

第I部門

鉄道架線柱のシリコーンゴム充填基礎の復元力モデルの検討

京都大学工学部 学生員 ○李野 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

高架橋や橋梁上の鉄道架線柱（以下、電化柱）が大地震時に橋構造物の応答による加振入力が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1000mm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。

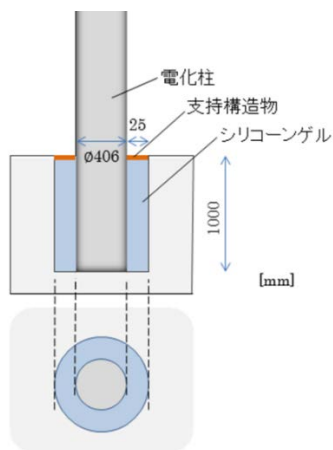


図-1 電化柱のシリコーンゴム充填基礎

2. シリコーンゴムの構成則モデル

シリコーンゴムの応力-ひずみ関係は、試験片を用いた動的一軸圧縮試験によれば、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 k_1 、損失係数 $2h$ ）、弾性ばね（剛性

k_2 ）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軸動的载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。

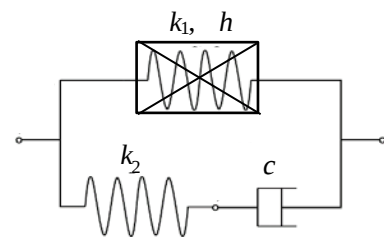


図-2 シリコーンゴム構成則の3要素レオロジーモデル

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

3. 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 個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。

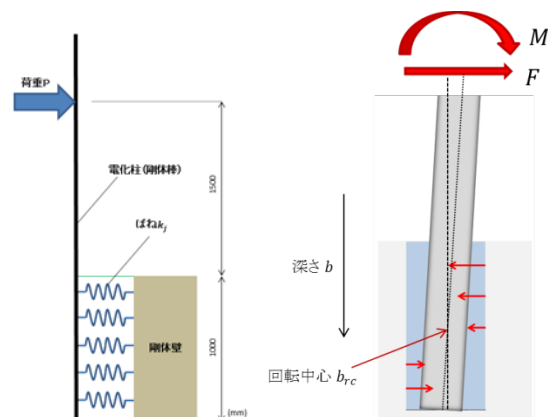


図-3 シリコーンゴム充填基礎の復元力モデル

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。

$$u(x, y) = \frac{R - \sqrt{x^2 + y^2}}{R - R_0} \delta \quad (R_0 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq R) \quad (1)$$

$$v(x, y) = 0 \quad (2)$$

平面応力状態を仮定すると、剛体に作用する反力は $\frac{(3-\nu)\pi E}{2(1-\nu)(1+\nu)} \cdot \frac{R_0 \delta}{R - R_0}$ 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。したがって、基準となる剛性 k_a は、単位高さあたり

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

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

$$k_b = \left(\frac{3}{2} - 2\nu \right) \frac{\pi E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{R_0}{R - R_0} \quad (4)$$

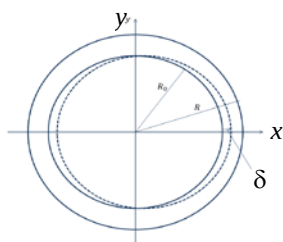


図4 円形ゴム材に埋め込まれた円形鋼体の水平変位

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これよりも増加していくと推定される。

4. 载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载荷実験では、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

Case B: 一様に平面ひずみ

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2次関数分布

Case E: 表面が平面応力で深さ方向に指数関数的に一定値に漸近

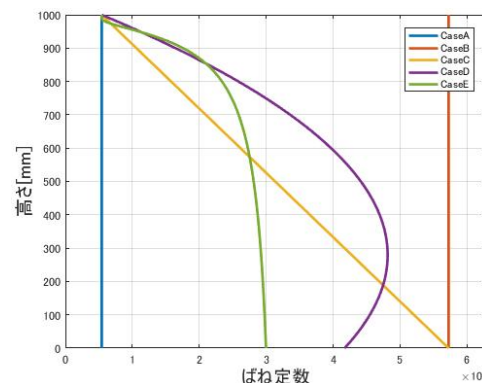


図5 履歴ばね要素に与えた剛性の深さ方向分布

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 F とモーメント反力 M 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。

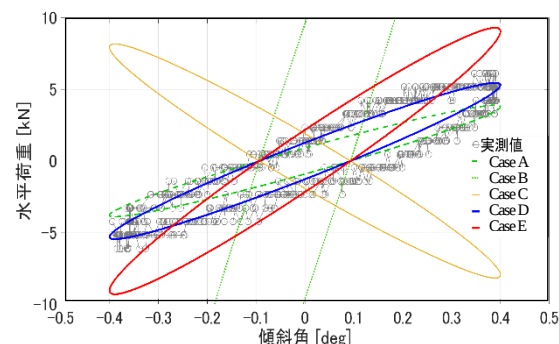


図6 水平反力の履歴ループの算出結果

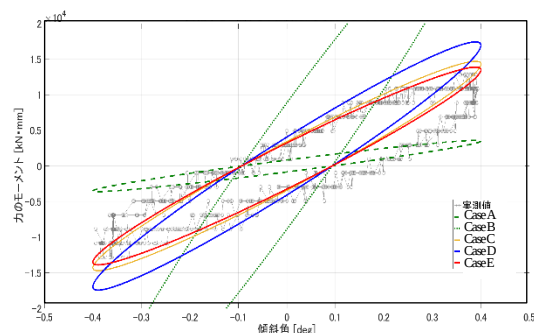


図7 モーメント反力の履歴ループの算出結果

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。