

Cyclic densification モデルを用いた有限要素法による 有道床バラスト軌道の3次元繰返し沈下解析

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

軌道に多用されるバラスト道床は、多数回の列車の繰返し通過の結果、道床に残留変形が発生・進展する。特に、道床の沈下量は軌道管理上主たる監視項目となっており、この定量予測は軌道保守において重要な課題となっている。

これまで、道床沈下量を定量評価するための繰返し変形挙動のモデル化等、国内外で研究が進められてきた¹⁾²⁾が、既往のモデルでは繰返し载荷履歴をもれなく追跡する必要があり、膨大な計算量を要する欠点がある。そこで本研究では、解析時の計算量の軽減を図るために Suiker らが提案した cyclic densification モデル³⁾を用い、有道床バラスト軌道の3次元の繰返し変形解析を試みる。

2. Cyclic densification モデル

本研究で採用する cyclic densification モデル³⁾では、従来型が履歴を追跡して塑性変形を評価していたのに対し、一定の载荷・除荷サイクル単位で塑性変形を評価する。繰返し载荷過程において、応力は繰返し回数 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。

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

ただし、 D_{ijkl} は弾性定数テンソルであり、 ε_{kl} はひずみ、 ε_{kl}^p は塑性ひずみを表す。

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

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_{ij}^p}{dN} = & \frac{d\kappa^p}{dN} \frac{\partial g^f(q, p, \kappa_0^p)}{\partial \sigma_{ij}} \\ & + \frac{d\varepsilon_{vol,c}^p}{dN} \frac{\partial g^c(p, \varepsilon_{vol,c,0}^p)}{\partial \sigma_{ij}} + \frac{d\varepsilon_{vol,t}^p}{dN} \frac{\partial g^t(p)}{\partial \sigma_{ij}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $d\kappa^p/dN$ は摩擦滑り、 $d\varepsilon_{vol,c}^p/dN$ は体積圧縮、 $d\varepsilon_{vol,t}^p/dN$ は引張破壊に関する塑性乗数速度である。ただし、塑性ポテンシャル g^f, g^c, g^t は次式で与えるものとする。

$$\begin{aligned} g^f &= g^f(q, p, \kappa_0^p) \\ g^c &= g^c(p, \varepsilon_{vol,c,0}^p), g^t = g^t(p) \end{aligned} \quad (3)$$

なお、 p は静水圧応力、 q は相当応力 ($q = \sqrt{(3/2)s_{ij}s_{ij}}$)、 $s_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij}$ は偏差応力である。摩擦滑りと体積圧縮に関する塑性乗数の発現速度は、Perzyna の超過応力モデル同

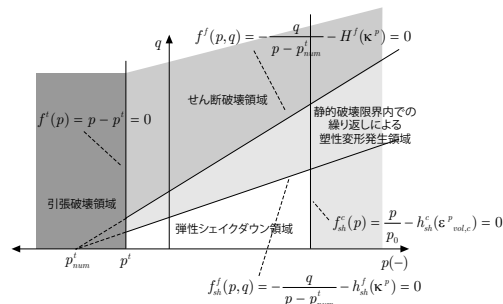


図1 繰返し载荷過程の破壊面形状

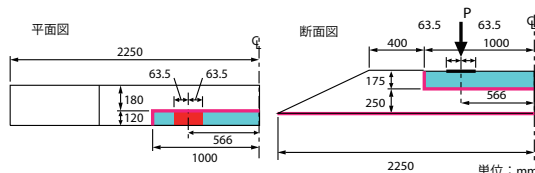


図2 解析領域および境界条件

様、超過応力量に基づき次式で与える。なお、繰返し载荷過程における構成モデルの破壊基準面は図1に示す。

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon^p}{dN} &= \alpha^f \left\langle -\frac{q}{p - p_{num}} - h_{sh}^f(\kappa^p) \right\rangle^{\gamma^f} \\ \frac{d\varepsilon_{vol,c}^p}{dN} &= \alpha^c \left\langle \frac{p}{p_0} - h_{sh}^c(\varepsilon_{vol,c}^p) \right\rangle^{\gamma^c} \end{aligned} \quad (4)$$

また、cyclic densification モデル³⁾は繰返し载荷2回目以降の解析で用いるものとし、繰返し载荷1回目における最大荷重作用時までは単調载荷解析で再現する。単調载荷過程における降伏曲面は、Drucker-Prager cone と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平面から構成されるものとする。

3. モデルの妥当性の検討

(1) 解析条件

本研究の解析では、文献¹⁾の図2に示すバラスト、まくらぎの2層からなる解析領域を有限要素モデルで表現し、レールの位置に鉛直方向の繰返し荷重を作用させることで沈下量を求める。今回は、まくらぎ1本あたりの最大鉛直荷重を $P=20\text{kN}$ または $25\text{kN}, 30\text{kN}$ で一定とし、载荷・除荷を繰返した。境界条件は、軌道縦断面および横断面に対称条件を課し、バラスト道床底面は変位を完全拘束した。材料パラメータ等、その他解析に必要な数値は、表1に示す値を与えた。

Key Words: 有道床軌道, 有限要素法, 道床沈下

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

表 1 材料パラメータ等の設定値

バラスト			
K_{ref}	110 MPa	η^f	120
n^e	0.35	η^c	200
p_{ref}	-100 kPa	ζ^f	80
p_{num}^i	10 kPa	ζ^c	240
ν	0.09	p_0	-20 kPa
α^f	1.0×10^{-5}	$p_0^{(init)}$	-25 kPa
α^c	0.2×10^{-5}	H_0	1.0
γ^f	2.5	H_m	2.08
γ^c	2.0	$d_0 (= d_m)$	-0.50
ρ	$1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	$d_0^{(init)}$	0.20
h_0	0.70	$d_m^{(init)}$	1.10
h_m	2.08		
まくらぎ			
E	78 GPa	ν	0.17
ρ	$2.677 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$		

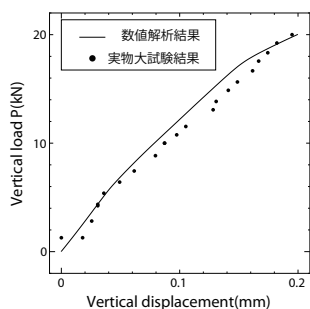


図 3 単調載荷過程における鉛直荷重-変位関係 (P=20kN)

(2) 単調載荷解析(繰返し第 1cycle)の結果

まず、図 3 に実物大試験結果(文献¹⁾参照)および数値解析結果の最大鉛直荷重 $P=20\text{kN}$ の場合の鉛直荷重と鉛直変位の関係を示す。図 3 より、進展速度に若干の誤差は生じているが、ほぼ同等の鉛直荷重-変位関係が得られた。次に、図 4 にバラスト内部の塑性体積ひずみ、塑性相当ひずみ ($\sqrt{\varepsilon_{ij}^{p*} \varepsilon_{ij}^{p*}}$) の発現傾向を示す。図 4(a) より、塑性体積ひずみはバラストと接するまくらぎの縁部から発生し、まくらぎ側面とバラストの境界面に進展することが分かる。その後、まくらぎ下部のバラスト領域に進展し、まくらぎ下部ではバラスト間の空隙が圧縮されるように圧縮側の塑性体積ひずみが生じている。また、図 4(b) より、塑性相当ひずみも塑性体積ひずみと同様に、バラストと接するまくらぎの縁部から発生することが分かる。鉛直荷重を加えていくと、まくらぎ下部では道床の下面方向に、まくらぎ側面では道床の上面方向に徐々に進展し、特にまくらぎ側面では塑性相当ひずみが卓越することが分かった。図 4 より、まくらぎ側面で引張側の塑性ひずみが顕著に発生していることから破壊が発生・進展することが確認できる。

(3) 繰返し載荷解析の結果

図 5 に 1001cycle までの繰返し載荷回数と鉛直変位の関係を示す。図 5 より、繰返し載荷過程では単調載荷過程

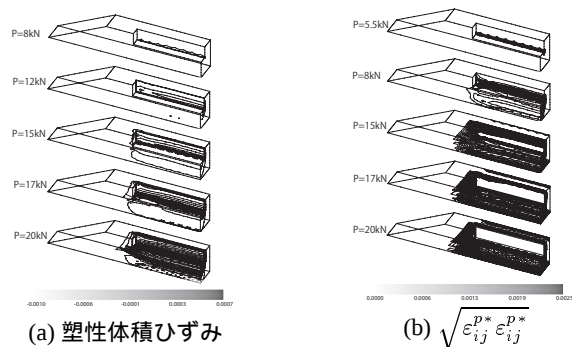


図 4 単調載荷過程の塑性ひずみ分布 (P=20kN)

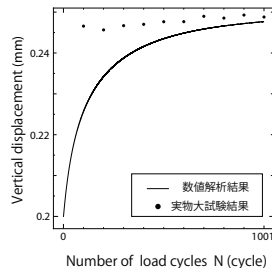


図 5 繰返し載荷過程における鉛直荷重-繰返し載荷回数関係

表 2 100cycle でのピーク荷重時の鉛直変位量

鉛直荷重 P	simulation	example
20 kN	0.225 mm	0.246 mm
25 kN	0.327 mm	0.401 mm
30 kN	0.467 mm	0.489 mm

に比べ 1cycle での変位量が非常に小さくなっていることが分かる。また、繰返し載荷回数が増加するにつれて 1cycle あたりの変位量は徐々に小さくなり、バラストの変形が塑性的なものから弾性的な変形に変化していくことが分かる。載荷初期の鉛直変位に誤差は生じるものの、繰返し載荷回数を増やすにつれて同等の鉛直変位量に漸近していくという結果が得られた。また、表 (3) は、実物大試験結果と数値解析結果における $P=20\text{kN}$, $P=25\text{kN}$, $P=30\text{kN}$ での 100cycle でのピーク荷重時の鉛直変位量を示したものである。実物大試験結果と数値解析結果を比較すると、 $P=20\text{kN}$, $P=30\text{kN}$ における鉛直変位量に大差はなく、概ね同等の値が得られた。

今後は、バラスト内部の塑性ひずみの発生・進展挙動の解析精度を向上させ、バラスト内部の挙動の評価に取り組む。

謝辞 本研究を実施するにあたり、平成 21-23 年度文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B), 課題番号 21760398)の助成を得た。また、北海道大学・石川達也准教授には、実験データをご提供いただいた。よって、ここに記して謝意を表す。

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/ -27, pp.47-59, 1995.
- 2) 紅露一寛, 阿部和久: 有道床バラスト軌道を対象とした繰返し鉛直・水平載荷試験の弾塑性有限要素解析, 第 17 回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL) 講演論文集, pp.565-568, 2010.
- 3) 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.