

鋼橋に用いる無補剛箱形断面部材の連成座屈強度評価法の提案

横河ブリッジホールディングス 正会員 ○池末 和隆 長崎大学大学院 正会員 中村 聖三  
 首都大学東京大学院 正会員 岸 祐介 首都大学東京大学院 フェロー会員 野上 邦栄  
 大日本コンサルタント 正会員 平山 博 国土技術政策総合研究所 正会員 白戸 真大  
 横河ブリッジ (研究当時 国土技術政策総合研究所) 正会員 水口 知樹

1. はじめに

鋼橋の圧縮部材の座屈挙動において、部材全体の座屈と局所的な座屈の連成挙動については各国で基準が設けられている。我が国では、道路橋示方書(以後、道示と呼称)<sup>1)</sup>の中で柱の耐荷力と板の耐荷力の積によって連成座屈強度を評価するものとしている(積公式)。しかし、連成座屈挙動は現象として複雑であり、現行基準との整合性については検討の余地がある。そこで本研究では、溶接箱形断面部材を対象に連成座屈現象を数値的に解き、現行基準との比較・検討を行い、その結果を踏まえ、新たな連成座屈強度評価式に関する提案を行う<sup>2)</sup>。

2. 数値解析概要

MSC.Marc により、シェル要素を用いた弾塑性有限変位解析を実施した。対象断面は、平成14年道示によって設計された鋼トラス橋部材の実績データを参考に決定した500×500mm(正方形)、1,000×500mm(長方形)の無補剛箱形断面(図-1参照)である。また、現行の基準との比較のため、座屈耐荷力の支配的な要因である細長比パラメータおよび幅厚比パラメータを変化させて検討を行うこととした。

材料構成則は、実績調査結果より代表的な鋼種としてSM490Y材を想定し、移動硬化型のバイリニアモデルとした(図-2参照)。また初期不整として初期たわみと残留応力を考慮した。初期たわみについては、道路橋示方書に基づき、柱に対して最大値を柱長Lの1/1,000、板パネルに対して最大値を板幅bの1/150とする正弦波とした。残留応力については、溶接部が降伏応力 $\sigma_y$ となる理想的三角形分布を定義し、圧縮側は $\sigma_{rc} = 0.25\sigma_y$ と仮定した。図-3に数値モデルで定義した残留応力分布形状を示す。

境界条件は、柱の両端を回転支持とし、載荷点側では柱軸方向への並進移動するものとした。回転は、柱全体の初期たわみに対して変形が拘束されない方向を許容するものとした。また、載荷は柱軸方向への単調載荷とした。検討ケースの決定に際しては、対象が無補剛断面であることを考慮し、各座屈パラメータについて無補剛として使用される部材寸法制限の範囲で検討を行うこととした。その結果、表-1に示す値でパラメトリックスタディを実施した。

3. 数値解析結果

数値解析によって得た荷重一軸方向変位関係から各ケースの耐荷力を求め、オイラー曲線および道示の柱の耐荷力

表-1 数値計算で変化させたパラメータの値

$\lambda$	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.4, 1.8
R	0.5, 0.7, 0.9, 1.1, 1.3, 1.5

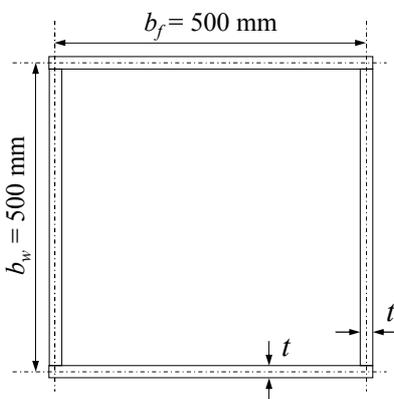


図-1 対象断面形状(500×500mm)

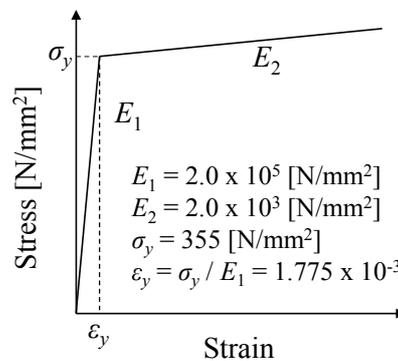


図-2 材料構成則(SM490Y)

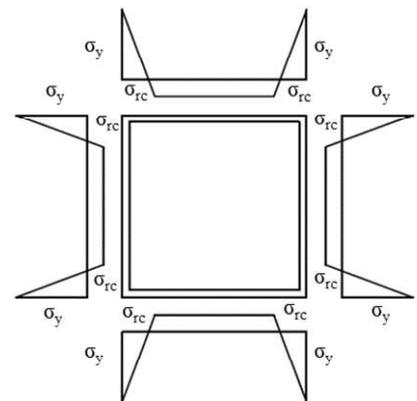


図-3 残留応力分布

キーワード 溶接箱形断面, 無補剛, 連成座屈, 座屈パラメータ, 初期不整

連絡先 〒261-0002 千葉県千葉市美浜区新港 88 (株)横河ブリッジホールディングス TEL 043-247-8411

基準と合わせてプロットしたものを図-4 に示す。縦軸は降伏応力に対する耐荷力の無次元量( $\sigma_{cr}/\sigma_y$ )、横軸は換算細長比 $\lambda$ である。換算幅厚比  $R$  の値が小さいほど耐荷力が大きく、最も幅厚比の小さい  $R=0.5$  では道示の曲線と近似していることがわかる。これに対し、 $R$  の値が大きいモデルでは、 $\lambda$  の値が 0.6 以下の範囲で道示との差が大きくなる。

図-5 は各モデルの連成座屈強度を、道示の柱の基準耐荷力 ( $\sigma_u$ ) で正規化し、横軸に  $R$  を取って整理したものである。有効座屈長の違いによって割合が異なるものの、いずれのモデルにおいても  $R$  が大きくなるに伴い、柱の耐荷力基準に対する連成座屈強度の割合が小さくなった。

4. 連成座屈強度評価式の提案

一方、図-5 のプロットの傾向は  $R=0.5$  のとき、 $\sigma_{cr}/\sigma_u=1.0$  となる 1 次関数のように変化している。この傾向を用いて、道示の柱の基準耐荷力に補正関数を乗じた形で連成座屈強度を推定する式を提案する。

まず解析結果について、 $\lambda$  道示の柱の基準耐荷力に対する耐荷力の無次元量( $\sigma_{cr}/\sigma_u$ )を  $R$  の 1 次関数として  $\sigma_{cr}/\sigma_u = \alpha R + \beta$  の形で整理し、各  $\lambda$  の近似曲線の傾き  $\alpha$  を求めた。その傾き  $\alpha$  を  $\lambda$  ごとに整理したものが図-6 である。この  $\alpha$  を  $\lambda$  値によって変化する関数として捉え、最小二乗法によって回帰式を求めた。その結果得られたのが、式(1)である。

$$\sigma_{cr}/\sigma_u = 1 - (0.0502\lambda^2 - 0.2485\lambda + 0.6077)(R - 0.5) \quad (1)$$

ここで、左辺の連成座屈強度は道示の柱の基準耐荷力 で正規化されている。つまり、右辺第 1 項は道示の柱の基準耐荷力を意味しており、右辺第 2 項に示す  $\lambda$  と  $R$  の関数によって座屈強度の低減を表している。

図-7 に提案式を用いて行った連成座屈強度評価の一例を示す。解析結果より局部座屈の影響の小さい  $R=0.5$  と、局部座屈の発生による低減の割合が大きい  $R=1.1, 1.5$  について、提案式と道示の積公式による評価を比較した結果である。積公式は図中に示す破線となり、解析結果に対してかなり安全側に評価される。これに対し、提案式は解析結果とほぼ一致する評価となった。ただし、 $\lambda$  が 0.6 以下の短柱領域では提案式の精度がやや低下しており、適用範囲を限定するなど、何らかの改善が必要であると考えられる。

5. まとめ

本検討では、無補剛箱形断面材に関する連成座屈強度解析を行った。その結果、道路橋示方書の基準では連成座屈強度を適切に評価できていないことが明らかとなった。この結果を踏まえ、細長比および幅厚比に関する 2 つの座屈パラメータを用いて、既往の基準に補正関数を乗じた新たな連成座屈強度評価式の提案を行った。

参考文献：1) 日本道路協会：道路橋示方書、2) 土木学会：局部座屈と全体座屈の連成座屈に関する検討、鋼構造委員会鋼橋の合理的な構造設計法に関する調査研究小委員会報告書、2015。

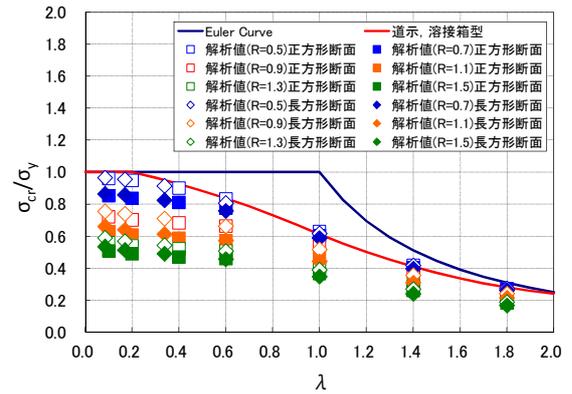


図-4 連成座屈強度曲線 (換算細長比)

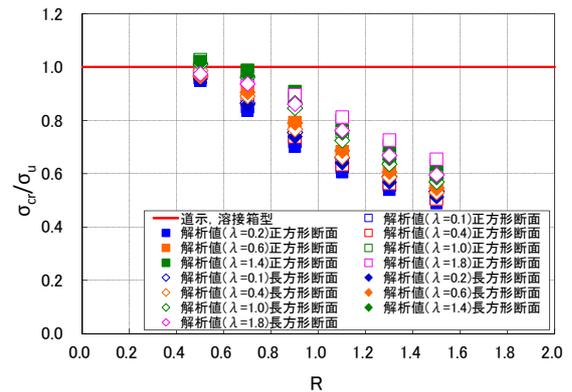


図-5 局部座屈による柱強度に対する低減状況

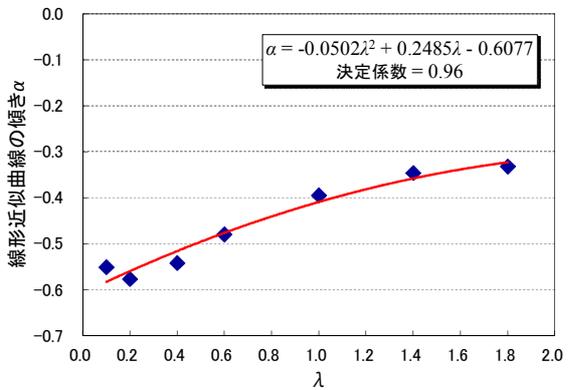


図-6 近似曲線の傾き  $\alpha$  と  $\lambda$  の相関関係

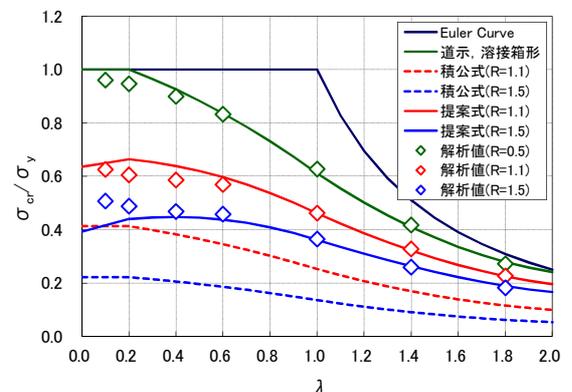


図-7 連成座屈強度の評価