

免震用積層ゴム支承の水平 2 方向復元力に対応した 拡張バイリニアモデルの構築

山梨大学 学生会員 ○小泉和士, 山梨大学 正会員 吉田純司

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震では、橋梁が多大な被害を受けた。その後、橋梁の耐震設計が見直される中で、積層ゴム支承を用いた免震橋が注目されている。免震橋は、上部構造の固有周期の長周期化を図るとともに減衰性を高め、地震力を軽減することを目的としている。このように免震橋は、支承の動学的効果を積極的に利用している構造であるため、橋梁の応答を精緻に予測するためには、支承の高精度な復元力モデルが必要となる。また、建築構造物では、支承を効率的に利用するために 2 方向免震を採用しており、橋梁においても今後、2 方向免震が増加することが予想される。

本研究では、著者らが文献 1) で提案した水平 1 方向の復元力モデル¹⁾を、支承の水平 2 方向の復元力を再現できるように拡張することを目的とする。文献 1) のモデルは、履歴ルールとして既往のバイリニアモデルを直接応用し、必要最小限のパラメータで積層ゴムが有する水平 1 方向の復元力特性を再現できる点に特徴がある。本研究では、その基本構造は、そのままに水平 2 方向への拡張を試みる。

2. 水平 2 方向拡張バイリニアモデルの構築

(1) 水平 1 方向拡張バイリニアモデル

文献 1) で提案されている復元力モデルにおいて支承のせん断応力 $\bar{\tau}$ は、以下のように表される。

$$\bar{\tau} = g_1(\gamma) \cdot \tilde{f}(\gamma) + g_3(t) \cdot g_2(\gamma) \cdot G_2 \gamma \quad (1)$$

ここで t は現時刻、 $\tilde{f}(\gamma)$ は完全弾塑性型バイリニアモデルでのせん断応力、 γ はせん断ひずみ、 G_2 は 2 次剛性を表す。また、 $g_1(\gamma)$ 、 $g_2(\gamma)$ は無次元のスカラ関数であり、ひずみレベル γ に応じて、履歴面積および応力進展方向が変化する挙動を表すために導入したものである。本研究では、具体的には、

$$g_1(\gamma) := 1 + \left| \frac{\gamma}{h} \right|^m, \quad g_2(\gamma) := 1 + \left| \frac{\gamma}{h} \right|^n \quad (2)$$

のような形を用いている。ただし、 m 、 n 、 h は正の実定数である。また、 $g_3(t)$ は過去に経験した最大せん断ひずみレベルに応じたダメージを表し、具体的には次式で与えられる。

$$g_3(t) := 1 - r_d \tanh \left[\frac{W_{\max}(t) - W(\gamma)}{m_d} \right] \quad (3)$$

$$W(\gamma) := \int_0^\gamma g_2(\gamma) \cdot G_2 \gamma d\gamma = \frac{1}{2} G_2 \left(\gamma^2 + \frac{2h^2}{n+2} \left| \frac{\gamma}{h} \right|^{n+2} \right) \quad (4)$$

$$W_{\max}(t) := \max_{0 \leq s \leq t} W(\gamma(s)) \quad (5)$$

ここに、 r_d および m_d は $0 \leq r_d \leq 1$ 、 $m_d > 0$ を満たす実定数である。また、 $W(\gamma)$ は非線形の弾性バネ $g_2(\gamma) \cdot G_2 \gamma$ に蓄えられる弾性エネルギーを表し、 $W_{\max}(t)$

は、時刻 t までに経験した W の最大値を表しており、ダメージの指標となる。

(2) 水平 2 方向バイリニアモデルの構築

まず、3 次元の弾塑性構成モデルに、1 方向の純せん断変形を仮定し、変数の置換えを行うと、1 方向のバイリニアモデルを導出することができる。次に、2 方向の純せん断を仮定し、上述した変数の置換えを行うと、水平 2 方向に対応したバイリニアモデルを導出することができる(紙面の制約から詳細は省略)。この拡張で用いた変数において、水平 1 方向と 2 方向の対応を表-1 にまとめておく。

(3) 水平 2 方向拡張バイリニアモデル

水平 2 方向バイリニアモデルにハードニングおよびダメージを導入して、水平 2 方向の復元力モデルを構築する。具体的には、表-1 の対応に従い式(2)~(4)をそのまま用いると、支承の水平 2 方向のせん断応力のベクトル $\{\bar{\tau}\}$ は、以下のように表される。

$$\{\bar{\tau}\} = g_1(\{\gamma\}) \cdot \{\tilde{f}(\{\gamma\})\} + g_3(t) \cdot g_2(\{\gamma\}) \cdot G_2 \{\gamma\} \quad (6)$$

ただし、 $\{\gamma\}$ はせん断ひずみのベクトルを表す。

参考のため、本拡張方法に従った水平 2 方向のモデルに、図-1 に示した水平 2 方向のひずみ経路を与えた場合における復元力特性を図-2、図-3 に示す。

3. 地震応答解析

(1) 地震応答解析の概要

2 方向での支承の復元力特性が有するハードニング現象や最大変形依存性の影響が橋脚や桁の応答に及ぼす影響について検討する。図-4 に示すように簡易な 2 質点系でモデル化し、地震応答解析を行う。解析モデルに入力する地震動は、これまで観測されている代表的な実地振動を対象に、兵庫県南部地震(JR 鷹取駅)、Northridge 地震(Sylmar Parking Lot)、釧路沖地震(釧路気象台)、東北地方太平洋沖地震(築館)の 4 つの地震動を用い、ハードニングダメージモデルでの支承の最大せん断ひずみが 250% 程度となるように定数倍した。

(2) 考察

地震応答解析の例として兵庫県南部地震において JR 鷹取駅で観測された地震動が作用した南北、東西方向における復元力特性について図-5、図-6 に示す。また、支承の最大ひずみおよび橋脚の塑性率について水平 1 方向と水平 2 方向での比較について表-2 に示す。

まず、図-5 を見ると 1 方向と比べ、2 方向は全体的に少し丸みがあり、復元力履歴ループの膨らみが確認された。しかし、図-6 では確認できなかった。表-2 より、1 方向と 2 方向と比べた結果、支承の最大せん断ひずみが 250% 前後となるような大地震において、大きな差が生じなかった。

表-1 水平1方向と水平2方向での式の違い

	1方向	2方向
せん断応力	$\bar{\tau}$	$\{\bar{\tau}\}$
せん断ひずみ	γ	$\{\gamma\}$
ひずみの絶対値	$ \gamma $	$\ \{\gamma\}\ $
符号関数	$\text{sgn}(\gamma)$	$\{n\} = \{\gamma\} / \ \{\gamma\}\ $

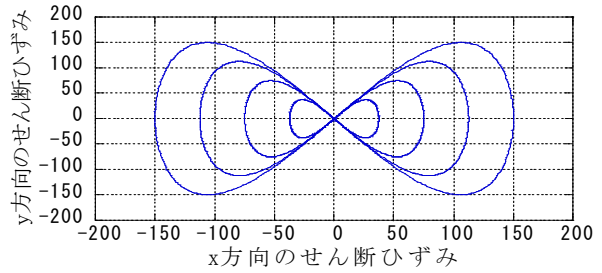


図-1 ひずみの経路

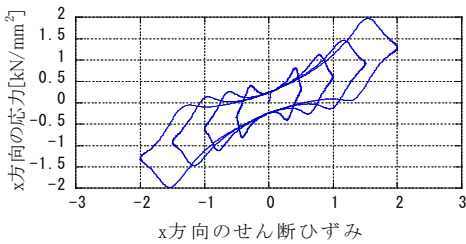


図-2 x方向の復元力特性

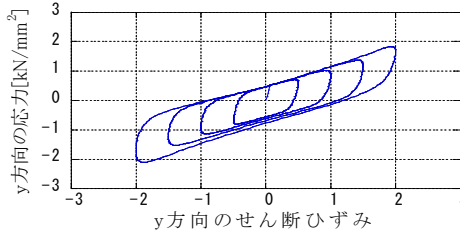


図-3 y方向の復元力特性

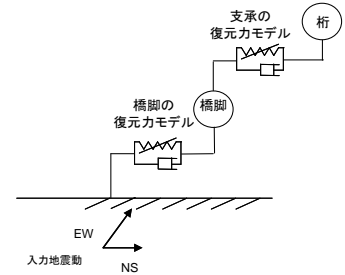


図-4 免震橋梁を模擬した2質点系モデル

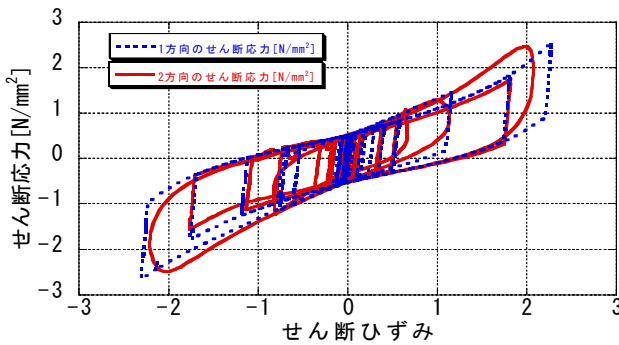


図-5 南北方向における支承のせん断応力-せん断ひずみ関係

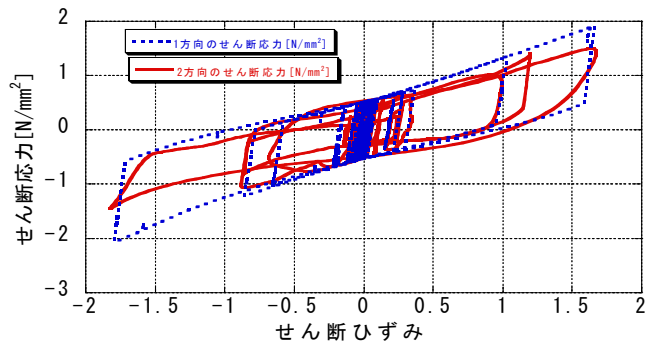


図-6 東西方向における支承のせん断応力-せん断ひずみ関係

表-2 免震橋梁を対象とした水平2方向と1方向での比較

入力地震動	応答の代表値	1方向 (NS)	2方向 (NS)	1方向(EW)	2方向(EW)
兵庫県南部沖地震 (JR 鷹取駅)	橋脚の塑性率	0.88	0.84	0.67	0.49
	支承の最大せん断ひずみ	2.31	2.21	1.73	1.83
Northridge 地震 (Sylmar Parking Lot)	橋脚の塑性率	0.87	0.92	0.52	0.48
	支承の最大せん断ひずみ	2.34	2.34	1.22	1.46
釧路沖地震 (釧路気象台)	橋脚の塑性率	0.76	0.81	0.41	0.39
	支承の最大せん断ひずみ	2.18	2.39	1.13	1.07
東北地方太平洋沖地震 (築館)	橋脚の塑性率	0.94	0.94	0.61	0.64
	支承の最大せん断ひずみ	2.58	2.62	1.64	1.70

4. まとめ

積層ゴム支承の水平2方向荷重に対応した復元力モデルを構築した。また、本モデルを用いて免震橋梁の地震応答解析を行った結果、ハードニング現象や履歴曲線の膨らみが確認された。1方向と2方向と比べた結果、支承の最大せん断ひずみが250%前後となるような大地震において、橋脚の塑性率や支承の最大せん断ひずみに大きな差が生じなかった。

参考文献

1) 吉田純司, 杉山俊幸: 耐震設計における動的応答解析のための免震用積層ゴム支承の拡張バイリニアモデル, 土

木学会論文集 A1, 構造・地震工学, Vol.70, No.2, pp.238-251, 2014.
 2) 阿部雅人, 吉田純司, 藤野陽三: 免震積層ゴム支承の水平2方向を含む復元力特性とそのモデル化, 土木学会論文集 No.696, pp.125-144, 2002.1.
 3) 五十嵐晃, 党紀, 村越雄太, 伊東俊彦: 免震ゴム支承の水平2方向復元力特性に関する載荷実験および復元力モデルの比較検討: 土木学会論文集 A1, 構造・地震工学, Vol.69.No.4,地震工学論文集第32巻, I_311-I_325, 2013.
 4) 八坂厚彦, 飯塚真巨, 竹中康雄, 藤本信夫, 前田祥三: 建築の免震防振法の開発(その13 水平2方軸加力実験のシュミレーション解析), 日本建築学会学術講演梗概集, pp.397-398, 1987. 脚