

バラスト材の弾性挙動の空間的ばらつきを有する 有道床軌道における動的応答の変動量に及ぼす 走行速度の影響

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 渡邊 あゆみ
新潟大学工学部工学科 正会員 紅露 一寛
新潟大学工学部工学科 正会員 阿部 和久

1. はじめに

国内外の鉄道で広く敷設されているバラスト軌道は、車両からの衝撃緩和・荷重分散効果が優れているという利点を有する。しかし、バラスト軌道には、軌道各部における物性値においてばらつきが存在する。本研究では、そのバラスト軌道における物性値の中でも、軌道の動的応答に大きな影響を及ぼすバラスト道床の Young 率に着目し、スペクトル確率有限要素法 (SSFEM)¹⁾を用いて、その空間変動が各部動的応答に及ぼす影響について検討した²⁾。しかし、軌道系の動的応答の変動は、バラスト道床に起因するものだけでないことは明らかである。

本研究では、バラスト道床の弾性特性だけでなく、軌道各部の物性値のばらつきが、軌道系の連成振動応答に及ぼす影響を定量評価する。今回はまず、不確定性の定量評価の精度を左右する Polynomial Chaos 展開の次数の設定が解析結果に及ぼす影響について評価する。また、バラスト道床の弾性挙動の空間変動を考慮した場合に、車輪の走行速度が軌道振動応答の変動に及ぼす影響を検討する。

2. スペクトル確率有限要素法による軌道振動解析

軌道振動解析では、著者らが提案した文献2)の SSFEM を用いる。図1のように、まくらぎを質点、レール・車輪間接触力をばね、レールを Euler ばり、レール・まくらぎ間、およびまくらぎ・道床間作用力を Voigt ユニット、バラスト道床を2次元線形弾性体でモデル化し、車両をばね下質量と上載荷重により表す。バラスト道床の Young 率 E の空間変動は、次の Karhunen-Loeve(KL) 展開で表す。

$$E(\mathbf{x}, \xi) = \bar{E} + \sum_{m=1}^{N_{KL}} \xi_m \sqrt{\lambda_m} f_m(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここで、 $\bar{E}$ は E の期待値、 N_{KL} は KL 展開の全展開項数、 ξ_m は確率変数、 λ_m 、 f_m はそれぞれ E の空間変動に関する共分散関数 $C(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ の固有値と固有関数である。本研究では、 $C(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ を次式で与える。

$$C(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\bar{E} \cdot \delta_E)^2 \exp \left(-\frac{|x_1 - y_1|}{b_1} - \frac{|x_2 - y_2|}{b_2} \right) \quad (2)$$

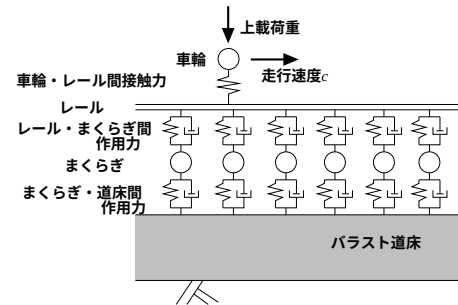


図1 車輪・軌道系の連成振動解析モデル

ここで、 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \Omega_b$ (Ω_b は道床領域)、 δ_E は E の変動係数、 b_1 、 b_2 は相関長さである。

なお、バラスト道床の Young 率の空間変動の影響は、軌道各部の動的応答の変動として伝播する。そこで、各部の変位や作用力をまとめて $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \xi, t)$ と表し、これを Polynomial Chaos(PC) 展開で次式で表す。

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, \xi, t) = \sum_{n=1}^{N_{pc}} \phi_n(\xi) \bar{\mathbf{F}}(\mathbf{x}, t) \quad (3)$$

ここで、 ϕ_n は polynomial chaos、 N_{ps} は PC 展開の項数、 $\bar{\mathbf{F}}$ は $\mathbf{F}$ の展開係数である。

解析に際しては、空間は有限要素法で離散化し、確率空間では ϕ_l を重みとした Galerkin 法を適用した上で、時間積分を陰解法で処理することで、各時間ステップにおける連立一次方程式が得られる。それを解くことで、軌道系の動的応答が評価できる。また解析時の計算負荷を考慮して、バラスト道床上面の鉛直変位は数値 Green 関数を用いて評価する。

3. 展開項数の設定の影響の評価

まず、バラスト道床の Young 率の空間変動を表現するための KL 展開、PC 展開の展開項数の設定の影響について検討する。バラスト道床の動弾性解析は、図2に示すように、まくらぎを 0.6m 間隔で 13 本設置したものに設定する。車輪は、領域中央から左に 1.8m の位置から図1の右方向に速度 10m/s で走行させる場合を考える。道床の Young 率の期待値を $\bar{E} = 88(\text{MPa})$ 、変動係数を $\delta_E = 10(\%)$ 、相関長さを $b_1 = b_2 = 0.6(\text{m})$ と与える。その他の物性値は既往の研究を参考に設定した上で解析を行い、領域中央のまくらぎ No.7 における各作用力の変動量について評価する。

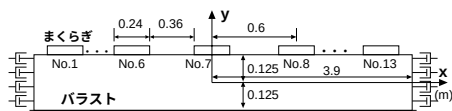


図2 バラスト道床部の解析モデル

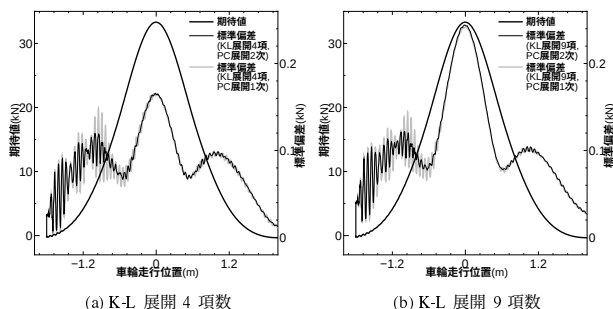


図3 展開項数を変更したときのまくらぎ・道床間作用力

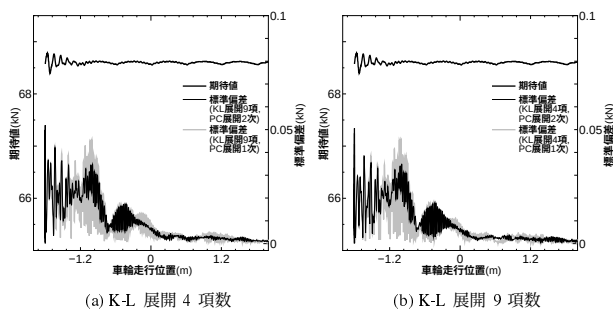


図4 展開項数を変更したときのレール・車輪間接触力

図3, 図4に, KL 展開項数, PC 展開の次数を変更した場合のまくらぎ・道床間, レール・車輪間の作用力を示す. PC 展開項数 N_{pc} について, KL 展開項数 $N_{KL} = 2 \times 2 = 4$ のとき, 1 次は $N_{pc} = 5$, 2 次は $N_{pc} = 15$, $N_{KL} = 3 \times 3 = 9$ のとき, 1 次は $N_{pc} = 10$, 2 次は $N_{pc} = 55$ となる. まくらぎ・道床間作用力では, KL 展開項数を変更したとき, 領域中央での変動量が約 2 倍に増加した. PC 展開の次数を変更したとき, まくらぎ No.5 から No.6 周辺において変動量の振動が小さくなっているが, 全体の傾向はほとんど変わらず, これは KL 展開の項数が異なる場合でも同様であった. また, まくらぎ・レール間においてもまくらぎ・道床間と同様の傾向となった. レール・車輪間接触力においては, KL 展開の項数を変更しても結果に影響せず, PC 展開次数の設定については他と同様の傾向となった.

4. 走行速度と動的応答の変動量との関係

次に, 車輪の走行速度が軌道各部の作用力の応答の変動量に及ぼす影響を検討する. 軌道の条件は前節と同一とし, 走行速度のみを変化させて解析を行った. 図5, 図6, 図7に, 走行速度 10m/s, および標準偏差が最も増幅する速度で走行させた場合の, まくらぎ・道床間, レール・まくらぎ間, 車輪・レール間の各作用力の結果を示す. いずれも解析時間を考慮して, $N_{KL} = 4$, PC 展開を 1 次 ($N_{pc} = 5$) に設定した. 速度は 10m/s から 100m/s の間で最も応答の変動量が増幅

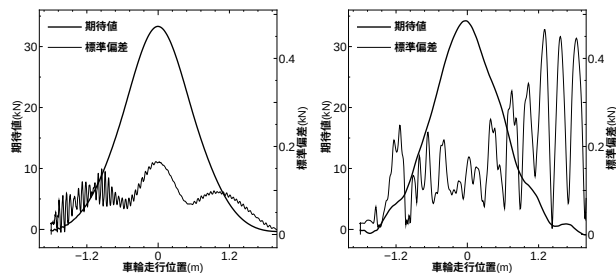


図5 速度を変更したときのまくらぎ・道床間作用力

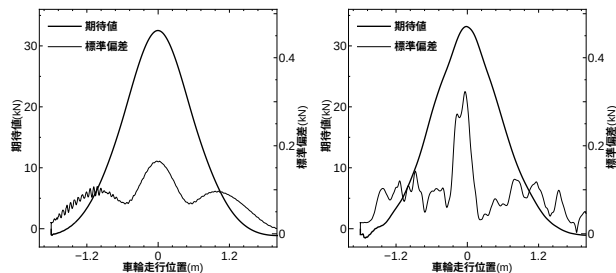


図6 速度を変更したときのレール・まくらぎ間作用力

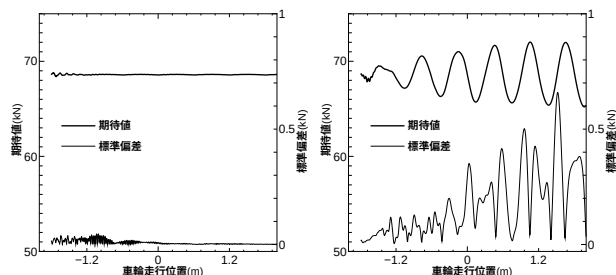


図7 速度を変更したときの車輪・レール間接触力

する速度を調べたところ, まくらぎ・道床間作用力は 87m/s, レール・まくらぎ間作用力は 69m/s, 車輪・レール間接触力は 53m/s であった. レール・まくらぎ間作用力においては, まくらぎ No.7 付近以外は低速の時と変動量はあまり変わらないが, まくらぎ・道床間作用力, レール・車輪間接触力においては, 車輪が走行に伴い, 標準偏差の振幅が増幅する結果となった. 特に, レール・車輪間接触力では, 低速の場合と比べ, 標準偏差が 100 倍以上増幅している結果となった.

5. おわりに

今後は, バラスト道床の Young 率だけでなく, 軌道の各構成要素に関する空間的なばらつきや作用外力を考慮した連成振動解析を行い, 軌道の動的応答に与える影響について検討する.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K06177 の助成を受けたものです.

参考文献

- Ghanem, R. G. & Spanos, P. G. : Stochastic finite elements. Dover, 1991.
- 渡邊あゆみ, 紅露一寛: バラスト軌道の振動応答に及ぼすバラスト材の弾性係数の空間的ばらつきの影響, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.72, No.2, pp.1.265-1.276, 2017.