

Pushover 解析による薄肉土木鋼構造物の 耐震性能の統一的評価法

葛 漢彬¹・鄭 沂²・宇佐美 勉³

¹正会員 博士(工) 名古屋大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 工修 名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³フェロー D.Sc. 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

本研究では、単柱式鋼製橋脚のみならず種々の構造形態を有する薄肉土木鋼構造物の保有耐力と塑性率の統一的評価法を提案している。手法は、過去に著者らによって提案されているコンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法を準用したものであるが、異なる点は破壊ひずみの定義式のみである。ここでは、圧縮と曲げを受ける条件で、構造物から取り出した短柱を取り上げて弾塑性有限変位解析を行い、短柱の変形能(即ち、破壊ひずみ)を求めている。鋼構造物の保有性能(耐力と塑性率)は、Pushover 解析より求めるが、終局点を定めるために短柱解析から求められた破壊ひずみを用いる。単柱式橋脚とラーメン橋脚の実験結果と提案推定法の比較により、本手法の妥当性が検証されている。

Key Words: ductility, failure strain, pushover analysis, seismic design method, steel structures, strength, thin-walled sections

1. まえがき

コンクリート部分充填鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法が著者らによって既に提案されている^{1), 2)}。本研究では、この方法を準用し、コンクリートを充填しない鋼製橋脚などの鋼構造物の耐震性能評価法について述べる。過去の研究では、圧縮フランジを構成する板パネルを取り上げ、板の幅方向に一様面内変位を受ける条件で弾塑性有限変位解析より得られた板要素の面内圧縮変形能力を破壊ひずみで定義している。これをそのまま鋼製橋脚に適用してもよいが、ウェブの圧縮フランジに対する拘束効果や長さ方向の圧縮力の勾配を無視したため、厚肉断面の場合においてかなり安全側の結果を与えることがある。そこで、本研究では、圧縮と曲げを受ける条件で、短柱全体を取り上げて弾塑性有限変位解析を行い、短柱の変形能(即ち、破壊ひずみ)を求めることとする。一方、パイプ断面の破壊ひずみは、箱形断面と同様に断面全体を取り上げた弾塑性有限変位より求める。次に、文献1)と同様に、Pushover 解析より鋼製橋脚の保有性能を算定する。ただし、終局点を定めるには破壊ひずみを用いる。また、実験結果との比較により、本手法の妥当性を検証する。なお、断面は箱形断面とパイプ断面である。

2. 破壊ひずみ

破壊ひずみは、Pushover 解析における終局判定条件として用いられる。弾塑性有限変位解析により求められるが、ここではその結果のみを述べることとし、詳細は文献3)と4)を参照されたい。

図-1に示すように、一定圧縮力 P の元で漸増曲げモーメント M を受ける無補剛箱形断面(図-1(a))、補剛箱形断面(図-1(b))およびパイプ断面(図-1(c))の弾塑性有限変位解析から得られた $M-P-\phi$ (平均曲率)の関係から、ピークから95%だけ強度が低下した点に対応する平均曲率を求め、さらに軸圧縮力による軸ひずみと曲げモーメントによる中立軸の移動によって生じた軸ひずみを考慮して求められた圧縮側最外縁のひずみを破壊ひずみとする。解析に際しては、断面の両端に剛なダイヤフラムがあるものと仮定する。また、無補剛断面と補剛断面のいずれも正方形とし、縦横比 α は0.7とした。検討結果については割愛するが、解析結果は長方形断面($D_w/B=3/4\sim4/3$ (D_w = ウェブ幅))および $\alpha=0.5\sim1.5$ (無補剛断面のときは $\alpha\geq 0.5$) のものにも適用できる⁴⁾。パイプ断面短柱は、ほぼ短柱の最小強度となるような長さで解析を行った。断面の変形能を支配する最も重要なパラメータは箱形断面の場合フランジプレート幅厚比、パイプ断面の場合径厚比であり、それぞれ次式で定義さ

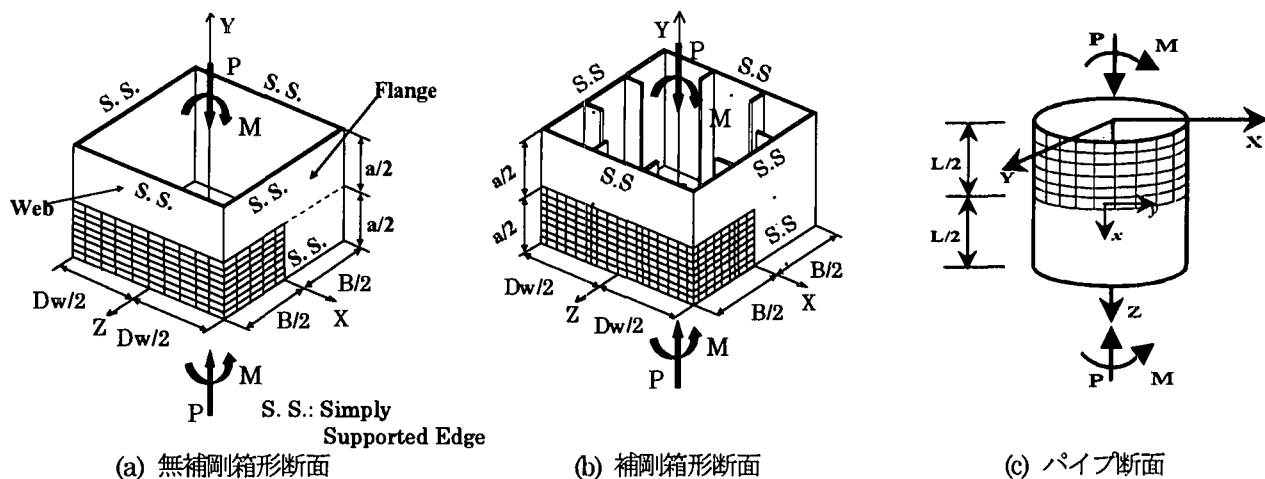


図-1 一定軸力と漸増モーメントを受ける短柱

れる。

$$R_f = \frac{B}{t} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4n^2\pi^2}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

$$R_f = \sqrt{3(1-\nu^2)} \frac{\sigma_y}{E} \frac{D}{2t} \quad (2)$$

ここで、 B =箱形断面のフランジ板幅、 D =パイプ断面の直径、 t =板厚、 n =サブパネル数（無補剛板の場合 $n=1$ ）、 σ_y =降伏応力、 E =弾性係数、 ν =ポアソン比である。

(1) 無補剛箱形断面

解析⁴⁾より、次のような経験式が得られている。

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = \frac{0.108(1-P/P_y)^{1.09}}{(R_f-0.2)^{3.26}} + 3.58(1-P/P_y)^{0.839} \leq 20.0 \quad (3)$$

上式中、 ε_y =降伏ひずみ、 P/P_y =軸力比（ P_y =全断面降伏軸力）である。なお、式(3)の適用範囲は、 $R_f=0.2\sim 0.8$ である。式(3)は、図-2にプロットしてあるが、破壊ひずみは R_f が小さくなると大きくなり、特に R_f 小さい領域で敏感である。一方、破壊ひずみは、軸力比が大きくなると小さくなり、即ち純圧縮に近づくにつれ小さくなる。比較のため、純圧縮を受ける無補剛の破壊ひずみに対する過去の提案式も示されている。

(2) 補剛箱形断面

補剛箱形断面の場合、 R_f と P/P_y 以外に補剛材の剛比（ γ/γ^* 、 γ^* は線形座屈理論から求められる補剛材の最適剛比）がもう1つのパラメータである。ここで、 $\gamma/\gamma^*=1.0, 3.0$ について解析した結果、破壊ひずみの式は、式(4)のように表される⁴⁾。

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = \frac{0.8(1-P/P_y)^{0.94}}{(R_f \cdot \lambda_s^{0.18} - 0.168)^{1.25}} + 2.78(1-P/P_y)^{0.68} \leq 20.0 \quad (4)$$

この式では、 R_f のほか補剛材細長比パラメータ λ_s が導入されている。 λ_s の定義については文献1)を参考されたいが、このパラメータは、 R_f 、 γ および α の関数である。

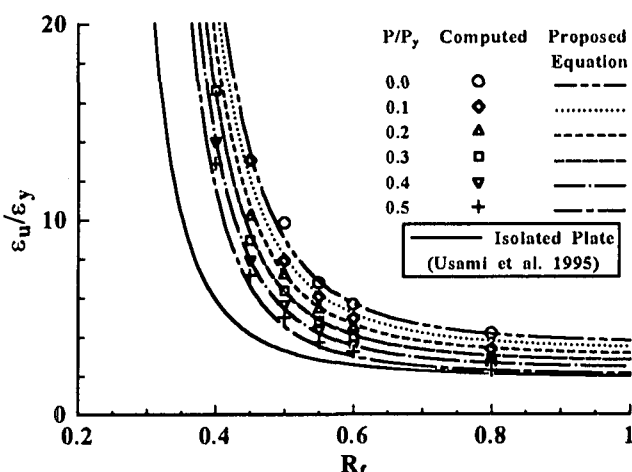


図-2 無補剛箱形断面の破壊ひずみ

純圧縮を受ける補剛板の場合、破壊ひずみの推定式は、 λ_s のみで表せたが、今回の場合は R_f の関数にもなった。図-3は、式(4)をプロットしたものであるが、無補剛断面の場合と同様に、破壊ひずみは軸力比が大きくなるにつれ小さくなり、純圧縮を受けるときの変形能に近づく傾向がみられる。ここで、横軸の量の小さい領域においては解析値より多少低めに予測するように経験式を作成した。これは、この領域で破壊ひずみがパラメータに対して非常に敏感であるため安全側にとる必要があることと、繰り返し荷重を受ける鋼製橋脚の変形能の予測に適用されたときに妥当な結果を与えることを考慮したからである。なお、図-3には、補剛板の圧縮変形能も示されている。

(3) パイプ断面

パイプ断面短柱の破壊ひずみが、次式のように導かれている³⁾。

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} = \frac{0.12(1+4P/P_y)}{(R_f-0.03)^{1.45}(1+P/P_y)^5} + 3.6(1-P/P_y) \leq 20.0 \quad (5)$$

式(5)は、図-4にプロットしてある。同図より、パイプ断面の破壊ひずみは、 R_f が 0.1 より小さくなる急速に大きくなる。また、軸力が小さくなる、すな

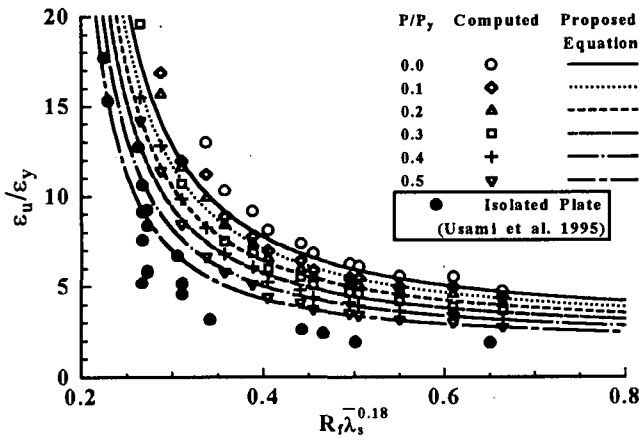


図-3 補剛箱形断面の破壊ひずみ

わち純曲げ状態につれて大きくなる。

3. 有効破壊長

有効破壊長(l_e)は、Pushover 解析で終局判定をするときの平均ひずみを求める領域(部材方向)の長さである。箱形断面の場合、文献1)で定められており、次のようになる。

$$l_e = \text{Min}(0.7B, a) \quad (6)$$

ここで、 B =フランジ幅、 a =ダイアフラム間隔である。

一方、パイプ断面の場合、次式より算出する。

$$l_e = 1.2 \left(\frac{1}{R_f^{0.08}} - 1 \right) D \quad (7)$$

この式は、試行錯誤的に定められたが、静的繰返し載荷実験で見られた足の象座屈モードの座屈波長に相当する長さを表している。式(7)の代わりに、中村による経験式⁵⁾($l_e = 3.0\sqrt{(D/2)t}$)を用いてもよいが、式(7)は材質の影響も考慮できる。

4. 鋼製橋脚の保有性能

鋼製橋脚の保有性能を求める方法として Pushover 解析による手法[例えば、文献1), 6)]がある。紙面上の都合でこの手法の詳細は省略するが、その妥当性を、単柱式箱形断面鋼製橋脚、パイプ断面鋼製橋脚および1層ラーメン鋼製橋脚について検証する。

(1) 箱形断面橋脚

解析例としては、無補剛断面橋脚($R_f = 0.297 \sim 0.704$)7体、補剛断面橋脚($R_f = 0.3 \sim 0.7$)10体を用いた。図-5に、本提案手法による無補剛断面橋脚の変形能(▲で記したものを)を静的繰返し実験による近似式(最大強度の95%まで降下した点に対応する変形能、すなわち δ_{95})との比較を示す。なお、文献1)で報告された単一板パネルによる破壊ひずみを用いた場合の結果も載せてある。同図をみると分かるように、単板のみを取り上げた解析から得られた破壊ひずみを用いた場合、横軸にとつ

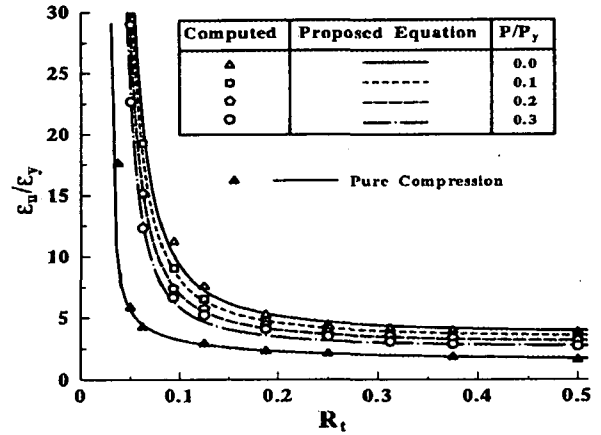


図-4 パイプ断面の破壊ひずみ

たパラメータの小さい領域においてはかなり安全側の結果となる。これに対し、本手法による変形能の推定値は実験結果の平均値曲線から標準偏差を引いた曲線(M-S Curve)と全般的によく一致している。

補剛断面橋脚の場合、本解析結果を静的繰返し解析の結果と比較したのが図-6である。同図に補剛板による破壊ひずみを用いて求めた終局変位もプロットしてあるが、2つのデータを除いて繰返し解析による経験式に比べて低めな予測であった。これに対し、本解析結果は、その経験式とよく一致している。また、実験結果との比較も行ってみたが、本解析結果と実験結果の M-S Curve がよく合っていることが分かった。

(2) パイプ断面橋脚

パイプ断面橋脚の実験結果が少ないので、文献7)で述べられた繰返し解析結果による経験式と比較する。ここで、9体の柱について解析し、式(7)より有効破壊長を求め、その間の平均ひずみが、式(5)で算出した破壊ひずみに達したときの変位を終局変位とした。その結果を経験式とともに図-7に示す。この図から、本解析手法をパイプ断面橋脚に適用したとき、箱形断面橋脚の場合と同様に、変形能を良い精度で推定できている。

(3) ラーメン橋脚

鋼製ラーメン橋脚への適用例に、西川ら⁷⁾が行った繰返し実験の供試体を用いる。この供試体は、600×600mmの補剛正方形断面で構成される1層のラーメン橋脚であり、実橋脚の1/3～1/4を想定した大型模型である。最大水平荷重は、ほぼ $3\delta_y$ のときに生じ、その後徐々に耐力が低下する。このとき、柱基部に軽微な局部座屈が発生した。実験より得られた水平荷重-水平変位履歴曲線を Pushover 解析の結果とともに図-8に示す。補剛板の破壊ひずみを用いて定められた終局点が■でマークした点になるが、実験結果に比較してかなり安全側の結果となった。一方、本解析手法による終局点を▲のマークで記し、そのときの変形能が約 $2.6\delta_y$ となっており、実験結果の δ_{95} よりまだ余裕があるものの、最大荷重点にはかなり近い。より多くの検証が必要であるが、上記の

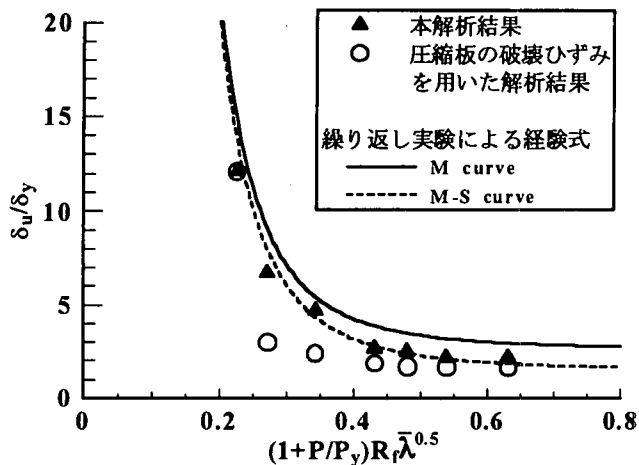


図-5 無補剛箱形断面橋脚の変形能

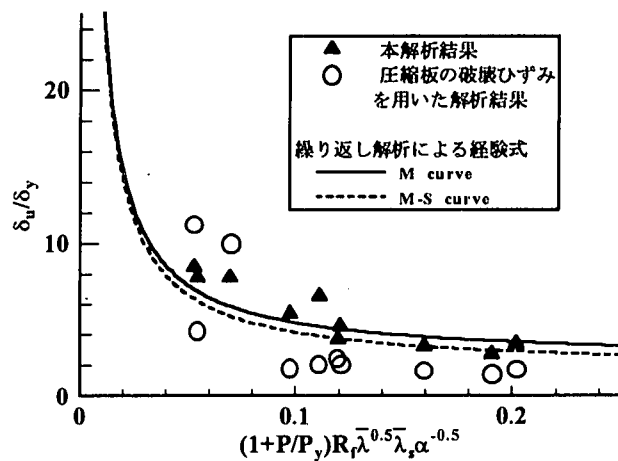


図-6 補剛箱形断面橋脚の変形能

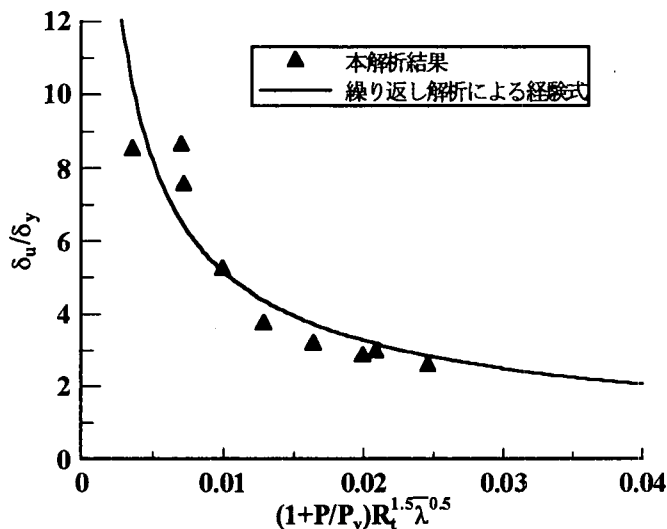


図-7 パイプ断面橋脚の変形能

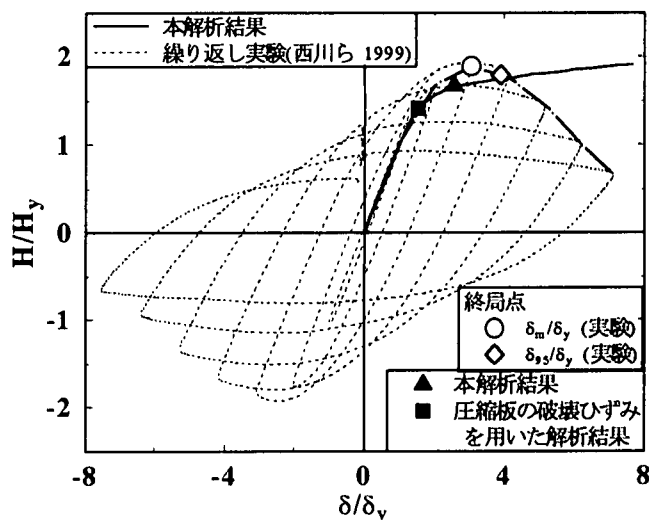


図-8 ラーメン橋脚の変形

結果から、塑性変形の最も大きい断面だけで構造物の終局状態を判定する本照査法は、土木分野によく使われる薄肉断面を有する鋼製ラーメン構造物にも十分適用可能と考えられる。これは、建築ラーメン構造物のようにヒンジが次々と形成されメカニズムに達する場合と異なり、薄肉断面を用いる土木鋼構造物においては局部座屈が一旦発生すると塑性変形が1カ所に集中し、応力再分配があまり期待できないためである。

5. あとがき

本論文は、Pushover 解析による鋼構造物の耐震性能評価法を種々の構造物に適用した結果をまとめたものである。その際、終局状態を判定する条件に圧縮と曲げを受ける短柱の弾塑性有限変位解析より得られた破壊ひずみを用いた。そして、単柱式鋼製橋脚（無補剛箱形断面、補剛箱形断面およびパイプ断面）と1層鋼製ラーメン橋脚について解析し、静的繰返し実験と解析の結果を用いてその妥当性を検証できた。今後、アーチリブや斜張橋の主塔などへの適用を検討する必要があるが、本研究

で提案した、Pushover 解析を併用する手法は、種々の土木薄肉鋼構造物の変形性能を比較的簡単に求めることが可能になる。

参考文献

1. 宇佐美勉, 鈴木森晶, IHP. Mamaghani, 葛漢彬: コンクリート部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 土木学会論文集, No.525/I-33, 69-85, 1995.
2. 土木学会鋼構造新技術小委員会: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996.
3. Gao, S. B., Usami, T. and Ge, H. B.: Ductility of steel short cylinders in compression and bending, J. Engrg. Mech., ASCE, 124(2), 176-183, 1998.
4. Zheng, Y., Usami, T. and Ge, H. B.: Ductility of thin-walled steel box stub-columns, submitted to J. Struct. Engrg., ASCE.
5. 中村秀治: 鋼製円筒橋脚の座屈評価法と数値解析技術, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, 37-42, 1997年.
6. 宇佐美勉: 第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.183-186, 1998.
7. 西川和廣, 村越潤, 高橋実, 岡本隆, 池田茂, 森下泰光: 鋼製ラーメン橋脚の耐力と変形性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.45A, 235-244, 1999年.