

曲げとねじりの繰り返し力を受けけるアーチ部材の局部座屈を考慮した解析法

熊本大学工学部 学生会員 ○師岡 文恵 熊本大学工学部 正会員 崎元 達郎
熊本大学大学院 学生会員 増永 寿彦 天草工業高校 正会員 鶴田 栄一

1. はじめに

アーチ橋のアーチリブに用いられる薄肉箱型断面部材が、面外方向の地震力を受ける場合は、軸圧縮力のほかに、2軸方向の曲げモーメントやねじりモーメントが繰り返し作用し、局部座屈等を生じ破壊に至ると考えられる。このような構造に対して局部座屈による影響を考慮した終局挙動解析を行う方法としては、FEM 解析があるが、照査計算ならまだしも、試行錯誤で断面寸法を決めていく設計計算においては膨大な労力と計算時間を費やすことになる。そのため FEM 解析に代わる設計ツールとして、精度をあまり損なわず、短時間で解析結果が得られるような簡易的な解析法の存在価値も認められる。そこで本研究では直応力とせん断応力度の組合せ応力下における局部座屈を考慮した応力一ひずみレベルの復元力モデルを提案する²⁾。これらをファイバー要素を用いた骨組解析法に導入することにより、3次元骨組の pushover 解析や動的解析を行う事が可能になる。

2. FEM 解析概要

まず無補剛箱形断面部材が、純圧縮および圧縮とねじりを受ける場合について汎用プログラム MARC¹⁾により解析を行った。MARC 解析上の設定として、

①材料は弾塑性かつ等方性②von Mises の降伏条件 $R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y 12(1-\nu^2)}{E}} \quad \beta = \frac{\theta/\theta_y}{\epsilon/\epsilon_y} \quad \dots (1)$
と移動硬化則③大変形・アップデイトラグランジエ

法・有限塑性ひずみ条件・ニュートンシーラプソソ法を用いた。鋼材は SM490Y を想定し、材料諸元については過去の引張試験の結果（表 1）を用いた。板厚 t は 9.0mm とし、板幅 b を変えて、式(1)で表される幅厚比パラメータ R を変化させた。構成板のアスペクト比 α (=高さ a/幅 b) は 1.0 で統一した。要素分割数は構成板パネルを 12×12 とし、板厚方向分割は 5 分割とする。本解析では圧縮とねじりに相当する荷重を変位（平均軸方向ひずみ ϵ とねじり角 θ ）の比により比例負荷させており、それぞれの載荷経路を式(2)のような無次元パラメータ β を用いて表すこととする。

3. FEM 解析と定式化

① 単調圧縮載荷における定式化

まず、純圧縮を受ける場合について平均応力一ひずみ関係を定式化する。この時の平均ひずみは、解析した部材の両端の圧縮変位差を部材長で除したものであり、局部座屈による短縮を含んだ見かけのひずみとなっている。FEM 解析結果を考察した結果、図 1 に示すように最大応力点 b、その 90% の点 a、 $5\epsilon_y$ の点 h、 $20\epsilon_y$ の点 j の各点を直線で結ぶことにより、近似的に形状を表せるものと考えた。そこでそれらの点についての FEM 解析値を最小二乗法を用いて、幅厚比パラメータ R の関数として下式(3)のように定義した。

$$\begin{aligned} \text{a 点: } (0.9\epsilon_0, 0.9\sigma_0) \quad & \sigma_0 = \sigma_u / \sigma_y = 1.0 \quad (R \leq 0.6) \\ & = 0.44R^2 - 1.48R + 1.73 \quad (R > 0.6) \\ \text{b 点: } (\epsilon_0, \sigma_0) \quad & \epsilon_0 = \epsilon_u / \epsilon_y = 2.0 \quad (R \leq 0.6) \\ & = 4.56R^3 + 16.24R^2 - 18.1R + 8.0 \quad (R > 0.6) \\ \text{h 点: } (5, \sigma_h) \quad & \sigma_h = 1.0 \quad (R \leq 0.5) \\ & = 1.0 / (0.243 + 2.82R - 0.67R^2) \quad (R > 0.5) \\ \text{i 点: } (20, \sigma_j) \quad & \sigma_j = 1.0 / (0.177 + 2.81R - 0.47R^2) \quad \dots (3) \end{aligned}$$

表 1 材料及び解析モデルの諸元

ヤング係数 E (GPa)	198
降伏応力 σ_y (Mpa)	407.4
降伏ひずみ ϵ_y	2230
ボアソン比 ν	0.3
幅厚比パラメータ R	0.45・0.7・1.0
β	0.3・0.6・1.0・2.0

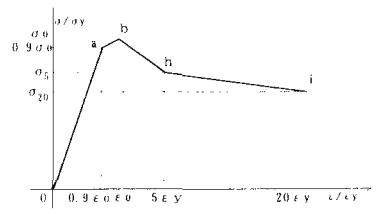


図 1 応力一ひずみ関係の近似値（単調載荷）

② 圧縮・引張繰り返し載荷における定式化

FEM 解析結果を分析した結果、図 2 に示す Ecd , σ_d , σ_f , σ_5 , σ_{10} の FEM 解析値をプロットし、最小二乗法により近似して式(4)のように定めた。履歴挙動は下記のようにルール化される。

$a \rightarrow b$: 単調載荷と同様に決定する。

$b \rightarrow c$: 最大応力 (b 点) に達すると、式(4)に示す σ_5 , σ_{10} 式によって求められる線図に従い、除荷された時のひずみ ε_c に対応する応力まで減少する。

$c \rightarrow d$: 勾配 Ecd に従い、 σ_d まで引張応力は増加する。

$d \rightarrow e'$: d 点に達した後はひずみ $-e_c$ の点で σ_y に達する。

$e' \rightarrow e$: 再除荷されるひずみ ε_e まで σ_y を保つ。

$e \rightarrow f$: その後一律 $Eef (= \sigma_y / \varepsilon_y)$ の勾配に従い応力 σ_f まで変化する。

$f \rightarrow g$: 繰り返しにおいて順次更新されていく圧縮応力の最大点 (g 点) は c 点と同様に求められる線図に従い、順次更新される。

③ ねじりによるせん断応力 τ の影響の考慮

本来 $\tau - \gamma$ の履歴挙動の定式化が必要であるが、ここではせん断応力度の影響は強度に対してのみ考慮し、 $\tau - \gamma$ 関係は弾性挙動とし、 $\sigma - \varepsilon$ 関係だけで履歴挙動を近似できるものと考えて定式化する。そこでまず圧縮とねじりの組み合わせ力を作用させた部材の FEM 解析結果より図 3 のように局部座屈を考慮した強度相関曲線式 (5) を求めた。

$$\begin{aligned} \tau_o &= \tau_u / \tau_y = 1.0 \quad (R_t \leq 0.52) \\ &= 0.89 R_t^2 + 0.79 R_t + 0.83 \quad (0.52 < R_t \leq 0.87) \\ \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_o} \right)^2 &= 1.0 \quad = 0.40 R_t^2 - 1.32 R_t + 1.68 \quad (R_t > 0.87) \end{aligned} \quad \dots (5) \quad R_t \text{ はせん断に対するパラメータ}$$

次に図 3 に示すように、ねじりによるあるせん断応力度 τ_o が作用している時の強度低下率を示す σ_o / σ_o を求め、図 4 の第 1 象限に示すようにこの値を純圧縮の場合に定式化した平均応力-ひずみ関係の降伏以後の部分に乗じて応力値を低減し、圧縮側の応力-ひずみ関係を得る。引張側では図 3 に示すように von Mises の降伏条件による降伏強度の低下率 σ' を求め、図 4 の第 3 象限に示すように応力-ひずみ関係の降伏以後の部分に乗じる。以上のような応力-ひずみ関係を導入する事により局部座屈とねじりの影響を考慮した定式化が可能となる。R=0.7, β=0.6 の場合を例にとり、図 5 に単調載荷の場合、図 6 に繰り返し載荷の場合の平均直応力-平均軸ひずみ関係を FEM 解析と比較して示す。

単調及び繰り返し載荷に対する提案式は、FEM 解析結果を精度良く評価している。したがって、ここで定式化した関係をファイバ要素を用いた骨組解析に導入することにより pushover 解析や動的解析を行う事が可能になる。アーチ部材の解析例については講演当日発表する。

【参考文献】1) MARC Users Manual Vol.A-E 日本マーク

2) 崎元 達郎他：局部座屈を考慮した鋼箱…… 土木学会論文集 No.647/I-51, pp.343-355, 2000.4

$$\begin{aligned} Ecd &= 0.2 Eo \quad (0 < \sigma_c / \sigma_y \leq 0.36) \\ &= (1.3 \sigma_c / \sigma_y - 0.26) Eo \quad (\sigma_c / \sigma_y > 0.36) \\ \sigma_d / \sigma_y &= -1.45 \sigma_c / \sigma_y + 0.46 \\ \sigma_f / \sigma_y &= 0.585 \sigma_c / \sigma_y + 0.361 \\ \sigma_5 / \sigma_y &= 1.0 \quad (0 < R \leq 0.41) \\ &= 2.01 R^2 - 3.85 R + 2.244 \quad (0.41 < R \leq 0.955) \\ &= 0.40 \quad (R > 0.955) \\ \sigma_{10} / \sigma_y &= 0.438 R^2 - 1.02 R + 0.883 \quad \dots (4) \end{aligned}$$

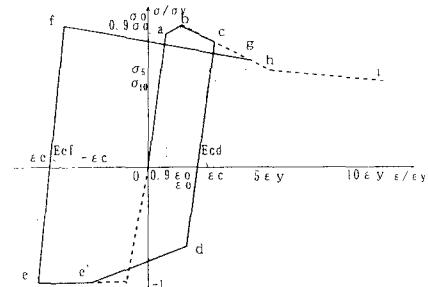


図 2 応力-ひずみ関係の近似値（繰り返し載荷）

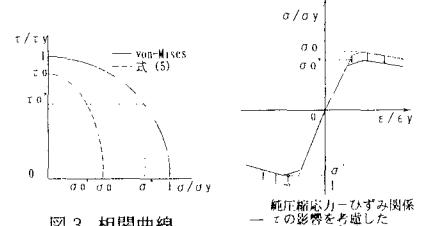


図 3 相関曲線

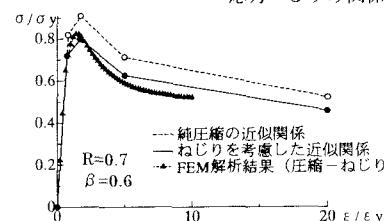


図 4 τ を考慮した応力-ひずみ関係

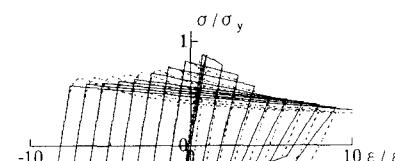


図 5 単調載荷平均応力-ひずみ曲線

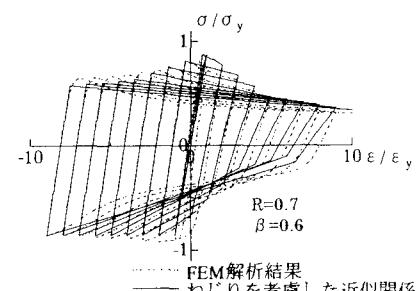


図 6 繰り返し載荷平均応力-ひずみ曲線