

モンテカルロシミュレーションによる 鋼柱の基本強度の理論的検証

大阪大学工学部 正 員 福本 啓士

大阪大学工学部 正 員 西村 宣男

大阪大学大学院 学生員 〇島谷 竜一

1. はじめに 構造部材として基本的な部材である鋼柱部材の中心軸圧縮強度について、代表的な断面を対象とした弾塑性有限変位解析により、初期不整に対する敏感度関数を作成し、極限強度を初期たわみと残留応力の関数として表示する。そして初期たわみと残留応力を実測データの分布に基づいてモデル化し多数の初期不整の組合せを発生させ、上述の敏感度関数を適用して極限強度の分布を求めた。さらに得られた極限強度分布を、実験データによって福本・伊藤¹⁾が定めた極限強度の統計曲線および各国の設計基準との比較を行った。また敏感度関数から強度の平均値および下限値に対応する初期不整の組合せを抽出し、初期たわみ-残留応力平面にプロットし、強度の下限値を再現するための初期不整を提案する。

2. 初期不整モデル モンテカルロシミュレーションに用いるための残留応力および初期たわみの初期不整モデルを実測データをもとに作成した。各不整のパラメータを表-1に示す。溶接柱および圧延柱の圧縮残留応力度の頻度分布は福本・伊藤¹⁾のデータを使用した。初期たわみの分布形は一般に、ガンマ分布、ワイブル分布等があげはまるが福本・伊藤¹⁾の実測結果をもとにカイ二乗検定の結果、ワイブル分布を用いた。初期不整モデルの信頼度はいずれも95%以上である。

3. 弾塑性有限変位解析 初期不整の敏感度関数を決定するために、残留応力、初期たわみを適宜組み合わせた弾塑性有限変位解析を行う。福本、伊藤¹⁾の実験データによる断面の区分において、グループ1について溶接箱形断面と圧延I形断面、グループ2について溶接I形断面とT形断面について解析を行った。解析モデルの断面と残留応力分布を図-1に示す。初期たわみはSIN半波形状を仮定し、部材が崩壊に至るまで各部における構成要素の局部座屈などは生じないものとする。また敏感度関数を作成するため、圧縮残留応力度(σ_{rc}/σ_y)は0.0, 0.2, 0.5の3ケース、初期たわみはL/500, L/1000, L/2000, L/5000の4ケースとした。また細長比 λ は0.6~1.2までを0.2ごとに4ケースを設定した。圧延I形柱の解析結果を降伏強度で無次元化し表-2に示す。

表-1 初期不整モデルのパラメータ

(a) 残留応力(σ_{rc}/σ_y) (b) 初期たわみ($\delta_0/L \times 10^{-3}$)

	M	S		M	S	m	α	γ
溶接柱	0.3	0.15	溶接柱	0.3	0.15	2.10	0.103	0.0
圧延柱	0.5	0.43	圧延柱	0.5	0.43	1.178	0.478	0.0
T形柱	0.3571	0.4976	T形柱	0.3571	0.4976	0.7305	0.4082	0.0

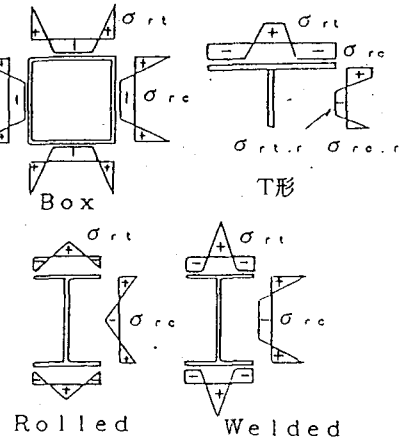


図-1 残留応力分布

表-2 圧延I形柱の解析結果

初期たわみ	$\lambda=0.6$	$\lambda=0.8$	$\lambda=1.0$	$\lambda=1.2$	残留応力	$\lambda=0.6$	$\lambda=0.8$	$\lambda=1.0$	$\lambda=1.2$
$L/500$	0.8213	0.6695	0.5386	0.4342	0.0	0.9244	0.8173	0.6794	0.5376
$L/1000$	0.8704	0.7508	0.6240	0.5026	0.15 σ_y	0.8704	0.7508	0.6240	0.5026
$L/2000$	0.8986	0.8063	0.6887	0.5589	0.30 σ_y	0.7737	0.6510	0.5357	0.4384
$L/5000$	0.9145	0.8480	0.7987	0.6797					

Yushi FUKUMOTO, Nobuo NISHIMURA and Ryuichi SHIMATANI

4. 敏感度関数 柱強度曲線として一般的に採用されているベリーロバートソン型の式の初期不整に関わる係数 α を初期不整と残留応力の影響度を反映する形式で考慮して組み込み、さらにするためシステム係数 β を採用して強度解析結果の全体を考慮して以下のように表示する。表-3 敏感度関数のパラメータ

$$\frac{N}{N_y} = \frac{1}{2\beta\lambda^2} \{S - \sqrt{S^2 - 4\beta\lambda^2}\}, S = 1 + \alpha(\bar{\lambda} - \lambda_{cr}) + \beta\bar{\lambda}^2$$

ここに β : システム係数, α : $(c_1 + c_2X + c_3X^2)(d_1 + d_2Y + d_3Y^2)$

$$X = \sigma_{rc} / \sigma_y \quad Y = W / W_0 \quad (W_0 = L / 1000)$$

各断面に関するパラメータの値を表-4に示す。

5. 柱部材の強度分布と実測強度曲線 各グループごとに算出した強度分布を実測データと比較し図-2, 3に図の下部に変動係数($\omega = S/M$)を添えて●, ○で示す。各断面とも $\bar{\lambda} = 1.0$ 付近で強度分布のばらつきが大きく、実測データの平均値曲線と下限値曲線の間に分布している。各グループごとに福本・伊藤²⁾の平均値および下限値曲線と比較すると、グループ1では箱型断面柱が平均値曲線を、圧延I形柱の下限値が下限値曲線にほぼ該当している。一方グループ2では溶接I形柱が平均値曲線を、T形断面柱が下限値曲線にほぼ該当している。また各国基準との比較を溶接圧延I形について図-4に示す。各国基準はシミュレーション結果の「M+2S」値にほぼ一致していることがわかる。

6. 等価初期不整量 同一の断面の部材については、その使用方法が柱であろうとはりであろうと等価な初期不整が存在する。このことより本研究では強度の下限値に該当する初期不整を等価初期不整と定義し提案を行う。なお各断面の平均値強度と下限値強度に相当する等価初期不整は $\bar{\lambda}$ によらず一定値をとる。また各初期不整を残留応力-初期たわみ平面上にプロットし、図-5に示す。初期不整をともに平均値で与えた場合を(○)で、ともに「M+2S」で与えた場合を(●)で示す。これより下限値強度を再現するためには、「M+2S」では過大評価であると言える。本研究では(○)と(●)を直線で結び、下限値の初期不整曲線(図中一点鎖線)との交点(▲)を下限値強度を再現するための初期不整として提案し表-4に示す。

表-4 等価初期不整量

	溶接BOX柱	溶接I形柱	圧延I形柱	T形柱
残留応力 (σ_{rc}/σ_y)	0.19	0.19	0.11	0.24
初期たわみ (δ/δ_0)	0.56	0.50	1.18	1.12

参考文献

- 1) 福本啓士、伊藤義人: 座屈実験データベースによる鋼柱の基準強度に関する実証的研究、土木学会論文集、第355号、1983

	β	c_1	c_2	c_3	d_1	d_2	d_3
箱型断面	0.9	0.1	0.6	-0.1	0.1	0.3	0.4
圧延I形	0.95	0.1	0.6	0.0	0.6	0.1	0.1
溶接I形	1.0	0.2	1.1	0.0	0.3	0.1	0.0
T形	1.1	0.3	0.7	0.0	0.8	0.2	0.0

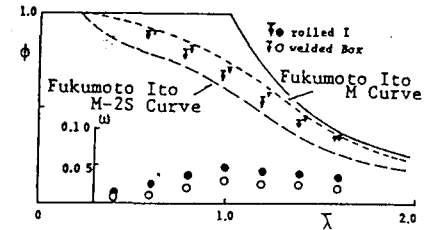


図-2 グループ1の解析結果と実測データ

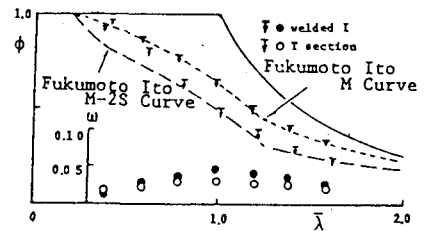


図-3 グループ2の解析結果と実測データ

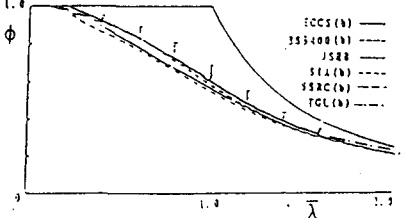


図-4 圧延I形柱の解析結果と各国規格

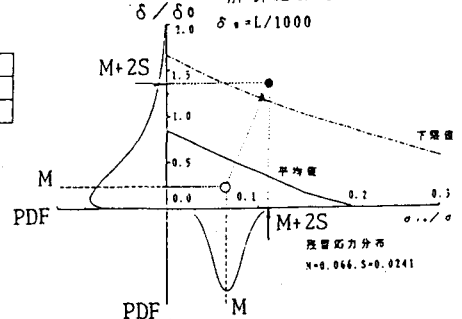


図-5 圧延I形柱の初期不整と強度