小型バラスト軌道模型の道床横抵抗力のスケール効果に関する研究

（公財）鉄道総合技術研究所　正会員　○伊地知卓也　中村貴久　桃谷尚嗣

1. はじめに

地震時におけるバラスト軌道の耐震性能を評価するため，これまでにまくらぎ 1 本もしくは 3 本の小型模型および実物大模型を用いて，加振中および加振前後の道床横抵抗力を評価するために大型振動台試験を実施してきた[1)]．一方，大型振動台テーブルのサイズは 7 m×5 m であるため，これまで実績のある 1/5 スケールの小型模型[2)]では座屈形状を十分に再現できないという課題があった．そのため，模型スケールを更に縮小するための検討を行うこととした．そこで，スケール効果が道床横抵抗力に及ぼす影響を検討するため，1/9 スケールのバラスト軌道模型を用いた水平載荷試験を実施した．

2. 小型模型を用いた載荷試験方法

縮尺を 1/9 にした場合の道床横抵抗力を検討するため，道床密度を 2 種類に変化させた水平載荷試験を行った．模型の条件および水平載荷試験の状況を図 1 および図 2 に示す．小型模型は高架橋上のバラスト軌道を想定し，1 本のまくらぎとバラスト道床で構成した．模型まくらぎは 3H まくらぎ（長さ 267 mm，底面幅 37 mm，高さ 28 mm）を模擬したモルタル製とした．模型バラストは 7 号砕石を使用した．図 3 に模型バラストの粒度分布を示す．破線はバラストの基準粒度を 1/9 に縮尺したものであり，これと比較すると概ね基準範囲内であることがわかる．

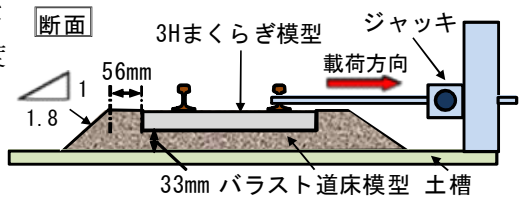

図 1　1/9 スケール小型模型の条件

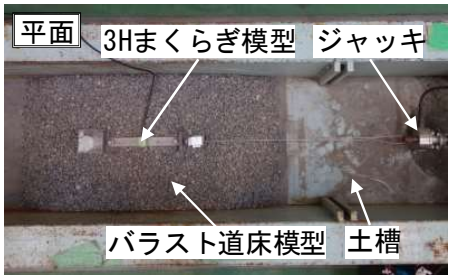

図 2　水平載荷試験の状況

小型模型の構築方法を以下に示す．

①試験土層の底面には，コンクリートと同等の表面摩擦とするため，接触面にサンドペーパー（120 番）を貼り付けた．

②道床厚 33 mm となるように試験土層にバラストをまき出し，所定の密度まで締め固めた．

③まくらぎ 1 本を道床上に設置し，つき棒でまくらぎ下のバラストをつき固めた．

④まくらぎ天端までバラストをまき出し，目標密度まで締め固めた．

道床密度は締固め試験結果（最大乾燥密度 ρ_{dmax}=1.58 t/m^3，最適含水比 w_{opt}=5.1 %）を考慮して，最大乾燥密度を目指して 1.57 t/m^3 となった場合，およびそれよりも密度を緩くした 1.50 t/m^3 の場合の 2 種類とした．

水平載荷試験はジャッキを用いて，まくらぎを水平横方向に載荷した．水平方向の載荷速度は 0.22 mm/min とした．この載荷速度は，過去に行った 1/1 スケールの模型（以下、1/1 模型）および 1/5 スケールの模型（以下，1/5 模型）による水平載荷試験[1)]の載荷速度と相似関係を満足している．

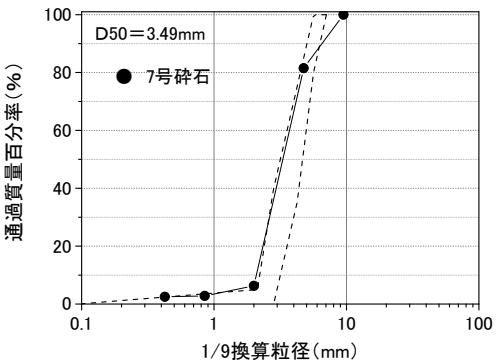

図 3　模型バラストの粒度分布

3. 試験結果

過去に行った 1/1 模型の道床密度 1.60 t/m^3 および 1/5 模型の道床密度 1.60 t/m^3 の水平載荷試験結果と 1/9 模型の道床密度 1.57 t/m^3 および 1.50 t/m^3 の水平載荷試験結果を比較したものを図 4 および図 5 に示す．なお，道床横抵抗力および変位は相似則を考慮して，1/9 スケールの場合に換算した．換算式は式（1）・（2）を用いた．また，ばね係数(N/mm)は道床横抵抗力を水平変位で除して求めた．

キーワード　:バラスト軌道、道床横抵抗力、スケール効果

連絡先　　:〒185-8540　東京都国分寺市光町 2-8-38　　Tel 042-573-7276　Fax 042-573-7413

図 4 の道床横抵抗力と水平変位の関係および図 5 のばね係数と水平変位の関係とも，1/1 模型および 1/5 模型の結果と比較して，1/9 模型の道床密度 1.50 t/m^3 の場合に概ね同様の関係性を示した．1/9 模型の道床密度 1.57 t/m^3 の場合は，他の条件と比較して道床横抵抗力が全体的に 10 N 程度大きく，ばね係数は水平変位 0.22 mm 時に 40 N/mm 程度大きくなった．

$$F_{1/9} = (N \times 1/9)^3 \times F_N \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{式（1）}$$

$$\delta_{1/9} = (N \times 1/9) \times \delta_N \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{式（2）}$$

$F_{1/9}$：1/9 スケール換算の道床横抵抗力、N：スケール

F_N：1/N スケールの道床横抵抗力

$\delta_{1/9}$：1/9 スケール換算の変位、δ_N：1/N スケールの変位

図 6 に 1/9 スケール換算の各模型の鉛直変位と水平変位の関係を示す．なお，鉛直変位はまくらぎ両端の平均値であり，プラス（正）が上昇方向となる．これより，1/9 模型は密度によらず，1/1 模型および 1/5 模型と概ね同様の関係性を示すことがわかった．

図 7 にまくらぎの変位を 1/9 スケールに換算した場合に，まくらぎ変位が 0.22 mm 時における道床横抵抗力と 1/N スケールの関係を示す．これは，まくらぎ変位 0.22 mm とは 1/1 模型にスケール換算すると 2mm となり，1/1 模型でまくらぎ 1 本の水平変位 2mm における道床横抵抗力が，軌きょう全体の最終道床横抵抗力と概ね等しいことによる [3]．1/1 模型および 1/5 模型の道床横抵抗力から累乗近似線を引くと $(X)^{-2.902} \fallingdotseq (X)^{-3} = (1/N)^3$ となり，式（1）と概ね同様であった．また、1/9 模型の変位 0.22 mm 時の道床横抵抗力は，道床密度 1.57t/m^3 よりも道床密度 1.50 t/m^3 の方が $(1/N)^3$ の相似則に近似することがわかった．

以上より 1/9 模型は，1/1 模型（道床密度 1.60 t/m^3）および 1/5 模型（道床密度 1.60 t/m^3）と比較して，道床密度が同程度となる密度 1.57 t/m^3 の場合，相似則を考慮すると道床横抵抗力が高くなった．一方，1/9 模型の道床密度を低下させた密度 1.50 t/m^3 の場合，1/1 模型および 1/5 模型と同様の道床横抵抗力－変位関係を示すことがわかった．

4. おわりに

1/9 スケールのバラスト軌道模型を用いた水平載荷試験を行い，過去に行った 1/1 スケールおよび 1/5 スケールと比較したところ，1/9 スケールの道床密度を低下させることで，相似則を満足することを確認できた．今後は構造物境界部における小型模型を用いた加振試験を行い，支持構造物とバラスト軌道の連成問題および地震時座屈安定性を検討する．

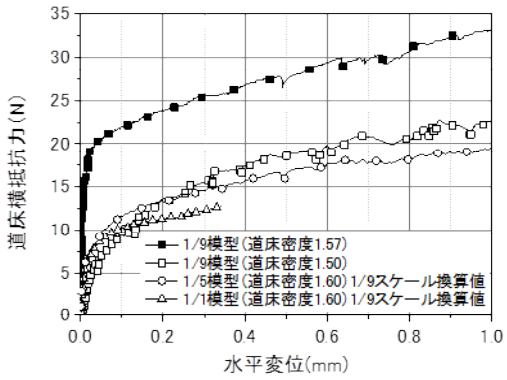

図 4　道床横抵抗力と水平変位の関係

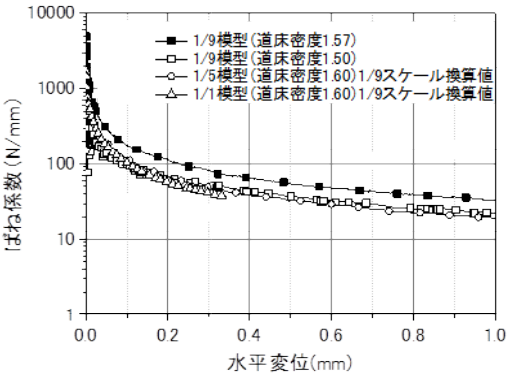

図 5　ばね係数と水平変位の関係

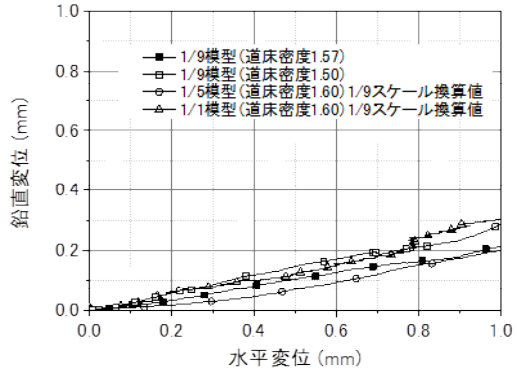

図 6　鉛直変位と水平変位の関係

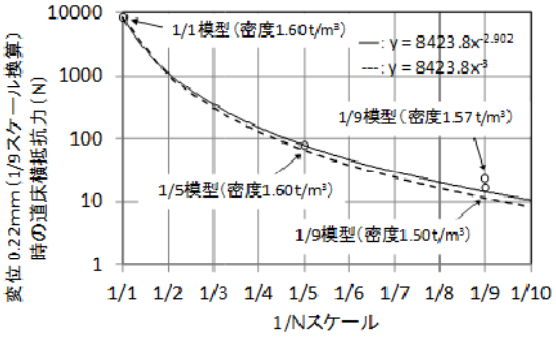

図 7　まくらぎ変位 0.22mm 時の
道床横抵抗力と 1/N スケールの関係

【参考文献】

1) 中村,桃谷,早野,小川：地震時におけるバラスト軌道の道床横抵抗力特性、土木学会論文集 E1(舗装工学)、Vol.70、No.3、2014.
2) Koike, Y., Nakamura, T., Hayano, K., Momoya, Y., Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks. Soils and Foundations(2014)
3) （公財）鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造、2012.1