

残留応力と初期不整を考慮した自由突出板の座屈強度に関する解析的検討

北海道旅客鉄道株式会社 正会員 ○片倉 篤志
埼玉大学大学院 正会員 奥井 義昭

室蘭工業大学大学院 正会員 小室 雅人

1. はじめに

本研究では、道路橋示方書に規定されている圧縮板の基準耐力曲線（以後、道式）の見直しのための基礎資料を収集することを目的に、自由突出板を対象に有限要素解析（FEM 解析）とモンテカルロシミュレーションを用いた終局強度の算定を行った。ここでは、SBHS500 材と SBHS700 材を含む計 6 種類の鋼材に対して、残留応力と初期不整のバラツキを考慮した終局強度の統計量を算定した。

2. 検討方法

図 1 には、検討方法の流れを示している。以下、各項目の概要について述べる。

- (1) 既往の研究成果^{1), 2)}に基づき、残留応力と初期不整に関するバラツキの確率密度関数を設定した。
- (2) (1) の残留応力および初期不整のバラツキを考慮した FEM 解析を行った。ここでは、図 2 に示すように残留応力(6 種類)、初期不整(5 種類)、および鋼種(6 種類)を変化させた鋼板に対して、各幅厚比パラメータ(10 種類)における終局強度を算出した。幅厚比パラメータ R は、次式によって与えられる。

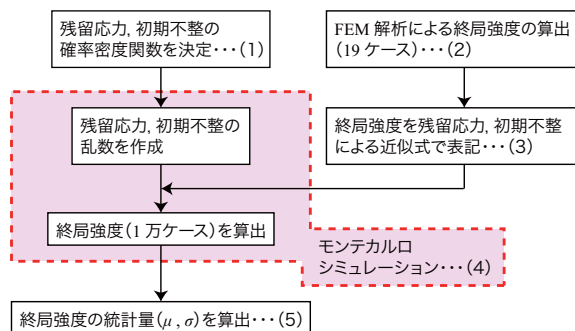


図 1 検討方法の流れ

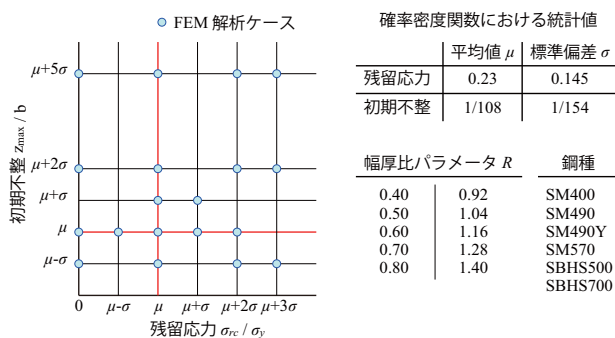


図 2 ケーススタディ

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s} \cdot \frac{12(1-\nu_s^2)}{\pi^2 k}}$$

ここで、 E_s ：弾性係数 (200 GPa)、 ν_s ：ポアソン比 (0.3)、 k ：座屈係数 (0.425) である。なお、降伏応力 σ_y は示方書に準拠して鋼種および板厚 t によって異なる値を使用した。

FEM 解析モデルは、図 3 (a) に示すように I 桁の圧縮側フランジを模擬した一辺自由三辺単純支持の鋼板である。本解析では、自由辺のみに正弦半波の初期不整を考慮し、その最大値 $z_{\max}$ を 5 種類に変化させている。また、残留応力分布は、図 3 (b) に示すように単純支持長辺の残留応力を σ_y 、自由端部の残留応力を $0.6 \sigma_y$ と固定し、圧縮側の残留応力 σ_{rc} を 6 種類に変化させている。なお、FEM 解析には構造解析用汎用プログラム ABAQUS を使用した。

- (3) (2) の結果より、次式に示す残留応力と初期不整による終局強度 σ_u/σ_y の近似式（応答曲面）を算出した。

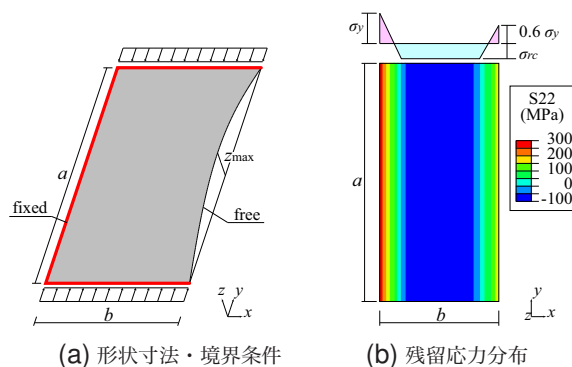


図 3 FEM 解析モデルの概要

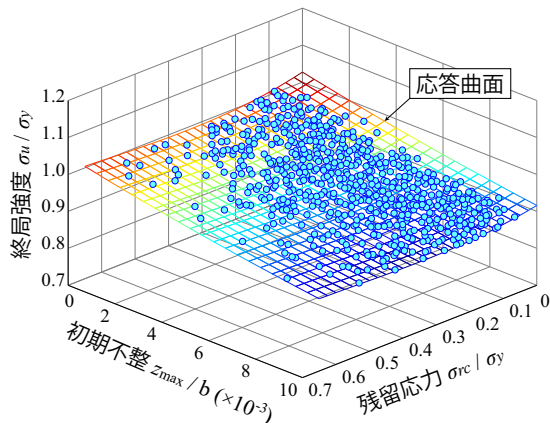


図 4 シミュレーション解析結果の一例

キーワード：板座屈、モンテカルロシミュレーション、残留応力、初期不整、SBHS

連絡先：〒 050-8585 室蘭工業大学大学院 くらし環境系領域 社会基盤ユニット TEL/FAX:0143-46-5228

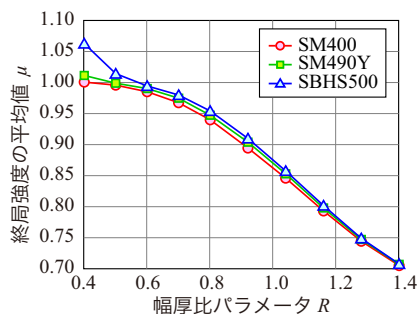
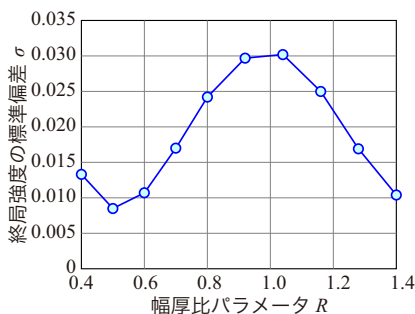
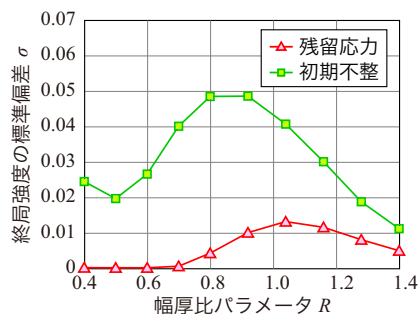
図5 平均値と R の関係図6 標準偏差と R の関係

図7 標準偏差に関する内訳

$$\sigma_u / \sigma_y = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3$$

ここで, x は降伏応力で無次元化した残留応力 σ_{rc} / σ_y , y は板幅で無次元化した初期不整量 $z_{\max} / b$ である. 上式中の未知係数 p_{ij} に関しては, 鋼種および幅厚比パラメータ R ごとの FEM 解析結果を用いて最小二乗法により決定した.

(4) (3) で算出した応答曲面を用いて, (1) の確率密度関数によるモンテカルロシミュレーションを実施し, 終局強度の算出を行った. なお, シミュレーションの試行回数は, 予備解析により収束性が十分に確保される 10,000 回とした. 図4には, その結果の一例を示している.

(5) (4) の結果を用いて, 終局強度の確率密度分布を求め, 終局強度に関する統計量を算出した.

3. 解析結果および考察

図5には, 終局強度の平均値 μ と幅厚比パラメータ R の関係を示している. 図より, 終局強度の平均値 μ は, R が大きいほど鋼種による差異が小さくなる傾向にあることが分かる. これは, R が大きい領域では弾性座屈が卓越するのに対し, R が小さい領域では鋼材の塑性硬化の影響(以後, 塑性降伏)が卓越することを示唆している.

図6には, 全鋼種の終局強度を平均化した場合の標準偏差 σ と R の関係について示している. 図より, 終局強度の標準偏差 σ は $R \simeq 1.0$ の領域で最大となることが分かる.

図7には, 有限差分近似により得られた終局強度の標準偏差 σ の内訳を示している. 図より, 終局強度は, 初期不整量の影響を大きく受け, 残留応力の影響は小さいことが分かる. 特に $R < 0.7$ の領域では, 残留応力の影響はほとんど無いことが分かる. また, 図6および図7より, $R \simeq 1.0$ の領域で標準偏差が大きくなる要因としては, (1) 弾性座屈域と塑性降伏域の境界域にあること, および (2) 残留応力や初期不整の影響が大きいこと, によるものと考えられる.

図8には, モンテカルロシミュレーションにより得られた全鋼種の平均終局強度の統計量と R の関係を道式式お

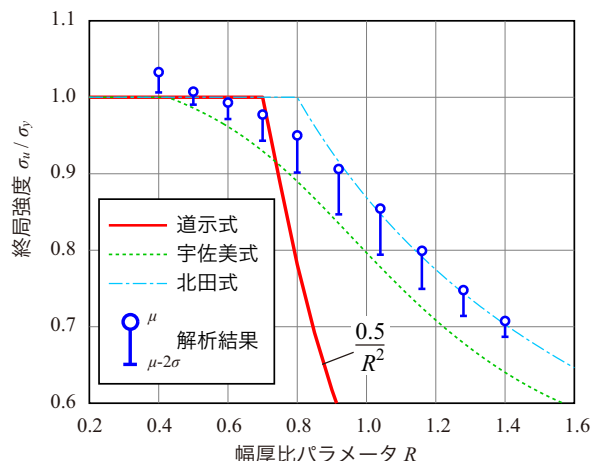


図8 耐荷力曲線の比較

よび既往の研究成果と比較して示している. 図より, 道式式と本解析結果を比較すると, 道式式は $R > 0.7$ の領域では安全側, $0.5 \leq R \leq 0.7$ の領域では若干危険側の評価を与えていることが分かる. また, 既往の研究成果と比較すると, $R \leq 0.9$ の領域では, 終局強度の下限値 ($\mu - 2\sigma$) の分布は宇佐美式にほぼ一致している. 一方, $R > 0.9$ の領域では, 終局強度の平均値 μ の分布が北田式にほぼ一致する. これより, 本解析結果は両者の中間的な分布性状を示しており, 終局強度をほぼ適切に再現しているものと考えられる.

以上より, 本解析結果を用いることによって, より合理的な耐荷力曲線を提案できるものと考えられる.

4. まとめ

- (1) 終局強度の下限値 ($\mu - 2\sigma$) は, $R \leq 0.9$ の領域においては宇佐美によって提案された評価式とほぼ一致している.
- (2) 終局強度のバラツキ (標準偏差) は, $R \simeq 1.0$ の領域において大きくなる.
- (3) $R > 0.7$ の領域では, 圧縮側の残留応力が終局強度に与える影響は非常に小さい.

参考文献:

- 1) Komatsu, S. and Kitada, T.: Statistical Study on Compression Flange Plates, *J. Struct. Eng.*, 109(2), 404-417, 1983.2.
- 2) Fukumoto, Y. and Itoh, Y.: Basic Compressive Strength of Steel Plates from Test Data, *Proc. of JSCE*, No.344/I-1 (Structural Eng./Earthquake Eng.), pp.129-139, 1984.4.