

JIS 規格 PC まくらぎの入線可能輪重についての検討

鉄道総研 正会員 ○後藤 恵一
鉄道総研 正会員 曾我部 正道

鉄道総研 正会員 渡辺 勉
PC まくらぎ研究所 正会員 井上 寛美

1. 目的 PC まくらぎの設計は、従来、許容応力度法により行われてきたが、2012 年に発刊された「鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造（以下、軌道標準という）」¹⁾により性能照査型設計法の適用が開始された。軌道標準では、PC まくらぎの設計応答値を算定する際に FEM を用いることを推奨しているが、実務において全ての PC まくらぎに対して FEM を適用するのは煩雑であることから、従来の許容応力度法で用いられてきた荷重分散係数による算定方法の需要も高いと考えられる。そこで本研究では、FEM と荷重分散係数を用いた場合の差異について入線可能輪重の面から比較し、従来法の適用範囲を確認した。また、入線可能輪重については、これまで限られた種類の PC まくらぎのみでの検討であったため²⁾、本研究では全ての JIS 規格 PC まくらぎを対象に検討を実施したので報告する。

2. 検討方法 表 1 に一般的に在来線で使用する JIS 規格 PC まくらぎを示す。本研究ではまず、この 7 種類を検討対象として取り上げた。

表 2 に設計条件を示す。本研究では、曲げ保証荷重、即ちひび割れ発生に関する照査が中心となるため、安全係数はすべて 1.0 とした。設計ベースでの曲げ引張強度の限界値については、PC まくらぎ種類ごとに 3 号は 1.0N/mm²、6 号は 2.0N/mm²、継目用は 1.0N/mm²、1-F 号は 0.0N/mm² と仮定した。また、表 3 に PC まくらぎの材料諸元を示す。

図 1 に荷重及び支持条件を示す。この条件は従来の許容応力度法³⁾で用いていたものにに基づき定めた。設計で用いる輪重 P は、静輪重 80kN に軌道標準に基づく輪重変動係数 $i_k=2.0$ を乗じて定めた。継目用については、レール継目部の遊間を車輪が通過する際の衝撃的な影響を考慮して、軌道標準に基づく輪重変動係数 $i_k=3.0$ を乗じて定めた。支持条件 C については、支配的な組み合わせである偶発時の横圧との組み合わせのみを検討対象とした。具体的には、3 号及び 1-F については 40kN、6 号及び継目用については 60kN の横圧を考慮した。

列車通過時の PC まくらぎの 1 本当たりの断面力を算定する方法については、許容応力度法では線路方向への荷重分散を荷重分散係数によって簡便に処理する方法を用いていた³⁾。即ち、列車が通過する際の荷重のうち輪軸直下の PC まくらぎへの分散比率を、弾性床土上の梁の理論式等に基づき、在来線に対して 0.5、新幹線に対して 0.6 と仮定した。

一方、軌道標準は、PC まくらぎの性能照査を行う場合には、動的解析法により設計応答値を算定することを基本としているため、解析には、車両を非振動の定荷重列とみなす、線路構造物の汎用構造解析プログラム DIARIST(Dynamic and Impact Analysis for Railway Structure)を用いた⁴⁾。図 2 に解析モデルの概要を示す。解析モデルの延長は約 25m とした。また、全ての要素は線形とした。レール及びまくらぎは梁要素でモデル化した。軌道パッドは 3 自由度のスカラーばね要素でモデル化した。バラスト及び路盤については、それぞれ軌道標準に基づいてばね定数を算出し、それを直列につないだ 1 つのばねとしてモデル化した。本解析モデルの節点数は 1582、要素数は 3089 である。

ひび割れ発生に関する設計限界値は、レール下断面及びまくらぎ中央断面について、式(1)及び式(2)により限界モー

表 1 一般的に在来線で使用する JIS 規格 PC まくらぎ

種類	略称	敷設区間
3 号	3PR	直線
	3PO	
6 号	6PR	曲線
	6PO	
レール継目部用	JPR	レール継目部
	JPO	
1-F(凍上区間用)	1F	凍上区間

※PR はプレテンション式、PO はポストテンション式
1F はポストテンション式

表 2 設計条件

レール種別	50kgN
PC まくらぎ敷設本数(本/25m)	39
軌道パッド(MN/m)	100
道床厚(mm)	250
地盤反力係数 K_{30} (MN/m ³)	110
輪重(kN)	80
横圧(kN)	40 (3 号, 1F) 60 (6 号, 継目用)

表 3 材料諸元

(a) コンクリート

設計基準強度 f'_{ck} (N/mm ²)	49.1
プレストレス導入時強度(N/mm ²)	39.2
弾性係数 E_c (kN/mm ²)	33.0
終局ひずみ μ	3500
曲げ圧縮強度 f'_{cdk} (N/mm ²)	19.6 (= 0.4 f'_{ck})

(b) 各諸元

略称	鋼材			レール下断面	
	種類, 本数	導入緊張力(kN/本)	有効プレストレス率(%)	高さ(mm)	幅(mm)
3PR	φ2.9-3 本より線 12 本	28.7	65	160	240
3PO	PC 鋼棒 φ10, 4 本	72.6	80	160	240
6PR	φ2.9-3 本より線 12 本	30.3	65	170	240
6PO	PC 鋼棒 φ10, 4 本	72.6	80	170	240
JPR	φ2.9-3 本より線 16 本	28.7	65	170	300
JPO	PC 鋼棒 φ11-4 本	88.3	80	170	300
1F	PC 鋼棒 φ11-4 本	83.4	80	160	240

※鋼材の弾性係数 $E_s=200$ (kN/mm²)

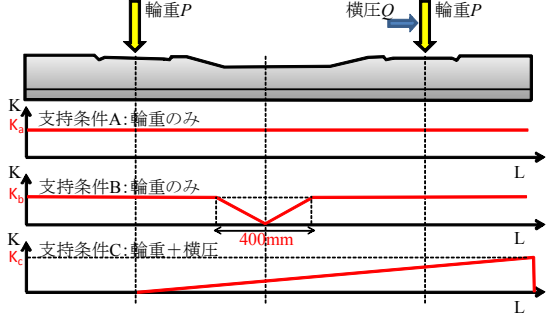


図 1 荷重及び支持条件

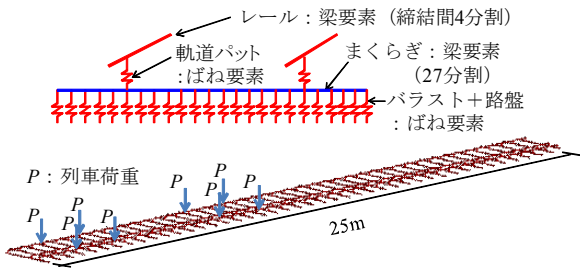


図 2 解析モデルの概要

キーワード PC まくらぎ、荷重分散係数、FEM、入線可能輪重
連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 TEL042-573-7290

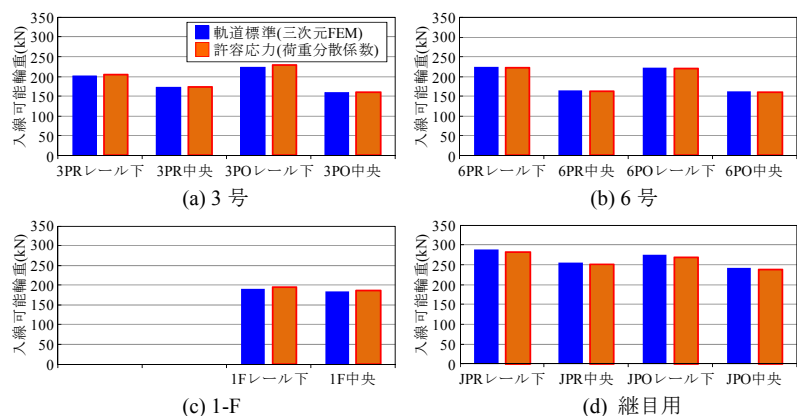


図3 構造解析手法の違いが入線可能輪重に及ぼす影響 (設計ベース)

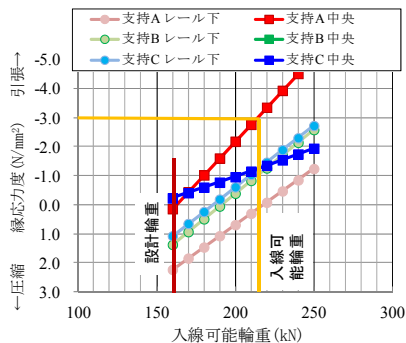


図4 入線可能輪重の算定例 (実強度ベース、3PR、荷重分散係数)

メントを算定し、それに達するときの計算上の輪重を入線可能輪重として求めた。ただし、横圧は一定とした。

$$M_{cr} = M_0 + f_{bcd} \cdot W \tag{1}$$

$$M_0 = \left(\sum P_e / A \pm \sum P_e \times e_p / W \right) \cdot W \tag{2}$$

M_{cr} は設計ひび割れ発生モーメント(kNm)、 M_0 はPCまくらぎの設計デコンプレッションモーメント(kNm)、 p_e はPC鋼材の有効プレストレス力(kN)、 A はPCまくらぎの断面積(m^2)、 e_p はPC鋼材の離心率(m)、 W はPCまくらぎの断面係数(m^3)、 f_{bcd} は曲げ引張強度(N/mm^2)を示す。なお、営業線で用いる実強度ベースでの入線可能輪重を算定する際には、曲げ引張強度 f_{bcd} として $3.0N/mm^2$ を用いることとした²⁾。

3. 検討結果 図3に構造解析手法の違いが設計ベースでの入線可能輪重に及ぼす影響を示す。図から、何れのPCまくらぎにおいても、FEMと荷重分散係数を用いた方法とが概ね同等であり、その誤差は5%以内となっていることが分かる。設計ベースの検討では、何れのPCまくらぎにおいても決定ケースは支持条件Cのケースであった。

図4に実強度ベースでの入線可能輪重の検討例を示す。この図は曲げ引張強度 $3.0N/mm^2$ に基づき、入線可能輪重を逆算したものである。3号のプレテンション式まくらぎで、荷重分散係数を用いた場合について示した。図から分かるように、設計輪重では支持条件Cの中央断面で決定しているが、実強度ベースでは、支持条件Aのまくらぎ中央断面で決定していることが分かる。

図5に実強度ベースでの入線可能輪重の比較を示す。各まくらぎとともに曲げ引張強度 f_{bcd} の $3.0N/mm^2$ を許容することにより、設計輪重に比べて入線可能輪重が20~48%増加することが分かる。また、従来の荷重分散係数を用いて求めた入線可能輪重も合わせて示すが、FEMによる入線可能輪重は従来の荷重分散係数によって求めたものと概ね同等の値になっていることが分かる。

表4にJIS規格に示された17種類のPCまくらぎの実強度ベースの入線可能輪重を示す。前述の7種類の検討結果と同様な方法で全てのJIS規格まくらぎに対して示した。ただし、FEMと荷重分散係数を用いた方法に大きな差異がないことから、表4は全て荷重分散係数を用いて算出し、結果を5kN単位で規格化している。この表を活用することにより、実務においては様々な列車に対してよりきめ細かな入線検討が可能となる。

4. まとめ 本研究で得られた知見は以下の通りである。①従来の許容応力度法の荷重分散係数を用いたものと、FEMを用いて算定した設計ベースの入線可能輪重が概ね同等であることを確認した。②曲げ引張強度 f_{bcd} の $3.0N/mm^2$ を許容することで、設計輪重と比べて入線可能荷重が20~48%増加することを示した。③FEMにより算定した実強度ベースの入線可能輪重は、従来の許容応力度法の荷重分散係数を用いたものと概ね同等の値となることを確認した。荷重分散係数を用いた設計法の適用については、今後さらに詳細な検討を進めていく予定である。

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)，丸善，2012.1
2) 鉄道総合技術研究所：在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説，研友社，1993.5
3) 宮本他：線路－軌道の設計・管理－，山海堂，pp.90-131，1980.9
4) 曾我部他：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究，土木学会論文集，No.724/I-62，pp.83-102，2003.1

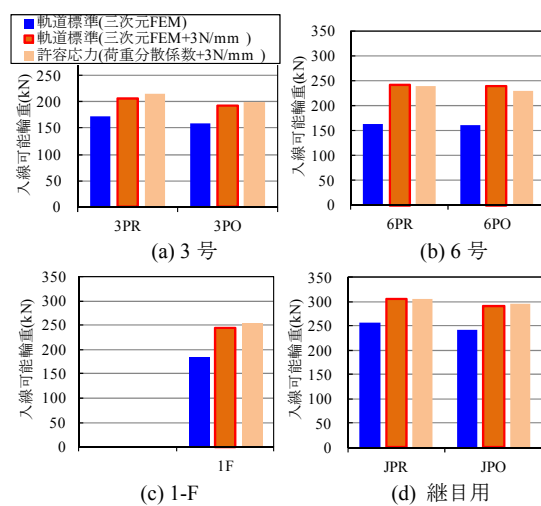


図5 入線可能輪重の比較 (実強度ベース)

表4 JIS規格PCまくらぎの入線可能輪重の算定結果 (実強度ベース)

種類	記号	入線可能輪重	
		提案	従来 ²⁾
3号	3PR	215	230
	3PO	200	
6号 (曲線)	6PR	240	190
	6PO	230	
7号 (低廉形)	7PR	144	
	7PO	144	
1-F(凍上区間用)	1F	255	
ケーブル防護用	CPR	245	
	CPO	260	
継目用	JPR	305	
	JPO	295	
特殊区間用	SPR	280	
	SPO	295	
新幹線	3T	270	
	4T	230	
新幹線高速	3H	430	
	4H	430	

※PR, 3T, 3Hはプレテンション式
※PO, 1F, 4T, 4Hはポストテンション式