

まくらぎの浮きを考慮したバラスト道床沈下有限要素解析

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 相田 真人
 新潟大学工学部建設学科 正会員 紅霞 一寛
 新潟大学工学部建設学科 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では、車両通過における軌道系の動的作用により道床沈下の発現・進展挙動が変化する。特に、軌道剛性の急変箇所では、沈下量が著大となることが知られており、この原因の一つに同省の不同沈下に起因したまくらぎの浮き考えられている。まくらぎの浮き上がりにより、車両から作用する荷重を隣接する他の接地まくらぎで集中して負担することになり、作用力の割り増しにより沈下が進展する。これまで、軌道剛性急変箇所における道床沈下挙動の評価を目的とし、軌道系の動的応答を考慮した道床沈下有限要素解析を試みたが、文献¹⁾では、まくらぎの浮きは考慮されていない。そこで本研究では、文献¹⁾の連成解析手法にまくらぎの浮きを考慮し、まくらぎの浮きが道床沈下に及ぼす影響について検討する。

2. 軌道振動問題と道床沈下問題の連成解析手法

本研究における連成解析は、図1に示すフローに沿って行う。まず、バラスト上面に所定の沈下量を与えて車輪走行下での軌道系の連成振動解析を行う。この解析により、道床沈下解析での作用外力となる、各まくらぎ位置でのまくらぎ・バラスト間作用力の最大値を評価する。連成振動解析の各構成要素については、レールはEuler ばり、車輪・まくらぎ・バラストは1個ないし3個の質点でモデル化し、車輪・レール間での作用力はHertz 接触バネ、はりおよび各質点間の相互作用力は、Voigt ユニットで評価する。

i 番まくらぎ・バラスト道床上面間の作用力 $F_s^{(i)}$ は、まくらぎ変位 $u_{slp}^{(i)}$ とバラスト道床上面変位 $u_{blst,1}^{(i)}$ の相対変位 $\delta_s^{(i)} \left(= u_{slp}^{(i)} - u_{blst,1}^{(i)} \right)$ に対して、次式で与えるものとする。

$$F_s^{(i)} = \begin{cases} k_s^{(i)} \delta_s^{(i)} & (\delta_s^{(i)} > 0) \\ 0 & (\delta_s^{(i)} \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $k_s^{(i)}$ は接触バネ定数である。

次に、軌道振動解析で得られたまくらぎ・バラスト間作用力の最大値を外力として、cyclic densification モデル²⁾に基づくバラスト道床沈下解析を有限要素解析により行う。cyclic densification モデルでは、単調载荷モデルと繰り返し载荷モデルの2つのモデルからなる。解析においては、まくらぎ・

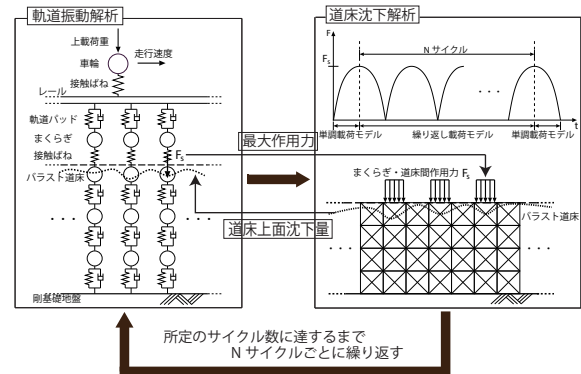


図1 軌道振動問題と道床沈下問題との連成解析の流れ

バラスト道床間最大作用力でのつり合い状態をつくり出すために、古典的弾塑性モデル(単調载荷モデル)を用いた増分解析を行う。単調载荷モデルでは、Drucker-Prager モデルの円錐曲面の上端と下端を体積圧縮と引張破壊の2平面で閉じた破壊面形状とする多曲面の古典的弾塑性モデルを用いる。

引き続き、その最大作用力を一定外力として所定のサイクル数まで繰り返し作用させ、载荷・除荷単位サイクルでの弾塑性つり合い状態の変化量を直接評価できる繰り返し载荷モデルを用いて、サイクル数 N を制御変数とした増分解析を行う。繰り返し载荷モデルは、Perzyna の超過応力モデルを用いて、繰り返し荷重作用により生じる塑性ひずみ増分を与える。なお、破壊基準としては、摩擦すべり、体積圧縮、引張破壊の3つのメカニズムについて考えることとする。

最後に、再び単調载荷モデルを用いて最大作用力を完全に除荷し、各まくらぎ位置の道床沈下量を求める。評価した道床沈下量は道床上面での初期沈下量として与え、前述の軌道振動解析を再度行う。

この一連の解析を所定のサイクル数に到達するまで交互に繰り返し行い、車輪通過による繰り返し荷重作用下でのバラスト道床沈下量を評価する。

3. 軌道剛性急変箇所における道床沈下解析

本解析では、軌道剛性急変箇所として、コンクリート直結軌道からバラスト軌道へ移行する区間を考える。今回は、車輪(車両)の進行方向に対して軌道上手側はコンクリート、下手側はバラスト道床が敷設されている場合を対象とする。

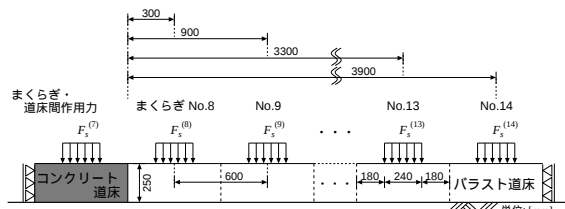
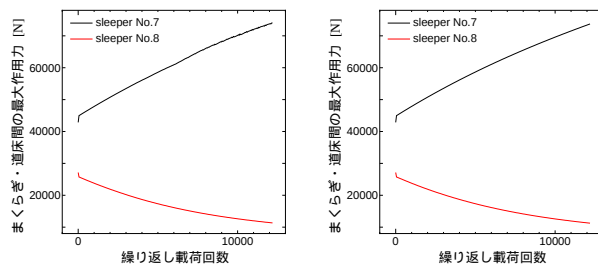


図2 道床沈下解析における解析領域

軌道振動解析では、レールを50Nレールとし、まくらぎはPCまくらぎをコンクリート区間に7本、バラスト道床区間に14本を配置し、バラスト道床区間に配置されたまくらぎにのみ浮きを考慮する。車輪は1個のみが10m/sで下手方向に走行する場合を考える。一方、道床沈下解析では、図2に示すようにコンクリートおよびバラストからなる道床部について平面ひずみ領域を対象に行う。なお、解析は、まくらぎの浮きを考慮した解析(a)と浮きを考慮しない解析(b)の2つを行った。

図3に道床の構造境界を直近のまくらぎNo.7(コンクリート側)、No.8(バラスト側)での繰返し載荷回数に対する最大作用力の推移を示す。コンクリート部にあるまくらぎNo.7では、繰返し載荷に比例して最大作用力は増加する。しかし、まくらぎNo.8では載荷に伴い作用力が減少する傾向にある。図3(a)、(b)の双方を比較すると、2つのまくらぎにおける作用力の推移にはほとんど違いが見られない。次に、まくらぎNo.10, 12, 14での最大作用力の推移を図4に示す。境界部に近いまくらぎNo.10では、最大作用力が減少しているが、その他のまくらぎの作用力は単調に増加しており、繰返し載荷12000回程度では解析(a)のまくらぎNo.12, 14の最大作用力が解析(b)に対して5%ほど大きいことがわかる。図5、図6には、各まくらぎにおける作用力の時刻歴を示す。まくらぎの浮きを考慮することにより、車輪に最近接するまくらぎを除いた前後数本のまくらぎ下に作用する力がまくらぎの浮きにより解放された結果、支点として機能しているコンクリート部No.7と最近接まくらぎでの作用力が増加する。繰返し載荷回数の増加により沈下が進展することで、作用力が解放されるまくらぎ本数が漸増する傾向を示すことから、図4の最大作用力の増加速度が増す結果をもたらしている。その結果、繰返し載荷回数に対する各まくらぎ位置における道床上面沈下量の推移を示した図7では、道床構造境界部付近での沈下に対して、境界部から遠ざかるにつれて道床沈下が進展し、まくらぎNo.9から14では、(b)に比べて浮きを考慮した(a)のほうが10%ほど沈下量が増加する結果を得た。

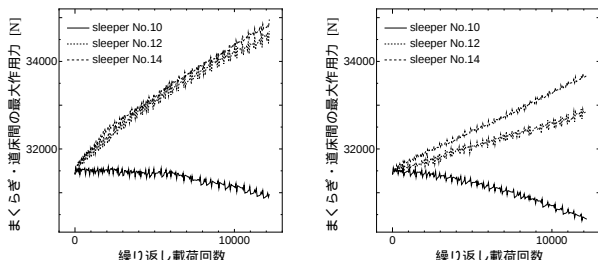
今後は、レール凹凸の有無が道床沈下の進展傾向に及ぼす影響や、室内模型実験結果との比較に取り組むこととしたい。



(a) 浮き考慮.

(b) 浮き未考慮.

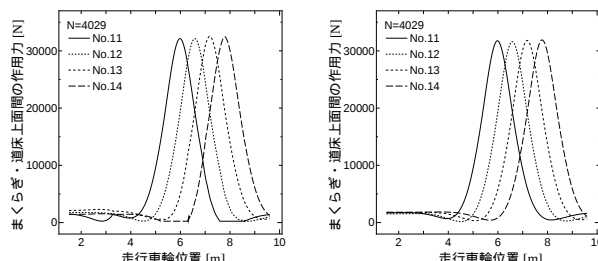
図3 繰返し載荷ごとの最大作用力 (まくらぎ No.7, 8)。



(a) 浮き考慮.

(b) 浮き未考慮.

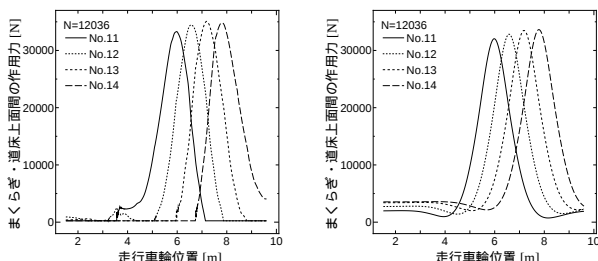
図4 繰返し載荷ごとの最大作用力 (まくらぎ No.10, 12, 14)。



(a) 浮き考慮.

(b) 浮き未考慮.

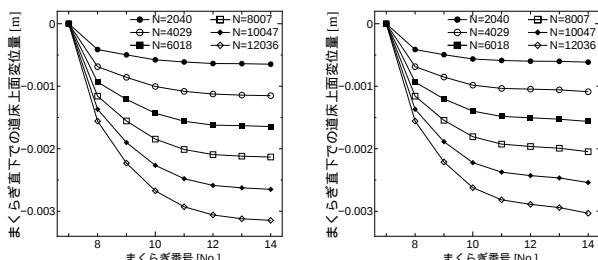
図5 繰返し載荷ごとの最大作用力 (4,029 サイクル)。



(a) 浮き考慮.

(b) 浮き未考慮.

図6 繰返し載荷ごとの最大作用力 (12,036 サイクル)。



(a) 浮き考慮.

(b) 浮き未考慮.

図7 繰返し載荷ごとの道床上面変位量。

参考文献

- 1) 紅露一寛, 佐藤江美, 阿部和久: 軌道の動的応答を考慮した cyclic densification モデルに基づくバラスト道床沈下解析法. 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.8, pp.227-234, 2014.
- 2) Suiker, A. S., J., de, Borst, Rene.: A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.57, pp441-470, 2003.