

S2-2-8. レール継目部で生じる道床沈下進みの解析的検討

[土] ○鈴木 貴洋 (鉄道総研) [土] 石田 誠 (鉄道総研)

[土] 阿部 和久 (新潟大学) [土] 紅露 一寛 (新潟大学)

Analytical Study on Ballast Settlement Growth Caused at Rail Joints

Takahiro Suzuki, Member ; Makoto Ishida, Member (Railway Technical Research Institute)
Kazuhiisa Abe, Member ; Kazuhiro Koro, Member (Niigata University)

The authors have recently established the prediction model of ballast settlement growth caused at rail joints. This prediction model consists of a ballast settlement law and a track dynamic model considering the excitation caused by wheels passing at the discontinuity of fish plate rail joints. With regard to the track dynamic model adopted in this paper, some measured and analytical results were so far compared and a good agreement in between was obtained. In this paper, the influence of countermeasures for rail dip joints on the ballast settlements was estimated.

キーワード：レール継目部、道床沈下、レール継目部動的解析モデル、継目対策

Keywords: Rail joint, Ballast settlement, Rail joints dynamic analysis model, Countermeasures for rail dip joints

1. はじめに

有道床軌道における継目部は保守量の大きい代表的な軌道弱点箇所の一つである。その原因として、継目部に生じる衝撃輪重とそれに伴う振動による軌道沈下が挙げられる。これまでに著者らは、継目部で生じる動的輪重に着目し、継目部の不連続性と車輪の遊間部乗り移りを考慮したレール継目部動的解析モデルと実測された車輪重量およびレール圧力の比較を行い、レール継目部動的解析モデルの妥当性を示すとともに、継目部で生じる動的輪重には継目落ち形状の影響が大きいことを明らかにした^{1),2),3)}。また、レール継目部動的解析モデルを用いた継目部における道床沈下予測モデルを構築し、継目落ち形状の有無による道床沈下の影響を解析的に検討した³⁾。

そこで、本論文では継目部における道床沈下予測モデルを用いて、レール端部バッター（短波長の継目落ち）とレール曲がりくせ等（長波長の継目落ち）の継目落ち形状に対する各種継目対策の影響を解析的に検討する。継目対策に関しては、これまでに各種対策が提案・施工され、その効果が報告されている^{4),5)}。しかし、各対策の施工箇所における継目落ち形状を全く同一に設定することは困難であり、継目落ち形状に依存して施工箇所毎に作用する動的輪重が異なるため、得られた効果が継目対策によるものかどうかを比較・判断することは難しいと考える。そのため、継目落ち形状を同一にした場合で継目対策の効果を比較・評価した方が望ましく、解析手法を用いた定性的な継目対策の評価には意義があると考えられる。

2. 継目部における道床沈下予測モデル

継目部における道床沈下予測モデルは、石田らが溶接部を対象に提案したモデル⁶⁾を参考に構築した。予測モデルは、レール継目部動的解析モデルによる短期挙動と、短期挙動による応答値（まくらぎ下面圧力の最大値）を用いて道床沈下則⁷⁾から道床沈下量を算出する長期挙動から構成される（図1）。以下では、予測モデルで用いるレール継目部動的解析モデルと道床沈下則の概要について述べる。

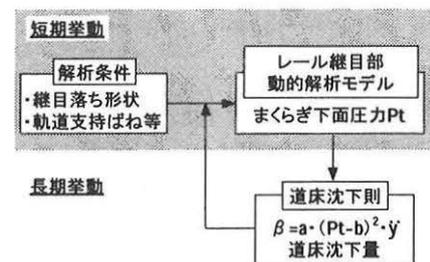


図1 継目部における道床沈下予測モデル

<2.1>レール継目部動的解析モデル

本研究では継目部で生じる道床沈下予測を目的としているため、道床沈下に伴った浮きまくらぎの影響を考慮する必要がある。そのためにはレールが長手方向で離散支持され、さらに継目欠線部を車輪が乗り移る現象が考慮できる解析モデルの構築が必要となる。そこで、本論文では片岡らが提案した継目部の解析モデル⁸⁾を参考に、図2に示す

レール継目部動的解析モデルを構築した⁹⁾。なお、片岡らの解析モデルと本解析モデルとの主な相違点は、Timoshenko 通りの離散化に用いる有限要素にあるが詳細は文献 [9] を参照されたい。

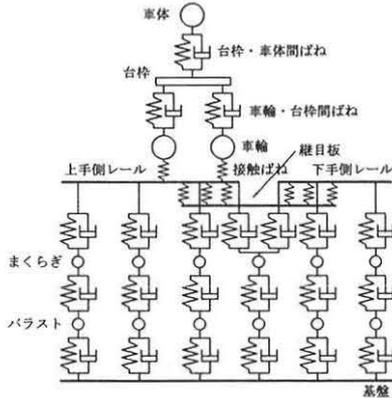


図 2 レール継目部動的解析モデル

<2.2>道床沈下則

道床沈下則は、文献 [7] に示される次式を用いた。

$$\beta = a \cdot (Pt - b)^2 \cdot \ddot{y} \dots \dots \dots (1)$$

- β : 道床沈下量 (mm/軸)
- Pt : まくらぎ下面圧力 (kPa)
- a : 道床沈下傾向を表す係数
- b : まくらぎ下面圧力のしきい値を表す係数 (kPa)
- \ddot{y} : 道床振動加速度係数

ここで、a は軌道構造によらず同一の値、b は道床厚さに依存する値、 \ddot{y} は道床厚さと地盤反力係数に依存する値である。そのため、これらパラメータは継目部・中間部に関わらず同じ値となることに注意されたい。

3. 解析

<3.1>継目対策工法

解析対象とした継目対策を表 1 に示す。標準構造(無対策)は軌道パッド 110MN/m で並まくらぎと大盤まくらぎ(継目部のみ)の木まくらぎを用いた軌道構造である。なお、以下ではまくらぎ PC 化を「PC 化」、軌道パッド低ばね係数化を「低ばねパッド化」、大盤まくらぎ敷設を「大盤まくらぎ化」と称する。ここで、表 1 の他にも縦まくらぎ工法や高剛性継目構造などが挙げられ、横まくらぎに比べて道床に作用する荷重の分散効果が大きいため、軌道狂い進み抑制に効果のあることが報告されている^{4),10)}。しかし、本予測モデルで用いる道床沈下則は横まくらぎに対して提案されたものであり、縦まくらぎ等にそのまま適用することはできないため、本論文では縦まくらぎ等は対象としないこととした。

表 1 解析対象とした継目対策 (継目構造 : 支え継ぎ)

| 継目対策工法 | 無対策 | まくらぎPC化 | 軌道パッド低ばね係数化 | 大盤まくらぎ敷設 |
|--------|-------------------------|--------------------------------|---|------------------------------------|
| 軌道パッド | 全て 110MN/m | ・継目部は 90MN/m ・上記以外は 110MN/m | ・継目部を含めた前後3部所を 30MN/m ・上記以外は 110MN/m | 全て 110MN/m |
| まくらぎ | 中間部 並まくらぎ 継目部 大盤まくらぎ | PC3号 | 並まくらぎ | ・継目部を含めた前後5本を大盤まくらぎ ・上記以外は並まくらぎ |

<3.2>解析諸元

解析において列車速度は 70km/h のみ、継目構造は支え継ぎ(遊間 11mm)、軌道構造は 3 級線を対象にまくらぎ本数を 39 本/25m、まくらぎ間隔を継目部から順に 0.553m、0.575m、その他を 0.650m とした。道床沈下量は通過トン数 100 万トン毎に算出し、通過トン数 500 万トンまでの累積道床沈下量を算出した。その他の車両、レール、道床等に関する解析諸元を表 2、まくらぎ下部構造に関する解析諸元を表 3 に示す。ここで、各継目対策におけるまくらぎ種別の影響は、表 3 に示すまくらぎ質量・支持ばね係数、道床質量・支持ばね係数、路盤支持ばね係数に反映される。

表 3 に示す道床質量・支持ばね係数および路盤支持ばね係数は、図 3 に示す道床モデル¹¹⁾を用いて、各層毎に値を決定した(算出方法は表 3 の備考欄を参照)。なお、道床モデルにおける A(z)、B(z)がまくらぎ寸法に影響されるため、まくらぎ種別毎で各値が異なる。

まくらぎ支持ばね係数は、まくらぎ自身の圧縮ばね係数と曲げ変形によるばね係数、および道床上部支持ばね係数を直列化して値を算出した。木まくらぎ(並まくらぎ、大盤まくらぎ)の場合、まくらぎ自身の圧縮性を考慮する。また、曲げ変形によるばね係数は、弾性床土上りだけでモデル化したまくらぎにレール圧力 R_p が作用した場合の解析¹³⁾から算出したレール下における変形量 y_s と、まくらぎを剛体とした場合の変形量 y_r を用い、 $R_p/(y_s - y_r)$ により算出した。一方、PC まくらぎは剛体であるものと仮定し、まくらぎ自身の圧縮性・曲げ変形は考慮しないこととした。

各構造部分の減衰係数については、文献 [6] を参考に継目対策工法によらずに同一の値を用いることとした。

継目落ち形状は、短波長の継目落ちであるレール端部バ

表 2 車両、レール、道床等の解析諸元 (軌道片側)

| | | |
|-----------------|-----------------|----------------------|
| 車体質量 | kg | 7502.4 |
| 台車枠質量 | kg | 1015 |
| ばね下質量 | kg | 842.5 |
| 台車枠ビッチング慣性モーメント | tm ² | 1.04 |
| 静止軸重 | kN | 50.0 |
| 車体/台車枠間 | ばね係数 | MN/m 0.337 |
| | 減衰係数 | kNs/m 14 |
| 台車枠/車体間 | ばね係数 | MN/m 0.5394 |
| | 減衰係数 | kNs/m 40 |
| 軸距 | m | 2.1 |
| 列車速度 | km/h | 70 |
| レール種別 | 50N | |
| 継目板の連結ばね | GN/m | 10 |
| 道床厚さ | mm | 200 |
| 上層厚さ | mm | 75 |
| 中層厚さ | mm | 75 |
| 下層厚さ | mm | 50 |
| 道床沈下則パラメータ | | |
| a | mm/軸 | 2.7×10^{10} |
| b | kPa | 38.6 |
| \ddot{y} | | 1.14 |
| 時間増分 | s | 1/20000 |

表 3 まくらぎ種別毎の質量、支持ばね係数、減衰係数 (軌道片側)

| | | まくらぎ種別 | | | | 備考 | |
|------------|-----------------------|------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------|--|
| | | 3号PC | 継目用PC | 並まくらぎ | 大盤まくらぎ | | |
| まくらぎ | 寸法(mm) | 174×240×2000 | 170×300×2000 | 140×200×2100 | 140×300×2100 | 木まくらぎ:文献[7]、PCまくらぎ:コンクリート重量の1/2 | |
| | 質量(kg) | 80 | 129 | 30 | 45 | | |
| | まくらぎ圧縮ばね | --- | --- | 100 | 100 | | |
| | まくらぎ曲げばね | --- | --- | 409.2 | 612.7 | | |
| | 道床上部支持ばね | 563.2 | 704 | 492.8 | 77.0 | | |
| | 道床下部支持ばね | --- | --- | --- | --- | | |
| 長渡 | 減衰(kNs/m) | 98 | 98 | 98 | 98 | 文献[6]に準拠 | |
| | 下面面積(m ²) | 0.24 | 0.3 | 0.21 | 0.315 | | |
| | 質量(kg) | 30.6 | 38.3 | 26.8 | 40.2 | | 質量密度ρ _B 1700kg/m ³ :文献[7] 弾性係数E _B 88MN/m ² :文献[12] 各層の質量:各層の体積V×ρ _B 各層の支持ばね係数: $E_u \times \left[\int_0^{h_i} \frac{1}{A(z)B(z)} dz \right]^{-1}$ 各層の減衰係数:文献[6] |
| | 支持ばね(MN/m) | 281.6 | 352 | 246.4 | 369.6 | | |
| | 減衰(kNs/m) | 980 | 980 | 980 | 980 | | |
| | 質量(kg) | 30.6 | 38.3 | 26.8 | 40.2 | | |
| | 支持ばね(MN/m) | 344.8 | 429.2 | 302.9 | 450.7 | | |
| | 減衰(kNs/m) | 980 | 980 | 980 | 980 | | |
| | 質量(kg) | 25.3 | 30.5 | 22.9 | 32 | | |
| | 支持ばね(MN/m) | 1235.8 | 1454.3 | 1142.8 | 1523.7 | | |
| | 減衰(kNs/m) | 980 | 980 | 980 | 980 | | |
| | 路盤 | 平均路盤圧力の分布面積(m ²) | 0.714 | 0.84 | 0.66 | | |
| 支持ばね(MN/m) | | 64.9 | 76.4 | 60.0 | 80.0 | | |
| 減衰(kNs/m) | | 98.0 | 98.0 | 98.0 | 98.0 | | |

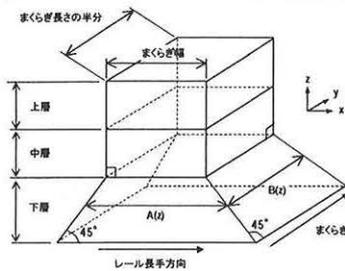


図3 道床質量およびまくらぎと道床の支持ばね係数設定のための道床モデル¹¹⁾

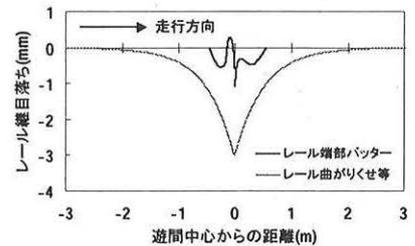
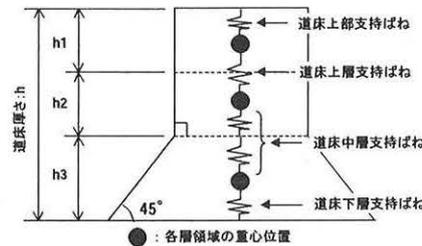


図4 レール継目落ち形状(遊間11mm)

ッター、長波長の継目落ちであるレール曲がりくせ等の2種類を考慮した(図4)。レール端部バッテリーには実測波形を用いた。レール曲がりくせ等には、その形状 y を以下に示す指数関数で表現した場合の曲線形状を用いた¹³⁾。

$$y = h \cdot \exp(-\alpha x) \quad \dots \dots \dots (2)$$

h : 最大落ち込み量 (mm) (ここでは 3mm に設定)

α : 0.002 (mm⁻¹)

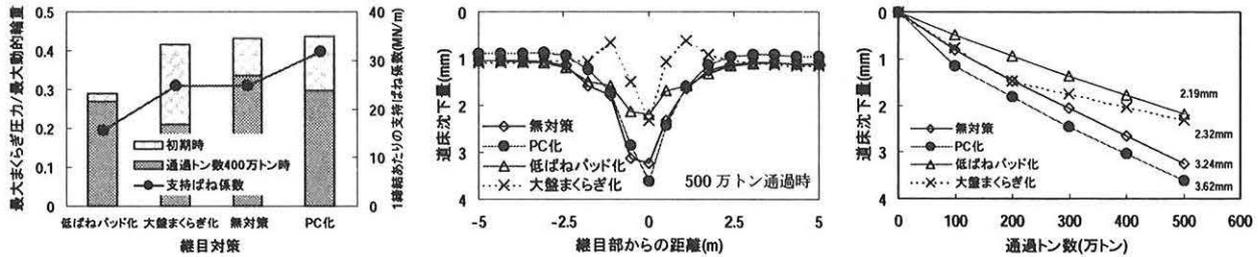
x : レール長手方向の距離(mm)

<3.3>解析結果

レール継目落ち形状としてレール端部バッテリーを用いた場合の道床沈下解析より得られた継目部直下の最大まくらぎ・道床間作用力(以下、「まくらぎ圧力」と称する)と最大動的輪重の比、道床面沈下形状および通過トン数に対する道床沈下量の推移を図5に示す。図5(a)より、初期時における継目部の最大まくらぎ圧力/最大動的輪重は、1締結あたりの支持ばね係数に依存しており、低ばね化することで小さくなることわかる。一方、通過トン数400万トン時の場合はどの継目対策でも最大まくらぎ圧力/最大動的輪重が初期時に比べて低下している。これは、道床沈下に伴った浮きまくらぎの影響で、支持ばね係数が低下したためと考えられる。図5(b)より、道床沈下は継目部を中心に生じているが、低ばねパッド化は他の対策に比べて道床沈下量が小さく、道床面沈下形状の変化率が最も緩やかになった。大盤まくらぎ化は継目部前後まくらぎ4本分で道床沈下量が小さくなっているが、これは敷設した大盤まくらぎの下面面積の影響でまくらぎ下面圧力が小さくなった

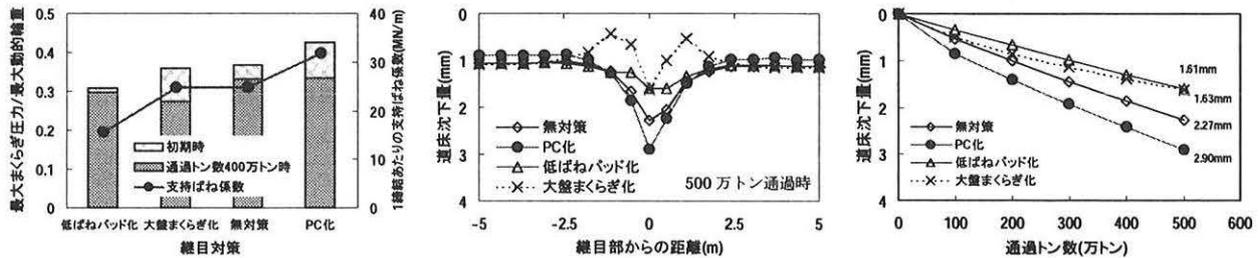
ためである。継目部まくらぎと前後まくらぎとの沈下量の差について見ると、PC化、大盤まくらぎ化で大きくなった。道床沈下量の大きさは、図5(a)に示す最大まくらぎ圧力/最大動的輪重や支持ばね係数の大きさに対応していることがわかる。図5(c)より、通過トン数500万トン時の継目部の道床沈下量は、無対策に対してPC化は約10%増加、低ばねパッド化と大盤まくらぎ化は約30%低下した。道床沈下曲線の傾きは、無対策に対してPC化は同程度、低ばねパッド化と大盤まくらぎ化は小さくなった。ただし、大盤まくらぎ化は通過トン数200万トン以降から傾きが急に小さくなっている。この理由として、継目部の浮きまくらぎによる影響が挙げられる。これは、初期時に比べて通過トン数400万トン時の継目部に作用する荷重分担の低下分が大きいこと(図5(a))、継目部まくらぎとその前後まくらぎとの沈下量差が大きいこと(図5(b))と対応している。そのため、500万トン時の道床沈下量が同程度でも、浮きまくらぎの程度が小さく、道床面沈下形状の緩やかな低ばねパッド化の方がまくらぎのあおり防止、それに伴う長波長継目落ち生成の防止の観点からも優れていると考えられる。

次に、レール継目落ち形状としてレール曲がりくせ等を用いた場合の道床沈下解析結果を図6に示す。長波長の継目落ちであるレール曲がりくせ等の場合でも、短波長の継目落ちであるレール端部バッテリーと同様の結果が得られた。特に、図6(c)より、通過トン数500万トン時の継目部の道床沈下量は、無対策に対してPC化は約30%増加、低ばねパッド化と大盤まくらぎ化は約30%低下した。また、道床沈下曲線の傾きは、無対策に対してPC化はやや大きくなり、低ばねパッド化と大盤まくらぎ化は小さくなった。



(a) 継目部の最大まくらぎ圧力/最大動的輪重 (b) 道床面沈下形状 (c) 継目部の道床沈下量の推移

図 5 レール端部バッターに対する道床沈下量の解析結果 (遊間 11mm、速度 70km/h)



(a) 継目部の最大まくらぎ圧力/最大動的輪重 (b) 道床面沈下形状 (c) 継目部の道床沈下量の推移

図 6 レール曲がりくせ等に対する道床沈下量の解析結果 (遊間 11mm、速度 70km/h)

以上より、継目落ち形状のある継目部では短・長波長の継目落ちに依らず継目部が最も道床沈下し、継目対策によって道床沈下量が最大 30%程度低下した。しかし、動的輪重発生観点から、軌道構造側の対策だけではなく継目部におけるレール頭頂面管理も必要であると考えられる^{4),14)}。

4. おわりに

レール継目部動的解析モデルによる道床沈下予測モデルを用いて、各種継目対策の評価を解析的に検討した。その結果、低ばねパッドの敷設は無対策に比べて道床沈下量が約 30%低下する結果となった。しかし、これはあくまで一計算例であり、本予測モデルは以下の点についてまだ不十分であるため、精度向上を図るために今後も検討が必要である。

- 1) 継目部で生じるまくらぎ・道床間作用力や振動の実態把握。特に振動に関して、道床沈下則では継目対策の影響が直接反映されないため、今回の解析結果の評価には注意が必要である。
- 2) 継目部における軌道沈下の実態把握、予測モデルとの比較。
- 3) 動的輪重に影響する継目落ち形状とその進みの実態把握。

参考文献

- 1) 鈴木 貴洋, 石田 誠, 阿部 和久, 紅露 一寛: レール継目部で生じる輪重変動に関する一考察, 鉄道力学論文集第 8 号, pp.35-40, 2004.
- 2) 鈴木 貴洋, 石田 誠, 阿部 和久, 紅露 一寛: レール継目部動的挙動の実測と解析結果, 鉄道総研報告, Vol.18, No.8, pp.29-34, 2004.
- 3) 鈴木 貴洋: レール継目部動的挙動の実測と沈下予測, 第

173 回鉄道総研月例発表会講演要旨, 2004.

- 4) 小山内 政廣: 新しい継ぎ目構造の研究, 土木学会論文集, No.675, I-55, pp.87-97, 2001.
- 5) 堀池 高広, 向井 明, 桃谷 尚嗣, 安藤 勝敏: レール継目部の沈下対策工法の開発, 鉄道総研報告, Vol.17, No.2, pp.17-22, 2003.
- 6) 石田 誠, 内田 雅夫, 小野 重亮: 軌道動的応答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.
- 7) 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.
- 8) 片岡 宏夫, 阿部 則次, 若月 修, 及川 祐也: レール継目部の梁モデルによる動的応力解析, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, pp.283-284, 2002.
- 9) 紅露 一寛, 阿部 和久, 石田 誠, 鈴木 貴洋: レール継目を考慮した振動解析モデルによる軌道系の衝撃応答の評価, 第 21 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集 (CD-ROM), 2003.
- 10) 古川 敦: 地方交通線における軌道の保守, RRR, pp.22-25, 2004.3.
- 11) 名村 明, 石川 達也, 三浦 重, 内田 雅夫, 堀池 高広: 有道床軌道の道床沈下の定量化に関する基礎的検討, 鉄道総研報告, Vol.7, No.10, pp.47-54, 1993.
- 12) 大塚 勝, 村本 勝巳, 関根 悦夫: 鉄道路盤の列車荷重作用時における応力分布に関する解析的検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会概要集, pp.1595-1596, 2002.
- 13) 佐藤 吉彦: 新軌道力学, 鉄道現業社, 1997.
- 14) 松浦 淳, 大場 久長, 田中 洋二: 一頭式レール削正機による乗り心地向上対策, 新線路, 第 58 巻, 第 7 号, pp.16-19, 2004.