

まくらぎ間隔拡大に対応した バラスト軌道の設計法

弟子丸 将* 山岡 大樹* 伊藤 壱記** 清水 紗希*

Design Method for Ballasted Track Applicable to Widening of Sleeper Spacing

Tadashi DESHIMARU Daiki YAMAOKA Kazuki ITO Saki SHIMIZU

A design method for ballasted track, which is applicable to the case of widening sleeper spacing, considering the condition of ballast and track bed and the quality of maintenance, was proposed. The method was considered to be a complement to the conventional design method, defined in the Railway Structure Design Standard – Track Structure. On the basis of the proposed method, we conducted the simulation of train running on the condition of various curve radii, and clarified the limit sleeper spacing which secures running safety. Moreover, we conducted a trial calculation regarding the propriety of widening of sleeper spacing using the method.

キーワード：バラスト軌道，設計法，まくらぎ間隔，走行安全性，道床，レール締結装置

1. はじめに

近年，特に地域鉄道のバラスト軌道において，走行安全性確保のためPCまくらぎ化するニーズがある。また，保守管理のコスト低減の一環として，既設のバラスト軌道のまくらぎ間隔を拡大することによる設備投資と管理コストの低減に対する要望がある。しかしながら，まくらぎ間隔を拡大すると列車荷重を支えるまくらぎ本数が減少し，軌道部材への負担が増加するため，場合により軌道の安定性を損なう恐れがある。

一方，軌道構造および軌道を構成する軌道部材の設計・性能照査方法については，2012年に発行された「鉄道構造物等設計標準・同解説（軌道構造）」（以下，軌道構造標準¹⁾）において明文化され，既に軌道の設計において活用されているが，軌道構造標準は新設線の軌道の設計に用いることが基本であり，既設線における地域鉄道特有の軟弱地盤や，細粒土の混じったバラストについて十分な対応ができないという課題があった。このため，まくらぎ間隔拡大の実施に当たっては供用条件を考慮した設計手法の確立が急務であった。

ここで，地域鉄道の既設線を対象として敷設間隔を拡大したPCまくらぎ化を検討する場合の走行安全性に関する懸念事項を以下に列挙する。

- (1) 路盤・道床の状態が必ずしも良好でないため，軌道の沈下，横変形が急速に進み，走行安全性が損なわれる恐れがある。
- (2) レール締結装置1組に対する列車荷重の作用が

大きく，レール締結装置の連続不良が発生しやすくなるため，軌間拡大による走行安全性が損なわれる恐れがある。

- (3) 軌道の整備状態が良好でないため，浮きまくらぎが発生しやすく，(1) および (2) の影響がさらに大きくなる恐れがある。

そこで筆者らは，従来の設計手法である軌道構造標準を補完する位置づけとして，既設線のバラストや路盤条件，管理レベルなどの供用条件を反映し，まくらぎ間隔拡大に対応できるバラスト軌道の設計手法を提案した。次に，この手法に基づき，走行安全性を確保できるまくらぎ間隔の限度を走行シミュレーションにより曲線半径別に把握した。さらに，提案した設計手法を用いて，まくらぎ間隔拡大の可否に関する試算を行った。

2. まくらぎ間隔拡大を考慮した設計法

2.1 設計法の概要

提案した設計法は軌道構造標準を補完するものであり，特徴として以下の点を挙げるができる。

- (1) 実物大載荷試験により，まくらぎ間隔・道床状態が軌道沈下に与える影響を評価し，バラスト軌道の適用限界と設計標準の軌道沈下式に用いる係数を提案した。
- (2) まくらぎ1本引きの最終道床横抵抗力より，任意のまくらぎ間隔における群杭効果を考慮した軌道1mあたりの道床横抵抗力を求める推定式を提案した。
- (3) レール締結装置の性能照査に用いる変動輪重係数について，供用条件に対応する算定法と在来線に

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室

** 軌道技術研究部 軌道・路盤研究室

適用可能な値を提案した。

これらの項目について実施した検討の内容と結果を次節以降に概説する。

2.2 まくらぎ間隔と軌道沈下の関係

実物大模型を用いた繰返し載荷試験により、まくらぎ間隔拡大を想定した載荷荷重と沈下量の関係を求め、急速な沈下が生じないバラスト軌道の条件（以下、限界条件）を検討した。さらに、現行の軌道構造標準の軌道沈下式（以下、設計標準式）の適用性を検証した。

設計標準式では、軌道沈下量 β_{zi0} は、式(1)に示す通り、道床沈下係数 β_{zbi0} と路盤沈下量 β_{zsb0} の和である。道床沈下係数 β_{zbi0} は、式(2)に示す通り、係数 α 、軌道ばね係数 K 、まくらぎ下面圧力 P_{ti0} および有効まくらぎ底面積 S_T' から求めており、係数 α は新品バラストにおける沈下特性を基に設定されている。

$$\beta_{zi0} = \beta_{zbi0} + \beta_{zsb0} \quad (1)$$

$$\beta_{zbi0} = \alpha(S_T' P_{ti0})/K \quad (2)$$

実物大模型はまくらぎ1本のバラスト軌道とし、地盤反力係数 K_{30} 値が $50\text{MN}/\text{m}^3$ の路盤上に構築した(図1)。なお、本試験は路盤の塑性変形が生じない条件で行っているため、路盤沈下量 β_{zsb0} は0である。

載荷回数10万回時におけるまくらぎ変位振幅および路盤変位振幅を図2および図3に示す。まくらぎ変位振幅は、載荷荷重の全振幅および道床内の細粒分含有率（以下、Fc）が大きいほど増加する傾向を示した。なお、本試験は載荷30万回以内にまくらぎ変位が30mm以上生じた場合、その時点で中断した。試験を中断したケースでは、まくらぎ変位振幅が4.0mm以上、路盤変位振幅は2.5mm以上であった。

載荷5万回から10万回までの沈下の傾きから定義したまくらぎ沈下進み β_t (図4) を基に、任意のFcにおける係数 α' の推定方法を検討した。Fc0%, 4%および12%の場合に対する近似式を式(3)に示す。係数 C_{Fci} および D_{Fci} は、式(4)および式(5)から任意の F_c における係数 C_{Fc} および D_{Fc} の値を算出した。さらに任意の F_c における係数 C_{Fc} および D_{Fc} を用いて、式(6)により任意の荷重 P における沈下進み（以下、実験式） β_{tF_c} を推定した。

$$\beta_t = C_{Fci} P_i + D_{Fci} \quad (3)$$

$$C_{Fc} = -1.6559 \times 10^{-8} F_c + 3.3610 \times 10^{-7} \quad (4)$$

$$D_{Fc} = 6.0743 \times 10^{-6} F_c - 1.6723 \times 10^{-5} \quad (5)$$

$$\beta_{tF_c} = C_{Fc} P + D_{Fc} \quad (6)$$

式(7)から式(9)により任意のFcにおける係数 α を算出した。推定した係数 α' は式(10)の通り、Fc0% (新

載荷荷重の全振幅
64kN, 96kN, 128kN

道床状態
細粒分含有率Fc: 0%, 4%, 8%, 12%
(Fc: 粒径0.075mm未満の割合)

図1 繰返し載荷試験

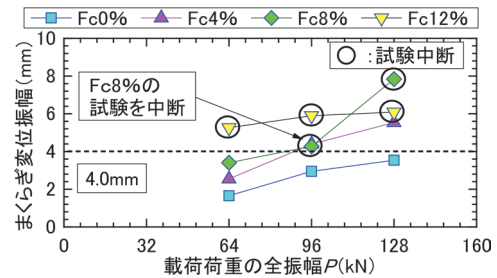


図2 まくらぎ変位振幅

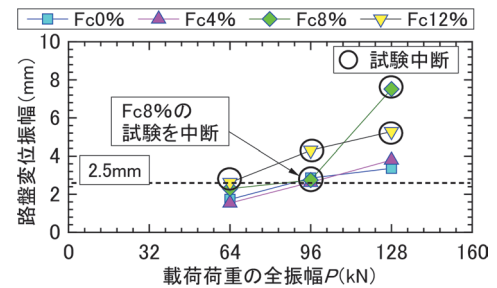


図3 路盤変位振幅

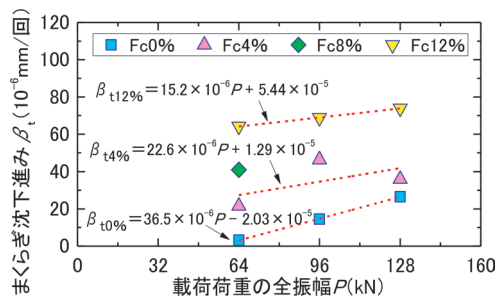


図4 まくらぎ沈下進み β_t

品バラスト)では 13.6×10^{-6} であり、現行の係数 α (14.7×10^{-6}) と概ね同程度となった。

$$\beta_{tF_c} = \beta_{zbi0} \quad (7)$$

$$C_{Fc} P + D_{Fc} = \alpha(S_T' P_{ti0})/K \quad (8)$$

$$\alpha = (C_{Fc} P + D_{Fc}) K / (S_T' P_{ti0}) \quad (9)$$

$$\alpha' = 3.84 \times 10^{-6} F_c + 13.6 \times 10^{-6} \quad (10)$$

式(8)の検証を行うため、試験結果の沈下進み β_t と係数 α' を用いた設計標準式から算出した沈下進み β_{zbi0} の比較を行った(図5)。設計標準式は沈下進み $50 \times 10^{-6} \text{mm}/\text{回}$

以下の範囲では概ね一致したものの、沈下進み 50×10^{-6} mm/回以上では試験結果との相関が低かった。

以上の検討結果より、設定する軌道条件に対して、まくらぎ変位振幅が4.0mm以内、路盤変位振幅が2.5mm以内でかつ、沈下進みが 50×10^{-6} mm/回以下の範囲をバラスト軌道の設計が可能な限界条件とした。

2.3 まくらぎ間隔と道床横抵抗力の関係

軌きょう状態のまくらぎ1本あたりの道床横抵抗力は、隣接するまくらぎの影響（以下、群杭効果）により、まくらぎ1本の横引き試験から得られる道床横抵抗力も小さくなる（図6）。そこで、1/5スケール軌道模型（図7）を用いたまくらぎ横引き試験によりまくらぎ間隔と道床横抵抗力の関係を検討²⁾した上で、実物大軌道模型によりその妥当性を検証した。

まくらぎ1本引きの最終道床横抵抗力に対するまくらぎ5本引きの1本あたりの最終道床横抵抗力の割合を群杭効率 η と定義する。任意のまくらぎ幅およびまくらぎ間隔における群杭効率を把握するため、まくらぎ幅 SW をまくらぎ間隔 SS で除した値 (SW/SS) と群杭効率 η の関係を整理した（図8）。群杭効率とまくらぎ幅/まくらぎ間隔の関係から群杭効率 η は、式(11)により推定されている。式(10)を用いて任意のまくらぎ幅およびまくらぎ間隔における最終道床横抵抗力は、式(12)で推定することができる。

$$\eta = 31.2(SW/SS)^2 - 76.3(SW/SS) + 104 \quad (11)$$

$$R_{5-10}^{Track} = \{\eta \times (R_{5-10}^{single} + \mu_b \times \Delta W)\} / SS \quad (12)$$

ここに、 μ_b はまくらぎとバラスト間の摩擦係数、 ΔW はまくらぎ間隔拡大に伴うまくらぎが負担する1本あたりのレール荷重の増加分 (N/本) である。

図9に推定式から求めた軌道1mあたりの道床横抵抗力と3号PCまくらぎを用いた実物大軌道模型のまくらぎ横引き試験結果の関係を示す。同図より、まくらぎ間隔を拡大するとともに軌道1mあたりの道床横抵抗力は減少し、その減少傾向は群杭効果を含んだ道床横抵抗力の推定式と概ね一致した。

2.4 使用条件に応じた変動輪重係数

レール締結装置の安全性の照査では、設計輪重（静的輪重）に変動係数（表1）を乗じて設計作用を算定し、これを適用した二方向荷重試験を実施して得られる応答値を限界値と比較する。

一般部用のレール締結装置の変動係数は表1に示す値であるが、これらは安全側となるよう経験的に設定されたものであり、必ずしも軌道の実態を考慮、反映したものではない。そこで、軌道支持状態の影響を考慮し、

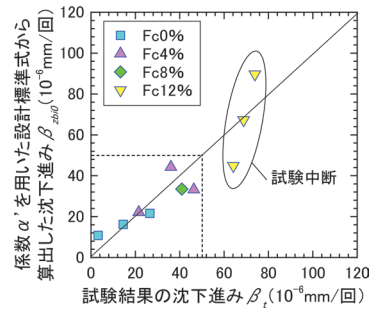


図5 試験結果と係数 α' を用いた設計標準式の比較

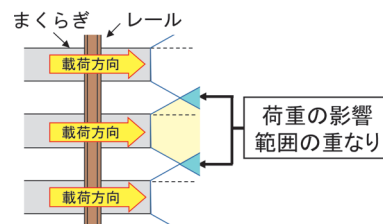


図6 群杭効果の概念図

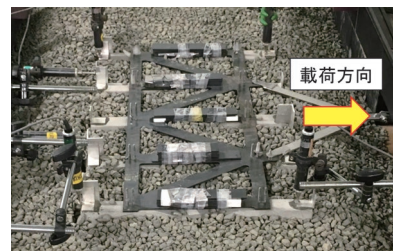


図7 1/5スケール軌道模型

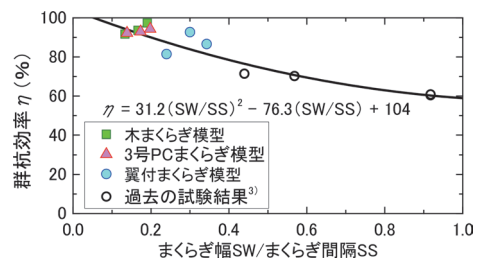


図8 群杭効率の推定式²⁾

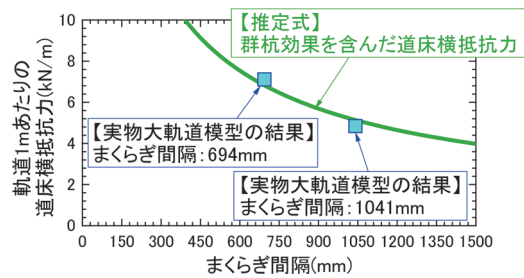


図9 道床横抵抗力の推定式の検証

軌道の使用条件を反映した変動輪重係数の検討を行った。検討にあたり、軌道の支持状態がレール締結装置一組に作用する設計作用の鉛直方向成分に相当するレール圧

表1 現行の変動係数（在来線）

荷重種別	直線・曲線 [m]	変動係数	
		A 荷重	B 荷重
輪重	直線・曲線	1.3	1.15
横圧	$R \geq 800$	0.4	0.2
	$800 > R \geq 600$	0.6	0.3
	$600 > R$	0.8	0.4

力に及ぼす影響を明らかにする。このため、過去に開発したレール小返り解析モデル⁴⁾を軌道支持状態が設定できるよう拡張した。この拡張モデルに対して、営業線で測定されたまくらぎの浮き量のデータを個々のまくらぎ下に設定し、レール圧力に及ぼす影響を評価した⁵⁾。

図10に実測された浮き量⁶⁾と同じ箇所でも推定したレール圧力の関係を示す。適正支持されたまくらぎの両側に4~5本分の連続した浮きが生じているような軌道支持状態の悪い場合においてレール圧力が顕著に増加する傾向が確認できる。また、図10に示したレール圧力の推定値を、同じく図10に示した全てのまくらぎが適正支持され浮きの無い場合のレール圧力の推定値で除した比をレール圧力比と定義し、その度数分布を整理した(図11)。その結果、まくらぎが連続して浮いているような軌道支持状態の悪い箇所では(平均+3×標準偏差)を超過する突出した値(1.36)となるものの、これらを除外すればレール圧力比は最大で1.13であった。

ここで、過去の知見より一般部における輪重変動は静的輪重の10%まで見込めば十分であることが明らかとなっている¹⁾。したがって、輪重の定常分の割増に相当する前述のレール圧力比1.13に対して輪重変動の影響まで考慮した場合の静的輪重に対する割増は $1.13 \times 1.1 \div 1.24$ であり、現行の変動輪重係数に対して安全側の値である。以上の考察により、実際の軌道支持状態を考慮した場合の変動輪重係数は、安全余裕を見込んで現行の設計A荷重の算定に用いられる1.3を引き続き適用することが妥当と判断された。

3. 走行安全性確保のためのまくらぎ間隔限度

まくらぎの間隔を拡大する場合、列車走行時のレールの変形量が増大し、列車の走行安全性を損なう可能性がある。そこで、走行解析による検討を行った。車両は在来線の通勤車両とし、軌道は初期不整のない理想的な条件を想定したJIS 50kgNレールを用いたバラスト軌道とした。走行安全性の指標については、脱線係数および輪重減少率を用い⁷⁾、脱線係数の目安値は車輪踏面形状のフランジ角度を考慮した0.95とした。また輪重減少率は動的輪重減少率を評価対象とし、その目安値を0.8とした。解析条件を表2に示す。各曲線半径において、

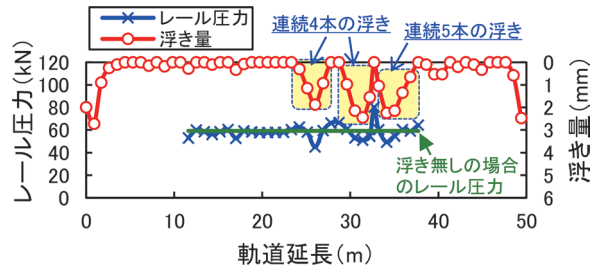


図10 浮き量とレール圧力の結果

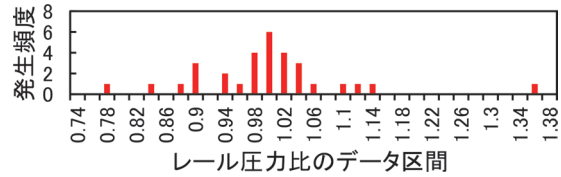


図11 レール圧力比の度数分布

表2 解析条件

曲線半径 R(m)	160	300	600	800
カント(mm)	103	103	103	103
走行速度(km/h)	44	61	86	99

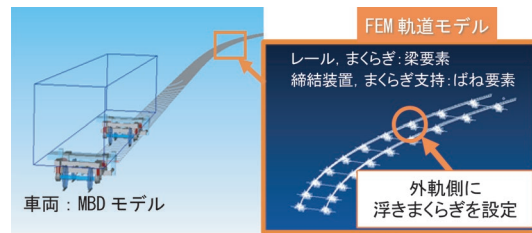


図12 解析モデル

まくらぎ間隔を0.6mから3.6mとした場合の解析を実施した。なお、走行速度は曲線本則⁸⁾により、カントは曲線半径、走行速度より求めた均衡カント⁸⁾とした。

計算に使用したのは汎用マルチボディダイナミクス(MBD)解析ソフトSimpack⁹⁾で、車両はMBDモデルである。ただし、軌道はFEMモデルであり、軌道の離散支持状態を模擬することが可能である¹⁰⁾。FEMモデルを効率的に計算するため、車輪との相互作用を考慮するレール梁要素の節点に自由度を縮退して計算を行う。図12に解析モデルの概要を示す。

例として、曲線半径160m、まくらぎ間隔2.5mの場合の解析結果を図13に示す。横軸の目盛線はまくらぎ位置を示す。ここで、グラフ中央のまくらぎ1本に外軌側の浮きを想定し、外軌側のまくらぎ支持剛性を0にしている。なお、浮きまくらぎ手前の25mのまくらぎ(支持まくらぎ)では、全て所定の支持状態とした場合の定常状態とほぼ合致することを確認しており、以下ではこれらを浮きのない理想条件での解析結果として論じる。

理想条件では、輪重、横圧ともにまくらぎ直上におい

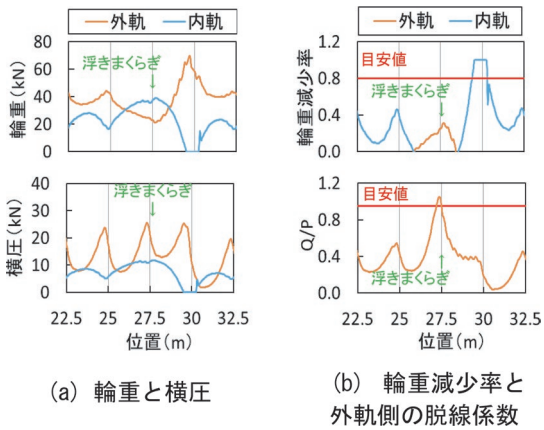


図 13 走行解析結果 (R160m, まくらぎ間隔 2.5m)

外軌側で増加し、内軌側で減少している。脱線係数は、まくらぎ直上で横圧が増加しているが、同時に輪重も増加しており、目安値には達していない。また、輪重減少率はまくらぎ直上において内軌側で増加するが目安値には達していない。一方、浮きまくらぎ箇所を支持まくらぎ箇所と比較すると、輪重は外軌側で減少し、内軌側で増加している。また浮きまくらぎの次のまくらぎ直上で外軌側において顕著な増加がみられ、内軌側で顕著な減少がみられる。横圧は浮きまくらぎの位置でやや増加する傾向が見られた。脱線係数については浮きまくらぎ箇所目安値を超過した。輪重減少率は、浮きまくらぎの次のまくらぎで内軌側で大きく目安値を超過した。

他の曲線半径についても同様の解析を実施した。まくらぎ間隔と脱線係数および輪重減少率の最大値を整理した結果を図 14 に示す。曲線半径 (R と表記する) が小さいほど目安値を超過するまくらぎ間隔が小さくなる傾向が見られ、浮きまくらぎを設定すると、これはさらに縮小し 2m 程度となった。今回は限定された条件での検討であるが、1m 程度のまくらぎ間隔拡大であれば直ちに重大な影響を及ぼさない結果となった。

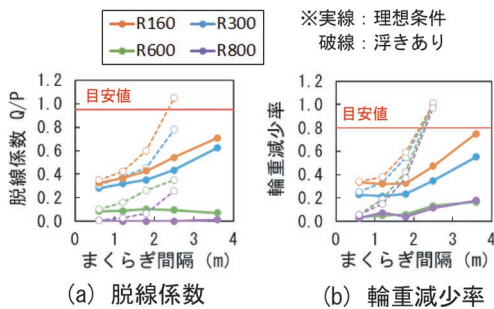


図 14 まくらぎ間隔と走行安全性

4. 提案した設計法による試算例

本章では、2 章で提案した設計手法を用いて営業線条

件を念頭に実施したまくらぎ間隔拡大に関する試算の例を示す。

4.1 試算の条件

表 3 に本章で実施する試算条件を示す。PC まくらぎ種別は地域鉄道を念頭に低廉化まくらぎ (以下、TPC まくらぎ)、まくらぎ間隔は現在 694mm¹¹⁾ としている箇所を 1041mm に拡大するケースを想定し、レール締結装置は線ばね式レール締結装置、車両の設計軸重は 100kN とした。

この条件に基づき、軌道沈下量、道床横抵抗力、レール締結装置の性能照査の各項目について検討を行った。

4.2 1 年間の軌道沈下量の推定

2.2 節に示した知見に基づき、表 3 の条件において、まくらぎ間隔を 694mm から 1041mm に拡大した場合における 1 年間の軌道沈下量と F_c の関係を求めた (図 15)。同図より、 F_c が増加するとともに軌道沈下量は増加する傾向を示した。また、まくらぎ間隔を拡大することで軌道沈下量は 2 倍程度に増加した。

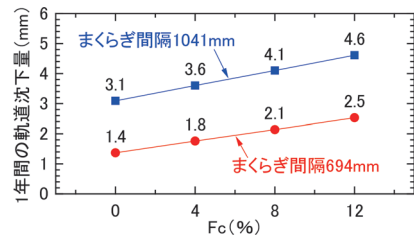


図 15 まくらぎ間隔と 1 年間の軌道沈下量の関係

4.3 道床横抵抗力の推定

2.3 節に示した知見に基づき、TPC まくらぎの道床横抵抗力は、文献 12 を参考に 3.1kN/本 (水平変位 2mm 時) と仮定した。まくらぎ間隔 694mm および 1041mm の軌道 1m あたりの道床横抵抗を求めた (図 16)。同図より、推定した軌道 1m あたりの道床横抵抗力は、まくらぎ間隔 694mm で 3.4kN/m、1041mm で 2.8kN/m となり、18% 程度低下した。レール軸力が高まり著大な通

表 3 試算の基本条件

項目	条件
軌道構造	バラスト軌道・定尺レール区間
軌道線形	直線
設計軸重	100kN
列車速度	80km/h
列車通過軸数	20 万回/年
レール種別	JIS 50kgN レール
まくらぎ種別	低廉化 PC まくらぎ (TPC まくらぎ)
まくらぎ間隔	694mm から 1041mm に拡大
レール締結装置	線ばね式レール締結装置 (SST 形)
軌道バッド	110MN/m
道床厚	200mm
道盤剛性 K_{30} 値	50MN/m ³

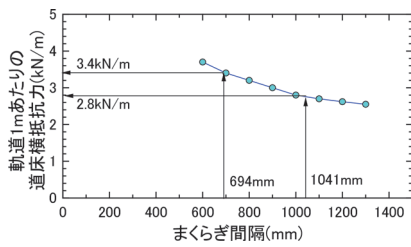


図 16 まくらぎ間隔と軌道 1m あたりの道床横抵抗力

り変位が生じるリスクを抑制するため、継目部で無遊間とならないよう遊間管理を強化する必要があると考える。

4.4 レール締結装置の照査

2.4 節に示した知見を踏まえ、レール締結装置については、対象となった TPC まくらぎと組み合わせて使用する線ばね式レール締結装置 (SST 形) に対し、表 3 の試算条件よりも更に厳しい評価となる、表 4 に示す条件で疲労破壊に関する安全性の照査を実施した。

その結果、図 17 に例示するように締結ばねの発生応力とレール頭部左右変位のいずれについても設計限界値以内となり、試算条件で安全性を満足した。

表 4 レール締結装置の性能照査の条件

項目	条件
新幹線・在来線	在来線
軌道線形	半径 800m 以上の曲線および直線
設計軸重	150kN (>100kN)
まくらぎ間隔	1200mm (>1041mm)

※ 下線部は表 3 の試算条件よりも厳しい条件
 ※ 上記以外は表 3 に示す条件を採用

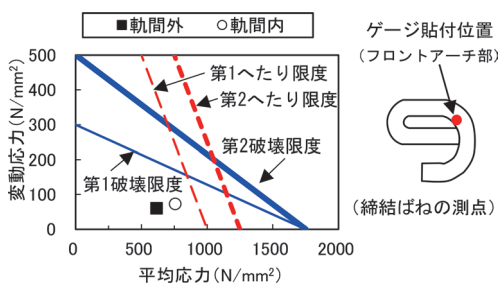


図 17 レール締結装置の照査例 (締結ばね応力)

4.5 試算の結果と留意点

4.2 節から 4.4 節に示した試算の結果より、4.1 節に示した条件において、まくらぎ間隔拡大を 694mm から 1.5 倍の 1041mm に拡大可能であることが分かった。

なお、本試算はレール底部曲げ応力とまくらぎについては性能を満足することを前提として実施した。実際に試算の条件でまくらぎ間隔を拡大する場合は、この前提が成り立つか事前に確認する必要がある。また、まくらぎ間隔を拡大することで軌道沈下量は増加し、軌道

1m あたりの道床横抵抗力は低下するため、拡大後も現状の保守管理レベルを維持することを前提としている点に留意が必要である。

5. まとめ

本稿に述べた内容をまとめると以下の通りである。

- (1) 新設線の軌道の設計に用いる軌道構造標準を補完する位置づけとして、既設線の使用条件を反映し、まくらぎ間隔拡大に対応できるバラスト軌道の設計手法を提案した。
- (2) 提案手法を用いて走行安全を確保できるまくらぎ間隔の限度を走行シミュレーションにより曲線半径別に把握した。
- (3) 提案手法を用いてまくらぎ間隔拡大の可否に関する試算を実施した。その結果、適切に保守を実施することを前提として、一例としてまくらぎ間隔を 1041mm まで拡大できる見通しを得た。

なお、1/5 スケール軌道模型を用いたまくらぎ間隔と道床横抵抗力の検討結果は、国立大学法人横浜国立大学との共同研究により得られた成果である。

文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善出版, 2012
- 2) Koyama, E., Ito, K., Hayano, K., Momoya, Y. (2021). A new approach for evaluating lateral resistance of railway ballast associated with extended sleeper spacing, soils and Foundations.
- 3) Koike, Y., Nakamura, T., Hayano, K., & Momoya, Y. (2014). Numerical method for evaluating the lateral resistance of sleepers in ballasted tracks, soils and Foundations, 54(3), 502-514.
- 4) 玉川新悟, 片岡宏夫, 弟子丸将: レールの小返り解析モデルの提案とレール締結装置の性能評価試験への応用, 土木学会論文集 A1 (構造力学), Vol.73, No.2, 2017
- 5) 弟子丸将, 片岡宏夫, 園田佳巨: 軌道の支持状態がレール締結装置に作用する荷重分散に及ぼす影響の研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.22, 2018.7
- 6) 楠田将之, 松本麻美, 片岡宏夫: 軌道変位データに基づく浮きまくらぎ検出手法, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.74, No.2, 2018
- 7) 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 研友社, 1993
- 8) 須田征男, 長門彰, 徳岡研三, 三浦重: 新しい線路, 日本鉄道施設協会, 1997
- 9) ダッソーシステムズ社ホームページ: <https://www.3ds.com/ja/> (参照日: 2022 年 1 月 13 日)
- 10) 西宮裕騎, 細田充, 田中博文, 清水紗希: 軌道変位およびレール凹凸を考慮した走行シミュレーション手法の構築, 日本鉄道施設協会誌, 第 55 巻, 第 12 号, 19-22, 2017.12
- 11) 藪中嘉彦, 高尾賢一: 下級線に適した PC まくらぎ化の検討, 日本鉄道施設協会誌, 2018.4
- 12) 伊藤彦記, 桃谷尚嗣, 木次谷一平: 細粒土混入率が高いバラスト軌道における道床横抵抗力試験, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2016.7