

報告 JIS 規格 PC まくらぎの入線可能輪重の算定

曾我部 正道^{*1}・渡辺 勉^{*2}・徳永 宗正^{*2}・井上 寛美^{*3}

要旨: 本報告は、JIS 規格 PC まくらぎの入線可能輪重を算定するとともに、近年の車両、軌道条件に対して発生輪重の調査を行ったものである。その結果、FEM と従来の荷重分散係数法による入線可能輪重の差異が 5% 以下であること、実状に合わせてコンクリートの縁引張応力度の限界値を緩和することにより入線可能輪重が 35% 程度増加すること、レール種別、道床厚、地盤反力係数が入線可能輪重に及ぼす影響は 10% 程度であることを示した。また、本報告の限られた測定条件では、レール継目に敷設された PC まくらぎの応答は、デコンプレッションモーメント以下であることが分かった。

キーワード: PC まくらぎ、プレストレストコンクリート、縁引張応力度、レール継目、衝撃

1. はじめに

我が国の PC まくらぎは、1951 年に東海道本線に導入が始まり、1961 年からは東海道新幹線建設に、1962 年からは在来線の木製まくらぎの更新に大量投入が始まった。これらはロングラインを用いたプレテンション式であったが、1980 年からは少量多品種生産に適したアスファルト系の塗布剤を用いたアンボンポストテンション式の製造も始まった。PC まくらぎは、従来の木製のものに比較して、曲げ耐力や耐久性に優れ、重量が比較的重いことから軌道の日常的な狂いも生じにくく保守性が高い。現在、JR7 社や鉄道・運輸機構関連では、新線建設及び更新で概ね年間 50 万本程度を生産している。

PC まくらぎの設計は、動的輪重（静的な輪重の 2 倍程度）と車輪横圧の組み合わせに対して、道床反力状態を仮定して断面力を算定し、引張縁のコンクリートが許容応力度以内（0 または 2N/mm^2 ）に収まることを確認する手法（許容応力度法）により開始された。

1990 年には、日本工業規格 JIS E 1201 「プレテンション式 PC まくらぎ」、JIS E 1202 「ポストテンション式 PC まくらぎ」が定められた（以下 JIS 規格という）。JIS 規格では、17 種類の PC まくらぎに対して曲げ保証荷重（曲げひび割れ）と曲げ破壊荷重等が規定された。

1993 年には、「在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説」（以下、速度向上マニュアルという）¹⁾が制定され、営業線において計測される輪重の限界値、即ち入線可能輪重が提案された。ここでは工場製品である PC まくらぎの実態を考慮して、引張縁の許容応力度を 3N/mm^2 に緩和して入線可能輪重を算定している。この速度向上マニュアルは、新形式車両の入線、軌道保守等で活用されている。しかしながらこれらの値は 2 種類のまくらぎのみを対象とした限定的な検討であった。

2012 年には、「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）」²⁾が発刊され、軌道構造に関する設計において性能照査型の設計法が導入された。PC まくらぎの設計法についても、軌道を構成する各部材の形状や材料特性に応じた応答値を算定し、想定する各限界状態に至らないことを照査する方法が導入された。具体的には、従来の引張縁引張応力度の照査に加え、著大な衝撃輪重（静的な輪重の 4 倍程度）に対して破壊耐力を担保することが新たに規定された³⁾。また、軌道標準は、適合みなし仕様を別途定めており、敷設や設計条件に応じた JIS まくらぎを選定することで照査を省力することができる。

一方、近年、車両の高速化やばね下質量の増加等に伴い、営業線において PC まくらぎに対する大きな輪重発生が懸念されている。しかしながら、これに照らす前述の速度向上マニュアルは内容が古く、限定された内容であるため、その精査が求められている。

以上のような背景から、本報告では、軌道標準の改訂も踏まえ、JIS 規格の PC まくらぎを対象に以下の観点から検討を行った。

- (1) 軌道標準で推奨する FEM を用いた応答値の算定方法と許容応力度法による荷重分散係数を用いた方法の差異について比較し、従来法の適用範囲を確認する。
- (2) 軌道を構成する各部材の形状や材料特性等のパラメータが、PC まくらぎの入線可能輪重（コンクリート引張縁が曲げ引張強度に達するときの輪重）に及ぼす影響を定量的に評価する。
- (3) 既設の JIS 規格 PC まくらぎの入線可能な車両の動的輪重を算定する。
- (4) 近年の車両、軌道条件に基づき営業線における発生輪重に関する傾向調査を行う。

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 博(工) (正会員)

*2 (公財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 修士 (正会員)

*3 PC まくらぎ研究所 博(工)

表-1 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'_{cd} (N/mm ²)	19.6 (=0.4 f'_{ck})

(b)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)

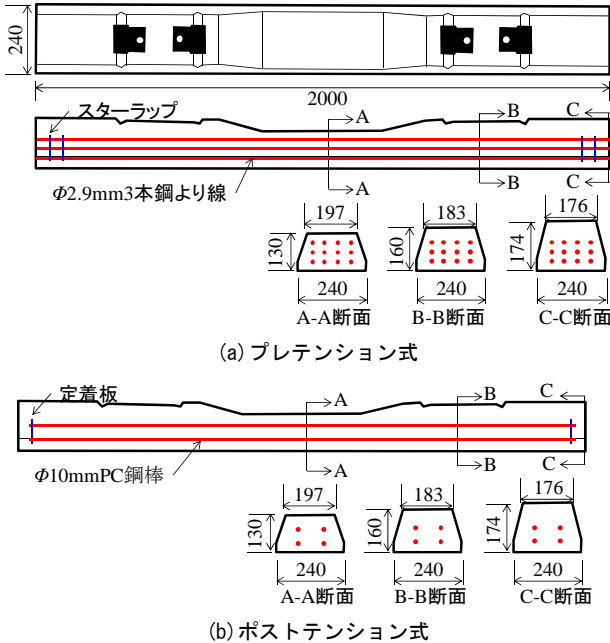


図-1 JIS規格3号PCまくらぎの概要

2. 検討方法

2.1 設計条件

表-1にJIS規格PCまくらぎを示す。図-1に3号PCまくらぎの概要を示す。本報告では、一般的に使用されている在来線用のPCまくらぎ7種類を検討対象として取り上げた(速度向上マニュアルでは2種類)。3号は直線及び半径800m以上の曲線に、6号は半径240m以上800m未満の曲線に、レール継目部用はレール継目部に、1-Fは凍上区間の直線及び半径600m以上の曲線に、それぞれ用いられている。ポストテンション式で用いるPC鋼棒には予めアンボンド剤が塗布されており、付着を切るとともに、防錆効果が確保されている。

表-2に設計条件を示す。本報告では、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。なお、PCまくらぎの設計は、引張応力の発生を認めないフルプレストレスと、一定限度まで認めるパーシャルプレストレスとで実施される。6号及び7号以外のまくらぎはフルプレストレスで設計されていたが、実際に復元設計を試みたところフルプレストレスを満足しないものが散見された。これは、設計

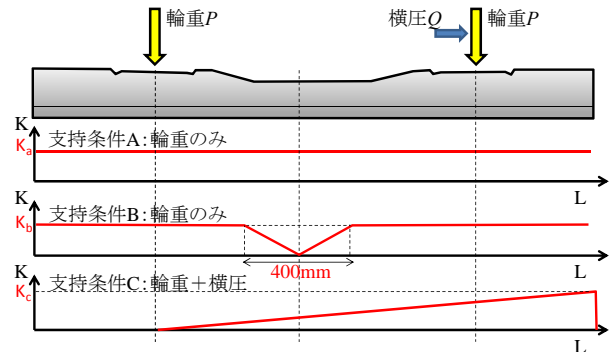


図-2 荷重及び支持条件

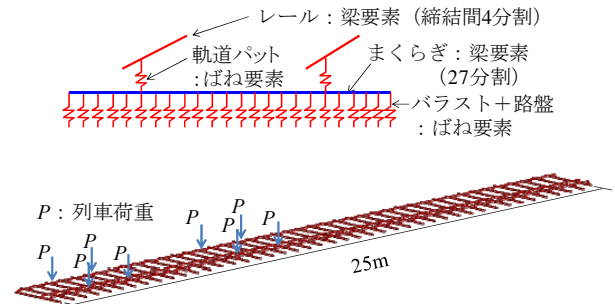


図-3 解析モデルの概要

当時の有効数字の丸め誤差、計算着目点の粗さ、着目位置の不十分さ、反力積分の粗さ、JRS(日本国有鉄道規格)からJISへの移行に伴う寸法変更等に起因していると思われる。設計経緯をまとめた現存資料も限定されていることから、本報告では当面の対応として、まくらぎ種別ごとに設計ベースの曲げ引張強度の限界値を仮定し(3号は1.0N/mm², 6号は2.0N/mm², 継目用は1.0N/mm²,

1-F は $0.0N/mm^2$), 復元設計を行った。この復元設計については実態との整合性を踏まえて今後、総合的に判断していく予定であるが、本報告では上記限界値を用いて設計ベースの議論を進める。

表-3 に材料諸元を示す。限界値に関する検討では、これらの値を標準として、パラメータ解析も実施した。

図-2 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⁴⁾で用いていたものに基づき定めた。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 $i_p=2.0$ を乗じて定めた(従来同様、輪重の発生頻度分布の傾向に基づき²⁾ 静的な輪重の 2 倍を用いた)。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 $i_p=3.0$ を乗じて定めている。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ケース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。

2.2 設計応答値の算定

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手法を用いていた⁴⁾。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 と仮定していた。

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。しかしながら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ため、従来の荷重係数法の適用範囲を検証することとした。FEM では 3 次元モデルにより、線路方向への荷重分散効果等が適切に再現される。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。本プログラムでは、列車は定荷重及び定速の移動荷重列でモデル化する。軌道構造は有限要素を用いて任意の構造形式を詳細にモデル化することができる。また、荷重列の走行ラインは、線路構造物モデル上の有限要素節点を直線補間する形で定義され、車両走行位置に応じて近傍節点に荷重が配分される⁵⁾。

図-3 に FEM を用いてモデル化した解析モデルの概要を示す。延長約 30m の解析モデルを構築した。全ての要素は線形とした。レール及び PC まくらぎは梁要素でモデル化した。レールについては締結間隔を 4 分割に、まくらぎについては 27 分割に離散化した。軌道パッド(レールとまくらぎ間に挿入する厚さ 10mm 程度のゴム板)

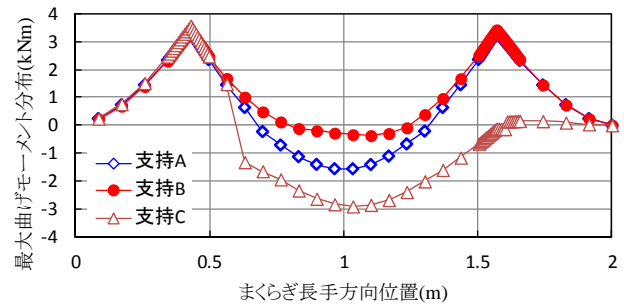


図-4 3PR の最大曲げモーメント分布

は 3 自由度のスカラーばね要素でモデル化した。まくらぎ下面にもばねを設けるが、それらのばね定数はバラスト及び路盤に相当するばね定数を軌道標準に基づきそれぞれ求め²⁾、それらを直列につないだものとして、1 つのばねに集約してモデル化した。支持条件 C については、支持ばね力の合計が支持条件 A と同一になるように三角形分布を仮定して求める。以上による解析モデルは、節点数は 1582、要素数は 3089 である。

2.3 設計限界値の算定

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)により限界モーメントを算定し、それに達する時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。

$$M_{cr} = M_o + f_{bcd} \cdot W \quad (1)$$

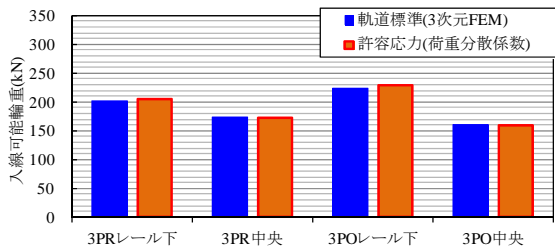
$$M_o = (\sum P_e/A \pm \sum P_e \times e_p/W) \cdot W \quad (2)$$

ここに、 M_{cr} は PC まくらぎの設計曲げひび割れ発生モーメント(kNm)、 M_o 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、営業線で用いる入線可能輪重を算定する際には、PC まくらぎが工場製品で設計に対して相当の余裕度を有していることを勘案して、曲げ引張強度 f_{bcd} は $3.0N/mm^2$ を用いることとした¹⁾。この値は、従来の速度向上マニュアルとの整合性に基づき定めた。

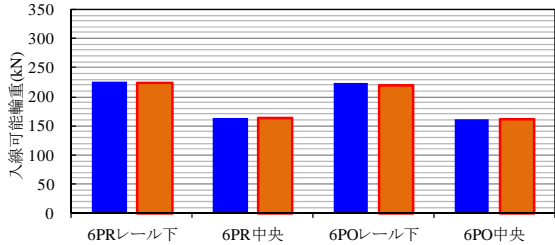
3. 検討結果

3.1 構造解析法の影響

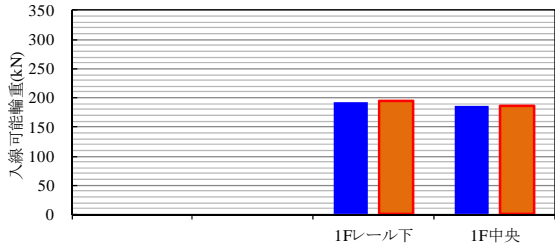
図-4 に PC まくらぎに発生する曲げモーメント一例として、3 号プレテンション式 (3PR) の最大曲げモーメント分布を示す。同図に示すように、支持状態の違いによって発生する曲げモーメント分布が異なることが分かる。本報告の検討は、全て線形応答値解析、耐力計算に基づいているが、決定ケースとなる荷重の組み合わせ



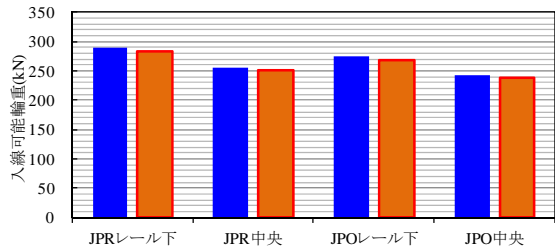
(a) 3号



(b) 6号



(c) 1-F



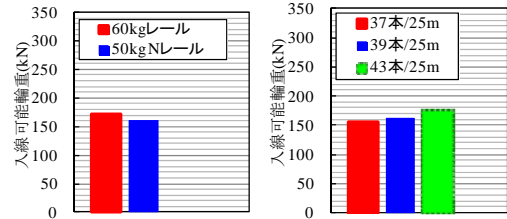
(d) 継目用

図-5 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)

せ、決定断面、支持条件が異なるため、入線可能輪重は縁引張応力度と必ずしも線形の関係とはならない。

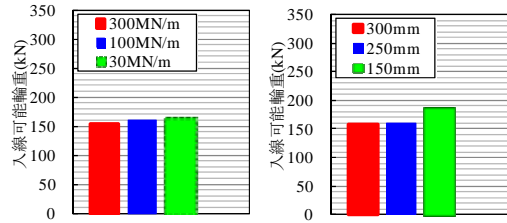
図-5 に構造解析手法の違いが設計ベースでの入線可能輪重に及ぼす影響を示す。設計では、設計輪重を用いて縁引張応力度を指標に照査を行うが、本報告では営業線における入線可能輪重を評価尺度として用いるため設計における縁引張応力度の限界値から設計ベースの入線可能輪重を逆算して比較することとした。

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、FEM による決定ケースは、いずれの PC まくらぎにおいても偶発横圧を作用させた支持条件 C のケースであった。この傾向は荷重分散係数を用いた場合と同様であった。



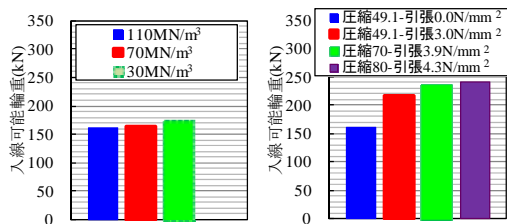
(a) レール種別

(b) 敷設本数



(c) 軌道パッド剛性

(d) 道床厚



(e) 地盤反力係数

(f) 材料特性

図-6 各種パラメータが入線可能輪重に及ぼす影響 (FEM, 支持条件 C, 設計ベース)

3.2 各種パラメータが及ぼす影響

図-6 に設計ベースにおける各種パラメータが入線可能輪重に及ぼす影響を示す。ここでは、3号ポストテンション式の支持条件 C を対象として各種パラメータの影響度を評価した。これらのパラメータの傾向は無限長の弾性床上の梁の理論解に定性的には近いものの、支持条件が複雑であること、一定値の横圧との組み合わせを考慮していること等から、単純には分析できない。

レール種別を 50kgN レールから 60kg レールに変更した場合、入線可能輪重は 7%程度増加した。これはレールの剛性が大きくなったため、荷重分散効果によりまくらぎ 1 本あたりの応答値が低減されたためである。

25m あたりの PC まくらぎ敷設本数を 37, 39, 43 本と変化させると、入線可能輪重は標準値 39 本のケースに対して-4~9%程度変動することが分かった。これは PC まくらぎ 1 本あたりの負担が変化するためである。

軌道パッドの剛性を 30, 100, 300MN/m と変化させても入線可能輪重の変動は標準値 100MN/m に対して 2%であり、軌道パッドの剛性の影響は小さかった。

道床厚を 150mm, 250mm, 300mm と変化させると、150mm とした場合に入線可能輪重は標準値 250mm に比べ 14%増加した。これは道床厚が小さくなると、路盤への荷重分散効果が小さくなるため、まくらぎ 1 本あたりの負担量が減少するためである(ただし軌道の沈下量が増加するため軌道全体には悪影響となる)。

地盤反力係数を 110, 70, 30MN/m³ と変化させると、標準値の 110MN/m³ とする場合に比べて、設計輪重は 7%程度増加した。

コンクリートの材料特性を変化させると、特に引張強度を考慮した影響が最も大きく、引張強度 3N/mm² を考慮すると入線可能輪重は 35%程度増加した。さらに、引張強度を 4.3N/mm² (実際のまくらぎの品質試験でしばしば確認される圧縮強度 80N/mm² 相当)⁶⁾ とすると、設計輪重は 25%程度増加した。

3.3 営業線における入線可能輪重の算定

図-7 に実強度ベースでの入線可能輪重の検討の例を示す。速度向上マニュアルで指標とした引張強度 3N/mm² に基づき、入線可能輪重を逆算したものである。PC3 号のプレテンション式まくらぎ、荷重分散係数を用いた方法について示した。図から分かるように、設計荷重では支持条件 C のまくらぎ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。同様の検討を対象 PC まくらぎに対して実施した。

図-8 に入線可能輪重の比較を示す。各まくらぎともに曲げ引張強度 f_{bcd} の 3.0N/mm² 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。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した。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入線可能輪重を算定した。ただし、FEM と荷重分散係数を用いた方法に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.発生輪重に関する傾向調査

PC まくらぎに生じる動的な輪重は、車両の諸元 (特に輪軸質量)、車輪踏面の整備状況、軌道の整備状況、レール継目等の状態に依存する。しかしながら PC まくらぎに生じる動的な輪重に着目した体系的な測定は、1984~1986 年に衝撃的な成分に着目したものが実施されて以降³⁾、実施されていない。日本全国に敷設された PC まくらぎに発生する動的輪重の実態調査を行うことは容易ではないが、本報告では、近年の鉄道車両、軌道条件を対象として、PC まくらぎに発生している動的輪重について傾向調査を行うこととした。

図-9 に測定概要を示す。測定は、一般的な 6 号及び

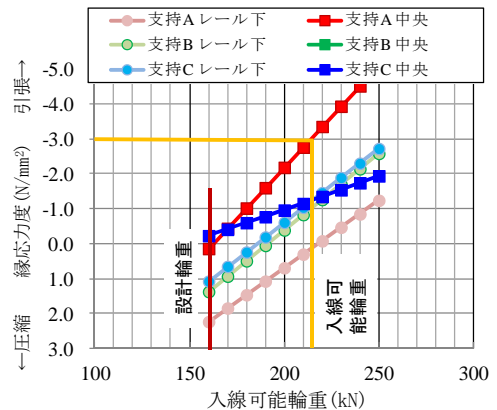


図-7 実強度ベースでの入線可能輪重の算定の例 (3号プレテンション式 荷重分散係数を用いた従来法)

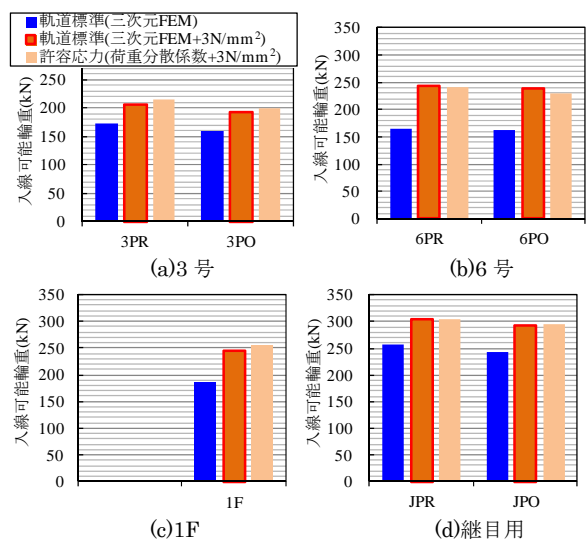


図-8 入線可能輪重の比較

表-4 JIS PC まくらぎの入線可能輪重の算定結果

種類	記号	入線可能輪重	
		提案 (kN)	速度向上マニュアル (kN)
3号	3PR	215	210
	3PO	200	
6号 (曲線)	6PR	240	190
	6PO	230	
7号 (低廉形)	7PR	144	
	7PO	144	
1F	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	

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

継目用のポストテンション式まくらぎに対して実施した。測定箇所は、当該線区内において、軌道検測車による輪重測定結果を目安 (車上データは脱線特性の把握を

目的としており PC まくらぎの評価に対してはサンプリング周波数が不足)として測定箇所を選定した。測定では、PC まくらぎにひずみゲージを貼付し、そのひずみ分布から曲げモーメントを逆算し、更に支持条件 A を仮定して発生輪重に換算した。測定は日本ナショナルインスツルメント製のモジュールで集約し、LAN ケーブルを介して PC に集約した。データ収録プログラムは LabVIEW を用いてトリガーにより自動収録されるように構築した。サンプリング周波数は 10kHz とした。列車速度はスピードガンにより測定した。

図-10 に列車速度と測定換算輪重の関係を示す。貨物列車、通勤車両、特急車両別に示した。通勤車両の通過時は、ばらつきがみられるものの、概ねデコンプレッションモーメント以内に収まっているなど、近年の車両による動的輪重の傾向が把握できる。また、当然のことではあるが発生輪重は、継目用の方が大きな値となった。

図-11 にピークひずみの作用時間と列車速度の関係を示す。同図から、継目用まくらぎの応答は、最小で作用時間 0.003 秒程度 (160Hz) であり、レールとレールの間を通過する際の車輪の衝撃的な荷重が発生していることが分かる。これらの測定結果については、今後、車両と軌道をモデル化した詳細な動的相互作用解析により深度化を図る予定である。

5.まとめ

本報告で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 軌道標準に基づき、JIS 規格 PC まくらぎ 7 種類について FEM を用いて設計ベースの入線可能輪重を算定した。その結果、いずれの PC まくらぎにおいても従来の許容応力度法の荷重分散係数を用いて求めた入線可能輪重と概ね同等の値となった。
- (2) 3 号ポストテンション式の PC まくらぎを対象に、軌道部材の構成や各種材料特性が入線可能輪重に与える影響を検討した結果、コンクリートの引張強度の影響が最も大きく、引張強度を考慮しない場合に比べて入線可能輪重は 35% 程度増加した。レール種別、道床厚、地盤反力係数の影響は 10% 程度であった。
- (3) 曲げ引張強度 f_{bcd} の 3.0N/mm^2 を許容して入線可能輪重を算定した結果、設計輪重に比べて入線可能輪重は 20~48% 増加することが分かった。また、軌道標準により算定した入線可能輪重は、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った。
- (4) 近年の車両、軌道条件に基づき PC まくらぎに作用する動的輪重を測定した。その結果、限られたデータではあるが、測定値はデコンプレッションモーメント以

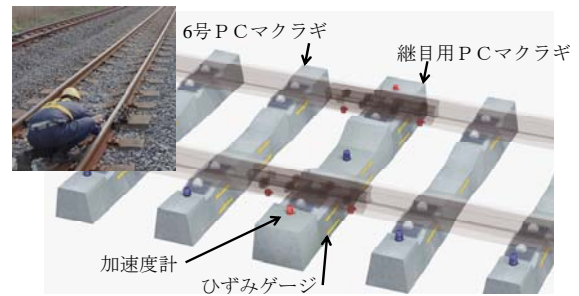


図-9 測定概要

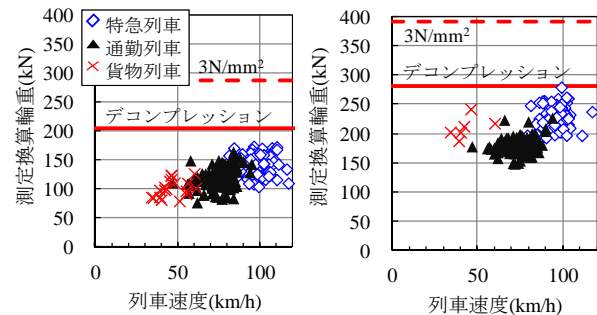


図-10 列車速度と測定換算輪重 (支持条件 A) の関係

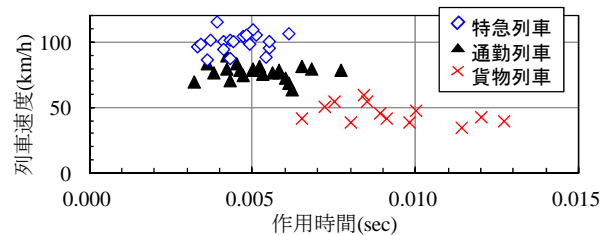


図-11 ピークひずみの作用時間 (継目用) と列車速度の関係

下に収まっていること等を確認した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 (軌道構造)，丸善，2012
- 3) 涌井一，奥田広之：PC マクラギの限界状態設計法に関する研究，土木学会論文集，No.557/V-34，pp.33-54，1997.2
- 4) 宮本俊充，渡辺偕年：線路 -軌道の設計・管理-，山海堂，pp.90-131，1980
- 5) 曾我部正道，松本信之，藤野陽三，涌井一，金森真，宮本雅章：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
- 6) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物)，丸善，2004