

高次積率を用いた鋼圧縮材および曲げ材の 抵抗強度に関する統計論的研究

正会員 小 野 徹 郎*

正会員 井戸田 秀 樹**

正会員 河 原 弘 明***

1. 序

鋼構造物の安全性評価に確率論の概念を導入した信頼性設計法に関する研究は今日まで国内外で数多く行われており、わが国でも鋼構造荷重・耐力係数設計法の試案¹⁾がまとめられるに至っている。

確率論に基づく安全性の評価では、荷重や部材抵抗強度、材料特性などの不確定因子に関する統計的な性質が明らかにされる必要がある。しかし部材抵抗強度についていえば、その実測データも今日までにいくつか収集されてはいるものの、その確率分布形状を厳密に評価し得るに十分なデータが得られているとはいえない。

そこで、解析手法を用いて鋼構造部材の抵抗強度の統計的性質を数値解析的、あるいは理論的に評価した不足データの補充も行われている。Strating²⁾や、藤本、岩田ら³⁾は Monte Carlo 法を用いて数値解析を行い、各種初期不整量をランダムとした場合の鋼圧縮材の統計的性質を求めている。Monte Carlo 法は複雑な確率計算を避ける上で非常に有効な方法であるが、その試行回数に精度が左右されるため、抵抗強度の確率分布形を得るためには膨大な計算時間を要する。これに対し坂本、小浜ら⁴⁾は系統的な考察を目的として鋼圧縮材、および曲げ材の基本強度式をいくぶん単純化して与えて確率論的解析展開を行い、抵抗強度の統計的特性を求めている。しかしこうした手法では基本強度式や導入される確率変数の特性の設定、初期不整量の確率分布形の仮定等が難しく、理論的な厳密性に欠くところがある。

このような解析上の問題点や、データ不足のために厳密な確率分布形を決定し難いことから、一般に部材抵抗強度の統計的性質は平均値と標準偏差だけを用い、2 次モーメント法で評価されることが多い。しかし 2 次モーメント法は確率分布形の違いに対応できず、分布形によっては破壊確率の評価に非常に大きな差を生ずること

も明らかになっている⁵⁾。確率分布形状を決定し得ない現在、確率論に基づく安全性の評価法を確立するためには、平均値や標準偏差で表現されない分布形の非正規性のような統計的情報に関しても十分論議されるべきである。

以上の問題点を考慮し、本論文は鋼圧縮材、および曲げ材の抵抗強度に関する統計的性格を非正規性も含めて積率情報だけで評価することを目的とする。まず初期不整量の実測データを収集して統計処理し、その結果を用いて確率分布形の仮定をせずに、確率論の数値解析法である 3 point estimate 法⁶⁾により鋼圧縮材および曲げ材の統計的な情報を提供する。統計量は高次に及ぶ積率の形で算出し、高次積率標準化手法⁵⁾を用いて鋼構造部材抵抗強度に関する統計的性質のより厳密な評価を行っている。さらに、これに基づいて各種設計強度式との対比考察も行う。

2. 鋼構造部材の初期不整量

鋼構造部材の抵抗強度の統計的性質に影響を及ぼす初期不整量の代表的なものとしては、降伏応力度、初期たわみ、残留応力、そして断面積の 4 種が考えられる。ここではこれら初期不整量のデータを過去 30 年間に発表された国内外の諸論文（総計 1030 編）より収集した。対象とした論文集は以下に示す 14 誌である。

- 1) 日本建築学会論文報告集
- 2) 日本建築学会大会学術講演梗概集
- 3) 土木学会論文報告集
- 4) 日本鋼構造協会誌
- 5) 溶接学会誌
- 6) 日本造船学会論文集
- 7) 材料
- 8) 機械学会論文報告集
- 9) 金属学会誌
- 10) American Society of Civil Engineering
- 11) Welding Research Council
- 12) The Welding Journal
- 13) The Structural Engineer

本論文の一部は文献 7) で発表している。

* 名古屋工業大学 教授・工博

** 東京工業大学 大学院生・工修

*** 大成建設(株)・工修

(昭和 61 年 6 月 10 日原稿受理)

Table 1 Statistical Results of Initial Imperfections

Factors			N	Moments				Results of χ^2 -test	
				Mean	SD	α_3	α_4	LD	ND
Yield Stress (t/cm ²)	(SS41)		1993	3.066	0.366	0.621	4.357	⊙	
	(SM50)		597	3.698	0.356	0.629	5.278	⊙	●
	(STK41)		291	3.676	0.416	0.121	3.307	⊙	●
Ultimate Stress (t/cm ²)	(SS41)		1733	4.552	0.320	0.263	5.802	○	
	(SM50)		597	5.422	0.286	0.161	5.604	○	
	(STK41)		283	4.749	0.293	0.025	3.834	⊙	●
Elongation (%)	(SS41)		1385	27.994	5.299	0.727	4.607	⊙	
	(SM50)		549	27.113	5.694	0.706	4.882	⊙	
	(STK41)		284	30.611	6.203	0.327	3.650	●	⊙
Young's Ratio		(×10 ³ t/cm ²)	882	2.094	0.100	0.025	3.879		○
Residual Stress	RH-f	(#1)	112	0.211	0.118	0.708	2.693	⊙	
	WH-f	(#1)	432	0.373	0.186	0.704	2.782	⊙	
Initial Deflection	RH-st	(×10 ⁻³ /l)	363	0.274	0.166	1.272	5.550	○	
	RH-we	(×10 ⁻³ /l)	372	0.315	0.234	1.196	3.835	○	
Sectional Area	RH	(#2)	346	0.986	0.049	1.195	5.301	⊙	●
	WH	(#2)	377	1.021	0.049	0.786	3.281	○	
Thickness	RH-f	(#2)	203	0.964	0.047	0.463	4.516	○	

RH: Rolled H WH: Welded H st: Strong Axis we: Weak Axis f: Flange

*1: Measured Residual Stress/Measured Yield Stress *2: Measured Value/Nominal Value

LD: Lognormal Distribution ND: Normal Distribution ○: Better Fit ●: Affirmed Assumption

14) Journal of Applied Mechanics

本章ではこれらの収集データを統計処理し、高次積率を算出して抵抗強度の解析に必要な情報を提供する。

鋼材の機械的性質については常温で行われた引張り試験によるもので、試験片が熱処理されていないものを対象としている。また、初期たわみ量と残留応力については圧延H形鋼と溶接H形鋼を対象とした。Table 1にデータの収集結果、および高次積率の算出結果の一部を示す。

i) 降伏応力度 Y —Fig.1はSS41材(データ数 $N=1993$)の降伏応力度 Y のヒストグラムである。降伏応力度はJISによって各種の下限値が規定されているため、3次積率から明らかのように分布形はやや正のひずみを持った形状となっている。また、 χ^2 検定では有意水準5%で対数正規分布との適合性が認められた。平均値 μ_Y 、標準偏差 σ_Y は文献8)の $\mu_Y=2.899$ (t/cm^2)、 $\sigma_Y=0.248$ (t/cm^2) ($N=305$) よりやや大きくなっているがこれはデータ数や鋼材の供給元の数、板厚等の影響と考えられる。一般に降伏応力度は板厚と弱い負の相関を持つことが知られているが、それに関する詳細な議論はここでは省略する。なお次章の数値解析に際して導入される Y の統計値としては、板厚 $t < 16$ (mm)のもの ($N=1776$)に限定し、 $\mu_Y=3.095$ (t/cm^2)、 $\sigma_Y=0.357$ (t/cm^2)、 $\alpha_{3Y}=0.541$ 、 $\alpha_{4Y}=4.066$ を用いている。

ii) 残留応力度 R —残留応力度 R については、フランジおよびウェブでの残留応力の最大値を降伏応力度の実測値の平均値でそれぞれ無次元化して統計処理を行った。ただし、ここでは $\mu_Y=2.8$ (t/cm^2)である。

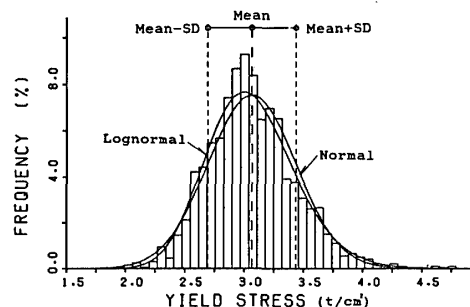
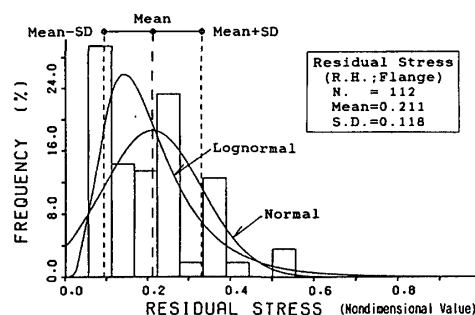
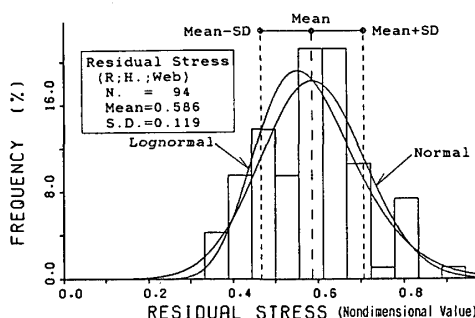


Fig.1 Histogram of Yield Stress



(a) Flange



(b) Web

Fig.2 Histograms of Residual Stress (Rolled-H)

Fig. 2は圧延H形鋼の R のヒストグラムである。フランジ、ウェブともに同程度の正のひずみ度と尖度を持っているが、絶対値はフランジの方が小さい。 χ^2 検定ではフランジ、ウェブともに対数正規分布との適合性が認められている。数値解析では R はフランジ端の値で取り扱うため、圧延H形鋼のフランジ端の残留応力の無次元化された資料より得られる積率情報に、上記の μ_Y を考慮して次のような値を設定する。 $\mu_R = -0.652(t/cm^2)$, $\sigma_R = 0.558(t/cm^2)$, $\alpha_{3R} = 0.588$, $\alpha_{4R} = 2.693$

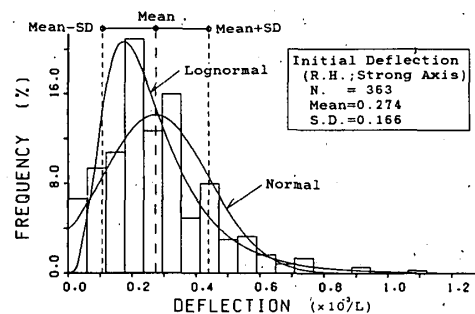
iii) 初期たわみ D —H形鋼材の強軸、および弱軸回りの初期たわみ量 D_s , D_w の座屈荷重に対する影響度はsin半波形成分が最も大きいことが明らかにされている⁹⁾ため、たわみ形をsin半波形式と仮定して部材中央の値を統計処理した。 μ_{D_s} , μ_{D_w} ともに材長の0.03%以内であり、JISの許容誤差である0.1%よりもかなり小さな値となっているが、変動係数 δ_{D_s} , δ_{D_w} は大きい。また、Fig. 3に示すとおり、大きく右裾の伸びたひずみ度の大きな分布性状となっている。 χ^2 検定では有意水準5%では正規分布、対数正規分布共に仮定は棄却されたが、適合度は対数正規分布の方が高い。

iv) 断面積 A —断面各部分の寸法はJISによる許容誤差の規定があるため断面積 A のばらつきは少なく、各断面形で変動係数は0.05前後となっている。また、フランジ厚のみを対象とすると平均値はさらに低くなっている。Fig. 4は圧延H形鋼の断面積を公称値で無次元化し、そのヒストグラムを描いたものである。各分布形は正のひずみを持っているが、高次積率の値は圧延、溶接、フランジとそれぞれかなり異なっている。 χ^2 検定では、圧延鋼は正規分布、対数正規分布ともに有意水準5%で適合性が認められたが、溶接H形鋼およびフランジではどちらの確率分布形も棄却されている。数値解析では、断面積のばらつきをフランジ厚で代表させて取り扱うため、フランジ厚の平均値を用いるが、標準偏差および3次、4次積率は断面積の統計的特性を反映させるため、圧延H形鋼の断面積のものを用いる。

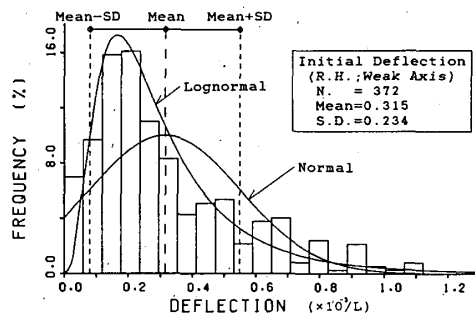
ここで行われた χ^2 検定については、各初期不整量とも有意水準5%で正規分布と対数正規分布についてのみ適合度を検定したが、どちらの分布形にも適さなかったものもあり、さらに厳密な確率分布形の検定を行うにはこれ以外の分布形も取り上げる必要がある。しかし、本論文では積率だけを用いた評価を基本としており、抵抗強度の数値計算でも確率分布形を必要としないので、分布形状に関してはこれ以上触れない。ただ、初期不整量には正規分布や対数正規分布では扱えない非正規性を有するものも存在し、積率だけを用いて評価するならば高次までの考慮が必要なることは明らかである。

3. 鋼構造部材抵抗強度の確率論的数値解析法

前章の統計処理結果に基づき、各初期不整量の確率モ



(a) Strong Axis



(b) Weak Axis

Fig. 3 Histograms of Initial Deflection (Rolled-H)

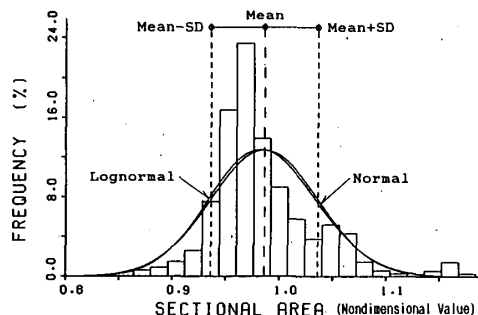


Fig. 4 Histogram of Sectional Area (Rolled-H)

Table 2 Probability Models of Initial Imperfections

Factors		M	SD	α_3	α_4
σ_y ($t < 16mm$; t/cm^2)		3.095	0.357	0.541	4.066
$ \sigma_R $ (*)		0.211	0.118	0.708	2.693
Initial Deflection	RH-st ($\times 10^{-3}/l$)	0.274	0.166	1.272	5.550
	RH-we ($\times 10^{-3}/i$)	0.315	0.234	1.196	3.835
RH Flange Thickness (*2)		0.964	0.049	1.195	5.301

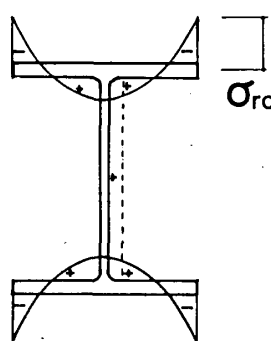


Fig. 5 Parabola Distribution of Residual Stress

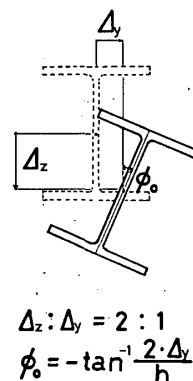


Fig. 6 Initial Deflection

デルを Table 2 のように設定する。部材は SS 41 材の圧延 H 形鋼で圧縮材 H-100×100×6×8, 曲げ材 H-200×100×5.5×8 を想定している。なお, 残留応力度分布は Fig. 5 に示す放物線分布を仮定し³⁾, 初期たわみ量は弱軸と強軸で完全相関を仮定して sin 半波形で与える (Fig. 6 参照)。これらの確率モデルを設定し, 本章では抵抗強度の統計諸量を解析的に算出する。

こうした解析では Monte Carlo 法²⁾³⁾や, 部材の基本強度式を簡略化した理論展開などが行われるが, それぞれ序で示したような問題点を有している。これらを考慮すると抵抗強度の確率論的解析においては次のような事項を満足する解析手法が望まれる。

1) 抵抗強度の関数は決定論的な段階で理論的な厳密性を有することが望ましい。

2) Monte Carlo 法は取り扱う関数が比較的単純なものであれば極めて簡潔で効率の良いものであるが, 一般に 1) を満足する関数は非常に複雑である。したがってそれほど試行回数が必要なく, かつこの利点を合わせもつ解析法が期待される。

このような要求を考慮し, 本論文では 3 point estimate 法⁶⁾を用いて抵抗強度の確率論的数値解析を行う。

i) 3 point estimate 法——この解析手法は確率変数の分布形を 3 点 X_- , X_0 , X_+ に集中させて取り扱う手法である (Fig. 7 参照)。確率変数 X の分布形を 3 点 X_- , X_0 , X_+ に集中させると, それらの確率密度はそれぞれ P_- , P_0 , P_+ に集中され, 4 次までの積率に関して以下の各式を満足する。

$$P_- + P_0 + P_+ = 1 \quad (1. a)$$

$$P_- X_- + P_0 X_0 + P_+ X_+ = \mu_X \quad (1. b)$$

$$P_- (X_- - \mu_X)^2 + P_0 (X_0 - \mu_X)^2 + P_+ (X_+ - \mu_X)^2 = \sigma_X^2 \quad (1. c)$$

$$P_- (X_- - \mu_X)^3 + P_0 (X_0 - \mu_X)^3 + P_+ (X_+ - \mu_X)^3 = \alpha_{3X} \cdot \sigma_X^3 \quad (1. d)$$

$$P_- (X_- - \mu_X)^4 + P_0 (X_0 - \mu_X)^4 + P_+ (X_+ - \mu_X)^4 = \alpha_{4X} \cdot \sigma_X^4 \quad (1. e)$$

ここで α_{3X} , α_{4X} はそれぞれ X の 3 次積率 (ひずみ度), 4 次積率 (尖度) を表す。 $X_0 = \mu_X$ とおくと, 上の 5 式より次の解を得る。

$$P_- = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \frac{\alpha_{3X}}{m}}{\alpha_{4X} - \alpha_{3X}^2} \right) \quad (2. a)$$

$$P_0 = 1 - \frac{1}{\alpha_{4X} - \alpha_{3X}^2} \quad (2. b)$$

$$P_+ = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \frac{\alpha_{3X}}{m}}{\alpha_{4X} - \alpha_{3X}^2} \right) \quad (2. c)$$

$$X_- = \mu_X - \frac{\sigma_X}{2} (m - \alpha_{3X}) \quad (2. d)$$

$$X_0 = \mu_X \quad (2. e)$$

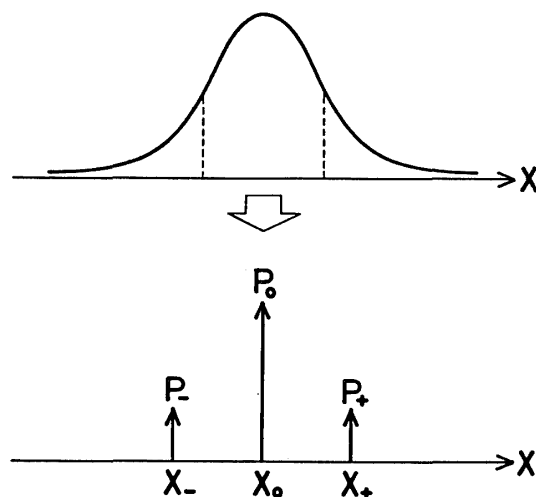


Fig. 7 Basic Concept of 3 Point Estimate Method

$$X_+ = \mu_X + \frac{\sigma_X}{2} (m + \alpha_{3X}) \quad (2. f)$$

ただし

$$m = \sqrt{4\alpha_{4X} - 3\alpha_{3X}^2} \quad (3)$$

である。 X を変数にもつ確率関数 $Y = Y(X)$ を考えると Y の k 次積率 α_{kY} は X_- , X_0 , X_+ , P_- , P_0 , P_+ を用いて次式より得られる。

$$\begin{aligned} \alpha_{kY} \cdot \sigma_Y^k &= E[(Y - \mu_Y)^k] \\ &= P_- (Y_- - \mu_Y)^k + P_0 (Y_0 - \mu_Y)^k \\ &\quad + P_+ (Y_+ - \mu_Y)^k \end{aligned} \quad (4)$$

ここに

$$Y_- = Y(X_-) \quad (5. a)$$

$$Y_0 = Y(X_0) \quad (5. b)$$

$$Y_+ = Y(X_+) \quad (5. c)$$

$$\mu_Y = P_- Y_- + P_0 Y_0 + P_+ Y_+ \quad (5. d)$$

$$\begin{aligned} \sigma_Y^2 &= P_- (Y_- - \mu_Y)^2 + P_0 (Y_0 - \mu_Y)^2 \\ &\quad + P_+ (Y_+ - \mu_Y)^2 \end{aligned} \quad (5. e)$$

である。

また, 多変数関数への展開を行うと次のようになる。Rosenblueth は多変数関数 $Y = Y(X_1, X_2, \dots, X_n)$ を次のような関数 $H = H(X_1, X_2, \dots, X_n)$ により近似できることを提案している。

$$\frac{H}{y} = \frac{Y_1}{y} \cdot \frac{Y_2}{y} \cdots \frac{Y_n}{y} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{Y_i}{y} \right) \quad (6)$$

ここに

$$y = Y(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, \mu_{X_n}) \quad (7. a)$$

$$Y_i = Y(\mu_{X_1}, \mu_{X_2}, \dots, X_i, \dots, \mu_{X_n}) \quad (7. b)$$

である。いま, X_1, X_2, \dots, X_n が統計的に独立であるとすれば, Y_1, Y_2, \dots, Y_n も互いに独立となり, H の 4 次までのモーメントは次のように表すことができる。

$$\frac{\mu_H}{y} = \frac{\mu_{Y_1}}{y} \cdot \frac{\mu_{Y_2}}{y} \cdots \frac{\mu_{Y_n}}{y} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{\mu_{Y_i}}{y} \right) \quad (8. a)$$

$$1 + \delta_H^2 = \prod_{i=1}^n (1 + \delta_{Y_i}^2) \quad (8. b)$$

$$\delta_H^3 \alpha_{3H} + 1 + 3\delta_Y^2 = \prod_{i=1}^n (\alpha_{3Y_i} \delta_{Y_i}^3 + 1 + 3\delta_{Y_i}^2) \cdots \cdots (8. c)$$

$$\delta_H^4 \alpha_{4H} + 4\delta_H^3 \alpha_{3H} + 1 + 6\delta_H^2 = \prod_{i=1}^n (\delta_{Y_i}^4 \alpha_{4Y_i} + 4\delta_{Y_i}^3 \alpha_{3Y_i} + 1 + 6\delta_{Y_i}^2) \cdots \cdots (8. d)$$

ここに δ_H , δ_{Y_i} はそれぞれ H , Y_i の変動係数である。

ii) 部材抵抗強度の弾塑性解析——部材の抵抗強度を数値解析により求めるには、決定論的な段階で十分にその弾塑性挙動を追跡できる解析法を用意する必要がある。ここでの弾塑性数値解析は、材料非線形と幾何学的非線形を考慮してつり合い条件を考えていくことにより、最大耐力および最大耐力後の解析を厳密に行うことのできるポテンシャルエネルギー増分の停留原理に基づいた初期応力法とも呼ばれる増分型の非線形解析¹⁰⁾である。解析上の仮定とモデル化については次のような事項に基づく。

- 1) 部材は 20~30 個の要素に分割する。
- 2) 3 次元的な広がりを持つ部材は線材と考える。
- 3) 部材の局所的な変形は無視する。
- 4) 各要素の変形は材軸方向の変形、2 軸方向の曲げ変形、断面のそり変形、サンブナンのねじれを含んだ材軸まわりのねじれ変形を考慮する。
- 5) 部材の曲げに伴うせん断変形は無視できるものとする。
- 6) 断面の弾性、塑性状態にかかわらず、2 軸方向の曲げに関して断面は平面を保持する。
- 7) 断面は数十の単位的面に分割する。
- 8) 断面の降伏はひずみと応力のみによって評価し、せん断応力の影響は無視する。
- 9) 要素内の応力度とひずみ状態は各要素の両端の断面についてのみ追跡する。要素内部の応力状態は両端の応力度を用いて線形補間する。
- 10) サンブナンのねじれに関しては常に弾性を保つものとする。
- 11) 材料の応力、ひずみ関係は Fig. 8 に示すような Bi-Linear 形を想定する。

4. 解析結果および考察

Fig. 9 に実験値より求めた圧縮材と曲げ材の平均抵抗強度と解析結果との対応を示した。実験値は文献 11) より引用したものである。 $e\lambda_c$, $e\lambda_b$ は圧縮材および曲げ材の換算細長比であり、それぞれ下式で定義される。

$$e\lambda_c = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{Y}{E}} \cdot \lambda_y \cdots \cdots (9. a)$$

$$e\lambda_b = \sqrt{\frac{M_p}{M_E}} \cdots \cdots (9. b)$$

ここに Y は実験値の降伏応力度、 E はヤング係数、 λ_y は弱軸の細長比、 M_p は全塑性モーメント、 M_E は弾性横座屈モーメントである。数値解析では実験時の端部拘束

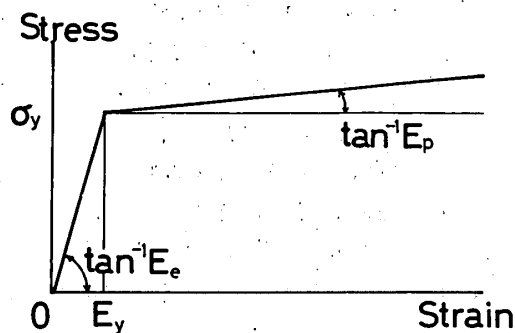


Fig. 8 Stress-Strain Relation

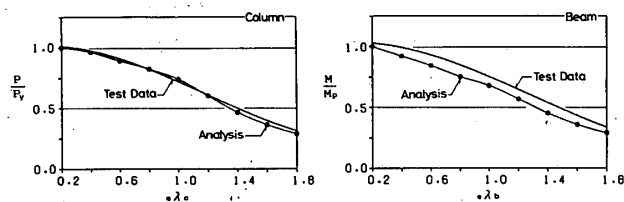


Fig. 9 Relations between Actual Mean Value of Resistance and Analytical Value

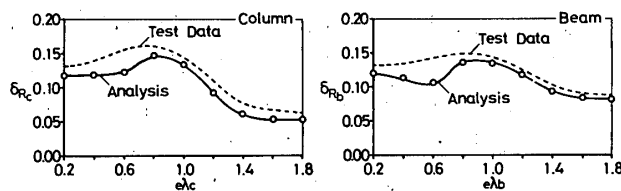


Fig. 10 Relations between Actual Variation of Resistance and Analytical Value

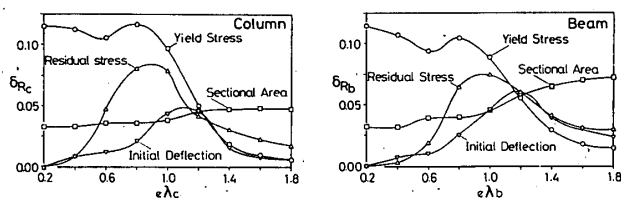


Fig. 11 Coefficient of Variations of Resistance with One Random Initial Imperfection

等を考慮しないために、曲げ材では解析値が若干下回っている。

Fig. 10 は各初期不整量の 4 次までの積率を考慮した場合の変動係数である。全因子を不確定量として扱った場合には、両材とも右下りの曲線となり、弾性域で抵抗強度のばらつきが小さくなる。全体に解析値が下回っているのはモデル化の段階で 4 種の初期不整量だけを考慮しているためと考えられる。

1 だけの初期不整量を確率変量とし、ほかの不確定因子を平均値に固定した場合の変動係数を Fig. 11 に示す。不確定量として設定する初期不整量によって変動係数は異なった値を示しており、各因子の抵抗強度に対する影響度の大きさが結果に反映されている。また、圧縮材と曲げ材で同じ傾向の変動を示していることがわかる。

次に解析により得られた抵抗強度の高次積率に注目し、抵抗強度の分布形の非正規性に関する考察を行う。Fig. 12 から Fig. 15 に一つの初期不整量だけを変動させた場合の抵抗強度の3次および4次積率を示す。また、図中—○—は初期不整量の4次積率までを、—△—は2次積率までを考慮した解析結果であることを表す。Fig. 12 は降伏応力のみを確率量とした場合の抵抗強度の積率を表す。 $e\lambda$ が小さくなると抵抗強度の積率は降伏応力の積率に収束すると予想される。今回の数値解析では圧縮材、曲げ材とも $e\lambda_c$, $e\lambda_b$ が 0.4 以下でその値に収束している。 $e\lambda$ が小さい場合に抵抗強度は P_y , M_p によって頭打ちとなっているが、 $e\lambda$ の増加とともに降伏応力の分布の裾の影響が出はじめ、抵抗強度の分布は負のひずみ度を示すようになる。Fig. 13 に示す残留応力度の影響も同様の傾向の変動を示している。Fig. 14 は、初期たわみ量を不確定量とした場合の結果である。 $e\lambda_c$, $e\lambda_b$ が 0.8 から 1.2 の前後で分布形のひずみ度は最も大きくなっている。強軸回りと弱軸回りのたわみ量を完全相関として扱っているために2種類の解析結果の対応はほかの場合とやや異なっている。Fig. 15 は断面性状のみを確率量とした場合の結果である。両材とも換算細長比の全域にわたって設定した確率モデルの高次積率に近い値を示している。これは断面形状の不確定性が全細長比区間で抵抗強度の不確定性に強く関与していることを示している。4次積率の変動は3次積率のそれと比べ相対的に小さい。

Fig. 16 は全初期不整量を確率変量として扱った場合の解析結果である。各初期不整量の4次までの積率を考慮した場合の解析結果については、材長が短い場合は変動係数との兼ねいで降伏応力の影響が支配的になり、分布形は正のひずみ度を示している。材長の増加とともに各因子の影響度が接近するため、 $e\lambda_c$, $e\lambda_b$ が 1.0 から 1.2 の前後で分布形のひずみ度は0に近くなる。 $e\lambda_c$, $e\lambda_b$ が 1.2 以降は断面形状の影響が大きくなり、分布形は再び正のひずみ度を示すようになる。抵抗強度の4次積率は3次積率と同じ傾向の変動を示しており、 $e\lambda_c$, $e\lambda_b$ が 1.0 から 1.2 の間で最小となる。3次積率を考え合わせると、この付近で分布形は正規分布に近い形になっているといえる。各初期不整量の2次までの積率によって不確定性を代表させた場合の結果は、全体に小さい変動しか示していない。なお、図中の点線は実験データより求めた抵抗強度の3次4次積率である。信頼性のある高次積率を算出するに十分な実験データは得られていないため、この値と解析結果との対比考察に関する議論は避けるが、抵抗強度の確率分布形がなんらかの非正規性を持つことを示しており、しかもその非正規性が材長によって変化することを示している。

5. 各種設計式の信頼性評価

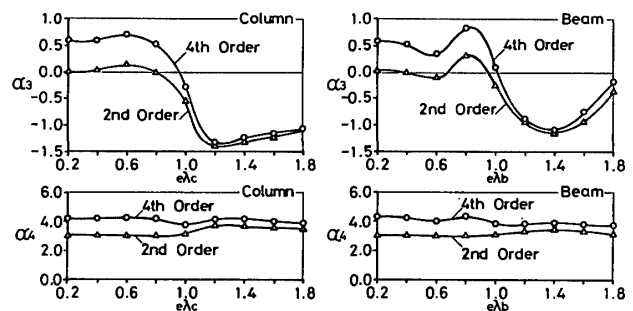


Fig. 12 Higher-Order-Moments of Member Resistance with Random Yield Stress

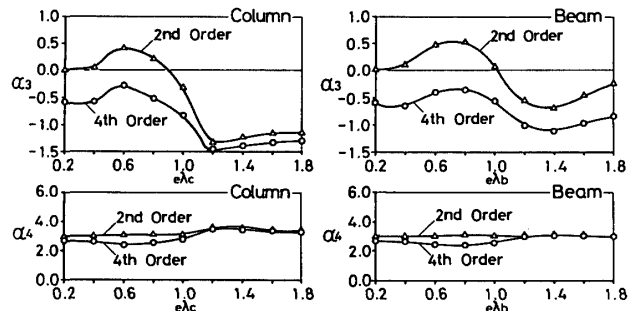


Fig. 13 Higher-Order-Moments of Member Resistance with Random Residual Stress

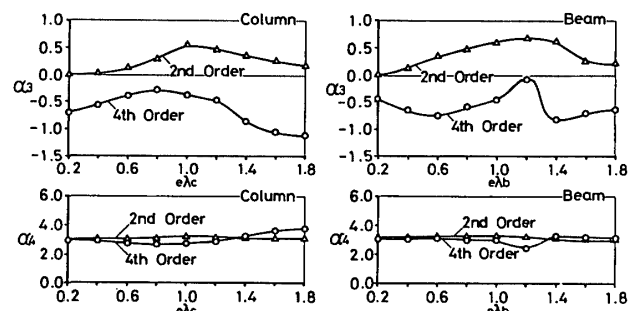


Fig. 14 Higher-Order-Moments of Member Resistance with Random Initial Deflection

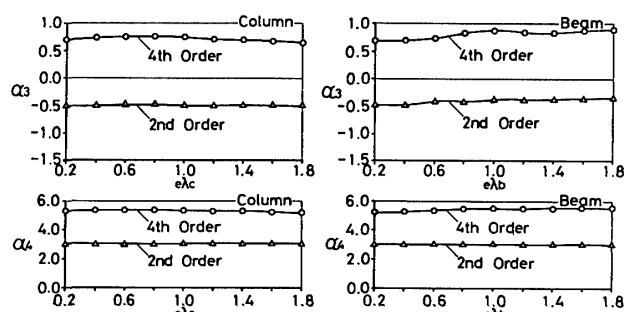


Fig. 15 Higher-Order-Moments of Member Resistance with Random Sectional Area

前章で算出された部材抵抗強度の高次積率に関するデータを用い、本章では鋼圧縮材および曲げ材の特性強度曲線の提示を行う。さらに、各種設計規範における鋼構造部材耐力の設計式の信頼性評価を行う。

積率情報だけを用いて信頼性を評価するには、積率と

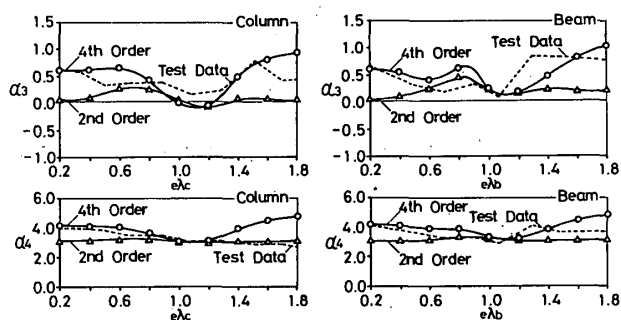
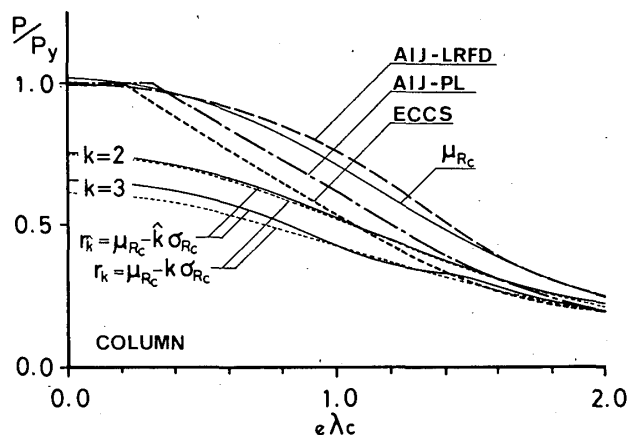


Fig. 16 Higher-Order-Moments of Member Resistance with All Random Initial Imperfections

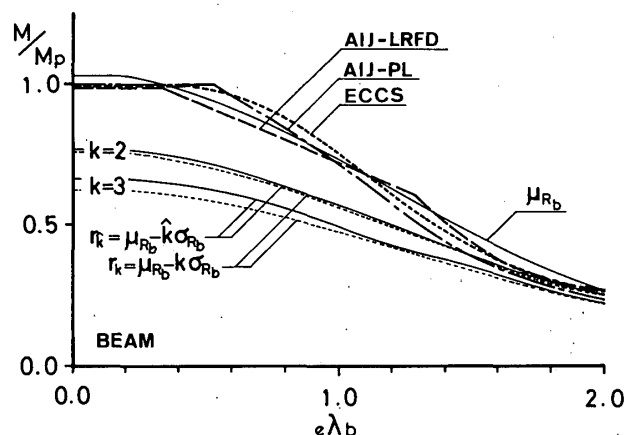
信頼性指標，あるいは破壊確率との理論的な結びつけが必要である。本論文では文献5)で提案されている高次積率標準化手法を適用し，積率だけを用いて信頼性の合理的な評価を行う。今回は4次までの積率を考慮している。この手法に基づけば，2次モーメント法で通常用いられる信頼性指標 β と4次までの積率を考慮した信頼性指標 $\hat{\beta}$ との関係は次式で与えられる。

$$\hat{\beta} = s(\beta) = \frac{\alpha_{3x} + 3(1 - \alpha_{4x})\beta - \alpha_{3x}\beta^2}{2\alpha_{3x}^2 - 3\alpha_{4x} + 3} \quad \text{.....(10)}$$

この評価法を用い，まず高次積率を考慮した特性強度曲線の提示を行う。ここでは各換算細長比区間において，



(a) Column



(b) Beam

Fig. 17 Comparison of Design Formulae with Characteristic Strength Curve

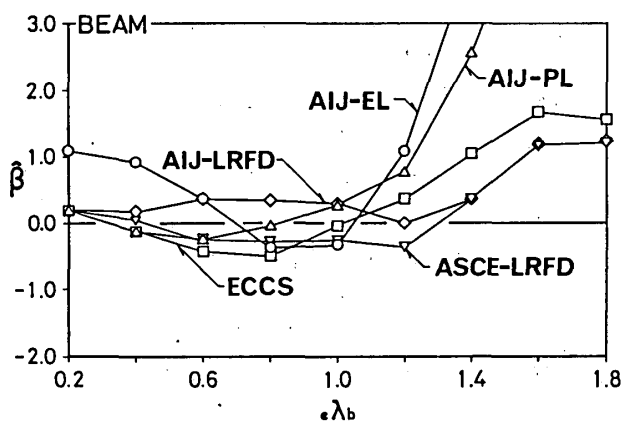
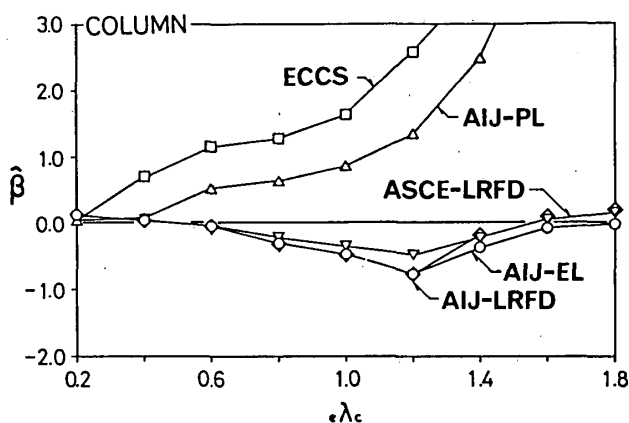


Fig. 18 Reliability Level of Design Formulae

実測値に基づく部材抵抗強度の平均値 μ_R と標準偏差 σ_R を用い，特性強度 r_k を

$$r_k = \mu_R - k\sigma_R \quad \text{.....(11)}$$

と設定する。この時， k はこの特性強度式の信頼度を決定する値となり，2次モーメント法に基づく信頼性指標 β と同義になっている。そこで，この k を β とみなし，(10)式を用いて高次積率を考慮した形 \hat{k} に変換する。この時， $k=2$ ， $k=3$ の場合についての特性強度 $r_k = \mu_R - k\sigma_R$ 曲線を $e\lambda_c - P/P_y$ ， $e\lambda_b - M/M_p$ 座標上に実線で示したものがFig. 17である。なお，(10)式における α_{3x} ， α_{4x} は前章の数値解析の結果を用いている。図中，細い点線は $r_k = \mu_R - k\sigma_R$ 曲線である。また，同一座標上に日本建築学会鋼構造塑性設計指針¹²⁾(AIJ-PL)，日本建築学会鋼構造荷重・耐力係数設計法試案¹⁾(AIJ-LRFD)，European Convention of Constructional Steelworks recommendation³⁾(ECCS)の各設計式における抵抗強度曲線を示す。 $r_k = \mu_R - k\sigma_R$ 曲線は $k=2$ のとき2.5 percentile 曲線， $k=3$ のとき0.14 percentile 曲線に対応し，各種設計式と特性強度曲線の対応が把握できる。

Fig. 18は，Fig. 17の3設計式に日本建築学会鋼構造設計規準¹⁴⁾(AIJ-EL)，ASCEのLRFD規範¹⁵⁾(16)

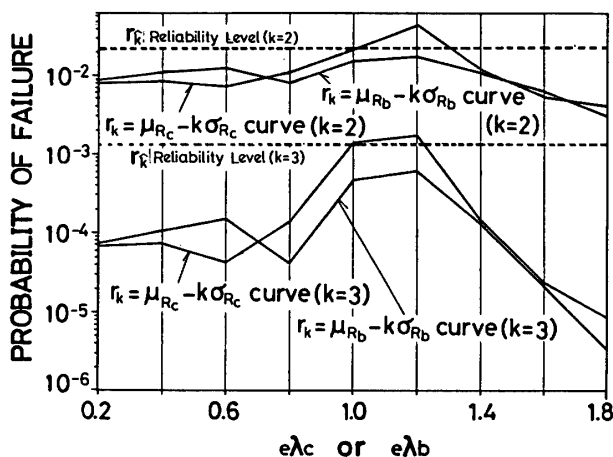


Fig.19 Reliability Evaluation of Characteristic Strength Curve ($k=2$ and $k=3$)

(ASCE-LRFD)を含め、それらの設計強度の信頼度 $\hat{\beta}$ を算出し、 $e\lambda_c$ 、 $e\lambda_b$ で整理したものである。 $\hat{\beta}$ は2次モーメント法に基づき

$$\beta = \frac{\mu_R - r_e}{\sigma_R} \dots\dots\dots (12)$$

と定義した信頼性指標 β を、高次積率標準化関数である(10)式を用いて

$$\hat{\beta} = s(\beta) \dots\dots\dots (13)$$

と変換したものである。なお、 r_e は各種設計式の設計強度を表す。両材ともAIJ-LRFD, ASCE-LRFDの評価式が比較的安定した信頼性レベルを有していることがわかる。

また、Fig.19は、 $r_k = \mu_R - k\sigma_R$ および $r_k = \mu_{Rc} - k\sigma_{Rc}$ 曲線($k=2, k=3$)を破壊限界とした時の部材の破壊確率を表す。 r_k が全 $e\lambda_c$ 、 $e\lambda_b$ 区間で一定の信頼性レベルを有しているのに対し、高次の積率を考慮していない r_k は破壊確率にして2桁もの差を生じており、鋼構造部材の信頼性評価においては、高次積率に関する情報の充実、およびその適切な評価法の確立が不可欠といえよう。

6. 結

以上、鋼構造部材の抵抗強度に関与する不確定因子である初期不整量の統計データを収集し、得られた統計量に関する考察を行った。また、統計処理結果に基づき、確率論的解析法を用いて部材の抵抗強度の積率情報を求め、抵抗強度の不確定性に関する考察を行った。その結果、抵抗強度にいくらかの非正規性が存在することを示し、不確定因子の高次までの積率を考慮した部材抵抗強度の評価例を述べた。さらに、解析により得られた抵抗強度の統計的情報を用いて、各種設計式の信頼性レベルの評価を行い、高次積率の考慮の必要性を示した。解析に導入した初期不整量のデータに関してはさらに充実に図る必要があるが、本論の考察は信頼性設計法確立のた

めの重要な基礎資料を提供するものとする。

謝 辞

本研究で用いた初期不整量のデータの一部については、名古屋大学工学部土木工学科、福本研究室から提供して頂いた。付して感謝いたします。

また、本研究費の一部は文部省科学研究費、および特定研究費によった。付して感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本建築学会構造委員会鋼構造分科会：鋼構造荷重・耐力係数設計法試案，昭和61年，3月。
- 2) Strating, J. and Vos, H. : Computer Simulation of E.C.C.S. Building Curve Using a Monte Carlo Method, Proceeding of International Colloquium on Column Strength, 1972.
- 3) 藤本盛久，岩田 衛，中谷文俊：鋼圧縮材の座屈強度の確率論的方法による研究，日本建築学会論文報告集，第229号，昭和50年，3月。
- 4) 坂本 順，小浜芳郎，渡辺雅生，大宮幸男：鋼構造部材強度の確率統計論的考察，日本建築学会論文報告集，第296号，昭和55年，10月。
- 5) 小野徹郎，井戸田秀樹：高次積率標準化手法の提案とそれに基づく信頼性指標の設定—高次積率を考慮した信頼性設計法に関する研究 その1—，日本建築学会論文報告集，第359号，昭和61年，1月。
- 6) Rosenblueth, E. : Point Estimates for Probability Moments, Proc. National Academy of Science of U.S.A., Nov.1975.
- 7) 小野徹郎，井戸田秀樹，河原弘明：鋼構造部材の初期不整量の統計的調査と抵抗強度に関する一考察，日本建築学会東海支部研究報告集，昭和60年，2月。
- 8) 西村 昭：鋼材の機械的性質のばらつきについて，JSSC, Vol.5, No.48, 1969.
- 9) 青木徹彦，福本啓士：鋼柱の座屈強度のばらつきにおよぼす残留応力分布の影響について，土木学会論文報告集，第201号，1972年，5月。
- 10) 藤本盛久，和田 章，岩田 衛，中谷文俊：鋼構造骨組の3次元非線形解析，日本建築学会論文報告集，第227号，昭和50年，1月。
- 11) 小野徹郎，平野富之：実験データに基づく鋼構造部材の耐力と変形能力に関する統計論的考察 (I)，日本建築学会論文報告集，第328号，昭和58年，6月。
- 12) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針，昭和56年，6月。
- 13) Johnston, B.G. : Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, Third Edition, John Wiley & Sons Inc., 1976.
- 14) 日本建築学会：鋼構造設計規準，昭和48年，5月。
- 15) Ravindra, M.K., and Galambos, T.V. : Load and Resistance Factor Design for Steel, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.104, No.ST 9, Sept., 1978.
- 16) Yura, J.A., Galambos, T.V., and Ravindra, M.K. : The Bending Resistance of Steel Beams, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.104, No.ST 9, Sept., 1978.

SYNOPSIS

UDC : 624.014.2 : 519.2

A STATISTICAL STUDY ON RESISTANCES OF STEEL COLUMN AND BEAM USING HIGHER-ORDER-MOMENTS

by Dr. **TETSURO ONO**, Prof., Nagoya Institute of Technology, **HIDEKI IDOTA**, Graduate Student, Tokyo Institute of Technology and **HIROAKI KAWAHARA**, Taisei Construction Co. Ltd, Members of A. I. J.

The probability distribution of steel member resistance is characterized by non-Gaussian properties that cannot be expressed solely in terms of mean value and standard deviation. The non-Gaussian properties of distribution can cause extremely large variations in the probability of member failure when probability distribution is evaluated in terms of moments up to the 2nd order.

The purpose of this paper is to present data relating to the non-Gaussian properties of member resistance distribution. In addition, using higher order moments of member resistance, design formulae of member resistance are studied and characteristic strength curves capable of producing a uniform level of reliability over the entire range of slenderness ratios are proposed.