軌道剛性急変箇所の道床沈下解析結果に対する各種離散化条件の影響

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 相田 真人
新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 一寛
（公財）鉄道総合技術研究所 正会員 相川 明
新潟大学工学部建設学科 正会員 阿部 和久

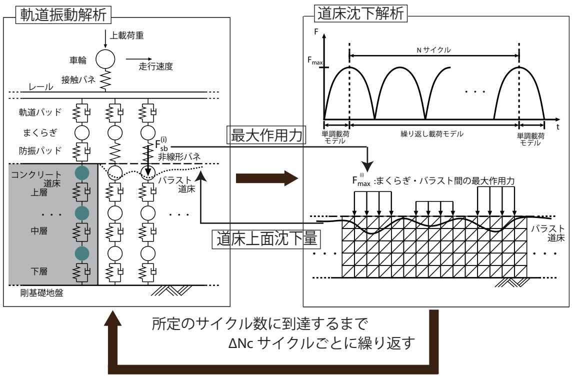


図 1 軌道振動問題と道床沈下問題との連成解析の流れ

1. はじめに

バラスト道床では，列車走行に伴う繰り返し荷重作用により，道床沈下が発生する．バラスト道床沈下の発現・進展挙動は，軌道系の動的作用に起因するまくらぎ・バラスト間の作用力の変動に影響されるため，軌道構造の動的応答を適切に評価し，道床沈下解析に考慮する必要がある．特に，コンクリート・バラスト道床の境界部といった軌道剛性急変箇所では，一部のまくらぎで「浮き上がり」が発生し，他の接地まくらぎへの荷重分配や浮上まくらぎの再接触により，局所的な沈下が発生・進展することが懸念される．

これまで本研究室では，バラスト道床を弾塑性連続体としてモデル化し，cyclic densification モデル[1)]を用いた弾塑性有限要素解析により多数回の載荷・除荷における変形挙動の解析の効率向上を試みてきた．また，まくらぎの浮き上がりを考慮した車輪・軌道系の振動解析と道床の沈下解析を連成させることで，車輪・軌道系の動的作用を考慮した道床沈下解析手法を構築した[2)]．

そこで本研究では，軌道剛性急変箇所を対象としたバラスト道床沈下解析において，各種離散化条件が道床沈下解析結果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．連成振動解析の各構成要素は，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，車輪・レール間での作用力は Hertz 接触ばね，はりおよび各質点間の相互作用力は，Voigt ユニットでモデル化する．まず，バラスト道床の上面に所定の沈下量を与えて車輪走行下での軌道系の振動解析を行い，各まくらぎ位置でのまくらぎ・バラスト間の最大作用力を抽出する．抽出したまくらぎ・バラスト間の最大作用力をまくらぎ底面に対して一様に分布した表面力に置換し，道床沈下解析における最大表面力とする．

次に，バラスト道床を弾塑性連続体としてモデル化し，cyclic densification モデル[1)]に基づく繰り返し載荷・除荷下における道床の変形挙動を有限要素解析により評価する．ここで，当該モデルは，単調載荷モデルと繰り返し載荷モデルの 2 つのモデルからなる．単調載荷モデルでは，無荷重作用状態から最大表面力作用状態におけるつり合い状態をつくり出すために，古典的弾塑性モデルを用いた増分解析を行う．なお，降伏面形状は，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 平面で閉じた多曲面モデルを用いる．続いて，繰り返し載荷モデルを用いて，載荷・除荷における単位サイクルでの物理変化量を直接評価し，最大表面力が所定の繰り返しサイクル数作用する下でのサイクル数 N を制御変数とした増分解析を行う．繰り返し載荷モデルでは，超過応力モデルに基づいて繰り返しサイクル下における塑性ひずみを評価し，破壊形態は，摩擦滑り破壊・体積圧縮破壊・引張破壊の３つとする．最後に，再び単調載荷モデルを用いて表面力を完全に除荷し，各まくらぎ底面下での道床沈下量を抽出する．抽出した道床沈下量を平均値した値を前述の軌道振動解析におけるまくらぎ位置での道床上面の沈下量として与える．そのため，軌道振動解析は ΔN_c サイクルに一度実行されることとなる．

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，繰り返し車輪走行による荷重作用下でのバラスト道床沈下量を評価する．

3. 解析条件

本解析では，軌道剛性急変部を対象として，一つの車輪がコンクリート道床からバラスト道床へと走行する場合の道床沈下解析を行う．軌道振動解析では，レールは 50N レール，車輪は走行速度を 10[m/s] として上載荷重 65170[N] を作用させる．まくらぎは，PC まくらぎをコンクリート道床側から No.1, No.2, · · · と番号を付し，0.6[m] の間隔で No.1

Key Words: バラスト道床沈下，軌道振動解析，*cyclic densification* モデル，弾塑性有限要素法
連絡先：950-2181 新潟市西区五十嵐二の町 8050 番地 TEL 025 (262) 7274 FAX 025 (262) 7274

からNo.7までをコンクリート区間に配置し，それ以外はバラスト区間に配置する．一方で，道床沈下解析では，**図 2**に示すような線形弾性体のコンクリート道床と弾塑性体のバラスト道床からなる平面ひずみ領域を対象とする．

本解析では，解析結果に及ぼす離散化条件の影響として，連成解析における軌道振動解析の実行間隔 ΔN_C サイクルとバラスト道床の区間長の 2 つについて検討する．ΔN_c の影響を検討する解析では，軌道振動解析の配置まくらぎ数を 24 本とし，道床沈下解析区間をコンクリート道床 1 区間とバラスト道床 7 区間の合計 8 区間（まくらぎ No.7 から No.14）とする．一方で，区間長の影響を検討する解析では，$\Delta N_c = 51$ と設定して配置まくらぎ数を上記の他に 28，34，41 本とし，解析区間をコンクリート道床 1 区間とバラスト道床 11，17，24 区間とした合計 12，18，25 区間（まくらぎ No.7 から No.18，24，31）とする．なお，解析に用いる各物性値は文献[2)]を参考されたい．

4.　解析結果

2 種類の離散化条件における道床沈下解析に及ぼす影響は，繰り返しサイクル数に対する各まくらぎ底面での平均沈下量により検討する．

まず，**図 3** に $\Delta N_c = 100, 500, 1000, 2000$(回) における各まくらぎ底面下での道床の平均沈下量を示す．**図 3** に示す (a), (b), (c) を比較すると，沈下形状では $N = 2000$ から 8000(回) において局所的な沈下が生じている箇所も見受けられるが，際立った形状の違いはない．しかし，ΔN_c が増加するにつれて $N = 12000$(回) における全てのまくらぎ位置での沈下量が小さくなっており，特に差が大きい箇所では，(c) の沈下量が (a) に対して 65 %程になっている．また，(d) については $N = 10000, 12000$(回) において，それぞれまくらぎ No.11, 12 で局所的な沈下が生じており，明らかに不自然な沈下形状が得られている．

次に，**図 4** にバラスト道床の区間長 8，12，18，25 区間における各まくらぎ底面下での道床平均沈下量を示す．沈下形状に着目すると，$N = 8007, 10047, 12036$(回) のまくらぎ No.10 から No.14 で局所的な沈下が発生・進展し，それ以遠のまくらぎでは沈下量がほぼ一定となっている．しかし，各まくらぎ位置の沈下量はバラスト区間を長くするに従い小さくなる傾向を示している．これは，バラスト区間を長くすることで走行荷重の支持点が増え，各まくらぎでの最大作用力が低減したことが原因であると考えられる．

このように，繰り返しサイクル数を重ねると，各まくらぎ位置での作用力の差異や数値誤差の蓄積が道床沈下量に影響を及ぼすことから，解析の際には ΔN_c や区間長の設定に注意が必要であると言える．

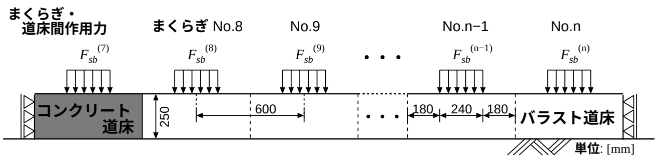
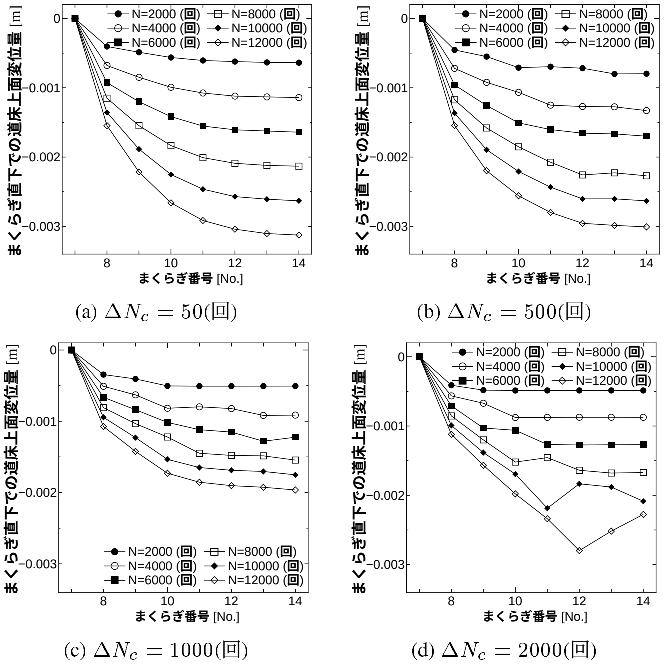


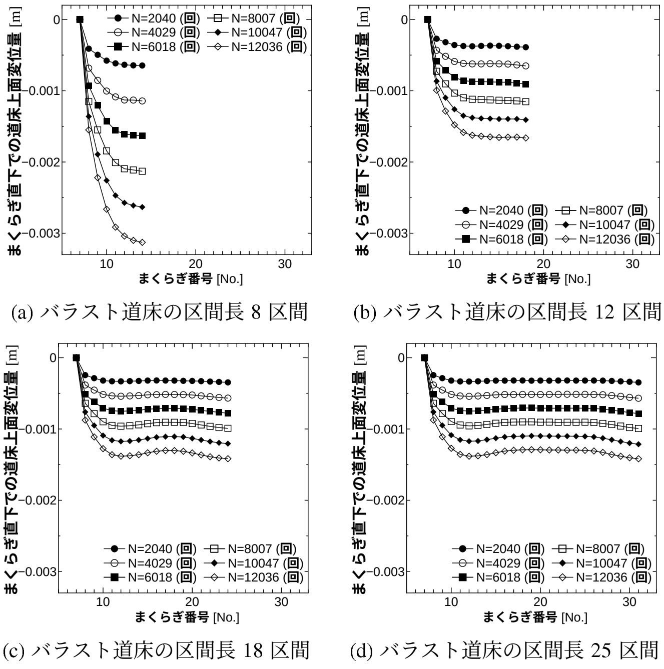
図 2 解析対象とする道床の設定



(a) $\Delta N_c = 50$(回)　(b) $\Delta N_c = 500$(回)

(c) $\Delta N_c = 1000$(回)　(d) $\Delta N_c = 2000$(回)

図 3 各 ΔN_c における各まくらぎ位置の平均沈下量



(a) バラスト道床の区間長 8 区間　(b) バラスト道床の区間長 12 区間

(c) バラスト道床の区間長 18 区間　(d) バラスト道床の区間長 25 区間

図 4 各区間長における各まくらぎ位置の平均沈下量

参考文献

1) Suiker, A, S., J., de, Borst, Rene.: A numerical model for the cyclic deteriration of railway tracks. *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.57, pp441-470, 2003.

2) 相田真人，紅露一寛，阿部和久：まくらぎの浮きを考慮した軌道振動・道床沈下連成解析. 土木学会鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.19, pp.127-134, 2015.