

PCまくらぎの敷設環境に応じた合理的な設計荷重係数の提案

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 工博 ○渡辺 勉
 (公財)鉄道総合技術研究所 工博 松岡 弘大
 (公財)鉄道総合技術研究所 工修 箕浦 慎太郎
 PCまくらぎ研究所 工博 井上 寛美

Abstract : Although the prestressed concrete sleeper is designed considering influence of the impact load, there are few cases that the validity of the load factor used for the design has been verified. Therefore, in this study, we investigated the actual loading and the bending moment on PC sleepers in a straight continuous welded rail section. In addition, we carried out a parametric study by numerical analysis and proposed reasonable variable wheel load coefficients and distributed coefficients according to the condition of PC sleeper layed.

Key words : Prestressed concrete sleeper , ballasted track , Design , Numerical analysis

1. はじめに

プレストレストコンクリートまくらぎ(以下、PCまくらぎ)の設計は、鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造(以下、軌道標準)¹⁾に基づき、図-1に示すように、レール位置断面およびまくらぎ中央断面に生じる応力の照査に基づいて行われる。設計応答値の算定法には、図-2に示すように、軌道を有限要素法などでモデル化し、車両モデルあるいは荷重列を走行させる動的解析による算定法や、PCまくらぎ1本を対象とした静的解析による算定法などがある。近年では前者のPCまくらぎの動的応答に関する数値解析による検討も行われている²⁾が、PCまくらぎの設計実務においては、後者の静的解析による応答値算定法がいまだに主流である。

静的解析による応答値の算定においては、列車走行に伴う衝撃作用の影響を考慮するために変動輪重係数を、レール長手方向の荷重分散の影響を考慮するために分散係数を、設計作用(輪重:鉛直方向の列車からの荷重、横圧:水平方向の列車からの荷重)にそれぞれ乗じる。PCまくらぎの使用性(ひび割れ)の照査においては、列車走行に伴う衝撃作用に対してPCまくらぎ断面のフルプレストレス状態を確保するために、変動輪重係数として2.0が一般に用いられている。また、分散係数としては0.5が用いられる³⁾。しかしながら、これらの値は1950年代のPCまくらぎ導入当初から慣例的に用いられてきた値であり、その妥当性を検証した事例はほとんどないのが実態である。

そこで本研究では、営業線の直線ロングレール区間を対象に列車通過時の輪重とPCまくらぎの曲げ

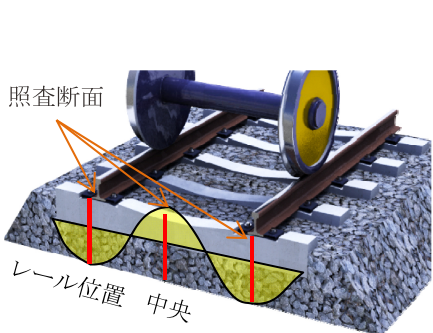


図-1 PCまくらぎ照査断面

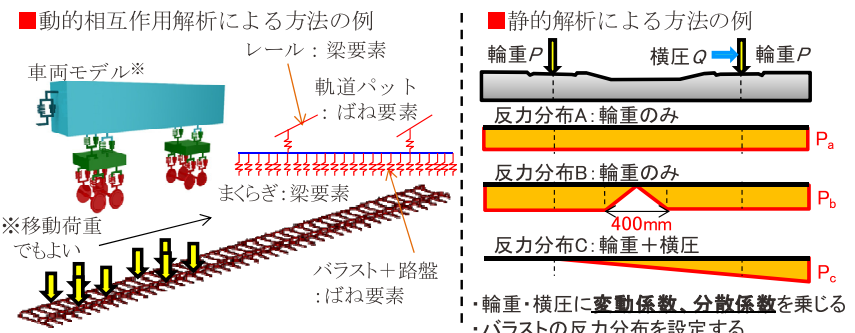


図-2 PCまくらぎの設計応答値の算定法の例

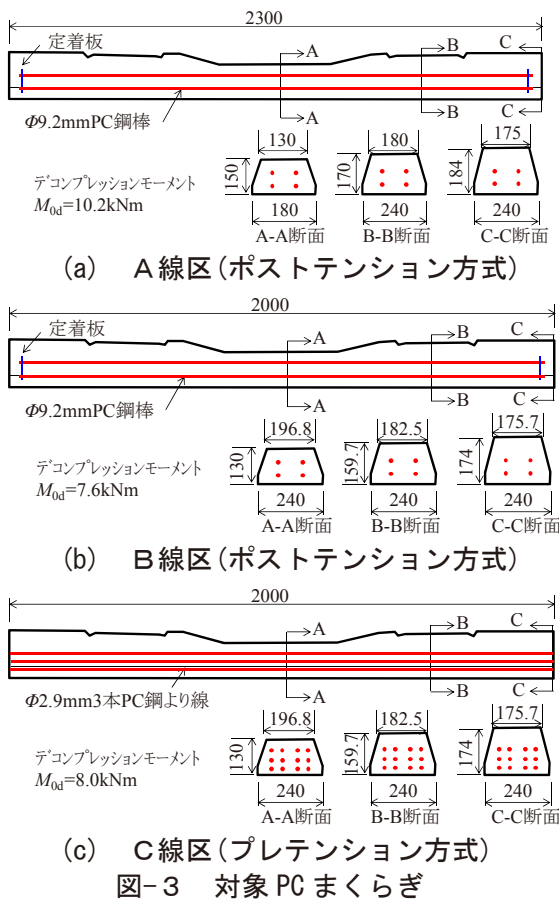


図-3 対象PCまくらぎ

表-1 対象線区のPCまくらぎの設計条件

線区	A	B	C
静的輪重	80kN	80kN	80kN
変動輪重係数	2.0	2.0	2.0
設計輪重	80×2.0=160kN	80×2.0=160kN	80×2.0=160kN
分散係数	0.5	0.5	0.5
レール圧力	160×0.5=80kN	160×0.5=80kN	160×0.5=80kN

表-2 対象線区の各種条件

線区	A	B	C
レール	50kgN	50kgN	50kgN
軌間	1372mm	1067mm	1067mm
軌道パッド	70MN/m	110MN/m	110MN/m
PCまくらぎ緊張方法	ポストテンション方式	ポストテンション方式	プレテンション方式 (JIS E 1201 3PR)
敷設本数	41本/25m	41本/25m	41本/25m
敷設箇所	土路盤上 バラスト軌道	土路盤上 バラスト軌道	土路盤上 バラスト軌道
走行車両重量	通勤車両 3種類	通勤車両 4種類	通勤車両 (車種C-1) 機関車 (車種C-2)
最高速度	100km/h	95km/h	95km/h
測定まくらぎ	連続する8本	連続する8本	連続する10本
測定列車本数	151本	122本	183本

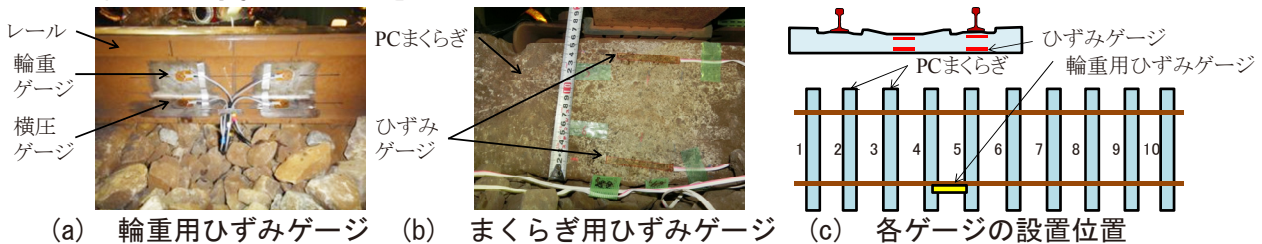


図-4 測定方法

モーメントを測定し荷重環境の実態を把握するとともに、数値解析を用いて各種パラメータの影響を検討する。さらに、それらの結果に基づき、PCまくらぎの敷設環境に応じた合理的な設計荷重係数を提案する。なお、安全性(曲げ破壊)の照査については既往の研究⁴⁾により、変動輪重係数4.0が提案されており、本研究でもこれを踏襲することとする。また、本論文では直線ロングレール区間を対象としたため横圧の検討は省略する。

2. 営業線におけるPCまくらぎに作用する輪重および発生曲げモーメントに関する現地測定試験

2.1 対象PCまくらぎ

図-3に対象としたPCまくらぎを、表-1および表-2に主な条件をそれぞれ示す。設計条件は同一である在来線用の3種類のPCまくらぎを対象とした。C線区のPCまくらぎはJIS E 1201に規定されるPCまくらぎである。コンクリートの設計基準強度はいずれも49.1N/mm²である。また、3線区はそれぞれ異なる鉄道事業者であり、C線区のみ通勤車両に加えて機関車(後述の車種C-2)が走行する。なお、3線区とも現地測定試験実施の過去1年間にレール削正やバラストの突き固めなどの軌道整備作業は一切行っていない。図-3には各PCまくらぎの使用性に関する設計限界値であるデコンプレッションモーメントを併せて示した。

2.2 測定方法

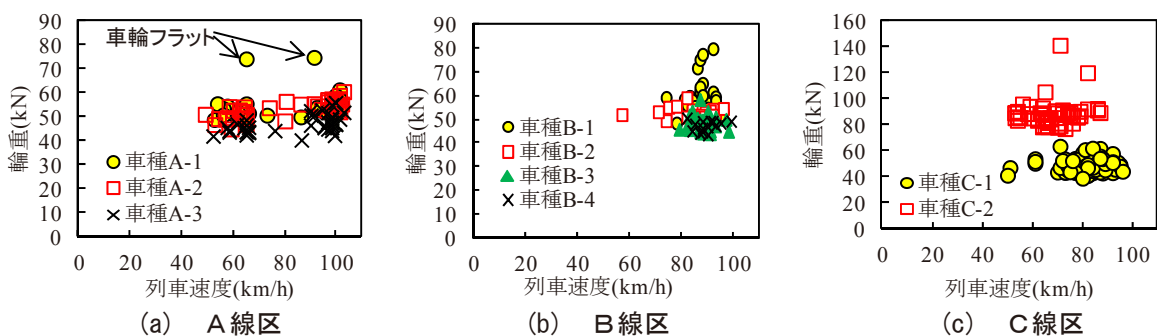


図-5 輪重の測定結果

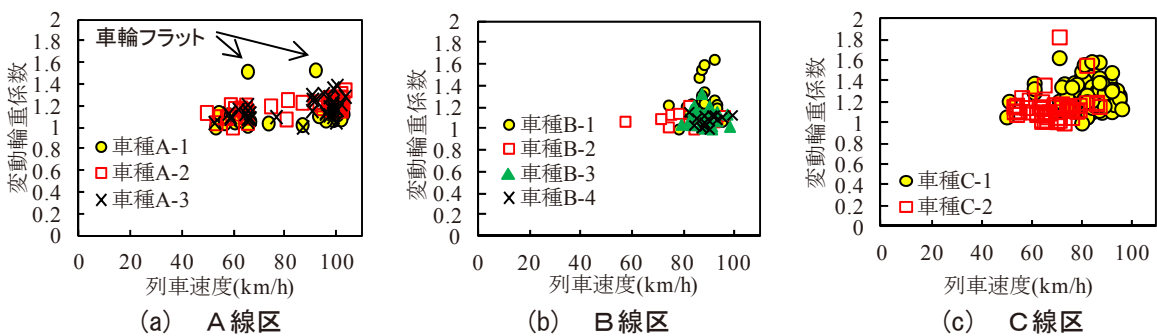


図-6 輪重の測定結果に基づく変動輪重係数

図-4 (a), (b)にレールおよびPCまくらぎへのひずみゲージの設置状況を示す。輪重ゲージの設置位置は図-4 (c)に示すように、レール長手方向に連続するPCまくらぎの中央とした。また、ひずみゲージは、PCまくらぎの照査断面であるレール位置断面とまくらぎ中央断面の上縁および下縁に貼り付け、測定されたひずみから中立軸を求め曲げモーメントに換算した。データはナショナルインスツルメントのモジュールに各ゲージを接続し、LANケーブルを介してPCに保存した。データ収集プログラムはLabVIEWを用いて構築した。本システムは測定区間から30m程度離れた地点のPCまくらぎ上に設置した圧電型加速度計(リオン)をトリガーとして自動収録するシステムとなっている。サンプリング周波数は10kHzとした。

2.3 測定結果

(1) 輪重と変動輪重係数

図-5に輪重の測定結果を示す。同じ車種であっても列車によって輪重がばらつくことが分かる。これは車両重量や車輪踏面の微細な凹凸形状の違いに起因すると考えられる。A線区においては車輪フラット検知装置で車輪フラット（ブレーキ時に車輪がレール上を滑走したときに生じる車輪表面が欠円状になる損傷）が検出された列車において著大な輪重が発生していた。B線区およびC線区においては検知装置で検出されたわけではないが、著大な輪重は車輪フラットによるものと推察される。測定輪重の最大値はC線区の141kNであり、すべての測定結果が変動輪重係数2.0を考慮した設計輪重160kN以内となった。

図-6に測定輪重を測定輪重の最小値で除すことにより求めた変動輪重係数を示す。同図より、測定結果をもとに換算した変動輪重係数は、すべてが設計における変動輪重係数2.0以内に収まることが分かる。ただし、車輪フラットに起因すると推察される輪重が測定された試番、とくにC線区の車種C-2については最大で1.8程度、A線区およびB線区については最大で1.6程度となった。

(2) 曲げモーメントと分散係数

図-7にPCまくらぎのレール位置断面における正曲げモーメントの測定結果を示す。ここでは車種による分類はせずに表示した。ただし、C線区においては曲げモーメントが大きい車種C-2の結果のみ記載した。連続する8~10本のPCまくらぎを対象として測定したが、ここでは曲げモーメントの平均値が大きい方から3本の結果を記載した。

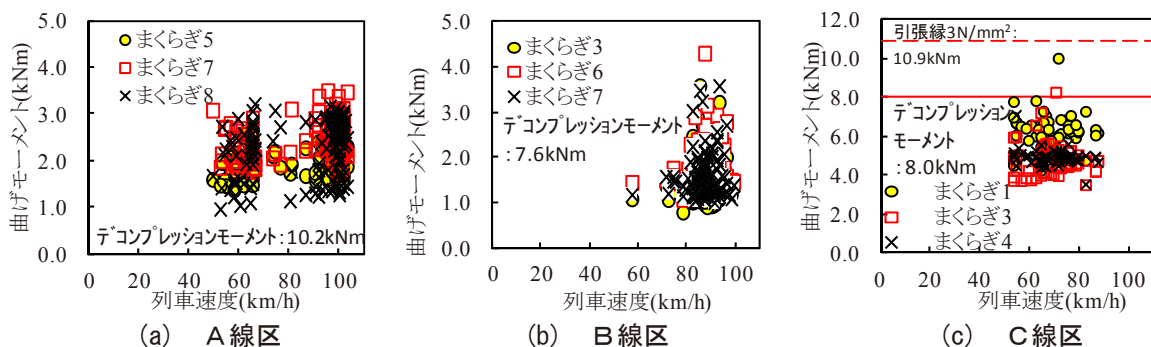


図-7 PCまくらぎのレール位置断面における正曲げモーメントの測定結果(上位3本を表示)

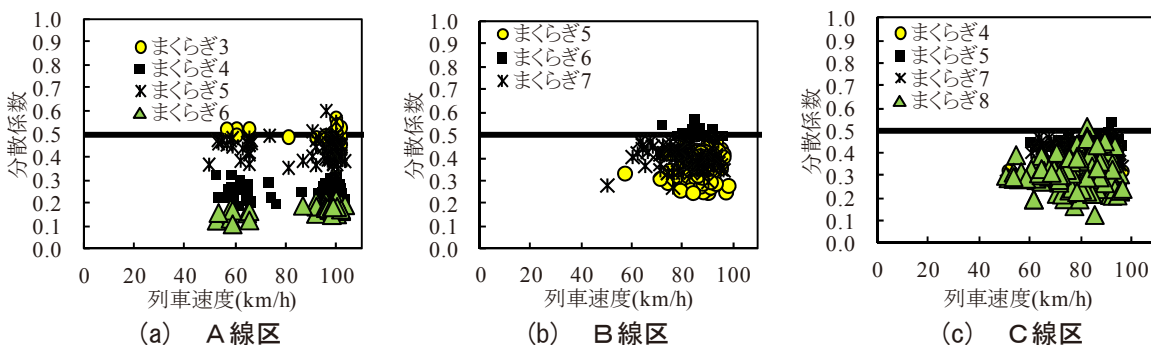


図-8 曲げモーメントの測定結果に基づく分散係数(連続5本のPCまくらぎの応答値から算定)

A線区におけるPCまくらぎの曲げモーメントは、デコンプレッションモーメント10.2kNmに対して最大で35%程度であった。B線区におけるPCまくらぎの発生曲げモーメントは、まくらぎ6において著大値がみられたが、デコンプレッションモーメント7.6kNmに対して最大で60%程度であった。

一方、C線区においては、デコンプレッションモーメントを超過する試番が確認された。これは、図-5に示した車種C-2において輪重141kNが測定された試番である。しかしながら、コンクリートの設計基準強度に基づき算定した、引張強度の特性値 3.1N/mm^2 がレール位置断面の引張縁に生じるときの曲げモーメントである10.9kNm以内であることが分かる。そのほかの試番においても、デコンプレッションモーメント8.0kNmとほぼ同等の曲げモーメントが発生していることが分かる。

図-8に測定曲げモーメントに基づき算定した分散係数を示す。ここでは車種による分類はせずに表示した。分散係数は連続する5本のPCまくらぎについて、中央のPCまくらぎの曲げモーメントが最大となる時刻において、当該PCまくらぎの曲げモーメントを5本のPCまくらぎに発生した曲げモーメントの総和で除すことにより求めた。同図より、どの線区においても分散係数が0.5を超過する場合があることが分かる。PCまくらぎごとに分散係数にばらつきが生じる理由としては、個々のPCまくらぎの支持状態に差異があるなど、軌道を構成する各種パラメータのばらつきの影響と考えられる。それらの影響の程度について、第3章の数値解析により行うこととする。

3. 数値解析による各種パラメータが分散係数に及ぼす影響に関する検討

3.1 解析手法

(1) 数値解析モデル

図-9に数値解析モデルの概要を示す。ここでは前述のA線区を対象とした。数値解析には、鉄道総研開発の車両と線路構造物との動的相互作用解析プログラムDIASTARSIII⁵⁾を用いた。車両については、車体、台車、輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパーで連結した三次元力学モデルで、1車両あたり31自由度を有する。列車は、車両モデルの端部に設けたばねとダンパーで連結して構成する。車両諸元はA線区を走行する車種A-3とした。軌道については有限要素法によりモデル化した。レールははり要素でモデル化し、節点間隔は1レール締結装置あたり20分割である。レールの頭頂面に

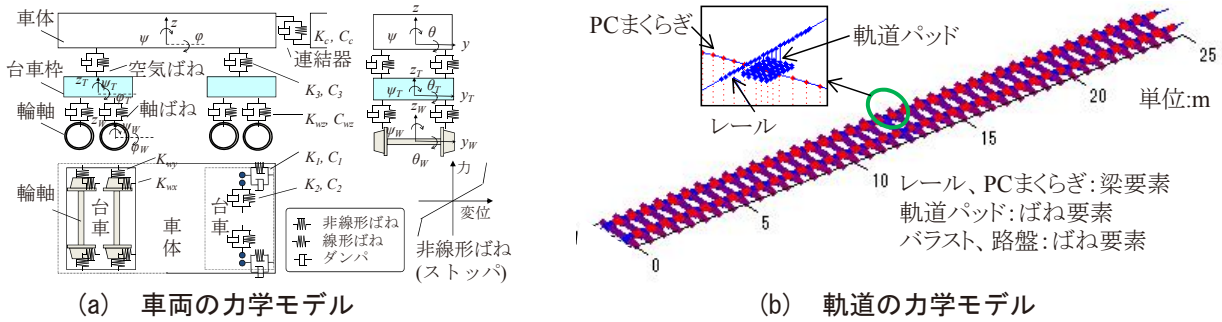


図-9 数値解析モデルの概要

は現地において長さ1mの測定機を用いて測定したレール凹凸と既往の車輪凹凸分布から復元した車輪踏面凹凸を与えた²⁾。PCまくらぎははり要素でモデル化し、節点間隔はPCまくらぎの曲げ変形形状を忠実に再現するため36分割とした。軌道パッドはばね要素、バラスト、路盤および路床を含む地盤は、両者を1つのばね要素に集約した。ここでいうPCまくらぎの支持剛性はバラスト、路盤、路床をすべて含むものとする。解析モデル全体で節点数は8338節点、要素数は13012要素である。数値解析はモーダル法により行った。解析におけるモード次数は、前述の測定周波数10kHz程度までの振動を再現できる次数とし、解析時間刻みは0.1msecである。解析に用いる減衰定数は固有振動モードの同定結果⁶⁾などを参考に0.1とした。

(2) 解析条件

表-3に解析に用いた材料定数を示す。数値解析では現地試験で対象とした8本のまくらぎのうち中央付近の『まくらぎ5』を対象とすることとした。各軌道部材とも軌道標準や鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物(以下、コンクリート標準)⁷⁾に記載された公称値を用いることを基本とするが、実測との整合性から軌道パッドのばね定数は公称値の2倍⁶⁾、路盤および路床を含む地盤の地盤反力係数 K_{30} は 30MN/m^3 を用いることとした。

表-4に解析ケースを示す。PCまくらぎの支持ばね定数、軌道パッドのばね定数、まくらぎ敷設間隔、PCまくらぎの支持状態の影響などをパラメータとして設定した。ここで浮きまくらぎとは、列車からの繰返し作用によりバラストが沈下し、まくらぎ底面とバラスト面との間に空隙が生じた状態のことをいい、本解析では一般部分の支持ばね定数の1/10のばね定数とすることにより、簡易に浮きまくらぎをモデル化した。

3.2 解析結果

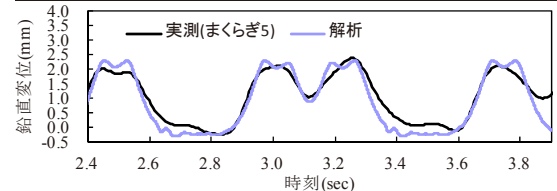
図-10にPCまくらぎの鉛直変位と曲げモーメントに関する数値解析と実測の比較を示す。同図より、数値解析と実測は概ね整合していることが分かる。図-11に各種パラメータが分散係数に及ぼす影響を示す。分散係数は図-8と同様の算出方法で求めた。同図(a), (b)より、PCまくらぎの支持ばね定数、軌道パッドのばね定数が大きくなるほど分散係数が大きくなる。また同図(c)より、

表-3 材料定数

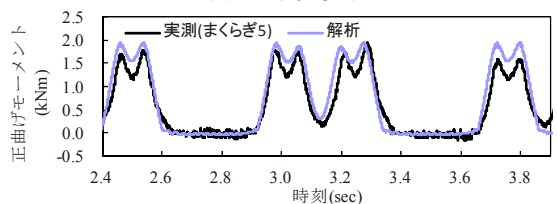
レール	50N レール、ヤング係数 E_s : 200MPa
軌道パッド	ばね定数 D_p : 140MN/m(公称値 70MN/m)
PCまくらぎ	PC 鋼棒: $\phi 9.2\text{mm}$ 4本 長さ L_p : 2300mm コンクリートヤング係数 E_c : 33MPa
バラスト	バラスト厚さ h : 180mm 支持ばね定数 D_B : 180MN/m(1レール分)
地盤(路盤,路床)	地盤反力係数 K_{30} : 30MN/m^3 支持ばね定数 D_s : 14MN/m(1レール分)

表-4 解析ケース

PCまくらぎ支持ばね定数(MN/m)	5、10、15($K_{30}=30\text{MN/m}^3$)、22、30($K_{30}=70\text{MN/m}^3$)、45($K_{30}=110\text{MN/m}^3$)
軌道パッドばね定数(MN/m)	56、70(公称値)、84、112、140(公称値の2倍)、168、196、224、252、280(公称値の4倍)
PCまくらぎ敷設間隔(本/25m)	25本~45本 (41本が基本ケース)
PCまくらぎの浮き	浮きなし (一様支持) CASE1: 当該まくらぎが浮き CASE2: 当該まくらぎの隣接6本が浮き(当該は浮いてない)

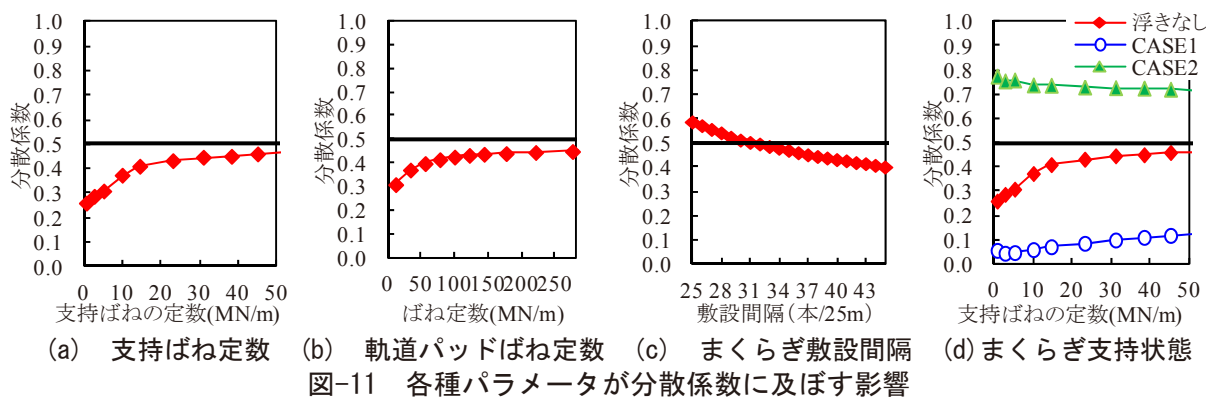


(a) 鉛直変位



(b) レール位置断面正曲げモーメント

図-10 数値解析と実測の比較



PCまくらぎに敷設間隔の増大に伴い、分散係数は増大し、25mあたりの敷設本数が31本を下回ると分散係数は0.5よりも大きくなる事が分かる。同図(d)より、当該PCまくらぎに浮きが生じると分散係数が小さくなる事が分かる。ただし、当然のことながら、PCまくらぎに浮きが生じると列車の乗心地や走行安全性に影響を及ぼすため、分散係数を低減する有効な方法にはなり得ない。また、当該PCまくらぎに隣接するPCまくらぎに浮きが生じた場合、分散係数が0.5よりも大きくなり、当該PCまくらぎの負担率が增大することが分かる。このため、設計条件を満足するためには、適切な維持管理により浮きまくらぎを発生させない必要がある。

表-5 本研究で提案する直線ロングレール区間における変動輪重係数と分散係数の例

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に整理する。

- ① PCまくらぎに作用する輪重は、今回の測定では最大141kNであり、変動輪重係数2.0を考慮した設計輪重160kNより小さい値となった。
- ② 実測で求めた変動輪重係数は、通勤車両で最大で1.6程度、貨物列車で1.8程度となり、現在のPCまくらぎの設計で一般的に用いられている変動輪重係数2.0は概ね妥当な値である。
- ③ PCまくらぎに発生する曲げモーメントは、PCまくらぎの支持状態によって大きな影響を受ける。浮きまくらぎを想定すると、分散係数は0.5を超過する可能性がある。また、敷設間隔が31本/25mよりも拡大すると分散係数は0.5を超過する可能性がある。

以上の成果を安全側に包含するように、適切な軌道整備による維持管理を前提とするが、直線ロングレール区間における敷設環境に応じた合理的な変動輪重係数と分散係数を表-5のように提案した。

	変動輪重係数		分散係数	備考
	使用性	安全性		
一般線区	2.0	4.0	0.5	適切な軌道整備が前提
通勤車両のみ走行線区	1.8	4.0	0.5	
通勤車両のみ走行線区(35本/25m未満)	1.8	4.0	0.7	

参考文献

- 1) 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
- 2) 渡辺勉，松岡弘大，箕浦慎太郎，山根寛史：PCまくらぎの動的応答性状に対するレール継目部の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.38, No.2, pp985-990, 2016
- 3) 宮本俊光，渡辺偲年：線路 - 軌道の設計・管理-，山海堂，pp.90-131, 1980
- 4) 涌井一，奥田広之：PCまくらぎ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.34-54, 1997.2
- 5) 涌井一，松本信之，松浦章夫，田辺誠：鉄道車両と線路構造物との連成応答解析法に関する研究，土木学会論文集，No.513/I-31, pp.129-138, 1995
- 6) 渡辺勉，箕浦慎太郎，松岡弘大，後藤恵一，水野圭太：画像計測に基づくPCまくらぎの支持剛性評価に関する基礎検討，第23回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2016)，2016
- 7) 鉄道総合技術研究所：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