

I-A 25 梁要素を用いた鋼製円筒橋脚の解析法に関する一考察

九州工業大学大学院	学生員	阿部圭吾
九州工業大学工学部	正会員	山口栄輝
日本鉄塔工業	正会員	稲森誠一郎
九州工業大学工学部	正会員	久保喜延

1. はじめに

兵庫県南部地震では鋼製橋脚が大きな被害を受けた。このため、多くの研究機関で鋼製橋脚の耐震性に関する研究が行われている。数多くの供試体を用いて実験的検討がなされている一方で、実験に要する費用・時間が多大であることから、実験結果をある程度の精度で再現できる解析法についても検討されている。すでに、汎用プログラムを用いた弾塑性有限変位解析で、実験結果と概ね一致した結果が得られることが報告されている¹⁾。この種の解析では、シェル要素で橋脚をモデル化し、変位制御で水平方向に正負交番载荷を行い非線形計算を実行している。したがって、そこで要求される計算量はかなり多くなる。ところで、鋼製橋脚の変形能については、繰り返し荷重下における変形履歴そのものではなく、簡易法として、その包絡線を用いることも考えられる。こうした点に鑑み、本研究では、梁要素を用いた有限要素解析により、包絡線を求めることを試みた。解析対象には鋼製円筒橋脚を取り上げ、計算はすべて汎用プログラムMARC²⁾で行った。

2. シェル要素による解析

図-1に示す円筒橋脚の弾塑性有限変位解析を行った。境界条件は、下端固定、上端自由とし、上端に鉛直下向きの一定荷重P（全断面降伏荷重の15%）、および水平荷重Hを作用させた。水平荷重は、その作用点の水平変位 δ が図-2に示すものとなるよう制御した。なお、断面変形が生じるのを防ぐため、上端は剛性の高い板で覆い、載荷点をその中央にとった。材料定数はヤング率 $2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$ 、ポアソン比0.3、また降伏応力は 36 kgf/mm^2 とし、二次勾配がヤング率の1%であるバイリニア型の単軸弾塑性挙動を仮定した。多軸応力下の弾塑性挙動は、移動硬化則、ミーゼス型の降伏関数・ポテンシャル関数で表されたとした。

対称性を利用して1/2のみを計算対象とし、これを4節点のシェル要素210個を用いてモデル化した。その際には、下端近傍で局部座屈が生じることを考慮し、この領域で要素を細かくとった。 δ を用いて変位増分法で解析し、その計算結果として、上端部の水平荷重-水平変位（ $H-\delta$ ）曲線の包絡線を図-3にSHELLとして示している。水平方向载荷の繰り返し回数が増加するにつれてピーク荷重が減少し始めるため、包絡線は下降している。この下降領域では、下端近傍でいわゆる“ちょうちん座屈”が発生した。

3. 梁要素による解析

図-1の円筒橋脚を2節点梁要素20個でモデル化し、弾塑性有限変位解析を行った。水平方向は正負交番载荷ではなく、単調载荷とした。得られた $H-\delta$ 曲線を図-3にBEAM1として示している。先にシェル要素解析で得られた包絡線と異なり、この曲線は単調に増加している。その主たる原因として、梁要素では局部座屈をとらえられない点が挙げられる。円筒橋脚に水平方向の正負交番载荷を行うと、軸対象に局部座屈（ちょうちん座屈）が生じ、それに伴い剛性が低下する。この剛性低下を取り込めないために、梁要素解析では円筒橋脚の耐荷力を過大評価する結果となる。なお、この2つの曲線では、初期勾配でも若干の差が見られる。これは、ここで用いた梁要素がベルヌーイ・オイラーの仮定に基づくものであるため、せん断変形が考慮されないことに起因している。

局部座屈による剛性低下の影響を取り込むため、本研究では、構成則に修正を施すことを考えた。すなわち、本来は材料の性質である構成則に構造特性を取り入れることとし、それにより梁要素解析でシェル解析の包絡線を再現することを試みた。試行錯誤の結果、図-4に示す修正相当応力-相当塑性ひずみ（ $\sigma^*-\varepsilon_p$ ）曲線を用いることにより、シェル解析の包絡線とかなり一致した $H-\delta$ 曲線（図-3のBEAM2）が得られた。ところで、非線形解析では、繰り返し計算により収束解を求めるのが一般的である。しかしながら、 $\sigma^*-\varepsilon_p$ 曲線に下降する部分を導入すると、収束解を得るのが困難になる。そこで、本解析では繰り返し計算をやめ、代わりに十分小さな増分 $\Delta\delta$ を与えることで解を得た。その妥当性を検証するために、収束解が容易に得られる $\sigma^*-\varepsilon_p$ 曲線が水平の場合（完全弾塑性体）において、繰り返し計算を行わない場合の結果と収束解を比較した。その結果、前者の解析結果は $\Delta\delta$ の大きさに依存するものの、その大きさを0.5mm程度にとれば $\Delta\delta$ への依存性は無視できるほど小さくなり、そのときの計算結果は、収束解とよく一致することが判明した。図-3のBEAM2は、 $\Delta\delta$ を0.5mmとして得たものである。

図-4の修正 $\sigma^*-\varepsilon_p$ 関係は、3つの直線で構成された比較的簡単なものである。最初の直線は本来の

材料特性と同じ勾配を有しており、局部座屈の影響が無視できる段階であることを示唆している。2番目の直線から局部座屈の影響が入り、最後の直線はその影響がかなり大きくなった段階に対応している。

以上の梁要素解析では幾何学的非線形性を考慮に入れていたが、最後に、その影響を無視して材料非線形性だけを考慮に入れた解析を行った。得られた結果は先のものとはほぼ同じであり、この橋脚を梁要素で解析する際には、幾何学的非線形性を考慮する必要はないと結論づけられる。したがって、この場合には、有限要素法によらず、図-4の修正 $\sigma^e - \varepsilon_p$ 関係から曲げモーメント-曲率関係を求め、それをもとに荷重-変位曲線を算出するという道示³⁾の手順に準じた手法も適用可能である。

4. おわりに

本研究では、構成則に修正を施し、シェル要素解析で得られた包絡線を梁要素解析で求めることを試みた。後者の利点は計算時間が短いことである。Sun SPARCstation 20を用いた場合、シェル要素を用いた解析では2日程度時間を要したのに対し、梁要素解析では数分で結果を得ることができた。このアプローチの要は $\sigma^e - \varepsilon_p$ 関係にある。図-4に示すものは特定の橋脚（図-1）に対して有効性が確認されたに過ぎない。今後、種々の橋脚に対してパラメータスタディ等を行い、 $\sigma^e - \varepsilon_p$ 関係についてさらに検討する予定である。

参考文献

- 1) 例えば、中川知和・安波博道他：弾塑性有限変形解析による箱形鋼製橋脚の耐荷力と変形能の評価、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp. 599-604, 1996年。
- 2) MARC K-6 マニュアル A～D編，日本マーク，1994年。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，丸善，1990年。

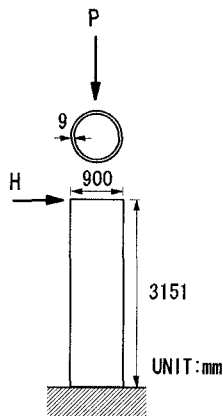


図-1 鋼製円管橋脚

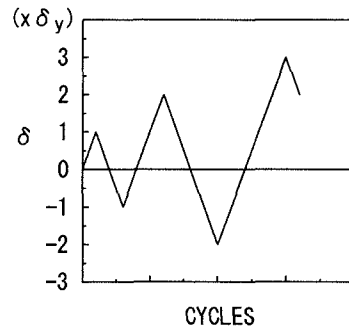


図-2 上端部水平変位

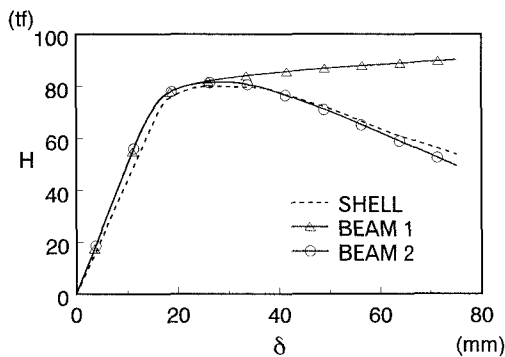


図-3 水平荷重-水平変位関係

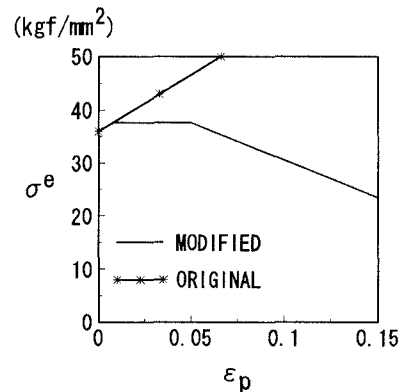


図-4 相当応力-相当塑性ひずみ関係