

有道床バラスト軌道を対象とした 繰り返し鉛直・水平載荷試験の弾塑性有限要素解析

○ [土] 紅露一寛 (新潟大), [土] 阿部和久 (新潟大)

Finite element elastoplastic analysis on the cyclic vertical- and horizontal loading tests of railway ballasted track

Kazuhiro KORO (Niigata Univ.), Kazuhisa ABE (Niigata Univ.)

The 3-D finite element analysis for cyclic loading tests of a full-scale railway ballasted track is implemented using the subloading surface elastoplastic model. In the present model, the ballast layer is modeled as the elastoplastic body based on the concept of the subloading surface with the rotational hardening; the sleeper is considered as the isotropic linear elastic body. The simulated vertical and horizontal displacements have the evolution tendency to the full-scale tests. For the vertical loading test, the simulated permanent deformation is observed in the ballast layer beneath the sleeper. The numerical results on the horizontal loading test show that the loosed zone of the ballast material extends from the sleeper end to the bottom of the ballast layer by the horizontal cyclic loading.

キーワード：有道床軌道，繰り返し鉛直・水平載荷，道床沈下，下負荷面モデル，有限要素法

Key words: railway ballasted track, cyclic loading, ballast settlement, subloading surface model, FEM

1. はじめに

わが国の鉄道において広く用いられているバラスト道床は、輪重衝撃を吸収し、騒音・振動の低減効果に優れている。しかし、列車が繰り返し通過することでバラスト粒子の移動・回転が徐々に累積し、変状となって現れる。特に、バラスト上面で観測される鉛直方向の残留変位は道床沈下量と呼ばれている。

今日、軌道管理における道床沈下量の予測は、作用輪重に動的効果を考慮するために導入された割増係数を乗じ、道床沈下量をこの設計荷重と列車の通過回数の関数として与える経験則を用いて行なうのが一般的である¹⁾。経験則は簡易に道床沈下量を与えるが、道床内部での残留変形の発生・進展メカニズムの解明に資するものとはいえない。また、沈下対策を講じるためには道床内部の運動状態の把握が必要不可欠であるが、実験によるバラスト粒子の運動の観測は現状ではまだ研究途上にあり²⁾、数値シミュレーションの活用も試みられている。

これまで、バラスト道床の残留変形の発生・進展シミュレーションは、個別要素法 (DEM)³⁾や不連続変形法 (DDA)⁴⁾といった、粒子集合体としての力学特性を直接モデル化した方法に基づいて行なわれたものが多数を占めている。これらの方法は粒状体の性質を容易に表現し、動的作用が卓越する短時間の粒子の運動状態の把握には適しているが、長時間・多数回にわたり荷重が繰り返し作用することで粒子の不可逆的な移動・回転が生じるような現象のシミュレーションでは、計算量の大きさが適用上のボトルネックとなることも予想される。

そのため著者らは、バラスト道床への荷重の繰り返し作用に起因する残留変形の蓄積現象を対象とする、弾塑性連続体モデルに基づく有限要素解析法の開発に取り組んできた。特に、回転硬化を考慮した下負荷面モデル⁵⁾を

用いて、有道床軌道の繰り返し鉛直載荷試験⁶⁾の有限要素解析を実施してきたが⁷⁾、まくらぎ下面位置において一様分布の鉛直変位を与えるように境界条件を設定したこともあり、得られた変位や応力、塑性ひずみの分布にやや不自然な点が認められるところもあった。そこで以下では、まくらぎを線形弾性体、バラストを回転硬化を考慮した下負荷面モデルでそれぞれ構成則を与えた上で、有道床バラスト軌道の実物大試験⁶⁾を対象とした弾塑性有限要素解析を試み、解析によって得られた荷重・変位関係、残留変位分布、残留ひずみ分布、応力分布について論じる。

2. 実物大軌道の繰り返し鉛直・水平載荷試験の概要

本研究では、荷重の繰り返し作用によって実際のバラスト道床に生じる残留変位の発現メカニズムを検討する目的で、石川らが実施した実物大有道床軌道の繰り返し載荷試験⁶⁾を対象に、3次元弾塑性有限要素解析を行なう。

比較対象とする実物大有道床軌道の繰り返し載荷試験では、Fig.1に示す実物大試験軌道において、鉛直方向および水平方向に繰り返し荷重を作用させている。鉛直載荷試験では、2本のレール各々の最大荷重が5kN刻みで20kNまで漸増させる条件下で繰り返し鉛直荷重を作用させる。また、水平載荷試験では、まず片レールあたり $P = 30(\text{kN})$ の鉛直荷重を加えたのち、鉛直荷重を載荷したまま水平荷重 Q を繰り返し作用させている。最大水平荷重 Q_{max} は、載荷・除荷1サイクルあたり2.5(kN)ずつ $Q_{max} = 20(\text{kN})$ となるまで増加させている。なお、実験の詳細については、文献⁶⁾を参照されたい。

3. 弾塑性有限要素解析モデル

本研究では、バラスト道床を弾塑性連続体としてモデル化し、弾塑性挙動は回転硬化を考慮した下負荷面モデ

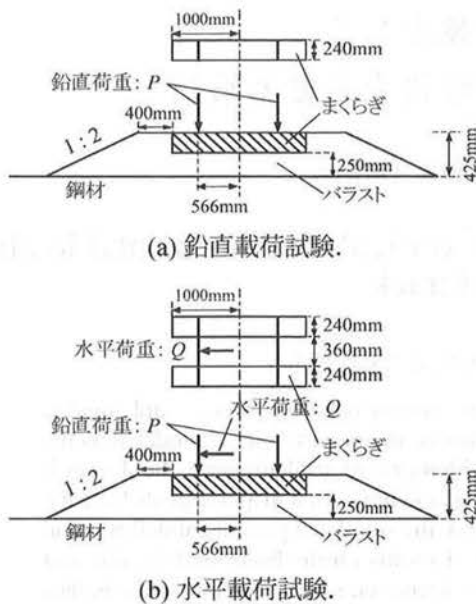


Fig. 1 実物大試験に用いた試験軌道構造.

ル⁵⁾を用いて表現する。変形は微小変形を仮定する。弾塑性モデルは、論文⁵⁾で提案されたモデルにおいて、降伏面形状を規定する材料関数を論文⁸⁾の関数に修正したものを用いる。ひずみ硬化については、回転硬化モデルと等方硬化モデルとを併用している。応力や塑性ひずみと同様に積分が必要な変数は、等方硬化変数、回転硬化変数および相似中心応力の3種類である。一方、まくらぎは等方均質線形弾性体としてモデル化する。有限要素定式化は変位法を採用し、準静的条件を仮定して仮想仕事式を離散化して解く。応力積分は前進 Euler 法を採用している。なお、弾塑性有限要素解析の定式化の詳細については、文献⁹⁾を参照されたい。

解析においては、まくらぎ間1区間分の領域を Fig.2 に示すように解析領域として設定し、Fig.3 のような有限要素メッシュを用いた。境界条件は、軌道横断面には対称条件を課し、バラスト道床底面は変位完全拘束面とした。バラストとまくらぎとの境界面は、接触および摩擦の影響を考慮する必要があるが、本研究では完全付着条件を課すこととした。バラストおよびまくらぎの材料パラメータは、Table 1 に示す値を用いた。有限要素解析の初期条件は無変形・無応力・無重力状態に定め、繰り返し载荷解析に先だって自重沈降解析を行なった上で、まくらぎにおけるレール締結位置に所定の荷重を載荷する荷重制御条件下で繰り返し载荷解析を行なった。

4. 繰り返し鉛直载荷試験の有限要素解析

まず、繰り返し鉛直载荷試験の有限要素解析について検討する。まくらぎ位置での荷重・変位関係を Fig.4 に示す。鉛直载荷の場合、まくらぎ下面位置で一様な強制変位を繰り返し作用させていた文献⁷⁾の解析結果と比べ、先行鉛直荷重超過時の残留変形の発現が小さい上、超過後の剛性低下もあまり見られず、解析結果は実測結果により近い挙動を示している。除荷時については、除荷開始直後は荷重を解放し始めてもしばらくは下向き鉛直変位が増加

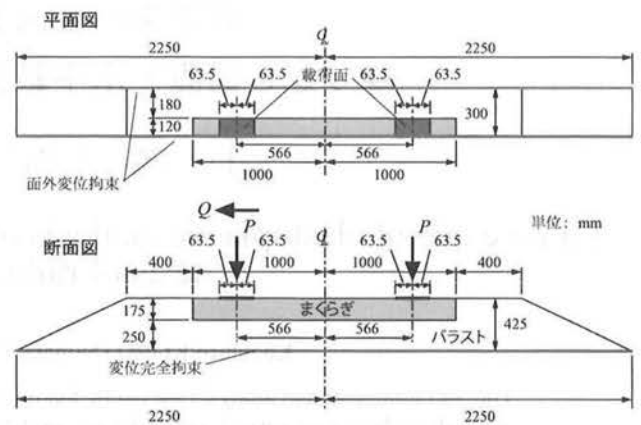


Fig. 2 解析モデルおよび境界条件.

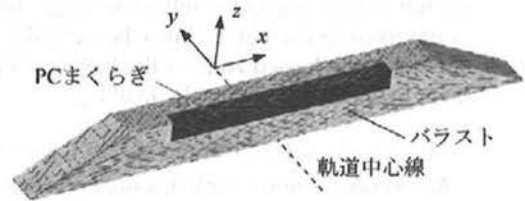


Fig. 3 解析メッシュ.

Table 1 材料パラメータ等の設定値.

バラスト	
質量密度	$1.74 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$
降伏面形状	$\phi = 24^\circ$
等方硬化	$\rho = 0.1, \mu = 3.8, \phi_d = 20^\circ$
回転硬化	$b_r = 80, \phi_b = 32^\circ$
R の発展	$u_1 = 1.0, u_2 = 4.3$
相似中心の移動	$c_1 = 3.5, c_2 = 1.2, c_3 = 3.2$
弾性定数	$\gamma = 3.5 \times 10^{-4}, \nu = 0.15$ $p_{num} = 0.01 (\text{kPa})$
まくらぎ	
弾性	$E = 78 (\text{GPa}), \nu = 0.17,$
質量密度	$2.677 \times 10^3 (\text{kg/m}^3)$

し続け、鉛直荷重が1割程度低減した後は鉛直変位の現象が始まる。しばらくは荷重変位関係は概ね線形に推移し、除荷完了直前の拘束応力が小さい段階で残留変位の発現量が大きくなっている。本モデルによる解析結果は、除荷直後の変位のわずかな増加こそ表現できていないが、それ以外については概ね再現できている。

Fig.5 は、4 サイクル終了時の残留変位の軌道横断面 $y = 0$ 内分布を図示したものである。鉛直変位については、まくらぎ下の領域に集中して発生しており、まくらぎが道床沈下によりそのまま下方へ移動していることがわかる。一方、水平変位はまくらぎ端近くに集中している。まくらぎへの鉛直载荷によりまくらぎ端での断面回転の影響を受け、まくらぎ下面側は外側へ、上面側は軌道中心線側へそれぞれ水平残留変位が生じている。

次に、鉛直载荷試験の繰り返し最終サイクル（鉛直载荷は片振幅 $P = 20 \text{ kN}$ の4回目）における塑性体積ひずみ ϵ_{mm}^p 、塑性偏差ひずみの2次不変量 $\sqrt{\epsilon_{ij}^{p*} \epsilon_{ij}^{p*}}$ の推移を Fig.6 に示す。本モデルではまくらぎの曲げを考慮できるためか、塑性ひずみの体積分、せん断成分とともにまく

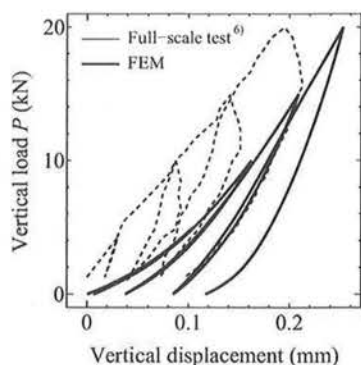


Fig. 4 作用荷重とまくらぎ変位の関係 (鉛直載荷)。

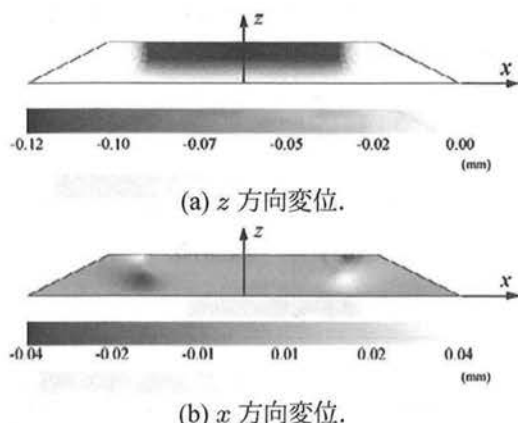


Fig. 5 4 サイクル終了時の残留変位分布 (鉛直載荷)。

らぎ直下の直方体状の領域に専ら発現しており、せん断ひずみが多い箇所では正の塑性体積ひずみが発現している。なお、塑性ひずみの発現は先行荷重超過時および完全除荷の直前で顕著であることがわかる。

Fig.7 は、繰り返し最終サイクル (4 回目)・鉛直荷重最大時における p および $\sqrt{\sigma_{ij}^* \sigma_{ij}^*}$ の軌道横断面 $y=0$ 内分布を示したものである。なお、各図は実際に発生している値の範囲よりも狭い範囲の値のみを表示したものであり、この範囲を超えた値については黒または白で図示されている。弾性体でモデル化しその内部に曲げ応力が発生するまくらぎ部分を除くと、バラスト内部で p の値が大きいのは、まくらぎ直下の領域に限定されている。 $\sqrt{\sigma_{ij}^* \sigma_{ij}^*}$ についても、 p と同様、まくらぎ直下のバラスト領域での値は他と比べて大きくなっている。そのため、上載荷重に対するバラストの支持力は、まくらぎ真下の領域でそのほとんどが負担されていることが分かる。

5. 繰り返し水平載荷試験の有限要素解析

次に、繰り返し水平載荷試験を対象とした有限要素解析結果について検討する。まず、荷重変位関係を Fig.8 に示す。水平載荷の場合、載荷過程では先行荷重超過以降で残留変位の発現量が増加し始めており、試験結果と解析結果とで定性的に矛盾のない結果が得られている。また、除荷過程でも、試験結果・解析結果ともに荷重変位関係は概ね線形に推移している。水平載荷試験では、片レールあたり 30kN の鉛直荷重を作用させたまま、水平荷重を変動させている。そのため、鉛直載荷試験の場合のような、

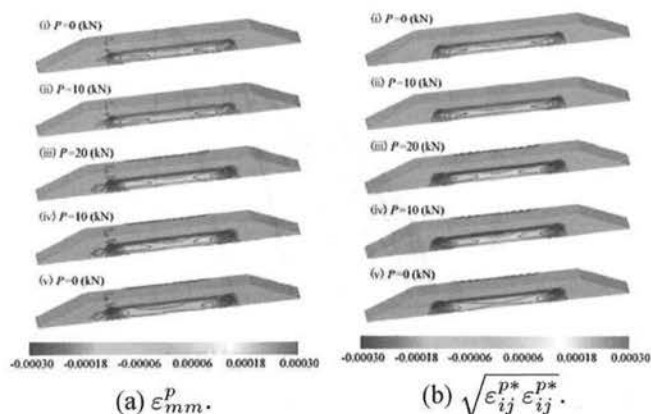


Fig. 6 繰り返し最終サイクルにおける塑性ひずみの発現傾向 (鉛直載荷)。

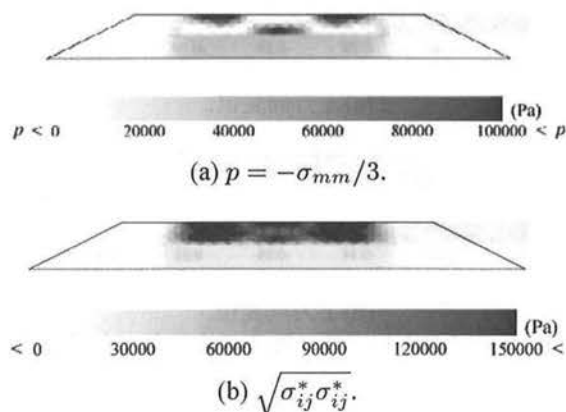


Fig. 7 最終サイクル (4 回目) 鉛直荷重最大時の応力不変量の分布 (鉛直載荷)。

載荷荷重が完全に解放される直前での残留変位の進展はみられない。しかし、実験と解析とで剛性が大きく異なっており、残留変位も過大に評価されている。この点については今後改善が必要である。

水平載荷試験の繰り返し各サイクル終了時における塑性体積ひずみ ϵ_{mm}^p 、塑性偏差ひずみの 2 次不変量 $\sqrt{\epsilon_{ij}^{p*} \epsilon_{ij}^{p*}}$ の推移を Fig.10 に示す。塑性ひずみの体積成分、せん断成分の発現挙動から、水平方向の繰り返し載荷によって、図中右側のまくらぎ端面でまくらぎがバラストから剥離し、剥離面がバラストの下方に進展していくことがわかる。また、水平載荷試験では鉛直荷重も両レールに作用し、結果としてまくらぎの水平方向の滑動に対する上方からの拘束力として働くため、まくらぎが正の曲げを受ける箇所ではバラスト材の摩擦抵抗により水平反力の一部を負担していると予想される。さらに、まくらぎ左側端面直下のバラスト最下部では、圧縮の塑性体積ひずみが発現している箇所が認められる。

最後に、最終サイクル (8 回目) における水平荷重最大時の p および $\sqrt{\sigma_{ij}^* \sigma_{ij}^*}$ の軌道横断面 $y=0$ 内分布を Fig.11 に示す。なお、Fig.7 同様、各図は実際に発生している値の範囲よりも狭い範囲の値のみを表示したものであり、この範囲を超えた値については黒または白で図示されている。鉛直載荷試験の解析同様、作用荷重に対するバラストの支持力は、まくらぎ真下の領域でそのほと

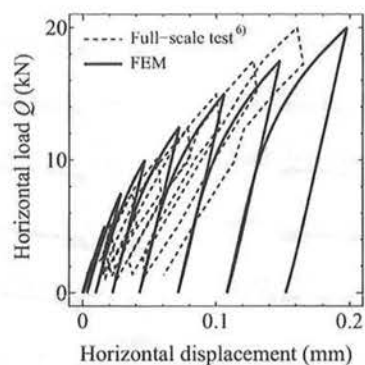


Fig. 8 作用荷重とまくらぎ変位の関係 (水平载荷)。

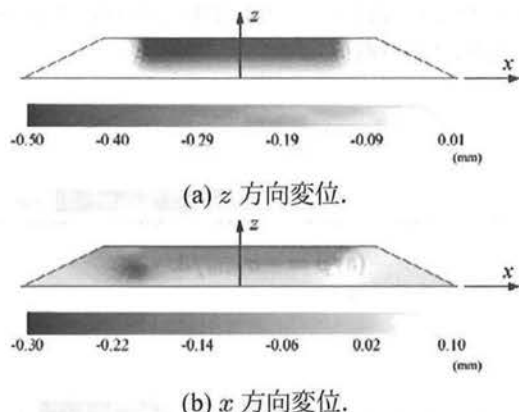


Fig. 9 8 サイクル終了時の残留変位分布 (水平载荷)。

んどが負担されている。

6. おわりに

本研究では、バラスト道床を回転硬化を考慮した下負荷面モデルに基づく弾塑性連続体でモデル化し、バラスト道床軌道の繰返し鉛直・水平载荷試験の有限要素解析を試みた。今回はバラスト部に加え、まくらぎを線形弾性体としてモデル化して解析を行ない、実験結果との比較を通して解析結果の妥当性について検討した。解析結果はバラスト道床の変形挙動について、定性的に再現できていると思われる。なお、本研究ではまくらぎとバラストとを完全付着を仮定しているため、今後接触・摩擦モデルの導入が必要と思われる。また、解析者が試行的に行なっているパラメータフィッティングが不十分であることは否めないため、今後遺伝的アルゴリズム (GA) を用いるなど、改善に取り組みたい。

参考文献

- 1) Dahlberg, T.: Some railroad settlement models – a critical review. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol.215, Part F, pp.289-300, 2001.
- 2) 相川 明: 鉄道バラストの三次元挙動測定装置の開発 – 溶接継目衝撃荷重の現場測定と DDA パラメータ設定法の提案 –。土木学会応用力学論文集, Vol.11, pp.487-496, 2008.
- 3) Saussine, G., Cholet, C., Gautier, P.E., Dubois, F., Bohatier, C., Moreau, J.J.: Modelling ballast behaviour under dynamic loading. Part 1: A 2D polygonal discrete element method approach. *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, Vol.195, pp.2841-2859, 2006.
- 4) 石川達也, 大西有三, 堀池高広: 不連続変形法 (DDA)

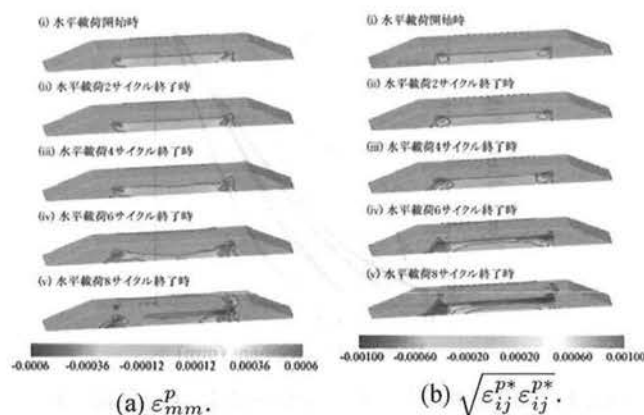


Fig. 10 各サイクル終了時における塑性ひずみの発現傾向 (水平载荷)。

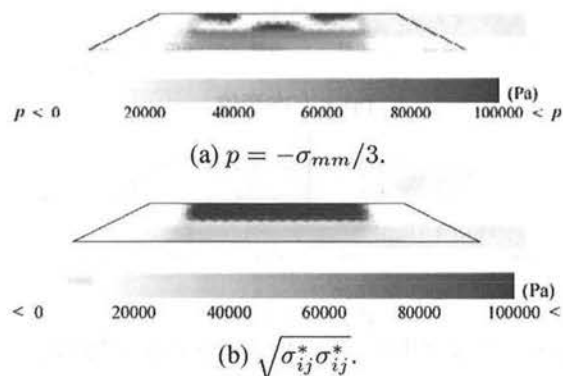


Fig. 11 最終サイクル (8 回目) 水平荷重最大時の応力不変量の分布 (水平载荷)。

による道床バラスト部繰返し塑性変形機構の検討。土木学会論文集, No.645/III-50, pp.15-28, 2000.

- 5) Hashiguchi, K., Chen, Z.-P.: Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.22, pp.197-227, 1998.
- 6) 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.
- 7) Koro, K., Fukutsu, Y., Abe, K.: 3-D FE simulation of cyclic loading tests of railway ballasted track using subloading surface elastoplastic model. *Proc. of STECH'09*, CD-ROM, 2009.
- 8) Hashiguchi, K.: A proposal for the simplest convex-conical surface for soils. *Soils & Foundations*, Vol.42, No.3, pp.107-113, 2002.
- 9) 紅露一寛, 福津佑太, 東海林裕之, 阿部和久: 下負荷面モデルを用いた弾塑性有限要素法による有道床バラスト軌道の繰返し変形解析, 計算工学講演会論文集, Vol.15, pp.961-964, 2010.