高減衰積層ゴム支承の 3 次元有限要素解析

東京大学大学院　学生会員　吉田純司
東京大学大学院　正会員　　阿部雅人
東京大学大学院　フェロー　藤野陽三

1．はじめに　近年，高減衰積層ゴム支承を用いた免震構造を採用している橋梁，建築物が増加している．高減衰積層ゴム支承は，構成材料にエネルギー吸収性能を持つゴムを使用しているため，支承の力学特性は非常に複雑なものとなる．そのため，材料レベルから支承の復元力特性を近似するモデルは存在せず，手間，費用のかかる性能確認試験が義務づけられている．そこで本研究では，材料レベルから高減衰積層ゴム支承の力学特性を再現できる有限要素モデルを構築することを目的とした．

2．数値計算手法　本研究では，Updated Lagrange 法[2),3),4)]による高減衰積層ゴム支承の 3 次元有限要素モデルを構築した．以下に数値計算手法の概要を示す．ゴム材料は非圧縮もしくは微圧縮とみなされることが多く，変位からだけでは決定が困難な圧力が存在する．本研究では，高減衰ゴムが微圧縮であるとしてモデル化をおこなった．これは，特に微圧縮を仮定し体積弾性係数を非常に大きな値にすることで非圧縮も再現可能なためである．ゴム層に相当する部分では，微圧縮の条件を反映し，変位とともに圧力を内挿する混合法[3), 4)]を用いた．また，変位の離散化では，Lagrange8 節点のアイソパラメトリック 6 面体要素を用い，圧力の離散化では要素ごとに不連続な要素内一定（圧力 1 節点）のものを用いた. 一方, 鋼板に相当する部分には，変位のみを独立変数とした Lgrange8 節点のアイソパラメトリック 6 面体要素を用いた．

3．構成則　以下では，有限要素モデルを構築するにあたり利用した高減衰ゴムおよび鋼の構成則の概要を示す．

1) 高減衰ゴム　高減衰ゴムの構成則は，文献 1)で提案した弾塑性体と超弾性体を組み合わせたモデルを用いた．

a）弾塑性部分　文献 1)に記した弾塑性モデルでは，接線剛性を得ることができず有限要素法に利用できない．そこで，ここでは以下のような古典塑性論[2)]に従った非圧縮型の（偏差成分のみの）完全弾塑性体を用いた．

$$\overset{\circ}{\hat{T}}'_{ij} = (C^e_{ijkl} - C^p_{ijkl}) D_{kl} \qquad (1a)$$

$$C^e_{ijkl} = \frac{2E}{3}\left(d_{ik}d_{jl} - \frac{d_{ij}d_{kl}}{3}\right) \qquad (1b)$$

$$C^p_{ijkl} = \frac{3E\hat{T}'_{ij}\hat{T}'_{kl}}{\bar{s}^2} \quad (\bar{s} \ge s_y) \qquad (1c)$$

$$C^p_{ijkl} = 0 \quad (\bar{s} < s_y) \qquad (1d)$$

$$\bar{s} = \left(\frac{3}{2}\hat{T}'_{pq}\hat{T}'_{pq}\right)^{1/2} \qquad (1e)$$

$$\hat{T}'_{ij} = \hat{T}_{ij} - \frac{\hat{T}_{kk}}{3} d_{ij} \qquad (1f)$$

ここに，$\hat{T}_{ij}$ ：Kirchhoff 応力テンソル，D_{ij} ：変形速度テンソル，E ：ヤング率，s_y ：降伏応力である．また，$\overset{\circ}{\mathbf{A}}$ は $\mathbf{A}$ の Jaumann 速度[2)]を表すものとする．ただし，式(1a)～(1f)で示される古典塑性論は，文献 1)で用いている弾塑性モデルと異なり，弾性から塑性に遷移する区間を滑らかに表現することはできず，バイリニアモデルのような急激な変化を呈する．

b）超弾性部分　本有限要素モデルでは，微圧縮を仮定しているため，文献 1)で用いたひずみエネルギー密度関数に加え，圧力と体積変化の関係式が必要となる．圧力と体積変化の関係を加えた超弾性体は，以下のように記述できる．

$$\mathbf{S} = -Jp\mathbf{C}^{-1} + 2\frac{\partial W}{\partial \mathbf{C}} \qquad (2)$$

ただし，$\mathbf{S}$ は第 2Piola-Kirchhoff 応力テンソルである．また，p は圧力，W はひずみエネルギー密度関数であり，本研究では次式のものを用いた．

$$p = -k \ln J \qquad (3a)$$

$$W = c_1(\bar{I}_C - 3) + c_2(\overline{II}_C - 3) + \frac{c_3}{n+1}(\bar{I}_C - 3)^{n+1} \qquad (3b)$$

ここに，$\mathbf{C}$ は右 Cauchy-Green テンソル，J は変形勾配テンソル $\mathbf{F}$ の determinant であり，c_1，c_2，c_3，n および k は材料定数である．また，$\bar{I}_C$ および $\overline{II}_C$ は，$\mathbf{C}$ の低減不変量と呼ばれ，体積変形に対して不変の値である．具体的には $\mathbf{C}$ の第 1，第 2，第 3 不変量をそれぞれ I_C，II_C，III_C とすると次のように定義される．

$$\bar{I}_C = I_C / III_C^{1/3} \qquad (4a)$$

$$\overline{II}_C = II_C / III_C^{2/3} \qquad (4b)$$

2）鋼　本研究では，積層ゴム支承が大変形する場合に内部鋼板が塑性化する可能性も考慮し，古典塑性論に従う弾塑性体[2)]としてモデル化した．特に鋼の硬化挙動のモデル化では，n 乗則に従う複合硬化則を用いた．

キーワード：3 次元有限要素法，高減衰積層ゴム支承，微圧縮，超弾性体，弾塑性体
連絡先：〒113-8656　東京都文京区本郷 7-3-1　東京大学　TEL:03-5841-6099　FAX:03-5841-7454

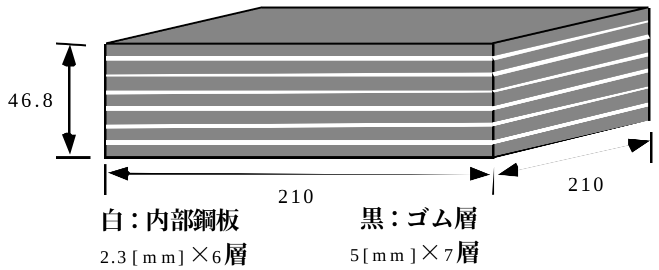

図-1　解析対象の高減衰積層ゴム支承

表-1　解析に用いたメッシュ

		要素数
平面方向		8×8
高さ方向	ゴム層１層あたり	3
	鋼鈑１層あたり	1
総要素数		1728

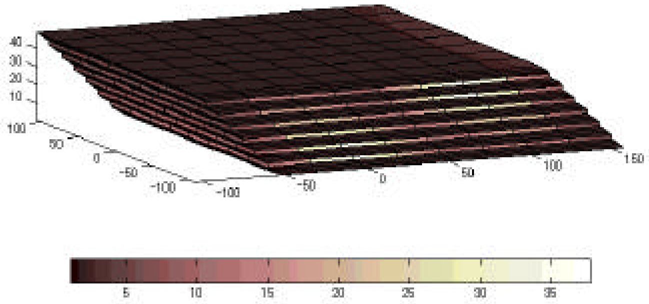

図-2　面圧 3.92[MPa]下でせん断ひずみ 150[%]の変形を受ける高減衰積層ゴム支承の応力場[MPa]

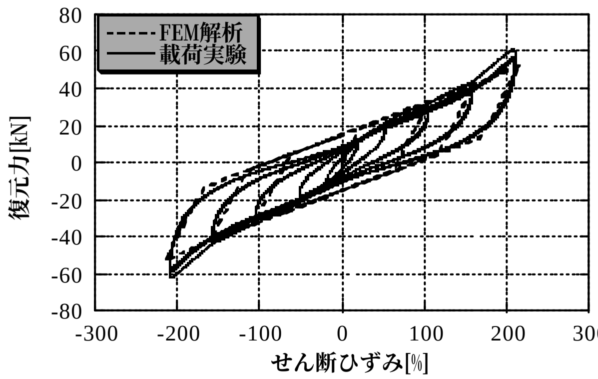

図-3　FEM 解析結果と載荷実験結果の比較

<u>4. 解析対象</u>　今回解析の対象とした支承は，図-1 に示すように平面寸法 210×210 の角型の高減衰積層ゴム支承である．この支承は，著者らがモデルを検証するために解析に先立って載荷実験を行ったものである．本研究では，この積層ゴム支承を表-1 に示すメッシュに分割して解析を行った．

高減衰ゴムの材料定数は，文献 1)に記した値を用いた．また，式(3a)の体積弾性係数 k は，一般にせん断弾性係数の 1000～2000 倍程度である [5]ことから，本研究では式(3b)で示される超弾性部分のせん断弾性係数 $2(c_1+c_2)$ の 1500 倍の値を用いた．一方，鋼（ss400）の材料定数は既往の FEM 解析で使用されている値を用いた．

<u>5. 解析結果と考察</u>　まず，図-2 に解析結果の一例としてせん断変形 150％を支承に与えた場合の応力場（Mises の相当応力）を示す．図-2 をみると，内部鋼板に発生している応力は，降伏応力 240[MPa]に達しておらず，この段階では，まだ塑性化していないことがわかる．

次に図-3 に FEM による解析結果と，高減衰積層ゴム支承の載荷実験結果との比較を示す．図-3 をみると大振幅領域においては，支承の剛性および減衰性能は概ね再現できている．しかし，FEM による解析結果は，バイリニアモデルのような変位-荷重関係となっており，実験結果に見られる滑らかな履歴曲線を再現できていない．そのため，特に小中振幅においては実験結果より剛性および減衰ともに大きくなっていることがわかる．これは，文献 1)で用いた弾塑性モデルの近似として古典塑性論に従う弾塑性体を用いたことによると考えられる．

<u>6. まとめ</u>　本研究では，高減衰積層ゴム支承の 3 次元有限要素モデルを構築することを目的とした．本モデルにより，高減衰積層ゴム支承の持つエネルギー吸収性能が再現可能となった．しかし現段階では，高減衰ゴムの構成則を完全に有限要素モデルに取り入れることができず小中振幅における水平復元力特性は再現できていない．

今後の課題は，1) 高減衰ゴムの構成則を精緻化する，2) 免震橋梁において重要な性質であり，かつ載荷実験が困難な回転変形やねじれ変形などに対する支承の力学特性を解析的に把握する，ことである．

<謝辞>　有限要素法のプログラムの開発では，東京大学新領域創成科学研究科環境学の渡辺講師にご指導頂いた．また積層ゴム支承の載荷実験における積層ゴム支承の設計，製作およびゴムの材料試験では，川口金属（株）鵜野氏，（株）ブリジストンの須藤氏，横浜ゴム（株）の遠藤氏，オイレス工業（株）の横川氏に協力して頂いた．ここに記して謝意を表する．

参考文献：　1) 吉田純司，阿部雅人，藤野陽三：高減衰ゴムの構成則の構築，土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集Ⅰ-B，pp.118-119，1999.　2) 久田俊明，野口裕久：非線形有限要素法の基礎と応用，丸善，1995.　3) Sussman.T, K.J.Bathe:A Finite Element Formulation for Nonlinear Incompressible Elastic and Inelastic Analysis, *Computer & Structure*, Vol.26, No.1/2, pp357-409, 1987.　4) 渡辺浩志：非圧縮性超弾性体の混合型有限要素解析に関する研究，東京大学学位論文，1995.　5) 日本免震構造協会：免震構造入門，オーム社，1995.