

ハードニング特性を有する免震ゴム支承に適した 等価バイリニアモデルの提案

植村 佳大¹・渡邊 康介²・高橋 良和³

¹正会員 工博 京都大学助教 工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
²正会員 工修 中部電力株式会社 再生可能エネルギーカンパニー（〒428-0411 静岡県榛原郡川根本町千頭814-1）
³正会員 工博 京都大学教授 工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

1. 背景

現行の免震ゴム支承の設計では、過去の試験結果踏まえ、免震ゴム支承の履歴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⁾。具体的には、一般的な等価線形化手法である Geometric Stiffness法の等価剛性に基づき、元の履歴と最大せん断応力点を一致させたバイリニアモデルが採用されている。しかし、免震ゴム支承は、大変形領域におけるハードニングの影響が顕著になるため、履歴の最大せん断応力点に追従する Geometric Stiffness法の考え方は、せん断ひずみが大きい領域では適切でない可能性が考えられる。

そこで本研究では、ハードニング特性を有する免震ゴム支承に適した新たな設計モデルの構築を目的に、Caughey²⁾により提案された等価線形化手法である Dynamic Stiffness法に着目した検討を行う。Dynamic Stiffness法とは、非線形履歴との復元力の時刻歴応答の平均二乗誤差が最小となる等価な線形モデルを作成する考え方である。この考え方を利用することで、たとえ免震ゴム支承のハードニング特性が顕在化したとしても、最大せん断応力点の変化に過度に追従せず、履歴全体の形状を考慮した等価なバイリニアモデルが作成できると考えられる。

2. 等価線形化手法と免震ゴム支承の現行設計

(1) 等価線形化法

本節では、いくつか提案されている等価線形化手法のうち、現行の設計において広く利用されている

Geometric Stiffness法と、本研究で着目する Dynamic Stiffness法について述べる。

a) Geometric Stiffness法

Geometric Stiffness法は、非線形履歴の荷重変位関係の最大変位点における割線剛性を等価剛性とし、1周期で消費される履歴吸収エネルギー量から等価減衰定数を求める等価線形化手法である。例えば、図-1に示す非線形履歴に対する等価剛性 k_e と等価減衰定数 h_e は、それぞれ以下のように表される。

$$k_e = F/X \quad (1)$$

$$h_e = \frac{\Delta W}{4\pi W} \frac{\omega_e}{\omega} \quad (2)$$

ここに、 F は最大復元力、 X は最大変位、 ΔW は1周期の履歴吸収エネルギー、 W は等価剛性に対する弾性エネルギー、 ω_e は等価固有振動数、 ω は外力振動数である。Geometric Stiffness法は、幾何学的情報から等価線形化パラメータを求めることができる簡易的な手法であり、道路橋支承便覧¹⁾では Geometric Stiffness法が等価線形化法として用いられている。

b) Dynamic Stiffness法

Dynamic Stiffness法は、式(3)に示すような非線形履歴に関する一自由度運動方程式に対して、式(4)

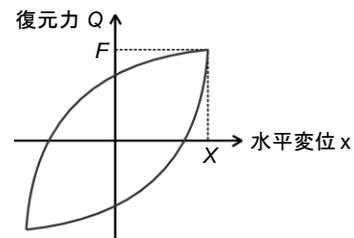


図-1 非線形履歴の一例

に示す誤差項 ε_e を含む等価な線形モデルの一自由度運動方程式を考え、この誤差項 ε_e の二乗平均を最小とするように等価線形モデルの等価剛性 k_e と等価減衰係数 c_e を決定する方法である。その際、非線形一自由度系の応答は、近似的に式(5)に示す定常応答であると仮定する。

$$m\ddot{x} + Q(x) = F_0 \cos \omega t \quad (3)$$

$$m\ddot{x} + c_e \dot{x} + k_e x + \varepsilon_e(x, t) = F_0 \cos \omega t \quad (4)$$

$$x = X \cos(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

ここに、 m は質量、 Q は非線形復元力、 F_0 は外力振幅、 x は応答変位、 t は時間、 φ は入力と応答の位相差である。そして、等価剛性 k_e と等価減衰定数 h_e は、それぞれ以下のように表される。

$$k_e = C(X)/X \quad (6)$$

$$h_e = \frac{S(X)}{2C(X)} \frac{\omega_e}{\omega} \quad (7)$$

ここに、 $S(X)$ および $C(X)$ は非線形モデルにおける履歴曲線を表す関数であり、以下のように表される。

$$C(X) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} Q(X \cos \theta) \cos \theta d\theta \quad (8)$$

$$S(X) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} Q(X \cos \theta) \sin \theta d\theta \quad (9)$$

なお、 $\theta = \omega t + \varphi$ である。また、非線形モデルの履歴面積 ΔW は、 $S(X)$ を用いると以下ようになる。

$$\Delta W = \pi X S(X) \quad (10)$$

さらに、式(6)と式(10)を用いて式(7)を整理すると、Dynamic Stiffness法における等価減衰定数 h_e も、Geometric Stiffness法と同様に、式(7)と同様に書き換えられる。そのため、両等価線形化法の違いは、等価剛性の考え方であると捉えることができる。

また、Dynamic Stiffness法では、元の非線形履歴と等価線形化モデルの共振周波数が一致するように等価剛性が決定されており、元の非線形モデルの振動特性を考慮できる手法であることが知られている。

(2) 現行の免震ゴム支承の設計¹⁾について

a) 高減衰積層ゴム支承 (HDR)

HDRの設計では、最大せん断応力点が試験結果と一致するよう、バイリニアモデルが決定されている。HDRの設計バイリニアモデルの履歴形状を決定するパラメータは、以下に示す式により算定される。

$$G_1 = c_{h1}(\gamma) G_e \quad (11)$$

$$G_2 = c_{h2}(\gamma) G_e \quad (12)$$

$$\tau_d = \gamma(G(\gamma) - G_2(\gamma)) \quad (13)$$

ここに、 G_1 および G_2 は一次剛性および二次剛性に関するせん断弾性係数、 τ_d は切片荷重に対応するせん断応力度、 γ はせん断ひずみ、 c_{h1} および c_{h2} はひずみ依存係数、 G_e はせん断弾性係数、 G はGeometric Stiffness法に基づく等価せん断弾性係数である。

b) 鉛プラグ入り積層ゴム支承 (LRB)

LRBの設計においても、最大せん断応力点が試験結果と一致するよう、バイリニアモデルが決定されている。LRBの設計バイリニアモデルの履歴形状を決定するパラメータは、以下の式により算定される。

$$F = c_r(\gamma) G_e A_e \gamma + q(\gamma) A_p \quad (14)$$

$$K_1 = 6.5 K_2 \quad (15)$$

$$Q_d = \alpha q_0(\gamma) A_p \quad (16)$$

ここに、 F はせん断荷重、 K_1 は一次剛性、 K_2 は二次剛性、 Q_d は切片荷重、 γ はせん断ひずみ、 c_r はゴムのせん断ひずみ依存係数、 q は鉛プラグのせん断応力度、 G_e はゴムのせん断弾性係数、 A_e はゴムの断面積、 A_p は鉛プラグの断面積、 α は鉛プラグのせん断応力補正係数、 q_0 を降伏荷重の算定に用いる鉛プラグのせん断応力度である。

c) 過去の試験結果³⁾との比較

過去に行われたHDRおよびLRBに対する試験で得られた履歴曲線³⁾と、試験体の寸法および材料特性から算出される設計バイリニアモデルとの比較の一例を図-2に示す。図より、現行設計モデルは、実際の履歴形状を正確に表現できていないといえる。これは、ハードニング特性を示す免震ゴム支承の履歴特性に対して、最大せん断応力度を一致させるよう設計バイリニアモデルが設定されているためである。

d) 設計バイリニアモデルのひずみ依存性

式(11)~(16)より、現行の設計バイリニアモデルの履歴形状を定めるパラメータは、せん断ひずみ依存性を有していることがわかる。そのため、免震橋梁全体系に対して非線形動的解析による照査を行う場合、免震ゴム支承の最大変形量がモデル化時に想定した値に近づくまで、繰り返し計算を行うよう規定

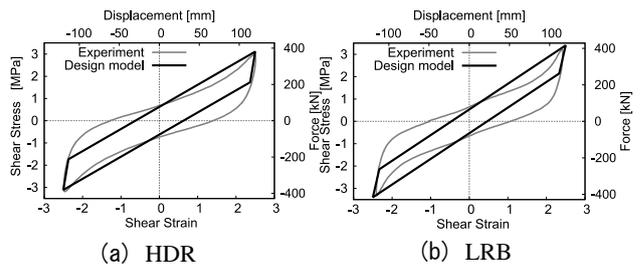


図-2 過去の試験結果³⁾と現行設計モデル¹⁾との比較

されている。そのため、複雑な橋梁全体系で地震応答解析をする際に、煩雑なモデルをその都度組み直すことに繋がり、計算コストが増大してしまう。これは、現行設計における課題の一つといえる。

3. 等価バイリニアの作成法

(1) 等価バイリニアについて

本研究では、非線形応答を表す任意の履歴形状を、等価線形化法の考え方に基づいてバイリニア型の履歴形状に変換することで得られるバイリニアを、「等価バイリニア」と定義し、Dynamic Stiffness法およびGeometric Stiffness法に基づく等価バイリニア(DYN系等価バイリニアおよびGEO系等価バイリニアと呼ぶ)の作成法を提案する。「等価バイリニア」という言葉は、井嶋ら⁴⁾の検討でも用いられているが、その検討では、免震支承に要求する剛性比および固有周期の範囲の中で、等価減衰定数が最大となるバイリニアを指しており、本論文が提案する等価バイリニアとは異なるものである。また本検討では、元となる非線形応答の縦軸をせん断応力、横軸をせん断ひずみと仮定して、等価バイリニアの作成法について述べる。

(2) DYN系等価バイリニアの作成法

DYN系等価バイリニアは、元の履歴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二乗誤差が最小となるよう作成されるバイリニアである。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定するための3変数、 G_1 、 G_2 、 τ_d を算出する。

$$\min. \bar{\varepsilon}_e^2 = \int_0^T \{f_E(\gamma) - f_B(\gamma)\}^2 dt \quad (17)$$

$$\text{s.t. } \Delta W = 4\tau_d \left(\gamma_a - \frac{\tau_d}{G_1 - G_2} \right) \quad (18)$$

ここに、 f_E は元の非線形応答のせん断応力、 f_B は等価バイリニアのせん断応力、 T は応答周期、 γ_a は応答せん断ひずみの振幅である。DYN系等価バイリニアの作成には、元の履歴の時刻歴応答が必要であることから、式(19)に示すように元の応答変位の時刻歴が正弦波になると仮定する。

$$\gamma = \gamma_a \sin \omega t \quad (19)$$

なお、式(18)に示すせん断応力の時刻歴応答の誤差 $\bar{\varepsilon}_e^2$ は振動数 ω の値によらないため、対象の応力-ひずみ関係を時刻歴応答に変換する際の振動数の値は任意である。そして、式(18)の条件の下で平均二乗

誤差 $\bar{\varepsilon}_e^2$ が最小となるような G_1 、 G_2 、 τ_d の組み合わせを探索することで、バイリニア形状を決定する。

ここで、LRBの試験結果³⁾を対象に作成したDYN系等価バイリニアを図-3に示す。図より、設計バイリニアモデルでは元の履歴と最大せん断応力を一致させているのに対して、DYN系の等価バイリニアでは、ハードニング特性が顕著になったとしても、せん断応力-せん断ひずみ関係全体をフィッティングするような形になっていることが分かる。

(3) GEO系等価バイリニアの作成法

GEO系等価バイリニアは、履歴の最大応力点と履歴吸収エネルギー量が試験結果と等価になるよう作成するバイリニアモデルである。具体的には、以下の3式を連立させることで、バイリニアモデルの形状を決定するための3変数 G_1 、 G_2 、 τ_d を算出する。

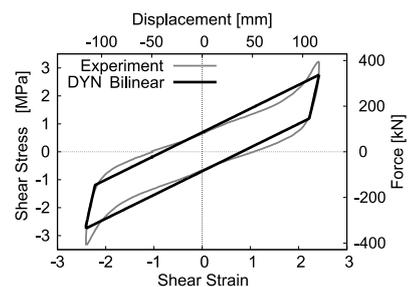
$$\tau_a = G_2 \gamma + \tau_d \quad (20)$$

$$\Delta W = 4\tau_d \left(\gamma_a - \frac{\tau_d}{G_1 - G_2} \right) \quad (21)$$

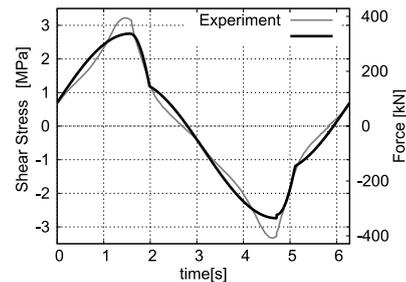
$$G_1 = \beta G_2 \quad (22)$$

ここに、 τ_a は元の非線形応答の最大せん断応力である。また、等価バイリニアを作成するためには、式(22)により一次剛性と二次剛性の比 β を設定することで、等価バイリニアの作成が可能となる。

なお、現行の設計モデルは、LRBとHDRとで一部設定理念に違いはあるものの、いずれも試験結果と比べて最大応力点が等価で、試験結果の履歴吸収エネルギー量を安全側に見積もりバイリニアモデルが



(a) 履歴の比較



(b) 復元力の時刻歴の比較

図-3 過去の試験結果³⁾のDYN系等価バイリニアモデル

作成されている。そのため、現行の設計モデルは、履歴吸収エネルギー量を小さく見積もったGEO系等価バイリニアとみなすことができる。

(4) 等価バイリニアにおけるせん断ひずみ依存性

HDRおよびLRBの試験結果³⁾から算出したそれぞれのDYN系およびGEO等価バイリニアの一例を、せん断ひずみ175%と250%のケースで重ねて示す(図-4)。図より、GEO系等価バイリニアと比べて、DYN系等価バイリニアはせん断ひずみ175%と250%で形状の差が小さく、バイリニア形状を決定するパラメータのせん断ひずみ依存性が小さいことが分かる。これは、DYN系の等価バイリニアでは、支承のハードニングが顕著になったとしても、せん断応力-せん断ひずみ関係における最大せん断応力の増加に対して、過度に影響されることなくバイリニア形状が決定されるためであるといえる。

以上から、DYN系等価バイリニアの考え方をを用いることで、せん断ひずみ175%と250%での支承のせん断応力-せん断ひずみ関係を同一形状のバイリニ

アで表現できれば、先述した免震橋梁に対する非線形解析の繰り返し計算が不要となる可能性がある。

4. 等価バイリニアの動的特性に関する検討

(1) 本章の目的および解析モデルについて

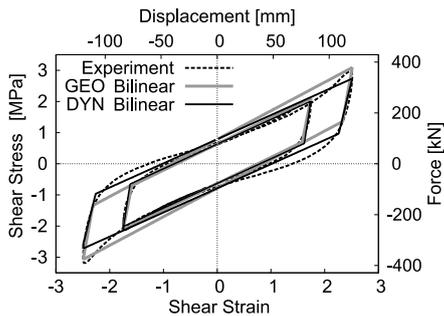
本章では、等価バイリニアが示す動的特性に関する検討を行う。具体的には、過去のLRBのせん断ひずみ250%の試験結果³⁾を表す非線形モデル(Experimentモデル)を作成し(図-5(a))、そのExperimentモデルに対するDYN系およびGEO系等価バイリニアを作成する(図-5(b)(c))。そして、Experimentモデル、DYN系およびGEO系等価バイリニアの3種類の復元力特性を持つ1質点系に対して検討を行う。なお、1質点系における質点荷重は75000kgとした。これは対象とする試験における面圧が6.0N/mm²であることに倣ったためである。

(2) 正弦波外力に対する動的解析

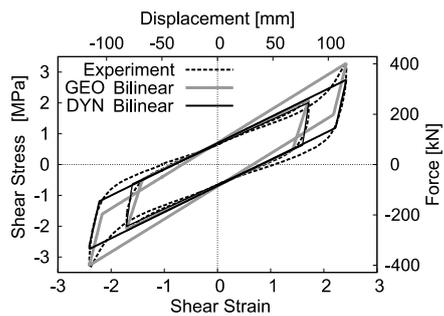
本検討では、Experimentモデルにせん断ひずみ250%相当の変位が生じるような大きさの正弦波を外力とし、その振動数は支承のせん断弾性係数から算出される固有周波数 $\omega = 6.3901$ の他、せん断弾性係数の1/2倍、2倍に対して、質点荷重で除したのち平方根をとることで定まる周波数 $\omega = 4.5184$ 、 9.0370 の3ケースとした。

ここで、各ケースの解析結果を図-6に示す。図より、全てのケースにおいて、GEO系等価バイリニアよりもDYN系等価バイリニアの応答値がExperimentモデルに近いことがわかる。

以上より、本解析で得られた応答結果の範囲では、DYN系等価バイリニアの方が元のExperimentモデルの挙動を表現する上で優れていることが確認された。これは、DYN系等価バイリニアでは、元の履歴と共振周波数が一致するよう等価剛性が算出されており、元の履歴の動的特性が考慮されたモデルとなっているためであると考えられる。また、現行の設計バイ

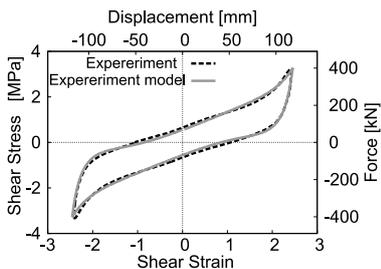


(a) HDR

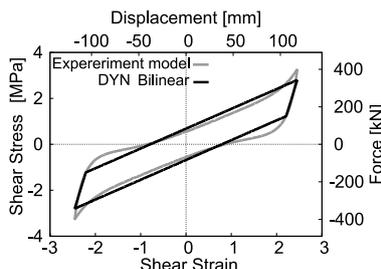


(b) LRB

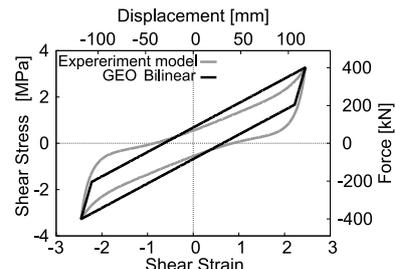
図-4 等価バイリニアモデル形状の比較



(a) Experiment モデル



(b) DYN 系等価バイリニア



(c) GEO 系等価バイリニア

図-5 動的解析で用いた解析モデル

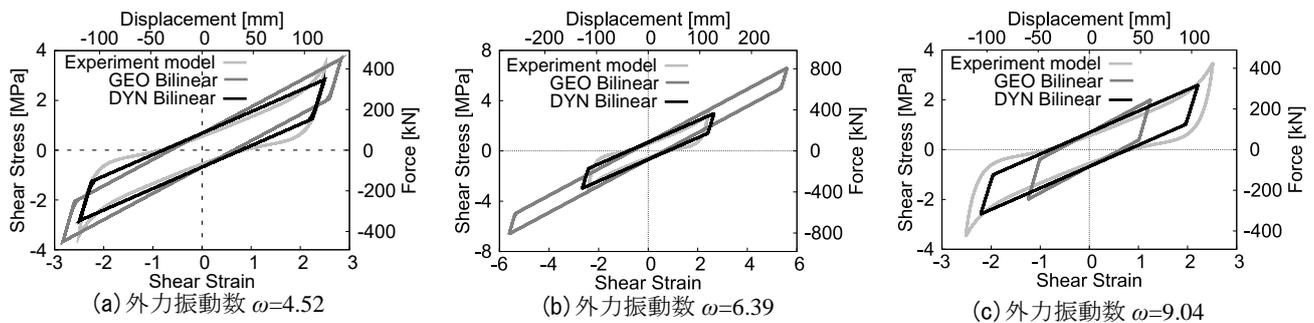


図-6 正弦波外力に対する動的解析の結果

リニアモデルは、GEO系等価バイリニアと同様の考え方で非線形履歴をバイリニアに置換しているため、GEO系等価バイリニアと同様、元の非線形履歴の動的特性が正しく反映されない可能性が考えられる。

(3) 等価バイリニアの応答倍率

Caughey²⁾は、非線形1質点系における最大応答と外力の振動数との関係式を導出することで、非線形1質点系における応答倍率を算出している。そこで、前節での動的解析で用いた、せん断ひずみ250%のExperimentモデルに対し作成したDYN系およびGEO系等価バイリニアの応答倍率を図-7に示す。図より、外力振動数 $\omega=6.39$ の付近では、非線形の周波数応答関数のグラフの傾きが大きくなっており、周波数変化に対して敏感に応答が変化することがわかる。そのため、振動数 $\omega=6.39$ のケースでは、GEO系等価バイリニアとそれ以外のモデルで、大きな差が生じたのだと考えられる。一方で、振動数が大きな領域ではそれぞれの非線形の周波数応答関数の差が小さくなる傾向にあることがわかり、実際に図-6に示すような解析結果が得られたと考えられる。

(4) 地震波外力に対する動的解析

本節では、せん断ひずみ250%のExperimentモデルから作成したDYN系およびGEO系等価バイリニアを復元力特性として有する非線形1質点系に対し、地震応答解析を行う。入力地震波は兵庫県南部地震とし、地盤種別の異なる2つの地震波とした。

各地震波を入力した結果を図-8に示す。図より、DYN系・GEO系等価バイリニアの間で、先述の正弦波解析の結果ほどの差は生じないことが分かる。これは、地震波には様々な周波数の波が含まれていることから、図-7における応答倍率上で議論した外力周波数変化が応答に与える影響が平滑化されたためであると考えられる。即ち、地震応答解析をする上で、DYN系とGEO系の両手法による等価バイリニアの応答の差は生じにくい可能性があるといえる。

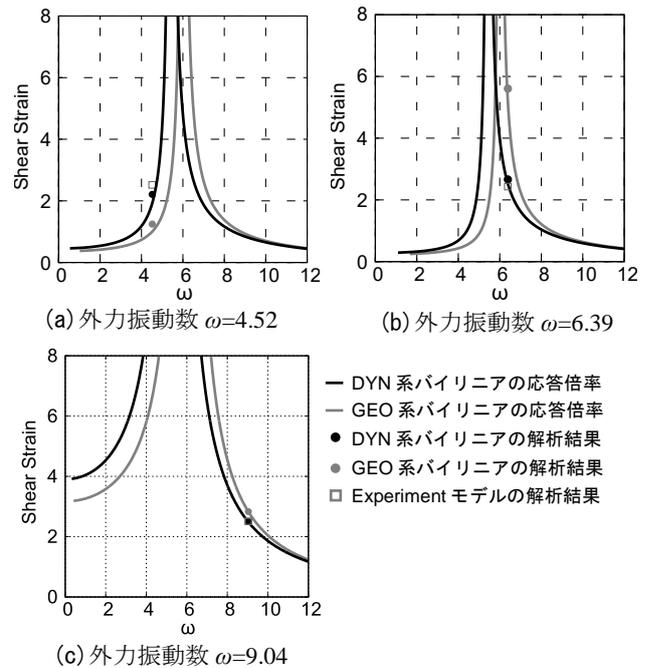


図-7 各振動数の応答に対して作成した等価バイリニアの応答倍率

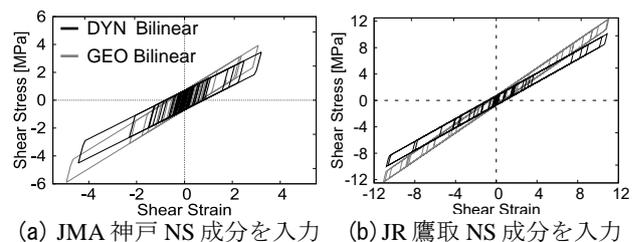


図-8 等価バイリニアに対する地震応答解析の結果

5. DYN系等価バイリニアに基づく高減衰ゴム支承(HDR)の設計モデル

(1) 過去の試験結果に対するDYN等価バイリニア作成

a) 検討概要

本節では、DYN系等価バイリニアに基づくHDRの設計モデル提案に先立ち、過去に行われたHDR16体に対する試験結果³⁾に対してDYN系等価バイリニアを作成し、DYN系等価バイリニアの履歴形状を決定するパラメータである G_1 、 G_2 、 τ_d を算出する。対象とする供試体の寸法は、全て240mm × 240mm

である。また、供試体は国内のHDRを製造する民間会社6社の製品であり、供試体のせん断弾性係数は全て1.2N=mm²である。

b) 検討結果および考察

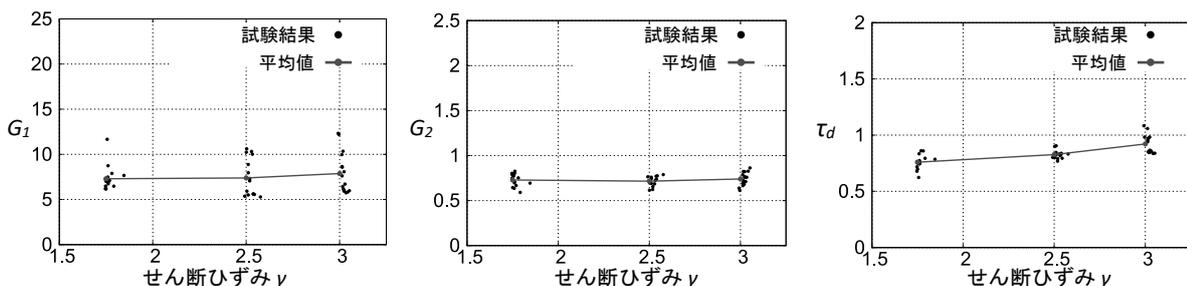
図-9にDYN系等価バイリニアの各種パラメータとせん断ひずみの関係を示す。図より、HDRのDYN系等価バイリニアでは、 G_1 および G_2 のせん断ひずみ依存性は小さいことが分かる。よって、DYN系等価バイリニアの基づいて設計バイリニアモデルを作成することで、 G_1 および G_2 におけるせん断ひずみ依存性を除去したモデル化が可能であるといえる。

一方、 τ_d に関しては若干のせん断ひずみ依存性が確認できる。これは、DYN系等価バイリニアにて元の履歴全体をフィッティングさせるよう形状が決定される中で、免震ゴム支承のハードニングによる履歴吸収エネルギー量の増加が、 τ_d の増加によって表現されるためである。しかし、免震ゴム支承の一般的な許容せん断ひずみである250%までの領域では、せん断ひずみ依存性は顕著ではない。また、図-9(c)で確認されたひずみ依存性を考慮せず、試験結果の下限値を設計モデルの τ_d と定めることで、履歴吸収エネルギー量を安全側に評価できるといえる。

以上から、DYN系等価バイリニアに基づくHDRの設計バイリニアモデルの作成にあたり、本検討では、 G_1 および G_2 に関しては、175%と250%のひずみにおける全ての値の平均値を代表値とし、 τ_d に関しては、設計バイリニアモデルの履歴吸収エネルギー量を安全側とするために、175%のひずみ時の下限値を代表値とすることとする。

(2) DYN系等価バイリニアに基づくHDRの設計モデル定式化

本節では、DYN系等価バイリニアに基づく設計モデルを、現行設計モデルの形式に倣って定式化することで、現行設計体型を変更せずとも提案モデルを実装可能とすることを目指す。なお、本研究において用いた試験結果が $G_e=1.2$ のケースのみであったため、 $G_e=1.2$ の場合を例に考えることとする。



(a) 一次剛性に関するせん断剛性係数 (b) 二次剛性に関するせん断剛性係数 (c) 切片荷重に対応するせん断応力度

図-9 HDRの試験結果³⁾から得られたDYN系等価バイリニアの各種パラメータ

HDRに関する現行の設計バイリニアモデルは、式(11)~(13)により形状が決定される。そこで、提案モデルの形状を決定するパラメータを、現行モデルの形式に倣って記述すると、以下のように表せる。

$$G_1 = c'_{h1} G_e \quad (23)$$

$$G_2 = c'_{h2} G_e \quad (24)$$

$$\tau_d = \tau'_d \quad (25)$$

ここで、各パラメータ c'_{h1} 、 c'_{h2} 、 τ'_d は、前節にて行った統計処理で得た代表値 $\overline{G_1}$ 、 $\overline{G_2}$ 、 $\overline{\tau_d}$ を用いて、以下のように表される。

$$c'_{h1} = \overline{G_1} / G_e \quad (26)$$

$$c'_{h2} = \overline{G_2} / G_e \quad (27)$$

$$\tau'_d = \overline{\tau_d} \quad (28)$$

上記の式により、 $c'_{h1}=6.11$ 、 $c'_{h2}=0.600$ 、 $\tau'_d=0.623$ と算出できる。図-10に、実際に作成した設計バイリニアモデルを示す。

以上のように、DYN系等価バイリニアに基づいたモデル化を行うことで、ハードニングによる最大せん断応力点の変化に過度に追従することなく履歴全体の形状を考慮できる新たな設計バイリニアモデルを、ひずみ依存性がない形で定式化できたといえる。

6. DYN系等価バイリニアに基づく鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)の設計モデル

(1) 過去の試験結果に対するDYN等価バイリニア作成

a) 検討概要

前章でのHDRに対する検討と同様、過去に行われたLRB23体に対する試験結果³⁾に対してDYN系等価バイリニアを作成する。その際、LRBの設計では、ゴムと鉛プラグの面積比 κ が構造パラメータの一つとなるが、本検討にて参照可能であった $\kappa=0.069$ の1パターンのみであった。なお、対象とする供試体の寸法は全て240mm×240mmであり、国内のゴム

支承を製造する民間会社6社の製品であり、供試体のせん断弾性係数は全て 1.2N/mm^2 であった。

b) 検討結果および考察

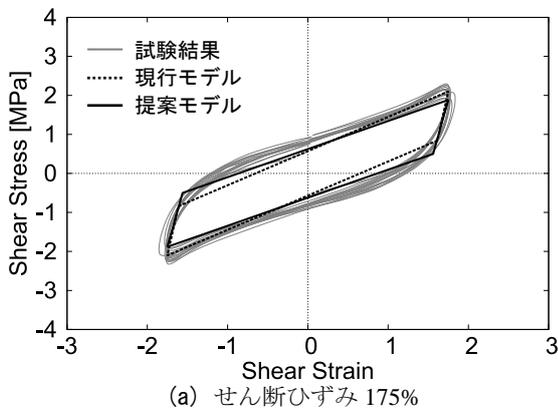
図-11にDYN系等価バイリニアの各種パラメータとせん断ひずみの関係を示す。図より、 G_2 に関しては、HDRと同様、せん断ひずみ依存性がないことがわかる。しかし、 G_1 や τ_d に関しては、せん断ひずみ依存性が確認できる。また図-12に、同一社が製作した免震ゴム支承の試験結果のみを示す。図より、同一社製造にもかかわらず、LRBにおける同一せん断ひずみ値での履歴形状のばらつきが、HDRの結果に比べて大きいことがわかる。これにより、同一ひずみで作成したDYN系等価バイリニアの変動も大きくなり、見かけ上、HDRよりも大きなひずみ依存性

が発生した可能性も考えられる。

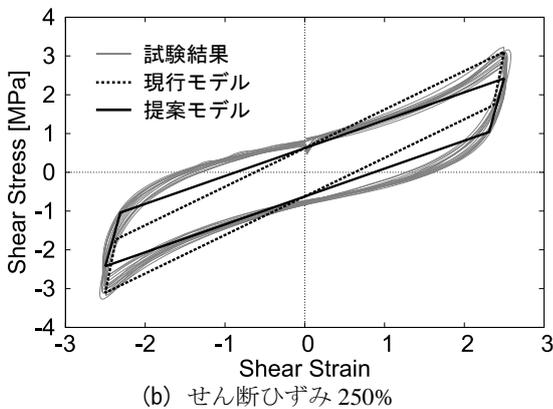
いずれにせよ、本検討で得られた結果のみでは、ひずみ依存性がないLRBの設計バイリニアモデル構築は困難であると判断できる。

(2) DYN系等価バイリニアに基づくLRBの設計モデル定式化

前節で述べたように、本論文ではひずみ依存性がないLRBの設計バイリニアモデル構築を正当化する結果が得られていないが、参考として、DYN系等価バイリニアに基づく、せん断ひずみ依存性を除去したLRBの新たな設計モデルを示す。その際、提案する設計モデルは、現行の設計モデルの形式に従って定式化する。提案モデル形状を決定するパラメータを、現行モデルの形式に倣って記述すると、以下の

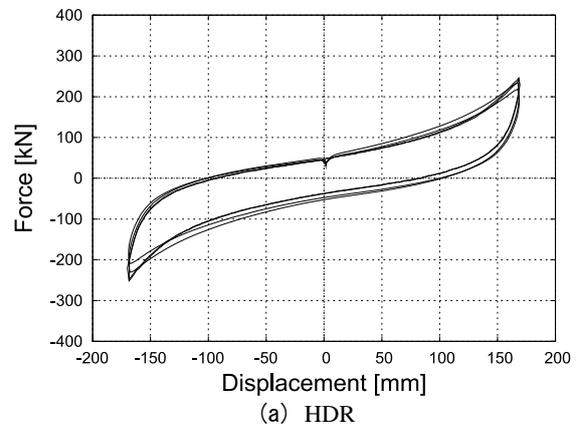


(a) せん断ひずみ 175%

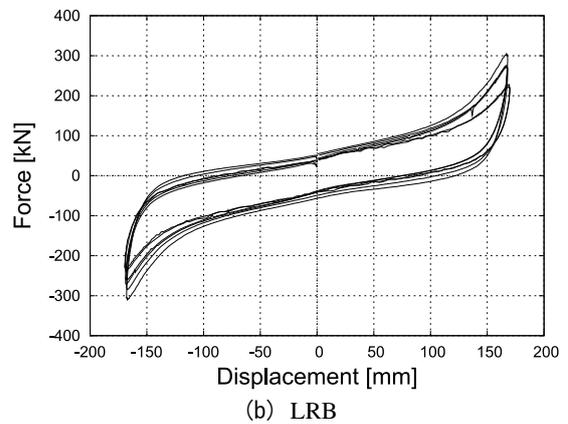


(b) せん断ひずみ 250%

図-10 HDRにおける現行の設計モデルと提案モデルの比較(G_{12} の場合)

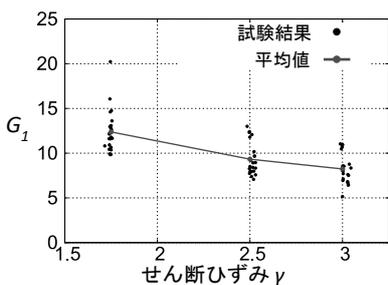


(a) HDR

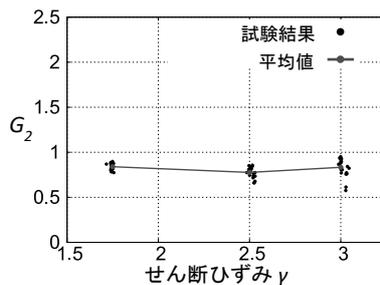


(b) LRB

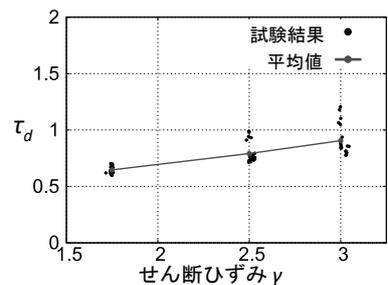
図-12 同一社製造の免震ゴム支承に対する試験結果³⁾



(a) 一次剛性に関するせん断剛性係数



(b) 二次剛性に関するせん断剛性係数



(c) 切片荷重に対応するせん断応力

図-11 LRBの試験結果³⁾から得られたDYN系等価バイリニアの各種パラメータ

ようになる。

$$F = f(\kappa)G_e A_e \gamma + Q_d \quad (29)$$

$$K_1 = g(\kappa)K_2 \quad (30)$$

$$Q_d = h(\kappa)A_p \quad (31)$$

$f(\kappa)$, $g(\kappa)$, $h(\kappa)$ は全てゴムと鉛プラグの面積比 κ に依存した係数であり、前節の統計処理で得た \bar{G}_1 , \bar{G}_2 , $\bar{\tau}_d$ の代表値を用いて、以下のように表される。

$$f(\kappa) = \bar{G}_2 / G_e \quad (32)$$

$$g(\kappa) = \bar{G}_1 / \bar{G}_2 \quad (33)$$

$$h(\kappa) = \bar{\tau}_d \quad (34)$$

本論文では、ゴムと鉛プラグの面積比に関して、 $\kappa = 0.069$ の1パターンの結果しか得られていないため、ゴムと鉛プラグの面積比 κ が異なる供試体の試験結果を集積させることで、 $f(\kappa)$, $g(\kappa)$, $h(\kappa)$ と κ の関係を得ることができ、その関係を回帰式により定式化することで、任意のLRB諸元に対して提案モデルを作成することが可能となる。

(3) LRBの現行設計モデルにおけるゴムおよび鉛プラグの力学特性の考え方と課題

前節にて、製作元が同じLRBの履歴形状のばらつきがHDRよりも大きい点について触れた。これは、LRBがゴムと鉛プラグの複合体であるがゆえ、HDRに比べて各個体間での性能のばらつきが大きいことを意味する。また、ゴムと鉛プラグの複合体としてのLRBの力学特性を評価することは容易ではなく、現行の設計モデルにおいても、ゴム単体を簡易的に線形弾性体として扱い、鉛プラグの復元力特性は、免震支承の正負交番載荷試験結果より得られた復元力から線形ゴムが負担する復元力を単純に引き算することで算出している。しかしゴムは本来2~9%の減衰性能を有することが知られており⁴⁾、現行の設計モデルでは、本来の鉛プラグの挙動を表現できていない可能性がある。

本論文にて、LRBの新たな設計モデルの提案には至らなかったが、今後の展望として、ゴムの非線形性を考慮した上でLRBの力学特性を把握し、設計モデルとして定式化することが必要であるといえる。

6. まとめ

本研究では、Caughey²⁾により提案された等価線形化手法であるDynamic Stiffness法に着目することで、

ハードニング特性を有する免震ゴム支承に適した新たな設計バイリニアモデルの構築を行った。以下に本研究で得られた知見を述べる。

- Dynamic Stiffness法の考え方に倣い、元の履歴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二乗誤差が最小となる等価バイリニア(DYN系等価バイリニア)の作成法を提案した。
- DYN系等価バイリニアは、支承のハードニングが顕著になったとしても、せん断応力-せん断ひずみ関係における最大せん断応力の増加に対して、過度に影響されることなくバイリニア形状が決定される。そのため、DYN系等価バイリニアの考え方をを用いることで、支承のバイリニアモデル形状を決定するパラメータのせん断ひずみ依存性を小さくできることを示した。
- 正弦波解析および応答倍率による検討の結果、DYN系等価バイリニアは、道路橋支承便覧で用いられているGeometric Stiffness法に基づくバイリニアモデルよりも、元の非線形モデルの最大応答値を精度よく表現できることがわかった。
- DYN系等価バイリニアに基づいた高減衰ゴム支承の設計モデルを提案した。提案モデルは、モデルパラメータのせん断ひずみ依存性がなく、また、ハードニングによる最大せん断応力点の変化に過度に追従せず、高減衰ゴム支承の履歴全体の形状をフィッティングすることができた。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574の助成を受けて実施した。また、ゴム支承協会より、免震ゴム支承の供試体情報および正負交番載荷試験結果のデータをご提供いただきました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2018。
- 2) Caughey, T.K.: Equivalent Linearization Techniques, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.35, No.11, pp.1706-1711, 1963.
- 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.
- 4) 井嶋克志, 後藤茂夫, 和田忠治: バイリニア型免震支承の合理的特性値の決定と実設計への応用, 土木学会論文集, No.465, I-23, pp.117-126, 1993.
- 5) 道路橋支承便覧：社団法人日本道路協会, 2004