

## 水平2方向地震動を受ける鋼製橋脚のマルチバネモデル非線形応答解析

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

## 1. 緒言

1995の兵庫県南部地震では、水平2方向地震動の同時作用による鋼製橋脚の基部の隅角に集中した座屈が多数に見られ、水平2方向から同時に荷重を受ける鋼製橋脚の耐震性能は、重要な課題となった。しかし、今まで、多く行われてきたのは1方向荷重に基づいた研究であり、橋脚の水平2方向荷重に関する実験データや解析手法は少ない。1方向荷重と2方向荷重された橋脚の耐荷力や地震応答などの耐震性能上の相違は、著者らのハイブリッド実験結果<sup>1)</sup>によると、一般に入力地震波によって異なり、バラツキが大きい。多くの地震波を用いた橋脚の地震応答データを実験的に求めることが望ましいが、経済的かつ時間的に困難である。水平2方向地震動を受ける鋼製橋脚の応答挙動を解明するために、ハイブリッド実験で求めた橋脚の水平2方向荷重時の履歴挙動や応答特性を正確に表現でき、また、大量の地震波を用いた応答計算に対応できる解析手法が望まれる。

本研究では、まず、対称変形を利用したマルチバネモデルの解析方法を説明し、つぎ、2次および3次曲線を用いたバネの曲線近似構成則を提案する。なお、橋脚の履歴特性を高精度に再現するため、静的繰り返し実験のデータを用いて、構成則に必要な各履歴パラメータの最適値を計算で求めている。

また、解析手法の妥当性と適用性を検証するため、著者たちが文献1)で行った正方形断面鋼製橋脚の2方向ハイブリッド実験の結果を用い、解析と実験の比較検討を行う。

## 2. 橋脚のモデル化とバネの曲線近似構成則

本研究で提案する解析手法は、基本的に図-1に示すような質点-剛棒-基部バネで構築されたマルチバネモデルに基づいた非線形振動解析である。解析モデルでは、平面保持仮定を用い、バネの等価応力-ひずみ構成則により橋脚の復元力-変位関係を求める。

基部における各バネの変形の平面保持の仮定により、図-2に示すように、バネ*i*の等価ひずみ $\varepsilon_i$ は橋脚上部の水平2方向変位 $\delta_x$ 、 $\delta_y$ 、橋脚高さ $h$ およびバネ座標 $(x_i, y_i)$ から求められる( $\varepsilon_i = (\delta_x x_i + \delta_y y_i)/h$ )。ただし、バネの高さは、ここで微小と仮定し、単位高さとしている。解析では、等価ひずみ $\varepsilon_i$ を用い、後述する基部バネの曲線近似構成則、すなわちバネの等価応力-ひずみの関係により、バネ等価応力 $\sigma_i$ を算出し、橋脚のXおよびY方向上の荷重 $H_x (= (\sum 2\sigma_i A_i x_i - P\delta_x)/h)$ 、 $H_y (= (\sum 2\sigma_i A_i y_i - P\delta_y)/h)$ を算出する。

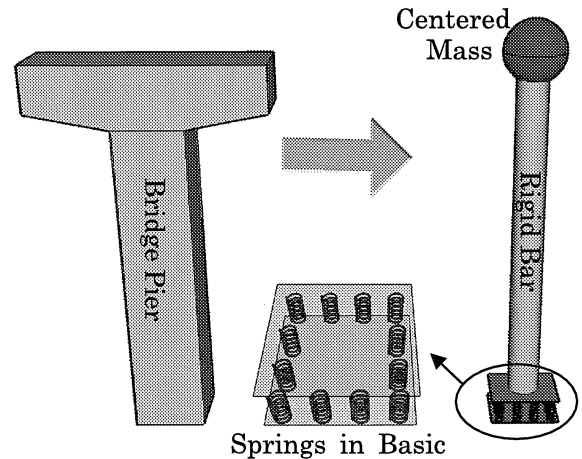
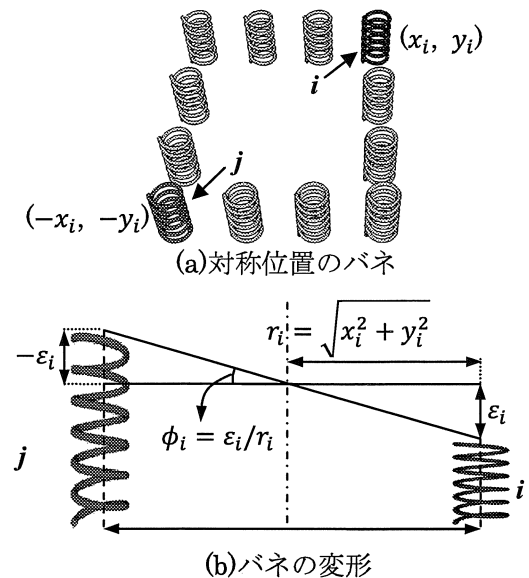


図-1 マルチバネモデルの概要

図-2 等価ひずみ $\varepsilon_i$ の定義

キーワード 鋼製橋脚, 水平2方向地震動, マルチバネモデル, 非線形解析, 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 TEL 0565-48-8121 danji1980@yahoo.co.jp

本研究では、各バネが同一な等価応力 $\sigma$ —ひずみ $\varepsilon$ 関係を有するとし、鋼製橋脚の曲線近似復元力モデル<sup>2)</sup>を参考し、曲線近似構成則を提案する。

この曲線近似構成則は、基本的に、バネの $\sigma$ — $\varepsilon$ 曲線として、図-3に示すように、荷重開始点 $(\varepsilon_s, \sigma_s)$ から最大応力 $(\varepsilon_m, \sigma_m)$ までの基本曲線 $(\sigma = \alpha_1\varepsilon + \alpha_2\varepsilon^2 + \alpha_3\varepsilon^3)$ 、最大応力から終局 $(\varepsilon_u, \sigma_u)$ までの劣化曲線 $(\sigma = \sigma_m + \beta_1(\varepsilon - \varepsilon_m) + \beta_2(\varepsilon - \varepsilon_m)^2)$ を用いる。

ただし、パラメータ $\alpha_1(=E)$ 、 $\alpha_2(= (3\sigma_m - 2E\varepsilon_m)/\varepsilon_m^2)$ 、 $\alpha_3(=(E\varepsilon_m - 2\sigma_m)/\varepsilon_m^3)$ は、最大応力点により算出し、パラメータ $\beta_1(= 2(\sigma_u - \sigma_m)/(\varepsilon_u - \varepsilon_m)^2)$ 、 $\beta_2(= -(\sigma_u - \sigma_m)/(\varepsilon_u - \varepsilon_m))$ は終局点による算出する。

また、繰返し荷重に対して、一時的に基本曲線の点 $(\varepsilon_s, \sigma_s)$ で除荷するとき、バネの等価応力—ひずみ曲線は、2次曲線で表すサブ曲線 $(\sigma = \sigma_s + \alpha_1(\varepsilon - \varepsilon_s) + \alpha_2(\varepsilon - \varepsilon_s)^2)$ を用いる。

基部バネの応力—ひずみ曲線は、座屈などの損傷に影響され、この損傷を累積劣化ひずみ $\varepsilon_{cd}$ により評価し、劣化後の最大応力点変位 $\varepsilon_{ni}$  ( $= \varepsilon_{pi} + 2\varepsilon_m + \gamma\varepsilon_{cd}$ ) および弾性係数 $E(= E_0 + \mu\varepsilon_{cd})$ を更新する。また、繰返し劣化を経験する場合、劣化曲線は累積劣化ひずみによる表現 $(\sigma = \sigma_m + \beta_1\varepsilon_{cd} + \beta_2\varepsilon_{cd}^2)$ を用いる。

なお、最大応力点、終局点などの履歴パラメータに関して、本研究では、静的繰返し実験結果を用い、最適計算(KH法)<sup>3)</sup>により定める。

### 3. ハイブリッド実験との比較

今回提案した復元力モデルの妥当性を検討するために、文献2)で行った鋼製橋脚の静的繰返し実験と水平2方向荷重ハイブリッド実験の結果と解析で得られた橋脚の最大応答変位と最大荷重の比較を図-4、5に示す。本研究で提案した解析手法による計算結果は、最大応答変位における誤差では平均5%、最大荷重における誤差では平均7%であり、ハイブリッド実験結果とよく一致しており、水平2方向地震動を受ける鋼製橋脚の地震時応答挙動、および水平2方向荷重により耐力低下を良好に再現しているといえる。

### 4. 結論

本研究では、マルチバネモデルおよびバネの曲線近似等価ひずみ—等価応力構成則を用い、水平2方向地震動を受ける鋼製橋脚の地震時応答を求めるための解析手法を提案し、実験の結果と解析結果の比較により提案した解析手法の妥当性と有効性を検証した。

**参考文献：** 1) 党紀，中村太郎，青木徹彦，鈴木森晶：正方形断面鋼製橋脚の水平2方向荷重ハイブリッド実験，構造工学論文集，Vol.56A，pp367-380，2010年3月。 2) 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 3) 黒田英夫：Visual Basicによる工学計算プログラム，CQ出版社，pp.69-74，2001

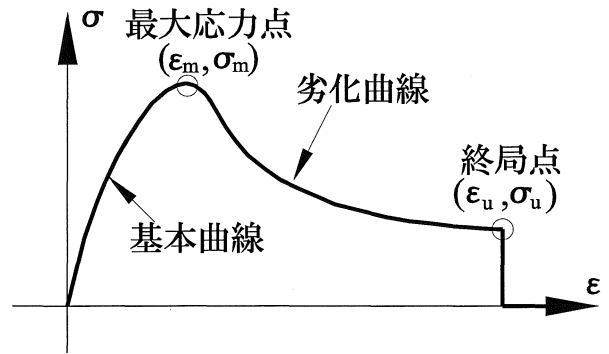


図-3 バネの等価ひずみ—応力関係の骨格曲線

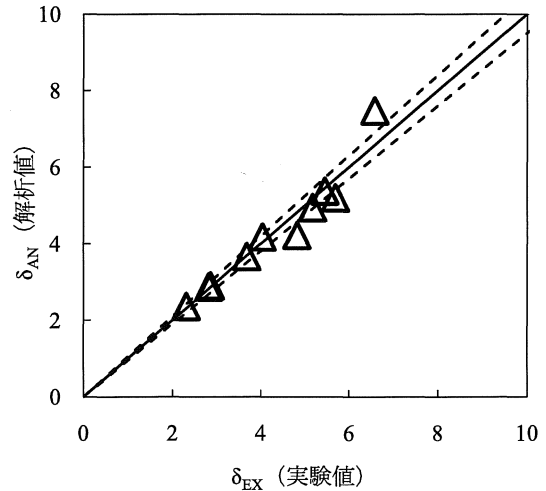


図-4 最大応答変位 $(\delta_{max}/\delta_0)$ の比較

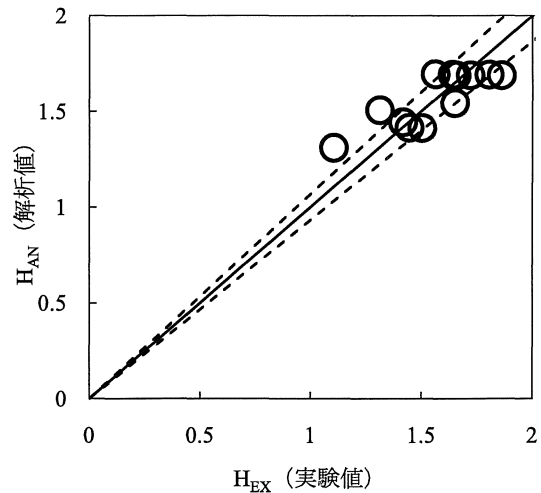


図-5 最大荷重 $(H_m/H_\theta)$ の比較