鉄道架線柱に用いるシリコーンゴム充填基礎の復元力特性のモデル化

京都大学大学院　　学生会員　○杢野　晃司
京都大学防災研究所　正会員　　五十嵐　晃
鉄道総合技術研究所　正会員　　原田　智

１．はじめに

大地震時に高架橋や橋梁上の鉄道架線柱（以下，電化柱）が，橋構造物の応答による加振入力の増幅や共振により折損が生じて倒壊し，復旧に大きな障害となった事例が報告されている．電化柱の耐震性向上のため，電化柱基礎にシリコーンゴムを充填する対策が検討されている．本研究ではシリコーンゴム充填基礎を用いた電化柱の地震時応答を予測するために必要となる，復元力モデルの構築について検討した．

２．シリコーンゴム充填基礎

既設の砂詰基礎の置換えを想定しているシリコーンゴム充填基礎（以下、ゴム充填基礎）の構造を図-1 に示す．PC 柱を建植した後に基礎底面から 1000㎜の高さまで PC 柱と基礎枠の間にシリコーンゲルを充填する．大規模地震時，電化柱基礎の水平移動および回転に伴いシリコーンゴムが変形 し，シリコーンゴムの低い剛性と減衰作用により電化柱 への地震作用の低減を図る．

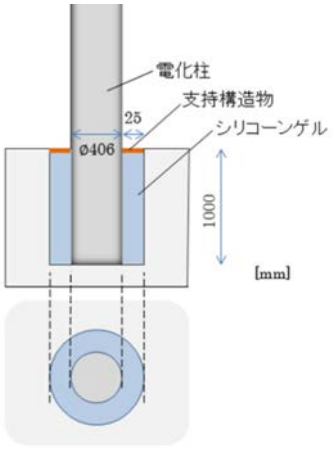

図-1 シリコーンゴム充填基礎

３．シリコーンゴムの構成則モデル

シリコーンゴムの応力ーひずみ関係は，試験片を用いた動的一軸載荷試験によれば，履歴エネルギー吸収特性，および振動数が増加するほど剛性が増加する特性を有する．このような特性を表現する構成則モデルとして，複素剛性ばね（実剛性 k1，損失係数 2h），弾性ばね（剛性 k2）および粘性要素（粘性係数 c）を組み合わせた，図-2 に示す３要素モデルを仮定した．構成則モデルパラメータは，1 軸動的載荷試験による振動数依存性データへのフィッティングにより定める．

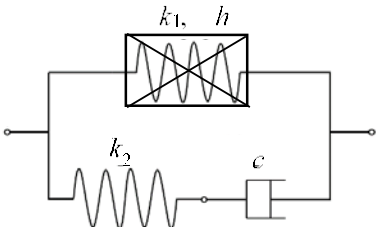

図-2 シリコーンゴム構成則の３要素レオロジーモデル

表-1 シリコーンゴム構成則のモデルパラメータ

k_1	6.04　[N/mm^2]
k_2	4.09　[N/mm^2]
h	0.12
c	0.09 [Ns/mm^2]

４．シリコーンゴム充填基礎の復元力モデル

ゴム充填基礎の復元力モデルは，図-3 に示すように，PC 電化柱と剛体壁の間の充填ゴム材を高さ方向に N ヶの区間に分割してそれぞれを独立な水平方向の履歴ばね要素に置換した形で表現する．PC 架線柱のロッキング応答に伴う傾きθに対応して生じる個々の履歴ばね要素の反力の合力として，ゴム充填基礎の水平反力 F およびモーメント反力 M が算出される．

履歴ばね要素の剛性は，水平面内に基礎中心を原点とする x-y 座標系を設定し，半径 R の円形のゴム材に埋め込まれた半径 R_0 の円断面形状の剛体に x 方向に変位δを与えた時に剛体がゴム材から受ける力に基づき設定する．ゴム内の 2 次元変位場(u, v)として次式を仮定する．

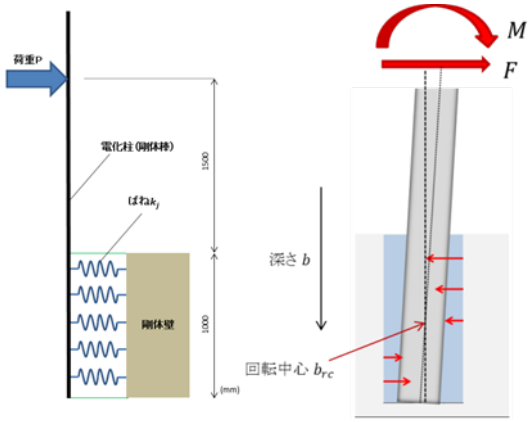

図-3 シリコーンゴム充填基礎の復元力モデル

キーワード　鉄道架線柱，シリコーンゴム充填基礎，耐震
連絡先　　〒611-0011　宇治市五ケ庄　京都大学防災研究所　ＴＥＬ0774-38-4135

$$u(x,y)=\frac{R-\sqrt{x^2+y^2}}{R-R_0}\delta \qquad \left(R_0\le\sqrt{x^2+y^2}\le R\right)\ ,\ v(x,y)=0 \qquad (1)$$

平面応力状態を仮定すると，剛体に作用する単位長さあたりの反力は $\frac{(3-\nu)\pi E}{2(1-\nu)(1+\nu)}\cdot\frac{R_0\delta}{R-R_0}$ となる．ここに E: ゴム材のヤング係数，ν: ポアソン比である．

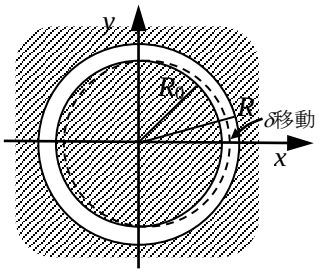

図-4 円形ゴム材に埋め込まれた円形剛体の水平変位

したがって，基準となる単位高さあたり剛性 k_a は

$$k_a=\frac{(3-\nu)\pi E}{2(1-\nu)(1+\nu)}\cdot\frac{R_0}{R-R_0} \qquad (2)$$

となる．同様に，平面ひずみ状態を仮定した時の単位高さあたり剛性 k_b は

$$k_b=\left(\frac{3}{2}-2\nu\right)\frac{\pi E}{(1+\nu)(1-2\nu)}\cdot\frac{R_0}{R-R_0} \qquad (3)$$

前節で得られた構成則モデルパラメータを用いることで，履歴ばね要素の複素剛性が決定される．実際のゴムは，表面より離れ深い位置となるにつれて平面応力から平面ひずみの状態に漸近していくため，履歴ばね要素の剛性は式(2)の値から式(3)の値を上限として増加していくと推定される．

５．載荷試験データによるばね係数分布の検討

実大模擬電化柱試験体を用いて実施されたゴム充填基礎静的載荷実験では，電化柱は底部から高さおよそ 400mm の位置を中心とした回転挙動を示す結果が得られている．そこで，上述のゴム充填基礎の復元力モデルにおいて底部からの高さ 400mm を回転中心と仮定し，履歴ばね要素に与える単位高さあたり剛性の深さ分布を検討した．次の Case A～Case E の５つの高さ分布についての結果を示す．履歴ばね要素は５本，ポアソン比νは 0.49 と仮定した．

Case A：一様に平面応力の剛性

Case B：一様に平面ひずみの剛性

Case C：平面応力（表面）から平面ひずみ（底部）まで直線変化

Case D：表面が平面応力の剛性となる２次関数分布

Case E：表面が平面応力の剛性で、深さ方向に剛性が指数関数的に一定値に漸近

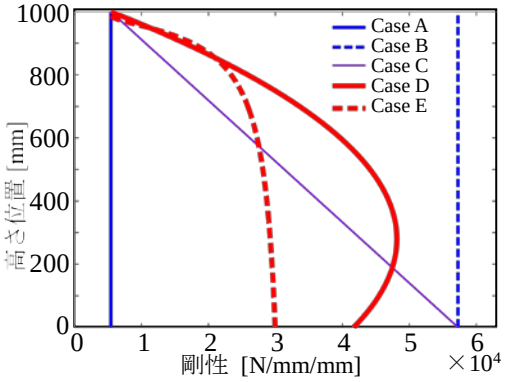

図-5　履歴ばね要素に与えた単位高さあたり剛性の深さ方向分布

実験での準静的な正負交番の変位と回転を電化柱に与え、復元力モデルから算出される水平反力とモーメント反力の履歴を各ケースについて算出した．水平反力に関する結果を図-6 に，モーメント反力に関する結果を図-7 に示す．

５つの分布のうち、Case E の指数関数的な分布が、水平反力とモーメント反力の両方で実験結果と比較的良好な一致を示している．

ゴム充填基礎の振幅依存性を含む複雑な非線形性を考慮したモデルの開発が，今後の課題である．

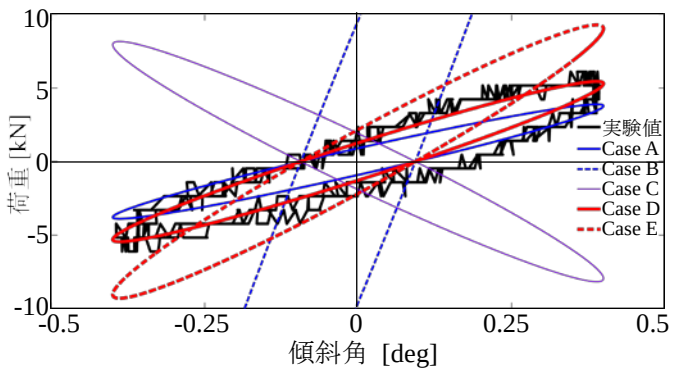

図-6　水平反力の履歴ループの算出結果

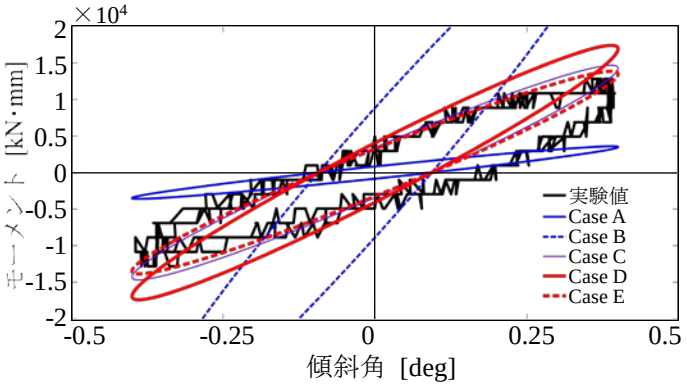

図-7　モーメント反力の履歴ループの算出結果