

道床を含む列車・軌道・3次元地盤連成系の定常応答解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 丸山 聖司
 新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久
 新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛

1. はじめに

列車走行による鉄道軌道の動的応答特性の把握は、列車の乗り心地の改善や地盤振動の低減、軌道破壊の抑制などの観点から非常に重要となる。さらに、軟弱地盤上の高速列車走行では、共振により輪重応答が増大することが知られている。そのため、地盤剛性も考慮した、走行荷重に対する軌道系の動的応答の評価が有用な知見を与える。

走行荷重下での軌道振動解析では、レールを有限要素や Green 関数により表現する手法が広く用いられている。しかしこの場合、定常解に十分近い結果を得るために必要とされる軌道区間長の設定には曖昧さが残る。これに対し、はりのたわみの表現に Fourier 級数を用いた、走行車輪・軌道連成系の定常応答解析法の構築が検討された¹⁾。この解析では、道床を省略したモデルを採用している。

しかし、実際には、地盤の上に道床を設けた構造となっているため、道床も考慮した連成系をモデル化することで、より現実に即した解析結果が得られると考えられる。

そこで本研究では、道床を地盤上においたモデル化を行い、離散支持されたレールと走行車輪との定常連成応答解析手法を構成する。

2. 定常応答の導出

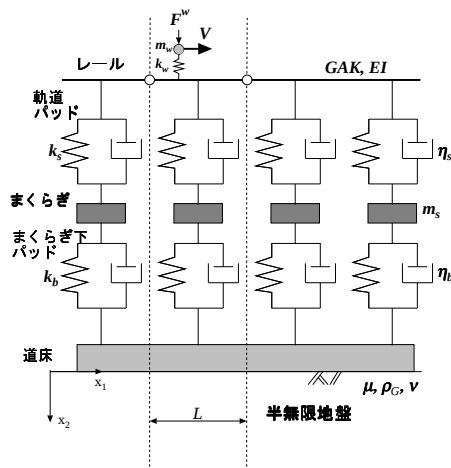


図 1 移動荷重が作用する無限長レール

図 1 のような離散支持された無限長レールを考える。レールは Timoshenko ばりでモデル化し、車輪とまくらぎはそれぞれ質量 m_w , m_s の質点、道床はそれと等価な質量と剛

性をもつ Euler ばり、軌道パッドおよびまくらぎ下パッドは Voigt モデルで表わす。また、地盤は 3 次元半無限弾性場として与える。この連成系において、走行車輪下での定常応答を導出する。

離散支持された無限長レール上で周期長 L に律動する走行荷重下における定常状態では、車輪位置のレールたわみ u_b は周期性をもつ。レールの運動方程式より、周期性に考慮したレールたわみの解は次のように与えられる¹⁾。

$$\hat{u}_b(\tilde{x}, \omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a_m^n(\omega) e^{i(\frac{2m\pi}{L} - \frac{\omega}{V})\tilde{x}} \quad (1)$$

ここで、 $\hat{u}_b$ は u_b の時間についての Fourier 変換、 V は車輪走行速度、 ω は円振動数である。式 (1) の右辺の各項は、係数 a_m^n と調和振動の項 $e^{i(\frac{2m\pi}{L} - \frac{\omega}{V})\tilde{x}}$ とに分けることができる。

a_m^n を導出する際、まくらぎ反力、輪重変動を考慮した道床・地盤系の等価剛性 k_G が必要となる。 a_m^n が求められると、式 (1) より車輪位置のレールのたわみ応答 u_b が得られる。

3. 道床・地盤系の等価剛性

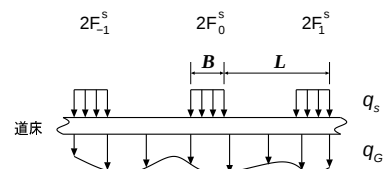


図 2 道床に作用する力

道床を表現している有限幅のはりには、地盤表面から図 2 のように鉛直反力 q_G が作用している。また、まくらぎ幅を B 、まくらぎからの接触力を q_s とおき、図 2 の荷重条件で道床の鉛直たわみ u_r を求める。

以上の結果より、道床・地盤系の等価剛性 k_G を算出する。

4. 解析結果

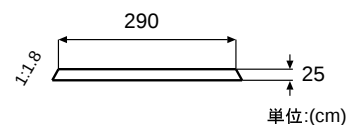


図 3 道床の断面形状

Key Words: 軌道, 道床, 走行車輪, 定常応答

連絡先: 950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL 025 (262) 7028 FAX 025 (262) 7021

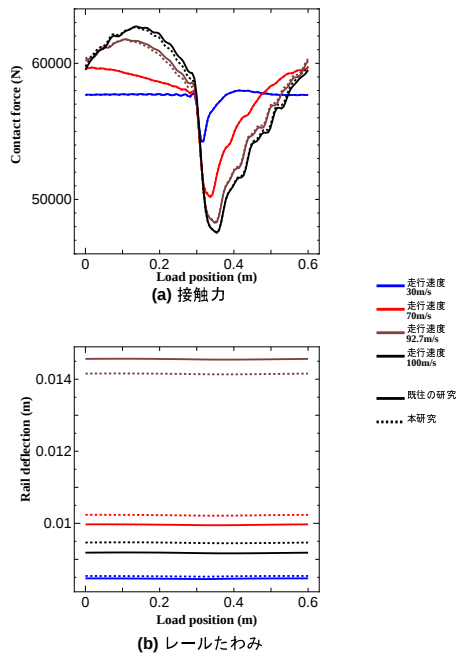


図 4 車輪直下における定常応答

レールは 60kg レールを対象とする。まくらぎ間隔 L は 0.6m とする。地盤は軟弱地盤を想定し、その質量密度は 1700kg/m^3 、ポアソン比は 0.3、地盤に正の減衰を与えるため導入する減衰定数は 5×10^{-4} 、せん断波速度は 100m/s とした。道床の形状は図 3 に示す通りである。用いる道床の質量密度は 1570kg/m^3 ヤング率は 56.32MN/m^2 、ポアソン比は 0.33 とする。

地盤表面の表面波速度と同等となる列車の走行速度 (臨界速度) について応答が卓越する現象が知られている。本研究では、この臨界速度における挙動を詳しく調べる目的で、列車の走行速度を、 30m/s 、 70m/s 、 100m/s の 3 ケースに加えて、上述の地盤剛性の場合に臨界速度を与える 92.7m/s の合計 4 ケースの走行速度に対し解析する。

(1) 道床を考慮したときの解析

各走行速度における定常応答を図 4 に示す。図 4(a) より、輪重変動において、臨界速度時に顕著な卓越応答は認められず、走行速度が増すにつれて変動幅が一様に大きくなる傾向が見て取れる。加えて、まくらぎ通過直後の輪重抜け現象も確認できる。道床を考慮しない既往の研究¹⁾と比較すると、輪重変動はほぼ一致しているのが見て取れ、道床の有無は影響しないことがわかる。

図 4(b) より、臨界速度では他の走行速度と比べ、レールたわみに顕著な卓越応答が認められる。得られたたわみの解析結果は走行速度の増加に対応して応答が一様には変化せず、値が増減している様子がわかる。既往の研究¹⁾と比較すると、臨界速度以外ではたわみが多少大きく目となるが、臨界速度では逆に減少していることがわかる。

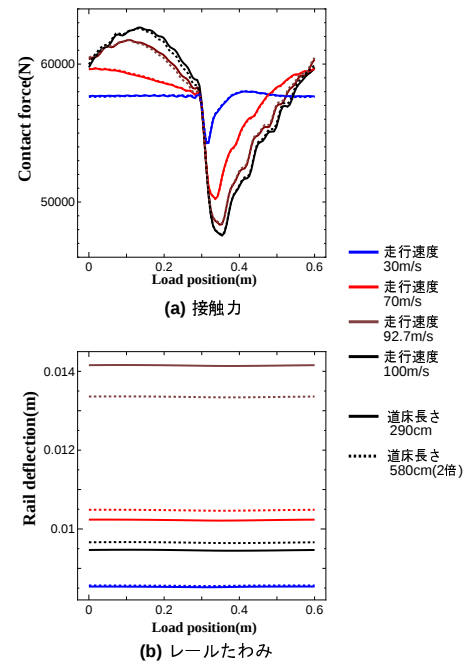


図 5 道床幅が定常応答に及ぼす影響

(2) 道床幅を 2 倍にしたときの解析

道床幅を変化させ、道床幅が応答に及ぼす影響を解析により調べる。道床幅を 2 倍とし、それに伴う道床の曲げ剛性と単位長さ当りの質量を 2 倍にし、その他は (1) と同一の条件で解析を行う。道床幅に変更を加えない場合を基本ケースとし、それとの比較を行う。

各走行速度における定常応答を図 5 に示す。図 5(a) より、輪重変動は道床幅を変えてもほぼ一致しているのが見て取れる。

一方、レールたわみを見ると (図 5(b))、臨界速度ではたわみが減少し、それ以外の速度では増大しているのが見て取れる。ちなみに、基本ケースに対し、道床質量と曲げ剛性のいずれかを大きく設定して解析した結果、前者の影響が大きいことがわかった。よって、図 4、図 5(b) におけるたわみ応答の変化は、主に道床導入による付加質量の影響によるものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、道床、まくらぎ、無限長レール、3 次元半無限地盤、そして一定速度で走行する車両との定常連成系を構成した。道床の有無で輪重変動には有意な違いは認められなかったものの、レールたわみについては道床の質量が影響を及ぼすことがわかった。

参考文献

- 1) 高野祐紀, 阿部和久, 紅露一寛: 3 次元地盤・走行車輪・軌道連成系の定常振動応答解析, J-Rail2011, 219-222, 2011