

# 実物大軌道模型試験によるバラスト軌道沈下量予測モデルの提案

軌道技術研究部 軌道管理  
研究室長 古川 敦

## 1. はじめに

バラスト軌道の設計では、安全性、使用性の照査における設計応答値として、ある一定期間内の軌道変位進みを用いる。したがって、設計の際にはこれを精度良く推定する必要がある。

一方バラスト軌道では、道床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、軌道沈下量が極大値となる道床厚の存在が指摘されている<sup>1)</sup>。また、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、道床厚および路盤剛性をパラメータとした実物大軌道を用いた繰り返し载荷試験を行い、軌道沈下量算定用の実験式を導出した。以下、その結果を報告する。

## 2. 試験の概要

### (1) 試験条件

载荷試験は、道床厚、载荷荷重、路盤剛性、まくらぎ種類（狭軌／標準軌／狭軌弾性まくらぎ）をパラメータとして実施した。試験パラメータを表1に、実物大軌道の供試体形状を図1に示す。表1のうち路盤剛性の硬／軟はバラスト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 $K_{30}$ 相当値を別途FEM解析で求めたところ、 $18.3\text{MN}/\text{m}^3$ 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。载荷波形は正弦波、载荷周波数は $10\text{Hz}$ 、载荷回数は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ことがあったので、このときは周波数を $4\text{Hz}$ 、载荷回数を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 $10\text{kN}$ とした。

### (2) 試験結果

载荷回数とまくらぎの沈下量（変位計4測点の平均）との関係の例として3号PC、路盤硬、道床厚 $250\text{mm}$ における結果を図2に示す。同図(1)に示す沈下量の増分は、载荷回数10万回程度までは急速に減少し、それ以降30万回まではばらつきは大きいもののほぼ一定となる。以下では载荷回数10万回以降における沈下量の増分の平均値を軌道沈下係数 $\beta$ と定義する。

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

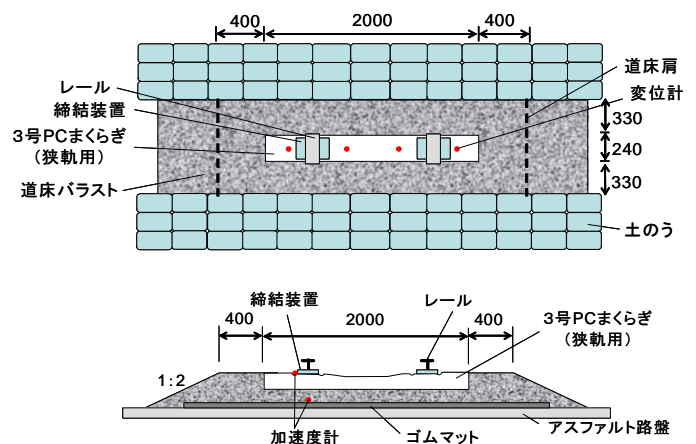


図1 実物大模型軌道

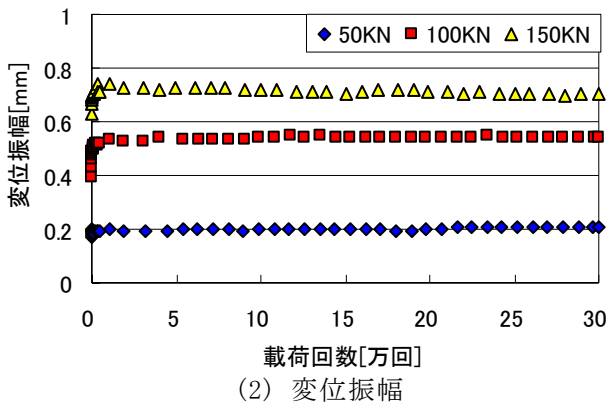
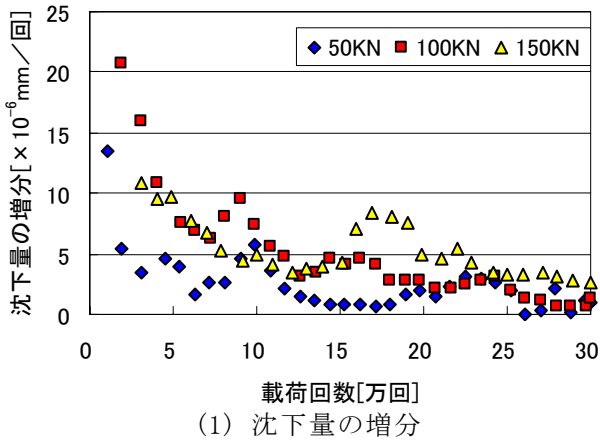


図2 载荷回数とまくらぎ変位との関係の例  
(3号P C、路盤硬、道床厚 250mm)

図2(2)に、1回载荷あたりのまくらぎ変位振幅を示す。変位振幅は繰り返し载荷の初期の段階からほぼ一定であり、また载荷荷重とともに大きくなる。以下、载荷荷重振幅とまくらぎ変位振幅との比を、まくらぎ支持ばね係数とする。

図3に、30万回までの载荷を実施した5ケースについて道床厚と $\beta$ との関係を示す。同図から、ある道床厚で $\beta$ が極値をとることがわかる。また弾性まくらぎの $\beta$ は同条件の3号P Cに対し約半分であった。

図2(2)からまくらぎ支持ばね係数を求め、さらに直列ばねの関係を用いて道床ばね係数と路盤ばね係数に分離した。路盤硬の場合の結果を図4に示す。同図から路盤硬の場合、道床厚が250mmで道床ばね係数が最小となることがわかる。さらに図5に、まくらぎ支持ばね係数の逆数と軌道沈下係数 $\beta$ との関係を図5に示す。まくらぎ支持ばね係数の逆数と $\beta$ とは比例関係にあり、まくらぎ支持ばね係数が小さい、すなわち軌道が柔らかいほど $\beta$ が大きいことがわかる。

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まくらぎ支持ばね係数の逆数と $\beta$ との関係を求めた結果を図6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かつ道床厚150mmの場合は直線上に乗らない

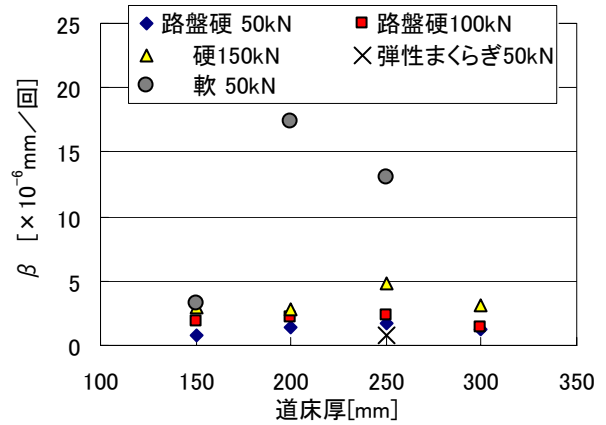


図3 道床厚と軌道沈下係数との関係

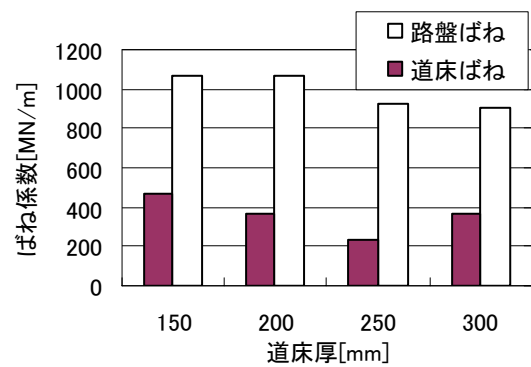


図4 道床層厚とばね係数との関係

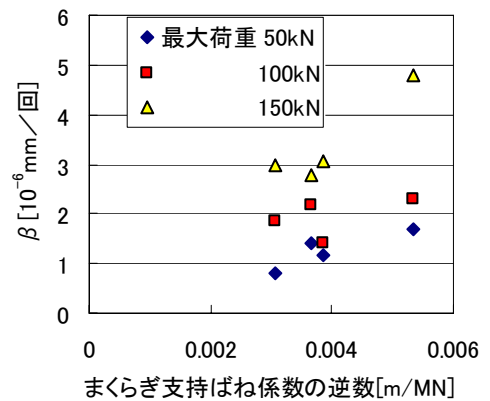


図5 まくらぎ支持ばね係数の逆数と $\beta$ との関係 (路盤硬)

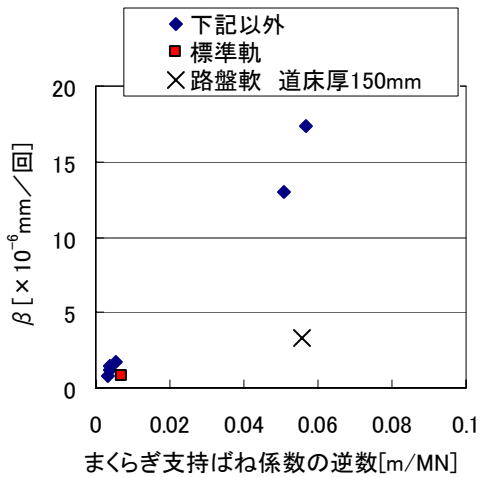


図6 まくらぎ支持ばね係数の逆数と  $\beta$  との関係 (最大荷重 50kN での結果)

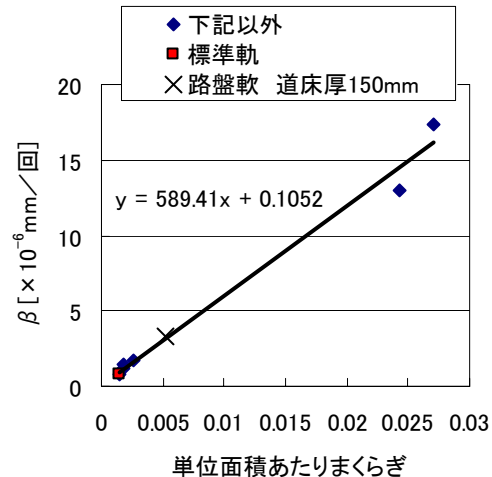


図7 単位面積あたりまくらぎ支持ばね係数の逆数と  $\beta$  との関係

結果となった。

ここで、道床に対しまくらぎを介して荷重を載荷する場合、荷重の大きさが同じであればまくらぎ下面積が狭いほどまくらぎの変位は大きくなり、見かけ上の道床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(まくらぎの有効支持面積 1/2)、路盤軟-道床厚 150mm の場合3倍(同 1/3)とし、図6の横軸をまくらぎ単位下面積あたりのまくらぎ支持ばね係数に換算すると図7のように、ほぼ比例関係となった。このように、まくらぎ下面圧力分布の不均一を考慮すると、全てのケースで  $\beta$  がまくらぎ支持ばね係数の逆数に比例することになる。上記の2倍、3倍という値に明確な根拠は無いが、別途実施した静的 FEM 解析では、道床厚が薄くなるほどバラスト下面の応力分布が不均一となったことから、上記の考察は定性的には妥当なものであると考えている。

### 3. 軌道沈下量算定式の提案

図7から、式(1)を  $\beta$  の算定式として提案する。

$$\beta_{zi} = a \frac{S_T(P_{r,in} + P_{r,out})}{D_v} \quad (1)$$

- $a$  : 係数、 $S_T$  : まくらぎ下面積[m<sup>2</sup>]
- $P_{r,in}, P_{r,out}$  : それぞれ内、外軌のレール圧力[kN]
- $D_v$  : まくらぎ支持ばね係数[MN/m]

式(1)の係数  $a$  は、図7から求める。図7に示す「下記以外」は、3号 PC、荷重振幅 (=内外軌のレール圧力振幅の和) 40kN のものであるが、この条件における回帰係数横軸は同図に示すように 589.4 であった。同図の横軸はまくらぎ下面積あたりのまくらぎ支持ばね係数の逆数 (=  $S_T/D_v$ ) であるので、 $a$  は  $589.4/40=14.7$  となる。なお、この  $S_T$  は、物理的なまくらぎ底面積というよりも、まくらぎ支持状態の不均一を補正するための係数というべきものである。式(1)からは、精度の高い沈下量推定のためには、まくらぎの支持状態を考慮した単位支持面積あたりのまくらぎ支持ばね係数を求めるのが肝要といえる。

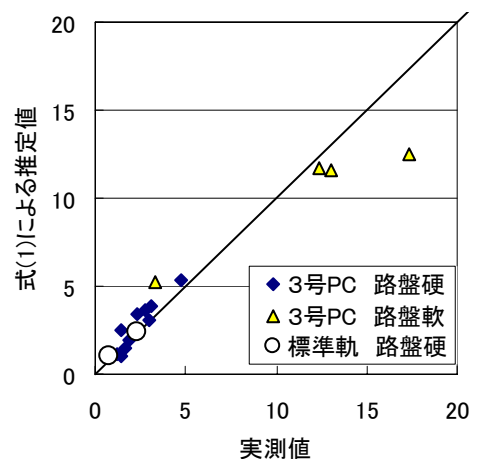


図8  $\beta$  の推定値と実測値との比較

レール圧力  $P_{r,in}$ ,  $P_{r,out}$  は、連続支承モデルまたは有限間隔弾性支持モデルなどで、まくらぎ支持ばね係数  $D_v$  は、道床ばね、路盤ばねを直列に接続して算定する。その際、道床のばね係数は、設計標準で用いられている 200 [MN/m] を使用するか、図 4 の値を用いる。

式(1)で得られる  $\beta$  と今回の試験で得られた結果（最大荷重 50kN 以外のものも含む）を図 8 に示す。式(1)による推定値は実測値を良く説明しているのがわかる。

#### 4. 実際の軌道変位進みとの比較

図 9 は、軌道保守の翌日に検測車で測定した 10m 弦正矢高低変位を 0 としたときの、軌道保守後の通過トン数と高低変位進み（高低変位振幅の増加分）との関係を示したものである。図中の破線は継目毎の高低変位進みの推移を、実線は式(1)（新モデル）および過去に提案された沈下量推定式による予測値を、95% 発生確率に換算したものである。同図に示すように、際の軌道変位はまず急進的な初期沈下が起こり、その後の進みは漸進的である。したがって軌道変位進みが通トンのべき乗に比例する S 式が傾向としては実測値に近い。ただし、初期沈下はばらつきが大きく、S 式を用いても正確な予測は難しい。

そこで、初期沈下が落ち着いてから軌道変位進みがどのように進行するかを検討するために、図 9 と同条件で、軌道保守から約 200 万トン通過後の高低変位を初期値 0 としたときの高低変位進みを図 10 に示す。推定には輪重の 95% 発生確率を用いているが、同図から、新たに提案した予測モデルで軌道変位進みの最大値に近い値を推定できていることがわかる。

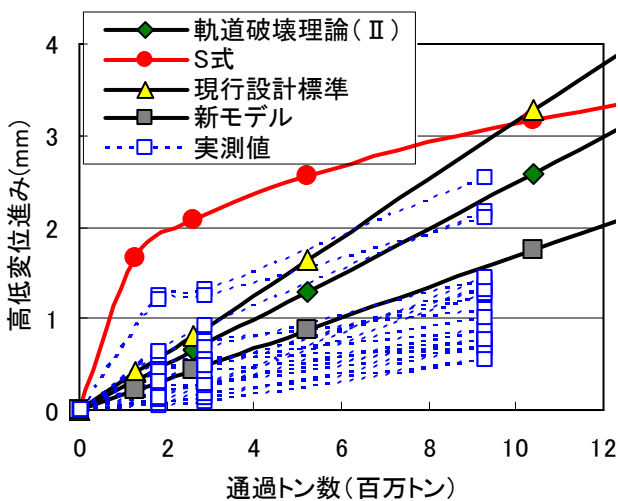


図 9 高低変位進みの実測値と予測値の比較

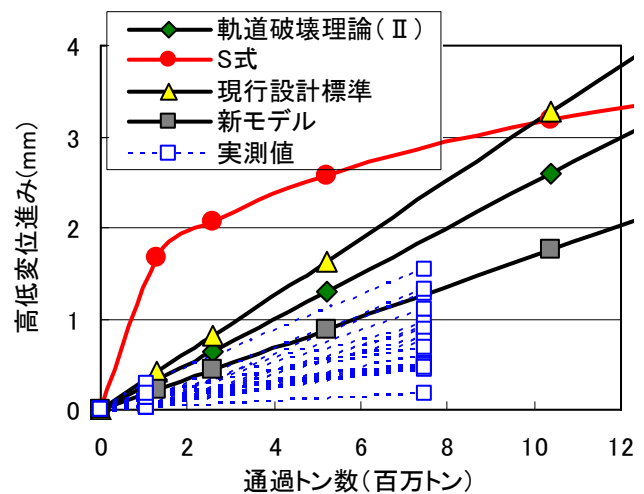


図 10 約 200 万トン通過後を初期値とする  
高低変位進みの実測値と予測値の比較

#### 5. まとめ

- (1) 実物大模型軌道載荷試験の結果、軌道沈下係数が極大となる道床厚が存在すること、および軌道沈下係数はまくらぎ支持ばね係数と相関があることを確認した。
- (2) 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。
- (3) 新たに提案したモデルは、実際の高低変位進みをよく説明できることを確認した。

#### 参考文献

- 1) 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.