

PC まくらぎ化計画作成システムの開発

金丸 清威* 三和 雅史* 片山 雄一朗**

Decision Support System for Replacement Planning of Wooden Sleepers to PC Sleepers

Seii KANEMARU Masashi MIWA Yuuichirou KATAYAMA

In the track structures using wooden sleepers, rail fastening condition would be weakend, when suitable maintenance of wooden sleepers is not executed. If the bad condition is continued, the gauge will be enlarged and derailment accident will eventually occur. Therefore, the condition of the wooden sleepers is an important inspection item, in order for railway companies to prevent the occurrence of the accident, and replacing work of degraded sleepers should be executed placing priority on the worse sleepers. In addition to such maintenance for eliminating the derailment occurrence probability, some railway companies are replacing wooden sleepers with concrete sleepers. However, a large amount of initial cost is necessary for executing the replacement. Therefore, we have developed a decision support system to draw up a plan to select effectively an appropriate curve when the sleepers are to be replaced in terms of improving running safety. In this paper, we report on the contents and function of the system.

キーワード：木まくらぎ、PC まくらぎ化、軌間内脱線、費用対効果

1. はじめに

下級線区や地域鉄道の多くで使用されている木まくらぎ構造の軌道では、まくらぎの腐朽などの進行によって、レール締結状態が不良になることが想定される。この不良が列車進行方向に対して連続的に存在すると、車両の通過時に作用する横圧によって軌間が拡大し、軌間内に車輪が落下する、軌間内脱線が生じる可能性が高まる。そのため、木まくらぎの状態は重要な検査項目であり、安全性が低いと判断された箇所については、健全な木まくらぎに交換されるのが一般的である。一方、このような木まくらぎから木まくらぎへの交換ではなく、そもそも腐朽する心配が無いPCまくらぎに交換する「PCまくらぎ化」によって安全性を向上する施策が行われることがある。特に近年では、施設の近代化として、鉄道事業者によっては国や自治体からの補助金により、こうした施策が推進されている。このPCまくらぎ化の方法としては、連続的あるいは部分的に交換する方法があるが、どちらの方法においても材料費、工事費などの多くの初期費用が必要となる。そのため、安全性向上効果が高い曲線を選択し、費用対効果の高い曲線から優先的にPCまくらぎ化を行うことが望まれる。

以上のことから、PCまくらぎ化を行う曲線を選択を適切に行うためのモデルを構築し、PCまくらぎ化計画

作成システムを開発した。本稿では、上記モデルおよびシステムの内容や機能について報告する。

2. 本システムの概要

本システムの画面例を図1に示す。本システムの主要機能としては大きく分けて「PCまくらぎ化優先度の算定」、「PCまくらぎ化曲線を選択」、「部分PCまくらぎ化敷設割合の検討」の3つが存在する。そして、これらの機能を簡単に利用できるような条件入力画面や各検討結果の詳細な出力画面がある。以下に、本システムの概要を示す。

2.1 検討条件の入力

条件入力画面では、検討対象である各曲線の諸元、軌道構造条件の他、存在する不良まくらぎの連続本数、軌道変位（通り、軌間）を設定する。また、各曲線を走行する車両諸元と速度を設定する。これらの条件を容易に入力できるように、例えば軌道材料の名称を候補から選択するだけで、その諸元（寸法、重量など）がシステム内で自動的に設定される機能がある。このため、本システムには良く用いられるデータについてデータベースが構築されている。本データベースには、代表的な軌道材料の諸元などは予め登録されている他、任意の材料の諸元やPCまくらぎ化に必要な費用の単価等を登録できる。

2.2 PCまくらぎ化優先度の算定

本システムでは、入力された条件を用いて、図2に

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

** 軌道技術研究部 軌道管理研究室
(現 四国旅客鉄道株式会社)

特集：軌道技術



図1 本システムの画面例

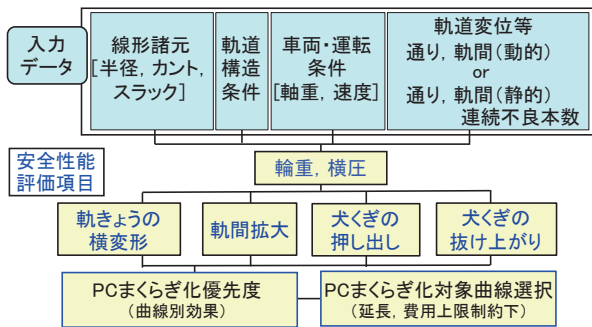


図2 PCまくらぎ化優先度算定と曲線選択のモデル

示すPCまくらぎ化優先度算定モデルにより、各曲線のPCまくらぎ化の優先度を算定する。本モデルでは、鉄道構造物等設計標準¹⁾におけるバラスト軌道の設計法における安全性照査の項目である「①輪軸横圧による軌きょうの横変形に対する照査」、「②軌間拡大による走行安全性の照査」、「③犬くぎの押し出しに対する安全性の照査」、「④犬くぎの抜け上がりに対する安全性の照査」を行い、これらを統合して各曲線のPCまくらぎ化優先度を算定する。

2.3 PCまくらぎ化曲線の選択

先掲の図2に示すように、PCまくらぎ化優先度に基づいて

曲線を選択する。ここでは、PCまくらぎ化の対象曲線の総延長、あるいは総予算の制約条件下で、最も安全性向上効果が高くなるように曲線を選択する。この結果、PCまくらぎ化計画を得ることができる。

2.4 部分PCまくらぎ化割合の検討

各曲線の諸元や軌道構造条件、車両・運転条件に基づいて、木まくらぎの連続不良本数の許容値に関する検討を行う。ここでは、検討を行う曲線において、連続不良本数を0(全て健全)～5本の範囲で変化させた際の軌間拡大量を算定し、軌間内脱線に対する余裕を算定する。本結果を用いることで、部分PCまくらぎ化時における適切な敷設割合やまくらぎ検査時の基準に用いる許容連続不良本数の検討ができる。

3. 優先度の算定と曲線の選択モデル

ここでは、PCまくらぎ化優先度の算定モデルとPCまくらぎ化曲線の選択モデルの内容を示す。

3.1 PCまくらぎ化優先度算定モデル

本モデルは先掲の図2の考え方に基づいて、2.2節の

4つの安全性照査項目に関する評価を曲線別に行う。各照査に用いる評価式を式(1)に示す。車両通過時の応答値を限界値で除し、軌道構造係数を乗じた値が1を超えないことが安全性の確保において求められる。すなわち、左辺が1を超える、或いは1以下であっても、1に近いほどPCまくらぎ化優先度が高いと考えられる。

$$\text{照査式} \quad \gamma_i \cdot \frac{I_{Rd}}{I_{Ld}} \leq 1.0 \quad (1)$$

γ_i : 軌道構造係数 (1.0), I_{Rd} : 応答値, I_{Ld} : 限界値

各照査項目の応答値, 限界値の具体的な内容は次項に示すとおりである。

3.1.1 照査の項目と内容

①輪軸横圧による軌きょうの横変形に対する照査

軌きょうに作用する輪軸横圧(左右レールに作用する横圧の差)がバラスト道床の横抵抗力から定まる軌きょうの滑動限界を超え、軌きょうに横方向の大変形が生じる状態の発生について照査する。応答値にはまくらぎ横圧力 Q_i を用い、限界値には道床横抵抗力 g_i を用いる。

ただし、ここで示すレール横圧力, レール圧力は力である。

$$\text{応答値} : Q_i = \gamma_a(Q_{r1} - Q_{r2}) \quad (2)$$

γ_a : 構造解析係数 (1.0)

Q_{r1} : 外軌側レール横圧力, Q_{r2} : 内軌側レール横圧力

$$\text{限界値} : g_i = (g_0 + \mu P_{r12}) / \gamma_b \quad (3)$$

γ_b : 部材係数 (1.0)

g_0 : 輪重無載荷時の道床横抵抗力

μ : まくらぎ/バラスト間の摩擦係数

P_{r12} : レール圧力の左右和

②軌間拡大による走行安全性の照査

車両から作用する輪重・横圧によって軌間が拡大し、輪軸が軌間内に脱線した状態を限界状態とする。よって、応答値は軌間変位最大値, レール小返り, 横圧によるレールの横変形を考慮した実軌間 I_G とし、限界値は軌間変位, レール摩耗形状および輪軸・車輪寸法の関係により、輪軸が落下しないときの軌間 δ_{cr} とする。ここで、応答値の計算では、連続不良まくらぎが存在する曲線については犬くぎ支持力が小さい状態であることから、応答値の計算の過程において、犬くぎの押し出し等により軌間が大きくなることを軌道負担力の解析モデルの1つである有限間隔弾性支持モデル²⁾を用いて考慮する。本解析モデルによるレール左右変位量の算定例を図3に示す。

$$\text{応答値} : I_G = G + s + \gamma_a(y_{r1} + y_{r2}) \quad (4)$$

G : 軌間 [設定値 + 変位の基準値], s : スラック

y_{r1} : 外軌の軌間外側への横変位

y_{r2} : 内軌の軌間外側への横変位

$$\text{限界値} : \delta_{cr} = \frac{\{a + b + c\} - (A + B + C)}{\gamma_b} \quad (5)$$

a : 車輪内面間距離 [最小値], b : 車輪厚 [最小値]

c : フランジ厚

A : レールの軌間測定位置とレール頭部とのはなれ

B : 車輪踏面端面面取り [最大値], C : 余裕

③犬くぎの押し出しに対する安全性の照査

車両から作用する輪重・横圧によってレールが横方向に変位し、犬くぎの変形量が弾性限界を超える時の状態を限界状態とする。よって、応答値にはレール横圧力(犬くぎの押し出し力)を用い、限界値には犬くぎ押し出し抵抗力 Q_{rcr} を用いる。

$$\text{応答値} : \gamma_a \times \text{レール横圧力 (犬くぎの押出力)} \quad (6)$$

$$\text{限界値} : Q_{rcr} = (\eta P_{r1} + n S_b) / \gamma_b \quad (7)$$

η : レール/まくらぎ間摩擦係数 [0.6], P_{r1} レール圧力

n : 押し出し抵抗犬くぎ本数

S_b : 1本あたりの犬くぎ限界押し出し力

④犬くぎの抜け上がりに対する安全性の照査

車両から作用する輪重・横圧によってレールに小返りが生じ、犬くぎが引き抜かれる状態を限界状態とする。よって、応答値にはレール小返り角を用い、限界値には抜け上がり限度角 θ_{cr} を用いる。

$$\text{応答値} : \gamma_a \times \text{レール小返り角} \quad (8)$$

限界値 : タイプレートなし

$$\theta_{cr} = \{(\delta_{lim} + P_{r1} / D_{p2}) / (b_3 / 2)\} \gamma_b \quad (9)$$

: タイプレートあり

$$\theta_{cr} = \{(\delta_{lim} + P_{r1} / D_{p2}') / b_3\} \gamma_b \quad (10)$$

$$D_{p2}' = D_{p2} \cdot b_3' / \gamma_b$$

δ_{lim} : 犬くぎの抜け上がり限度, P_{r1} : レール圧力

D_{p2} : まくらぎの圧縮ばね係数, b_3 : レール底部幅

b_3' : タイプレートの底部幅

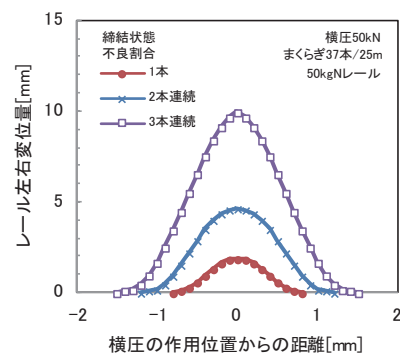


図3 締結状態とレール左右変位量

3.1.2 PCまくらぎ化優先度

上記の4項目において、式(1)の左辺である応答値と限界値の比(応答値/限界値)を算出し、この比の4項目平均値「各項目の(応答値/限界値)の和/4」を各曲線のPCまくらぎ化優先度とする。つまり、この優先度の高い曲線はPCまくらぎ化の効果が大きいと考えられる。この優先度は安全率の逆数と考えられる。ただし、

り、図5と同様に半径が小さい順に同程度の優先度の和となるように、曲線を選択した場合の結果と合わせて示す。システムが選択した場合は総延長1.2kmの7曲線が選択された。一方、半径順に選択した場合は総延長1.4kmの7曲線が選択された。よって、PCまくらぎ化の効果を同じだけ得るには、本システムを用いた方が約15%短い延長の施工で可能と考えられる。

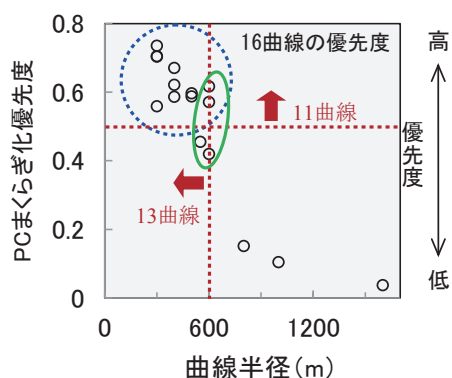


図4 半径とPCまくらぎ化優先度の関係

表1 曲線別の優先度算定結果

優先順位	曲線半径 (m)	カント (mm)	スラック (mm)	通り変位最大 (mm)	軌間変位最大 (mm)	通過速度 (km/h)	応答値/限界値 (4項目平均)
1	300	45	15	14	16	55	0.735
2	300	55	15	11	17	55	0.705
3	300	55	15	14	13	55	0.704
4	400	50	10	20	11	55	0.671
5	400	45	10	15	12	55	0.621
6	600	35	5	16	15	55	0.617
7	500	40	5	13	11	60	0.597
8	500	45	5	13	10	60	0.588
9	400	55	10	12	13	55	0.587
10	300	60	15	4	11	55	0.559
11	600	35	0	15	12	60	0.571
12	550	50	0	9	6	60	0.455
13	600	45	5	7	9	60	0.420
14	800	30	0	9	5	60	0.152
15	1000	20	0	8	4	60	0.105
16	1600	10	0	4	3	60	0.038

4.2 評価指標の妥当性

PCまくらぎ化曲線を選択モデルにおいて、目的関数に用いる2つの各評価指標(PCまくらぎ化優先度, PCまくらぎ化優先度×延長)で計画を作成し、各計画の特徴を比較することで、指標の妥当性を検証する。

対象とするデータは全線が100kmを超え、79の曲線を有する線区データに適用した。

4.2.1 妥当性の検証結果

曲線選択モデルにおいて、「(i) PCまくらぎ化優先度」と「(ii) PCまくらぎ化優先度×延長」を用いてシステムにより対象曲線を選択し、その結果に基づいて、各曲線延長とPCまくらぎ化優先度の関係として整理したものをそれぞれ図7、図8に示す。

(i) の場合には、優先度が0.6を超える8曲線のうち5曲線が対象曲線として選択され、また、PCまくらぎ化優先度が比較的大きな曲線を中心に選択されたが、延長は短い傾向にあり、(ii) の場合と比べると選択された

曲線数は多い。一方、(ii) の場合には、曲線延長が長くても優先度の大きな箇所がPCまくらぎ化対象として選択され、優先度が0.6を超える曲線については、全て対象曲線として選択された。

以上のように、各評価指標を用いた際にPCまくらぎ化対象として選択される曲線には違いがあり、(i) については、優先度が比較的高い曲線を中心に多くの曲線が選択されるが、延長が長い曲線は選択されにくい傾向がある。すなわち、この場合、多くの曲線をPCまくらぎ化できるため、木まくらぎ構造の曲線数が減少し、木まくらぎ状態の管理対象曲線数を減らすことができ、特に長い線区に曲線が散在する場合、管理の省力化に有効と考えられる。一方、(ii) については、選択される曲線数は少ない傾向があるが、曲線延長が長くても優先度の大きい曲線が選択される。よって、この評価指標を用いる場合には、優先度を重視した選択を行える。

このように、用いる評価指標に応じて選択される曲線の特徴が異なることから、各指標で曲線を選択した上で、結果を比較しながら最終的なPCまくらぎ化計画を策定するのが良いと考えられる。

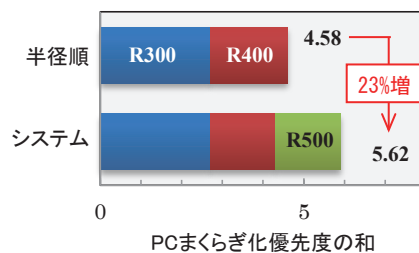


図5 曲線選択結果 (施工延長指定)

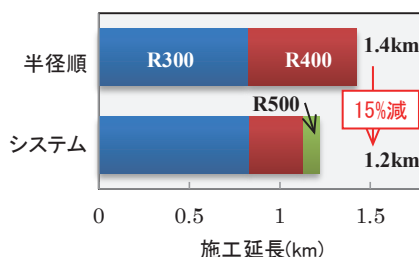


図6 曲線選択結果 (優先度総和指定)

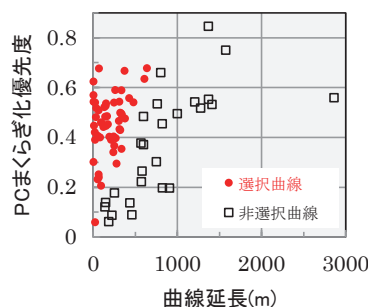


図7 モデルの適用結果 (優先度による評価)

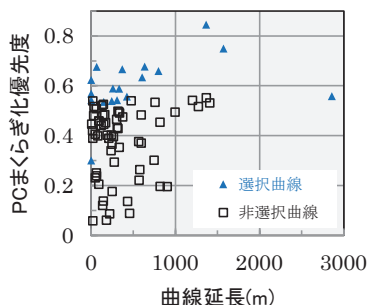


図8 モデルの適用結果（優先度×延長による評価）

4.3 部分PCまくらぎ化割合に関する検討

本システムでは、木まくらぎ不良に伴うレール締結状態の不良が連続して存在する場合の軌間拡大量を算定でき、その結果に基づいて、部分PCまくらぎ化時におけるPCまくらぎ敷設割合を検討できる。表2に示す軌道条件、表3に示す車両・運転条件において、木まくらぎの連続不良本数と軌間拡大量の関係を分析した結果を図9に示す。なお、この図は本システムの出力画面の一部を抜き出したものである。

図から、軌間拡大量は連続不良本数が3本以上の場合に最大限度を超えることがわかる。よって、本検討条件におけるまくらぎの連続不良本数の許容値は2本までと考えられ、部分PCまくらぎ化の際の敷設割合は、少なくとも3本に対して1本以上であり、安全上の余裕を更に確保するのであれば、2本に対して1本程度が適切と考えられる。また、本結果に基づいて、木まくらぎの連続不良に関する検査の判定基準を検討できる。

表2 軌道条件

曲線半径 (m)	カント (mm)	スラック (mm)	軌間変位 (mm)	レール種別	まくらぎ本数 (本/25m)	締結装置	犬くぎ (本)	道床厚 (mm)	路盤
300	45	20	10	37kgN	37	犬くぎ	内2・外2	200	土

表3 車両・運転条件

軸重 (tf)	有効重心高さ (m)	車輪内面間距離 (mm)	車輪厚さ (mm)	フランジ厚 (mm)	車輪踏面端面面取り (mm)	走行速度 (km/h)
12	1.5	988	120	22	3	55

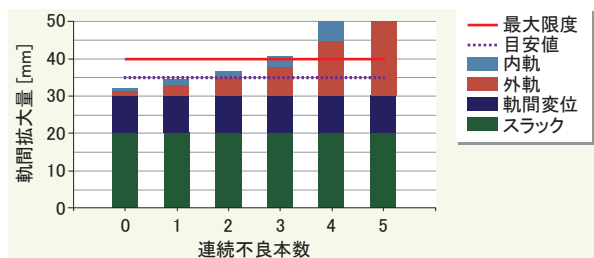


図9 まくらぎ連続不良本数の検討結果

5. おわりに

木まくらぎ構造の曲線を対象として、適切なPCまくらぎ化曲線を選択するPCまくらぎ化計画作成システムを開発した。また、模擬線区データをシステムに適用して試算を行い、出力の妥当性等を確認した。それらをまとめると以下のとおりである。

- (1) PCまくらぎ化優先度を曲線別に算定し、それに基づいたPCまくらぎ化対象曲線を選択できる、PCまくらぎ化計画作成システムを開発した。
- (2) 試算の結果、優先度は半径の小さい曲線で大きい傾向があったが、半径がほぼ同じであっても軌道条件や運転条件が異なると優先度が異なる。このため、半径の小さな順にPCまくらぎ化曲線を選択するよりも、優先度を基準に選択することで、少ない施工延長で線区としての安全性を十分に高められることを確認できた。
- (3) PCまくらぎ化対象曲線のモデルにおいて、「(i) PCまくらぎ化優先度」と「(ii) PCまくらぎ化優先度×延長」を評価指標として試算した結果、(i)の場合には、優先度が比較的大きな曲線を中心に、多くの曲線が選ばれる傾向にあった。一方、(ii)の場合には、曲線延長に関わらず優先度の大きな曲線を選択する傾向にあった。よって、各評価指標の際に出力される結果を見比べながら計画を検討するのが良いと考えられる。
- (4) 部分PCまくらぎ化時における、PCまくらぎの敷設割合を試算できる機能により、敷設割合の他、木まくらぎの連続不良に関する検査の判定基準を検討できる。

なお、本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

謝辞

本システムの試算に際して多大なるご協力をいただいたアルピコ交通株式会社に深く謝意を表す。

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，丸善，2012
- 2) 佐藤吉彦他：線路工学，日本鉄道施設協会，1987
- 3) 三和雅史，金丸清威，片山雄一郎，大山達雄：PCまくらぎ化曲線の最適選択モデルの構築とシステム化，日本オペレーションズ・リサーチ学会2016年秋季研究発表会，2016
- 4) 金丸清威，三和雅史，片山雄一郎：PCまくらぎ化計画作成支援システムの開発，土木学会第71回年次学術講演会，2016