

高硬度ゴム粘弾性体の極微小変形から大変形までの歪・振動数依存性のモデル化

高硬度ゴム粘弾性体の力学モデルの構築 その1

STRAIN AND FREQUENCY DEPENDENCE OF HIGH-HARDNESS RUBBER IN THE RANGE FROM VERY SMALL UP TO LARGE DISPLACEMENT

Mechanical model of high-hardness rubber Part 1

谷 翼^{*1}, 辻 聖晃^{*2}, 吉富信太^{*3}, 竹脇 出^{*4}, 松本達治^{*5}

Tsubasa TANI, Masaaki TSUJI, Shinta YOSHITOMI, Izuru TAKEWAKI and Tatsuji MATSUMOTO

A constitutive model of a high-hardness rubber in the small strain amplitude is constructed based on the stationary and non-stationary random vibration tests. The mechanical properties of the high-hardness rubber depend mainly on the strain amplitude, vibration frequency and temperature. Because the present high-hardness rubber has a smaller dependence on the vibration frequency and temperature compared to the ordinary visco-elastic materials, the dependence on the strain amplitude is considered mainly. The validity of the proposed constitutive model is investigated by the comparison with the results by the test.

Keywords: High-hardness rubber, Vibration control, Visco-elastic damper, Dynamical loading experiment, System identification, Numerical simulation

高硬度ゴム, 制振, 粘弾性ダンパー, 動的載荷実験, システム同定, 数値シミュレーション

1. 序

粘弾性体を用いたダンパーは、環境振動による微小な変形から大地震時の大きな変形まで安定した減衰効果を発揮する。このため、近年では、建築物の居住性と耐震安全性の両者を同時に向上させることができる制振デバイスとして、多くの高層建物に適用されるようになってきている。

粘弾性体の復元力特性は材料の配合や製造法により様々で、程度の大小はあるものの、復元カーループの最大変形点における割線勾配とループが取り囲む面積から算出される等価剛性と等価減衰係数は、歪、温度および加振振動数に依存している。そのため、粘弾性ダンパーを組み込んだ建築物の風応答や地震応答を精度よく評価するためには、各粘弾性体に対して上記の各種依存性を十分な精度で表現できるような適切な力学モデル（構成則）を構築する必要がある。

ダンパーとしての粘弾性体の構成則に関する研究には次のようなものがある。曾田らは、粘弾性ダンパーの力学特性（特に振動数依存特性）を一般化マックスウェルモデルや一般化フォークトモデルを用いて表現する方法、およびそのパラメータの決定方法を提案している^{1,2)}。また、非線形ばねを力学モデル内に並列要素として組み込むことで、軟化型あるいは硬化型の非線形復元力特性を有する粘弾性体の振幅依存性を表現できるモデルも提案している³⁾。温度依存性は、力学パラメータに、温度で定義される関数を乗じることで考慮している。金子と中村⁴⁾は、経験した最大歪により剛性が決まるような非線形ばねを含む非線形4要素モデルを提案し、ゴムアスフ

ルト系粘弾性体の振動数依存性と振幅依存性を独立に表現可能なモデルを提案している。華ら⁵⁾は、ばねとダッシュポットから構成されるケルビン・フォークトモデルの各要素の係数を、等価振動数を定義してその振動状態に応じて変化させる方法を提案している。来田ら^{6,7)}は、高減衰ゴムを用いた粘弾性ダンパーを対象として、ばねとダッシュポットからなる4要素モデルに独自の非線形同定手法を適用して、モデルのパラメータを決定する方法を提案している。笠井ら^{8,9,10)}は、主としてアクリル系の粘弾性体を対象として、温度依存性を振動数依存性に置き換える手法と、分数階導関数により振動数依存性を表現する手法とを用いることで、熱の授受による力学特性の変化も精度よく表現可能な構成則と、その数値解析アルゴリズムを提案している。歪・歪速度に対する依存性は、粘弾性体の剛性を歪に依存する関数として与えることでモデル化している。また、風に対する粘弾性ダンパーの特性を評価するための風洞実験手法を提案している¹²⁾。石川ら¹⁰⁾は、分子間の内部摩擦によって大きな減衰力を得るタイプ（従って、復元カーループはバイリニア型に近いものとなる）の粘弾性体の力学モデルとして、修正バイリニア型の復元力特性を有するばね要素を組み込んだ3要素ばねモデルを提案し、最小二乗法と遺伝的アルゴリズムを組み合わせたパラメータ決定方法を提示している。石川らは、せん断歪が20%程度の小振幅時のパラメータと、200%程度以上の大振幅時とは、パラメータの値が異なる別のモデルが適切であるとしている。

本研究で取り扱う高硬度ゴムは、天然ゴムをベースとして特殊添

*1 京都大学工学研究科都市環境工学専攻 大学院生
*2 京都大学工学研究科都市環境工学専攻 准教授・博士(工学)
*3 京都大学工学研究科都市環境工学専攻 助教・博士(工学)
*4 京都大学工学研究科都市環境工学専攻 教授・工博
*5 SRI ハイブリッド 制振ビジネスチームリーダー 博士(工学)

Graduate Student, Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ.
Assoc. Prof., Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ, Dr. Eng
Assis. Prof., Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ, Dr. Eng
Prof., Dept. of Urban and Environmental Eng., Kyoto Univ, Dr. Eng
General Manager, Vibration Control System Dept., SRI Hybrid, Dr. Eng

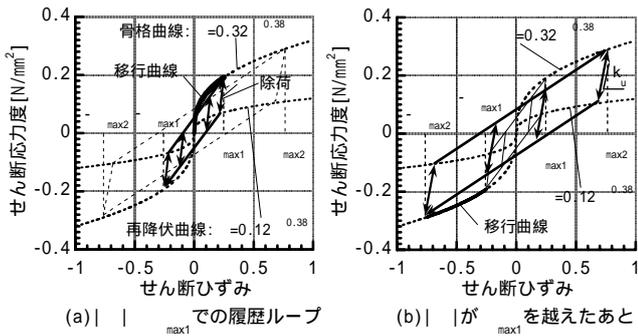


図4 弾塑性要素の履歴ルール

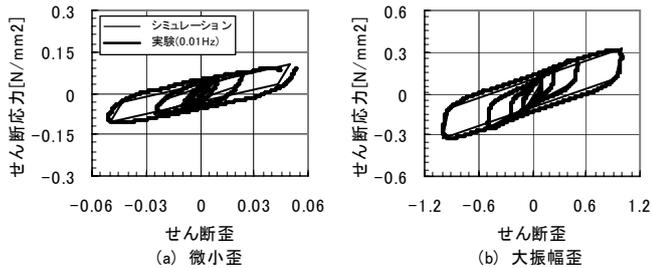


図5 せん断応力度 - せん断歪履歴ループ(0.01Hz)

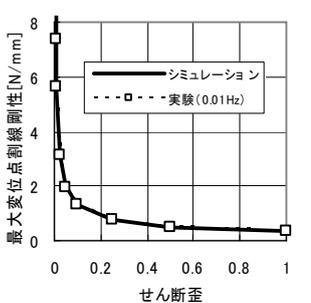


図6 最大変位点割線剛性の変化

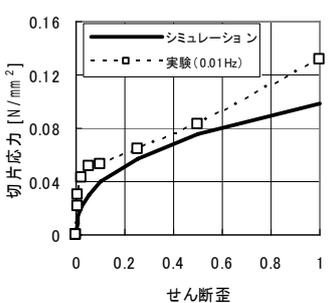


図7 切片応力の変化

$$\text{除荷勾配: } k_u = \frac{0.32 - 0.11\epsilon^{0.38}}{(1-\epsilon)\gamma_{\max}^{0.62}}, \quad \epsilon = \frac{0.94\gamma_{\max}^{0.73}}{\gamma_{\max}^{0.73} + 0.01} \quad (3a,b)$$

第二分枝勾配直線:

$$\tau = \frac{0.32 - 0.11\epsilon^{0.38}}{(1-\epsilon)\gamma_{\max}^{0.62}} \gamma \pm \left(0.32 - \frac{0.32 + 0.11\epsilon^{0.38}}{1+\epsilon} \right) \gamma_{\max}^{0.38} \quad (4)$$

図5に0.01Hz 載荷実験時の履歴ループと弾塑性要素によるシミュレーション時の履歴ループを併せて示す。図6, 7に0.01Hz 載荷実験時の履歴ループと弾塑性要素によるシミュレーション時の履歴ループの剛性と切片応力の変化を示す。尚、切片応力とは、歪0でのせん断応力である。微小歪時には多少のずれがあるものの、0.01Hz 載荷実験時の履歴ループの特徴が的確に表現できているといえる。

3-3 弾性要素

3-2で設定した弾塑性要素と、ほぼ静的とみなし得る0.01Hz 載荷時以外の実験による履歴ループとの割線剛性の差を、振動数の増加により付加される剛性とし、弾性要素で表現する。歪0.1, 歪1.0において付加される剛性を図8に示す。付加される剛性が振動数依存性と歪依存性を有していることがわかる。しかしながら、付加される剛性を振動数に依存するものとしてモデル化する場合、時々刻々の振動数を計算したり⁵⁾、パネとダッシュポットの直列要素を組み込む¹⁾など、時刻歴解析を行うことには多くの作業が伴う。

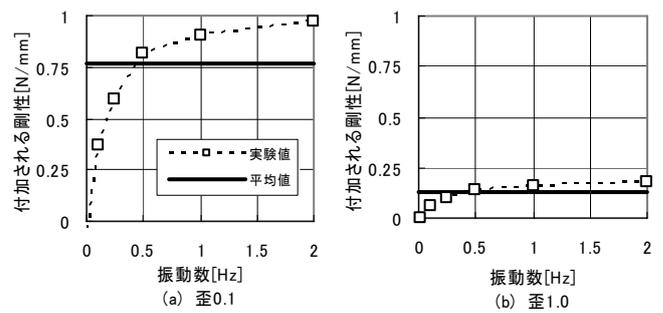


図8 振動数の増加により付加される剛性

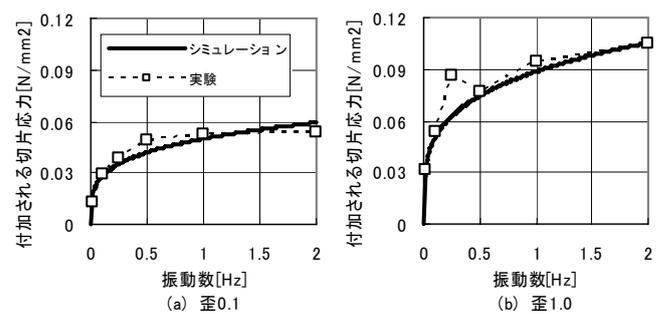


図9 振動数の増加により付加される切片応力

そこで、このダンパーを組込む対象として想定している建物の1次の固有振動数が0.3~1.0Hz程度であること、その間に付加される剛性の変化がそれほど顕著でないことから、付加される剛性は振動数に依存せず一定の値であるとし、その値は0.25Hz, 0.5Hz, 1.0Hzのデータの平均値とする。また、本研究で取り扱う高硬度ゴムでは、付加される剛性は経験した最大歪に依存する傾向が見られるため、付加される剛性は最大せん断歪 γ_{\max} により決まるものとする。すなわち、弾性要素の τ - γ 関係は以下のように表現できるとする。

$$\tau = \begin{cases} 0.10\gamma_{\max}^{-0.66}\gamma & (\gamma_{\max} \geq 0.005) \\ 3.30\gamma & (\gamma_{\max} < 0.005) \end{cases} \quad (5)$$

3-4 粘性要素

3-2で設定した弾塑性要素と、0.01Hz 載荷時以外の実験による履歴ループとの切片応力の差を載荷振動数の増加により付加される切片応力とし、粘性要素で表現する。歪0.1, 歪1.0において付加される切片応力を図9に示す。付加される切片応力も振動数依存性と歪依存性を有していることがわかる。そこで、粘性要素の振動数依存性と歪依存性を歪速度依存性として表現することとし、付加される切片応力と振動数の関係を、付加される切片応力と歪速度の関係に置き換え、最小二乗法により係数を決定した。すなわち、粘性要素の τ - $\dot{\gamma}$ 関係は以下のように表現できる。

$$\tau = 5.2 \times 10^{-2} \text{sgn}(\dot{\gamma}) |\dot{\gamma}|^{0.25} \quad (6)$$

4. 定常載荷試験のシミュレーション解析

定常載荷を対象として構築した上記の力学モデルの妥当性を検証するため、作成した3要素モデルを用い、定振幅正弦波定常入力のシミュレーション解析を行った。正弦波を強制変位として与え、各要素の抵抗力の和をモデル全体に作用する荷重として、実験結果との比較を行った。

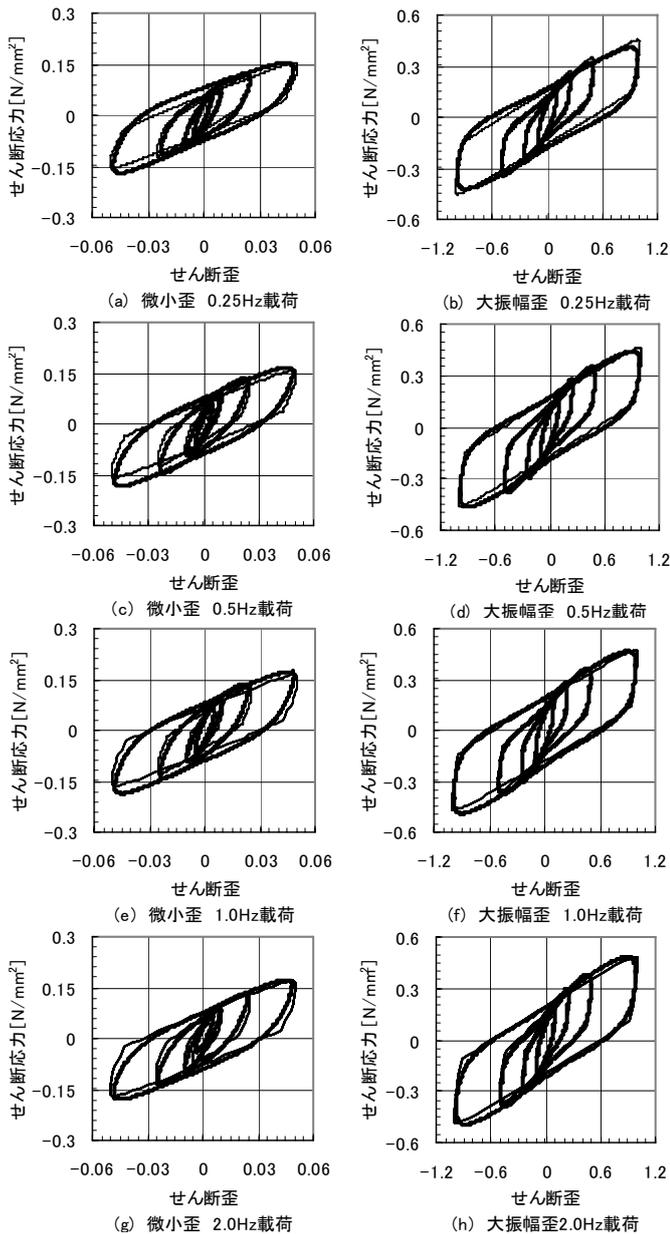


図10 定常载荷時の解析結果(細線)と実験結果(太線)

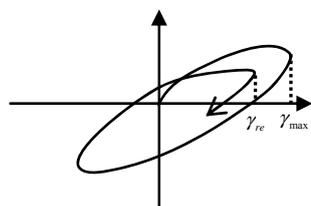


図11 α の定義

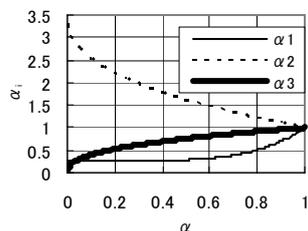


図12 大変形経験後の反力低減を表現するための α_i の変化

正弦波入力実験に基づき構築した力学モデルに対するシミュレーションと、正弦波入力実験結果との比較を図10に示す。左側には微小変形領域における比較を示し、右側には大変形領域での比較を示す。これらの図は、図2,3と同様に、各実験における4サイクルの载荷のうちの第3サイクル目のループを示している。载荷振動数が0.25Hz~2.0Hzの範囲では、履歴ループの傾き、面積ともによく一致しており、試験結果を十分な精度で表現できているといえる。

5. 非定常载荷実験結果に基づく一般化された復元力モデルの構築

5-1 非定常载荷を考慮するためのパラメータ導入の方針

本研究で取り扱う高硬度ゴムは、大変形の経験前後で性質が異なる。また、主成分が天然ゴムであるため、同じ配合でも、製造時期などの違いによりゴムの特性が最大15%程度異なる(同一ロット内での管理精度は5%)。そこで、3節で提示した基本復元力特性で与えられる各要素の反力に、過去の歪履歴や、製造時の検査によって定量化された基本特性からの変動量によって定義される係数を乗じることによって、前述の性質を表現することとする。すなわち、モデルの全反力を以下のように表現する。

$$\tau = \beta_2 (\beta_1 \alpha_i \tau_1 + \alpha_2 \tau_2 + \alpha_3 \tau_3) \quad (7)$$

ここで、 α_i : 大変形経験後の特性の変化を表現する係数 ($i=1, 2, 3$)

β_1 : 初期変形時に見られる反力の増大を表現する係数

β_2 : 材料特性の変動を考慮するための係数

τ_1 : 弾塑性要素の定常ルールでの反力

τ_2 : 弾性要素の定常ルールでの反力

τ_3 : 粘性要素の定常ルールでの反力

5-2 大変形経験後の性質の変化を表現する係数 α_i

高硬度ゴムにおいては、大変形を経験した後、反転時の歪が同じであっても反力の減少が見られる。そこで、過去に経験した最大歪 γ_{max} に対して、変位方向が入れ替わったときの歪 γ_{re} の割合 α を(8)式のように定義し(図11)、(7)式における α_i ($i=1, 2, 3$)を(9)式に示すような α の関数とすることで、大変形経験後の各要素の反力の減少を表現することとする。

$$\alpha = \frac{|\gamma_{re}|}{\gamma_{max}} \quad (8)$$

$$\alpha_i = A_i \alpha^{\beta_i} + C_i \quad (9)$$

α_i ($i=1, 2, 3$)の変化の一例を図12に示す。 $\alpha=1$ のとき、 $\alpha_i=1$ となるように A_i, C_i ($i=1, 2, 3$)を設定することで、定常载荷の場合は常に $\alpha_i=1$ となり、係数 α_i を導入しても履歴ループの形状は変化しない。

5-3 初期変形時に見られる反力の増大を表現する係数 β_1

図13に、高硬度ゴムに定振幅定常载荷を与えたときの、第1サイクルから第4サイクルまでの履歴ループを連続的に描いたものを示す。この図に見られるように、高硬度ゴムは载荷1サイクル目の変形時には2サイクル目以降の変形時の1.2倍程度の反力を示す。これは载荷振動数の大小に関わらず観察される。そこで、载荷振動数に依存しない弾塑性要素の反力に係数 β_1 を乗じることで、この性質を表現する。すなわち、

$$\beta_1 = \begin{cases} 1.2 & (|\gamma_{max}(i-1)| < |\gamma(i)|) \\ 1.0 & (|\gamma_{max}(i-1)| \geq |\gamma(i)|) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 γ_{max} : 過去に経験した最大歪

γ : 現時刻のせん断歪

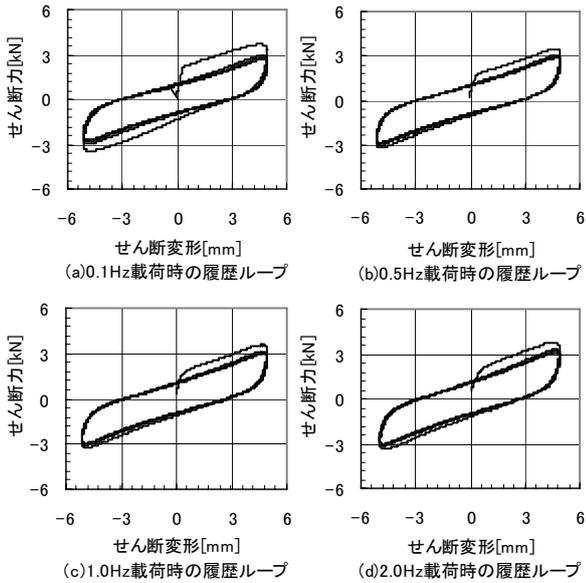


図 13 繰り返し载荷による履歴ループの差

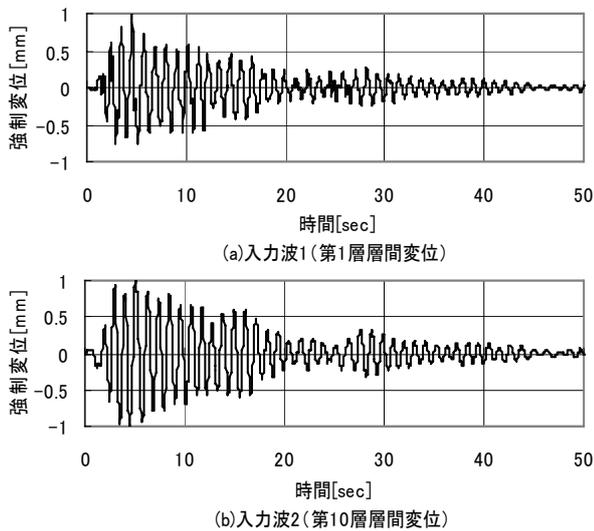


図 14 入力波

5-4 材料特性のばらつきを考慮するための係数 β_2

天然ゴムの材料特性のバラつきに起因して、高硬度ゴムには製造ロットの違いによる不可避的な特性の変動が生じる（管理精度は15%）。ただし、同一ロット内のバラつきは合成ゴムを主原料としたときと同等である（管理精度は5%）。この変動を反映させるために、標準的な値のパラメタを用いて計算される反力全体に係数 β_2 を乗じる。係数 β_2 の値は、出荷前の標準载荷テスト等により決定するものとする。

6. ランダム波入力試験とそのシミュレーション解析

6-1 小振幅歪レベルに対するモデル化

建物に頻繁に作用する小さなレベルの外乱を想定した、ランダム波入力実験とシミュレーションの比較の一例を示す。高硬度ゴムダンパーを組込んでいない弾性10層せん断型質点系モデル（固有周期1.0秒）に、振幅を調整したEl Centro 1940 NSを入力する。そのときの第1層の層間変位（入力波1と呼ぶ）および最上層の層間変位（入力波2と呼ぶ）を地震入力時にダンパーに入力される代表波形

として取り出し、それらを強制変位として高硬度ゴムダンパーに与えたときの実験とシミュレーションとの比較を行った。実験には図1に示した供試体（高硬度ゴムの厚さ5mm）を用いた。最大変位を1mm（せん断歪0.2）に基準化した入力波1と2を図14に示す。入力波1は1次固有周期である1.0秒に卓越周期のある入力となり、入力波2は入力波1に比べて高次モードの影響がより多くみられる。

実験結果に基づき、高硬度ゴムに生じる最大せん断歪が0.2程度のランダム入力に最も適合した値として、大変形経験後の反力の減少を表現するための係数 α_i ($i=1, 2, 3$) を以下のように設定した。

$$\alpha_1 = 0.74\alpha^5 + 0.26 \quad (11a)$$

$$\alpha_2 = -2.5\alpha^{0.4} + 3.5 \quad (11b)$$

$$\alpha_3 = \alpha^{0.5} \quad (11c)$$

材料特性の変動を表すための係数 β_2 は、実験結果と対応するようにここでは0.9とした。尚、上で示した各係数の値は、5節で提示した非正常载荷を考慮するための方法の有効性を検証することを目的として、本節で示した実験結果とシミュレーションが最も合致するように係数の値をパラメトリックに変動させて決定したものである。より大きな歪領域における各係数の値については次節に示す。また、各係数の値の合理的な決定方法については、別稿で提示したい。

ダンパー反力-変位の履歴ループを図15に、反力の時刻歴を図16に、累積吸収エネルギーを図17に示す。図15の左側には実験結果を、右側にはシミュレーション結果を示す。これらの図より、ランダム波を入力した場合においても、材料特性の変動と非正常入力に起因する基本履歴ループの変化を適切に考慮することにより、実験結果を良好にシミュレートできるといえる。

図18には入力波1に対する時刻ごとの履歴ループを示す。左側には実験結果を右側にはシミュレーション結果を示す。図19には入力波2に対する同様の図を示す。せん断歪が0.01程度の小さな歪レベルから0.2程度の大きな歪レベルまで、幅広い領域において、シミュレーション結果は実験結果を精度よくシミュレートできているといえる。

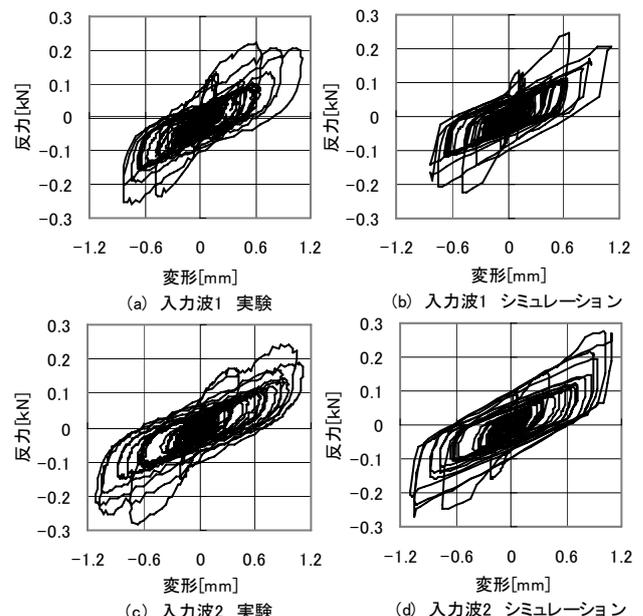
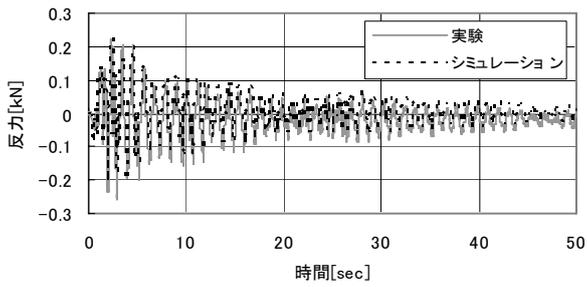
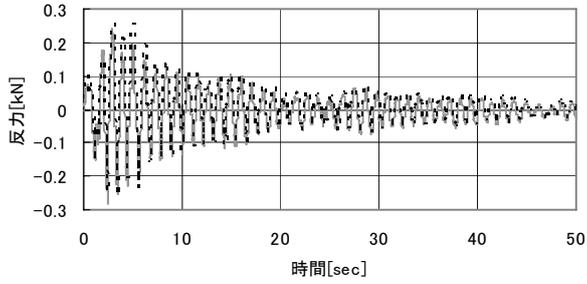


図 15 履歴ループの比較(左:実験 右:シミュレーション)

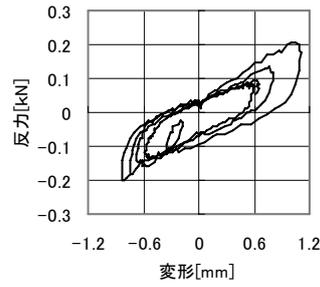


(a)入力波1

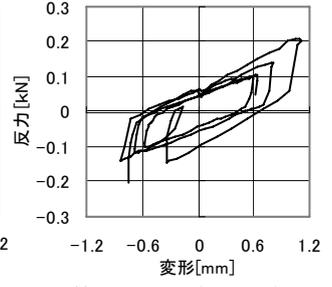


(b)入力波2

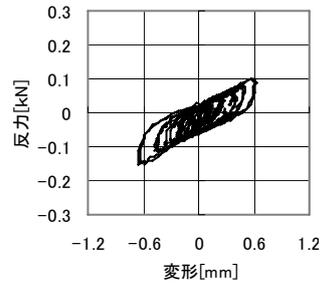
図 16 反力の時刻歴の比較



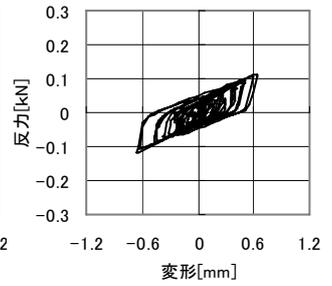
(e) t=4.0~8.0 実験



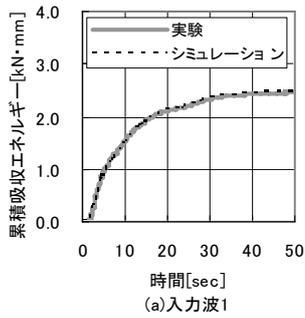
(f) t=4.0~8.0 シミュレーション



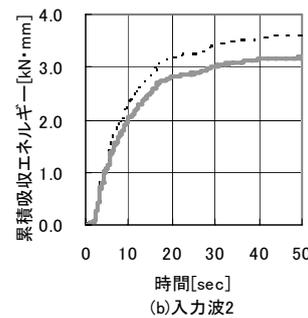
(g) t=10~25 実験



(h) t=10~25 シミュレーション

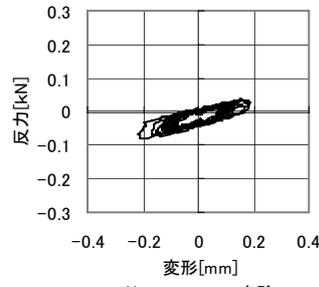


(a)入力波1

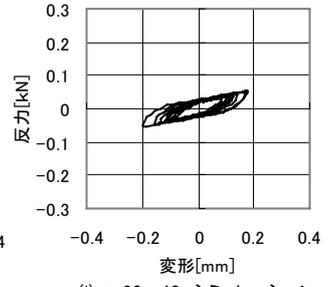


(b)入力波2

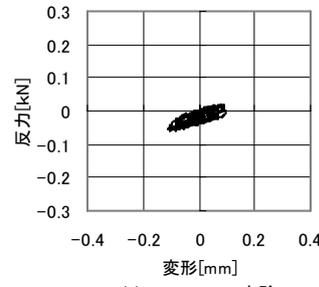
図 17 累積吸収エネルギーの比較



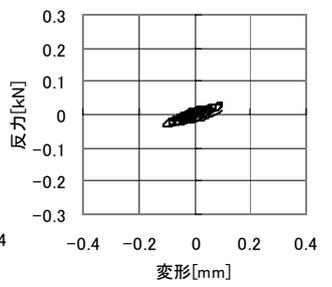
(i) t=30~40 実験



(j) t=30~40 シミュレーション

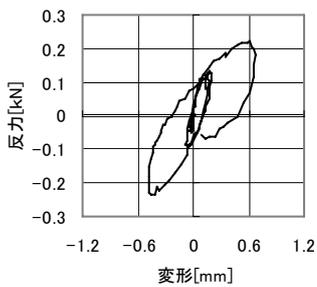


(k) t=40~50 実験

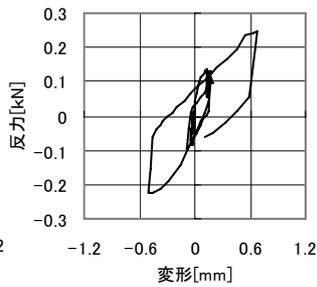


(l) t=40~50 シミュレーション

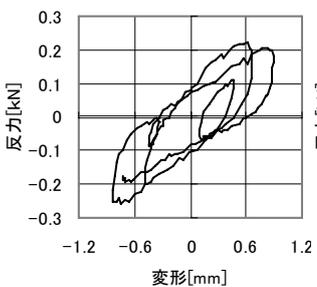
図 18 (続) 入力波 1 に対する時刻ごとの履歴ループ (左:実験, 右:シミュレーション)



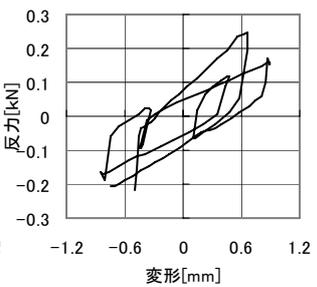
(a) t=0.0~2.5 実験



(b) t=0.0~2.5 シミュレーション

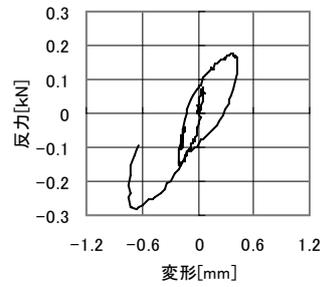


(c) t=2.0~4.0 実験

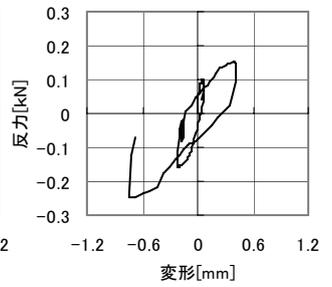


(d) t=2.0~4.0 シミュレーション

図 18 入力波 1 に対する時刻ごとの履歴ループ (左:実験, 右:シミュレーション)



(a) t=0.0~2.5 実験



(b) t=0.0~2.5 シミュレーション

図 19 入力波 2 に対する時刻ごとの履歴ループ (左:実験, 右:シミュレーション)

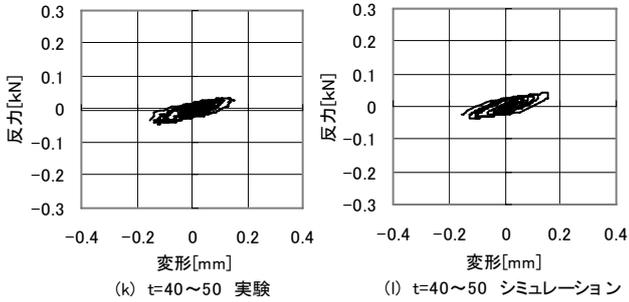
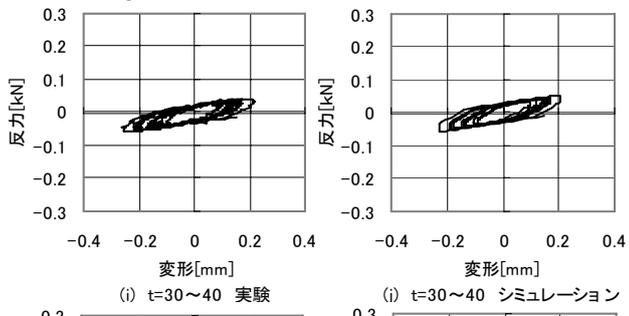
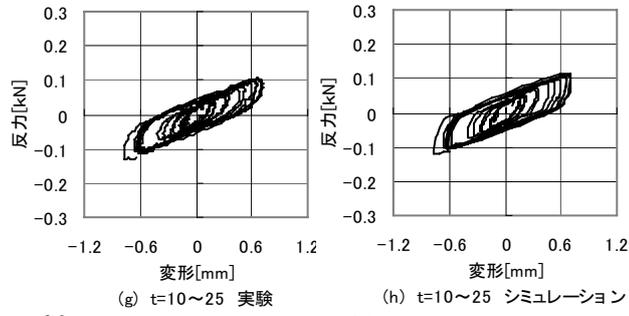
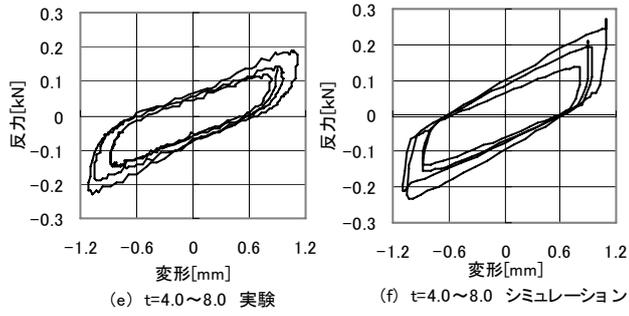
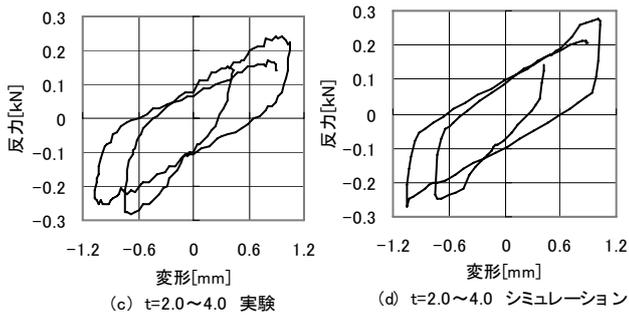


図 19 (続) 入力波 2 に対する時刻ごとの履歴ループ (左 : 実験 , 右 : シミュレーション)

6-2 大振幅歪レベルに対するモデル化

建物に稀に作用する大きなレベルの外乱を想定した、漸減正弦波入力実験とシミュレーションの比較の一例を示す。実験には図 1 に示した供試体 (高硬度ゴムの厚さ 5mm) を用い、最大せん断歪が 1.0、振動数が 1.0Hz の漸減正弦波を強制変位として与えた。入力波

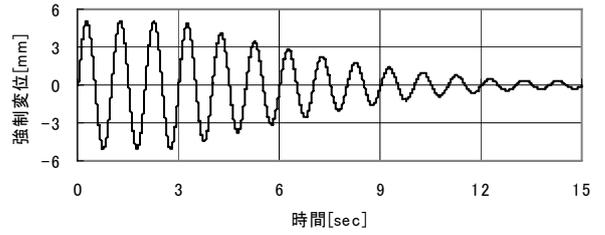


図 20 漸減荷重に対応する入力波

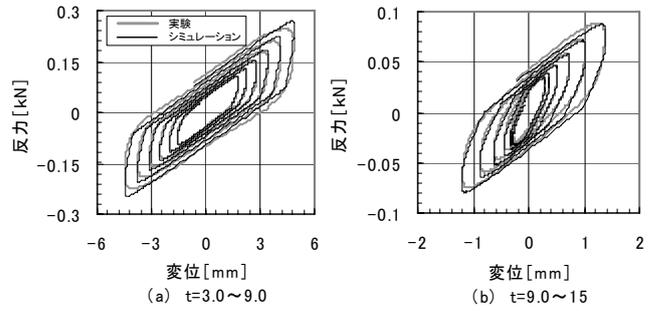


図 21 漸減荷重時の履歴ループ (左 : 前半 , 右 : 後半)

形を図 20 に示す。本論文で対象とする高硬度ゴムは、歪が漸増となる場合には、それまでに経験した最大歪がサイクルごとに更新されるため、 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1.0$ としてモデル化することが可能である。それに対して、歪が漸減となる場合には、ランダム入力の場合と同様に α_1 から α_3 を適切に設定する必要がある。しかも、小振幅歪領域と大振幅歪領域で特性が異なるため、6.1 節とは異なるパラメータを設定する必要がある。

実験結果に基づき、高硬度ゴムに生じる最大せん断歪が 1.0 程度の漸減歪入力に最も適合した値として、大変形経験後の反力の減少を表現するための係数 α_i ($i=1, 2, 3$) は以下のように設定できる。

$$\alpha_1 = 0.8\alpha^2 + 0.2 \quad (12a)$$

$$\alpha_2 = -3\alpha^{0.8} + 4 \quad (12b)$$

$$\alpha_3 = 0.85\alpha^{0.35} + 0.15 \quad (12c)$$

尚、材料特性の変動を表すための係数 β_2 は、実験結果と対応するようにここでは 1.2 とした。

時刻ごとの履歴ループを図 21 に示す。実験とシミュレーションは、ほぼ全領域で精度よく表現できているといえる。今後、このような大振幅歪の領域でも、6.1 節と同様のランダム波に対するシミュレーションと実験の比較を行い、(12)式のパラメータの妥当性をさらに詳細に検討する必要がある。また、(11)、(12)式の適用歪領域についてもさらなる検討が必要である。

7. まとめ

本研究では、天然ゴムに特殊添加剤を付与して製造された高硬度ゴムが有する歪依存性と振動数依存性を、せん断歪が 0.5% 程度の微小な変形域から、せん断歪が 100% 程度の大変形域まで良好な精度で表現できる力学モデルを構築した。本論文の成果は以下のとおりである。

- 1) 高硬度ゴムの復元力特性にみられる顕著な歪依存性と、他の代表的な粘弾性材料に比べるとやや程度が小さい振動数依存性を、軟

化型の復元力特性を有する静的弾塑性バネ要素,非線形粘性要素,および過去に経験した最大歪により剛性が決まる動的弾性要素からなる3要素の並列モデルで表現する方法を提案した.本モデルは,モデル化の簡明さと精度を両立させた力学モデルである.力学モデルにおけるパラメータは,高硬度ゴムを粘弾性体として用いたダンパーに対する定常振幅正弦波入力試験(載荷振動数:0.01Hz~2.0Hz,載荷歪振幅:0.5%~100%)の結果に適合するように決定した.

- 2) 高硬度ゴムにおいて,歪振幅が漸減する場合にみられる復元力の低下を適切に表現できる方法を提案した.すなわち,1)で力学パラメータを決定した3要素の復元力に,過去に経験した最大の歪と直前に経験した歪の反転値の比で定義される関数を乗じることにより,精度よくシミュレートできることを示した.
- 3) 高硬度ゴムダンパーを多層建物内に組み込む場合を想定したランダム波入力試験を実施し,構築した力学モデルにより十分な精度でシミュレートできることを示した.
- 4) 本研究で構築した力学モデルは,高硬度ゴムの復元力特性を,せん断歪が0.5%程度の極微小変形領域から,せん断歪が100%程度の大変形領域まで,定常載荷については統一的かつ同一パラメータで表現可能であり,ランダム載荷についてはパラメータ変更でかなり精度よく表現できることを明らかにした.

尚,本研究で用いた弾塑性バネ要素は軟化型の復元力特性を有するため,せん断歪が300%を超えるような高硬度ゴムが硬化型の復元力特性を示す極大变形領域に対してはそのままでは適用できない.しかしながら,文献3)で用いられているような蝶ネクタイ状の復元力特性を有する弾塑性バネ要素を,本研究で構築した3要素並列モデルにさらに並列的に加えることで,硬化型の復元力特性を表現することが可能であることは十分予想できる.このような極大变形領域に対する適用性については,今後の課題としたい.

謝辞

本研究の一部は,京都大学と(株)SRIハイブリッドとの共同研究による.実験に際し,田中克往氏ならびに田中和宏氏(SRIハイブリッド)より多大な尽力をいただいた.ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 1) 曾田五月也,和田純一,平田裕一,山中久幸:繰返加力実験にもとづく粘弾性ダンパーの力学モデルの構築,日本建築学会構造系論文報告集 No.457, pp.29-36, 1994.3
- 2) 曾田五月也,高橋雄司:ランダム加力による粘弾性ダンパーの振動数依存性の定量化,日本建築学会構造系論文集, No.498, pp.43-49, 1997.8
- 3) 曾田五月也,柿本和茂,関谷英一:軟化型・硬化型非線形粘弾性ダンパーの力学モデル,日本建築学会構造系論文集, No.551, pp.45-52, 2002.1
- 4) 金子美香,中村 豊:振幅および振動数依存性を有する粘弾性ダンパーの力学モデルの提案,構造工学論文集, Vol.44B, pp.263-270, 1998.
- 5) 黄 一華,加藤敬史,和田 章,岩田 衛,竹内 徹,大熊 潔:振動数と温度に依存する粘弾性ダンパーの動的力学モデル,日本建築学会構造系論文集 No.516, pp.91-98, 1999.2
- 6) 来田義弘,中村 豊,竹脇 出,上谷宏二:高減衰ゴムダンパーの力学モデルの構築とその適正配置に関する検討,構造工学論文集, Vol.46B, pp.279-288, 2000.
- 7) 来田義弘,中村 豊,竹脇 出,上谷宏二:非線形システム同定法による高減衰ゴムダンパー力学モデルの構築,日本建築学会構造系論文集, No.531, pp.63-70, 2000.
- 8) 笠井和彦,寺本道彦,大熊 潔,所 健:粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その1 線形領域における温度・振動数依存のモデル化),日本建築学会構造系論文集, No.543, pp.77-86, 2001.5
- 9) 笠井和彦,所 健:粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則,(その2 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化),日本建築学会構造系論文集, No.561, pp.55-63, 2002.11
- 10) 笠井和彦,大木洋司,雨宮健吾,木村勝彦:イソブチレン・スチレン系のブロック共重合体からなる粘弾性材料の構成則(その1 小歪領域における温度・振動数依存のモデル化),日本建築学会構造系論文集, No.569, pp.47-54, 2003.7
- 11) 佐藤大樹,笠井和彦,田村哲郎:高層建物の制振を対象とした風洞実験装置の開発および風応答に関する基礎的研究—粘性・粘弾性ダンパーを有する高層建築物の一様流中における風洞実験—,日本建築学会構造系論文集, No.609, pp.65-73, 2006.11
- 12) 石川理都子,諏訪 仁,関松太郎:非線形粘弾性ダンパーのモデル化に関する検討,日本建築学会構造系論文集, No.544, pp.47-52, 2001.6