

# バラスト道床の繰り返し変形挙動の評価における平面ひずみ近似の妥当性の検討

新潟大学大学院自然科学研究科 学生員 佐藤 江美  
 新潟大学大学院自然科学研究科 正会員 紅露 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

バラスト道床では、列車の繰り返し走行によりその上面において残留変位が発生・進展する。残留変位の主たる成分である道床沈下量は、道床より上部の軌道構造からの伝達力が大きいほど少ない通過回数で累積が促進される傾向を示す。そのため、道床沈下解析を行う際にはこの力の適切な評価が必要となる。上部からの伝達力のうち、レール圧力は、継目部や軌道剛性急変箇所に変化し、その変化においては動的作用が支配的である。しかし、従来より用いている連続体ベースの道床沈下解析手法では、動的効果に起因した作用外力の変動を考慮できていない。そこで、本研究では、軌道の動的応答を考慮した有道床軌道の沈下量解析手法の構築を試みる。

これまで当研究室では、石川らの実物大試験<sup>1)</sup>を対象として、Cyclic densification モデル<sup>2)</sup>を用いた3次元有限要素解析を行い、繰り返し荷重作用時の道床沈下量の数値予測、およびバラスト道床の変形特性の評価を行なった<sup>3)</sup>。しかし、3次元解析の計算負荷が大きいため、まずは、Cyclic densification モデルを用いた道床沈下解析を行う場合を対象に、軌道横断・縦断方向についての平面ひずみ近似の妥当性について検討する。

## 2. Cyclic densification モデル

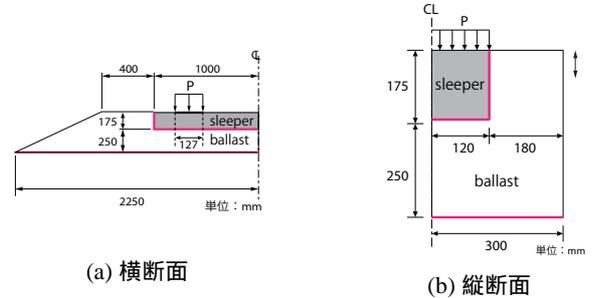
本研究で採用する cyclic densification モデルでは、従来型が時刻歴で塑性変形を評価していたのに対し、載荷・除荷を1cycleとして塑性変形を評価する。載荷・除荷単位 cycleあたりの応力やひずみの変化量を直接評価することにより、高サイクル負荷下でのつり合い・変形状態を効率よく評価することが可能となる。繰り返し載荷過程において、応力は繰り返し回数  $N$  についての履歴依存性を有するものとし、次式の垂弾性構成式で与える。

$$\frac{d\sigma_{ij}}{dN} = D_{ijkl} \left( \frac{d\epsilon_{kl}}{dN} - \frac{d\epsilon_{kl}^p}{dN} \right) \quad (1)$$

ここで、 $D_{ijkl}$  は弾性定数テンソルであり、 $d\epsilon_{kl}/dN$  は全ひずみ速度、 $d\epsilon_{kl}^p/dN$  は塑性ひずみ速度を表す。

塑性ひずみの発現速度  $d\epsilon_{kl}^p/dN$  は次式の非関連流動則で与える。

$$\frac{d\epsilon_{ij}^p}{dN} = \frac{d\kappa^p}{dN} m_{ij}^f + \frac{d\epsilon_{vol,c}^p}{dN} m_{ij}^c + \frac{d\epsilon_{vol,t}^p}{dN} m_{ij}^t \quad (2)$$



(a) 横断面 (b) 縦断面

図1 平面ひずみ解析の解析モデル

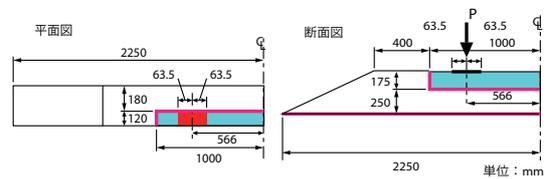


図2 3次元解析の解析領域と境界条件

ここで、 $d\kappa^p/dN$  は摩擦滑り、 $d\epsilon_{vol,c}^p/dN$  は体積圧縮、 $d\epsilon_{vol,t}^p/dN$  は引張破壊に関する塑性乗数速度である。また、 $m_{ij}^f$ 、 $m_{ij}^c$ 、 $m_{ij}^t$  はそれぞれ摩擦滑り、体積圧縮、引張破壊に関する流動方向規定テンソルであり、次式に示す。

$$m_{ij}^f = \frac{\partial g^f(q, p, \kappa_0^p)}{\partial \sigma_{ij}} \quad (3)$$

$$m_{ij}^c = \frac{\partial g^c(p, \epsilon_{vol,c,0}^p)}{\partial \sigma_{ij}}, m_{ij}^t = \frac{\partial g^t(p)}{\partial \sigma_{ij}}$$

ただし、 $g^f$ 、 $g^c$ 、 $g^t$  は文献<sup>2)</sup>に示す通りである。

また、 $p = \sigma_{mm}/3$  は平均応力、 $s_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$  は偏差応力であり、 $q = \sqrt{(3/2)s_{ij}s_{ij}}$  は相当応力である。摩擦滑りと体積圧縮に関する塑性乗数の発現速度は、超過応力量に基づき与えるものとする。

なお、当該のモデルは繰り返し載荷2回目以降の解析で用いるものとし、繰り返し載荷1回目における最大荷重作用時までは単調載荷解析で再現する。単調載荷過程における降伏曲面は、Drucker-Pragerの降伏条件を適用し、引張破壊および体積圧縮破壊を表現する等方応力軸に直交する2平面と1曲面から構成されるものとする。

## 3. 平面ひずみ近似の妥当性の検討

### (1) 平面ひずみ解析の条件

本研究の解析では、図1に示すバラスト、まくらぎの2相からなる解析領域を有限要素モデルで表現し、3次元解析における荷重作用位置(レール位置)の縦断面およびまく

Key Words: 有道床軌道, 有限要素法, 道床沈下, 平面ひずみ

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

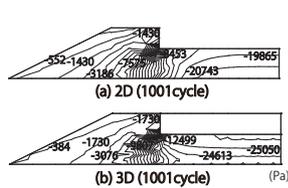


図3 1001cycleにおける平均応力に関する2D・3D解析結果(横断面)

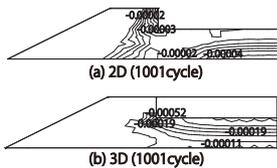


図5 1001cycleにおける塑性体積ひずみに関する2D・3D解析結果(横断面)

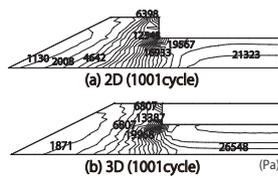


図4 1001cycleにおける偏差応力の2次不変量に関する2D・3D解析結果(横断面)

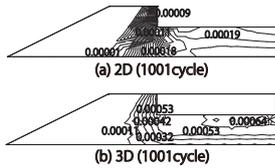


図6 1001cycleにおける塑性偏差ひずみの2次不変量に関する2D・3D解析結果(横断面)

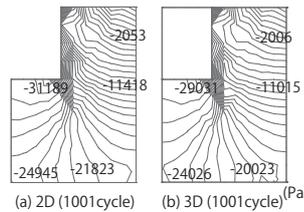


図7 1001cycleにおける平均応力に関する2D・3D解析結果(縦断面)

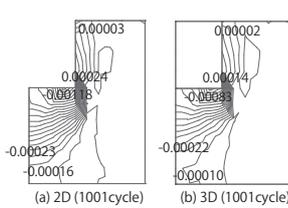


図9 1001cycleにおける塑性体積ひずみに関する2D・3D解析結果(縦断面)

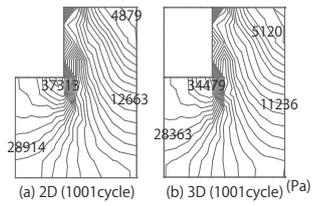


図8 1001cycleにおける偏差応力の2次不変量に関する2D・3D解析結果(縦断面)

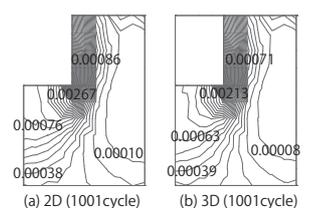


図10 1001cycleにおける塑性偏差ひずみの2次不変量に関する2D・3D解析結果(縦断面)

らぎ中央の横断面を解析対象とする。最大作用荷重は、文献<sup>1)</sup>に準じて、レール1本あたり20kNとした。境界条件は、軌道横断面・縦断面に対称条件を課し、バラストとまくらぎは完全付着を仮定した。また、バラスト道床底面は完全拘束とした。材料パラメータ値は文献<sup>3)</sup>で用いた値で与えた。なお、図2は3次元解析で用いた解析モデルである。

(2) 軌道縦断方向の平面ひずみ近似

まず、軌道縦断方向の平面ひずみ近似の妥当性を検討するために、図3-図6に軌道横断面内の平面ひずみおよび3次元解析における平均応力、偏差応力の2次不変量、塑性体積ひずみ、塑性偏差ひずみの2次不変量の分布をそれぞれ示す。図3、図4より、平面ひずみ解析の道床の各応力値は、3次元解析結果よりも小さな値で評価される傾向を示している。この傾向は、図5、図6の各塑性ひずみの値についても同様である。また、バラスト隅角部近傍における塑性ひずみの発現傾向に差が認められる。これらの差は、軌道縦断方向の応力場・ひずみ場が平面ひずみ近似の前提を満たしていないことに起因すると考えられる。従って、軌道横断面内のバラスト材の力学挙動の評価は、3次元解析による方が、より妥当な結果を与えると思われる。

(3) 軌道横断方向の平面ひずみ近似

次に、軌道横断方向の平面ひずみ近似の妥当性について検討する。図7-図10に縦断方向の平面ひずみおよび3次元解析における平均応力、偏差応力の2次不変量、塑性体積ひずみ、塑性偏差ひずみの2次不変量の分布をそれぞれ示す。図7-図10より、平面ひずみ解析と3次元解析の平均応力を比較すると、同様の分布傾向を示すことが分かる。数値的な差は多少あるものの、ほぼ同等の値を示しており、平面

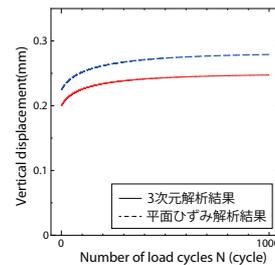


図11 まくらぎ位置での鉛直変位の比較

ひずみ解析によって十分再現できるといえる。これは、まくらぎの剛性がバラストの剛性より高いため、鉛直荷重作用時にまくらぎの剛体的な移動によるバラストの圧縮変形が卓越するためと考えられる。以上の結果から、軌道縦断面内のバラストの力学挙動の評価には平面ひずみ解析が適用可能である。

(4) 軌道横断方向の荷重作用位置における鉛直変位

最後に、3次元解析および軌道横断方向の平面ひずみ近似に基づく2次元解析のでられた荷重作用位置における鉛直変位を図11に示す。図11より、平面ひずみ解析では3次元解析よりも変位が大きめに生じているが、図7-図10に示すように応力・塑性ひずみが大きめの値で評価されていることに矛盾がなく、安全側に評価されることが分かる。

参考文献

- 1) 石川達也, 名村 明: 実物大試験による道床バラスト部繰返し変形特性の検討. 土木学会論文集, No.512/IV-27, pp.47-59, 1995.
- 2) Suiker, A. S.J. and de Borst, Rene.: A numerical model for the cyclic deterioration of railway tracks, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.57, pp.441-470, 2003.
- 3) 佐藤江美, 紅露一寛, 阿部和久: Cyclic densification モデルによるバラスト道床の繰返し鉛直荷重試験の3次元有限要素解析, J-RAIL2012 講演論文集, pp.247-250, 2012.