

浮きまくらぎを考慮したバラスト道床沈下有限要素解析

新潟大学 学生員 相田真人
 新潟大学 正会員 紅露一寛
 新潟大学 正会員 阿部和久

1. はじめに

国内外の鉄道で広く採用されているバラスト軌道では、碎石粒子の集合体から成るバラスト道床が敷設されている。特に、軌道剛性の急変箇所では、局所的な沈下の発生により、無荷重時においてまくらぎが締結されたレールにぶら下がり宙吊りになる「浮きまくらぎ」が発生する。浮きまくらぎ発生箇所周辺では、レールより上部から作用する荷重が隣接するまくらぎに集中して作用する。この荷重の割り増し効果によって沈下が不均一に進展する。著者らはこれまで、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て、軌道系の振動解析と cyclic densification モデルに基づく道床沈下有限要素解析との連成解析手法を構成した¹⁾、しかし、浮きまくらぎは考慮されていない。そこで本研究では、文献¹⁾の連成解析法においてまくらぎの浮きを考慮し、その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¹⁾。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。当該の解析では、道床沈下解析での作用外力となる、各まくらぎ位置におけるまくらぎ・バラスト間作用力の最大値を評価する。なお、連成振動解析は、有限要素法に基づく文献²⁾の方法を用いる。軌道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 $\delta_s^{(i)}$ ($= u_{slp}^{(i)} - u_{blst,1}^{(i)}$) 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、軌道振動解析によって得られたまくらぎ・バラスト間作用力の最大値を外力として、cyclic densification モデル³⁾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

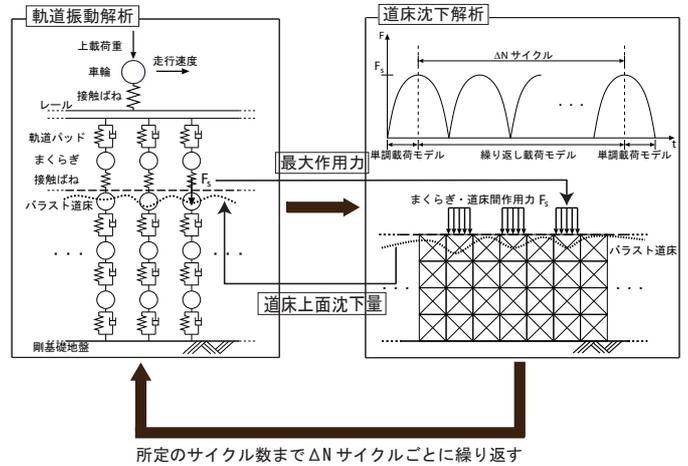


図1 軌道振動問題と道床沈下問題との連成解析の流れ

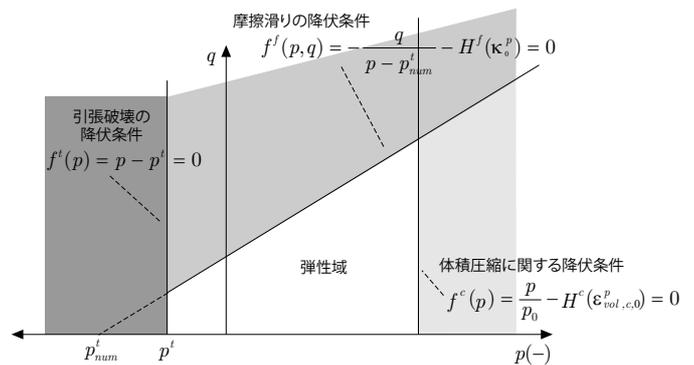


図2 単調载荷モデルにおける降伏面形状

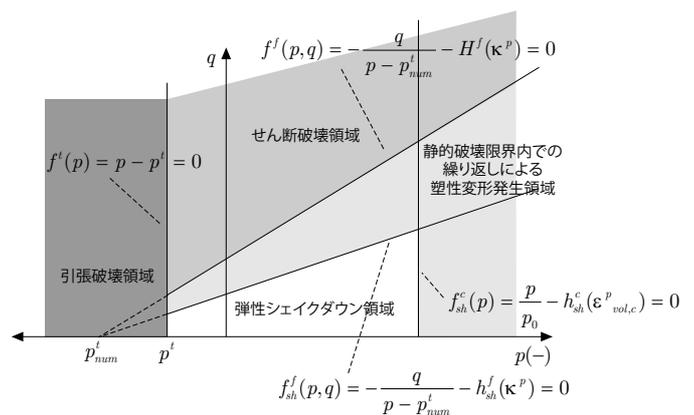


図3 繰り返し载荷モデルにおける破壊面形状

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・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、図2に示すよう

に, Drucker-Prager モデル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. なお, モデルの詳細は文献³⁾を参照されたい.

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, 載荷・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載荷モデルを用いて, サイクル数 N を制御変数とした増分解析を行う. 構成則は, σ_{ij} を応力テンソル, ε_{kl}^e を弾性ひずみとして, N についての歪弾性を仮定して次式で与える.

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dN} = D_{ijkl} \frac{d\varepsilon_{kl}^e}{dN} \quad (2)$$

$$D_{ijkl} = \frac{3K_t}{2(1+\nu)} \left[(1-2\nu)(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) + 2\nu\delta_{ij}\delta_{kl} \right] \quad (3)$$

$$K_t = K_{ref} \left(\frac{p}{-p_{ref}} \right)^{1-n^e}, \quad p = \frac{\sigma_{mm}}{3} \quad (4)$$

ここで, ν は Poisson 比であり, $K_{ref}, p_{ref} (> 0)$ は材料パラメータである. なお, 構成則以外の諸式については文献¹⁾に示す通りである.

繰り返し載荷モデルは, 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弾性ひずみ増分を与える. なお, 破壊基準としては図 3 に示すように, 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, 再び単調載荷モデルを用いて最大作用力を完全に除荷し, 各まくらぎ位置での道床沈下量を求める. 評価した道床沈下量は道床上面における初期沈下量として与え, 先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より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.

レールは 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. その他のレール, 車輪, 軌道・防振パッド, 接触バネ, まくらぎ, 道床の物性値は表 1-表 6 に示す通りである.

弾性係数	206 (GPa)
ポアソン比	0.3
質量密度	7880 (kg/m ³)
断面積	64.05×10 ⁻⁴ (m ²)
断面二次モーメント	1960×10 ⁻⁸ (m ⁴)
曲率半径	0.3 (m)

表 2 軌道・防振パッド・接触バネの物性値

軌道パッド	バネ定数	47.33 (MN/m)
	減衰係数	65.3 (MNsec/m)
防振パッド	バネ定数	133.3 (MN/m)
	減衰係数	65.3 (MNsec/m)
接触バネ定数		1000 (MN/m)

表 3 車輪の物性値

弾性係数	210 (GPa)
ポアソン比	0.3
質量	350 (kg)
曲率半径	0.43 (m)

表 4 まくらぎの物性値

まくらぎ本数	21 (本)
まくらぎ間隔	0.6 (m)
まくらぎ幅	0.24 (m)
質量	100 (kg)

表 5 バラストの物性値

上層	質量	24.3 (kg)
	バネ定数	211 (MN/m)
	減衰係数	980 (kNsec/m)
中層	質量	24.3 (kg)
	バネ定数	211 (MN/m)
	減衰係数	980 (kNsec/m)
下層	質量	58.1 (kg)
	バネ定数	322 (MN/m)
	減衰係数	980 (kNsec/m)

表 6 コンクリートの物性値

上層	質量	50.7 (kg)
	バネ定数	182 (GN/m)
	減衰係数	980 (kNsec/m)
中層	質量	69.3 (kg)
	バネ定数	215 (GN/m)
	減衰係数	980 (kNsec/m)
下層	質量	121.4 (kg)
	バネ定数	193 (GN/m)
	減衰係数	980 (kNsec/m)

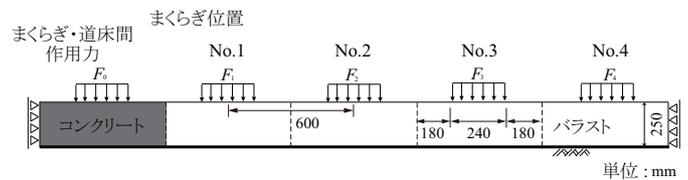


図 4 道床沈下解析における解析領域

一方, 道床沈下解析は, 図 4 に示すようにコンクリート, バラスト道床からなる平面ひずみ領域を対象に行う. なお, 解析結果は発表会において示す.

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) 紅露一寛, 石田誠, 鈴木貴洋, 阿部和久: レール継目部の衝撃応答解析における道床・路盤部のモデル化の影響. 土木学会応用力学論文集, Vol.7, pp.1313-1323, 2004.
- 3) 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.