.5 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここでは、余長、材せい、支圧幅の 3 つのパラメータについての調整が必要。

⑤せん断弾性係数

せん断弾性係数 (G) では、実大材に対する標準試験法が策定中。暫定的に変動スパン法による測定結果から密度をパラメータとした数値を使用。ただ、本文の「木材のせん断弾性係数は、繊維方向のヤング係数の 1/15 をとる」は、設計上大きな支障にはならないと思われる。

2)製材以外の軸材料

製材以外の主要な軸材料である集成材および単板積層材については、統計処理にたえるデータはないので、曲げについてはシミュレーション計算から求めた変動係数 0.15 と、建設省告示第 1799 号（平成 8 年）および建設省通達（建設省住指発第 120 号）に規定する長期許容応力度の 3 倍を強さの 75%信頼水準 5%下限値を公称値としている。

集成材のシミュレーションとしては、いくつかの研究報告があるが、変動係数 0.15 は安全側にある。構造用単板積層材では積層数は 2 級でも 6 層以上と規定されており、この場合、単板の強度の分布が正規分布にしたがうとすれば、単板積層材の変動係数は単板の変動係数の $1/\sqrt{6} = 0.408$ 倍になるから、単板の変動係数を最大 0.35 とみても、 $0.35 \times 0.408 = 0.143$ 、となり、変動係数 0.15 は安全側にある。

圧縮、引張、せん断の公称値は曲げと同様の方法で求めたが、めり込みは製材に準じた。また、変動係数は、めり込みのみ曲げと同等とし、その他は製造時に品質管理が義務づけられていることから、製材より低めの値を採用している。

◆使用限界耐力

使用限界耐力の公称値は、材料が弾性限度を超えない範囲として、終局耐力に $2/3$ を乗じた値として求めることとしている。なお、弾性限度の決定法についてはいくつかの提案があるが、「構造用木材の強度試験法」では、その方法はとくに規定していない。

◆耐力の調整係数（本文「7.6」）

①時間影響係数 (K_T)

木材強度が荷重継続時間に影響を受けることに対処するもの。

②含水率係数 (K_M)

強度の標準含水率条件を 15% に設定したことから、この標準条件時の強度を任意の含水率条件時の強度に換算するためのもの。

③処理木材

防腐処理や難燃処理を施した材料は、適宜処理影響係数 K_P を定め、終局限界耐力あるいは使用限界耐力に乗ずる。無処理材は $K_P = 1.0$ とする。

④材料寸法調整係数 (K_S)、荷重影響係数 (K_L) およびスパン梁せい影響係数 (K_H)

製材は実験データによる。集成材他は現行方式を踏襲。ただし、標準材せいを明記した。

⑤横座屈影響係数 (K_B)

現行方式を踏襲。

⑥湾曲影響係数 (K_C)：湾曲材の湾曲部分の検定に適用する。

現行方式を踏襲。

⑦曲げたわみおよびクリープ

最近の実験データを引用し、曲げたわみについては基準ヤング係数をそれぞれの载荷条件時のヤング係数に換算すべきである。

木材のクリープ特性は、荷重の大きさと加わり方、その存続期間、さらにその木材が使われる場所の温湿度条件に大きく影響されるので、剛性の検定においてはこれを考慮して設計する必要がある。とくに、一定の継続荷重が長期にわたって作用する場合、施工時の木材含水率を考慮して設計する。また、曲げヤング係数は、部材間隔が 60cm 以下で平行に多数配列されているときは平均値、それ以外のときは 5% 下限値を用いる。

3.今後の検討課題

① E_b を指標：曲げ強さ f_b ・ 縦圧縮強さ f_c ・ 縦引張強さ f_t

R（密度）を指標：せん断弾性係数 G ・ せん断強さ f_s ・ 横圧縮強さ $f_{c,90}$ 、 $f_{c,90,y}$ ・ めり込み剛性 $K_{c,90}$

→ 接合設計に用いられている樹種群（J1～J3）に対応させると分かりやすくなるのではないか

②含水率による区分：12、15、18、19、20？

③製材と集成材・LVL 其他との整合性：標準寸法、寸法調整係数など

④面材をどうするか？

⑤時間影響係数（ K_T ）：DOL との関連

⑥非等級区分材の取り扱い

木質構造限界状態設計

さわり

Q & A

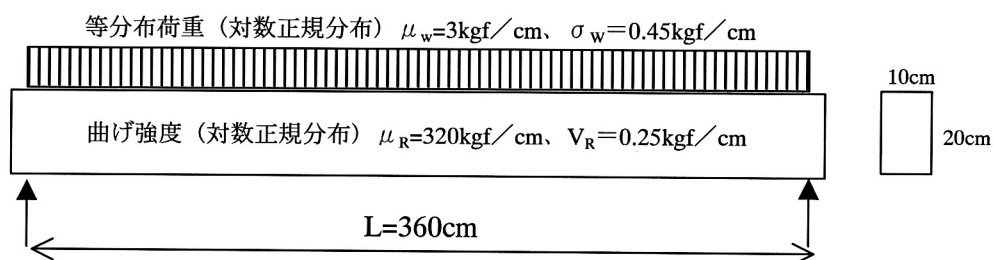
↑ 当日真実が…

- Q1 梁の破壊確率を求める。
 - Q2 破壊確率から梁成を求める。
 - Q3 梁の信頼指標 (β) を求める。
 - Q4 耐力・荷重係数を求める。
-

● 矩形断面 $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ の長さ 3.6m の単純梁があり、この単純梁に等分布荷重 W が作用している。

この梁の曲げ強度 R は、平均値 $\mu_R = 320\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、変動係数 $V_R = 0.25$ 、等分布荷重 W は平均値 $\mu_W = 3\text{kgf}/\text{cm}$ 、標準偏差 $\sigma_W = 0.45\text{kgf}/\text{cm}$ である。梁中央断面の曲げに関する破壊確率 (pf) を求めよ。

- 1) 全て正規分布として破壊確率 (pf) を求めよ。
- 2) 全て対数正規分布として破壊確率 (pf) を求めよ。
- 3) 全て2母数ワイブル分布として破壊確率 (pf) を求めよ。

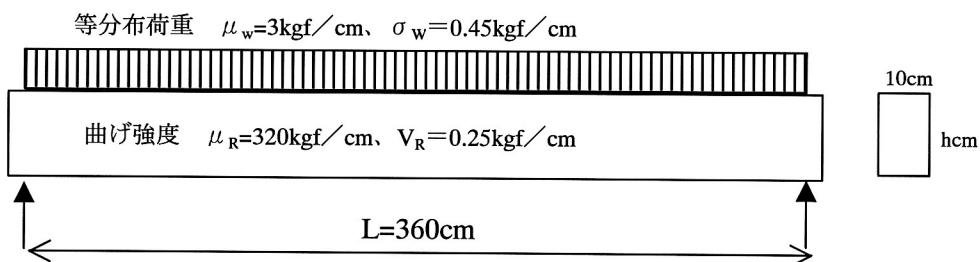


A (1) $pf=1.106 \times 10^{-3}$ 、(2) $pf=1.971 \times 10^{-7}$ 、(3) $pf=1.685 \times 10^{-4}$

● 矩形断面 $10\text{cm} \times h\text{cm}$ の長さ 3.6m の単純梁があり、この単純梁に等分布荷重 W が作用している。

この梁の曲げ強度 R は、平均値 $\mu_R = 320\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、変動係数 $V_R = 0.25$ 等分布荷重 W は平均値 $\mu_W = 3\text{kgf}/\text{cm}$ 、標準偏差 $\sigma_W = 0.45\text{kgf}/\text{cm}$ である。破壊確率 (pf) $= 0.01$ になる曲げ応力の平均値 (μ_{fe}) と梁成 (h) を求めよ。

- 1) 全て正規分布として平均値 (μ_{fe}) と梁成 (h) を求めよ。
- 2) 全て対数正規分布と平均値 (μ_{fe}) と梁成 (h) を求めよ。



A (1) $\mu_{pf} = 128.561\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $h_{pf} = 15.06\text{cm}$ (2) $\mu_{pf} = 99.23\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、 $h_{pf} = 17.142\text{cm}$

● ある梁の曲げ強度 R は平均値 $\mu_R = 300 \text{kgf/cm}^2$ 、変動係数 $V_R = 0.15$ 、固定荷重効果 D は平均値 $\mu_D = 100 \text{kgf/cm}^2$ 、変動係数 $V_D = 0.10$ 、積載荷重 L 効果は平均値 $\mu_L = 75 \text{kgf/cm}^2$ 、変動係数 $V_L = 0.25$ である。

曲げ強度 R を 2 母数ワイブル分布、固定荷重効果 D を対数正規分布、積載荷重効果 L をグンベル分布として、信頼性指標 (β) 及び設計点 (破壊点) を求めよ。ただし、各確率変数に相関はない。

累積分布関数(2母数ワイブル分布)

$$F(x, \eta, m) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\eta}\right)^m\right]$$

累積分布関数(対数正規分布)

$$F(x, \lambda, \xi) = \int_0^x \frac{\exp\left[-\frac{\left(\ln(z) - \lambda\right)^2}{\xi^2}\right]}{z \cdot \xi \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} dz$$

累積分布関数(グンベル分布)

$$F(x, \alpha, u) = \exp(-\exp(-\alpha(x - u)))$$

A $\beta = 2.293$ 、破壊点 ($R = 190.524$ 、 $D = 103.161$ 、 $L = 87.363$)

● ある梁の曲げ強度 R は変動係数 $V_R=0.15$ であり、固定荷重効果 D は平均値 $\mu_D=100\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、変動係数 $V_D=0.10$ 、積載荷重 L 効果は平均値 $\mu_L=75\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、変動係数 $V_L=0.25$ である。

曲げ強度 R を 2 母数ワイブル分布、固定荷重効果 D を対数正規分布、積載荷重効果 L をグンベル分布として信頼性指標 (β) =2.5 となる曲げ強度 R の平均値 μ_D を求めよ。さらに、設計点を曲げ強度 R の下側 5% 値、固定荷重の平均値 μ_D 、積載荷重 L の平均値 μ_L で除した値 (ϕ 、 γ_D 、 γ_L) を求めよ。ただし、各確率変数に相関はない。

A $\mu_R=322.6$ ($\beta=2.499$)、設計点 ($R=191.167$ 、 $D=103.244$ 、 $L=87.924$)、 $F_{005}=23.5418$ 、 $\phi=0.812$ 、 $\gamma_D=1.032$ 、 $\gamma_L=1.172$

橋本康則 (大林組) 福本早苗 (同) 藤井正則 (同)
 諏訪 仁 (同) 和田安弘 (同)

1. はじめに

鋼やコンクリートの人工材料と比べて、「木」という天然材料を用いた建物では、地球温暖化にかかわる炭酸ガス放出量が、材料生成時および建設時に著しく少なく、資源、エネルギーの節約、地球環境保全に大きな利点がある。また、比強度が鋼材の6倍も高いという特長があり、建物の軽量化を図ることができる。構造材料として優れた木質材を用いて、限界状態設計法を活用することにより、架構の崩壊メカニズムを定量的に評価したオフィスの設計例を提案する。

2. 建物概要および構造計画

建物は、地上3階建ての6.3mスパンによるラーメン架構(柱、大梁は大断面構造用集成材)とし、柱材は、オフィス空間のデザインにも配慮した十字形状柱とする。柱と梁の接合部は、ドリフトピンを用いたモーメント抵抗接合とし、崩壊メカニズムは接合部の破壊とし、部材(柱、梁)の主材部は損傷させない。ドリフトピンによるモーメント抵抗接合部は、正確に加工された場合は他の木質系の接合形式に比べて初期剛性が高く、有効長さとお径の比を大きくとり、木材のめり込み降伏よりドリフトピンの曲げ降伏を先行させることにより、地震エネルギー消費能力を高め、架構の靱性を向上させることを図った(図1~3に、基準階平面図、床伏図、軸組図を示す)。

3. 限界状態における信頼性の設定

『建築物の限界状態設計指針(案)』第1版(日本建築学会、1999.3)の木質構造編に準じて、目標信頼性指標 β_T を設定する。本設計では、損傷を集中させる部位を大梁端部接合部とし、その塑性化を先行させ、その履歴減衰により、エネルギー消費を行うことを設計の目標として、柱側接合部、大梁材、柱材の順に破壊確率を低減させ、構造体の安全性を高める。

3-1) 使用限界状態における信頼性の設定

構造体に有害な変形が残留し、これが累積していく限界(ドリフトピンが降伏しない)とし、限界層間変形角 $\leq 1/200$ 、目

標信頼性指標 $\beta_T=1.0$ を原則とする。

3-2) 終局限界状態における信頼性の設定

構造物の倒壊(人命損失)、復元力が急激に低下する状態(接合部のドリフトピンが塑性限界変形以下、木材が限界変形以下)とし、限界層間変形角 $\leq 1/75$ とする。塑性化を先行させる大梁端部接合部の目標信頼性指標を $\beta_T=2.0$ (破壊確率: $P_{FA} \approx 2.3\%$)とし、柱側接合部、大梁、柱については破壊確率が、 $P_{FA} \leq 0.5\%$ 以下となるように設定する。

表1 目標信頼性指標 β_T : ()は相当する破壊確率 P_{FA} (%)

	接合部耐力		主材の曲げ耐力	
	大梁	柱	大梁	柱
使用限界状態	1.0(15.9)	1.5(6.7)	1.5(6.7)	2.0(2.3)
終局限界状態	2.0(2.3)	2.5(0.5)	2.5(0.5)	3.0(0.1)

4. 材料強度のばらつきに関する評価

	主材(構造用集成材)	ドリフトピン(SS400)	柱梁モーメント接合部
平均値/公称値	1.33	1.16	1.55
変動係数	0.15	0.13	0.20

*ただし、接合部は、主材とドリフトピンの分布が独立として評価

5. 応力解析

荷重は、『建築物荷重指針』(日本建築学会、1993)に準拠して算定し、架構は、梁端部、柱端部、柱脚部のモーメント抵抗接合部を非線形ばね要素にモデル化し、静的非線形応力解析を行う。モーメント抵抗接合部周囲は、梁-梁接合部-挿入鋼板-柱接合部-柱からなる連結モデル(図4)とし、各接合部の曲げ-回転変形関係については、円形配置したドリフトピンが最外円から内側にかけて順次非線形化する事象を考慮するために、接合部のみの非線形解析により得られた曲げモーメント-回転変形関係を全体架構モデルに組み込む。静的非線形解析より得られた層せん断力-層間変位の関係より、層間変形角の最

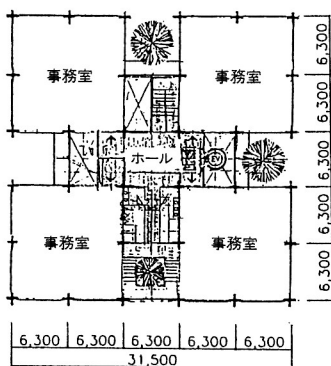


図1 基準階平面図

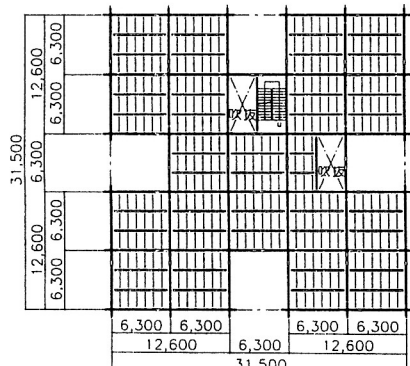


図2 基準階床伏図

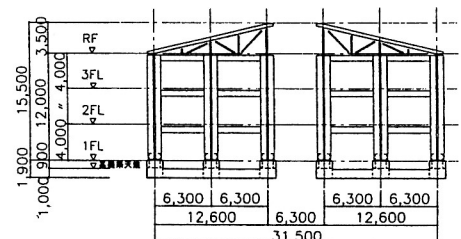


図3 軸組図

大値は、使用限界状態で1/828、終局限界状態で1/92であり、架構全体としての目標値に対してすべて満足している。

6. 断面検定と評価

使用および終局限界状態時の限界状態関数 G を設定し、信頼性指標 β_T を評価する。

例) 接合部の検定(塑性化を許容し、曲げ回転角にて評価)

$$G = A_f \cdot R_U - S_U$$

R_U : 曲げ終局限界回転角、 A_f : 耐力の調整係数

S_U : 終局限界状態時曲げ回転角、

信頼性指標 β_T の分布状況により、終局限界状態時 $\beta_T = 2.0$ 、使用限界状態時 $\beta_T = 1.0$ の目標値を満足していることを確認した(図5)。また、塑性化を意図的に先行させている梁端部接合

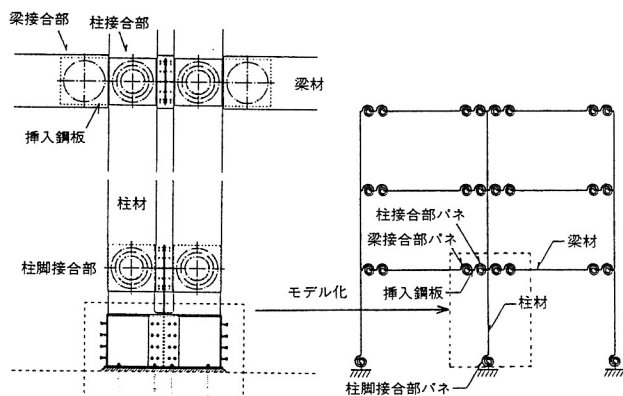


図4 架構のモデル化

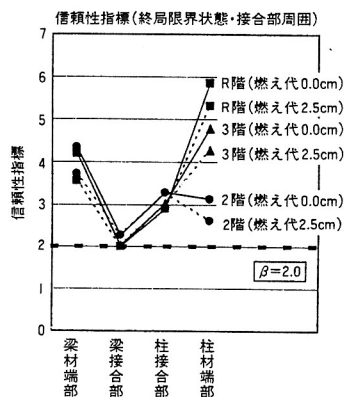


図5 接合部周囲の信頼性指標

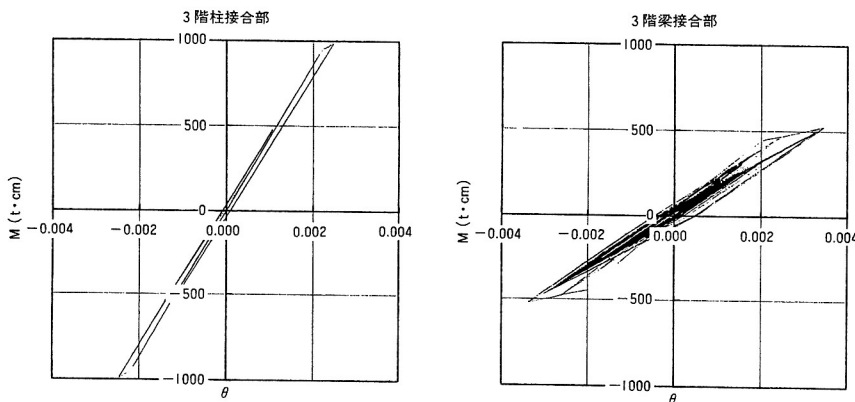


図6 梁接合部と柱接合部の応答履歴性状

部に対する柱接合部側の破壊確率を算定すると、0.14%と極めて小さく、設計上意図した損傷部位の特定を実現できた。さらに、接合部に対する主材(柱・梁部材)の破壊確率は、 10^{-6} より小さく、主材の破壊はほとんどないことが検証された。また、燃え代を考慮しても、目標値を満足している。

7. 地震応答解析

設計モデルが目標構造性能を満足していることを確認するため、地震応答解析を行う。地震波は、建設サイトの50年最大平均値(100年再現期待値)とし、解析モデルは、静的非線形解析から得られた層せん断力-層間変位関係をTri-Linearに近似化した串団子モデルにて等価せん断弾塑性応答解析を行い、層全体の構造性能を確認するとともに、平面フレーム応答解析を行い、部材の履歴特性を確認する。

応答解析の結果、最大層間変形角は等価せん断モデルでは、最大1/83であり、目標値(1/75)を満足している。また、各接合部の応答履歴性状(曲げモーメント-回転角関係)より、柱接合部よりも梁接合部を先行降伏させ、その履歴減衰にて地震エネルギーを消費していることが確認できた(図6)。

8. まとめ

限界状態設計法を活用した木質架構の設計に当たり、目標性能を具現化するため、使用および終局限界状態を設定し、それを満足させる程度を信頼性指標を用いて評価した。このように信頼性指標という具体的な数値を判断基準として、構造設計者が意図した崩壊機構の具現化が可能となった。

審査講評

本作品は、モーメント抵抗接合を用いた木造半剛節骨組構造である。骨組の接合部は柱-梁、柱脚に存在するが、いずれも挿入鋼板とドリフトピンで構成している。設計では、破損モードの制御に β_T を用いている。すなわち、部材では終局限界状態においても弾性限内の応力に抑え、接合部では塑性化の始まる順位を柱-梁の梁端、柱脚、柱-梁の柱側とするためにそれぞれ異なる β_T を設定している。接合部は、非線形バネ要素にモデル化し、接合部および架構全体の静的非線形応力解析を行っている。接合部の終局限界状態としてドリフトピンのメリコミ変位を設定し、これを信頼性解析に適用している。信頼性解析より

得た β が部材および接合部に設定した β_T を超えていることを確認している。さらに、動的解析を行い、接合部の最大応答値について β を評価し、静的なものより大であること、設計で企図したとおり梁端接合部でエネルギーを消費していることを確認している。また現行設計法との比較を行い、限界状態設計法の優越性を指摘している。

このように本作品は、木質構造で問題となる破損モードを明確にしたうえで、これの制御に β_T を用いているところが大きな特徴で、情報が乏しい困難な状況のなかで、あえてこれに挑戦し一つの考え方を提示したことは評価される。