

大変形解析による鉄道用防振パッドの力学特性の検討

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 西宮裕騎
 新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露一寛
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部和久

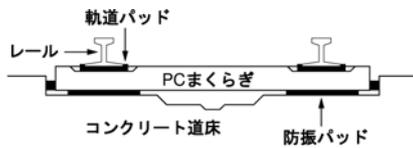


図-1 防振パッドの設置位置

*†

1. はじめに

鉄道軌道における防振対策の一つとして、低バネ定数のゴム製パッドをまくらぎ下部に設置する弾性軌道が広く用いられている(図-1)。この方法は、低コストの割に高い防振効果を発揮し得るという特徴を有している¹⁾。過去に微小変形解析がなされているが²⁾、大変形時の力学挙動の詳細については未知な点も多い。本研究では、防振パッドの力学挙動の大変形解析による把握を試みた。

2. 防振パッドの静的圧縮試験

解析の妥当性を確認し、未知パラメータを求める目的で防振パッドの一軸静的圧縮試験を行った。

試験方法はJISに定められている軌道パッドの試験方法を参考に設定した。実験供試体は3種類の防振パッド(公称バネ定数15MN/m, 8MN/m, 5MN/m)を、表面を研磨した2枚の載荷板(30mm厚の鋼板)によって挟み込み、上下両面で接着して作成した。圧縮荷重は最大300kNまで、50kN/minの荷重速度で作用させた。なお、荷重実験においては0→300kNの定速荷重・除荷を4サイクル繰り返し、荷重と変位をそれぞれロードセル・変位計を用いて測定した。

3. ゴム材料の解析モデル

防振パッドは主に合成ゴム製であり、荷重時には大きなひずみが生じる。ゴム物質の変形挙動を適切に表現するため、有限変形に対応した非圧縮超弾性体を解析モデルとして用いる。超弾性体の弾性ポテンシャル関数として式(1)で与えられる、低減不変量を用いたMooney-Rivlin体³⁾を用いる。式(1)で I_c, II_c, III_c は、右Cauchy-Green変形テンソル $\mathbf{C} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T$ の主不変量である。また、 \mathbf{F} は変形勾配テンソル、 c_1, c_2 は2.に述べた圧縮試験から定め

られる定数である。

$$W = c_1(I_c III_c^{-1/3} - 3) + c_2(II_c III_c^{-2/3} - 3) \quad (1)$$

物体内部に生じるCauchy応力 \mathbf{T} を考えると、構成式は次式で与えられる⁴⁾。

$$\mathbf{T} = p\mathbf{I} + \frac{2}{J}\mathbf{F} \cdot \frac{\partial W}{\partial \mathbf{C}} \cdot \mathbf{F}^T = p\mathbf{I} + \check{\mathbf{T}} \quad (2)$$

ここで、 p は境界条件から定まる不定静水圧で、 J は体積変化率($J = \det \mathbf{F}$)である。

超弾性体の場合、定式化の簡易性から通常total Lagrange法による解法が用いられる。ここでは、大変形時のメッシュ更新の可能性などの理由でupdated Lagrange法を用いる。

対象としている物体の現配置における領域と境界をそれぞれ v, Γ で表すと、力のつり合い式は次式で与えられる。

$$\int_v \check{\mathbf{T}} : (\mathbf{u}^* \otimes \nabla_x) dv + \int_v p(\nabla_x \cdot \mathbf{u}^*) dv = \int_\Gamma \mathbf{n} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{u}^* d\Gamma, \quad (3)$$

$$\int_v \left(1 - \frac{1}{J}\right) p^* dv + \sum_{e=1}^{ne} \int_{v^e} (\nabla_x p) \cdot \boldsymbol{\beta} \cdot (\nabla_x p^*) dv = 0 \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{u}^*, p^* はそれぞれ変位 \mathbf{u} 、圧力 p に関する試験関数、 ∇_x は現配置において定義されるナブラ演算子である。また、 \mathbf{n} は Γ 上での単位外向き法線ベクトルである。なお、本研究では非圧縮超弾性体の解析に際し、不適切な要素選択による圧力振動を抑える目的で、式(4)第2項の安定化項を付加している。ここで $\boldsymbol{\beta}$ は次式により要素ごとに与えられる。

$$\boldsymbol{\beta} = -\frac{\alpha h_{e_i}^2}{2\mu} \delta_{ij} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j, \quad \alpha > 0 \quad (5)$$

α は無次元量の安定化パラメータであり、 h_{e_i} は有限要素領域の \mathbf{e}_i 方向の代表長さである。また、 μ は局所的なせん断弾性係数である。なお、解析においては、式(3)(4)が非線形方程式であることを考慮し、Newton-Raphson法による増分計算によって、 \mathbf{u} と p を計算する。

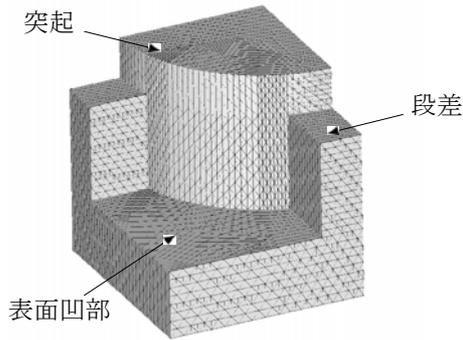


図-2 解析メッシュ(公称バネ定数 8MN/m の防振パッド)

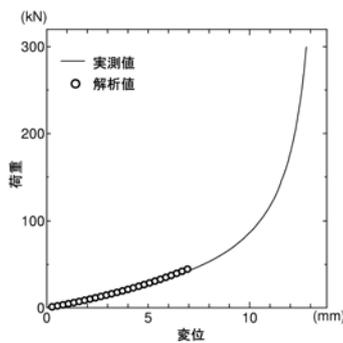


図-3 圧縮载荷試験と解析結果(公称バネ定数 8MN/m の防振パッド)

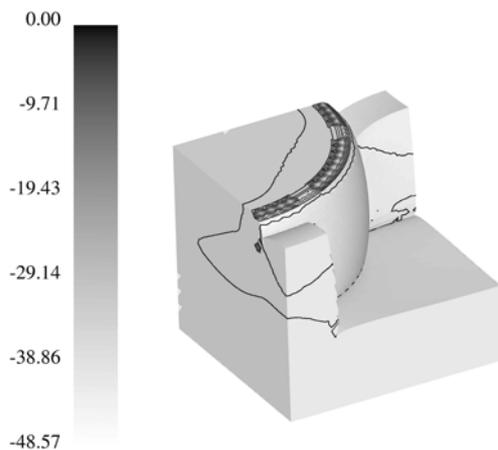


図-4 押し込み変位 4mm 時の J_2 応力分布と変形状態(公称バネ定数 8MN/m の防振パッド, 単位: N/mm²)

4. 実験と解析の比較

実験値と解析の双方で得られた押し込み変位を比較し、解析モデルの再現性を検証する。なお、パッド表面には十分な数の突起が周期的に配置されていることを考慮し、突起1つ分の1/8の領域を解析領域として設定した。図-2は、公称バネ定数 8MN/m のパッドの解析モデル、およびその有限要素分割を示したものである。

図-3は 8MN/m の防振パッドに関する荷重-変位関係の実測値と解析値を示したものである。実測において荷重が小さい時は、表面突起が設けられているためにパッドの自由表面積が大きく、比較的大きな変形が許容される。しかし、荷重が大きくなると変形により突起間の空隙が小さくなり、材料間の接触が発生する。その際、ゴムの非圧縮性がより顕著に発現することとなり、パッドの剛性は高くなっていく傾向を示している。

一方、解析は変位制御で行なったものの、変位増分を小さくしてもパッド厚約 12% (15MN/m)、約 28% (8MN/m)、約 33% (5MN/m) の変位が生じた段階で解析が進められなくなった。これは、変形の進展に伴い要素のゆがみが著しくなること、接触が評価されていないことが原因として考えられる。しかし、計算停止前については実測の荷重-変位関係を正確に再現できることが確認できた。

5. 内部応力と変形状態

公称バネ定数 8MN/m の防振パッド内部に発生する J_2 応力の分布と変形形状を図4に示す。 J_2 応力は表面に配置された突起の縁部と段差の隅角部に大きな成分を持つ様子が確認できる。最大応力は突起の縁部に現れ、突起と表面凹部との隅角部においても大きな応力値が現れた。変形状態については、ゴムの非圧縮性により突起側面が膨らみ、さらに押し込むと表面凹部が盛り上がる。その後、載荷板が段差と接触するまで変形する様子が確認できる。よって共用時に大荷重が繰り返し作用することにより、突起の縁部や各隅角部で、材料の損傷や磨耗を生じる可能性がある。

6. おわりに

本研究では、防振パッドの大変形解析を通し、その力学挙動の把握を試みた。実験の荷重-変位関係を完全に再現することはできなかったが、一軸圧縮ひずみ 25%程度まではほぼ適切に再現することができた。なお、今回の研究では材料間の接触を考慮していない。今後は、材料間の接触や摩擦滑りを考慮した適切な接触モデルを選定し、変形解析の品質を向上させる必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 西宮裕騎他：多目的 GA を用いた地下鉄軌道防振対策の最適化に関する研究, 境界要素法論文集, Vol.21, pp33-38, 2004.
- 2) 阿部則次他：軌道パッドの応力解析, 土木学会第 44 回年次学術講演会, pp548-549, 1989.
- 3) 渡辺浩志他：超弾性体の混合型有限要素解析に関する基礎的検討, 日本機械学会論文集 (A 編), 62 巻 595 号, pp745-752, 1996.
- 4) 久田俊明他：非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 1995.
- 5) Klaas, O., et al.: A stabilized mixed finite element method for finite elasticity, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 180, pp-65-79, 1999.