

水平2方向のひずみ依存性を考慮したゴム支承の非線形履歴復元力モデル

J R 西 日 本 正会員 〇村越 雄太
 京都大学工学研究科 正会員 五十嵐 晃
 埼玉大学理工学研究科 正会員 党 紀

1. はじめに

現在, ゴム支承を用いた橋梁の地震時性能照査には主に1方向の復元力モデルが適用されている. ゴム支承の水平2方向復元力モデルは既往の研究においても複数提案されているものの, レベル2地震動に対応するような大ひずみ領域におけるゴム支承の2方向挙動については未解明な部分が多いことや, モデルの実務的な適用性の問題などの理由から, レベル2地震に対する橋梁の耐震性能照査計算を目的とした2方向復元力モデルは, 現状では確立されていないと言える. 本研究では, 高減衰ゴム支承を対象とした水平2方向静的載荷試験および水平2方向ハイブリッド実験結果を用いた既存の数値モデルの再現性の検討に基づき, 既存モデルの問題点を改善した新たな水平2方向の非線形履歴復元力モデルを提案する.

2. 既存の解析モデル

本研究では, 実務的な適用性を考慮した水平2方向解析モデルの提案を目的としたため, 既存の数値モデルの中でも特に必要モデルパラメータ数の少ない以下の簡便なモデルを選定し, 検討を行った

(1) MSS バイリニアモデル : 水平面内に複数の非線形せん断ばねを等角度間隔で設置したモデルである. 8本のせん断ばねにバイリニア型の非線形復元力特性を持たせた(図-1).

(2) Park-Wen モデル : 履歴特性を表現する式(2)(3)の微分方程式で定められる変数 Z_x , Z_y を用い, 式(1)の形で2方向復元力 (x 成分, y 成分をそれぞれ F_x , F_y とする) を算出するモデルであり, 折り返し点の処理等が不要な利便性の高いモデルである.

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \alpha K_1 \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} + (1 - \alpha) K_1 \begin{Bmatrix} Z_x \\ Z_y \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\dot{Z}_x = \alpha \dot{u}_x - \beta |u_x Z_x| Z_x - \gamma \dot{u}_x Z_x^2 - \beta |u_y Z_y| Z_x - \gamma \dot{u}_y Z_x Z_y \quad (2)$$

$$\dot{Z}_y = \alpha \dot{u}_y - \beta |u_y Z_y| Z_y - \gamma \dot{u}_y Z_y^2 - \beta |u_x Z_x| Z_y - \gamma \dot{u}_x Z_x Z_y \quad (3)$$

ここに, u_x , u_y : x , y 方向の変位, K_1 : 初期剛性, α : 2次剛性比, A , β , γ : 履歴パラメータである.

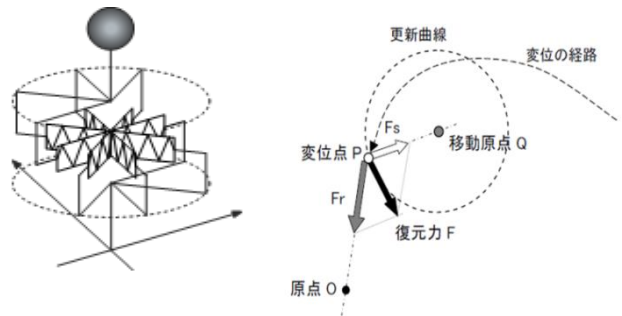


図-1 MSS モデル 図-2 山本モデル概念図

(3)山本モデル : ベクトルと移動原点を用いて2方向復元力を表現するモデルである. 原点指向の弾性成分 F_r と移動原点指向の弾塑性成分 F_s を算出し, その合力を復元力とする(図-2).

3. 実験概要

- (1) 試験体: 超高減衰ゴム支承 (HDR-S, G10) を用いた. 平面寸法は $160 \times 160 \text{ mm}$, ゴム総厚は 40 mm , 形状係数 $S_1=4.0$, $S_2=4.0$ である(図-3).
- (2) 載荷装置: 3次元6自由度載荷装置を用いて一定面圧 (6 MPa) の下, 水平2方向変位制御で載荷した(図-4).
- (3) 試験内容: 半径がせん断ひずみ 225% に相当する円形軌跡載荷試験, 上部構造 392 t を1質点でモデル化した2方向ハイブリッド実験を行った. 後者では鷹取, 神戸JMAの水平2成分記録を入力として用いた.

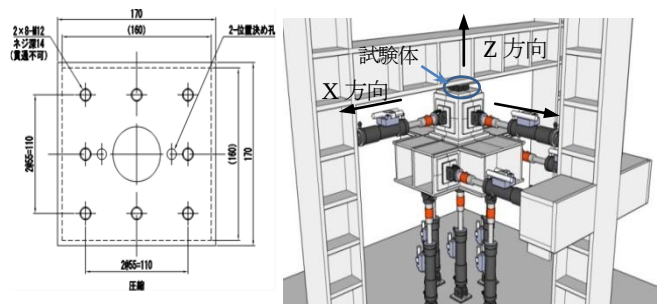


図-3 試験体平面図 図-4 載荷装置立体図

キーワード 高減衰ゴム支承, 仮動的実験, 水平2方向復元力モデル, ハードニング, Park-Wen モデル

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1棟 TEL075-383-3245

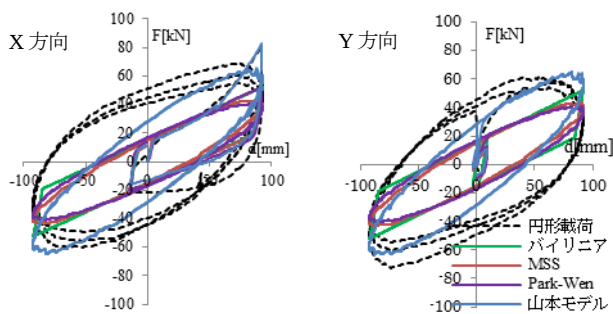


図-5 円形荷重による履歴復元力曲線

4. 既存の解析モデルによる解析

円形軌跡荷重試験の結果と、各数値モデルによる算出解析を、各水平方向の荷重-変位関係で比較したものを図-5に示す。数値モデルパラメータは1方向荷重試験に基づき設定している。いずれの数値モデルも、2方向荷重に特徴的な切片荷重の増加、履歴ループの膨らみ等が再現されていない。切片荷重やエネルギー吸収量は、着目する方向成分の変形のみではなく、2方向の変形量に同時に依存して変化するが、従来のモデルではこのような特性が適切に表現できないためであると考えられる。

5. 新たに提案するモデル

切片荷重やエネルギー吸収量を決定する復元力の履歴特性部分の大きさを、2方向合成ひずみ ε に関する関数として与える修正 Park-Wen モデルを導入する。

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = K \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \end{Bmatrix} + (b_1 + b_2 \varepsilon^2) \begin{Bmatrix} Z_x \\ Z_y \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2} \quad (5)$$

ここに、 b_1, b_2 : 包絡線の形状を決定するパラメータ、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$: せん断ひずみの x, y 成分である。履歴変位 Z_x, Z_y の包絡線を主せん断ひずみの2次関数とすることで(図-6)、大ひずみ時におけるハードニングを同時に表現する。円形変位軌跡を与えた場合について、修正 Park-Wen モデルと他の解析モデルを比較したものを図-7に示す。2方向荷重による履歴復元力の影響とハードニング特性が、他

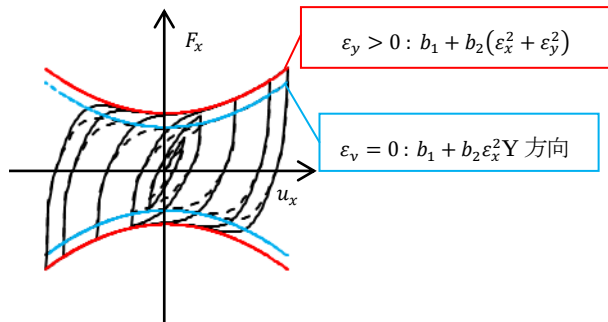


図-6 修正 Park-Wen モデル包絡線概念図

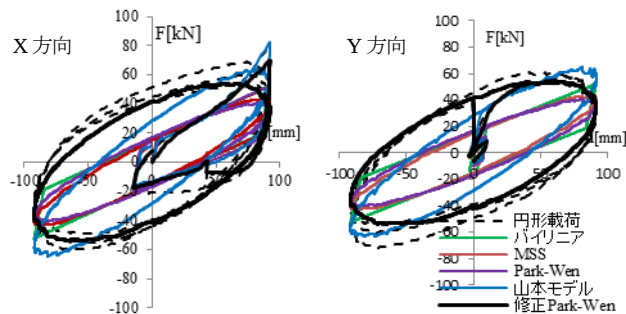


図-7 修正 Park-Wen モデルによる円形荷重解析

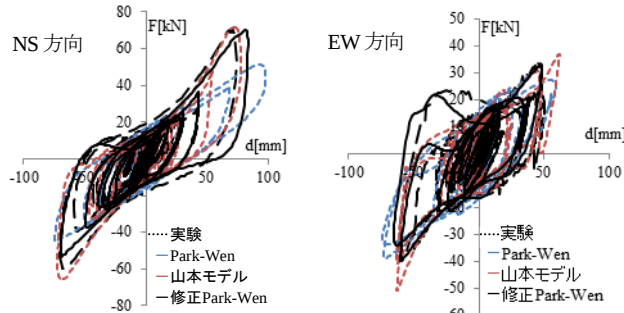


図-8 鷹取記録入力時の履歴復元力曲線

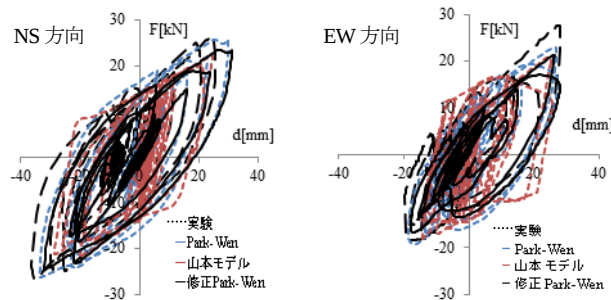


図-9 JMA 入力時の履歴復元力曲線

の解析モデルよりも良好に再現できる。

式(2)、式(3)におけるパラメータ A は1とすると、設定に必要なモデルパラメータは $K, \beta, \gamma, b_1, b_2$ の5つである。これらは1方向荷重試験により定めることができる。

各解析モデルの2方向動的応答解析結果と、2方向ハイブリッド実験の結果を図-8(鷹取記録)および図-9(JMA 神戸記録)に示す。修正 Park-Wen モデルは、鷹取記録入力時の変位 60mm 以降の復元力のハードニング現象を良好に再現している。また、EW 方向の変位 -40mm 付近で見られた履歴ループの膨らみが表現されている。最大荷重について実験結果と比較した誤差は、両方向において 10%以下に収まっている。JMA 地震波入力時には、応答変位自体が小さく復元力特性の変化がそれほど生じていないため、いずれの解析モデルを用いた場合においても最大応答値の評価に大きな差は見られない。最大応答変位について実験値との誤差は、いずれの解析モデルの場合でも約 10%、最大荷重については約 10~20%となった。