端部回転を有する免震用積層ゴムの水平剛性と取付け部材の設計用応力に関する研究

A STUDY ON LATERAL STIFFNESS AND DESIGN STRESS OF INSTALL MEMBER ON LAMINATED RUBBER BEARINGS SUBJECTED TO END ROTATION

小林正人*, 下田 卓**, 西村拓也***

Masahito KOBAYASHI, Suguru SHIMODA and Takuya NISHIMURA

The purpose of this study is to gain an understanding of the lateral stiffness of laminated rubber bearings subjected to end rotation, and design stress of member to install in end of laminated rubber bearings. To understand the mechanical properties of laminated rubber bearings subjected to end rotation, the mechanical properties of laminated rubber bearings concatenated the rotational spring are evaluated. In addition, the degree of fluctuation in lateral stiffness and bending moment are evaluated by using the analytical model assuming a base isolated building with inclination of pile top.

Keywords : *Base-isolation, Laminated rubber bearing, End rotation, Stiffness degradation, Bending moment distribution, Coupled model*

免震, 積層ゴム, 端部回転, 剛性低下, 曲げモーメント分布, 連成モデル

1. はじめに

免震建物の設計において, 免震デバイスとして一般的な積層ゴムを用いる場合, 通常積層ゴムの上下には剛強な二重基礎が設けられる。この場合, 積層ゴム取付け部の固定度は十分に大きいため, 積層ゴム端部の回転は拘束され安定した水平挙動を示す。一方, 免震建物の建設コストの削減や免震層の有効利用の観点, または耐震改修の一手法として, 柱頭・杭頭に直接免震装置を設置する柱頭・杭頭免震構造の建設事例が報告されており, 2011年東北地方太平洋沖地震において杭頭免震構法を適用した実建物で免震効果が確認されている¹⁾。

柱頭・杭頭免震では, 柱間や柱頭・杭頭に直接免震デバイスを設置するため, 二重基礎を省略または簡略化することがある。これらの構法では積層ゴム取付け部の固定度が低下するため, 地震時には積層ゴム端部に回転が生じる。回転により生じる積層ゴムの軸心の傾斜により, 鉛直荷重の分力が付加せん断力として働き積層ゴムの水平変位が増加する。従来の積層ゴムの剛性評価式では積層ゴム端部回転の影響を考慮していないため, 設計時には端部回転を考慮して剛性評価を行う必要がある。

積層ゴムの水平剛性と座屈荷重に関する古典的力学理論として Haringx 理論がよく知られており, 積層ゴムの一般的な剛性評価式は端部の回転を拘束した条件下で求められている²⁾。積層ゴムの端部回転を考慮した水平剛性評価式として, 浅野・嶺脇ら³⁾は積層ゴ

ムの存在応力に応じて曲げモーメント - 回転角関係における非線形特性を逐次計算することで任意の応力状態における積層ゴムの特性を評価している。飯塚⁴⁾は Haringx 理論に基づき端部の回転を考慮した剛性マトリクスの定式化を行っている。また, 飯塚・高岡ら⁵⁾は積層ゴムを高さ方向に分割し, 各分割要素を回転ばね, せん断ばね, 剛体要素で構成したモデルに材料非線形特性を導入し, 大変形域までの挙動を追跡できるモデルへの拡張を行っている。三山⁶⁾は飯塚の提案する剛性マトリクスに基づき, 積層ゴムの面圧依存性や変位依存性の影響を考慮し, 剛棒に曲げばねとせん断ばねを用いたモデルにより物理的な意味を明解にした剛性マトリクスを示している。これらの手法の多くは各種特性の設定がやや難解で高度な専門知識が必要となるが, 積層ゴムの非線形特性や各種依存性, ハードニングなどを精密に評価することが可能である。

積層ゴムに取付く部材の設計用応力については, 積層ゴムの高さ方向における曲げモーメント分布は端部回転が発生しない場合, 反曲点位置が積層ゴム中心に位置するため, 上下端部が負担する曲げモーメントは均等である。しかし, 端部回転が発生すると反曲点位置が回転の生じる端部側に移動し, 曲げモーメント分布に変化が生じため, 積層ゴム端部モーメントの増加量を適切に評価する必要がある⁷⁾。

本論では端部回転を有する積層ゴムの剛性評価手法として三山の評価式⁸⁾を採用し, 端部回転を有する積層ゴムの特性を評価する。

* 明治大学理工学部建築学科 准教授・博士(工学)

** 明治大学大学院理工学研究科建築学専攻 博士前期課程

*** 清水建設㈱技術研究所 主任研究員・修士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.
Dept. of Architecture, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ.
Senior Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

さらに、積層ゴムに取付く部材の回転剛性を回転ばねに集約し、積層ゴムの水平剛性低下の割合と取付け部に作用する曲げモーメントの増減率について評価する。また、杭頭免震建物を想定した積層ゴム－杭－基礎梁連成解析モデルにより実架構を想定した回転剛性評価および周辺部材の応力状態を評価する。

2. 端部回転を有する積層ゴムの構成則

2.1 三山の剛性評価手法

三山は飯塚の提案する Haringx 理論に基づく剛性評価式の物理的な意味をより明確化し、積層ゴムのせん断剛性および回転剛性に関する水平変位依存性を導入した剛性方程式を提案している。この手法は 4×4 のマトリクス演算であり、既往の評価式の中でも比較的簡易に表現されている。また、各剛性項を分割して扱えるため、積層ゴムごとに異なる非線形特性を導入しやすいという利点があり、評価式としての汎用性も高い。端部回転を有する積層ゴムの評価モデルを図 1 に示す。このモデルに基づく、積層ゴムの荷重変形関係は(1)式で表される。

$$\begin{Bmatrix} Q_A \\ M_A \\ Q_B \\ M_B \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_h \begin{bmatrix} 1 & -H/2 & -1 & -H/2 \\ H^2/4 & H/2 & H^2/4 & H/2 \\ 1 & H/2 & 1 & H/2 \\ \text{sym.} & H^2/4 & H/2 & H^2/4 \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} 0 & -1/2 & 0 & -1/2 \\ H/4 & 1/2 & 0 & H/4 \\ 0 & 1/2 & 0 & H/4 \\ \text{sym.} & H/4 & 1/2 & H/4 \end{bmatrix} \\ + K_r \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{sym.} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_A \\ \theta_A \\ x_B \\ \theta_B \end{Bmatrix} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 Q_A : A 点のせん断力、 Q_B : B 点のせん断力、 M_A : A 点の曲げモーメント、 M_B : B 点の曲げモーメント、 x_A : A 点の変位、 x_B : B 点の変位、 θ_A : A 点の回転角、 θ_B : B 点の回転角、 P : 鉛直軸力、 H : 積層ゴム高さ(ゴム厚+鋼板厚)である。

積層ゴムの水平剛性 K_h および回転剛性 K_r は積層ゴムに作用する軸力に伴う非線形性を有する。積層ゴムの水平剛性 K_h 、回転剛性 K_r

図1 積層ゴムの評価モデル

は座屈荷重 P_{cr} の影響を考慮して(2)~(4)式によって表される。

$$K_h = \frac{G \cdot A}{n t_r} \left(1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right) \cdot \phi_h \quad (2)$$

$$K_r = \frac{E_{rb} \cdot I}{n t_r} \left(1 - \left(\frac{P}{P_{cr}} \right)^2 \right) \cdot \phi_{rc} \cdot \phi_{\sigma} \quad (3)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi}{n t_r} \sqrt{G \cdot A \cdot E_{rb} \cdot I} \quad (4)$$

ここで、 G : ゴムのせん断弾性率、 A : ゴム部のせん断断面積、 n : ゴム層数、 t_r : ゴム 1 層厚さ、 E_{rb} : 体積弾性率で補正されたゴムの曲げ弾性係数⁸⁾、 I : ゴム部の断面 2 次モーメントである。

(2)式では積層ゴムの水平剛性に水平変位依存性 ϕ_h を考慮している。積層ゴムはせん断ひずみ γ の増加に伴い水平剛性が低下し、一定のひずみレベルを超えるとハードニングにより水平剛性が増加する特徴があるが、積層ゴムごとにその特性は異なるため、実験により評価することが一般的である。三山は、水平剛性の水平変位依存性を圧縮せん断実験に基づき評価している。せん断ひずみ $\gamma=100\%$ 時の積層ゴムの割線剛性を基準とし、試験体の各ひずみレベルでの割線剛性の低下率を近似式により示したものとなる。積層ゴムの水平変位依存性 ϕ_h は(5)式で表される。

$$\phi_h = \left(\frac{x}{n t_r} \right)^u \quad (5)$$

ここで、 u は図 2 に示す水平変位依存性の曲線形状を決定する係数であり、実験結果より定められる。 $u=0$ のとき、常に $\phi_h=1$ となり、積層ゴムの水平剛性を線形として扱うことができる。文献 6) では実験結果より求めた水平変位依存性と一致するように $u=-0.16$ としている。

また、 K_r は(3)式より図 3 に示す水平変位依存性 ϕ_{rc} を考慮している。図 4 に示すように、変形 x 時において積層ゴムの回転変形に関する有効断面積を上下面が重なる領域 S とすると、 ϕ_{rc} は領域 S の重心を通る直線 y 軸まわりの断面 2 次モーメントと積層ゴム全断面の断面 2 次モーメントの比となる。よって、回転剛性に関する水平変位依存性 ϕ_{rc} は積層ゴム円形断面の直径 D を用いて(6)式、(7)式で表される。

$$\phi_{rc} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{2} \theta_d + 2 \theta_d \cos^2 \theta_d - \frac{13}{6} \sin^3 \theta_d \cos \theta_d - \frac{5}{2} \sin \theta_d \cos^3 \theta_d \right) \quad (6)$$

$$\theta_d = \cos^{-1}(x/D) \quad (7)$$

図2 水平剛性の変位依存性

図3 回転剛性の変位依存性

図4 曲げに関する有効断面

図 3 に示すように、 ϕ_{rc} は積層ゴムの水平変位 x の増加とともに低下し、積層ゴム上下面の重なりがなくなるとき ($x/D=0$) に $\phi_{rc}=0$ となる。

文献 9) では、積層ゴムのゴム部において平面保持を仮定して求めた縁応力度 σ が引張降伏応力度 σ_y に達すると回転剛性 K_r が非線形となる材料非線形特性 ϕ_σ を考慮している。積層ゴムの降伏回転角 θ_y は (8) 式で表し、材料非線形特性 ϕ_σ は (9)、(10) 式で表される。

$$\theta_y = \frac{Z(P/A + \sigma_y)}{(K_h H^2 / 4 + PH / 4 + K_r)} \quad (8)$$

$$\phi_\sigma = 1 \quad (|\theta| \leq \theta_y, \theta = \theta_A - \theta_B) \quad (9)$$

$$\phi_\sigma = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\beta} \left(\left| \frac{\theta}{\theta_y} \right| - 1 \right)^{\frac{1+\alpha}{\alpha}}} \quad (|\theta| > \theta_y) \quad (10)$$

ここで、 Z : ゴム部の断面係数、 σ_y : ゴム部の引張降伏応力度、 θ_y : ゴム部の降伏回転角である。(10) 式における α および β は、積層ゴムの曲げモーメント・回転角の履歴形状に係わる係数で、積層ゴムの圧縮せん断試験より定まる値となる。本論では文献 9) と同様に $\alpha=10$ 、 $\beta=40$ とする。図 5 に材料非線形特性 ϕ_σ と上下面の相対回転角 θ を降伏回転角 θ_y により無次元化した θ/θ_y との関係を示す。 θ/θ_y が 1 以上となると、 ϕ_σ は θ の上昇とともに漸減する。

図 5 回転剛性の材料非線形

2.2 積層ゴム端部の曲げモーメント

水平変位 δ を有し、軸力 P を受ける積層ゴムに作用する曲げモーメント M は (11) 式により表される。

$$M = Q \cdot H + P \cdot \delta \quad (11)$$

積層ゴム端部に回転が生じない場合、積層ゴムの反曲点が積層ゴム高さ方向の中心となるため、上下端に生じる曲げモーメント M_0 は上下等分割となり (12) 式で表される。

$$M_0 = \frac{1}{2} Q \cdot H + \frac{1}{2} P \cdot \delta \quad (12)$$

しかし、図 6 に示すように積層ゴムの端部に回転が生じると固定度の低下に伴い、積層ゴムの反曲点が回転側へ移動し積層ゴム取付け部が負担する曲げモーメントの割合が変化する。回転を有する端部の曲げモーメント M_B は (12) 式の値よりも減少し、他方の端部の負担する曲げモーメント M_A は (12) 式の値よりも増加することになる。そこで、本節では積層ゴムせん断ひずみの増加に伴う端部モーメントの変動を検討する。回転発生側の下端部 B 点の負担曲げモーメント M_B は (12) 式の M_0 よりも減少するため、負担曲げモーメント M_A を (12) 式で示す回転が生じない場合の曲げモーメント M_0 で基準化し、曲げモーメント増加率 α_M を (13) 式で定義する。

ここで、 $\alpha_M=1.0$ の場合は、端部回転がなく積層ゴム取付け部の負担する曲げモーメントは上下等分割となり、 $\alpha_M=2.0$ に近づくにつれて下端がピン支持状態に近づくことになる。

$$\alpha_M = \frac{M_A}{M_0} \quad (13)$$

ここで、(1) 式における積層ゴムの上端モーメント M_A は $x_B=0$ 、 $\theta_A=0$ と仮定し、(1) 式を展開することで (14) 式により表される。

$$M_A = -x_A \cdot K_h \cdot \frac{H}{2} - x_A \cdot \frac{P}{2} + \frac{\theta_B \cdot H^2}{4} K_h + \frac{\theta_B \cdot H}{4} P - \theta_B \cdot K_r \quad (14)$$

(14) 式を (13) 式に代入すると、増加率 α_M は (15) 式で表される。

$$\alpha_M = \frac{M_A}{M_0} = 1 + \left\{ \frac{\theta_B}{2x_A} \cdot \left(\frac{4K_r}{K_h \cdot H + P} - H \right) \right\} \quad (15)$$

図 7 にせん断ひずみ 200% 時における積層ゴム上下端の曲げモーメント増加率 α_M と端部回転角の関係を示す。(a) は面圧 10N/mm²、(b) は面圧 20N/mm² の結果である。各面圧における積層ゴムの降伏回転角 θ_y の値を 2 点鎖線で示す。また、図中の点線は (10) 式で示すゴムの材料非線形を無視した場合の結果である。ゴムの材料非線形を無視した場合は、端部回転の増加に対して曲げモーメント増加率 α_M は比例的に増加の傾向を示す。しかし、ゴムの材料非線形を考慮すると、降伏後はモーメント増加率 α_M の増加は緩慢になり最終的には $\alpha_M=1.00$ に向かう。また、面圧の増加に伴い同じ回転角に対する増加率 α_M の値は減少する傾向にある。これは、変位 x_A および端部回転角 θ_B が等しい場合、(15) 式においての変数項が軸力 P のみであることから理解できる。

図 6 端部回転に伴う曲げモーメント分布の変化

図 7 $\gamma=200\%$ 時における $\alpha_M-\theta_B$ 関係

3. 連結部材の回転剛性を考慮した連成解析

3.1 解析モデル

積層ゴム端部の回転角は、積層ゴムが取付く部材の剛性に左右さ

れる。そこで、本論では図 1 に示す積層ゴム力学モデルの下端に線形回転ばね K_B を連結し、柱や杭、基礎梁など積層ゴムの端部に取付く部材（連結部材と称する）の回転剛性を考慮した連成解析を行う。解析モデルを図 8 に示す。積層ゴムの上端部には十分に剛強な部材が取り付けると仮定し、境界条件として回転を拘束した。一方、積層ゴムの下端部は回転を考慮し、水平自由度を拘束している。

図 8 連結部材連成モデル

3.2 解析パラメータ

使用する積層ゴムとしては、せん断弾性率 0.392N/mm^2 、2 次形状係数が 5.0 の免震用積層ゴムとして一般的なものをを用いとし、文献 11)に掲載されている代表的な積層ゴムの諸元を用いた。参考値として表 1 に外径 600mm の積層ゴムの諸元を示す。

図 8 に示す解析モデルでは、連結部材の回転剛性を集約した回転ばね K_B を導入している。そこで、連結部材の回転剛性の大きさを示す指標として、積層ゴムの回転剛性 K_{rc} を連結部材の回転剛性 K_B で無次元化した回転剛性比 K_{rc}/K_B を用いる。ここで、 K_{rc} は軸力の影響を無視した積層ゴムの回転剛性で下式により表される。

$$K_{rc} = \frac{E_{rb} \cdot I}{n r} \tag{16}$$

柱頭・杭頭免震と異なり通常の二重基礎を有する基礎免震構造では、積層ゴム端部の回転剛性 K_B が十分に大きいため、回転剛性比 K_{rc}/K_B は 0.00 に近い値となり端部の回転角も微小な値となる。よって、回転剛性比 K_{rc}/K_B が小さい値となるにつれて、端部の固定度が十分に大きい構造とみなせる。逆に、連結部材の回転剛性 K_B が小さくなるにつれて回転剛性比 K_{rc}/K_B の値は増加し、端部回転角も大きくなる。すなわち、回転剛性比 K_{rc}/K_B は端部回転のしやすさを示す指標となる。

検討する解析パラメータは、せん断ひずみを 50% 、 100% 、 150% 、 200% に固定し、せん断ひずみレベル毎に連結部材の回転剛性 K_B を変動させる。また、面圧は長期、短期荷重を想定し 10N/mm^2 および 20N/mm^2 の 2 パターンとする。

表 1 積層ゴム諸元（外径 600mm ）

外径 D	600	mm	内部鋼板厚 t_s	5.0	mm
内径 d	13.5	mm	せん断弾性率 G	0.392	N/mm^2
1次形状係数 S_1	36.6	-	ヤング率 E_0	0.22	N/mm^2
2次形状係数 S_2	5.0	-	体積弾性率 E_∞	1960	N/mm^2
ゴム層数 n	30	-	補正係数 κ	0.88	-
ゴム厚 t_r	4.0	mm	引張降伏応力度 σ_y	1.00	N/mm^2

3.3 水平剛性低下率

文献 11)における外径 600mm 、 700mm 、 800mm 、 900mm 、

1000mm の積層ゴムに対し解析を行ったところ、積層ゴムの外径差が水平剛性低下率や回転角、曲げモーメント増加率に与える影響は小さく解析結果の差も数%であった。差異の原因としては、ゴムシート厚と内部鋼板厚の比率が径ごとに若干異なることがあげられる。よって、2 次形状係数が等しければ積層ゴムの特性変化に大きな差は生じないとし、上記の外径における解析結果の平均値により各種特性変化を評価する。

図 9 に水平剛性低下率 $K_{eq}/K_{h0.00}$ と回転剛性比 K_{rc}/K_B の関係を示す。水平剛性低下率 $K_{eq}/K_{h0.00}$ は、せん断ひずみレベル毎の荷重変形関係から求めた割線剛性を K_{eq} とすると、回転の生じない場合（ $K_{rc}/K_B = 0.00$ ）のせん断ひずみレベル毎の割線剛性 $K_{h0.00}$ で K_{eq} を除した $K_{eq}/K_{h0.00}$ と定義する。凡例に示すのは、せん断ひずみレベルで(a)が面圧 10N/mm^2 の結果、(b)が面圧 20N/mm^2 の結果である。両面圧の結果を比較すると積層ゴムの水平剛性低下率は面圧に大きく影響を受けることが分かる。ここで、連結部材の回転剛性が積層ゴムの回転剛性と等しい回転剛性比 $K_{rc}/K_B = 1.00$ に着目する。本解析の最大振幅であるせん断ひずみ $\gamma = 200\%$ 時において、水平剛性低下率は面圧 10N/mm^2 では 5% 程度の低下にとどまるが、面圧 20N/mm^2 では 20% 近くもの剛性低下が生じる。例えば、本論では 10% 以下の水平剛性低下に抑えようとすると面圧 10N/mm^2 では回転剛性比が 2.50 以下、面圧 20N/mm^2 では回転剛性比が 0.50 以下となるように連結部材の回転剛性を確保する必要がある。

3.4 端部回転角

図 10 に端部回転角 θ_B と回転剛性比 K_{rc}/K_B の関係を示す。図 10 において、(a)と(b)を比較すると面圧が 2 倍になることで端部回転

図 9 水平剛性低下率－回転剛性比関係

図 10 端部回転角－回転剛性比関係

図 11 モーメント増加率－回転剛性比関係

角の値もおおよそ2倍となっている。また、杭頭免震建物の設計において端部回転角の制限を $1/100(0.01\text{rad})$ 以下とする事例¹²⁾がみられる。本論においても端部回転角の制限を 0.01rad 以下とすると、せん断ひずみ $\gamma=200\%$ 時において、面圧 10N/mm^2 では回転剛性比が1.60以下、面圧 20N/mm^2 では回転剛性比が0.75以下となるように連結部材の回転剛性を確保する必要がある。ここで、端部回転角 0.01rad 以下となる上記の回転剛性比における水平剛性低下率を図9より求めると、面圧 10N/mm^2 の回転剛性比1.60では7%程度の水平剛性低下であり、面圧 20N/mm^2 の回転剛性比0.75では14%程度の水平剛性低下となる。

また、基礎免震構造の積層ゴムの施工精度管理基準¹³⁾では、積層ゴムの傾きの精度管理は概ね $1/400(0.0025\text{rad})$ 以下と定められている。施工精度基準と同等の端部回転角となる回転剛性比は $\gamma=200\%$ 時の面圧 10N/mm^2 では0.30以下、面圧 20N/mm^2 では0.17以下の回転剛性比を確保する必要がある、端部回転角 0.01rad 以下となる回転剛性と比べ4~6倍の回転剛性が連結部材に必要となる。

3.5 曲げモーメント増加率

図11に積層ゴム上端の曲げモーメント増加率 α_M と回転剛性比 K_{rc}/K_B の関係を示す。(a)と(b)を比較すると面圧が変化しても増加率に大きな変化は確認されない。(15)式において、積層ゴムの水平変位 x_A を定めると増加率 α_M は積層ゴムの端部回転角 θ_B および軸力 P により決定する。図11において軸力 P が増加しても増加率 α_M に大きな差が見られないことは、軸力 P の増加に対して積層ゴム端部回転角 θ_B が相対的に増加していることによるものと考えられる。

積層ゴムのせん断ひずみが増加すると、水平変位依存性 ϕ_{rc} により積層ゴムの回転剛性は低下するため、曲げモーメント増加率 α_M は小さくなる。また、せん断ひずみが増加すると積層ゴムの材料非線形 ϕ_σ により積層ゴム上端部は降伏する状態になる。よって、せん断ひずみが増加するほど降伏曲げモーメントは小さくなるため曲げモーメント増加率 α_M の値も減少する。本解析において積層ゴムの降伏時の α_M は、面圧 10N/mm^2 で $\alpha_M=1.27$ 、面圧 20N/mm^2 で $\alpha_M=1.25$ となる。

端部回転角 0.01rad 以下を満たす回転剛性比は、3.4節で述べたとおり、面圧 10N/mm^2 では1.60以下、面圧 20N/mm^2 では0.75以下である必要がある。そこで、最大振幅であるせん断ひずみ $\gamma=200\%$ 時の曲げモーメント増加率を求めると、面圧 10N/mm^2 、回転剛性比1.60では $\alpha_M=1.29$ 、面圧 20N/mm^2 、回転剛性比0.75では $\alpha_M=1.10$ である。面圧が大きいほど連結部材に必要とされる回

転剛性は大きくなるため、回転剛性比は小さな値となりモーメント増加率の値も小さくなる。しかし、面圧の増加により(11)式に示す積層ゴムに生じる曲げモーメントは増加しているため、端部曲げモーメントの値の算定には注意が必要である。これらの結果から、端部回転角 0.01rad の制限を設けた場合、積層ゴムに取付く部材の設計には、端部回転が生じない場合に対して10~20%の曲げモーメントの割り増しが必要となる。

4. 積層ゴム－杭－基礎梁連成解析

4.1 解析モデル

杭頭免震構法を利用した建物を想定し、連結部材の回転剛性の評価および周辺部材への影響を把握する。図12に解析モデルを示す。積層ゴム1基を中心とした周辺架構を解析対象範囲としており、積層ゴムの上端部には上部構造の剛強な基礎梁が取付くと仮定し、積層ゴム、基礎梁、杭、地盤をモデル化する。使用する積層ゴムは表1に示す外径600mmのものを使用する。

杭は場所打ちコンクリート杭とし、杭径を900mm、杭長を15mとした。杭先端部はピン支持とし、杭は長さ1000mmごとに分割した直交分割要素モデルとして扱う。また、杭断面の非線形特性は文献14)を参考に定める。下式によりひび割れモーメント M_{cr} および降伏モーメント M_y を算定する。

$$M_{cr} = 0.56\sqrt{F_c} \cdot Z + ND/6 \quad (17)$$

$$M_y = 0.9a_t \cdot \sigma_y \cdot d \quad (18)$$

ここで、 F_c ：コンクリート設計基準強度(N/mm^2)、 Z ：断面係数、 N ：軸力、 D ：部材せい、 a_t ：引張鉄筋の断面積、 σ_y ：主筋の降伏引張応力度、 d ：有効せいとする。本論では、コンクリート設計基準強度を 24N/mm^2 とし、引張鉄筋比を1.2%、主筋の降伏引張応力度を 390N/mm^2 とした。曲げモーメント M －曲率 ϕ 関係を図13(a)に示す。なお、杭の3次剛性は初期剛性の1/1000とした。

基礎梁はRC造とし梁幅を1000mm、スパン長を10m、梁の反曲点位置はスパン中央と仮定し5mの位置にローラー支持を設けるものとする。基礎梁は、杭頭部との接合をピン接合として回転に無抵抗とした場合、梁せいを300mmとした回転拘束効果のある程度有する場合を検討する。なお、杭と同様にコンクリート強度を 24N/mm^2 とし、主筋の許容引張応力度を 390N/mm^2 とした。基礎梁においては引張鉄筋比を0.6%とし、基礎梁の3次剛性は初期剛性の1/1000、1000mm間隔で分割した直交分割要素モデルとして

図12 積層ゴム－杭－基礎梁連成解析モデル

図13 非線形特性

扱う。図 13(b)に基礎梁断面の曲げモーメント M －曲率 ϕ 関係を示す。

地盤は、粘性土の一樣地盤とし N 値=1, 3, 5 の 3 パターンについて検討し、1000mm 間隔で分割した杭の各節点に杭周地盤ばねを設け評価する。また、杭周地盤ばねには地盤の非線形特性を考慮するものとし、文献 15)を参考に下式により評価する。

$$Kh = \alpha \cdot \xi \cdot E_0 \cdot \bar{B}^{-3/4} \quad (19)$$

$$E_0 = 700 \cdot N \quad (20)$$

$$Kh = 3.16 \cdot Kh_0 \cdot \bar{y} \quad (0.0 \leq \bar{y} \leq 0.1) \quad (21)$$

$$Kh = Kh_0 \cdot \bar{y}^{-1/2} \cdot B \quad (0.1 < \bar{y}) \quad (22)$$

ここで、 Kh_0 ：水平地盤反力係数(kN/m³)、 α ：評価法による係数(本論においては $\alpha=60$)、 ξ ：群杭の影響を考慮した係数、 E_0 ：変形係数(kN/m²)、 $\bar{B}$ ：杭径を cm 単位で無次元化した数値、 N ：地盤の N 値、 B ：杭径(m)、 $\bar{y}$ ：水平変位を cm 単位で無次元化した数値である。せん断力 Q －せん断変位 δ 関係を図 13(c)に示す。

4.2 回転剛性比の評価

積層ゴムのせん断ひずみは $\gamma=50\sim 200\%$ の範囲で検討し、面圧を10N/mm²および20N/mm²とした。また、基礎梁と杭頭の接合がピンの場合を Pin と表記し、基礎梁の梁せいが300mm の場合を300 と表記する。地盤の N 値は1, 3, 5 と変動させ N1, N3, N5 と表記する。表 2 に示すように、解析ケースを面圧－基礎梁形式－ N 値の順に表記する。図 12 に示す積層ゴム－杭－基礎梁連成解析モデルの積層ゴム上端部に、軸力および水平変位を与え、杭頭部の回転角および各部曲げモーメント等の評価する。なお、本解析においては、地震時の地盤応答変位の影響は考慮していない。この点については今後の課題とする。解析結果を以下に示す。

図 14 は、図 9 に連成解析の結果を重ね合わせたものであり、水平剛性低下率 $K_{eq}/K_{h0.00}$ と回転剛性比 K_{rc}/K_B の関係を示している。凡例には、解析ケースを示す。 N 値が大きくなると回転剛性比は小さくなるが回転剛性比 0.50 前後で変化の割合は小さくなる。この傾向は、面圧が増加しても大きく変わらない。また、両面圧とも Pin-N1, 300-N1 以外のケースでは一体解析モデルの回転剛性比は概ね 0.75 以下に収まっており、水平剛性低下率も 10%以下に収まる結果となっている。梁せい 300mm の基礎梁による回転拘束効果はみとめられるものの、地盤による回転拘束効果のほうが影響は大きい。また、せん断ひずみ $\gamma=150\%$ 前後で σ 10-Pin-N1 のケースの回転剛性比の値に差がみられるのは杭および地盤の非線形特性の影響

表 2 連成解析パラメータ

No.	せん断歪み γ	面圧 σ	基礎梁形式	N 値
σ 10-Pin-N1	50%、100%、150%、200%	10N/mm ²	Pin	1
σ 10-Pin-N3				3
σ 10-Pin-N5				5
σ 10-300-N1			300mm	1
σ 10-300-N3				3
σ 10-300-N5				5
σ 20-Pin-N1		20N/mm ²	Pin	1
σ 20-Pin-N3				3
σ 20-Pin-N5				5
σ 20-300-N1			300mm	1
σ 20-300-N3				3
σ 20-300-N5				5

図 14 水平剛性低下率－回転剛性比関係

図 15 端部回転角－回転剛性比関係

図 16 曲げモーメント増加率－回転剛性比関係

響によるものと考えられる。

図 15 には、同様に端部回転角 θ_B の比較を示す。(a), (b)の Pin では N 値=1 の場合に 0.01rad を大きく上回る端部回転角が生じる。(c), (d)に示すように、基礎梁による回転拘束効果が見込める 300 では、端部回転を 0.01rad 程度に抑えることができる。このことから、基礎梁の梁せいを調節することで端部回転角を 0.01rad 程度以下に抑えられる回転剛性の確保が可能となることがわかる。また、 N 値=1 以外のパターンは 0.01rad 以下の回転角に収まる結果となっている。

図 16 には、曲げモーメント増加率 α_M の比較を示す。3.5 節における連結部材連成モデルでは面圧の変化による曲げモーメント増加率の大きな変化はみられないが、実架構を想定した連成モデルでは杭や基礎梁、地盤の各種非線形特性により、積層ゴム－杭－基礎梁連成解析モデルの回転剛性が変化するため面圧の変化に伴い増加率 α_M も変化する。せん断ひずみ $\gamma = 200\%$ 時に着目すると、 σ 10-Pin-N1 では、20%を超えるモーメント増加が生じており、 σ 10-Pin-N3、 σ 10-Pin-N5 においても 10%前後の曲げモーメント増加が確認できる。また、面圧 20N/mm^2 においても、 α_M は 1.07～1.14 の範囲にある結果となった。よって、この結果からも積層ゴムに取付く部材の設計においては、端部回転が生じない場合に対して 10～20%の曲げモーメント増加を考慮すべきであるといえる。

以上の結果から、本論における解析モデルの回転剛性比の範囲は 0.25～2.60 であり、端部回転角には基礎梁の剛性および地盤の N 値が大きく影響していることが把握される。

4.3 周辺部材に生じる曲げモーメント

図 17 に示すように積層ゴム－杭－基礎梁連成解析モデルの各部材に生じる曲げモーメントを定義し、各部材に生じる曲げモーメントの大小関係をせん断ひずみレベル毎に評価する。基礎梁形式ごとに比較し、基礎梁と杭頭の接合がピン接合である Pin の場合における曲げモーメント－せん断ひずみ関係を図 18 に、基礎梁の梁せいが 300mm で回転拘束効果を有する 300 の場合を図 19 に示す。

図 18 において、Pin の場合は基礎梁が負担するモーメントが 0 であるため、積層ゴム下端のモーメント M_B と杭頭モーメント M_{PH} は等しい値をとる。また、連成解析モデルの回転剛性比が大きくなる程、杭中間部での最大モーメント M_{Pmax} の値は大きくなり回転剛性比が小さくなるほど、杭頭が負担する曲げモーメントは大きくなる。杭のひび割れモーメント M_{cr_P} は面圧 10N/mm^2 においては $514\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、面圧 20N/mm^2 においては $832\text{kN}\cdot\text{m}$ である。せん断ひずみ $\gamma = 200\%$ 時に注目すると、Pin の場合において

図 17 周辺部材に生じる曲げモーメント

図 18 周辺部材の曲げモーメント (Pin の場合)

図 19 周辺部材の曲げモーメント (300 の場合)

面圧 10N/mm^2 のすべてのパターンで杭中間部においてひび割れが生じており、杭頭に対して杭中間部の曲げモーメントは相対的に大きい。

図 19 では、杭頭に接合される基礎梁両端の負担するモーメントの和を M_{Beam} とする。基礎梁のひび割れモーメント M_{cr_B} は $41\text{kN}\cdot\text{m}$ と非常に小さい値であり、図 19(a)～(f)のすべてにおいて、せん断ひずみ 50%～100%の間で基礎梁のひび割れが確認できる。なお、図 19 に示す M_{Beam} は両端の基礎梁が負担する曲げモーメントの和であるため、梁のひび割れモーメント M_{cr_B} も 2 倍の値で示している。基礎梁が取付くことにより、杭頭の負担モーメントは低減される。基礎梁により連成解析モデルの回転剛性比の値は小さくなるため、杭中間部の曲げモーメントも減少し、杭中間部でのひび割れを防ぐことができる。せん断ひずみの増加に伴い、せん断ひずみレベルが小さいときは、杭頭の曲げモーメントよりも基礎梁の負担する曲げモーメントの方が大きい、せん断ひずみレベルが大きくなるにつれて基礎梁の負担モーメント M_{Beam} と杭頭の負担モーメント M_{PH} の大小関係が入れ替わるケースが確認できる。これは、基礎梁のひび割れによって基礎梁の回転剛性が低下し、杭頭の負担する曲げモーメントが増加したためである。

図 18 および図 19 において、積層ゴム上端部の曲げモーメント M_A および下端部の曲げモーメント M_B の増加の仕方はせん断ひずみによって変化し、せん断ひずみの増加に伴い上下端の曲げモーメントの差が小さくなる傾向を示す。また、連成解析モデルの回転剛性比が大きい N 値=1 のようなケースでは、杭体地中部の最大曲げモーメント M_{Pmax} と杭頭曲げモーメント M_{PH} の差が大きい、回転剛性比が小さい N 値=5 のようなケースになるほど差は小さくなる。このことから、杭体に生じる曲げモーメント分布が図 17 に示すように変化している傾向も確認できる。

5. まとめ

本論では、端部回転を有する積層ゴムの剛性評価手法より、積層ゴム端部に取付く部材の剛性を評価し、積層ゴム水平剛性低下率と取付け部に作用する曲げモーメントの増加率について定量的評価を行った。また、杭頭免震構造の架構を想定し、積層ゴムに取付く部材の応力状態を示した。結論を以下にまとめる。

- 1) 積層ゴム端部に取付く架構の回転剛性を評価した連結部材連成モデルにより、水平剛性低下率および端部回転角を評価した。杭頭免震では面圧 10N/mm^2 で回転剛性比が 1.60 以下、面圧 20N/mm^2 で回転剛性比が 0.75 以下であれば端部回転角を 0.01rad 以下とすることができる。
- 2) 連結部材連成モデルにより、積層ゴム上端部の曲げモーメント増加率を評価した。杭頭免震建物では、積層ゴムに取付く部材の設計を行う際は、端部回転が生じない場合に対して、10～20%の端部曲げモーメントの増加を見込む必要がある。
- 3) 杭頭免震建物を想定した積層ゴム－杭－基礎梁連成解析モデルを作成し、連成解析モデルの回転剛性比を算出した。本論の解析モデルにおける回転剛性比の範囲は 0.25～2.60 となった。また、積層ゴムの端部回転角には基礎梁および周辺地盤の N 値による回転拘束効果が大きく影響する。
- 4) 連成解析モデルにおける各部材の曲げモーメントを比較した。

せん断ひずみの増加に伴い、各部材が負担する曲げモーメントの変化および基礎梁の有無による影響を検討した。回転剛性比が大きいパターンでは杭体にひび割れが生じるケースが確認できた。また、本解析における断面の基礎梁ではおよそせん断ひずみ 50%～100%の間でひび割れが生じる結果となった。

参考文献

- 1) 猿田正明、岡田敬一、中村豊、長谷部雅伸：2011 年東北地方太平洋沖地震における免震建物の応答、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.629-630、2011.8
- 2) 日本建築学会：免震構造設計指針、第 2 版、1993
- 3) 浅野三男、峯脇重雄：取付け部の柔性を考慮した免震用積層ゴムの水平剛性評価、日本建築学会技術報告集、No.8、pp.57-62、1999.6
- 4) 飯塚真巨：積層ゴムの剛性マトリクス (Haringx 理論に基づく定式化)、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.619-620、1995.8
- 5) 飯塚真巨、高岡栄治：ばねと剛体要素から成る積層ゴム用分散型力学モデル、日本建築学会構造系論文集、No.607、pp.81-85、2006.9
- 6) 三山剛史：積層ゴムの上下面に回転を与えた場合の力学性状に関する研究、日本建築学会構造系論文集、No.556、pp.43-50、2002.6
- 7) 下田卓、小林正人：積層ゴムの端部回転が取付け部曲げモーメントに及ぼす影響、日本地震工学会・大会・2011 梗概集、pp.174-175、2011.11
- 8) 藤田聡、藤田隆史：重量機器免震用積層ゴムの静的加力実験 - 第三報 剛性についての理論的検討 -、生産研究 38 巻、第 4 号、pp.27-29、1986.4
- 9) 西村拓也、渡辺宏一：3 次元免震装置における積層ゴムの回転剛性評価と解析モデルの検証、清水建設研究報告、第 87 号、pp.19-25、2009.1
- 10) 下田卓、小林正人：取付け部の回転及び P- δ 効果を考慮した積層ゴムの水平剛性評価、第 13 回日本地震工学シンポジウム(2010)、pp.464-471、2010.11
- 11) 日本建築学会関東支部：免震・制振構造の設計 学びやすい構造設計、p.207、2007
- 12) 日本免震構造協会：MENSIN、No.52、pp.19-22、2006.5
- 13) 日本免震構造協会：JSSI 免震構造施工標準 2009、pp.78-79、2009
- 14) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010、2010
- 15) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006

(2012年3月9日原稿受理、2012年9月10日採用決定)