

I - A55

鋼製橋脚の履歴載荷応答特性

日立造船 正員 宮崎 高
琉球大学 正員 矢吹哲哉
琉球大学 正員 有住康則

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震は、従来の耐震設計の想定を遥かに越える大規模な地震であり、過去の地震で被災例がなかった鋼製橋脚も、この地震によって2基が倒壊し、約半数が大小何らかの損傷を被った。なかでも円筒鋼製橋脚では、いわゆる象の足座屈と呼ばれる局部座屈現象の事例が多く、その中には、残留変形が大きいために補修が困難になり、新たに架け替える必要に迫られたものもある。このようなことから、鋼製橋脚の耐激震設計法の確立が急務となってきたが、鋼製橋脚の動的耐荷力については、十分なデータが整っていないのが現状である。そこで本研究では、繰り返し荷重下での円筒鋼製橋脚の挙動について非線形有限要素解析を行い、各種パラメータが耐履歴載荷性能に及ぼす影響について検討を行った。

2. 解析法

本研究では、繰り返し荷重下での円筒鋼製橋脚の挙動を解明するため、幾何学的非線形及び材料非線形を考慮した鋼製橋脚を、アイソパラメトリックシェル要素でモデル化し、弾塑性有限変位理論に基づいて解析した。なお、幾何学的非線形挙動は、更新ラグランジ法に増分理論を用いて、評価した。解析に用いた基本的仮定は、(1)アイソパラメトリックシェル要素では中央面に対する法線を含む面は変形後も平面を保持し、中央面法線方向の直ひずみを無視する(2)材料非線形挙動は、von Misesの降伏条件式及びPlandtl-Russの塑性流れ理論に従う(3)材料はひずみ硬化を呈する等方等質材料とする(4)材料構成則は等方硬化則である。なお、ひずみ硬化率は、構造用軟鋼を考慮して、 $d\bar{\sigma}/d\bar{\epsilon}_p = E/100$ を用いた。

3. 解析法の検証

本研究で用いた解析法の妥当性を検証するため、建設省土木研究所で行われた円筒鋼製橋脚供試体の繰り返し載荷実験結果¹⁾との比較を行った。実験では、図-1に示すように、鋼管供試体の軸方向に全断面降伏軸力(公称降伏応力度を用いて計算)の15%に相当する一定軸力荷重を載荷した状態で、柱頭部の載荷点に正負の繰り返し水平荷重を準静的に載荷している。解析における支持条件は、基部が固定支持、載荷部が自由支持とした。供試体は、高さ $h=340.3\text{cm}$ 、外径 $R=45.0\text{cm}$ 、板厚 $t=0.9\text{cm}$ で、降伏応力度は実験に伴って行われた引張試験の結果 $\sigma_y=2953.92\text{kgf/cm}^2$ であった。図-2に載荷サイクルの概念図を示す。繰り返し載荷の基本となる初期降伏水平変位 δ_y 及び初期降伏水平荷重 H_y は次式で与えられる。

$$\delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} \dots (1) \quad , \quad H_y = \left(\sigma_y - \frac{P}{A} \right) \frac{z}{h} \dots (2)$$

ここで、 σ_y はSS400材の公称降伏応力度($\sigma_y=2400\text{kgf/cm}^2$)を用いた。図-3に実験と解析の荷重-変位履歴曲線の比較を、図-4に包絡線の比較を示す。図より明らかなように、解析結果は全領域にわたって実験で得られた荷重-変位履歴曲線をよく再現できているものと思われる。また、最大耐荷力についても、解析結果(63tonf)は実験結果(61tonf)とよく一致している。次に、図-5に吸収エネルギーの比較を示す。なお、吸収エネルギーは、荷重-変位履歴曲線における1ループごとの面積で求めた。図より明らかなように、解析から得た吸収エネルギーは、実験結果を精度良く表現していると考えられる。載荷部変位 $+3\delta_y, +6\delta_y$ での全体の変形モードを図-6に、基部付近での変形状態を図-7に示す。実験においては基部付近で象の足座屈が生じた。これらの図より明らかなように、解析結果は実験で見られた象の足座屈を再現できているが、その突出位置、突出量についてはわずかに異なっている。以上の比較結果より、本解析法は荷重-変位履歴曲線、最大耐荷力、吸収エネルギー及び変形モードについて、実験結果を精度良く再現できるものと判断した。

4. パラメトリック解析

円筒鋼製橋脚の耐履歴載荷性能を解明するため、パラメトリック解析を行った。解析モデルは、図-1に示すような一定軸力を載荷した状態にある一端固定、他端自由の円筒鋼製橋脚であり、図-2に示すように水平荷重を準静的に載荷した。そして円筒鋼製橋脚の耐履歴載荷性能に影響を及ぼすと思われる径厚比パラメータ R/t 、細長比パラメータ λ を種々変化させ、解析を行った。解析に用いた構造諸元を表-1に示す。なお、径厚比パラメータ及び細長比パラメータは次式で定義される。

円筒鋼製橋脚、弾塑性有限変位解析、履歴載荷

〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地 TEL 098-895-8664 FAX 098-895-8677

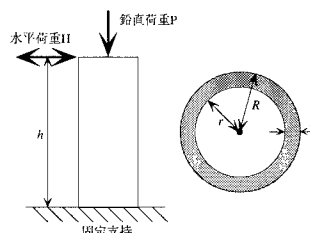


図-1 円筒鋼製橋脚モデル

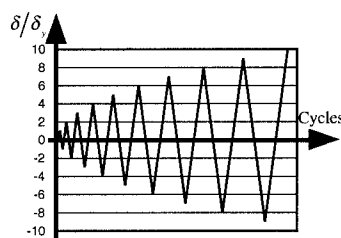


図-2 載荷サイクル概念図

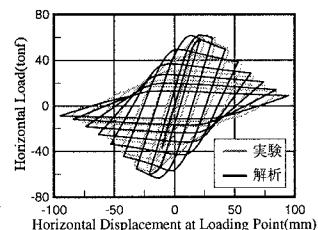


図-3 荷重-変位履歴曲線の比較

$$R_t = \frac{\sqrt{3(1-\nu^2)}}{t} \left(r + \frac{t}{2} \right) \frac{\sigma_y}{E} \dots (3)$$

$$\lambda = \frac{4h}{\sqrt{R^2 + r^2}} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \dots (4)$$

1) 径厚比パラメータの影響

径厚比パラメータ R_t が耐履歴載荷性能に及ぼす影響を調べるため、 $\lambda = 0.233$ に固定し、 $R_t = 0.0644 \sim 0.1123$ と変化させて解析を行った。解析より得られた包絡線を図-8に示す。図から明かなように径厚比パラメータが小さくなるに従って、最大耐荷力とそれに対応する δ/δ_y が大きくなっている。

次に、吸収エネルギーと載荷部変位の関係を図-9に示す。図より明かなように、吸収エネルギーの最大点に対応する δ/δ_y の値は、径厚比パラメータが小さいほど、大きくなっている。吸収エネルギーピーク点以降の吸収エネルギーの減少の割合は、いずれの場合もほとんど同じである。考慮したパラメータの範囲内の解析対象モデルでは、全て象の足座屈モードが見られた。

2) 細長比パラメータの影響

細長比パラメータ λ が耐履歴載荷性能に及ぼす影響を調べるため、 $R_t = 0.0935$ に固定し、 $\lambda = 0.1257 \sim 0.3662$ と変化させて解析を行った。解析より得られた包絡線を図-10に示す。図より明かなように、細長比パラメータの減少に伴い、わずかではあるが最大耐荷力の上昇がみられる。最大荷重載荷時の変位 δ/δ_y は、細長比パラメータが小さくなるに従って、大きくなっている。吸収エネルギーと載荷部変位の関係を図-11に示す。図より明かなように、吸収エネルギー最大点に対応する変位 δ/δ_y の値は、細長比パラメータが小さいほど、大きくなっている。また、吸収エネルギーピーク点以降の吸収エネルギーの減少の割合は、細長比パラメータが大きくなるに従って、顕著となる。考慮したパラメータの範囲内の解析対象モデルでは、全て象の足座屈モードが見られた。

5. まとめ

1) 本解析法は繰り返し水平荷重を受ける円筒鋼製橋脚の荷重-変位履歴曲線、最大耐荷力、吸収エネルギー及び変形モードを精度良く評価できる。

2) パラメトリック解析で考慮したパラメータの変動範囲内において、解析対象モデルでは、全て象の足座屈が生じた。

3) 径厚比パラメータが小さいほど、最大耐荷力とそれに対応する変位、吸収エネルギー最大点に対応する変位は大きい。また、細長比パラメータが小さいほど、最大耐荷力に対応する変位、吸収エネルギー最大点に対応する変位は大きい。また、細長比パラメータが大きいほど、吸収エネルギー最大点以降の吸収エネルギーの減少の割合が顕著である。

参考文献 1) 西川和廣, 山本悟司, 名取暢, 寺尾圭史, 安波博道, 寺田昌弘: 既設鋼製橋脚の耐震性能改善方法に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 42A, 1996年3月

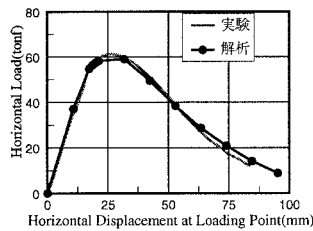
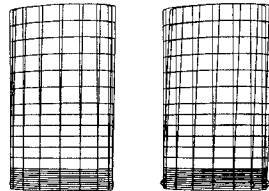


図-4 包絡線の比較



(a) 載荷部変位+3δy (b) 載荷部変位+6δy

図-6 変形モード

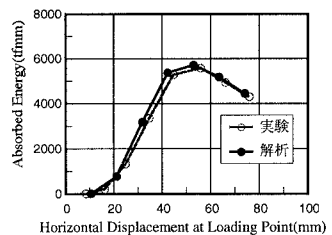


図-5 吸収エネルギーの比較

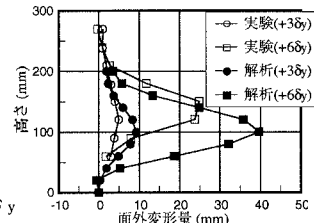


図-7 基部付近の変形量の比較

表-1 解析パラメータ及びその変動範囲

	単位	値
鋼材	kgf/cm ²	S5400
弾性係数E	kgf/cm ²	2.1×10^6
降伏応力 σ_y	kgf/cm ²	2400.0
外径R	cm	45.0
軸力比P/P _y	—	0.15
細長比パラメータ λ	$\times 10^{-1}$	1.2570, 1.5030, 1.9128, 2.3248, 2.7326, 3.0059, 3.0879, 3.4978, 3.6617
径厚比パラメータ R_t	$\times 10^{-2}$	6.4420, 6.8140, 7.2309, 7.6305, 7.9983, 8.4030, 9.3471, 11.2354

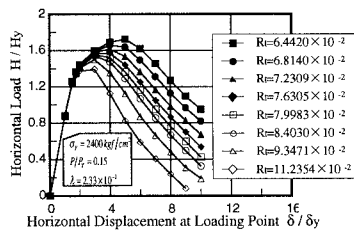


図-8 包絡線

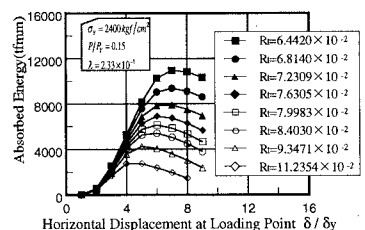


図-9 吸収エネルギーと載荷部変位の関係

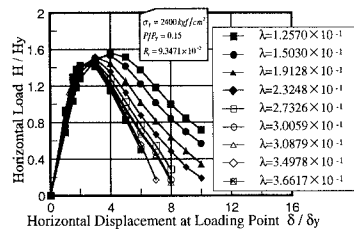


図-10 包絡線

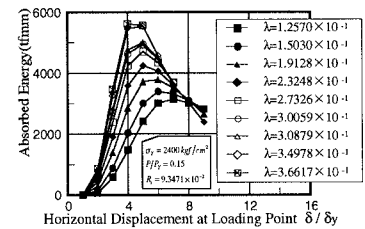


図-11 吸収エネルギーと載荷部変位の関係