

鋼構造の耐震設計におけるひずみ照査法と断面力照査法に関する一考察

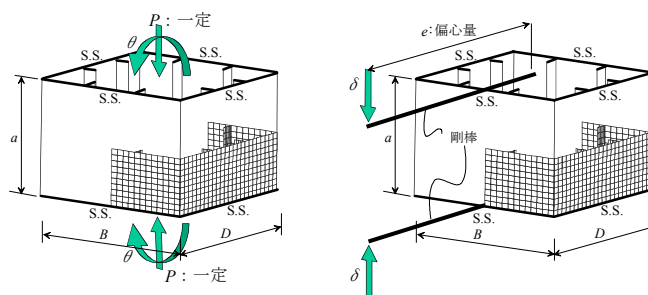
○岐阜高専 正会員 奥村徹, 名古屋工業大学 フェロー会員 後藤芳顕

1. はじめに

現行のレベル2地震動に対する鋼製橋脚の耐震安全性の照査法では、道示V耐震設計編¹⁾に規定されるように橋脚の終局限界として正負交番試験での水平荷重-変位曲線の包絡線のピーク点を対象とし、それに対応した変位やPushover解析により等価な曲率あるいはひずみを求め、これらを限界値として照査がなされる。また、鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン²⁾でも荷重-変位関係の包絡線のピーク点から95%低下点を終局限界状態とし、対応する変位や部材セグメントの平均ひずみに限界値を設定している。このように現行の設計では何らかの変形量を指標として限界状態の照査を行っている。このような変形量を用いて終局限界を評価する場合、終局限界に至までの荷重履歴による変動が大きくなり安全側の値を設定せざるを得ない。一方、道示のように交番試験による包絡線のピーク点を終局限界とする場合、終局限界に至までの荷重履歴の差による最大荷重の変動は非常に少なく、限界値としては変形量よりむしろ最大荷重を用いた方がより精度のよい合理的な照査が可能になる。また、現行の変形量による照査法では構造安定に対する照査が必ずしも明確に行われていないという問題点もある。道示II鋼橋編³⁾によるレベル1地震動に対する安全性の照査では、周知のとおり、規定される許容応力に対し、「断面照査」と「部材照査」の2つの照査を行なう方法がとられ、構造安定性の照査が明確化されている。これらの現状と先に述べた変形量を用いた限界値の精度の問題を考慮すると、レベル2地震動に対する耐震安全性の照査においても「断面照査」と「構造安定」の両者を断面力などの力学量を用いて行った方がより合理的でわかりやすいと考えられる。このようなレベル2地震動に対する耐震安全性照査法の体系化を視野に入れ、本稿では「断面照査」における断面力の限界値について検討を行った結果を報告する。なおここでは終局限界状態としては道示と同様の考え方に従う。

2. 数値解析モデル

部材断面の限界値を検討するための補剛箱型断面の数値解析モデルの概要を図-1に示す。断面形状は正方形 ($B=D$) とし、無次元化パラメータとして、アスペクト比 $a/B=0.7$ 、サブパネル数 $n=3$ 、縦リブの幅厚比パラメータ $R_s=0.7$ をそれぞれ固定値とし、サブパネルの幅厚比パラメータ R_R を 0.3, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70, γ/γ^* を 1.0, 3.0 と変化したモデルを設定する。鋼種はSS400 ($\sigma_y=235\text{MPa}$) とする。初期不整として与える初期たわみと残留応力の分布は文献 2) で示される補剛箱型断面セグメントの終局圧縮ひずみの算定において考慮したものと同一モデル⁴⁾⁵⁾ とする。断面に作用する荷重のモデルとしては、図-1 a) に示すように、軸圧縮力一定下で断面上下部の回転角を制御するケース (N



a) 軸力一定 b) 軸力-曲げモーメント比例載荷
図-1 部材断面セグメントモデル (補剛箱型断面)

一定載荷) と、同図 b) に示すように、断面上下部から剛棒により偏心量を与え、剛棒の端部を鉛直方向に変位制御することにより、断面に作用する軸力と曲げモーメントが比例関係になるように考慮したケース (NM比例載荷) を設定する。いずれのモデルも断面の上下部ははり理論における断面不変の仮定を満足するように拘束を与える。材料構成則には鋼材の履歴挙動を精度よく表す三曲面モデルを用いる。

3. 終局点の定義

軸力変動がある場合など複雑な荷重履歴に対応可能な一般性のある終局限界状態として、非弾性体の安定基準により仕事の2次増分が $\Delta^2 W > 0$ (安定) から $\Delta^2 W < 0$ (不安定) に移行する過程での $\Delta^2 W = 0$ となる点として定義する。この定義は、従来の正負交番試験では極限点に相当するもので道示の終局限界と整合している。仕事の2次増分は本解析においては $\Delta^2 W = (\Delta P \cdot \Delta u + \Delta M \cdot \Delta \theta) / 2$ で算定される。ここに、 ΔP 、 Δu は断面に作用する軸方向の力の増分と変位増分、 ΔM 、 $\Delta \theta$ は断面に作用する曲げモーメント増分と断面回転角増分である。

4. 軸力一定での繰り返し解析における各限界値の比較

局部座屈挙動を考慮することができるシェル要素を用いた解析によれば、3. で定義した安定基準により終局状態を特定することが可能であるが、一般的に実務でははり理論をベースにした耐震解析を行っていることから、断面力やひずみなどの限界値を定め、照査する方法が適当であると考えられる。ここでは限界値として、断面力、従来の平均圧縮ひずみおよび曲げひずみに着目し、軸力一定下 ($P/P_y=0.1, 0.3$) の繰り返し解析により塑性履歴がこれらの物理量に与える影響について考察する。なお、曲げひずみについては曲率に相当するものである。限界値として断面力については軸力が一定であるので不安定化前の最大曲げモーメント、平均圧縮ひずみと曲げひずみについては、a) 不安定化前の最大値および b) 不安定前の最大曲げモーメント発生時の値についてまとめる。図-2~4にこれらの物理量の単調載荷によって求めた限界値と繰り返し載荷(両振りおよび片振り)によって求めた限界値の相関関係を示す。これらより、曲げモーメント(断面力)が最も塑性履歴の影響を受けにくいことがわかる。

キーワード：耐震安全性、断面照査、断面力、限界値、三曲面モデル

連絡先：〒501-0495 岐阜県本巣市 岐阜工業高等専門学校 Tel 058-320-1402

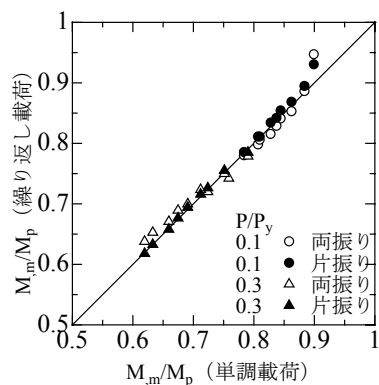
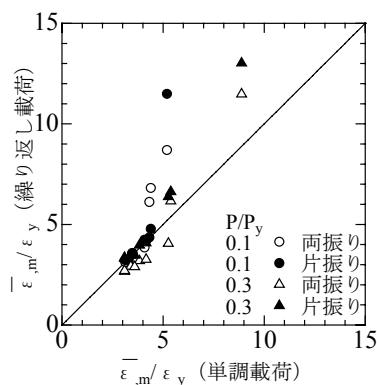
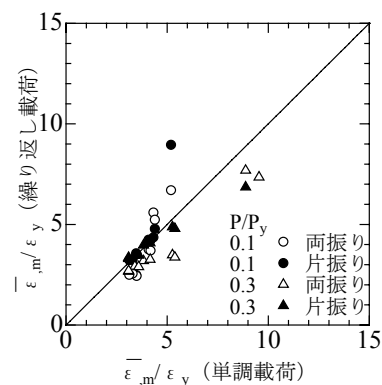


図-2 不安定化前の最大曲げモーメント

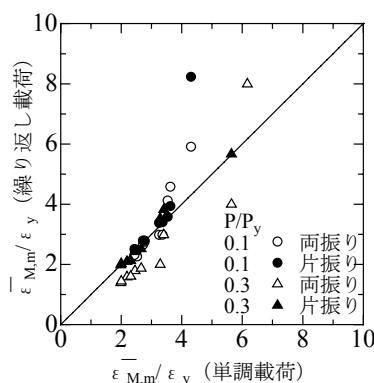


a) 不安定化前の最大値

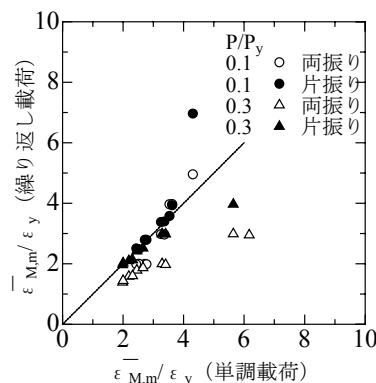


b) 不安定化前の最大曲げモーメント発生時

図-3 不安定化前の平均圧縮ひずみ



a) 不安定化前の最大値



b) 不安定化前の最大曲げモーメント発生時

図-4 不安定化前の曲げひずみ

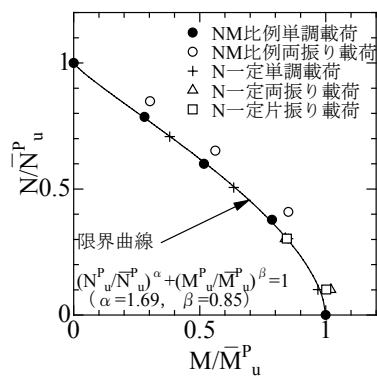
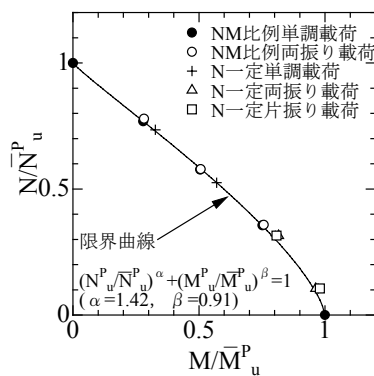
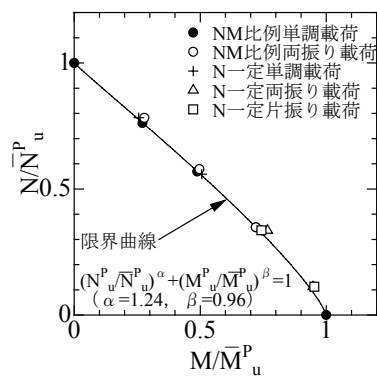
a) $R_R=0.3$, $\gamma/\gamma^*=1.0$ b) $R_R=0.4$, $\gamma/\gamma^*=1.0$ c) $R_R=0.5$, $\gamma/\gamma^*=1.0$

図-5 単調載荷解析による断面力の限界曲線と繰り返し載荷時の限界値の比較

5. 軸力変動を考慮した断面力の限界曲線の適用性

軸力と曲げモーメントの相関を考慮した断面力の限界値として図-1 b)のNM比例載荷モデルを用い、単調載荷解析により限界曲線を設定する。この限界曲線とNM比例および軸力一定下での繰り返し載荷解析における限界値との比較を図-5に示す。各解析における限界値は不安定化前の $\sqrt{N^2 + M^2} / \sqrt{(N_u^P)^2 + (M_u^P)^2}$ の最大値である。これらよりNM比例単調載荷解析によって求めた限界曲線と各載荷パターンにおける限界値はよく一致しており、複雑な履歴にも対応しうるものと考えられる。変形能の大きな $R_R=0.3$ の断面ではひずみ硬化の影響により単調載荷による限界曲線と較べてやや外側に限界値がプロットされているが、単調載荷により求めた限界曲線は安全側の評価を与えており問題はないであろう。

6. まとめ

包絡線のピーク荷重点を終局限界とする耐震安全性の照査法について、現行のひずみや曲率を基にした耐震安全性照査法の問題点を明らかにした上で、断面力を用いた照査法の可能性を検討した。その結果、断面力を用いて表した限界状曲線への塑性履歴の影響は十分小さく、断面力照査法が有効であることが明らかになった。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V 耐震設計編，2002。
- 2) 宇佐美勉，日本鋼構造協会：鋼橋の耐震・制震設計ガイドライン，技報堂出版，2006。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説I 共通編・II 鋼橋編，2002。
- 4) 葛漢彬，河野豪，宇佐美勉：圧縮と曲げを受ける鋼管円セグメントの終局ひずみと鋼アーチ橋の動的耐震照査への応用，構造工学論文集 Vol.50A，2004。
- 5) 土木学会：座屈設計ガイドライン，2005。