実物大バラスト軌道模型載荷試験による軌道沈下量算定式の導出

A new prediction model of ballast settlement derived with full-scale track model examinations

[土]古川敦 財団法人鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部(軌道管理)[土]泉英治 四国旅客鉄道株式会社 工務部保線課

Atsushi Furukawa: A member of JSCE, Railway technical research institute, Track Div, Track Maintenance Lab. Eiji Izumi: A member of JSCE, Shikoku Railway company, Engineering Dept, Track Maintenance Sec.

アブストラクト

In order to predict the settlement observed in ballasted track which causes vertical irregularity of rail under train passage, vertical cyclic loading tests on constant load amplitude were performed with full-scale track. As a result, we found out that "the progressive displacement gradient" does not increase monotony when the thickness of ballast layer increases. In addition we obtained a new equation of the settlement of railroad ballast. With the equation, we can predict the settlement of ballast layer when roadbed is very soft because this equation includes the spring constant of roadbed and ballast layer.

キーワード: 実物大試験, 軌道沈下量算定式, 軌道ばね係数, バラスト厚さ Full-scale model, Ballast settlement, Track stiffness, Sickness of ballast

1. はじめに

バラスト軌道では、一般に道床バラスト層が厚いほど軌道 沈下抑制に対し有利であると考えられているが、最近の研究 によれば、軌道沈下量の極大値を与えるバラスト層厚さの存 在が指摘されている¹⁾.また、路盤剛性が低い場合はバラス ト沈下量が大きくなるが、両者の関係は定量的に示されてい ない.近年の新設バラスト軌道では路盤にはアスファルト路 盤が用いられているため路盤剛性の影響は小さいが、既設線 の軌道強化を行う場合には、路盤剛性が沈下量に及ぼす影響 を把握した上で、バラスト軌道の構造を決定する必要がある.

このような背景から,実物大軌道を用いた繰り返し載荷試 験³⁾を行い,道床バラストの厚さおよび路盤剛性と軌道沈下 量との関係を確認した.

表1 試験条件

まくらぎ種類	道床厚[mm]	路盤剛性	最大荷重[kN]
3号PC(狭軌)	150	硬, 軟	50, 100, 150
3号PC(狭軌)	200	硬, 軟	50, 100, 150
3号PC(狭軌)	250	硬, 軟	50, 100, 150
3号PC(狭軌)	300	硬	50, 100, 150
在来線用標準軌PC	250	硬	50, 100
弾性まくらぎ(狭軌)	250	硬	50



たので、このときは周波数を4Hz、載荷回数を10万回とした. なお、表1の最大荷重はまくらぎ1本あたりの荷重である. 最小荷重は全てのケースで10kNとした.

3. 試験結果

3.1 載荷回数と軌道沈下量の関係

載荷回数とまくらぎの沈下量(変位計4測点の平均)との

2. 試験の概要

1 軌道模型の概要

実物大バラスト軌道模型は、在来線直線部で標準的に使用 されている図1に示す形状とし、バラスト厚、K₃₀値を条件 によって変化させた。

載荷試験は、道床バラストの厚さ、載荷荷重、路盤剛性、 まくらぎ種類(狭軌/標準軌/狭軌弾性)をパラメータとし て実施した.実物大軌道の供試体を図1に、試験パラメータ を表1に示す.表1のうち路盤剛性の硬/軟はバラスト層下 のゴムマットの有無で調整した.ゴムマット有りにおける路 盤のK₃₀相当値を別途FEM解析で求めたところ、18.3MN/m³ であった.ゴムマット無しの場合はアスファルト路盤を想定 している.載荷波形は正弦波、載荷周波数は10Hz、載荷回数 は30万回を基本とし、荷重制御で行った.なお、路盤の剛性 が低い試験条件ではまくらぎにあおりが生じるケースがあっ 関係の例として3号PC,路盤硬,バラスト厚さ250mmにお ける結果を図2に示す.同図(1)に示す累積沈下量は、載荷回 数10万回程度までは急速に進むが、それ以降、30万回まで は漸進的に増加する.載荷回数10万回以降では、1回載荷あ たりの沈下量の増分はほぼ一定と考えられることから、この 値を軌道沈下係数βと定義して求めた結果を同(2)に示す.ば らつきはあるものの、載荷回数10万回以降でβはほぼ一定で あり、載荷荷重が大きいほどβも大きくなることがわかる. また、1回載荷あたりのまくらぎ変位振幅を図2(3)に示す. 変位振幅は繰り返し載荷の初期の段階からほぼ一定であり、 また載荷荷重とともに大きくなる.載荷荷重と変位振幅との 比は、軌道のばね定数となる.

3.2 バラスト厚さと軌道沈下係数 β との関係

図3に、30万回までの載荷を実施した5ケースについて、



バラスト層厚さとβとの関係を示す.両図から,路盤の硬・ 軟に関わらず,あるバラスト厚さでβが極値をとることがわ かる.これは文献1)で得られた結果と等しい.また弾性まく らぎのβは、同条件の3号PCに対し約半分であった.



3.3 軌道ばね係数と軌道沈下係数Bとの関係

ここでは、試験データをもとにバラスト層の厚さとβとの 関係が図3のようになる理由を考察する. なお、以下の考察 で弾性まくらぎは除外する.

図4に、路盤硬における図2(3)のまくらぎ変位振幅平均値 と載荷荷重との関係を示す、変位振幅は載荷荷重振幅におお むね比例して増加している、バラスト厚さ毎のプロットの傾 きが、バラスト層ばねと路盤ばねを直列につないだ軌道ばね のばね係数(以下、「軌道ばね係数」という、)となる、

図4から軌道ばね係数を求め、さらに式(1)、(2)を用いてバ ラスト層ばね係数と路盤ばね係数に分離した.路盤硬の条件 における結果を図5に示す.また、軌道ばね係数の逆数と軌 道沈下係数βとの関係を図6に示す.図5から、路盤硬の場 合、バラスト層厚さが250mm でそのばね係数が最小となる ことがわかる.また図6から、軌道ばね係数の逆数とβとは 比例関係にあり、軌道ばね係数が小さい=軌道が柔らかいほ どβが大きくなることがわかる.







なぜ、バラスト層厚さが 250mm のときに、そのばね係数 が極小となるのかはこの実験結果では不明であるため、今後、 さらなる検討が必要である.

同様の処理を路盤軟の場合についても行い,最大荷重 50kN のケースについて,路盤硬の場合と合わせて軌道ばね係数と βとの関係を求めた結果を図7に示す.全体は右上がりの傾 向にあるが,標準軌まくらぎおよび路盤軟-バラスト厚 150mmの場合は直線上に載らない結果となった.

一般に載荷荷重と物性値が等しい場合,載荷面積が狭いほ ど変位が大きくなるため,見かけ上のばね係数が小さくなる. そこで,これら2条件については試験時にまくらぎ下面の一 部のみで荷重を負担していたと考え,標準軌の場合はまくら ぎ下面圧力を2倍,路盤軟-バラスト層厚150mmの場合3倍 とし,図7を単位まくらぎ下面圧力あたりの軌道ばね係数に 換算すると図8となった.このように,まくらぎ下面圧力の 不均一を考慮すると,全てのケースでβが軌道ばね係数の逆 数に比例することになる.ただし,上記の2倍,3倍という



値に明確な根拠は無いことから, FEM 解析等で圧力分布を明 らかにしたいと考えている.

3. 4 弾性まくらぎに関する考察

図3で弾性まくらぎの場合,同条件の3号PCに対しβが 約半分になった.これはまくらぎ下の弾性体の効果であるが, 前節における,軌道が柔らかい=軌道ばね係数が小さいとβ が大きくなるという考察結果と矛盾する.ここでは,この弾 性まくらぎの効果について考察する.

図9に、3号PCおよび弾性まくらぎのケースについて、 まくらぎ下面圧力とまくらぎ、路盤振動加速度全振幅を示す. 同図から、まくらぎ種類に関わらず、路盤振動加速度はほと んど変わらないことがわかる. すなわち、バラスト層から路 盤に伝わる力の総和は弾性体の有無によって変化しない.

弾性まくらぎと3号PCで,バラスト層から路盤に伝わる 力の総和が等しいにもかかわらず,図3に示すようにβが約 半分になるということは,バラスト層内の力が広く薄く分布



していることを示唆している.これは、まくらぎ下面圧力を 求める際に、本来角張った砕石とコンクリートまくらぎ面の 接触の場合は、接触面積を割り引いて計上する必要があるが、 弾性まくらぎの場合、PCまくらぎに対し接触面積が約2倍 になることを意味している.すなわち、今回の実験結果から は、弾性まくらぎの場合はまくらぎ底面積を2倍とすること で、3号PCと同様にβを算定できるといえる.

4. 新しい軌道沈下量算定式

図8から、新しいβの算定法として、式(3)が得られる.

$$\beta_{zi} = a \frac{P_t}{D_u}$$

a : 係数, P_t : まくらぎ下面圧力[MPa] D_v : 軌道ばね係数[kN/m]

(3)

式(3)の各係数は以下の方法で算定する.

1) 係数a

係数 a は、試験結果(図8)をもとに 14.7×10⁶とする. (注:14.7=589.4/40.40は図8の荷重振幅)

2) まくらぎ下面圧力 P_c

まくらぎ下面圧力*P*_cは,連続支承モデルまたは有限間隔弾 性支持モデルのいずれかによりレール圧力を求めた上で,こ れを一般にはまくらぎ下面の面積で除して算定する.まくら ぎ下面圧力の分布が一様ではないと想定される場合は,これ を適切に算定する.ここでは,前述したように標準軌の場合 はまくらぎ下面圧力を2倍,ゴムマット-バラスト層厚 150mmの場合3倍とした.

3) 軌道ばね係数 D_v

軌道ばね係数 D_v は、バラスト層、路盤のばね係数を用いて式(1),(2)から算定する.ただし、文献 3)で路盤剛性が低くなるほど路盤圧力分布が広がることが指摘されているため、式(2)の S_B を K_{30} 値に応じて変化させることとする.また、バラスト層のばね係数は、設計標準⁴⁾で用いられている200[MN/m]を使用して良いが、バラスト層厚さにより変化させる場合には、当面図5の値を用いる.



式(3)で得られるβと今回の試験で得られた結果の比較を 図 10 に示す.式(3)による推定値は実測値を良く説明してい るのがわかる.

従来の軌道破壊理論では、軌道沈下係数βは道床振動加速 度に比例するとされていた。今回の実験では荷重振幅および 載荷周波数一定の条件で行ったため、軌道ばね係数が小さい ほどバラスト層の変位およびその2階微分である振動加速度 は大きくなる.したがって、式(3)は従来の理論と矛盾するこ となく、簡易な式で軌道沈下係数が推定できるものと考えて いる.

5. まとめ

- (1) 実物大バラスト軌道模型載荷試験結果から、あるバラス ト厚さで軌道沈下係数が極大値を取ることを確認した.
- (2) 軌道沈下係数は、バラスト層ばねと路盤ばねの直列ばね である軌道ばねのばね係数と相関があることを確認した.またバラスト層のばね係数はバラスト厚が 250mm で最大となった.
- (3) 弾性まくらぎの軌道沈下係数は3号PCまくらぎの約 半分であった。
- (4) 上記実験結果をもとに、新しい軌道沈下係数算出法を提 案した。

参考文献

- 関根悦夫,石川達也,河野昭子:道床バラストの繰返し 塑性変形に及ぼす道床厚さの影響,鉄道総研報告, Vol.19,No.2, 2005.2.
- 泉英治,古川敦:道床バラスト厚さをパラメータとする 実物大軌道載荷試験,第63回土木学会年次学術講演会, 2008.9.
- 大塚勝、村本勝己、関根悦夫:路盤の剛性と路盤圧力分 布に関する検討、土木学会第 56 回年次学術講演会、 2001.10.
- 運輸省鉄道局監修:鉄道構造物等設計標準・同解説 [有 道床軌道](案),1997.3.