

ゴム製軌道パッドの静的圧縮特性に関する解析的検討

九州大学 学生会員 ○後藤 真緒
九州大学大学院 学生会員 路 馳
公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 後藤 恵一
九州大学大学院 フェロー会員 園田 佳巨

1. はじめに

鉄道の軌道にはレールと締結装置との間に「軌道パッド」と呼ばれるゴム製の緩衝材が挿入されている。軌道パッドの役割は、軌道部材に伝わる荷重を緩和し、まくらぎの保守作業の頻度を減らすことや周囲への騒音や振動を低減させることであるが、現状ではその効果の程度は実際に敷設した後でないと確認ができない。本研究は、軌道パッドの圧縮特性の違いが軌道応答に与える影響を数値解析により検討することを最終的な目的とし、その基礎段階として軌道パッドの静的圧縮試験の再現解析を行ったものである。対象は在来線 PC まくらぎ用標準仕様の軌道パッド（写真-1）とした。この軌道パッドは、公称ばね値 110[MN/m]であり、列車進行方向に深さ 1.9[mm]、幅 4.3[mm]の溝を持つ。



写真-1 在来線 PC まくらぎ用標準仕様の軌道パッド

2. 解析概要

軌道パッドの対称性を考慮した 1/4 解析モデルを用いて有限要素解析を実施した。解析結果は JISE1117 に基づき行われた試験の結果と比較した。なお、この試験では実際の軌道状況に近づけるために軌道パッドの上下面に #120 の紙やすりが設置されていた。

2.1. 荷重条件

載荷と除荷の 2 ステップからなる荷重サイクルを、値を変えて 3 回繰り返し行った（表-1）。ただし載荷速度は、試験で 2[kN/sec]、解析で 1[step/sec]である。

表-1 荷重条件

サイクル	荷重 [kN]			
1	0	→	200	→ 0
2	0	→	40	→ 10
3	10	→	100	→ 0

2.2. 材料構成則

ひずみエネルギー密度関数 W には Ogden¹⁾ の提唱する式(1)を用いた。

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (1)$$

ここに、 N は Ogden モデルの項数、 μ_i 、 α_i は材料定数、 $\lambda_j (j=1,2,3)$ は主伸長比である。本研究では 3 項モデルとし、材料定数は実際に行った単純引張試験の結果と、この結果を 1.4 倍²⁾ して求めた仮想の等二軸引張試験の結果を用いて同定した。この結果を表-2 に示す。

表-2 Ogden モデルの材料定数

i	μ_i [N/mm ²]	α_i [-]
1	-0.398336	-1.42332
2	-0.0000532629	-0.0593674
3	1.21073	2.68189

2.3. Mullins 効果

解析における Mullins 効果の影響を検討するために、補正されたひずみエネルギー密度関数 W として Ogden と Roxburgh³⁾ の提唱する式(2)を用いた。

$$W = \eta W^0 + \phi(\eta) \quad (2)$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r} \operatorname{erf} \left[\frac{\max(W^0) - W^0}{m + b \max(W^0)} \right]$$

ここに、 W^0 は本来のひずみエネルギー密度関数、 η は損傷変数、 $\phi(\eta)$ はダメージ関数、 r, m, b は材料定数である。材料定数は表-3 の値を用いた。

表-3 Ogden & Roxburgh モデルの材料定数

r [-]	2.0
m [N/mm ²]	2.0
b [-]	0.1

3. 解析結果

3.1. 載荷板－軌道パッドの摩擦係数 β の検討

1 サイクル目載荷においてほぼ非圧縮（ポアソン比 $\nu = 0.4999$ ）とし、載荷板－軌道パッドの摩擦係数 β を $\beta = 0.1, 0.2, 0.25, 0.3$ と変えた解析の荷重－変位曲線を図-1 に示す。また、 $\beta = 0.25$ の解析での変形状態を図-2 に示す。これらより、解析における勾配の遷移点は軌道パッドの溝が埋まる点であることが確認でき、溝が埋まることで剛性が向上し第二勾配が出現することが明らかとなった。

$\beta = 0.1$ とすると第一勾配は試験結果と近似しているが、載荷に伴い載荷板－軌道パッド間で滑りが生じ第二勾配が再現できていない。 $\beta = 0.25$ とすると第一勾配はやや試験結果よりも高いが、第二勾配の傾きと遷移点での荷重は試験結果を概ね再現できている。本研究では、著大な列車荷重が発生した際に軌道応答への影響度が大きい第二勾配を近似させることを優先し、 $\beta = 0.25$ が適当な値であると結論付けた。

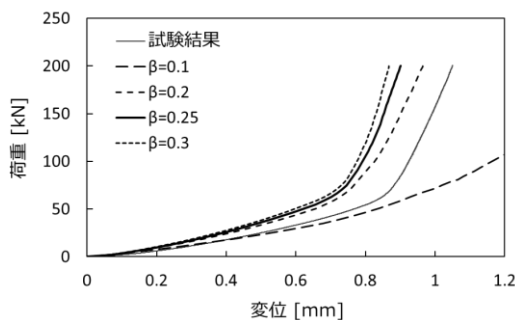


図-1 β の値による荷重－変位曲線の変化

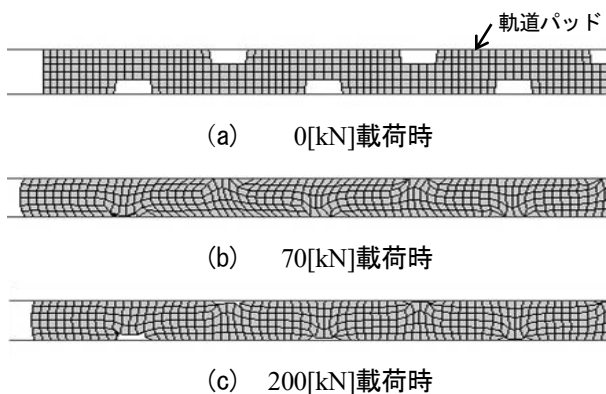


図-2 $\beta = 0.25$ の解析における変形状態

3.2. Mullins 効果の検討

前節の結果を踏まえ $\nu = 0.4999$, $\beta = 0.25$ とし、Mullins 効果の影響を比較した荷重－変位曲線を図-3 に示す。これより繰り返し載荷時のヒステリシス挙動を再現できていることがわかる。また Mullins 効果を

考慮した場合は、載荷サイクル数の増加に伴って応力軟化する試験同様の現象も再現できた。

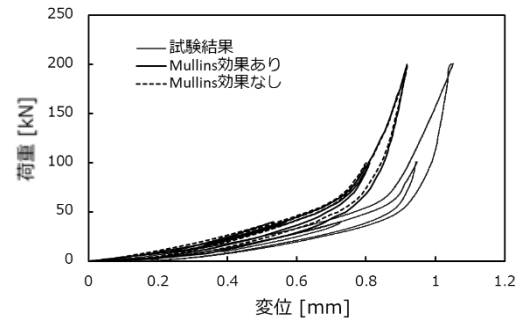


図-3 Mullins 効果の有無による荷重－変位曲線の変化

4. 結論と展望

本研究により、解析において各種の材料定数を適切に設定することで、荷重－変位曲線上の2つの勾配、ヒステリシス、応力軟化現象といった軌道パッドの静的圧縮特性を再現できることが明らかとなった。

今後は列車の走行を想定した軌道パッドの動的載荷試験の再現解析を行い、軌道パッドの動粘性特性が緩衝効果へ及ぼす影響を検討する。最終的には、図-4 に示す車両／軌道／構造物／地盤からなる全体系へ、詳細な軌道パッドモデルを挿入する方針である。これにより、軌道パッドの種類や列車の走行速度の違いが軌道応答に与える影響を数値解析により事前検討できるようになると考えている。

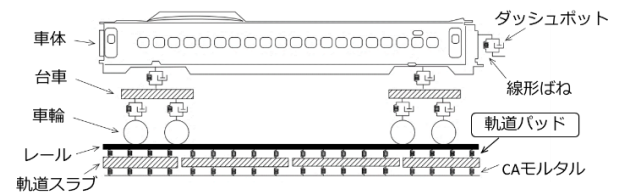


図-4 車両／軌道モデル⁴⁾

参考文献

- 1) R. W. Ogden : Large deformation isotropic elasticity - on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids , Proc. Roy. Soc. London, A326, 1972, 565-584
- 2) 永田孝弘, 小林卓哉, 山下善裕 : 一軸試験による二軸伸長ゴム材料モデルの推定, 計算力学講演会講演論文集, 55-56, 2001
- 3) R. W. Ogden, D. G. Roxburgh : A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber, Proc. Roy. Soc. London, A455, 1999, 2861-2877
- 4) 洲上翔太 : 環境負荷と経済性を考慮した省力化軌道に関する研究, 博士論文, 九州大学, 2020