

ハードニングの大きな免震支承の等価バイリニアモデルの提案

京都大学 学生会員 ○渡邊 康介

京都大学 正会員 植村 佳大

京都大学 正会員 高橋 良和

1. 研究背景・目的

現行の免震支承の設計では、ハードニングを示す履歴挙動を幾何学的にバイリニア形状に変換した履歴モデルが採用されている¹⁾。しかしこのモデルでは、元の履歴とバイリニアモデルの最大せん断応力点を一致させているため、大きなハードニングを示す免震支承の履歴特性を適切にモデル化できているか疑問が残る。

本研究では、非線形モデルとのせん断応力の時刻歴応答の平均二乗誤差を最小とする等価線形モデルを作成する等価線形化概念 (DYN 系) の考え方を利用することで、ハードニングが大きな高減衰積層ゴム支承 (HDR) や鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB) の履歴特性を、最大荷重(最大せん断応力) のみに縛られることなくバイリニア形状でモデル化する方法を提案する。

2. 等価線形化概念に基づくバイリニアモデルの作成

支承のせん断応力-せん断ひずみ関係をバイリニア形状に変換することで得られる材料モデルを「等価バイリニア」と呼ぶ。本研究では、この等価バイリニア形状を決めるパラメータである一次剛性に関するせん断弾性係数 G_1 、二次剛性に関するせん断弾性係数 G_2 、切片荷重に関するせん断応力度 τ_d を、DYN 系の等価線形化概念に基づいて算出する。DYN 系等価バイリニアは、試験結果と履歴吸収エネルギー量が等価であり、かつせん断応力の時刻歴応答の平均二乗誤差が最小となるよう作成されるバイリニアモデルである。具体的には、下記に示す条件付きの最小値問題を解くことで、バイリニア形状を決めるパラメータ G_1 、 G_2 、 τ_d を決定する。

$$\min. \overline{\epsilon^2} = \frac{1}{T} \int_0^T \{f_{ex}(x) - f_{Bi}(x)\}^2 dt \quad (1)$$

$$s.t. \Delta W = 4\tau_d \left(\gamma - \frac{\tau_d}{G_1 - G_2} \right) \quad (2)$$

ここに f_{ex} は試験結果のせん断応力、 T は時刻歴応答の周期、 f_{Bi} は等価バイリニアのせん断応力である。なお、式(2)より、DYN系等価バイリニアの作成には、試験結果のせん断応力の時刻歴応答が必要であるため、以下の式(3)により、試験結果のせん断応力-せん断ひずみ関係をせん断応力の時刻歴応答へと変換する。

$$x = \gamma \sin \omega t \quad (3)$$

ここに、 ω はせん断応力の時刻歴応答の振動数であるが、式(1)の最小値問題の解は ω の値によらないため、任意の値とする。図-1 に DYN 系等価バイリニアの一例を示す。なお、図-1 の等価バイリニア作成に用いた試験結果は、現行の設計モデルの設定根拠となった試験²⁾で、HDR のゴムの弾性係数が $G_e = 1.2(N/mm^2)$ 、せん断ひずみが 175%と 250%のサイクルでの試験結果である。

3. 免震支承設計モデルの提案

(1) 提案モデル概要

本研究では、現行の設計モデルの妥当性検証に用いられた HDR16 体、LRB23 体の免震支承のせん断応力-せん断ひずみ関係³⁾に対して、それぞれ DYN 系等価バイリニアを作成し、そのバイリニア形状を定めるパラメータ G_1 、 G_2 、 τ_d を対象に統計処理(図-2)を行うことで、提案モデル形状を決定した。その際、現行のモデルでは、バイリニアのパラメータがせん断ひずみの値によって変化するが、DYN 系等価バイリニアではせん断ひずみ 175%と 250%での形状の差異が小さいと判断し(図-1)、バイリニアのパラメータはせん断ひずみの値によらず一定の値とした。本研究での各パラメータに対する統計処理の方法は、 G_1 、 G_2 の値をせん断ひずみ 175%と 250%の DYN 系等価バイリニアの G_1 、 G_2 の平均値とし、 τ_d は、安全側の評価となるように、せん断ひずみ 175%における τ_d の最小値とした。なお全ての対象供試体は、

キーワード 免震支承, 設計モデル, 等価線形化, 動的解析

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-139 TEL : 075-383-3246 FAX : 075-383-3244

せん断弾性係数 $G_e = 1.2(N/mm^2)$ であったため、 $G_e = 1.2(N/mm^2)$ の場合における提案モデルを示す。また、LRB の提案モデル形状は、鉛プラグとゴムの面積比 κ に依存するが、対象供試体は、全て $\kappa = 0.069$ であったため、本検討では、 $\kappa = 0.069$ の LRB の提案モデルを導出するに留める。

本研究で提案する HDR と LRB のバイリニアモデルを図-3 に示す。ここで、HDR の提案モデルを、現行の設計式に倣い定式化すると以下のように記述できる。

$$G_1 = c_{h1} G_e \quad (4)$$

$$G_2 = c_{h2} G_e \quad (5)$$

$$\tau_d = \tau_d \quad (6)$$

ここに c_{h1} , c_{h2} , τ_d は、統計処理で得られた定数であり、本検討の結果、 $c_{h1} = 6.11$, $c_{h2} = 0.600$, $\tau_d = 0.623$ となった。また LRB は、以下の式のように記述できる。

$$Q_d = f(\kappa) A_e \quad (7)$$

$$K_1 = g(\kappa) K_2 \quad (8)$$

$$F = h(\kappa) G_e A_e \gamma + Q_d \quad (9)$$

$$f(\kappa) = \tau_d \quad (10)$$

$$g(\kappa) = G_1 / G_2 \quad (11)$$

$$h(\kappa) = G_2 \quad (12)$$

ここに A_e はゴム面積、 Q_d , F , K_1 , K_2 は提案モデルの切片荷重、最大水平荷重、一次剛性、二次剛性、 $f(\kappa)$, $g(\kappa)$, $h(\kappa)$ は統計処理により得られる関数である。本検

討の結果、 $f(0.069) = 0.597$, $g(0.069) = 13.428$, $h(0.069) = 0.804$ となった。

(2) 提案モデルと現行モデルを用いた地震応答解析

免震支承を有する橋梁全体系に対して、地震応答解析を行った。その際、免震支承部分は提案モデルと現行モデルによりモデル化し、比較を行った。その結果、現行モデルは 2 回目の解析で許容誤差内に収まったのに対し、提案モデルは繰り返し計算を行わずに、現行の設計モデルと近い応答を示すことがわかった(図-4)。

4. まとめ

支承の試験結果に対して、DYN 系の等価線形化概念に基づく等価バイリニアを作成し、それらを統計処理することで、免震支承に対する新たなバイリニアモデルを提案した。本モデルは、現行モデルと異なり、動的解析での繰り返し計算を必要とせず、検討の範囲においては、現行モデルと同等の精度で応答を再現できた。

謝辞：ゴム支承協会より、免震支承の供試体情報および試験結果をご提供いただきました。謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋支承便覧, 2018
- 2) 高橋良和, 篠原聖二, 星隅順一: 免震支承の設計モデルの高度化, 第 17 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.325-332, 2014
- 3) 篠原聖二, 榎本武雄, 星隅順一, 岡田慎哉, 高橋良和: ゴム支承の終局限界状態の評価に関する研究, 第 17 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.333-340, 2014

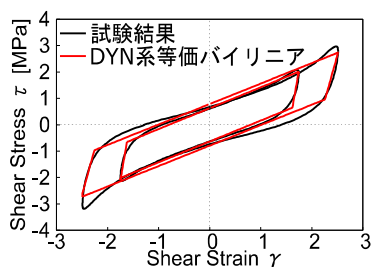


図-1 DYN 系等価バイリニア

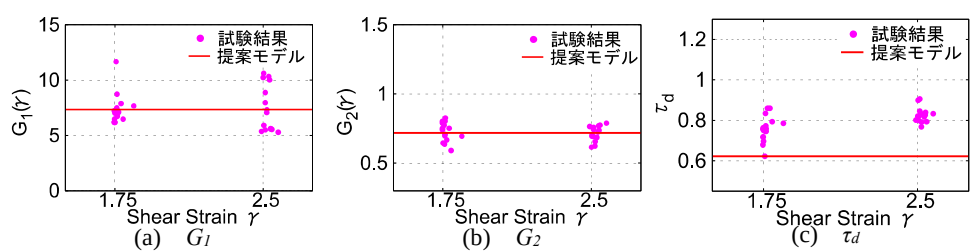


図-2 DYN 系等価バイリニアのパラメータに対する統計処理(HDR の場合)

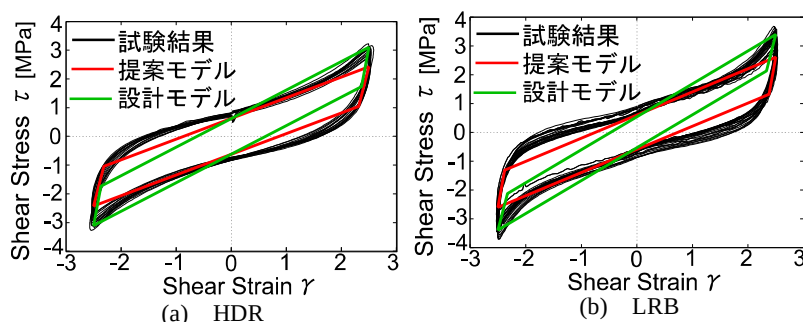


図-3 本研究で提案する免震支承のバイリニアモデル

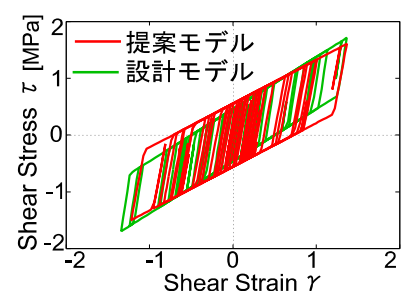


図-4 提案モデルと設計モデルを用いた地震応答解析結果