

バラスト軌道の道床横抵抗力に関する FEM 解析

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○白江雄介 関根悦夫 中村貴久

1. はじめに

地震時および常時の座屈安定性に対し、重要な役割をしているのが道床横抵抗力である。道床横抵抗力の算定は営業線における横引き試験などによる実測値を用いるのを原則とし、実測値が得られない場合には、無載荷時のまくらぎ 1 本当たりの道床横抵抗力は PC まくらぎと道床バラスト間の場合、式(1)で算定される¹⁾。式(1)はまくらぎおよび道床の重量やまくらぎ形状により求められるが、道床バラストの強度や変形特性は反映されていないのが現状である。そこで本稿では、道床横抵抗力の算定に道床バラストの強度・変形特性を考慮するため、道床バラストの大型三軸試験を行い、道床横抵抗力の実物大模型試験²⁾を対象とした静的 FEM 弾性解析を行った。

$$F=0.75W+29 \gamma G_e+1.8 \gamma G_s \dots (1)$$

F:まくらぎ 1 本あたりの道床横抵抗力

W:まくらぎ上重量, γ :道床単位容積重量

G_e :まくらぎ端面の上辺周りの断面一次モーメント, G_s :まくらぎ側面の上辺周りの断面一次モーメント

2. 道床バラストの大型三軸試験

道床バラストの強度・変形特性を把握するために、大型三軸試験を行った。大型三軸試験では、JGS 0524 土の圧密排水三軸圧縮試験方法に準拠し、拘束圧 20kPa まで負圧により等方圧縮させた後、軸ひずみ速度 0.01%/min にて排気条件で単調載荷を行った。軸ひずみは外部変位計, LDT, ギャップセンサーを用いて計測を行った。試験に用いた大型三軸試験装置の概要を図 1 に示す。試験に用いた道床バラストは甲州産で、粒度分布を図 2 に示す。試験供試体は直径 30cm, 高さ 60cm の円形モールドに気乾燥試料を 5 層に分けて入れ、振動バイブレーターを用いて、各層ごとに同じエネルギーで締め固め、密度は 1.62g/cm³にした。試験結果として軸差応力と軸ひずみ関係を図 3 に示す。ここで示した軸ひずみは LDT を用いて供試体側面で測定した値である。軸差応力は軸ひずみ 0.004 程度まで線形的に増加し、その後なだらかに増加する。軸差応力の最大値は 200kPa 程度であった。

3. FEM 解析

3.1 解析モデル

FEM 解析では NASTRAN を用い、解析モデルは図 4 に示すように、実物大模型試験と同様、道床バラスト上に一本のまくらぎを配置した 3 次元モデルとした。解析モデルの領域は、線路横断方向を 6.2m とし、長手方向を 1.5m とした。また、路盤厚 0.35m, 道床厚 0.3m, 道床肩幅 0.5m, 道床肩の勾配を 1:1.8 とした。

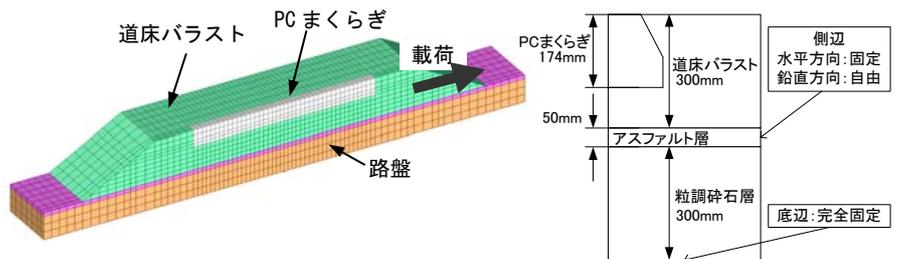


図 4 解析モデル断面図および解析概要

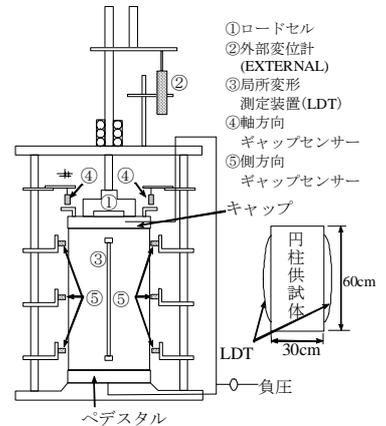


図 1 大型三軸試験装置の概要

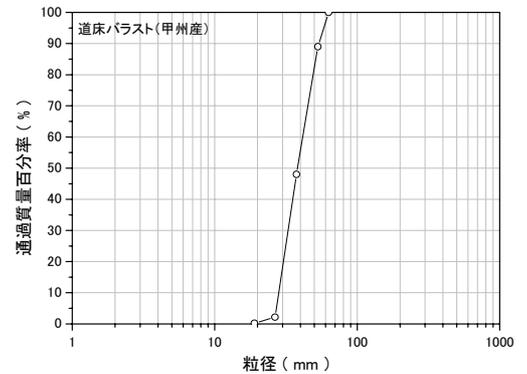


図 2 試験に用いた道床バラストの粒度分布

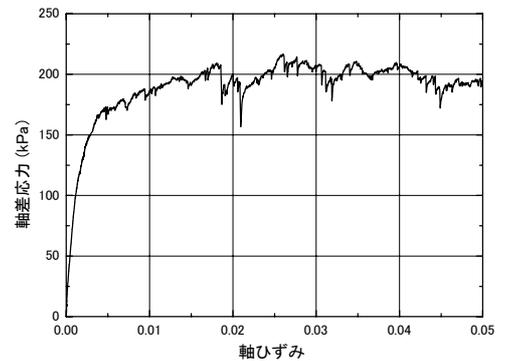


図 3 軸差応力ー軸ひずみ関係

キーワード: バラスト軌道, 道床横抵抗力, FEM 解析, 拘束圧
連絡先: (財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤 (042)573-7276

3.2 解析パラメータ

解析に用いた物性値を表1に示す。道床バラストのヤング係数※1は、図3に示す応力とひずみ関係より算出し、ひずみレベルに応じて変化させることとし、実バラスト道床は礫材料であるため、引張に対する応力はほとんど作用しないことから、圧縮方向は三軸試験結果に従い、引張方向は圧縮方向の1/100の値を用いることとした。ここで、実軌道における道床バラストの拘束圧は大型三軸試験における拘束圧よりも小さく、また、道床バラストのような粒状体は拘束圧の影響を受けることから、大型三軸試験の結果に対して拘束圧の補正を行った。補正には拘束圧と等価ヤング係数の関係を定式化した³⁾式(2)を用いた。間隙比を一定とすると、道床バラストのヤング係数は初期ヤング係数 E_0 を用いて、拘束圧が最小と考えられる道床肩部で $0.25E_0$ 、最大と考えられるPCまくらぎ下で $0.6E_0$ となる。本解析では、大型三軸試験によるバラスト剛性をひずみレベルに応じて0.6倍から0.25倍まで低減させた。

$$E_h = (E_{h0}) \cdot (\sigma_h / \sigma_0)^{nv} \cdot f(e) / f(e_0) \quad f(e) = (2.17 - e)^2 / (1 + e) \cdot \dots \cdot (2)$$

(E_{h0}) : 初期ヤング係数, σ_h : 拘束圧, $nv=0.5$,

$f(e)$: 密度補正係数, e : 間隙比, e_0 : 初期間隙比

また、まくらぎと道床バラストとの境界面では摩擦力が発生するため、本解析では、まくらぎと道床バラストとの境界面について、せん断ばねにより摩擦抵抗を考慮することとした。図5に示す実物大試験における底面みの道床横抵抗試験²⁾より、せん断ばねを設定した。

3.3 解析結果

PCまくらぎ水平変位1.5mm, 3.0mm時の水平方向ひずみ分布を図6, 7に示す。水平方向の圧縮ひずみはPCまくらぎ端部に集中しており、最大値で0.01程度(水平変位1.5mm)から0.03程度(水平変位3.0mm)まで増加している。また、ひずみ分布範囲はPCまくらぎ端部を中心に荷重方向だけでなく、荷重直角方向および下方向にも広がっていることがわかる。水平変位について、試験結果と合わせて図8に示す。試験結果として用いたのは標準断面の道床横抵抗力試験²⁾である。解析結果と試験結果は弾性域であると考えられる荷重初期から塑性域と考えられる変位3mm程度まで、概ね一致しており、解析手法の妥当性が確認できる。

4. おわりに

本稿では道床横抵抗力について、まくらぎと道床バラスト間の摩擦と道床バラストの拘束圧の影響を考慮することにより、静的FEM弾性解析を用いて、道床横抵抗力と水平変位の関係を再現する手法を提案した。今後、これまで実施されてきた座屈防止対策試験との比較を行うことでFEM解析による道床横抵抗力推定の検討を進めたい。

- 1) 国土交通省鉄道局監修 土木関係技術基準調査研究会編 解説 鉄道に関する技術基準(土木編) 第二版, 社団法人 日本鉄道施設協会
- 2) 平尾博樹, 関根悦夫, 村本勝己: 有道床軌道における座屈防止対策の効果確認試験, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007.9
- 3) Jiang, G.L., Kohata Y., Tateyama M., and Tatsuoka F., (1999), "Small deformation characteristics at low pressure of dense gravel", Proc. Second Int. Symp. on Prefailure Deformation Characteristics of Geomaterials, IS Torino'99

表1 解析に用いた物性値

		ヤング係数 E(N/mm ²)	ポアソン比
PCまくらぎ		34300	0.16
道床バラスト		※1	0.30
路盤	アスファルト層	3000	0.30
	粒調碎石層	180	0.01

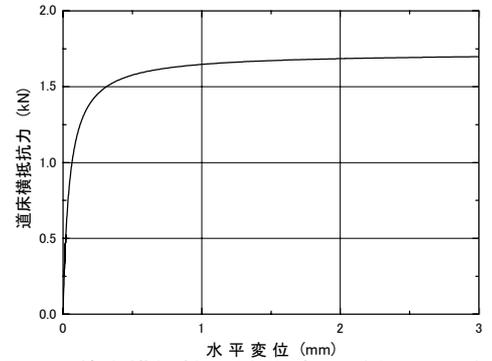


図5 道床横抵抗力試験結果(底面のみ)

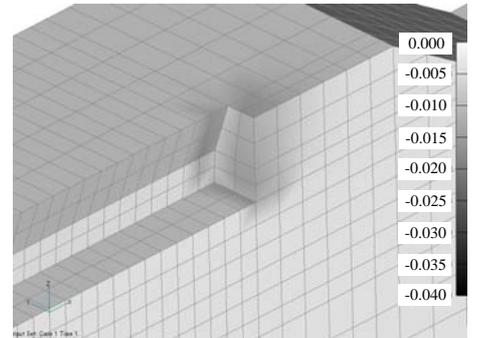


図6 水平方向ひずみ(変位1.5mm)

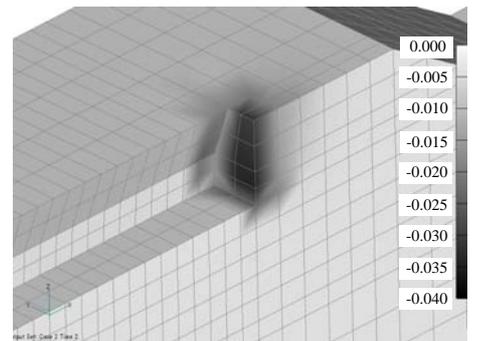


図7 水平方向ひずみ(変位3.0mm)

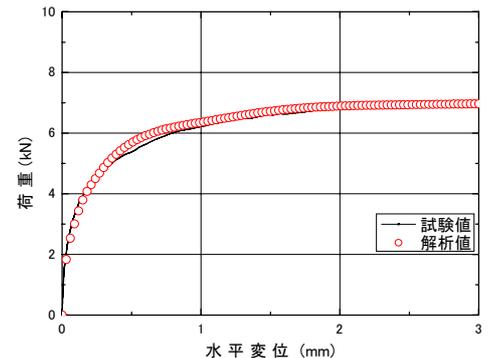


図8 試験結果と解析結果