

極限釣り合い法を用いた鉄道バラスト軌道の道床横抵抗力の推定

横浜国立大学大学院都市イノベーション学府 正会員 ○市川拓真
 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 正会員 早野公敏
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 中村貴久 桃谷尚嗣

1. はじめに レールの座屈防止などバラスト軌道の水平安定性の確保に道床横抵抗力は極めて重要である。ここで道床横抵抗力は道床バラスト内に設置されたまくらぎを横引きしたときの抵抗力である。道床横抵抗力の特性を調べるためにいままでに模型や実物大実験などが精力的に実施され、例えば Koike et al.(2014)¹⁾によってまくらぎの形状やまくらぎの本数などが道床横抵抗力に及ぼす影響が明らかにされている。さらに任意のまくらぎ本数に対する道床横抵抗力の推定手法が提案されている。しかしながらこの手法は常時における直線軌道部に限定されており、カント勾配付きの曲線軌道部や地震時の道床横抵抗力などに対する拡張性が高くない。

そこで複雑な道床形状や地震時慣性力などを比較的考慮しやすい極限釣り合い法に着目した。LM Le Pen and W Powrie(2011)²⁾は、ある形状のまくらぎ一本を横引きして得られる道床横抵抗力の推定を、極限釣り合い法を用いて試みている。本研究ではこの手法をもとに、①様々なまくらぎ形状、②軌きょう引き、という条件下の道床横抵抗力に対する適用性を既往の実験結果と比較することで検討した。

2. 対象とした模型実験 Koike et al.(2014)が実施した模型実験結果を対象とした。まくらぎ(モルタル製)、バラスト(砕石)などすべて実物の1/5スケールの模型実験である(図-1)。この実験では、3Hと呼ばれる新幹線などで使用されているまくらぎ形状に加えて、直方体、翼付き(翼の長さは20, 40mm, 断面形状が長方形, 台形の計4種類)形状のまくらぎ(写真-1)の横引き試験を実施している。また、まくらぎ一本引きに加えて軌きょう引き(3, 5または7本同時の横引き)を実施して1本あたりの道床横抵抗力がどの程度減少するかを確認している。すべての実験ケースでバラスト密度は1.60g/cm³である。

3. 用いた極限釣り合い法 まくらぎ一本当たりの道床横抵抗力はまくらぎの底面・側面・端面の抵抗力 R_{bottom} , R_{side} , R_{end} によりそれぞれ分担され発揮されるとして計算を行った。

直方体形状のまくらぎ RP の場合、 R_{bottom} はまくらぎ重量 $W_{sleeper} \times$ まくらぎとバラストの摩擦角 $\delta_{sleeper}$ により、 R_{side} は側面に作用する静止土圧合力 $\int K_0 \sigma'_v dz \times$ まくらぎ長さ $\times 2$ により算出し、 R_{end} については図-2 に示すようにすべり面を設定し土塊に働く力の釣り合いから求めた受働土圧合力の大きさとした。なおすべり面を水平面に投影した線とまくらぎ長手方向がなす角度 α についてはバラストの内部摩擦角 ϕ と等しいと設定し、土塊に働く力の釣り合い条件を3次元から2次元に簡素化した。実際の計算を行うのにあたっては、壁面摩擦角 δ_w の絶対値はすべり土塊形状に応じて $0 \sim \delta_{sleeper}$ の範囲で変化させた。また別途実施したまくらぎとバラストの摩擦抵抗力評価試験から

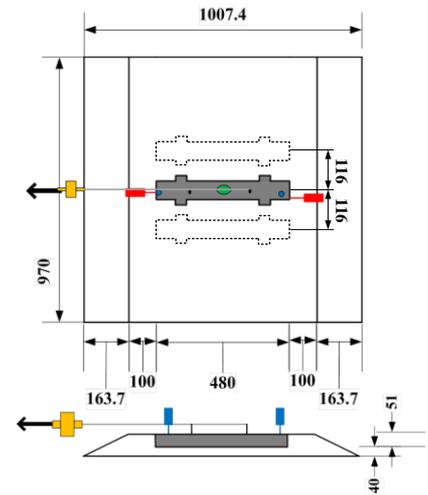


図-1 一本引き、軌きょう引きの模型実験

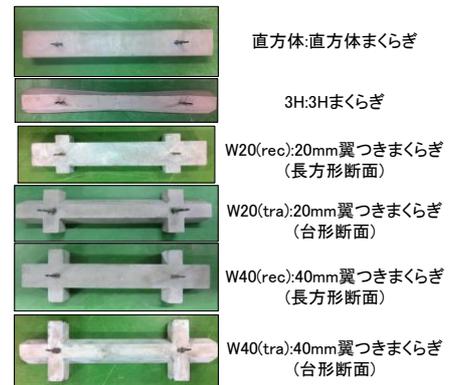


写真-1 対象としたまくらぎ形状

$\delta_{\text{sleeper}}=42^\circ$ とし (図-3 参照), さらに既往の三軸圧縮試験結果³⁾を参考に $\phi=55^\circ$ とした.

翼付き形状のまくらぎ W20(rec), W40(rec), W20(tra), W40(tra)の場合は, 基本的な算出方法は RP と同じであるが翼部分からすべり面が形成されるとして R_{end} を算出した. また断面形状が台形に近い 3H および翼付き形状のまくらぎ W20(tra), W40(tra)の場合は側面の傾斜角に応じた応力成分を考慮して R_{side} および R_{bottom} を算出した.

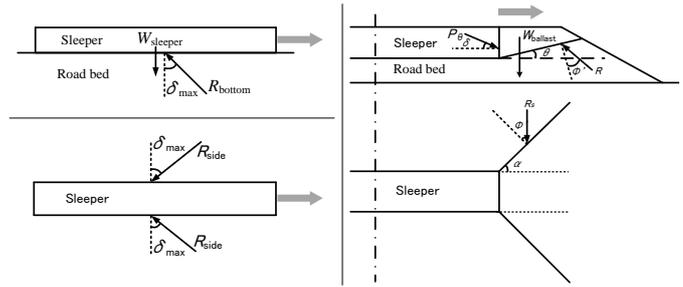


図-2 道床横抵抗力推定手法の概要

4. 実験結果と解析結果の比較

(1)静止土圧係数 K_0 の推定 R_{side} の大きさを求める際に必要となるパラスタ K_0 の値については知見がない. そのため主動土圧係数~受働土圧係数の範囲で変化させて計算を行った. 図-3 には直方体まくらぎについて $K_0=0.5, 1.0, 1.5$ とした場合の道床横抵抗力と一本引きの試験結果との比較を示した. 同図より実測された水平変位~抵抗力曲線に変動があるものの $K_0=1.5$ とすると最終的な道床横抵抗力の平均的な値とよく合うことが分かる. またこのとき $R_{\text{bottom}}, R_{\text{side}}, R_{\text{end}}$ のそれぞれの分担率は 31.5%, 25.4%, 43.1%となり既往の知見⁴⁾と近い値が得られた. 道床作製の際のパラスタの締固め程度を考えると $K_0=1.5$ は特に大きすぎる値ではないと考えられる.

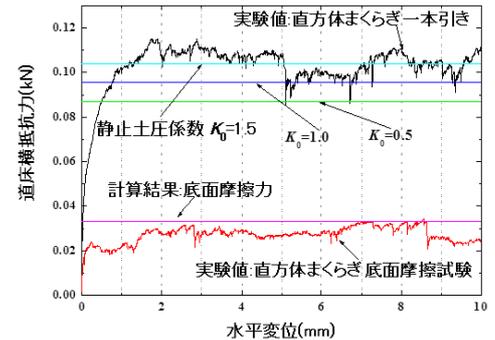


図-3 直方体まくらぎ RP の一本引き試験結果と K_0 値の異なる解析値

(2)様々な形状のまくらぎ道床横抵抗力の推定 まくらぎ RP, W20(rec), W40(rec), W20(tra), W40(tra)の道床横抵抗力の実測値と極限つり合い法による解析値の大きさを図-4 に示す. 道床横抵抗力の実測値は一本引きの試験から得られたもので, 水平変位が 10mm の時の値である. 解析値は実測値によく一致しており, 提案した極限つり合い法は 3H や翼付き形状のまくらぎにも対応できると考えられる.

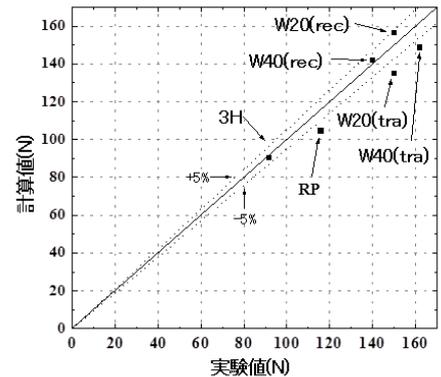


図-4 さまざまな形状のまくらぎの一本引き実験値と解析値

5. まとめ 極限釣り合い法を用いた道床横抵抗力手法は単純形状のまくらぎに加えて台形断面や翼つき形状のまくらぎの道床横抵抗力の推定が可能である. また軌きょう引きの道床横抵抗力の推定にも拡張可能であると考えられる.

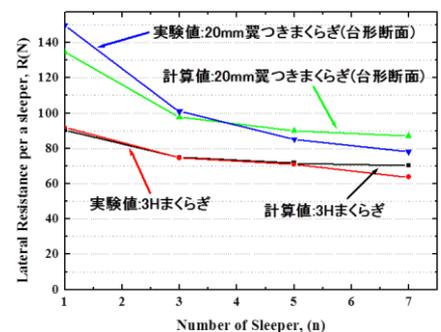


図-5 3H と W20(tra)の軌きょう引き試験結果と解析結果

参考文献 1) Koike et al.(2014): Numerical Method for Evaluating the Lateral Resistance of Sleepers in Ballasted Tracks, Soils and Foundations, 2014 (in print). 2) L M Le Pen and W Powrie: Contribution of Base, Crib, and Shoulder Ballast to the Lateral Sliding Resistance of Railway Track: Journal of Rail and Rapid Transit, 2011. 3) 石川達也,須長誠, 董軍,名村明: 大型三軸試験による道床パラスタの変形特性の検討,土木学会論文集 No.575, 1997. 4) 関根悦夫,中村貴久,平尾博樹: パラスタ軌道の道床横抵抗力に関する模型実験,土木学会第 65 回年次学術講演会, 2010.