免震用積層ゴムを用いた振動系の応答解析に関する研究

履歴系解析手法の改良と実験による検証

STUDY ON RESPONSE ANALYSIS OF VIBRATION SYSTEM USING
LAMINATED RUBBER FOR EARTHQUAKE ISOLATION SYSTEM

Improvement on analytical method of hysteresis system and verification by experiment

柴田 康弘*, 岡本 修一**, 柴田 耕一***

Yasuhiro SHIBATA, Shuichi OKAMOTO and Koichi SHIBATA

We have already proposed the analytical method of hysteresis system using the restoring force model of power function type (PFT-HYS) as the vibration response analytical method when the external force affects the nonlinear vibration system. In this paper, previous PFT-HYS method is improved to enhance the accuracy by the new analytical method. We investigated continuous vibration waveforms of vibration response acceleration and hysteresis loop by improving the hysteresis rule. We examined the validity and verification of the improved method by directly comparing experimental values obtained by the forced vibrations of the vibration system using laminated rubber with other analytical values.

Key Words : laminated rubber, nonlinear vibration, hysteresis restoring force, vibration properties,
vibration response

積層ゴム、非線形振動、履歴復元力、振動特性、振動応答

1. 序論

免震用積層ゴムを用いた免震構造の動的挙動をより正確に求めるために、ゴムの振動特性を把握し、動的振動応答解析を精度良く行うことが重要となる。

一般に、積層ゴムに使用されている高減衰ゴムは変位振幅、周波数および面圧に依存して変化する非線形振動特性（剛性、減衰）を示すため、その振動特性を反映した動的振動応答解析を困難なものとしてきた。しかし、既に我々は変位振幅、周波数および面圧に依存する振動特性を精度良く求めるために、履歴曲線の形状が類似しているべき関数型復元力モデルを用いて解析的に算出する手法を提示し¹⁾、また、積層ゴムをばね要素とする一質点系に強制外力が作用する場合の振動応答解析手法として、べき関数型等価線形系解析手法(PFT-ELS法: Equivalent Linear System using the Restoring Force Model of Power Function Type)およびべき関数型履歴系解析手法(PFT-HYS法: Hysteresis System using the Restoring Force Model of Power Function Type)を報告した²⁾。

周波数、変位振幅に依存して求める減衰量と剛性量を線形の運動方程式に逐次置き換える ELS 法に比べ、HYS 法は履歴曲線の形状が類似しているべき関数型復元力モデルを運動方程式に適用して解析を行うため、履歴復元力を的確に表現できると考えられる。しか

し、履歴本線のみ定義する従来の HYS 法は変位振幅が原点付近で折り返す場合や、周波数が急激に変化する場合に復元力に不連続点が生じる。

そこで本論では、この HYS 法の更なる解析精度の向上を目的として、車両用防振ゴムに用いた手法³⁾と同様に周波数、変位振幅依存の履歴本線のみ定義する従来の履歴法に、周波数、変位振幅に依存する履歴支線までも定義する方法を適用する。この方法を適用するにあたり振動特性に影響する周波数および履歴支線時における変位振幅の決定方法について改良する。

改良した手法の妥当性については、ソフトニング型復元力特性⁴⁾を有する積層ゴムをばね要素とした一質点系に地震波が作用する場合の振動応答解析結果に対して ELS 法および従来の HYS 法と比較することで考察し、また、人工的なランダム波を入力加速度とした場合の振動実験結果と解析結果を直接比較することで検証をした。

2. 解析手法

2.1 べき関数型等価線形系解析手法 (PFT-ELS 法)

ゴムのように変位振幅 x 、周波数 ω 、面圧 σ に依存する復元力特性が $f(x, \omega, \sigma)$ で表現できる一自由度系に強制外力（加速度 $\ddot{y}$ ）が作用する場合の運動方程式は質点の質量を m として次式で表す

* 日本大学生産工学部数理工学科 大学院生

** 東洋ゴム工業(株)技術開発本部

*** 日本大学生産工学部数理工学科 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Mathematical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon Univ.
Chief Engineer of Vibration Control Laboratory, Research & Development Division, Toyo Tire & Rubber Co., Ltd.
Prof., Dept. of Mathematical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

ことができる。

$$m\ddot{x} + f(x, \omega, \sigma) = -m\ddot{y} \quad (1)$$

上式を無次元化すると次式となる。

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} + F(X, \eta, q) = -\frac{d^2 Y}{d\tau^2} \quad (2)$$

$$\left(\begin{array}{l} X = x/x_s, X_0 = x_0/x_s, \omega_s^2 = F_s/(x_s \cdot m), \eta = \omega/\omega_s \\ q = \sigma/\sigma_s, \tau = \omega_s t, k_s = F_s/x_s, Y = y/x_s \end{array} \right)$$

$F(X, \eta, q)$: 無次元化した復元力

x_s, F_s : 線形限界における変位と荷重

ω_s : 線形限界における固有周波数

σ_s : 単位面積あたりの面圧の無次元化定数

x_0 : 変位振幅

上式の履歴振動系を等価な線形振動系に置換すると次式を得る。

$$\frac{d^2 X}{d\tau^2} + 2H_{eq} \frac{dX}{d\tau} + K_{eq} X = -\frac{d^2 Y}{d\tau^2} \quad (3)$$

ただし、等価減衰係数 H_{eq} 、等価ばね定数 K_{eq} は次式のようになる。

$$H_{eq} = \frac{1}{2\pi\eta} \left(\frac{1}{X_0} \right)^2 G(X_0, \eta, q) \quad (4)$$

$$K_{eq} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{X_0} \right)^2 \int_0^{X_0} P(X) R(X, \eta, q) dX \quad (5)$$

$G(X_0, \eta, q)$: 変位振幅 x_0 に対応する履歴曲線の囲む面積

$P(X) : X/\sqrt{X_0^2 - X^2}$ $R(X, \eta, q)$: 各変位での加力線と減力線を加えた曲線 (和曲線)

ここで、 $G(X_0, \eta, q)$ 、 $R(X_0, \eta, q)$ を算出するために積層ゴムの履歴曲線に形状が類似している、べき関数型復元力モデル (図 1) を適用する。その基本式は次式で表される。

$$\left. \begin{array}{l} \text{骨曲線} \quad F(X, \eta, q) = kX_0^\alpha \\ \left[\begin{array}{l} \text{加力本線} \\ \text{減力本線} \end{array} \right] F(X, \eta, q) = \pm 2k \left\{ \frac{1}{2}(X_0 \pm X) \right\}^\alpha \mp kX_0^\alpha \end{array} \right\} \quad (6)$$

また、 H_{eq} 、 K_{eq} を用いて変位振幅 x_0 、周波数 ω および面圧 σ に依存する非線形の減衰係数 C 、ばね定数 K は次式により求まる。

$$C(x_0, \omega, \sigma) = \frac{2F_s}{\omega_s x_s} H_{eq}, \quad K(x_0, \omega, \sigma) = k_s K_{eq} \quad (7)$$

この C 、 K を用いて積層ゴムのばね要素とする一自由度系に強制外力 (加速度 $\ddot{y}$) が作用する場合の運動方程式は次式のようになる。

$$m\ddot{x} + C(x_0, \omega_0, \sigma)\dot{x} + K(x_0, \omega_0, \sigma)x = -m\ddot{y} \quad (8)$$

ω_0 : 積層ゴム自体の相対応答変位の周波数

上式を解くことにより積層ゴムの変位振幅、周波数および面圧に依存する特性をばね要素とする系の応答計算が可能となる。これを等価線形系解析手法という。

図 1 べき関数型復元力モデル

2.2 べき関数型履歴系解析手法 (PFT-HYS 法)

(6)式の α, k は加力実験から得られた履歴曲線を、べき関数型復元力モデルを用いて関数化することによって得られる、履歴曲線の頂点 $F_0(X_0, \eta, q)$ および、履歴曲線の囲む面積 $G_0(X_0, \eta, q)$ から次式のように求めることができる。

$$\alpha = \frac{4F_0(X_0, \eta, q) \cdot X_0 - G_0(X_0, \eta, q)}{4F_0(X_0, \eta, q) \cdot X_0 + G_0(X_0, \eta, q)} \quad (9)$$

$$k = \frac{F_0(X_0, \eta, q)}{X_0^\alpha} \quad (10)$$

この α, k を用いることにより変位振幅 X_0 、周波数 η 、面圧 σ に依存した復元力ループを逐次定義し、直接(2)式の運動方程式を解くことをべき関数型履歴系解析手法という。

ソフトニング型復元力特性を有する積層ゴムのべき関数型復元力モデルを用いた履歴則を以下に示す。

(I) 初期履歴において力-変位関係は線形とする (図 2)。変位の絶対値が初めて線形範囲 ($|X| \leq 1$) をこえる場合、力-変位関係は骨曲線①で与えられる。

骨曲線上で変位振幅が折り返す場合 (図 2 中、点 A)、今折り返した点から次に折り返す点までの時間で求まる周波数を新しい周波数として用いる。そして、力-変位関係は新しい周波数の骨曲線②に対応した履歴本線 (減力本線) に沿って折り返した点 A と同じ変位振幅で②線上の点 B と対称の点 C を目指して進むものとする。また、対称点 C に到達したときは、骨曲線上を進む。

(II) 本線上で対称点に到達する前に折り返しがある場合 (図 3 中、点 E)、従来の周波数を考慮した履歴則では、履歴本線 (6)式)のみで解析を行っていたため、新しい周波数、変位振幅に依存した骨曲線 (4線) から始まる減力本線を折り返した点 E と対称の点を目標点として進み E-E' のように復元力に不連続点が生じる。連続的な入力波に対して実際の現象では積層ゴムの履歴特性に不連続点が生じにくい。そこで、振動特性に影響する周波数が大きく変化する場合には履歴曲線に不連続が起こる事がないように、車両用防振ゴムで用いた履歴則を適用する。その履歴則は(III)~(V)となる。

(III) 本線上で対称点に到達する前に折り返しがある場合 (点 E)、新しい周波数 (4線) を求めて、その骨曲線上の元の折り返し点 D と同じ変位振幅の点 F を目標点として減力支線に沿って進むものとする。目標点 F に到達したときは、新しい周波数の骨曲線上を進む (図 4)。

(IV) 本線から入った 1 回目の支線上で目標点に到達する前に折り返しがある場合 (点 G)、新しい周波数 (5線) の点 a と点 b の上に立つ加力本線の元の折り返し点 E と同じ変位振幅の点 H を目標点として加力支線に沿って進む。目標点 H に到達したときは、加力本線上を新しい周波数の目標点 b を目指して進む (図 5)。

(V) 履歴支線上でさらに折り返す場合 (点 I)、1 つ前の支線 E-F の代わりに、新しい周波数 (6線) に対応した支線 E-J を考え、元の折り返し点 G と同じ変位振幅上の点 K を目指す (図 6)。

以降の力-変位関係は(III)~(V)の繰り返しである。

この履歴則に従って応答計算を行う。ここで、履歴本線の式と区別するために、履歴支線の無次元化した復元力特性を $f_n(X, \eta_n, q)$ として表す。ただし、 n は履歴本線を 1 とし、目標点に到達する前に変位が折り返す毎に増える。

図 7 において、最大点 (X_1, F_1) から始まる減力本線 $f_1(X, \eta_1, q)$ は周波数 η_1 により求まる骨曲線上の折り返した点 (X_1, F_1) の対称点を目指す曲線として(6)式と同様に次式で表せる。

$$f_1(X, \eta_1, q) = -2k \left\{ \frac{1}{2} (X_1 - X) \right\}^\alpha + kX_1^\alpha \quad (11)$$

次の折り返し点が (X_2, F_2) のとき、新しい周波数として η_2 が求まり、改良した履歴則によって周波数 η_2 の骨曲線上に目標点が決まる。その目標点 (X_1, F_1') と (X_2, F_2) の中点を $(X_{1,2}, F'_{1,2})$ とすれば、この点に関して $f_1(X, \eta_2, q)$ に対称な曲線 $f_2(X, \eta_2, q)$ として次のように表せる。

$$f_2(X, \eta_2, q) = -f_1(-X + 2X_{1,2}) + 2F'_{1,2} \quad (12)$$

同様に、新しい周波数を η_3 、2点 (X_2, F'_2) 、 (X_3, F_3) の中点を $(X_{2,3}, F'_{2,3})$ として、この点に関して $f_2(X, \eta_3, q)$ に対称な曲線 $f_3(X, \eta_3, q)$ は次式となる。

$$f_3(X, \eta_3, q) = -f_2(-X + 2X_{2,3}) + 2F'_{2,3} \quad (13)$$

$$= f_1(X + 2X_{1,2} - 2X_{2,3}) - 2F'_{1,2} + 2F'_{2,3}$$

このようにして、骨曲線に到達しない n 番目 ($n \geq 2$) の履歴支線 $f_n(X, \eta_n, q)$ は次式で表すことができる。

$$f_n(X, \eta_n, q) = (-1)^n 2k \left[\frac{1}{2} \{ (-1)^n X - (-1)^n X_n \} \right]^\alpha \quad (14)$$

$$+ F_n - (-1)^n \sum_{i=2}^n (-1)^i \Delta F_{i-1}$$

$$\Delta F_{i-1} = F_{i-1} - F'_{i-1} \quad (15)$$

ただし、 F_{i-1} は折り返し点の復元力、 F'_{i-1} は目標点の復元力を表す。

一方、本線が最小点から始まる加力本線の場合の履歴支線も(14)式と同様に次式となる。

$$f_n(X, \eta_n, q) = -(-1)^n 2k \left[\frac{1}{2} \{ (-1)^n X + (-1)^n X_n \} \right]^\alpha \quad (16)$$

$$+ F_n - (-1)^n \sum_{i=2}^n (-1)^i \Delta F_{i-1}$$

このように、周波数によって変わる目標点と元の折り返し点との差(15式)を求めることによって、周波数依存の履歴支線を得ることができる。

2.3 応答解析

周波数、変位振幅依存の履歴支線を用いるにあたり、従来の周波数、変位振幅の算出方法では急激に応答周波数が変化する場合や、履歴曲線が原点近辺で折り返すときなどに問題が生じる。そこで、更に改良した周波数、変位振幅の決定方法を次に示す。

2.3.1 周波数 $\eta_{0(i)}$ の決定方法

図8において、a点からb点に向かう減力本線の途中、c点で折り返したとき、a-c間の時間 Δt_{i-1} より求まる周波数 $\eta_{0(i-1)}$ で定まる骨曲線上のd点に向かって応答計算を行う。計算中にe点で折り返すことが分かったとき、c-e間の時間 Δt_i より周波数 $\eta_{0(i)}$ を求め、再びc点に戻り、 $\eta_{0(i)}$ を用いてf点に向かって応答計算を行う。ここで、周波数選択の精度を上げるため、周波数 $\eta_{0(i)}$ の骨曲線に沿った応答計算によりg点で折り返すことが分かったとき、c-g間の時間から求まる周波数を $\eta'_{0(i)}$ とする。(17)式からc-e間より求まった周波数 $\eta_{0(i)}$ とc-g間の時間から求まる周波数の差 ξ を調べ、差がなくなるまで繰り返す。

$$\xi = \eta_{0(i)} - \eta'_{0(i)} \quad (17)$$

2.3.2 履歴支線における変位振幅 $X_{0(i)}$ の決定方法

積層ゴムの原点指向型という特性を考慮し、変位振幅の決定方法を3種類に分類した(図8)。

(I) 履歴本線では折り返した点aの対称点bを目指すことから、これまでと同様(α, k の決定)に変位振幅は $X_{0(i-1)}$ の値を用いる。

(II) 履歴支線が原点から離れる方向へ進む場合(c-g間)。c点における剛性、減衰量から、g点における剛性、減衰量へ変化するという考えから、(18)式より原点からの変位振幅の中点を $X_{0(i)}$ として用いる。

$$X_{0(i)} = \frac{|X_{01}| + |X_{02}|}{2} \quad (18)$$

図2 動的履歴則 (I)

図3 動的履歴則 (II)

図4 動的履歴則 (III)

図5 動的履歴則 (IV)

図6 動的履歴則 (V)

(Ⅲ) 履歴支線が原点方向へ進む場合(g 点)。履歴支線を用いるにあたり、次の目標点が1つ前の折り返し点と同じ変位振幅上の点を目指しているため、地震波のように加速度が小さくなっていく過程で原点に指向しにくくなる。そこで、変位が大きいたときには原点に戻りやすく、また、変位が小さいときには支線が原点をこえた時に原点から離れにくくするという考えから、支線上の現在折り返した変位振幅 X_{02} を用いることにする。

そして、新しい周波数 $\eta_{0(i)}$ が求まるたびに決まる変位振幅 $X_{0(i)}$ を用いて、周波数、変位振幅に依存する α, k を求めることにより、履歴曲線の形状が定まる。同様の手順を履歴曲線の折り返す毎に行う。

以上のように、周波数、変位振幅によって変化する復元力を求め、(2)式の運動方程式に逐次代入する。

3. 解析結果

解析に使用した試験体はいずれも高減衰ゴムを材料とする積層ゴム縮小模型であり、その形状とゴムの材料特性値を図9, 10, 表1に示す。両試験体ともに、解析手法を確認するためのものでソフトニング型復元力特性を示すものになっている。

3.1 振動特性

今回新たに解析に使用した、試験体2について試験体1と同様に、動的加力実験により測定した履歴ループの頂点を結んで得られる骨曲線と履歴ループの囲む面積をそれぞれ無次元化し、最小二乗法を用いて関数化した。試験体1, 2の骨曲線と面積を変位振幅 X_0 、周波数 η 、面圧 q で関数化した近似関数 $F_0(X_0, \eta, q)$ と $G_0(X_0, \eta, q)$ を表2, 3に示す。ただし、試験体2は面圧一定 (0.29MPa) である。

関数化した骨曲線 $F_0(X_0, \eta, q)$ 、履歴ループの囲む面積 $G_0(X_0, \eta, q)$ を用いて(9),(10)式から α, k を求め、(7)式より減衰係数、ばね定数の解析値を算出し、次に示す略算方法による値と比較検討した。

$$\sin \delta = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta W}{W}, \quad C' = \frac{F_0 \sin \delta}{X_0 \omega}, \quad K' = \frac{F_0 \cos \delta}{X_0} \quad (19)$$

δ : 損失角

ΔW : 積層ゴムが1周期間に吸収するエネルギー (履歴ループの囲む面積)

W : 積層ゴムの弾性エネルギー

C' : 減衰係数の略算値 K' : 動的ばね定数の略算値

F_0 : 履歴復元力の最大値 X_0 : 履歴ループの最大変位

試験体1については既に文献1より、骨曲線と面積を変位振幅 X_0 、周波数 η 、面圧 σ で関数化した近似関数 $F_0(X_0, \eta, q), G_0(X_0, \eta, q)$ の妥当性が示されている。一方、試験体2については、減衰係数の変位振幅依存性、ばね定数の変位振幅依存性、減衰係数の周波数依存性およびばね定数の周波数依存性についてそれぞれ図11~14に示す。

試験体2は変位振幅が増大するにつれて減衰係数、ばね定数ともに減少し、強い非線形特性を示す。特に変位振幅の小さい範囲でその傾向が顕著に現れている。また、周波数が増大するにつれて減衰係数は減少する。一方、ばね定数は増加する傾向にあるが、その割合は小さい。

加力実験の変位は小さいが、低周波数領域においては減衰係数、ばね定数ともに図11~14から解析値は略算値によく対応しており、関数化した $F_0(X_0, \eta, q), G_0(X_0, \eta, q)$ は図15で示す加力実験による履歴復元力ループとべき関数型復元力モデルを用いて求めた履歴復元力ループの比較 (0.1Hz) から妥当であったといえ

る。この低周波数領域における $F_0(X_0, \eta, q), G_0(X_0, \eta, q)$ の関数を基に、高周波数における減衰係数とばね定数を予測し解析に用いることとした。

3.2 地震波入力による振動応答

改良した HYS 法の妥当性を考察するため、2種類の試験体 (試験体1, 2) に地震波を入力加速度とした場合の振動応答解析を行い、ELS 法および従来の HYS 法による応答解析結果と比較した。ただし、両試験体ともに面圧は一定 ($2.04\text{MPa}, 0.29\text{MPa}$) として解析を行った。

図16~18に試験体1をばね要素とする1自由度系に EL CENTRO(NS)地震波 (最大 320gal) を入力加速度とした場合の絶対応答加速度、相対応答速度、相対応答変位の波形を示し、図19, 20に従来の HYS 法と改良後の HYS 法による履歴復元力ループを示す。

図7 周波数依存の履歴支線

図8 変位振幅 X_0 周波数 η_0 決定方法

図9 試験体1の形状

図10 試験体2の形状

表 1 ゴムの材料特性値

	Type 1	Type 2
Static Shear Modulus (Mpa)	0.55	0.29
Hardness	46	48
Tensile Strength at Break (Mpa)	13.9	12.5
Tensile Elongation at Break (%)	800	820
Specific Gravity	1.18	1.17
Inner Rubber	High Damping Rubber	

表 2 履歴曲線の囲む面積の関数化

Type 1	Type 2
$G_0(X_0, \eta, q) = Y_1(\eta, q) \cdot X_0 \wedge Y_2(q)$	$G_0(X_0, \eta, q) = Y_1(\eta, q) \cdot X_0 \wedge Y_2(\eta, q)$
$Y_1(\eta, q) = N_1 + N_2 \cdot (q \cdot \sigma \cdot A) + N_3 \cdot \text{Log}(a \cdot \eta)$	$Y_1(\eta, q) = N_1 \cdot (a \cdot \eta) \wedge N_2$
$Y_2(q) = N_4 + N_5 \cdot \text{Log}(q \cdot \sigma \cdot A)$	$Y_2(\eta, q) = N_3 \cdot (a \cdot \eta) \wedge N_4$
$N_1 = 0.023008$ $N_2 = 0.0082643$ $N_3 = 0.011683$ $N_4 = 1.775$ $N_5 = -0.30737$	$N_1 = 0.0060586$ $N_2 = 0.037606$ $N_3 = 1.6062$ $N_4 = 0.033649$
Frequency f (Hz): $f = a \cdot \eta$ $a = \omega_s / 2\pi$	
Vertical load Pv (tonf): $Pv = q \cdot \sigma \cdot A$ $A = \text{Area of rubber sheet}$	

表 3 骨曲線の関数化

Type 1	Type 2
$F_0(X_0, \eta, q) = Z_1(\eta, q) \cdot X_0 \wedge Z_2(q)$	$F_0(X_0, \eta, q) = Z_1(\eta, q) \cdot X_0 \wedge Z_2(\eta, q)$
$Z_1(\eta, q) = M_1 + M_2 \cdot (q \cdot \sigma \cdot A) + M_3 \cdot \text{Log}(a \cdot \eta)$	$Z_1(\eta, q) = M_1 \cdot (a \cdot \eta) \wedge M_2$
$Z_2(\eta, q) = M_4 + M_5 \cdot \text{Log}(q \cdot \sigma \cdot A)$	$Z_2(\eta, q) = M_3 \cdot (a \cdot \eta) \wedge M_4$
$M_1 = 0.030714$ $M_2 = 0.042663$ $M_3 = 0.010141$ $M_4 = 0.88608$ $M_5 = -0.44364$	$N_1 = 0.0059155$ $N_2 = 0.043279$ $N_3 = 0.48723$ $N_4 = 0.0085122$
Frequency f (Hz): $f = a \cdot \eta$ $a = \omega_s / 2\pi$	
Vertical load Pv (tonf): $Pv = q \cdot \sigma \cdot A$ $A = \text{Area of rubber sheet}$	

図 11 減衰係数の変位振幅依存性 (試験体 2)

図 12 ばね定数の変位振幅依存性 (試験体 2)

図 13 減衰係数の周波数依存性 (試験体 2)

図 14 ばね定数の周波数依存性 (試験体 2)

図 15 履歴復元カループ (試験体 2, 0.1Hz)

図 16 絶対応答加速度波形(EL CENTRO, 試験体 1)

図 17 相対応答速度波形(EL CENTRO, 試験体 1)

図 18 相対応答変位波形(EL CENTRO, 試験体 1)

図 19 従来の HYS 法による履歴復元カループ(EL CENTRO, 試験体 1)

図 20 改良後の HYS 法による履歴復元カループ(EL CENTRO, 試験体 1)

図 21 絶対応答加速度波形(KOBE, 試験体 1)

図 22 改良後の HYS 法による履歴復元カループ(KOBE, 試験体 1)

図 23 絶対応答加速度波形(EL CENTRO, 試験体 2)

図 24 相対応答変位波形(EL CENTRO, 試験体 2)

図 25 改良後の HYS 法による履歴復元カーループ(EL CENTRO, 試験体 2)

写真 1 試験体 2 の外観

図 26 入力加速度波形

図 27 入力加速度のフーリエスペクトル

図 28 絶対応答加速度波形

図 29 絶対応答加速度波形のフーリエスペクトル

図 30 相対応答速度波形

図 31 相対応答変位波形

図 32 ELS 法による履歴復元力カーブ

また、図 2 1, 2 2 には KOBE(NS)地震波（最大 810gal）による絶対応答加速度波形と改良した HYS 法による履歴復元力カーブを示す。

次に、試験体 2 の積層ゴム 4 個をばね要素とする 1 自由度系に EL CENTRO 地震波を入力加速度とした場合の解析結果を試験体 1 のときと同様に示す。ただし、入力地震波は 1/20 圧縮したものをを用いた。図 2 3, 2 4 に絶対応答加速度と相対応答変位の波形を示し、図 2 5 に改良後の HYS 法による履歴復元力カーブを示す。

改良後の HYS 法は従来の HYS 法と比べ、本論の 2.2 に示した履歴則の改良により、時刻歴波形においては絶対応答加速度が連続的なものになり（図 1 6 中、A,B）、その結果、図 1 9 中 A, B 点のような復元力の不連続点が図 2 0 のように解消され、加力実験¹⁾から個別に得られた復元力カーブの形状に近い形で描かれていることが分かる。

3.3 振動台上実験による比較

試験体 2 の積層ゴム 4 個を放射状かつ、同心円上に配置し、面圧一定（0.29MPa）の試験体（写真 1）を用いて、ランダム波（0~100Hz、最大加速度 600gal）を入力加速度とする水平 1 方向の振動台上実験を行った。その実験値と ELS 法と改良後の HYS 法による解析値を直接比較しそれぞれの手法の検証をした。入力加速度と絶対応答加速度の波形とそれぞれのフーリエスペクトルを図 2 6 ~ 2 9 に、相対応答速度と相対応答変位の波形、ELS 法および改良後の HYS 法による履歴復元力カーブを図 3 0 ~ 3 3 に示す。

ELS 法に比べ、改良後の HYS 法は時刻歴波形と絶対応答加速度のフーリエスペクトルの比較（図 2 9）からも分かるように実験値の応答結果に、より対応していることが分かる。また、履歴復元力カーブの変位の折り返し点において、ELS 法に比べ改良後の HYS 法（図 3 3）は不連続点がなくなり、改良した成果が見られる。

4. 結論

本論では、変位振幅の折り返し点において周波数が大きく変化する場合に従来の HYS 法に見られた、応答波形および履歴復元力カーブの不連続点を解消するために履歴則の改良を行い、また、振動実験による実験値と ELS 法および改良型 HYS 法による解析値を直接比較することで手法の検証を示した。その結果、次のことが明らかになった。

（1）地震波入力による解析結果の比較（図 1 6 ~ 2 5）から、改良後の HYS 法は絶対応答加速度波形において不連続点がなくなり、その結果、改良前に見られた履歴復元力カーブの不連続点を解消する事ができた。また、連続的な応答計算が可能となったことから信頼性も向上していると考えられる。

（2）振動台上実験から得られた振動応答値と解析値の比較により、

図 33 改良後の HYS 法による履歴復元力カーブ

ELS 法の信頼性を示すことができたと同時に、改良した手法についても確かめることができた。また、手法の検証からは、いずれの手法とも実験値とよい対応を示しているが、ELS 法に比べ改良型 HYS 法による解析結果は実験による応答をより反映していると考えられる。

（3）非線形振動系の応答解析に従来の HYS 法と改良後の HYS 法が有効な手法であると考えられる。しかし、履歴復元力カーブの形状で免震効果を判断し、あらかじめ特徴のある理想的な履歴を考慮する場合や、累積塑性変形等を調べる場合、ELS 法、従来の HYS 法では復元力カーブに不連続点がありループの形状や、囲む面積を正確に判断することは困難である。その点において改良型 HYS 法は連続的な応答波形を表現できるため、従来の手法に比べ優位であると言える。

今回はソフトニング型の履歴特性を示す場合の解析手法に限ったが、今後はハードニング型履歴特性を示す積層ゴムについても本論で示した履歴則を適用し、振動応答解析手法の有効性を示す必要がある。また、残留変形や片ずれを伴う弾塑性振動に対しても手法の改良が必要である。

最後に、本解析に使用した ELS 法、従来の HYS 法および、改良型 HYS 法は車両用防振ゴムだけでなく免震用積層ゴムの振動応答解析手法としても有効であると考えられ、非線形の振動特性を有する対象物に対しての解析に役立つことが分かった。

謝辞

本研究を進めるにあたり御協力、御助言くださいました、見坐地一人氏、神保浩之氏に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 柴田耕一、高橋勲、笹川孝義、一ノ瀬博明：免震用積層ゴムの振動特性に関する研究（履歴復元力特性のモデル化と非線形振動特性）、日本建築学会構造系論文集、第 475 号、pp.93-102、1995.9
- 2) 柴田耕一、一ノ瀬博明、桜井弘幸、大沢慶吉：ハードニング型復元力特性を示す免震用積層ゴムの非線形振動に関する研究（振幅、振動数、面圧の依存性と振動応答解析）、日本建築学会構造系論文集、第 490 号、pp.119-127、1996.12
- 3) 神保浩之、見坐地一人、柴田耕一：周波数、変位振幅依存型非線形振動に対する履歴系解析手法の研究（履歴則の改良と防振ゴムの振動応答）、日本機械学会論文集（C 編）、65 巻 630 号、pp.9-16、1999.2
- 4) 日本免震構造協会：免震積層ゴム入門 オーム社 1997
- 5) 柴田耕一、見坐地一人、加藤英樹：ゴムの振動特性に関する研究（周波数及び変位振幅依存型の非線形振動特性）、日本機械学会論文集（C 編）、59 巻 564 号、pp.144-150、1993.8
- 6) 見坐地一人、加藤英樹、柴田耕一：車両用防振ゴムの振動特性に関する研究（非線形振動応答解析）、日本機械学会論文集（C 編）、60 巻 578 号、pp.42-48、1994.10
- 7) 廣瀬茂雄、神保浩之、見坐地一人、柴田耕一：車両用防振ゴムの振動特性に関する研究（多自由度系における非線形振動応答解析）、日本機械学会論文集（C 編）、63 巻 614 号、pp.47-53、1997.10

（1999 年 9 月 9 日原稿受理、2000 年 2 月 17 日採用決定）