

I - A54

阪神・淡路大震災で被災した鋼製円筒橋脚の耐履歴載荷性能に関する解析的検討

琉球大学 正員 有住 康則
 琉球大学 正員 矢吹 哲哉

1. まえがき

阪神・淡路大震災の地震動は、近年まれにみる都市直下型大地震であり、鋼製円筒橋脚部材にも場所によっては設計震度をはるかに上回る地震力を受け、座屈や破断といった被害が発生した。このことから鋼製円筒橋脚部材の耐震設計法の再検討、特に静的及び動的耐荷力特性を把握することの必要性が指摘されている。鋼製円筒橋脚部材の終局挙動を精度良く把握するためには、構造材料の非線形挙動のみならず、部材の全体座屈、局部座屈及びそれらの連性座屈強度特性を明確にする必要がある。しかしながら、鋼製円筒橋脚部材の力学特性は極めて複雑であり、その耐荷力に関する研究は少なく、震災以後、鋼製円筒橋脚部材の非線形挙動について精力的に実験的及び解析的研究が行われているが、極限強度把握のための十分な基礎的資料は整っていないのが現状である。そこで本研究では、阪神・淡路大震災で実際に被災した鋼製円筒橋脚について、一定軸力荷重を載荷した状態で、柱頭部に正負の繰り返し水平荷重を準静的に載荷して弾塑性有限変位解析を行い、その鋼製円筒橋脚の耐履歴載荷性能の検討を行った。

2. 解析モデル及び解析法

阪神・淡路大震災で実際に被災した鋼製円筒橋脚をモデル化し、準静的繰り返し水平荷重を載荷し解析を行い、その結果から実鋼製円筒橋脚の耐履歴載荷性能の評価を行った。解析の対象とした鋼製円筒橋脚は、阪神高速神戸線の鋼製円筒橋脚（P-584海側）である。本橋脚は、図-1に示すように橋脚の中間位置で、提灯座屈形状を示し、その座屈部分で全断面に破断クラックが発生している。この橋脚は破断面から山側に大きく傾いており、支持能力を失っているが、上部構造が連続形式であるため、落橋には至っていない。座屈位置は、ダイヤフラム間のもので、板厚が21mmと28mmと変化した溶接部のすぐ上部である。その部分の径厚比は52であり、材質はSS400材である¹⁾²⁾。

本研究では、繰り返し荷重載荷下での鋼製円筒橋脚の挙動を解明するため、鋼製円筒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た数値解析を行った。なお、幾何学的非線形挙動は、更新ラグランジュ法に増分理論を用いて評価した。また、材料非線形挙動は、von Misesの降伏条件及びPrandtl-Reussの塑性流れ理論に従い、材料はひずみ硬化を呈する等方等質材料とし、材料構成則は等方硬化則に従うものとした。

解析モデルを図-2に示す。本橋脚は、下部内側に中詰めコンクリートが打設されているが、本解析ではこれを剛体と考え³⁾、中詰めコンクリート上端から橋脚頂部までをモデル化し、モデル下端（中詰めコンクリート上端）を完全固定支持、橋脚上部を自由とした。また、解析では、対称性を考慮して橋脚の1/2部分を解析対象とした。一方、橋脚頂部には橋桁からの載荷重 $P=482\text{ton}$ ($P/P_y=0.14$) を一定軸力として負荷し、図-3に示す正負の準静的繰り返し水平荷重を載荷して数値解析を行った。なお、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⁴⁾。

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

ここで、 EI は曲げ剛性、 z は断面係数、 h は橋脚の高さ、 A は断面積、及び σ_y は降伏応力度である。本解析では降伏応力度として公称値（SS400

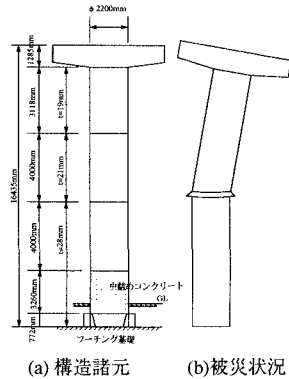


図-1 鋼製円筒橋脚（P584海側）¹⁾

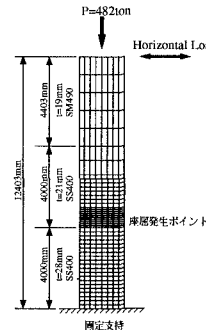


図-2 鋼製円筒橋脚の解析モデル

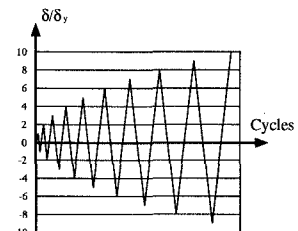


図-3 載荷サイクル

鋼製円筒橋脚，極限強度，局部座屈，弾塑性有限変位解析
 〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地 TEL 098-895-8664 FAX 098-895-8677

材： $\sigma_y=24\text{kgf/mm}^2$ ，SM490材： $\sigma_y=28\text{kgf/mm}^2$ ）を，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. 解析結果及び考察

解析で得られた水平荷重-水平変位履歴曲線を図-4に，水平荷重-水平変位履歴曲線に基づいて得られた包絡線を図-5に示す。これらの図から明らかなように，本解析モデルでは，最大耐力力に達したのち，急激に剛性が低下し，水平変位が $+7\delta_y$ で崩壊に至っており，その時の復元力は最大耐力力の約1/5程度まで低下している。

水平荷重-水平変位履歴曲線の各ループで囲まれた面積で評価した吸収エネルギーと各ループの載荷部最大水平変位の関係を図-6に示す。図-6から明らかなように，本解析モデルでは，吸収エネルギーはピークに達したのち急激に低下しており，ピーク点以後の吸収エネルギーの伸びは見られず，崩壊に至っている。

図-7に最大荷重(H_{max})載荷時，及び載荷部水平変位が $+4\delta_y$ ， $+5\delta_y$ での橋脚の変形図を示す。これらの図から明らかなように，本解析モデルでは，板厚が21mmと28mmと変化した溶接部の少し上部で局部座屈が発生し，載荷部の水平変位の増加に伴って，局部座屈発生断面の上部の橋脚部分が側方に大きく傾いている。これは阪神・淡路大震災で実際に被災した実鋼製円筒橋脚(P-584海側)の被災状況と酷似している。なお，最大荷重載荷時には，すでに局部座屈は発生しており，局部座屈発生部分の面外変形量の増大に伴って剛性が低下している。

これらの結果から，本橋脚は，板厚変化点近傍で局部座屈が発生し，局部座屈発生部の突出変形量の増大に伴って急減に剛性が低下し，エネルギー吸収能を十分発揮することなく脆性的に崩壊に至ったものと考えられる。

4. 結論

本研究では，阪神・淡路大震災で実際に被災した鋼製円筒橋脚をモデル化し，準静的繰り返し水平荷重を載荷し解析を行い，その結果から実鋼製円筒橋脚の耐履歴載荷性能の評価を行った。本研究より得られた主な結論をまとめると，以下のようになる。

(1) 本解析モデルでは，水平荷重-水平変位履歴曲線及び包絡線の結果より明らかなように，最大耐力力に達したのち急激に剛性が低下し，崩壊に至っている。

(2) 吸収エネルギーは，ピーク到達後急速に低下している。

(3) 本解析モデルでは，板厚変化点の少し上部で局部座屈が発生し，載荷部の水平変位の増加に伴って，局部座屈発生断面から上部の橋脚部分が側方に大きく傾斜しており，実橋脚の被災状況と良く一致している。

参考文献：1)土木学会：阪神・淡路大震災調査報告，1996。2)中村秀治：鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析，土木学会論文集，No.549/I-37，1996。3)中川知和 他：阪神・淡路大震災で被災した鋼製橋脚の非線形動的応答解析，鋼製橋脚の非線形数値解析と設計法に関する論文集，1997。4)西川和廣 他：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，1996。

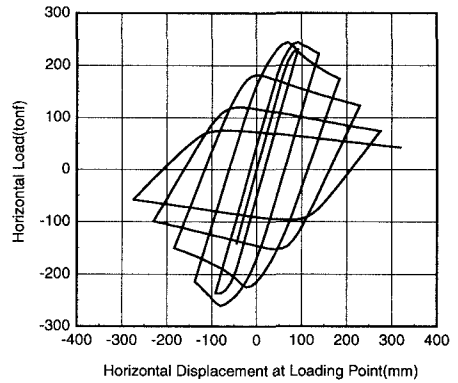


図-4 水平荷重-水平変位履歴曲線

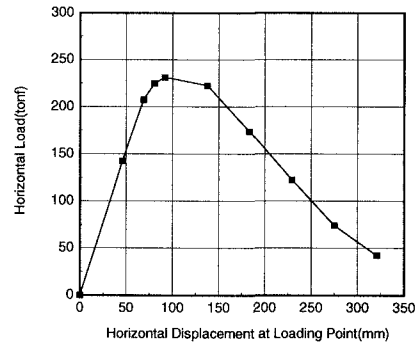


図-5 包絡線

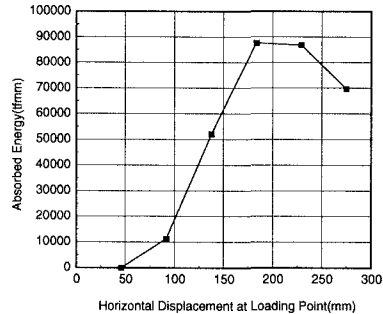


図-6 吸収エネルギーと載荷部水平変位の関係

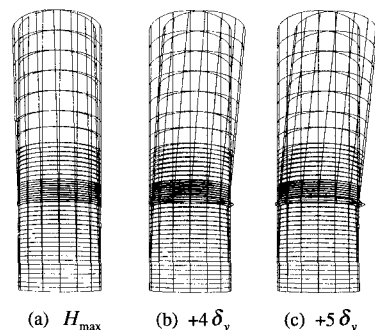


図-7 変形モード