

2405 軌道動的応答モデルを用いた軌道沈下予測モデル

Prediction Model of Track Settlement Based on Vehicle/Track Dynamic Model

正 [土] ○石田 誠 (鉄道総研) 正 [土] 鈴木 貴洋 (鉄道総研)

Makoto Ishida, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo
Takahiro Suzuki, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo

The estimation of track settlement or track irregularity growth is an important issue for both the selection of the optimum track structure and maintenance method from the aspect of reducing maintenance cost. A state of the art track deterioration theory in Japan is summarized in "Design Standard of Railway Structures and Others - Track Structures [Ballast Track]", 1997 which includes ballast and subgrade settlement laws. In this standard the ballast and subgrade settlement laws were established based on some experiments of track settlement by repeated loading to a full-scale model track, and maintenance practice. This paper describes that track site experiments for measuring track settlement and the adequacy of the prediction model of track settlement and track irregularity growth which consists of a vehicle/track dynamic model and track settlement laws.

Keyword: vehicle/track dynamic model, ballast settlement law, sleeper settlement, ballast acceleration, track site experiments

1. はじめに

有道床軌道における高低軌道狂い進みの予測は、保守費を考慮した軌道構造の決定、保守方法と投入時期の適切な選択のために重要であり、いわゆる軌道破壊理論として取り組まれている。有道床軌道の設計標準(案)¹⁾においては、軌道に発生する動的荷重を簡単なモデルで算定し、これを実験的に求めた道床沈下則と組み合わせて、軌道沈下進みの最大値を推定している。

筆者らは、軌道狂いとレール凹凸によって発生するまくらぎ・道床間作用力を軌道動的応答モデル^{2),3)}を用いて解析し、道床沈下則¹⁾によって個々のまくらぎの沈下を算定し、それで得られた新たな軌道狂い形状に対する解析を繰り返すことにより、軌道狂い進みの経時変化を予測する手法を提案した^{4),5)}。一方、軌道沈下の実態を把握するために、営業線において継続試験を実施している^{6),7)}。

そこで、本報告では営業線における測定結果を踏まえて、提案している軌道動的応答モデルを用いた道床沈下予測手法の妥当性について検討した結果を紹介する。

2. 道床沈下予測モデル

2. 1 解析モデル

初めに、軌道動的応答モデルを簡単に紹介する。図1に示すように、レールをティモシェンコ梁とし、道床を3層に層分けし、ばねとダンパで縦方向に連結した質点としている。軌道狂いはまくらぎを支持する道床面の沈下量として与え、レールとまくらぎの自重による弾性変形を最初に計算し、動的解析の初期条件とする。モデルの詳細は既報^{2),3)}を参照されたい。

このモデルで解析したまくらぎ・道床間作用力の最大値から、まくらぎ下面圧力を求め、式(1)の道床沈下則¹⁾を用

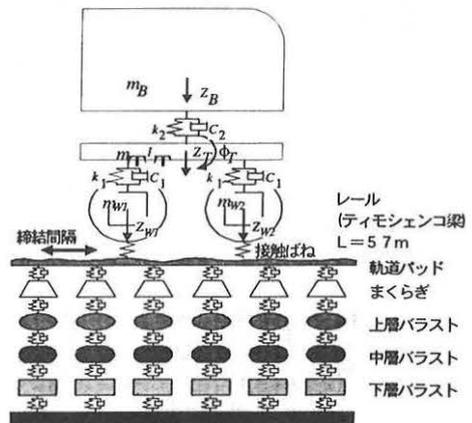


図1 軌道動的応答モデル

表1 解析条件

車種	特急気動車
車	
静止輪重 (kN)	53.9
輪軸質量 (kg)	784.5
両	
車輪径 (mm)	860.0
走行速度 (km/h)	130
軌	
レール種別	50N
軌道バッドばね係数 (kN/m)	11.0×10^4
軌道バッド減衰係数 (kN·s/m)	30.0
締結間隔 (mm)	620
まくらぎ種別	1F
道床厚さ (mm)	250
道	
バラスト等価質量 (kg)	195.3
バラストばね係数 (kN/m)	0.24×10^6
バラスト減衰係数 (kN·s/m)	75.4
路盤ばね係数 (kN/m)	5.0×10^4
路盤減衰係数 (kN·s/m)	98.0

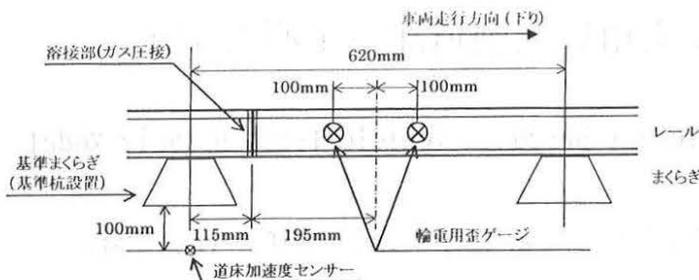


図2 測点配置の概要

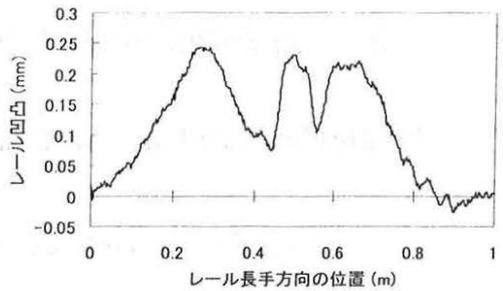
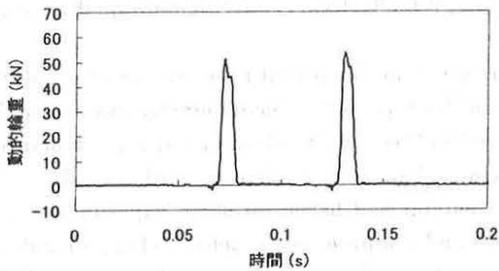
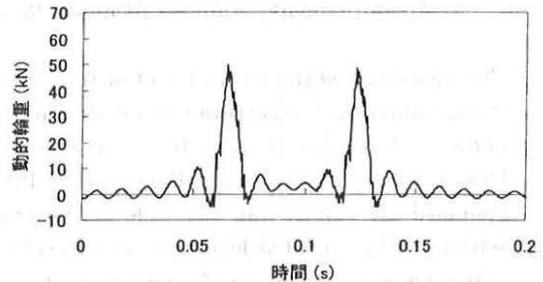


図3 レール頭頂面の凹凸形状

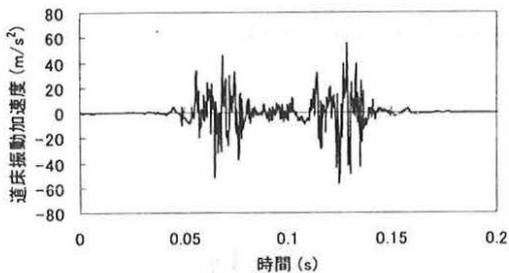


(a) 測点結果

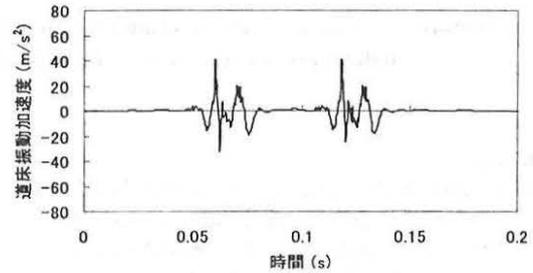


(b) 解析結果

図4 動的輪重波形：下り列車（速度130km/h）



(a) 測定結果



(b) 解析結果

図5 道床振動加速度波形：下り列車（基準まくらぎ下、速度130km/h）

いて、道床沈下量を予測する。

$$\beta_{by} = a \cdot (P_t - b)^2 \cdot \dot{y} \cdots \cdots (1)$$

ただし、

- β_{by} : 道床沈下量 (mm/軸)
- P_t : まくらぎ下面圧力 (kPa)
- a : 係数 (2.7×10^{-10})
- b : 係数 (39.6) (道床厚 250mm)
- \dot{y} : 道床振動加速度係数

道床振動加速度係数 \dot{y} は、路盤の剛性が低いほど、道床振動が増大し、粒子間の摩擦抵抗力の減少などによって道床沈下量が増大する作用を表わす係数である。

2.2 解析条件

本報告では、道床沈下量の継続測定試験が行われている営業線の軌道と車両の条件を用いて解析を行い、測定結果と解析結果を比較した。なお、営業線は非電化・単線で、その線区の代表的な車両である特急気動車の走行時の測定値を用いた。解析条件を表1に示す。また、表1の解析条件において、路盤のばね係数 50MN/m であり通常の剛性を有するため、道床振動加速度係数 \dot{y} を 1.0 とし路盤沈下は無いものとした。

3. 軌道動的応答

道床沈下量の継続測定試験に先立ち、測定箇所の軌道の基本的

な動特性を調査した。ここでは、レールに貼られた歪ゲージにより輪重を測定し、継続測定用の基準杭を設置したまくらぎ（以降、「基準まくらぎ」と呼ぶ）の底面から 100mm 下の砕石に埋めこまれた加速度センサーにより道床振動加速度を測定した。測定箇所の溶接部の位置、歪ゲージが貼付された位置等の測点配置の概要を図2、および溶接部を中心とするレール頭頂面の凹凸の形状を図3に示す。

まず、図2に示す歪ゲージによる輪重の測定結果と測定条件をモデルに取り入れてせん断歪を求め解析結果を図4に示す。図より、走行速度が 130km/h の下り列車が通過した場合を比較した結果、概ね妥当な波形が得られたと考えられる。特に、車両の進行方向に対する溶接部と歪ゲージの位置関係から、走行速度が大きくなっても、歪ゲージで捉えられる輪重の値が必ずしも大きくならないことが理解できる。

次に、基準まくらぎ下の道床振動加速度の測定結果と解析結果を図5に示す。図の解析結果は、図1の道床モデルが道床を荷重の影響する程度に応じて層分けした質量を有する質点で表現されているため、加速度センサーが埋められた位置に相当する質点の応答値を示す。したがって、砕石とモデルの質量の違い等を考慮すると、最大値を評価する上では図5に示す解析結果は概ね妥当であると判断できる。

さらに、図6に、測定箇所付近を車両が走行する際の輪重変動波形の解析結果を示す。図より、測定においては図2に示す歪ゲ

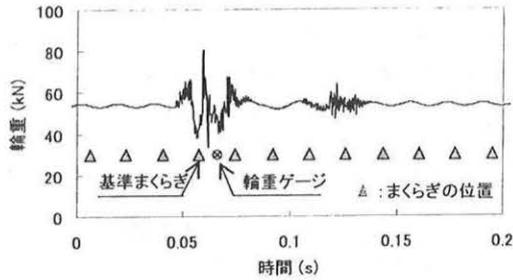
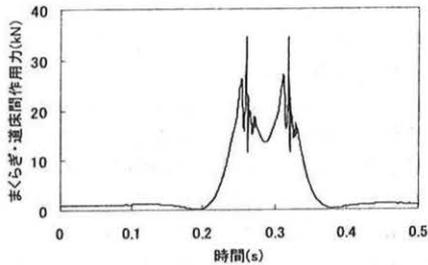
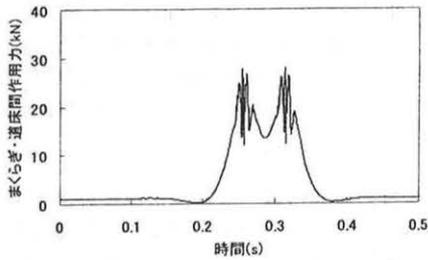


図6 輪重変動解析波形：下り列車
(台車前軸、速度 130km/h)



(a) 下り列車



(b) 上り列車

図7 まくらぎ・道床間作用力 (速度 130km/h)

ージ間隔の 200mm 間の輪重が測定されるに過ぎないが、解析モデルにより溶接部を含む軌道の長手方向の作用力の変化を理解できる。

ここで、道床沈下の計算に用いるまくらぎ・道床間作用力に関して、下り列車と上り列車により励起される作用力の解析結果を図7に示す。図より、測定現場のまくらぎと溶接部凹凸の位置関係に依存して、基準まくらぎと道床間の作用力が列車の走行方向の違いにより10%程度異なることが理解できる。また、台車前軸と後軸による作用力が完全にゼロに戻らないことをよく理解できる。この作用力がゼロに戻らない現象が道床沈下に影響を与えることが指摘されており⁸⁾、今後この点をどのように沈下予測に取り込んでいくのが課題である。

4. 道床沈下進み

道床沈下量の継続試験においては、頭頂面の凹凸と図8に示すまくらぎ端に設置した基準杭からの静的なまくらぎ沈下量を約3ヶ月間隔に、動的なまくらぎ変位と道床振動加速度を約1年間隔(年間通過トン数2300万トン)に測定している。解析においては、測定箇所を通過する車両として特急用気動車、普通用気動車とディーゼル機関車が牽引する貨物列車の代表として、特急気動車が130km/hで走行する場合のみを考慮した。つまり、特急用気動車による軌道へのダメージをその他の車両を含めた平均的なものと考えた。また、ここでは図7に示すような台車前軸と後軸通過において作用力がゼロに戻らないことの影響を無視し、

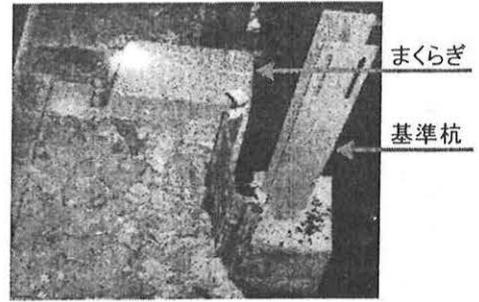


図8 まくらぎ沈下測定基準杭

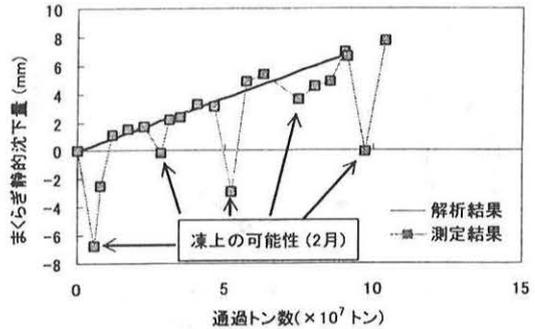


図9 まくらぎ静的沈下量の推移

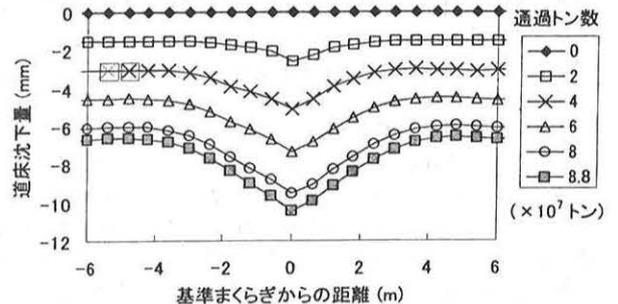


図10 各まくらぎ下の道床面沈下の経時変化(解析結果)

表2 まくらぎの落下高さ (mm)

	単線非電化線区*
左レール	1.37
右レール	1.36
平均値	1.37

* 通過トン数 8900万トン時に測定

各軸の作用力が単独に生じるとしている。

図9に、静的なまくらぎ沈下量の測定結果と溶接部付近の局所的な道床沈下ではなく軌道全体の沈下量の解析結果を示す。まず、測定結果において2月の冬季に限りまくらぎが持ち上がっていることが分かる。これは、凍上現象を示すものであると考えられる。また、そのような凍上が起きているにも関わらず、その後は完全に回復し、沈下を継続していることは、大変興味深い結果である。

ところで、様々な不確定な要因もあり、解析も特急用気動車のみを代表させて道床沈下を算定するなどかなり大まかな仮定の下に解析を行ったが、結果的には驚くほど測定結果と解析結果が一致した。これは、測定箇所の軌道の条件が道床沈下則を求める際に行った実験の状態とよく似ていたことが考えられるなど、不確定な要因が双方の結果を望ましい方向に作用したことが考えられる。また、図9に示す軌道全体の沈下ではなく、溶接部付近の各まくらぎ下

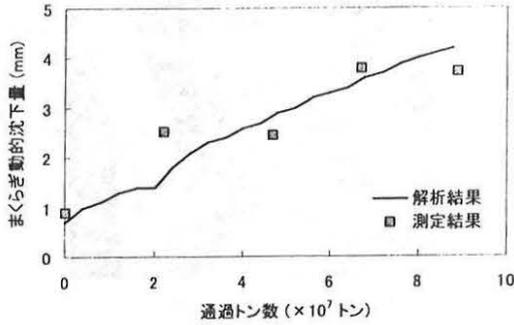


図 11 まくらぎ動的沈下量の推移

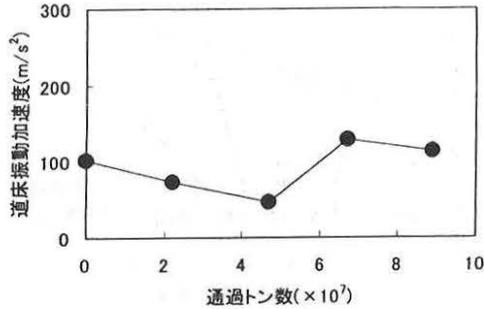


図 12 道床振動加速度の推移 (測定結果)

の道床面の沈下に関して、継続測定の開始時からの絶対量を図 10 に示す。図より、基準杭を設置した溶接部直近の基準まくらぎを中心に、塑性沈下が進むと同時に沈下する範囲も広がっていく経時変化を理解できる。

ここで、通過トン数 8900 万トン時に基準まくらぎのレール締結装置を外して、基準まくらぎを道床上に落として、道床との隙間（浮き量）を測定した結果を表 2 に示す。表より、左右レールの差もほとんどなく、平均で約 1.4mm であった。一方、図 10 のまくらぎと道床間の隙間（浮き量）の解析値は 3.4mm 程度であり、実測値よりかなり大きいことが、そもそも隙間（浮き量）の定義自体が明確ではないことと、バラストの形状を考慮すると、単にまくらぎを道床上に落した場合の落下高さが隙間（浮き量）に等しいとは考えにくい。この隙間（浮き量）に関するモデルと実体の違いについては、今後検討が必要と考えられる。

次に、台車前軸車輪の動的なまくらぎ変位の測定結果と解析結果を図 11 に示す。図より、実際の車両と解析モデルの車両の諸元の違い、および実際のまくらぎと解析モデルのまくらぎ（質点）の違いはあるが、測定上のばらつきを考慮すると、測定結果と解析結果は非常によく一致していると考えられる。

このように、図 9 と図 11 において、様々な不確定な要因があるにも関わらず、測定結果と解析結果が非常に良く一致したことは、このような軌道動的応答モデルと道床沈下則の組み合わせにより、対象とする軌道と車両の条件に

じて、道床沈下量とそれを含む軌道狂い進みの予測がある程度可能であることが明らかになったと考えられる。

最後に、図 12 に右レール側の道床振動加速度の推移を示す。図より、通過トン数の増加に伴い道床振動加速度が一度減少し、その後再び増加する傾向が見られる。これは、着目している基準まくらぎの浮きが近隣まくらぎと比較すると当初は大きく、その後は少々小さくなるなど、まくらぎと道床の接触状態あるいは支持状態が近隣まくらぎと相対的にも変化するためと考えられる。

5. おわりに

以上、軌道動的応答モデルを用いて道床沈下を予測する手法の妥当性の検討結果について述べた。結果的には、測定結果と解析結果が非常に良く一致し、筆者らが提案した手法がある程度妥当である結論が得られた。今後は、現在は質点として扱っている道床モデルをより適切なモデルへの改良、解析モデルのパラメータとして不確定な道床の減衰係数の明確化により、解析精度の向上をより一層図りたいと考えている。一方、台車前軸・後軸の通過により、まくらぎ・道床間作用力がゼロに戻らない前軸・後軸の相互作用が道床沈下にどのような影響を与えるのかなど、道床沈下則の適用方法をさらに検討する必要がある。

最後に、今回の解析対象とした道床沈下量の継続測定試験を担当していただいている JR 北海道の関係者の皆様、また JR 西日本においても同様な測定試験を担当していただいている関係者の皆様に感謝を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 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 [有道床軌道] (案), 鉄道総合技術研究所, 1997
- 2) 三浦重：軌道構造の動特性モデルの構築, 鉄道総研報告, 9-12, pp.7-12, 1995
- 3) 石田誠, 三浦重, 河野昭子: 軌道動的応答モデルとその解析結果, 鉄道総研報告, 11-2, pp.19-26, 1997
- 4) 石田誠, 内田雅夫, 小野重亮：軌道動的モデルによる軌道狂い経時変化予測, 鉄道力学論文集, 第 4 号, pp.13-18, 2000
- 5) 小野重亮, 石田誠, 内田雅夫：軌道動的応答解析による軌道狂いシミュレーション, 日本鉄道施設協会誌, 39-9, pp.32-35, 2001
- 6) 石田誠, 名村明, 鈴木貴洋：軌道沈下の実態と予測モデル, 鉄道力学論文集, 第 6 号, pp.61-66, 2002
- 7) 石田誠, 名村明, 鈴木貴洋：営業線における道床沈下測定試験結果, 日本鉄道施設協会誌, 41-4, pp.22-25, 2003
- 8) 名村明, 木幡行宏, 三浦清一：道床沈下特性に及ぼす荷重条件・まくらぎ形状の影響, 鉄道総研報告, 17-9, pp.15-20, 2003