

ねじりと局部座屈を考慮した補剛箱形断面鋼部材の終局挙動と復元力モデル

駒井鉄工 正会員 増永寿彦 熊本大学 正会員 崎元達郎[†]
天草工業高校 正会員 鶴田栄一 熊本大学 正会員 渡辺浩

1.はじめに

アーチ橋のアーチリブや逆 L 形の橋脚などには、薄肉補剛箱形断面部材がよく用いられているが、これらの面外方向に地震力が作用する場合、大きな軸圧縮力の他に、曲げモーメントやねじりモーメントが組み合わさって作用することになる。このような構造物の耐震設計においては、ねじりと局部座屈を考慮した動的解析が必要となる。そのような動的解析は、汎用プログラムを用いれば、単柱橋脚程度の簡単な構造物についてであれば不可能ではないが、アーチ橋のような橋梁システム全体構造の断面寸法を試行錯誤して求める設計ツールとして FEM を用いることは現実的でない。そこで、本研究ではまず、汎用 FEM プログラム MARC¹⁾を用いて、種々のパラメータを変化させた部材の終局挙動を解析し、圧縮とねじりを同時に受ける補剛箱形断面部材のねじりと局部座屈を考慮した等価な応力-ひずみ関係と、応力-ひずみ型復元力モデルを提案する。これらをファイバー梁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ことが可能となる。

2.FEM 解析概要

純圧縮、純ねじり、及び圧縮とねじりを受ける補剛箱形断面部材の解析には、汎用プログラム MARC を使用した。MARC 解析上の設定として、①材料は弾塑性かつ等方性②von Mises の降伏条件と移動硬化則③有限変位・アップデートラグランジェ・有限塑性ひずみ解析・ニュートンラプソン法を用いた。本研究において解析するモデルの断面は、全て正方形とし、一辺につき 2 本の補剛材を有するモデルを想定した。要素分割は、構成板パネルを 8 分割とし、軸方向に 24 分割とした。また、補剛材は高さ方向に 4 分割とし、板厚方向分割は全構成板で 5 分割とする。幅厚比パラメータ R_R (式(1))は、0.4~1.2 の範囲で変化させ、補剛材剛比 γ/γ^* は 0.6・1.0・3.0 の 3 通りをそれぞれ組み合わせて解析を行った。鋼材は SM490 を想定し、材料緒元については過去の引張試験の結果を用いた。補剛板の板厚を 2.8cm と固定し、各パラメータ値が得られるようにその他の諸元を決定した。なお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 ・ねじり角 θ)の比により比例負荷させており、それぞれの変位に対する増分比を式(2)のような無次元化パラメータ β を用いて表すことにする。解析モデルの諸元の内主要なものを表 1 に示す。

3.FEM 解析結果と復元力モデルの提案

① 局部座屈を考慮した鋼の等価な応力-ひずみ関係の提案

純圧縮を受ける場合について等価な応力-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際、図 1 に示すように最大応力点 B、その 70%の点 A、 $5\varepsilon_y$ の点 C、 $10\varepsilon_y$ の点 D 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。そこでそれぞれの点についての FEM 解析値を最小二乗法を用いて、 R_R 又は λ^* の関数として定式化を行った。

表 1 解析モデルの諸元

鋼種	SM490
板厚 $t(\text{cm})$	2.8
アスペクト比 $\alpha(=a/b)$	1.0
補剛材間の幅厚比パラメータ R_R	0.4~1.2
補剛材の幅厚比パラメータ R_S	0.48
補剛材剛比 γ/γ^*	0.6・1.0・3.0
β	0.0・0.3・0.6・1.0・2.0・ ∞

$$R_R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1) \quad \beta = \frac{\vartheta/\vartheta_y}{\varepsilon/\varepsilon_y} \quad (2)$$

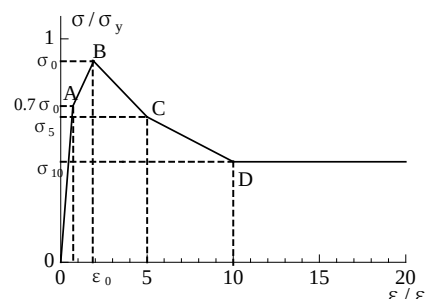


図 1 等価な応力-ひずみ関係の定義

*Key Words : hysteresis model, local buckling, torsion, ultimate behavior

[†]〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1 TEL 096-342-3532

② 復元力モデルの提案

復元力特性は、圧縮・引張り繰返し载荷の FEM 解析結果から得られた包絡線に対して定式化し、これを基に復元力モデルを構成する。包絡線を定式化の際、 $4\varepsilon_y$ 時の応力点と $10\varepsilon_y$ 時の応力点を単調载荷同様に最小二乗法で整理した。また、履歴特性はルールの定義に必要な $E_{c'd}$, σ_d , σ_f は、 $\sigma_{c'}$ の関数として FEM 解析値の回帰式として定義する。これらを用いて、以下に示すようなルールに従って、履歴ループを描くものとした。1) 圧縮側では、 ε_A まで引張り側では降伏ひずみ ε_y までは弾性勾配 E_0 で移動し、A 点以降ひずみが増大した場合 B 点を目指し移動する。2) B 点以降ひずみが増大した場合、定式化された包絡線上で C 点を目指し移動する。4) B 点以降徐荷された場合 (c' 点)、徐荷勾配 $E_{c'd}$ の直線上を σ_d まで圧縮応力は減少する。3) d 点を越えた後は、最初に徐荷された c' 点のひずみ ($\varepsilon_{c'}$) の反対側の e 点 ($-\varepsilon_{c'}$, $-\sigma_y$) を目指し直線上を移動する。4) de 間で再徐荷された場合、弾性勾配 E_0 に従い直線 fc' と交わる点まで圧縮応力は増加する。5) e 点で再徐荷された場合、弾性勾配 E_0 に従い f 点を目指し圧縮応力は増加する。6) f 点を越えた後は、最初に徐荷された c' 点を目指す。c' 点に到達すると、徐荷されるまで定式化された包絡線上を移動する。

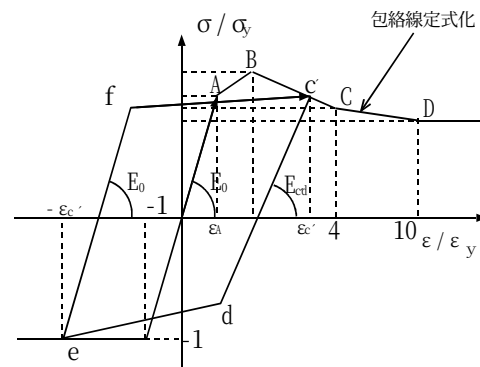


図2 復元力モデル

③ ねじりによるせん断応力 τ の直応力 σ への影響の考慮

本来 τ - γ 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、 τ - γ 関係は弾性挙動とし、 σ - ε 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。すなわち、あるせん断力 τ が作用している時の最大強度 σ_0' を、局部座屈を考慮した最大強度相関曲線(式(3))から求め、次に純圧縮を受ける場合の最大強度 σ_0 ($=\sigma_u/\sigma_y$) 以降の応力値に、比率 σ_0'/σ_0 を乗じて、図に示すように応力値を低減させた。引張を受ける場合は、von Mises の降伏条件式 ($\sigma^2 + 3\tau^2 = \sigma_y^2$) より求められる σ_2' を、圧縮側と同様に、比率 $-\sigma_2'$ を乗じて応力値を低減させた。また、復元力モデルにおいても、単調载荷と同様に、包絡線を比

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_0\tau_y}\right)^2 = 1.0 \quad (3)$$

率に乗じて応力値を低減させた。

4. FEM 解析結果と提案式との比較

ここで提案する提案式と FEM 解析値との比較の一例を図5に示す。単調载荷 (上から $\beta=0.0 \cdot 0.3 \cdot 0.6 \cdot 1.0 \cdot 2.0$)・繰返し载荷の場合、 $\beta=0.6$ までは最大強度以降も τ の影響だけ減少させたもので近似できるが、 $\beta=1.0 \cdot 2.0$ となると、最大強度以降の強度劣化が大きくなり、近似度は悪くなる。しかし、実構造物に発生する β は、0.3 程度であるので、本研究の提案式の適用範囲を β が 0.6 以下とすると、全体的に安全側に良い近似を与えると結論できる。また、地震波のように、ランダムにひずみが増加減少を繰返した際にも、今回の提案式が精度よく表現できていることが確認できる。本研究で得られた、ねじりと局部座屈を考慮した復元力モデルをファイバー梁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ことが可能となる。

参考文献 1) MARC User's Manual Vol. A-E, 日本マーク, 1997.

2) 中井博ら：曲げとねじりを受ける箱桁の終局挙動に関する解析的研究
構造工学論文集, Vol.42A, pp71-pp82, 1996.3.

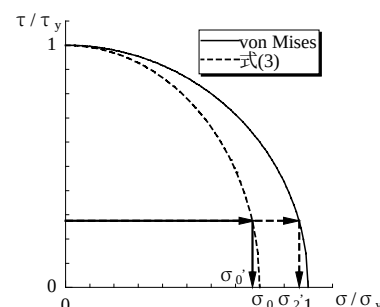


図3 最大強度相関曲線

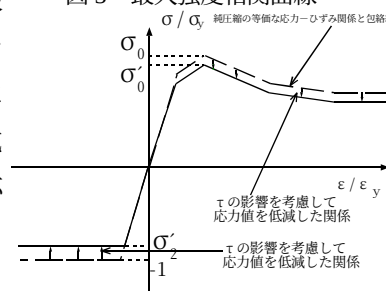
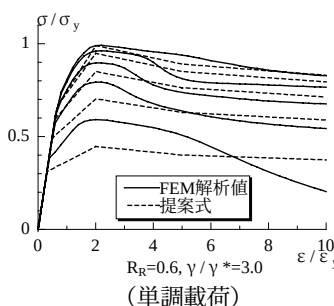
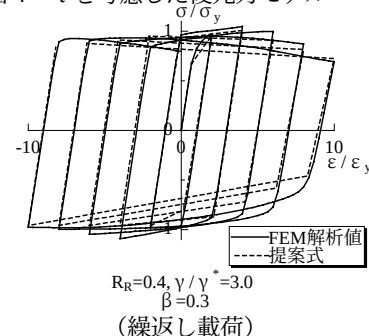


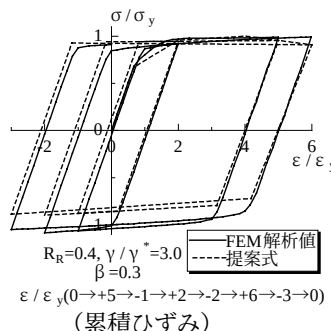
図4 τ を考慮した復元力モデル



(単調载荷)



(繰返し载荷)



(累積ひずみ)

図5 FEM 解析値と提案式との比較