

免震支承の要素別非線形履歴特性評価法に関する検討

川口金属工業（株） 正会員 ○姫野 岳彦， 鶴野 禎史

1. はじめに

免震支承を用いた免震橋梁の設計・施工が一般化され、近年では、さらなる高性能化、高機能化が求められてきている。機能分離型支承などに代表される摩擦減衰効果を期待した構造形式や粘性減衰あるいは履歴減衰性能を有するダンパー等の採用事例もそれらの一例であるが、ゴム系の免震支承技術としても、例えば鉛に代わる減衰材料として、錫プラグの研究¹⁾が行われるなど、今後も新しい材料開発が進められることが予想される。

筆者らはすでに開発・実用化を果たし、多くの実績を蓄積しつつある「スプリング拘束型鉛プラグ入り積層ゴム支承」(Spring confined Pb Rubber bearing：略称 SPR)²⁾を対象に、免震支承を構成するゴムと鉛の個々の要素を別々にモデル化した、新しい非線形履歴特性評価式の構築を行っている。ここで用いた思想は、今後、多様化が予想される免震支承開発においても重要となることから、本稿では、まず現行の設計法の特徴を総括し、その上で各要素の重ねあわせによる免震支承の特性評価法について提案する。

2. 免震支承設計式

免震支承は一般にバイリニア型にモデル化されるが、この場合、履歴形状の決定および設計に用いる指標の算出のためには、図-1に示す5つのパラメータ ($G_B, h_B, \tau_d, G_1, G_2$) を定める必要がある。これらは実験データからの回帰が必

要なものと、バイリニア型の構成則から計算により求められるものとに分類できるが、現行基準のモデル化手法をみると、結果的に得られる特性値には有意な差違は生じないものの、その詳細は若干異なっていることが分かる(表-1)。

特に鉛プラグ入り積層ゴム支承のモデル化に関しては、道路橋支承便覧³⁾では、天然ゴム要素を線形として扱い、免震支承の非線形性(ひずみ依存性)を鉛要素の特性として1つに集約して評価しているが、ISO⁴⁾ではゴムと鉛の両方に非線形性(ひずみ依存性)を考慮している。

この天然ゴム要素の評価法に関しては、従来は線形部材としての取り扱いが一般的であったが、最近では天然ゴムの減衰特性を積極的に設計に取り込むようになり、また、約100体の製品サンプルによる調査結果からは2~9%程度の減衰性能を有しており、少なからず非線形履歴特性を示す実態が明らかにされている³⁾。また、今後の免震支承の高

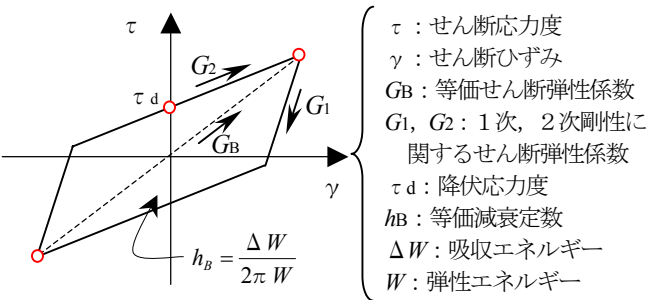


図-1 バイリニアモデルの特性値

表-1 免震支承のモデル化手法の比較

	実験データから回帰を行う項目	構成則から算出される項目	備考
鉛プラグ入り積層ゴム支承 (道路橋支承便覧 ³⁾)	①ピーク値から G_B 、切片から τ_d ②履歴面積から G_1 を回帰(実験値と等価となるように設定)	①' $G_2 = (G_B \gamma - \tau_d) / \gamma$ ②' $h_B = \frac{2\tau_d \{ \gamma + \tau_d / (G_2 - G_1) \}}{\pi \gamma (\tau_d + \gamma G_2)}$	$G_B = G_e + q(\gamma) \cdot \kappa / \gamma$ と表現し、 ゴム(第1項)は線形、鉛(第2項)のみ非線形性を考慮
鉛プラグ入り積層ゴム支承 (ISO 22762-2 ⁴⁾)	①切片から τ_d 、2次勾配から G_2 ②履歴面積から G_1 を回帰(実験値と等価となるように設定)	①' $G_B = \tau_d / \gamma + G_2$ ②' $h_B = \frac{2\tau_d \{ \gamma + \tau_d / (G_2 - G_1) \}}{\pi \gamma (\tau_d + \gamma G_2)}$	$G_2 = C_r(\gamma) G_e + C_p(\gamma) G_p$ と表現し、 ゴム(第1項)と鉛(第2項)ともに非線形性を考慮
高減衰積層ゴム支承 (道路橋支承便覧 ³⁾)	①ピーク値から G_B 、2次勾配から G_2 ②履歴面積から h_B を回帰 (③ G_1 を実験値から回帰)	①' $\tau_d = (G_B - G_2) \gamma$ ②' -	G_1 は構成則から算出可能であるが、ここでは回帰による
高減衰積層ゴム支承 (ISO 22762-2 ⁴⁾)	①ピーク値から G_B 、切片から τ_d ②履歴面積から h_B を回帰	①' $G_2 = (1 - U) G_B$ ②' $G_1 = \frac{2U - \pi h_B (1 - U)}{2U - \pi h_B} G_B$	思想的には上記の道路橋支承便覧とほぼ同じ ※ $U = \tau_d / G_B \gamma$

キーワード 免震支承，天然ゴム，鉛，バイリニアモデル，非線形履歴

連絡先 〒332-8502 埼玉県川口市宮町18-19 川口金属工業（株）技術本部技術一部 TEL 048-259-1154

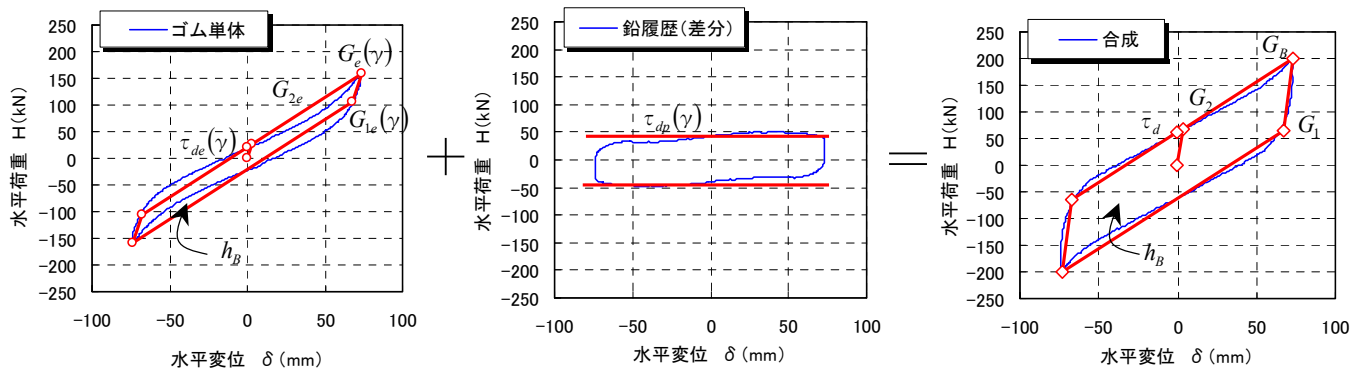


図-2 各要素別のモデル化

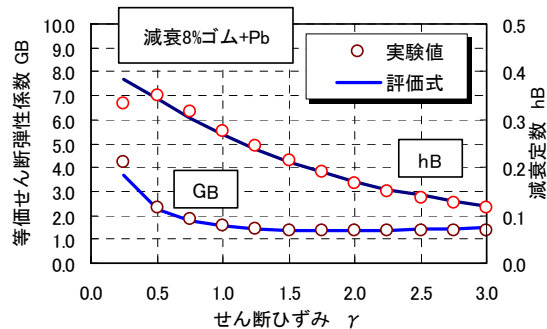


図-3 重ねあわせによる推定精度（ゴム要素の減衰8%）

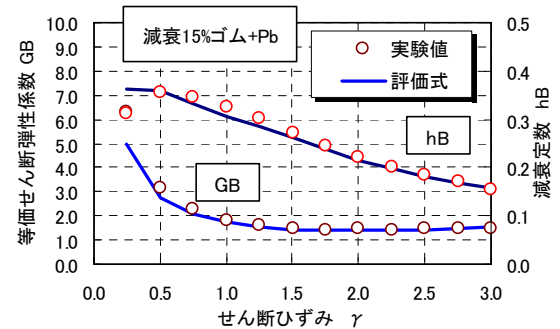


図-4 重ねあわせによる推定精度（ゴム要素の減衰15%）

機能化等のためには、ゴム要素に積極的に減衰効果を付加するケースなども想定される。したがって、鉛プラグ入り積層ゴム支承のモデル化にあたっては、ゴム要素に対しても非線形評価を行うことが重要となる。

よって、ここでは、免震支承を個々の要素ごとに分割して評価を行うことを考え、鉛挿入孔を有するゴム体に対し、鉛挿入前後で同一条件の载荷実験を行い、その両者の履歴曲線の差分から鉛特性を抽出して、各要素別にモデル化の検討を行った。また、得られた各モデルから重ねあわせによる評価式を作成し、免震支承全体の特性推定に関する精度検証を行った。

3. 要素別モデルと重ねあわせによる評価

以下、本稿で提案する手法の概略を示す（図-2 参照）

(1) ゴム要素のモデル化

表-1 に示す高減衰積層ゴム支承のモデル化を参考に、実験回帰・構成則からの算出等の作業により評価を行う。

- ① $G_e(\gamma)$: ピーク点に対する割線として実験値から回帰
- ② $\tau_{de}(\gamma)$: 履歴曲線における切片として実験値から回帰
- ③ G_{2e} の算出 : $G_{2e} = (G_{Be}\gamma - \tau_{de}) / \gamma$
- ④ $G_{1e}(\gamma)$: 履歴曲線から h_{Be} を求め、また、上記①～③をふまえ、 h_{Be} に一致するように G_{1e} を逆算する。

$$G_{1e}(\gamma) = \frac{2U - \pi h_{Be}(1-U)}{2U - \pi h_{Be}} G_e \quad (\text{※ } U = \tau_{de} / G_e \gamma)$$

なお、このように求めた G_1 は面積比を一致させるために

設定した仮想の剛性であるため、例えば鋼材の降伏剛性などとは力学的な意味合いが異なることに留意が必要である。

(2) 鉛要素のモデル化

鉛特性は矩形（図-2）となるため、 y 切片をモデル化する。

- ① $\tau_{dp}(\gamma)$: 履歴曲線における切片として実験値から回帰

(3) 各要素の重ねあわせ

上記の要素別モデルに対して、一定以上のデータ数を確保した上でパラメータを一般化し、得られた各特性値から、免震支承としての履歴特性を下記により推定する。なお、この手法によれば、ゴムまたは鉛要素の一方の特性が変更になっても、その効果を容易に推定することが可能となる。

- ① 等価剛性 : $G_B = G_e(\gamma) + \tau_{dp}(\gamma) \cdot \kappa / \gamma$ (※ $\kappa = A_p / A_e$)
- ② 降伏荷重 : $\tau_d = \tau_{de}(\gamma) + \tau_{dp}(\gamma) \cdot \kappa$
- ③ 2次剛性 : $G_2 = (G_B \gamma - \tau_d) / \gamma$
- ④ 1次剛性 : $G_1 = G_{1e}(\gamma) + \tau_{dp}(\gamma) \cdot \kappa \cdot (G_{1e} - G_{2e}) / \tau_{de}(\gamma)$
- ⑤ 減衰定数 : $h_B = \frac{2\tau_d \{ \gamma + \tau_d / (G_2 - G_1) \}}{\pi \gamma (\tau_d + \gamma G_2)}$

4. 実験データによる妥当性の検証

本稿で提案した重ねあわせによる評価式と実験データとの比較を図-3, 4 に示す。この結果から、免震支承を構成する個々の特性が把握できていれば、精度良く、全体の特性を推定できることが分かる。

参考文献 1) 山口ら: 錫プラグ入り積層ゴム免震装置の開発, 建築学会概説集, pp.747-748, 2005.9 など, 2) 金井ら: スプリング拘束型鉛プラグ入りゴム支承の基本特性, 土木学会年次講演会, pp.921-922, 2002.9, 3) 日本道路協会: 道路橋支承便覧, 2004.4, 4) ISO 22762-2 Elastomeric seismic-protection isolators-Part2, 2005.7