

鋼製橋脚の曲線近似復元力履歴モデルの開発とハイブリッド実験による検証

愛知工業大学 学生会員 ○袁 輝輝
 愛知工業大学 正会員 党 紀
 愛知工業大学 正会員 青木 徹彦

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、高速道路の倒壊により、地震直後の緊急支援の遅れや、物流機能の停止により、経済的損失は極めて大きなものとなった。地震直後の高速道路の機能維持のため、高速道路橋脚の耐震安全性の向上は重要な研究課題である。橋脚では地震時に限定された損傷が許容されるが、強震時挙動を予測するために橋脚の非線形履歴を適切に反応できる復元力モデルが必要である。本研究では、はじめに鋼製橋脚の復元力履歴曲線を3次および2次曲線で近似し、これをもとに履歴法則を仮定し、曲線近似復元力履歴モデルを構築する。つぎこの復元力モデルによる数値解析の結果を、本学の大型載荷装置を用いて行った静的繰返し実験とハイブリッド実験結果と比較し、モデルの妥当性を検討する。

2. 曲線近似復元力モデル

本研究で提案する曲線近似復元力履歴モデルは、主要経路となる①基本曲線、②サブ曲線、および③劣化曲線で構成されている。橋脚の大変形域における履歴特性をより正しく表現するため、提案モデルでは、橋脚のP-δ効果の影響を考慮し、高さhにおける水平荷重Hおよび鉛直荷重Pにより生じた基部曲げモーメントMを高さhで除した等価水平力 $H_{eq}(=H+P\delta/h)$ を用い、橋脚等価水平力-変位関係に着目する。

(1)基本曲線の決定:図1に示す $H_{eq}-\delta$ 平面で載荷開始点O(δ_s, H_s)から、最大荷重点M(δ_m, H_m)に至る載荷履歴曲線を基本曲線と呼ぶことにする。静的繰返し実験で得られた等価水平力の最大値 H_{m0} およびそのときの変位 δ_{m0} を最大荷重点座標の初期値とする。なお、図1に示すように基本曲線上のある点Aで除荷するとき、この点Aはつぎの基本曲線の始点となり、終点は逆側の最大荷重点M'($-\delta_m, -H_m$)となる。この基本曲線における等価水平力 H_{eq} と変位 δ の関係を近似的に3次曲線($H_{eq}-H_s=K_e(\delta-\delta_s)+\alpha_1(\delta-\delta_s)^2+\alpha_2(\delta-\delta_s)^3$)で表す。係数 α_1 と α_2 は、最大荷重点Mを通ること、および最大荷重点での剛性が0であるという条件より定められる($\alpha_1=3(H_m-H_s)/(\delta_m-\delta_s)^2-2K_e/(\delta_m-\delta_s)$, $\alpha_2=K_e/(\delta_m-\delta_s)^2-2(H_m-H_s)/(\delta_m-\delta_s)^3$)。ただし、 K_e は橋脚の弾性剛性であり、後述のように、橋脚の損傷によって低下させる。

(2)サブ曲線の決定:基本曲線から除荷する場合、例えば図1のA点から除荷し、B点に至る経路は、短い変位でも前述のように基本曲線を作り、この曲線上を進むものとする。除荷後に再載荷する場合、例えばB点で再び変位が逆転し、A点の方向に戻る場合には、 $|H_B| < |H_A|$ のとき、B点から除荷される経路は、B点を始点とし、A点を終点とする2次式($H_{eq}-H_B=K_e(\delta-\delta_B)+\alpha_1(\delta-\delta_B)^2$)を用いる。ここでは、この2次曲線をサブ曲線と呼ぶ。ただし、係数 α_1 はB点とA点を通ることから($\alpha_1=(H_A-H_B)/(\delta_A-\delta_B)^2-K_e/(\delta_A-\delta_B)$)定められる。なお、 $|H_B| > |H_A|$ のときB点からの除荷はB

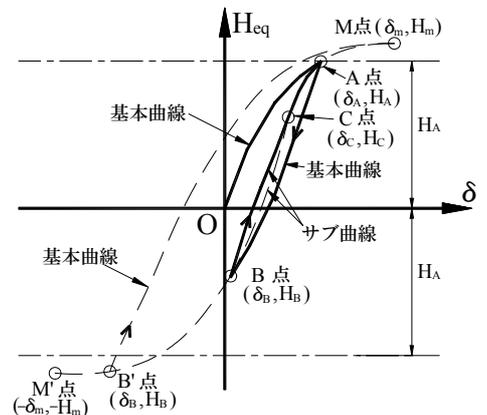


図1 繰返し載荷時の履歴曲線

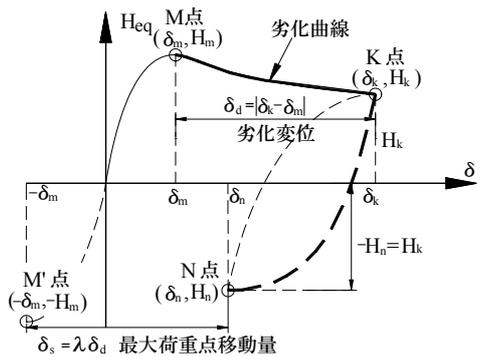


図2 劣化曲線およびその後の最大荷重点

キーワード 鋼製橋脚, 復元力モデル, ハイブリッド実験

連絡先 〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草 1247 愛知工業大学工学部 TEL 0565-48-8121

点を始点, 最大荷重点 M を終点とする基本曲線とする.

(3)劣化曲線の決定: 図 2 に示すように, 最大荷重点 M を超えると, 履歴曲線の勾配は負となる. このような負勾配の履歴曲線をここでは劣化曲線と呼び, M 点から K 点までの区間を劣化域と呼ぶ. また, 劣化域で経験した変位を劣化変位 $\delta_d = (\delta_k - \delta_m)$ と定義する. 橋脚の損傷による耐力の低下は, 劣化変位 δ_d の累積値 $\sum \delta_d$ に密接に関係すると考え, 劣化域における等価水平力 H_{eq} と累積劣化変位 $\sum \delta_d$ の関係を 2 次式($|H_{eq}|/H_y = H_{m0}/H_y + \beta_1 \sum \delta_d/\delta_y + \beta_2 (\sum \delta_d/\delta_y)^2$)で表す. ここに, δ_y と H_y はそれぞれ降伏変位と降伏荷重で, 劣化パラメータ β_1 と β_2 は静的繰返し実験結果から最小 2 乗法により求める.

(4)弾性剛性の低下: 橋脚基部の局部座屈などによる損傷が進むにつれて, 履歴曲線の弾性剛性は低下する. この剛性低下は累積劣化変位 $\sum \delta_d$ と降伏変位 δ_y の比例関係にあると考え, 直線式($K_e/K_{e0} = 1 + \gamma \sum \delta_d/\delta_y$)で表す. ただし, K_{e0} は損傷前の初期弾性剛性であり, 剛性低下係数 γ は, 静的繰返し実験結果から最小 2 乗法により求める.

(5)劣化後の最大荷重点: 図 2 に示す正側の最大荷重点を K 点とし, 負側の最大荷重点は, 劣化変位によって, はじめの M'から N 点になったとする. 劣化後の負側の最大荷重 H_n の大きさは, K 点と同じ大きさとする ($H_n = -H_k$). 正側の最大荷重点は, M 点から K 点へ移動したので, 負側の最大荷重点変位も M'から N 点まで正方向へ変位 $\delta_s (= \lambda \delta_d)$ を平行移動させ, 負側の最大荷重点変位 $\delta_n (= -\delta_m + \delta_s)$ を求める. ただし, λ は最大荷重点移動係数であり, 静的繰返し実験結果から最小 2 乗法で求める.

3. ハイブリッド実験による曲線近似モデルの検証

ハイブリッド実験では, 高さ $h=2400\text{mm}$, $450\text{mm} \times 450\text{mm}$ の補剛正方形断面の鋼製橋脚を対象とする, 細長比パラメータは約 0.4, 幅厚比パラメータ R_f がそれぞれ 0.336, 0.170, 0.113 の 3 種類の試験体(D450, D225 およびD150 と呼ぶ)を用い, 表 1 で示す 11 本のハイブリッド実験を行う. ハイブリッド実験で得られた復元力履歴と応答変位時刻歴の一例を図 3(a), 3(b)の実線で示し, 解析結果を同図の破線で示し, 解析結果と実験結果の良い一致が見られる. 各実験で得られた結果と解析結果の比較により, 最大荷重における誤差は平均 5%で, 最大応答変位の差は平均約 5%, 残留変位の差は平均で橋脚高さの 1/450 以下である.

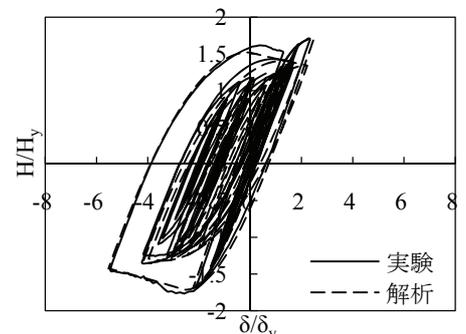
4. まとめ

本研究では, P- δ 効果を考慮した等価水平力 H_{eq} を導入し, 3 次曲線で近似する基本曲線, 2 次曲線で近似するサブ曲線および劣化曲線で構成するモデルを提案した. また, 劣化域における等価水平力および剛性の低下や最大荷重点の移動などの挙動に対する履歴法則と近似式を提案し, 各履歴パラメータを静的繰返し実験により求めた. ハイブリッド実験の結果と解析結果の比較により, 提案した復元力モデルの妥当性と有効性を検討し, 解析では橋脚の履歴特性および地震時の応答挙動を高精度に予測することができることを確認した.

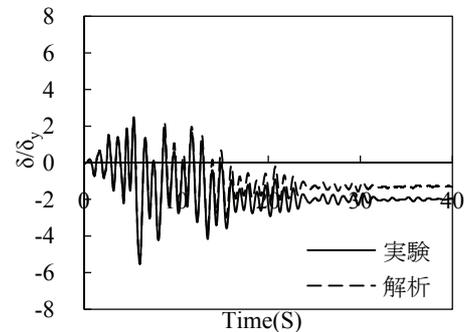
参考文献: 1)青木徹彦, 鈴木森晶, 田中智宏: 多曲線近似履歴モデル, 第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 1998. 2)Liu, Q.Y., Akira, K. and Usami, T.: Parameter Identification of Damage-based Hysteretic Model for Pipe-section Steel Bridge Piers, Journal of Structural Engineering, JSCE, Vol. 45A, pp. 1005- 1016, 1999. 3)党紀, 青木徹彦: 鋼製橋脚の曲線近似復元力履歴モデルの開発およびハイブリッド実験による検証, 土木工学論文集, 査読中.

表 1 ハイブリッド実験計画

No.	供試体	R_f	地震波	地盤種類	相似則
1	D450	0.336	JRT-NS	II	4
2			JRT-EW		
3			JRT-EW		
4	D225	0.170	JMA-NS	I	4
5			JMA-EW		
6			JRT-NS	II	
7			JRT-EW		
8			PKB-NS		
9	PKB-EW	III			
10	D150	0.113	JRT-NS	II	
11			JRT-EW		



(a)復元力履歴



(b)変位時刻歴

図 3 実験 No.6 の結果(JRT-NS,S=4)