

鉄道総研報告

第37巻 第4号

2023年4月

論文

- 車両** **施設** 2円筒試験装置を用いた実験による散水流量と車輪／レール接線力の関係評価
..... 山本大輔 (1)
- 施設** 水流中の3次元的な土砂の移動に基づいた河川橋脚周りの局所洗掘解析手法
..... 石井秀憲, 室谷浩平, 中出孝次 (9)
- 施設** 経年並びに通トンがPCまくらぎの耐荷力に及ぼす影響に関する実態調査
..... 渡辺勉, 後藤恵一, 箕浦慎太郎, 池田学 (17)
- 施設** ゲージコーナキ裂の抑制を図ったレール断面形状選定手法
..... 辻江正裕, 幸野真治, 曄道佳明 (25)
- 施設** 列車前方画像を用いた木まくらぎ劣化度判定システム
..... 加藤爽, 坪川洋友, 長峯望, 合田航, 前田梨帆, 糸井謙介 (33)

2円筒試験装置を用いた実験による 散水流量と車輪／レール接線力の関係評価

山本 大輔*

Evaluation of Relationship between Water Flow Rate and Tangential Contact Force of Wheel/Rail
Using Twin-disc Rolling Machine

Daisuke YAMAMOTO

In this study, to investigate the effects of various experimental conditions such as circumferential velocity of the test wheel, amount of water spray, and contact pressure on the tangential contact force characteristics, experiments to measure the tangential contact force were carried out at a maximum circumferential velocity of 130km/h. The results show that a small amount of water on the contact surface has a great influence on a decrease in the tangential contact force. Furthermore, it is clarified that the amount of water between actual wheels and rails when running in rainy conditions may be extremely small, when the amount of water intervenes on the contact surface is considered as an inverse problem from the experimental results under several water flow rate conditions. This tendency is similar for all contact pressure conditions and is qualitatively consistent with the actual phenomenon.

キーワード：車輪／レール，接線力特性，水潤滑状態，低粘着現象，車両運動

1. はじめに

雨天時を始めとする車輪／レール間の低粘着現象は、鉄道車両の輪軸の滑走を誘発して車輪踏面に滑走痕（いわゆる「フラット」）、レール頭頂面に損傷を生じさせることがある。このような損傷は、車両が走行する際に不快な騒音源となり快適性を損ねるだけでなく、車輪／レール間では過大な振動源になるため車両や軌道を構成する部品の損傷を助長する一因ともなる。このため、輪軸の過大な滑走を未然に防止することが望まれる。

この課題に対して、車輪踏面を研磨子により適度に粗して粘着力を向上させる手法¹⁾が考案されたこと、車輪の空転・滑走をいち早く検知しこれを収束することを基本とする再粘着制御技術の開発²⁾により、車輪やレールの損傷は大幅に低減したとされる。車輪の滑走を低減する手法に関する今後の展開として、車輪／レール間の接線力特性を考慮することが鍵となると推察される。このような考えから、これまで実験的研究が行われ数多くの報告もある。例えば、実物車両を用いた走行実験では、車輪／レール間が水潤滑状態となるとき粘着係数は乾燥時と比べて小さく、速度向上とともにこれが減少する速度依存性が認められること²⁾³⁾、さらに、車輪とレールの接触を一對の円筒試験輪の接触で模擬した2円筒試験装置を用いた乾燥条件での室内実験では、試験輪間の接触面形状とその表面性状、そして接触面の周辺湿度

が、乾燥条件のときに接触面に作用する接線力の増加・減少メカニズムに深く関与することが報告⁴⁾⁶⁾されている。その一方で、水潤滑条件では、車輪とレールの接触面は、理論的⁷⁾には水が混在した状態で、表面粗さの微小突起同士で接触していると考えられるが、現状では、ここに作用する接線力特性、すなわち「車輪／レール間の接線力係数とすべり率の関係」は海外で数件の報告⁵⁾がある程度で十分に理解されているとは言えない。

本稿では、車両の滑走制御や車両運動解析に活用することを念頭に、2円筒試験装置を用いた接線力測定実験（図1）により、実車輪／レール間と同等の接触面圧となる条件での散水流量と接線力特性の関係を定量的に評価する。また、室内実験での接線力特性がそのまま走行時の実車輪／レール間のものとはなり難いことを考慮し、計測した接線力係数と走行実験に基づく評価式との比較により、実現象と室内実験の関係についても触れる。

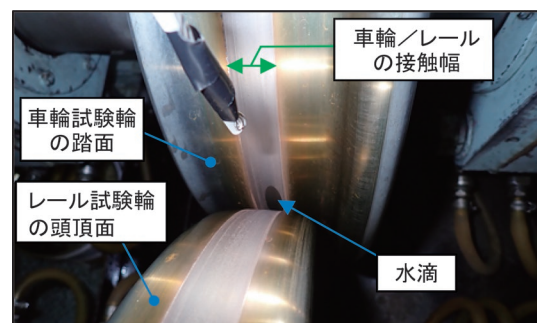


図1 車輪／レール間に滴下した水滴

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

2. 既往研究における接線力特性の概要

2.1 接線力の増加・減少メカニズム

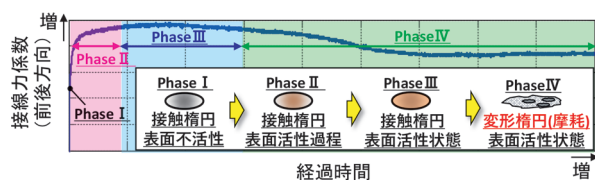
既報⁴⁾⁶⁾では、車輪とレールの接触を直径30mmの一对の小型円筒試験輪の接触で模擬した基礎的な接線力測定実験により、乾燥条件のときの接線力の増減メカニズムを調査している。ここでは、試験輪間のすべり率を一定条件として転動接触させた接線力測定実験により、試験輪の削正後から転動接触により接触面が摩耗するまでの間について、接触面形状とその表面性状、接触面の周辺湿度に着目して評価している。以下にこれらをまとめ、実験時に観察された現象を模式図で図2に示す。

- ① 時間の経過とともに接触面の表面性状が変化するため、接線力係数は増加して一定値に飽和する(Phase I～Phase III)。また、接触面が平滑な条件ほど接線力係数は大きい。
- ② 繰り返しの転動接触にともない接触面が摩耗するとその突起の先端で接触する形態に変化するため、接線力係数は最大値から若干低下する(Phase IV)。
- ③ 接触面の周辺湿度が定常的に30%以下と低い条件では接触面の潤滑効果が低下することで接線力係数がより大きい傾向を示す。

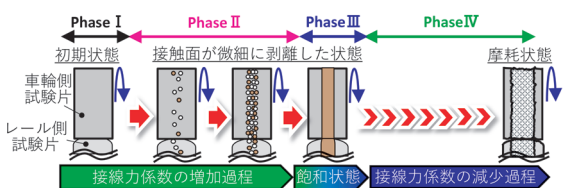
乾燥条件と水潤滑条件の接線力特性の差異は接触面に水が存在するか否かで、車輪鋼の降伏応力760MPaを超過するとされる車輪／レール間の高い接触面圧を考えると、鉄道車両の実用速度域では車輪とレールが水膜により完全に遮断されることは理論的⁷⁾には考えられない。すなわち、接触面で作用する力は流体のみにより伝達される訳ではないので、水潤滑条件でも接触面に作用する接線力の増減メカニズムに基づく考察が必要となる。

2.2 接触面が水潤滑状態のときの接線力特性

既報⁸⁾では、2.1節と同じ試験装置を用いて、水潤滑条件での接線力測定実験も行っており、試験輪の周速度が



(a) 接線力係数と試験輪間の接触楕円・表面性状の変化



(b) 2円筒実験による試験輪間の接触面の変化

図2 接線力の増加・減少メカニズムの模式図⁴⁾⁶⁾

20km/h程度まで増加する間に乾燥時の半分以下まで接線力係数が急峻に減少する実験結果を報告している。また、この理由として、自動車用ゴムタイヤが水に高速で衝突したときに作用する水の慣性力により生じる動圧とゴムタイヤ接地面圧の大小関係から両者が水膜により分離する臨界速度を求める理論⁷⁾と比較して考察している。具体的には、自動車用ゴムタイヤでは実用速度域でタイヤが水膜上に浮くハイドロプレーニング現象が生じるが、車輪／レール間の接触面圧はゴムタイヤ／路面間の場合より十分に高いため、実用速度域では車輪とレールが水膜により分離されることは理論的に考えにくい。その一方で、速度向上とともに水の動圧は増加するため、車輪とレールの表面粗さの隙間を通過して接触面へ浸入する水量が増加すると考えられ、これにより接線力は低減すると結論付けている。このような速度依存性は、営業線での実物車両を用いた走行実験でも「粘着係数(=接線力係数の最大値)と速度の関係」として同様に確認²⁾³⁾されており、その傾向は定性的に一致している。

しかしながら、「接触面に介在する水量と接線力係数の定量的な関係」や接触面が水潤滑状態となるとき「粘着係数とすべり率の関係」については明確でなかった。このため、第3章以降で実験的に評価する。

3. 2円筒試験装置を用いた接線力測定実験

雨天時を想定した接線力測定実験は、鉄道総研の2円筒試験装置の試験輪間に水を直接供給して実施した。実験では、接触面圧が実車輪／レール間の場合と同等となるよう設定し、試験輪の周速度、接触面で生じるすべり率、散水流量、試験輪に負荷する荷重(接触面圧)の4つの実験条件を変えたときの試験輪間の接線力係数とすべり率の関係を評価した。車輪試験輪とレール試験輪の断面形状⁹⁾は、それぞれ修正円弧踏面形状とJIS 50kgNレールとした。なお、本実験を効率のかつ効果的に実施するため、同一試験輪をさまざまな実験条件で繰り返し使用することとした。そのため、接触面の摩耗に起因して生じる試験輪間の接触面積の変化による実験誤差の偏在を防止することを考え、荷重とすべり率の実験順序をランダムに設定しながら行った。

3.1 実験装置

鉄道総研が所有する大型2円筒試験装置の一つである「車輪・レール高速接触疲労試験装置」(図3)を用いた。本試験装置は、直径500mmの車輪試験輪とレール試験輪の組合せで構成しており、実車輪／レール間に作用する接触面圧と同等とするため、油圧アクチュエータにより車輪試験輪をレール試験輪に押付けた。実際のレールの下部には1/40の勾配を有するタイププレートが

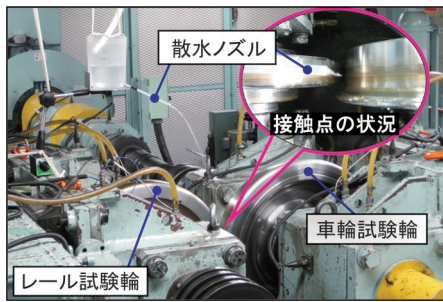


図3 水潤滑条件での接線力測定実験

敷設されていることが多く、この場合、レールは軌道中心方向に傾いて車輪と接触しているが、これと同様の接触状態とするため、本試験装置では車輪試験輪を約1.4deg.傾けて両者の接触状態を相対的に同等とした。実験では、車輪試験輪とレール試験輪を、実物輪軸がスラックのない軌道上の中立位置に載った状態と同等となる位置関係として接触させた。

雨天時を模擬した水潤滑条件での実験では、試験輪間の接触面を水潤滑状態とするため、散水装置を試験装置の台座にマグネットクランプで固定するとともに、試験輪の接触位置の上部40~50cm位置に設けたノズル先端から試験輪の接触面に向けて水を自由放水した。

3.2 実験条件

実験条件を表1に示す。接線力測定実験は、在来線を想定して最高速度130km/hで行った。荷重条件は、実車輪/レール間の接触面圧を想定した15kNを基本とし、一部の試験では比較のため5kNとした。また、試験輪の接触面の損傷防止の観点から、すべり率を1.0%以下に制限して実験を行った。散水流量は表1に示すCase IとCase IIの2条件とし、水の温度は11.2~18.3℃であった。特に、Case Iの散水量が少ない。

次に、散水流量の条件と実現象の関係について考える。レール頭頂面に載った水が全て車輪/レール間に供給されると仮定し、走行中の車輪/レール間に供給される水量を計算する。実物レールの頭頂面に載る最大水量を計測すると、JIS60kgレールの場合には65×52mm²あたり1.0mLであった(図4)。車輪/レールの接触幅を10mmとすると、走行速度と接触面に供給される水量の

表1 実験条件

荷重(kN)		5	15
最大接触面圧(MPa)		629	907.2
Hertz理論に基づく接触楕円の大きさ(mm)	長径の半値	3	4.22
	短径の半値	1.26	1.82
周速度(km/h)		10, 20, 30, 60, 90, 130	
すべり率(%)		0.2, 0.25, 0.3, 0.5, 0.65, 0.8	
散水流量(mL/分)	Case I	約26mL/分	
	Case II	約500mL/分	
水温(℃)		11.2~18.3	

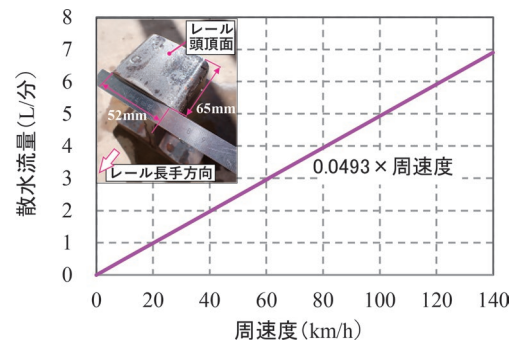


図4 実車輪/レールに換算したときの散水流量と周速度の関係

関係は図4となり、Case IとCase IIの散水流量が車両走行時の車輪/レール間に供給される最大想定水量に比べて十分少ないことが分かる

3.3 計測方法

計測項目は、車輪試験輪に作用するトルク T_w 、レール試験輪への押付力(荷重) N 、そして車輪試験輪とレール試験輪のそれぞれの周速度 v_w, v_r とし、試験装置に付属する計測装置によりサンプリング周波数1.0Hzでそれぞれ計測を行った。車輪試験輪の車輪回転半径(レール試験輪と接触する位置での車輪試験輪の半径)を r_w とすると、接線力特性の評価で必要となる試験輪間の接線力 F_{x_exp} とすべり率 s_x は、計測値を式(1)と式(2)に代入し演算で求めることができ、接線力係数は式(1)を押付力 N で除した値となる。

$$F_{x_exp} = \frac{T_w}{r_w} \quad (1)$$

$$s_x = \frac{100(v_w - v_r)}{v_w} \quad (2)$$

4. 接線力測定実験の結果とその評価

4.1 周速度と接線力係数の評価

水潤滑条件における試験輪の周速度と接線力係数の関係を評価する。すべり率0.3%、荷重15kNのときの実験結果を図5に示す。散水流量の条件は凡例のとおりで、接線力係数とすべり率の時系列波形に記した青色と緑色の網掛区間はそれぞれの評価区間を表し、その上下に記した下線付きの数値がそれぞれの平均値を意味する。

図5から、試験輪の周速度を増減すると接線力係数がこれに追従するように変動する様子がCase I(青線)とCase II(緑線)に共通して認められる。散水流量の少ないCase I(青線)で周速度130km/hの条件(250

～300秒付近)を除くと、周速度の速い条件ほど接線力係数は小さい傾向がそれぞれに認められる。特に、接線力係数は、周速度が30km/h程度まで増加する間に大きく低減する傾向が認められ、既報⁸⁾と同様の傾向となっている。散水流量の多いCase II(緑線)の接線力係数は、Case I(青線)のときより若干小さい傾向も認められるが、周速度60km/hから周速度90km/hで評価すると散水流量による差異は0.02程度で大きくない。

水潤滑条件での接線力係数は、同一試験装置を用いて計測した乾燥条件のときの接線力係数が0.35程度であったこと¹⁰⁾を考慮すると、乾燥条件のときの接線力係数に対して半分以下まで急峻に低減しており、接触面に介在する僅かな水の潤滑効果を顕著に受ける特性であることが分かる。ところで、Case I(青線)で周速度130km/hのときの接線力係数には不規則な大きな変動が認められる。これは周速度の増加により、接触面に介在する水膜が薄くなり局所的にセミウェットな状態となったためと考えられる。このような傾向は、荷重5kNの場合、さらに、既報¹¹⁾で実施した荷重25kNの場合でも同様の傾向が認められた。また、本稿では紙面の都合上記載を省略したが、散水流量を約9.4L/分とした多量の条件でも接線力係数は上記とほぼ同様であった。

以上から、水潤滑条件における周速度と接線力係数の関係では、接線力係数は乾燥時と比べて小さく、周速度30km/h程度までの間に接線力係数は急峻に低減し、そこから速度向上すると接線力係数は微減傾向を示す非線形的な速度依存性を有する特性となることが分かった。さらに、水潤滑条件での接線力特性は、接触面に浸入する極僅かな水でも十分な潤滑効果があり、散水流量が最少条件として設定した約26mL/分程度以上であれば、散水流量は接線力係数の低減に大きな影響は及ぼさないことが分かった。速度依存性については文献2と定性的に一致しており、散水流量と接線力係数の関係について

は、新たに分かった知見といえる。

4.2 接線力とすべり率の関係の評価

荷重15kNの場合の接線力係数とすべり率の関係を評価する。ここでは、周速度ごとに接線力係数が30秒間以上比較的安定している箇所を評価区間と定め、評価区間ごとに求めた接線力係数とすべり率の各平均値の関係を評価した。例えば、図5の接線力係数とすべり率の時系列波形の上部と下部に設けた青色と緑色の網掛区間で評価を行い、その結果、それぞれの平均値はその上下の下線付きの数値となる。周速度ごとにまとめた実験結果を図6に示す。散水流量ごとにCase I(約26mL/分)を青色▲印で、Case II(約500mL/分)を緑色▲印で示す。

図6(a)の周速度10km/hの場合、すべり率0.3%付近までは接線力係数が若干大きくなる傾向が認められ、すべり率が0.3%以上となると、接線力係数はそれぞれ0.15前後の値でおおむね一定となり飽和状態となっている。同様に、周速度20km/hから90km/hの場合(図6(b)～図6(e))でも、散水流量によらず周速度が向上すると接触面に浸入する水量が増加するため、接線力係数はそれぞれ小さくなっているが、すべり率の大小に対しては図6(a)と同様に一定傾向となっている。すべり率が0%から約0.2%となるときに接線力係数が大きくなる理由は、乾燥条件のときと同様で接触面内のすべり領域が増えるため、水潤滑条件の実験では、接触面が水潤滑状態となっているので、すべり率のより小さい条件から接触面が完全にすべり領域で占められた状態となり、接線力係数は小さい値で飽和すると考えられる。そして、これにより、すべり率が約0.2%から約0.8%までの範囲で接線力係数が一定となっていると考えられる。散水流量で評価すると、図6(a)と図6(b)の周速度10km/hと20km/hの低速条件では、散水流量が多い

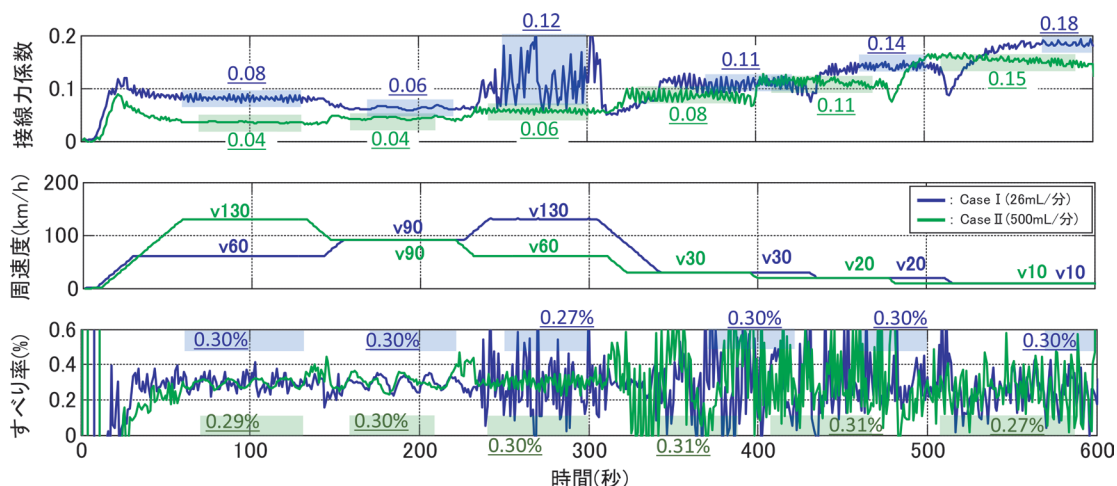


図5 散水流量の異なる条件における接線力係数、すべり率の計測結果の一例(荷重15kNの場合)

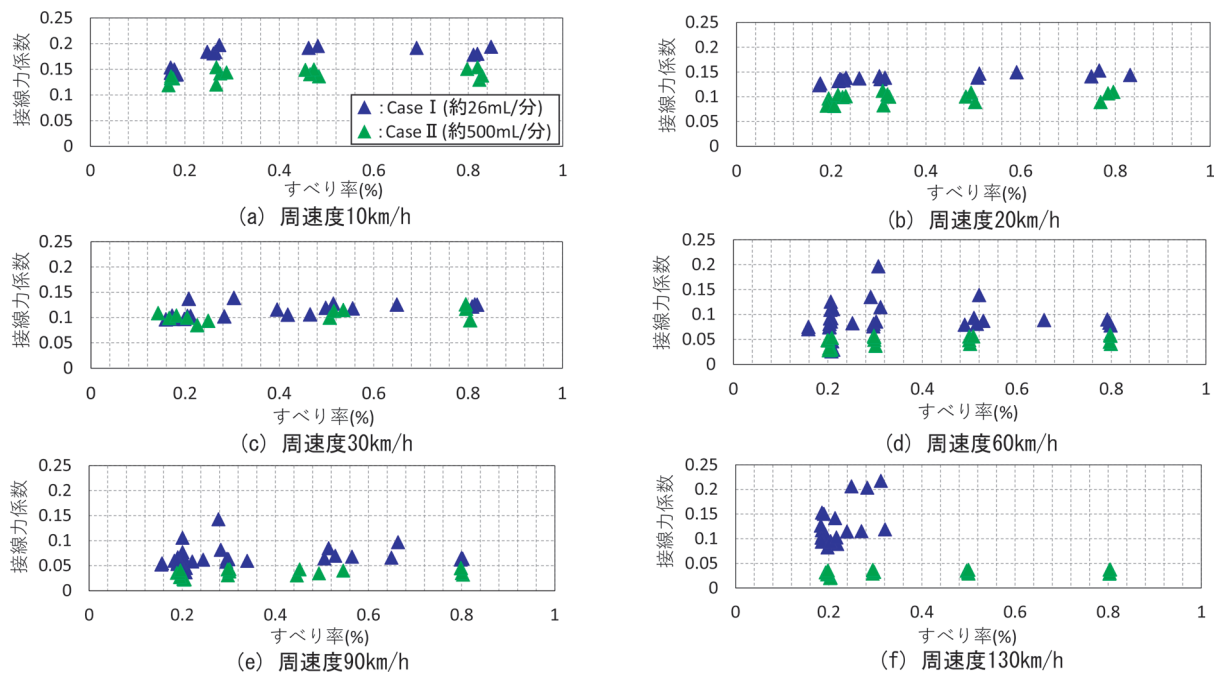


図6 周速度の異なる条件における接線力係数とすべり率の関係（荷重 15kN の場合）

Case II（緑色▲印）の接線力係数の方が若干小さい傾向が認められるが、周速度が向上して水の動圧が大きくなると接触面の潤滑状態が増すので、散水流量によらず接線力係数は低減する。その一方で、接触面に介在することができる水量には限界があるため、散水流量が接線力係数の低減に及ぼす影響は顕著でなくなる。周速度 30km/h から 90km/h（図 6 (c) ~ 図 6 (e)）では、それぞれの接線力係数は 0.1 程度と小さくなっており、さらに両者の差異も小さいことから理解できる。なお、図 6 (f) の Case I（青色▲印）の接線力係数が大きい理由は、4.1 節で述べたとおりで、ここでは評価しない。

ところで、実物車両を用いた走行実験で計測された接線力特性では、接線力係数がすべり率の増加とともに一度大きくなり、その後、すべり率の増加とともに低減傾向を示すことが一般的⁵⁾とされるが、図 6 はこの傾向とは異なる。この理由として、走行実験で計測された接線力特性は、短い区間で強制的に車輪を滑走させたときに計測された車輪／レール間の摩擦係数が大きい場所から小さい場所までの特性を一つの図に纏めた特性のため、室内実験のように定常的な摩擦係数の条件で計測された特性とはその形態が異なっていると考えられる。すなわち両者の差異は実験条件の相違によるもので、両者を補正することにより同一評価軸で評価できると考えられる。

以上から、水潤滑条件における接線力係数とすべり率の関係では、2 円筒試験装置を用いた場合は試験輪の接触面の摩擦係数が定常状態となるため、すべり率が小さい範囲から大きい範囲まで、接線力係数はおおむね一定

となることが分かった。また、このような傾向は散水流量によらず同様となることが分かった。そして、4.1 節と同様に、散水流量は接線力係数の低減に大きな影響は及ぼさないことが分かった。

4.3 実現象に対する散水流量の定量的評価

実現象と室内実験の関係を検討するため、計測した接線力係数を実現象の下限値を意味する粘着係数計画式などと比較することで、実現象に対する実験時の散水流量を定量的に評価する。ここでは、実物車両を用いた走行実験結果などから提案²⁾¹²⁾された粘着係数の計算式（新幹線用（式 (3)）および在来線用（式 (4)））を用いる。なお、 μ は粘着係数、 V は速度 (km/h) とする。

$$\mu = \frac{13.6}{V + 85} \tag{3}$$

$$\mu = 0.245 + \frac{1 + 0.05V}{1 + 0.1V} \tag{4}$$

最初に、両者の物理量を一致させる。4.2 節の実験結果から、接線力係数がすべり率 0.3% 以上のときに飽和する傾向が認められたことを踏まえ、余裕を加味してすべり率 0.5% 以上のときの接線力係数の平均値を粘着係数と定義する。そして、荷重 15kN のときに計測された粘着係数と、式 (3) と式 (4) を重ねて図 7 に示す。

図 7 (a) から、散水流量を Case I（青色□印）とした場合、荷重 15kN のときの粘着係数は新幹線用の計算

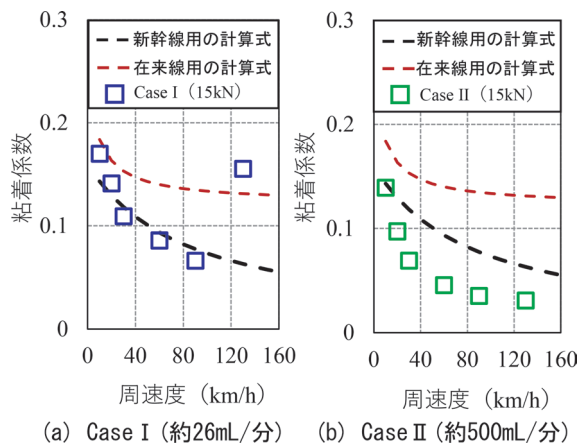


図7 接線力測定実験結果の定量的評価

式(式(3))におおむね沿っており、実車走行時に想定される下限値とされる接線力特性と同等と評価できる。その一方で、図7(a)の在来線用の計算式(式(4))と比較すると、速度向上とともに粘着係数の乖離が大きいの。同様に、図7(b)の散水流量をCase II(緑色□印)とした場合の粘着係数は、式(3)および式(4)より大きく下回っており、2円筒試験装置で計測した車輪/レール間の粘着係数は実現現象の下限値より小さいことが分かる。これらの実験では計測することができない接触面に介在する水量を散水流量から逆問題として評価すると、実際の車輪/レール間に介在する水量は、3.2節で仮定した室内実験の最少条件である散水流量26mL/分より少ない条件となることがあると推察される。その一方で、車輪/レール間の接触面に今回の実験条件と同等の散水流量で水が供給された場合には、実現現象の下限値より小さい粘着係数が計測される場合もあり得ることが分かった。

このように、実現現象の下限値を意味する粘着係数の計算式との比較により、散水流量を定量的に評価した結果、試験輪間に散水流量を約26mL/分より少なく連続的に供給したときの粘着係数が現象の下限値に近い条件となることが分かった。すなわち、雨天走行時に車輪/レール間に浸入する水量は非常に少ない可能性もあり、レール面上に大量の水があったとしても、その大半は接触面の周囲に流出していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、車両の滑走制御や車両運動解析に活用することを念頭に、2円筒試験装置を用いた接線力測定実験により、水潤滑条件における散水流量と車輪/レール間の接線力特性の関係を評価した。その結果、水潤滑条件における接線力特性は、荷重条件に関わらず、周速度が30km/h程度まで増加する間に接線力係数が乾燥時の半分以下まで急峻に低減し、その後は周速度が増加して

も接線力係数は微減傾向となる非線形的な速度依存性を示すこと、接触面に介在する僅かな水による潤滑効果の影響を顕著に受け、散水流量が僅か26mL/分程度と少量でも接線力係数は0.1程度まで小さくなること、そして、接触面に浸入することができる水量に限度があるため、散水流量を極端に多くしても接線力係数は大きく変動しないことをそれぞれ確認した。また、接線力係数とすべり率の関係については、すべり率の変動に関わらずおおむね一定となることが分かった。

なお、これに関連して、実現現象と室内実験の関係について検討した結果、室内実験に換算するとその最少条件である散水流量26mL/分が実現現象の下限値と同程度となることが分かった。

以上から、これらの知見を車両の滑走制御や車両運動解析に活用することによって、より効果の高い制御や精度の高い評価ができると考える。

今後は、本稿の知見を踏まえ、一般的な車両運動解析に実装することができる、雨天走行時の実態に即した実用的な車輪/レール接線力モデルを開発する計画である。

文献

- 丸山弘志, 大山忠夫: 高速鉄道車両のスキッド防止(特殊合成ブロックの新幹線電車における実用化), 日本機械学会論文集(第3部), Vol.44, No.388, pp.4342-4350, 1978
- 渡邊朝紀: 空転・滑走検知, 再粘着制御研究の内外の歴史と最近の動向, 電気学会誌, Vol.122, No.9, pp.613-617, 2022
- 永瀬和彦: 本線上におけるレール-車輪間の粘着の実態(すべり粘着台車による調査結果), 日本機械学会論文集C編 Vol.54, No.504, pp.1852-1860, 1988
- 山本大輔: 車輪/レールの過渡的な接線力特性における車輪削正痕の影響, 鉄道総研報告, Vol.33, No.8, pp.23-28, 2019
- Polach, O.: Creep forces in simulation of traction vehicle running on adhesion limit, Wear, Vol. 258, Issues 7-8, pp.992-1000, 2005.
- 山本大輔: 鉄道車両における車輪削正痕の車輪とレール間の過渡的な接線力特性, 日本機械学会論文集, Vol.85, No.876, DOI: 10.1299/transjsme.18-00394, 2019
- 酒井秀男: タイヤ工学, グランプリ出版, pp.271-276, 2004
- 山本大輔: 雨天走行時の車輪/レール接線力特性における車輪削正痕の影響, 鉄道総研報告, Vol.36, No.7, pp.27-34, 2022
- 高速車両用輪軸研究委員会: 鉄道輪軸, 丸善プラネット株式会社, p.58, 2008
- 山本大輔: 乾燥条件におけるコンタクトパッチの大きさに

着目した鉄道車両の車輪とレール間の接線力特性の評価,
日本機械学会論文集, Vol.86, No.888, DOI: 10.1299/
transjsme.19-00451, 2020

11) 山本大輔：散水流量の多寡に着目した車輪／レール間の接

線力特性に関する実験的評価, 日本機械学会論文集,
Vol.88, No.915, DOI: 10.1299/transjsme.22-00119, 2022

12) 電気鉄道ハンドブック編集委員会, 電気鉄道ハンドブック,
コロナ社, p.389, 2007

水流中の3次元的な土砂の移動に基づいた 河川橋脚周りの局所洗掘解析手法

石井 秀憲* 室谷 浩平* 中出 孝次*

Numerical Analysis of Local Scour Around Pier
Based on 3D Movements of Sediment Particles

Hidenori ISHII Kohei MUROTANI Koji NAKADE

This paper describes a numerical model developed to simulate the flow and scour around a bridge pier. The flow is modeled by large eddy simulation. The morphological change of riverbeds is calculated by coupling sediment transport with models for sediment pick-up and deposition. The sediment transport is calculated by 3D momentum equations of sediment particle. Sediment pick-up and deposition are modeled by stochastic models for the purpose of reducing computational demand. The numerical model was applied to the local scour around a vertical cylinder pile under clear water condition. The results agreed well with experimental data, except shape of downstream riverbed. It is concluded that this model can evaluate a local scour on the upstream side considering 3D movements of sediment particles.

キーワード：局所洗掘，河川橋脚，洗掘解析，連成解析，LES

1. はじめに

近年の地球規模の気象条件の変化に伴う降雨の激甚化により、大規模な洪水氾濫が頻発している。このような大規模な洪水により、河川橋梁の橋脚周辺が洗掘され、橋脚が沈下・傾斜する被害が発生している¹⁾²⁾。鉄道の河川橋梁は戦前・戦後頃に建設された旧式のものが多く、今後も鉄道の河川橋梁の被害が予想されることから、合理的な洗掘深予測方法や洗掘防止対策の開発が求められている。

水理構造物周りの河床変動解析は、その防災上の重要性から多くの研究がなされてきた。近年では、3次元的な流体計算を用いた河床変動解析の開発が進められている。

Roulundら³⁾は、乱流モデルに $k-\omega$ SSTモデルを用いて流れ場を計算し、河床勾配の影響を考慮した掃流砂量式と流砂の連続式による河床変動モデルを用いて円柱周辺の河床変動解析を行った。Baykalら⁴⁾は、Roulundら³⁾のモデルに浮遊砂の移動モデルを組み込んだモデルを用いて、円柱周辺の河床変動解析を行った。その結果、浮遊砂の移動を考慮したモデルの方が洗掘深が2倍程度大きくなったことを報告している。

Nagataら⁵⁾は2次元の運動方程式を用いた掃流砂の移動計算と土砂の離脱・堆積に関する確率モデルを組み合わせた河床変動解析手法を提案した。Nagataら⁵⁾はこの手法を用いて円柱周辺の河床変動を解析し、実験で

得られた洗掘孔形状の特徴を再現した。Otaら⁶⁾はNagataら⁵⁾の解析手法に掃流砂から浮遊砂への遷移過程に関する確率モデルを組み込むことで、浮遊砂への土砂巻き上げを考慮した河床変動解析手法を提案し、河川横断構造物上流における洗掘に適用した。解析結果は、洗掘形状の特徴を概ね再現したものの、最大洗掘深を過小評価する傾向となった。Otaら⁶⁾は最大洗掘深の過小評価について、浮遊砂への遷移モデルの係数設定に局所流の影響を考慮する必要があるとしている。

上述の河床変動解析^{3)~6)}は、河床変動に関わる土砂の移動を掃流砂と浮遊砂に分けて取り扱っていることが特徴である。掃流砂の移動は河床面付近の薄い層内での2次元的な運動として取り扱われ、浮遊砂の移動は無視されるか移流拡散現象として取り扱われる。

一方で、関根ら⁷⁾は掃流砂と浮遊砂の運動を一括して3次元の運動方程式で計算し、その特性について系統的な評価を行う研究を行った。その結果、掃流力の範囲によっては、従来の分類とは異なる形式の運動が存在することが明らかになり、従来の理論に限界があることが示された。

本研究で構築する河床変動解析は、将来的に複数構造物が影響する条件や根固めブロックなどの洗掘対策工が存在する条件での洗掘解析も解析対象とすることを目標としている。このような条件下では、土砂の移動がより3次元的な運動となり、掃流砂と浮遊砂を頻繁に遷移するような移動になることが予想される。従来の掃流砂と浮遊砂の移動を区別した計算では、このような移動形態

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

が頻繁に遷移する3次元的な土砂移動を十分に表現できるとは言い難い。そこで本研究では、流れの計算に水流中の非定常な渦構造を再現することに優れたLES乱流モデルを採用し、関根ら⁷⁾と同様に掃流砂と浮遊砂の移動を一括して3次元の運動方程式で計算する河床変動解析手法を構築した。土砂の離脱・堆積に関しては、Nagataら⁵⁾と同様に確率モデルを採用することで計算コストを抑え、長時間の現象を現実的な計算時間で解析できる手法とした。本手法により、橋脚周りなどの3次元的な流れ場に適用可能な計算量で、粗視化手法を用いない実粒径スケールの土砂の運動を河床変動計算に反映できることが期待される。本手法の妥当性検証の第一段階として、橋脚上流側の非攪乱域で土砂移動がない静的洗掘条件下で行われた単一円柱周りの洗掘実験⁸⁾の再現解析を行った。

2. 解析手法

本研究では、LES乱流モデルを用いた流体計算と土砂の3次元的な移動に基づく河床変動計算を連成した河床変動解析手法を構築した。本章では、流体計算と河床変動計算の手法についてそれぞれ詳述する。

2.1 流体計算

流体計算には、鉄道総研で開発を進めている不等間隔直交格子に対する有限差分法を採用した空気流シミュレータ⁹⁾を用いた。基礎式は非圧縮性流体に対するナビエ・ストークスの式である。座標系は3次元の直交座標系とし、 x 方向を流下方向、 y 方向を河川横断方向、 z 方向を鉛直方向とした。乱流計算はLESにより実施した。代表速度 U 、代表長さ L 、水の密度 ρ_1 、動粘性係数 ν 、レイノルズ数 $Re=UL/\nu$ としたとき、無次元化されたLESの基礎式は以下の式(1)、式(2)のようになる。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\tau_{ij}}{\partial x_j} + G_i \quad (2)$$

ここで、 $u_i=(u, v, w)$ は無次元化されたグリッドスケールの速度、 p は無次元化された圧力、 G_i は無次元化した重力加速度項である。 τ_{ij} は空間フィルターによって粗視化された流れにおける残余の応力であり、LESの計算においてはモデル化(サブグリッドスケールモデル(SGSモデル))される。SGSモデルは、コヒーレント構造スマゴリンスキーモデルを用いた。時間進行は、3次精度のアダムス・バッシュフォース法を、空間差分は2次精

度の中心差分法を用いた。円柱や河床形状の表現は計算格子単位で流体と固体を判別するボクセル法とした。再現解析対象のフルード数 Fr が0.143(平均流速 $U_0=0.171\text{m/s}$ 、平均水深 $h_0=0.146\text{m}$ より算出)と小さいため、水位差の影響が小さいとし、水面はRigid lid条件を適用した。解析領域の側方はすべり条件、固体壁面はすべりなし条件とした。また、再現解析対象の河床材料の粒径が小さく、無次元粗度高さが滑面として取り扱える範囲のため、河床面は滑面のすべりなし条件とした。

2.2 河床変動計算

本研究の河床変動計算は、土砂の移動を3次元の質点の運動方程式によって計算し、これと掃流砂の離脱・堆積に関する確率モデルを組み合わせることで、河床変動量を算出する。

2.2.1 土砂の離脱

土砂の離脱量は、pick-up rate p_s を用いて、次式により計算する。

$$V_p = \frac{A_3 d}{A_2} p_s S_p \quad (3)$$

ここで、 V_p は計算格子から単位時間当たりに離脱する土砂体積、 d は河床材料の粒径、 A_2 、 A_3 は粒径の2次元、3次元の形状係数($=\pi/4$ 、 $\pi/6$)、 S_p は離脱地点の計算格子の面積である。pick-up rate p_s は無次元掃流力と局所河床勾配を用いた離脱確率式である中川・辻本・村上の式¹⁰⁾により計算した。

河床底面の無次元掃流力 τ_* については、動圧勾配が河床の土砂に圧力勾配力をもたらすことを考慮し、Marsooliら¹¹⁾を参考に、河床近傍の動圧勾配を用いて次式で算出した。

$$\tau_* = \frac{|\tau_b|}{(\rho_s - \rho_1)gd} \quad (4a)$$

$$\tau_{b,j} = \mu \frac{u_{b,j}}{dz} - \frac{A_3 d}{A_2} \frac{\partial p_d}{\partial \vec{e}_{b,j}} \quad (4b)$$

ここで、 τ_* は無次元掃流力、 ρ_s は土粒子の密度、 $\vec{e}_{b,j}$ は $x-z$ 平面上と $y-z$ 平面上において局所河床面と平行な単位ベクトル、 $\tau_{b,j}$ は j 方向において修正された掃流力、 $u_{b,j}$ は河床最近傍セルの流速評価点における局所河床面に平行な流速の j 方向成分、 μ は粘性係数、 dz は河床面から河床最近傍セルまでの距離、 p_d は河床最近傍セルでの動圧である。

2.2.2 土砂の移動

計算セルの河床面に離脱量の情報を持たせた追跡粒子

を生成し、移動経路を計算する。Nagataら⁵⁾およびOtaら⁶⁾の手法では、2次元の運動方程式を用いて追跡粒子の移動経路計算を行い、掃流砂の移動経路を河床変動解析に反映させた。一方で、本手法では追跡粒子の移動を3次元の運動として計算することで、掃流砂に加えて浮遊砂の移動経路も河床変動解析に反映させることができるようにした。追跡粒子の運動方程式は関根ら⁷⁾と同様に以下の式を用いた。

$$\begin{aligned} \rho_1 \left(\frac{\rho_s}{\rho_1} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{d\vec{u}_p}{dt} &= \rho_1 \left(\frac{\rho_s}{\rho_1} - 1 \right) A_3 d^3 \vec{g} \\ &+ \frac{1}{2} \rho_1 C_D A_2 d^2 |\vec{u} - \vec{u}_p| (\vec{u} - \vec{u}_p) \\ &+ \rho_1 (1 + C_M) A_3 d^3 \frac{d\vec{u}}{dt} \\ &+ \frac{1}{2} \rho_1 C_L A_2 d^2 [|\vec{u}_{r,xy}|_T^2 - |\vec{u}_{r,xy}|_B^2] \vec{e} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $\vec{u}_p = (u_p, v_p, w_p)$ は追跡粒子の移動速度ベクトル、 $\vec{u} = (u, v, w)$ は水の流れ速度ベクトル、 $\vec{u}_r = (u_r, v_r, w_r)$ は両者の相対速度ベクトル、 \vec{g} は重力加速度ベクトル、 \vec{e} は成分 $(0, 0, 1)$ の単位ベクトル、 C_M は付加質量係数 ($=0.5$)、 C_D は抗力係数、 C_L は揚力係数 ($=0.2$) である。抗力係数 C_D は粒子レイノルズ数 $Re_p = |\vec{u}_r| d/\nu$ を用いて次式で評価した。

$$C_D = \frac{24}{Re_p} + \frac{3}{\sqrt{Re_p}} + 0.34 \quad (6)$$

式(5)右辺第4項は砂粒子周囲の速度勾配による揚力を示す項であり、 $\vec{u}_{r,xy}$ は鉛直方向成分を除いた相対速度ベクトル ($\vec{u}_{r,xy} = (u_r, v_r, 0)$)、添え字の T, B は球体の上縁点 (Top) および下縁点 (Bottom) を意味する。

追跡粒子が河床面付近に接近した場合は、追跡粒子の移動経路上の河床に模擬河床粒子を配置し、追跡粒子と河床粒子が衝突した際には非弾性衝突過程を計算し、衝突後の追跡粒子の速度を算出した。模擬河床粒子を配置する際には、関根・吉川¹²⁾の検討を参考に、平均河床面まわりの模擬河床粒子の高さ方向の分布が標準偏差 $\sigma_z = d/3$ の正規分布に従うように模擬河床粒子の配置を行った。

移動経路計算には追跡粒子間の干渉や各種係数への土砂濃度の影響は考慮されていない。解析対象の現象に対して、これらがどの程度結果に影響を及ぼすかは議論の余地があることをここに示す。

2.2.3 浮遊砂への遷移判定

Otaら⁶⁾は、確率モデルに基づいて掃流砂から浮遊砂への遷移判定を行った。一方で、本手法ではSekineら¹³⁾の掃流砂の最大跳躍高さに関する検討から掃流砂

層厚を定義し、追跡粒子の3次元運動に基づいた掃流砂から浮遊砂への遷移判定を行った。掃流砂の最大跳躍高さから求まる掃流砂層厚 T は次式で計算した。

$$T = (1 + h_s) d, \quad h_s = A_b \left(\frac{\tau_*}{\tau_{*c}} - 1 \right)^m \quad (7a, b)$$

ここで、 τ_{*c} は無次元限界掃流力である。また、 A_b , m は定数でありSekineら¹³⁾により提案された値である1.42と0.64を採用した。

追跡粒子が掃流砂層の外側へと移動したときに、浮遊砂へと遷移したと判定する。浮遊砂に遷移した追跡粒子については、次項の掃流砂の堆積確率モデルによる堆積計算を行わない。浮遊砂へと遷移した後も前項の運動方程式による計算を継続し、河床面に再付着した時点でその地点に全量が堆積するものとした。

2.2.4 掃流砂の堆積量計算

計算点 j での砂粒の離脱量を $V_{p(j)}$ としたときこの点から出発した追跡粒子の、出発から n ステップ後の位置における単位時間あたりの堆積量 $V_{d(j,n)}$ は、次式で求められる。

$$V_{d(j,n)} = V_{p(j)} f_s(S_{(n)}) \Delta s \quad (8a)$$

$$f_s(S_{(n)}) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{S_{(n)}}{\lambda}\right) \quad (8b)$$

$$S_{(n)} = \sum_{i=0}^n \Delta t |\vec{u}_{p(i)}| \quad (8c)$$

ここに、 $V_{p(j)}$ は離脱量 (初期体積)、 $f_s(S_{(n)})$ は step length の確率密度関数、 $S_{(n)}$ は粒子の累計移動距離、 λ は平均 step length、 $\vec{u}_{p(i)}$ は i ステップ目での追跡粒子の速度ベクトル、 Δt は時間刻み幅である。平均 step length λ は揚力の変動を考慮した Einstein 式¹⁴⁾で算出する。

本手法では、追跡粒子の移動経路上で堆積量を計算するため、堆積量の算定位置と計算格子点は一致しない。そこで、追跡粒子の近傍の計算格子中心点に対して、距離による重みづけを行い土砂堆積量を分配した。

式(8)で評価した単位時間あたりの堆積量 $V_{d(j,n)}$ および追跡粒子の土砂体積が河床材料の砂粒1つ分の体積 ($= \pi d^3/6$) を下回った際には、追跡を打ち切った。

2.2.5 河床高の変動計算

河床高の時間変化は、単位時間あたりの土砂の離脱量、堆積量を用いて次式により求める。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{(V_d - V_p - V_s)}{S_d} \quad (9)$$

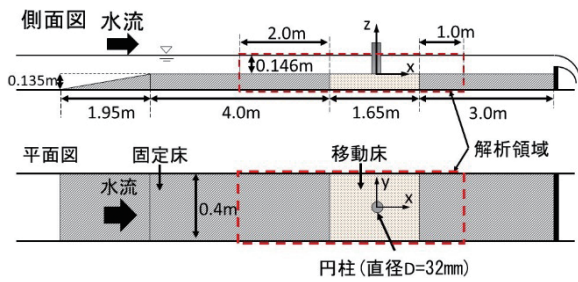


図1 実験概要図

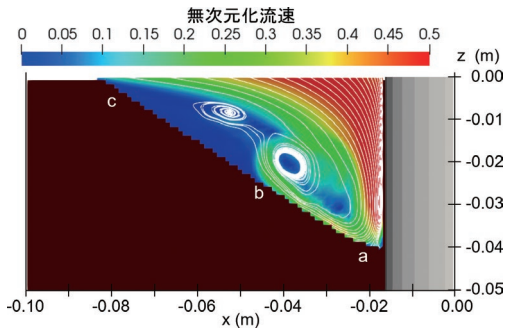


図2 通水 600 分時点の円柱上流の縦断面の流速分布と流線

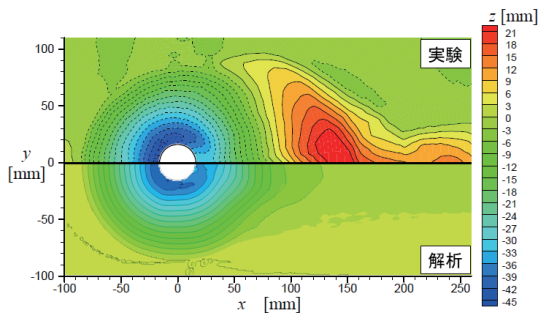


図3 通水 620 分後の河床面変位の実験結果⁸⁾ (上側)と解析結果 (下側) の比較

ここに、 Z_b は河床高、 A_1 は 1 次元の砂粒の形状係数 (=1.0)、 V_s はスライドによる移動量、 S_d は計算格子の鉛直方向投影面積である。

構造物近傍の局所洗掘現象においては、構造物近傍の洗掘の進行に伴って、急な河床勾配を有する斜面が洗掘孔内に形成される。局所的な河床勾配 θ_b が、限界勾配角 θ_{bc} 以上となると、河床斜面土砂のすべり崩壊 (いわゆるスライド) が生じる。そこで、本研究では関根の斜面崩落モデル¹⁵⁾ を用いて、 $\theta_b > \theta_{bc}$ となった場合の土砂移動量 V_s を算出した。 θ_{bc} には土砂の水中安息角を用いた。スライドによる土砂の移動は瞬時に行われるものと仮定し、スライドが生じた計算格子の pick-up 量 V_p にスライドによる土砂移動量 V_s を付加した。

3. 解析手法の適用

3.1 計算ケース

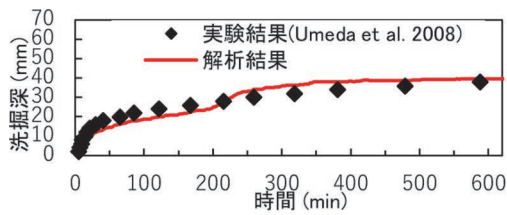
本手法の妥当性検証として、Umeda ら⁸⁾ の円柱周りの洗掘実験を対象に再現解析を行った。図 1 に、Umeda ら⁸⁾ の実験の概要図を示す。実験は長さ 12m、幅 0.4m、深さ 0.4m、勾配 1/1000 の水路で行われた。水路途中に長さ 1.65m の移動床部分が設けられ、砂が 0.135m の厚さで敷き詰められた。移動床部分の前後は砂面と同じ高さになるようアクリル板で底上げされた。移動床部分の中央部に直径 $D=32\text{mm}$ のビニール製円柱模型が設置された。移動床部分の砂には $d_{50}=0.139\text{mm}$ 、 $d_{60}/d_{10}=1.78$ 、比重 2.65 のものが使用された。上流側から水が $Q=9.985\text{L/s}$ で流入され、平均水深 h_0 は 0.146m、平均流速 U_0 は 0.171m/s であった。フルード数 Fr は 0.143 であり、円柱直径に対するレイノルズ数 Re_c は 4560 であった。非擾乱域で土砂移動はなく、静的洗掘条件であった。通水は 620 分間にわたって行われた。

次に解析条件を示す。流入および流出境界の位置が流れの計算に大きな影響を与えないことを確認した上で、図 1 中に赤枠で示した長さ 4.65m、幅 0.4m、高さ 0.281m の領域を解析対象とした。円柱近傍の河床面付近での最小格子を辺長 1.0mm の立方体とし、 x 方向 (流下方向) 750 格子、 y 方向 (横断方向) 260 格子、 z 方向 (鉛直方向) 128 格子の不等間隔格子を使用した。 $x-y$ 座標の原点は円柱模型中心の位置とし、初期河床面を $z=0.0\text{m}$ とした。流入境界を $U_0=0.171\text{m/s}$ に固定し、流出境界を対流流出条件とした。時間刻みは無次元時間間隔 $\Delta t=0.0002$ (実時間換算 $\Delta t_{\text{real}}=0.00117\text{s}$) とした。はじめに初期値を一様流とした状態から流体計算のみを行い、流れが十分に発達したのちに、流体計算と河床変動計算の連成計算を開始した。移動床を構成する砂は $d=0.139\text{mm}$ の均一粒径とし、無次元限界掃流力 τ_{*c} は岩垣の実験式¹⁶⁾ で算出した。Umeda ら⁸⁾ の論文内には水中安息角の情報が記載されていないため、実験後の洗掘孔の形状から水中安息角を 32° と推定し解析条件に反映させた。

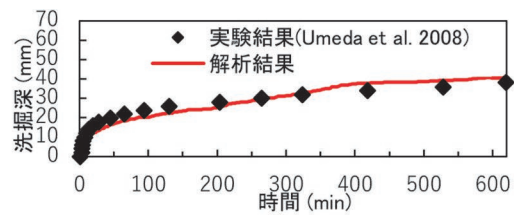
本手法を用いて、全てのステップで追跡粒子を生成して追跡を行うことは、計算時間や計算機のメモリの制約上、非常に困難である。そこで、本研究では 100 ステップごと (実時間換算 0.117s ごと) に追跡粒子を生成することとした。追跡粒子の移動・堆積および河床変動計算については、毎ステップ流体計算と交互に行った。追跡粒子が図 1 中の移動床領域の外に出た場合は追跡を終了し、粒子を削除した。

3.2 計算結果

図 2 に通水 600 分時点の円柱上流側の縦断面 (水路

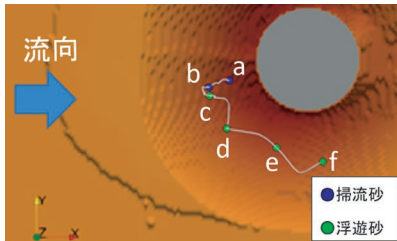


(a) 円柱上流側前面 ($x = -0.017\text{m}$, $y = 0.000\text{m}$)

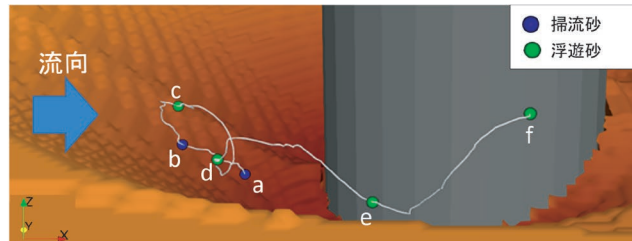


(b) 円柱上流側肩部 ($x = -0.012\text{m}$, $y = 0.012\text{m}$)

図4 洗掘深の時間変化

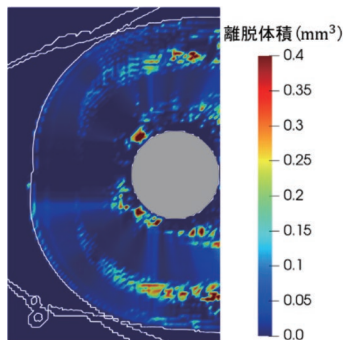


(a) 円柱上方側から

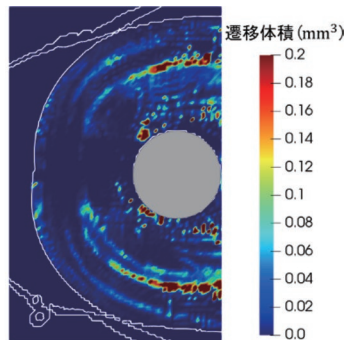


(b) 円柱側面側から

図5 円柱前面で離脱した追跡粒子の軌跡



(a) 土砂の離脱量



(b) 浮遊砂遷移量

図6 土砂の離脱量・浮遊砂遷移量 (累積値)

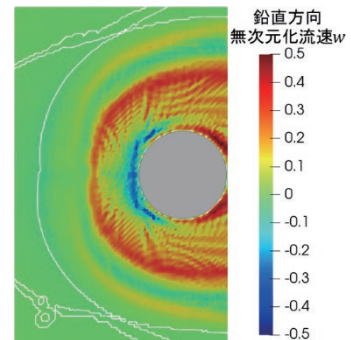


図7 洗掘深の時間変化河床最近傍セルでの無次元化流速の鉛直方向成分 (時間平均値)

中心線上)の流速分布と流線の解析結果を示す。流速分布のカラーコンターは上流側の平均流速 0.171m/s で無次元化している。図2中の a-b にかけては、馬蹄形渦が形成され河床面での流速が大きくなっており、この領域で pick-up が多く見られた。一方で、図2中の b-c は河床面での流速が小さいため pick-up は少なく、洗掘孔の拡大とともに、水中安息角に従ってスライドする様子が確認された。

図3に通水620分後の河床面変位の実験結果と解析結果の比較を示す。図3の上側半分が実験結果、下側半分が解析結果である。また、図3の左側が上流側、右側が下流側である。解析結果の洗掘孔は Umeda ら⁸⁾の実験結果と同様に逆円錐型の形状となり、円柱上流側の肩部から円柱前面付近で洗掘深が最大となった。円柱上流側の洗掘範囲についても、解析結果は実験結果とよく一致した。一方で、洗掘孔の下流側においては、一時的に堆積域が形成されることはあるものの、円柱背後の乱れた流

れにより砂粒が離脱して下流側に移動することで、結果として実験で見られるような堆積領域は再現されなかった。この原因としては、円柱後流の流れ場に対する再現性の不足が考えられる。また、堆積モデル中の平均 step length の式に構造物周辺の乱流場の影響が考慮されていないことも誤差の要因として考えられる。加えて、土砂の移動経路計算において追跡粒子間の干渉や土砂濃度の影響が考慮されていないことも要因として考えられる。しかしながら、堆積領域は再現されないものの、橋脚の安定計算で重要となる洗掘範囲については良好に再現されており、本手法により有益な結果が得られたと考える。

図4に洗掘深の時間変化を示す。(a)に円柱前面での洗掘深、(b)に円柱上流側肩部での洗掘深を示す。黒色の四角が実験結果、赤線が解析結果を示している。解析結果は、円柱前面・肩部ともに洗掘深の増加傾向をよく

再現しており、通水 600 分付近での洗掘深の誤差は前面・肩部ともに 10% 以内であった。

図 5 に通水 100 分時点で円柱前面 (図 5 中 a の位置) で離脱した追跡粒子の 5 秒間の軌跡を示す。追跡粒子が掃流砂の状態を青、浮遊砂の状態を緑で示す。円柱前面で離脱した追跡粒子は河床との接触を繰り返しながら、上流側に向かって移動した (図 5 中 a-b)。上流側斜面の中腹で馬蹄形渦の上昇流によって持ち上げられることで浮遊砂へと遷移し (図 5 中 b-c)、遷移した位置から水流の影響を受けながら、浮遊砂として下流側に移動した (図 5 中 c-f)。このような、円柱前面での土砂の移動は Umeda ら⁸⁾ の実験においても報告されており、本手法によって、実験で観測された 3 次元的な土砂の移動の特徴を再現できることが確認された。

図 6 (a) に通水 100 分時点から 10 分間の土砂の離脱量 (累積値)、(b) に浮遊砂への遷移量 (累積値)、図 7 に河床最近傍セルでの無次元化流速の鉛直方向成分 (時間平均値) を示す。図 6、図 7 中において河床面が $z=0.0\text{m}$ となる位置を白線で示している。図 6 (a) から円柱の上流側肩部と洗掘孔中腹で土砂離脱が多くみられた。放射状の分布はスライドモデルによる土砂離脱であると考えられる。図 6 (b) から円柱の上流側肩部から側方にかけて多くの遷移がみられる。また、洗掘孔中腹から外縁にかけて、同心円状に遷移体積が多い領域が分布している。図 5 の粒子軌跡および図 7 の鉛直方向流速の分布を考慮すると、洗掘孔斜面上を移動する砂粒子が底面付近の上昇流によって持ち上げられ浮遊砂へと遷移していることが予想される。

4. 結論

本研究では、掃流砂と浮遊砂の移動を一括して 3 次元の運動方程式で計算する河床変動解析手法を構築した。本手法の妥当性検証の第一段階として円柱周りの洗掘実験⁸⁾ の再現解析を行った。

解析結果の河床変位は、実験結果と比較して洗掘孔下流側の堆積領域が現れないという違いはあるものの、洗掘孔の形状や洗掘範囲について実験とよく一致した。洗掘深の時間変化については、洗掘深の増加傾向を精度よく再現した。円柱前面での砂粒子の移動についても、本手法によって実験で観測された 3 次元的な土砂の移動が再現できることを定性的に確認した。以上の結果から、本手法によって 3 次元的な土砂の移動を考慮した局所洗掘の評価を行えると結論付けた。これにより、洗掘対策工が存在する場合などのより複雑な条件へ適用できることが期待される。今後は、円柱後流の流れ場の再現性確認および堆積モデルの精緻化が課題であると考えられる。

なお、本論文は文献 17 を再構成したものである。

文献

- 1) 運輸安全委員会：南海電気鉄道株式会社，南海本線，列車脱線事故 (H29 年 10 月 22 日発生)，鉄道事故調査報告書説明資料，<http://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/p-pdf/RA2019-1-2-p.pdf> (参照日：2022 年 4 月 28 日)
- 2) 日野市：令和元年台風 19 号の対応概要報告 (最終報告)，https://www.city.hino.lg.jp/_res/projects/default_project/_page/_001/015/018/syuseigaiyou.pdf (参照日：2022 年 4 月 28 日)
- 3) Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsøe, J., and Michelsen, J., "Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile.," *J. Fluid Mech.*, Vol. 534, pp.351-401, 2005.
- 4) Baykal, C., Sumer, B.M., Fuhrman, D.R., Jacobsen, N.G. and Fredsøe, J., "Numerical investigation of flow and scour around a vertical circular cylinder," *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, Vol.373, Issue 2033, article no.20140104, 2015.
- 5) Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T., and Muramoto, Y., "Three-dimensional numerical model for flow and bed deformation around river hydraulic structures," *J. Hydraul. Eng.*, Vol.131(12), pp.1074-1087, 2005.
- 6) Ota, K., Sato, T., and Nakagawa, H., "3D numerical model of sediment transport considering transition from bed-load motion to suspension—Application to a scour upstream of a cross-river structure—," *J. JSCE*, Vol.4, pp.173-180, 2016. pp.23-32, 1996.
- 7) 関根正人, 小川田大吉, 佐竹宣憲：Bed material load の流送機構に関する研究，土木学会論文集，No.545/II-36, pp.23-32, 1996
- 8) Umeda, S., Yamazaki, T., and Ishida, H., "Time evolution of scour and deposition around a cylindrical pier in steady flow," *Proc. of 4 th Int. Conf. on Scour and Erosion*, pp.140-146, 2008.
- 9) 中出孝次, 井門敦志, 梶島岳夫：台車を含む鉄道車両モデルにおける車両床下の蛇行流れ (実形状の鉄道車両モデルにおける大規模流れ構造の LES)，日本機械学会論文集，第 87 巻，894 号，2021
- 10) 中川博次, 辻本哲郎, 村上正吾：側岸における非平衡流砂過程，第 29 回水理講演会論文集，pp.561-566, 1985
- 11) Marsooli, R. and Wu W., "Three-dimensional numerical modeling of dam-break flows with sediment transport over movable beds," *J. Hydraul. Eng.*, Vol.141(1), 04014066, 2015.
- 12) 関根正人, 吉川秀夫：掃流砂の停止機構に関する研究，土木学会論文集，No.399/II-10, pp.105-112, 1988
- 13) Sekine, M. and Kikkawa, H., "Mechanics of saltating grains," *J. Hydraul. Engng ASCE* 118, pp.536-558, 1992.

- 14) Einstein, H.A: Formulas for the transportation of bed load, Trans. ASCE., No.2140, pp.561-597, 1942.
- 15) 関根正人：斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション，水工学論文集，第47号，pp.637-642, 2003
- 16) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究(I)限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1-21, 1956
- 17) 石井秀憲，室谷浩平，中出孝次：水流中の土砂の3次元的な移動に基づいた円柱周りの局所洗掘解析，土木学会論文集B1（水工学），Vol.78, No.2, pp. I _1021- I _1026, 2022

経年並びに通トンが PC まくらぎの耐荷力に及ぼす影響に関する実態調査

渡辺 勉* 後藤 恵一** 箕浦 慎太郎* 池田 学**

Evaluation of Service Life of Aged Prestressed Concrete Sleeper

Tsutomu WATANABE Keiichi GOTO Shintaro MINOURA Manabu IKEDA

PC sleepers have been treated as replacement track materials that are replaced each time deformation occurs. For this reason, currently no criteria have been established for quantitative soundness assessment nor for replacement of sleeper. In this research, to establish a new maintenance management system, we collected aged PC sleepers, conducted a survey of aging deterioration, conducted various tests such as bending tests specified by JIS, and evaluated the load-bearing capacity of aged PC sleepers through numerical analyses using a three-dimensional FEM model. Based on these results, a guideline for the service life of PC sleepers was proposed.

キーワード：PC まくらぎ，維持管理，耐用年数，耐用期間，交換基準，数値解析

1. はじめに

プレストレストコンクリート製のまくらぎ（以下、PC まくらぎ）は鉄道の高速度化、快適化、安定輸送に欠かすことのできない重要な構成要素である。我が国のPC まくらぎは1951年に初めて試験敷設されて以降、現在までの累計敷設本数は国鉄、JRだけでも4000万本を超えている。

PC まくらぎの維持管理は、年1回程度の定期的な徒歩巡回において外観目視検査が行われ、PC まくらぎの表面状態を指標とする基準¹⁾に基づき交換の要否を判定する体系となっている。この基準は必ずしもPC まくらぎの耐荷性能とリンクしたのではなく定性的なものであるため、不良と判定されても交換の緊急性は不明である。このため、一般的なPC まくらぎの設計上の耐用年数である50年を超えても供用上問題がなければ使用を継続しているのが実態である。しかしながら、列車荷重や環境作用によりPC まくらぎの経年劣化は確実に進行するため、今後は耐荷性能に問題があるPC まくらぎが増加することが懸念される。

営業線におけるPC まくらぎの敷設本数は膨大であるが、一晩の夜間工事で交換できる本数は非常に限られている。このため、例えばある時期において、既設のPC まくらぎに耐荷性能を満足しない不良PC まくらぎが急増かつ連続的に発生した場合、交換工事が追いつかなくなり、安全性に影響を及ぼすことが懸念される。このような状況を回避するため、今後は予め定量的な耐用期間を定め、計画的に維持管理していくことが望ましい。

このような背景から近年筆者らは、新たな維持管理体

系の構築のため、凍害²⁾³⁾、アルカリシリカ反応⁴⁾や塩害⁵⁾などの変状が生じた経年PC まくらぎの実態調査を行っている。これらの研究により、PC まくらぎに変状が生じた場合の性能についてはある程度定量化されてきているが、具体的な耐用年数や耐用期間の提案までは至っていないのが実情である。

以上より、本研究では前述の変状が生じていない経年PC まくらぎを幅広く収集し、以下の点に着目して検討を行うこととした。

- (1) JISに規定される各種力学試験を実施し、PC まくらぎの耐荷力の実態を把握する。
- (2) 数値解析によりコンクリートおよび鋼材の物性が耐荷力に及ぼす影響を評価する。
- (3) PC まくらぎの耐荷力等の実態調査の結果を踏まえて、PC まくらぎの耐用期間の参考値を提案する。

2. 力学試験に基づくPC まくらぎの耐荷力評価

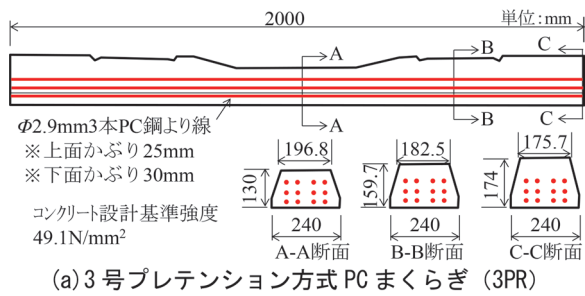
2.1 評価方法

2.1.1 対象としたPC まくらぎ

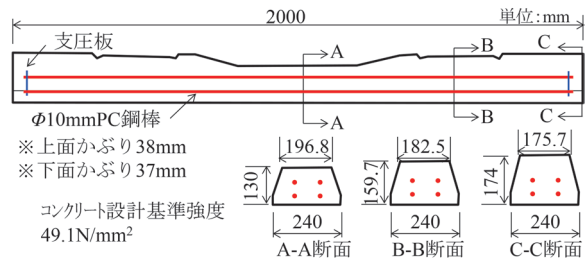
図1に対象としたPC まくらぎを示す。JIS E1201,1202に規定される品形が「3号」で、緊張方式がプレテンション方式(3PR)とポストテンション方式(3PO)のPC まくらぎを対象とした。3号PC まくらぎは直線区間および曲線半径800m以上の曲線区間に敷設され、我が国で最も敷設本数が多い。コンクリートの設計基準強度は49.1N/mm²、使用鋼材は3PR まくらぎではφ2.9mm-3本鋼より線が12本、3PO まくらぎではφ10mmのPC鋼棒が4本配置されている。かぶりについては3PR まくらぎは上面かぶりが25mm、下面かぶりが30mm、3PO まくらぎは上面かぶりが38mm、下面かぶりが37mmである。

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

** 鉄道力学研究部 構造力学研究室



(a) 3号プレテンション方式PCまくらぎ (3PR)



(b) 3号ポストテンション方式PCまくらぎ (3PO)

図1 対象としたPCまくらぎ

表1に試験対象としたPCまくらぎの経年別本数を示す。主に都市部の複数の線区に敷設されたPCまくらぎを収集しており、それぞれの本数は、3PRまくらぎは70本、3POまくらぎは65本である。

2.1.2 JISに規定される曲げ試験

図2にJIS E1201,1202に規定される曲げ試験の概要を示す。PCまくらぎの設計断面であるレール位置断面とまくらぎ中央断面に対して、正曲げ試験と負曲げ試験をそれぞれ実施する。荷重スパンは700mmである。本試験はPCまくらぎの製造直後の性能確認のために実施される試験であるが、本試験の他にPCまくらぎの力学的性能を定量的に評価でき、かつ適用実績が豊富な試験は存在しないため、本研究では本試験方法を経年PCまくらぎの評価に準用することとした。なお、本JISには規格値として曲げ保証荷重 P_{cr} 、曲げ破壊荷重 P_u が規定されており、それぞれ式(1)、式(2)により算定される値であり、試験では曲げ保証荷重 P_{cr} を荷重した時にひび割れを生じないこと、曲げ破壊荷重 P_u を荷重した時にPCまくらぎが破壊しないことを確認する。

$$P_{cr} = 4 \times (\sigma_{CPr} \times 0.9 + f_{ta}) \times Z/L \quad (1)$$

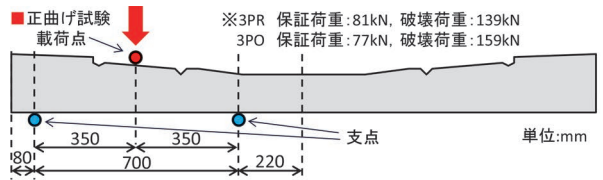
$$P_u = 4 \times 3\sigma_{pe} \times Z/L \quad (2)$$

ここに σ_{CPr} は導入プレストレス力によるコンクリート応力、 f_{ta} は許容引張応力度(=3N/mm²)、 σ_{pe} :有効プレストレス力によるコンクリート応力(有効率65%)、 Z は断面係数、 L は荷重スパン(=700mm)である。

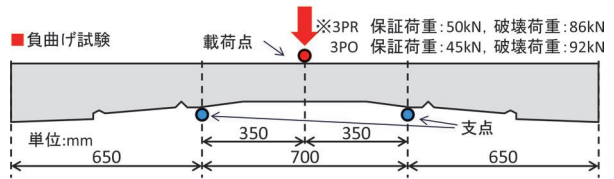
試験結果は、ひび割れ発生荷重と最大荷重で整理した。

表1 対象としたPCまくらぎの経年別の本数

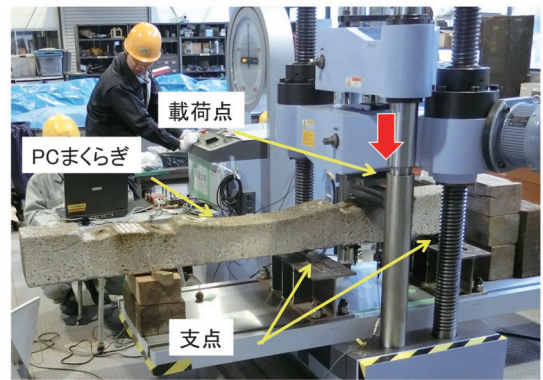
経年(年)	~10	~20	~30	~40	~50	~60	合計
3PR(本)	9	8	9	11	32	1	70
3PO(本)	16	18	10	5	16	0	65



(a) レール位置断面を対象とした正曲げ試験

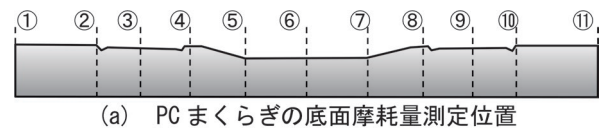


(b) まくらぎ中央断面を対象とした負曲げ試験



(c) レール位置断面を対象とした正曲げ試験の状況

図2 JISに規定される曲げ試験の概要



(a) PCまくらぎの底面摩耗量測定位置



(b) PCまくらぎの底面摩耗量の測定状況

図3 PCまくらぎの底面摩耗量の測定概要

ひび割れ発生荷重は目視でひび割れが発生したと判定した荷重、最大荷重はPCまくらぎが曲げ破壊し荷重が保持できなくなる最大の荷重である。

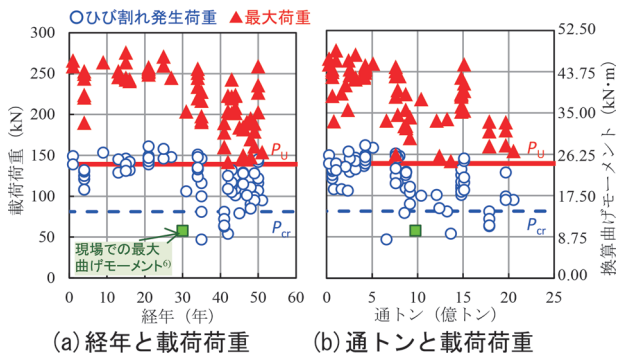


図4 3PR まくらぎにおける正曲げ試験結果

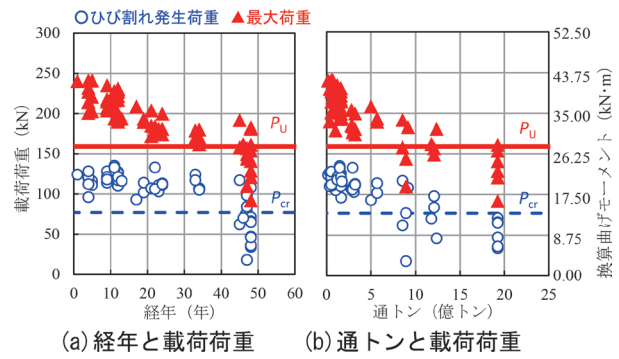


図5 3PO まくらぎにおける正曲げ試験結果

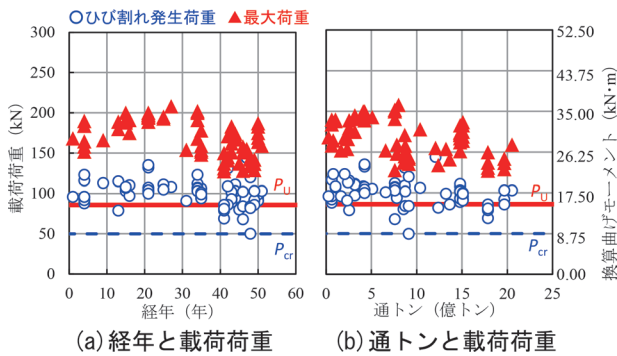


図6 3PR まくらぎにおける負曲げ試験結果

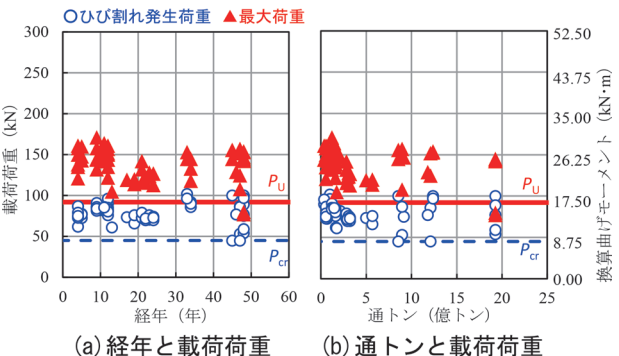


図7 3PO まくらぎにおける負曲げ試験結果

2.1.3 圧縮強度試験および静弾性係数試験

PC まくらぎのコンクリート強度と静弾性係数を求めるために、JIS A1108 に規定されるコンクリートの圧縮強度試験および JIS A1149 に規定される静弾性係数試験を実施した。なお、円柱供試体の直径は PC 鋼より線と干渉するため、50mm が最大となる。小径コアの強度を直径 100mm の供試体に補正する方法も提案されているが、本研究では小径コアで得られた値をそのまま評価に用いることとした。

2.1.4 PC まくらぎ底面の摩耗量測定試験

図3にPCまくらぎ底面の摩耗量の測定位置を示す。PCまくらぎの底面の摩耗量は、図3に示す11断面に対して、まくらぎ幅方向の3か所測定し、PCまくらぎ1本あたり、33か所の摩耗量をノギスとコの字型に加工した定規を用いて測定した。測定結果は断面ごとの最大摩耗量で整理した。なお、目視で明らかに摩耗が減少した状態ではなく、「欠け」と判断されるものは除外した。

2.2 評価結果

2.2.1 JIS に規定される曲げ試験

図4および図5に3PRまくらぎおよび3POまくらぎの正曲げ試験結果を示す。経年と載荷荷重、累積通過トン数（通トン）と載荷荷重の関係をそれぞれ整理した。図の右軸の換算曲げモーメントとは、載荷荷重と載荷ス

パンから求めた曲げモーメントの値である。また、図には JIS に規定される曲げ保証荷重 P_{cr} 、曲げ破壊荷重 P_U を併せて記載した。さらに、収集した PC まくらぎが敷設されていたある線区（在来線の直線ロングレール区間）における PC まくらぎの実測の曲げモーメントの最大値を緑のプロットで示した⁶⁾。なお、曲げモーメントは PC まくらぎの上縁と下縁に貼り付けた 2 枚のひずみゲージの実測値から換算して求めた。

図4および図5より、ひび割れ発生荷重は経年 30 年程度、通トン 5 億トン程度を超えると JIS の規格値を下回るものが見られる。最大荷重については経年 40 年程度、通トン 8 億トン程度で JIS の規格値を下回るものが見られた。また、ひび割れ発生荷重および最大荷重ともに経年や通トンの増加とともに低下する傾向が見られた。なお、PC まくらぎは工場製品で品質管理が徹底されており、製造初期の段階でひび割れ発生荷重や最大荷重にばらつきはあるものの曲げ保証荷重や曲げ破壊荷重などの JIS の規格値を満たさないことはほぼ考えられない。一方で本試験結果より、経年や通トンの増加とともに JIS の規格値と同等あるいは下回る結果も得られたことから、経年による材料劣化や列車荷重の繰返し作用等の影響により、耐荷力が低下している可能性が示唆される。このような低下の要因に関する検証は、後述する 3 章で数値解析により実施することとした。

さらに、図4において、前述の在来線の直線ロング

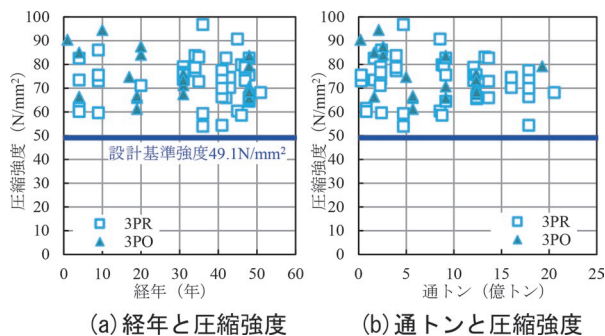


図8 圧縮強度の測定結果

レール区間で実測された最大曲げモーメント⁶⁾と曲げ試験におけるひび割れ発生時の曲げモーメントを比較すると、前者よりも後者の曲げモーメントの方が小さい結果が数例あることが分かる。このことから、曲げ試験におけるひび割れ発生荷重による曲げモーメントを上回る曲げモーメントが現場のPCまくらぎに発生している可能性があり、現場のPCまくらぎにひび割れ発生の可能性が想定される。そこで、既往の研究において実際の営業線のPCまくらぎに対してひび割れ調査を実施したところ、レール位置断面に曲げひび割れが発生したPCまくらぎが実際に存在することを確認している⁷⁾。

図6および図7に3PRまくらぎおよび3POまくらぎにおける負曲げ試験結果を示す。負曲げ試験についても正曲げ試験と同様な観点で整理したが、3PRまくらぎについてはすべてのPCまくらぎでひび割れ発生荷重および最大荷重がJISの規格値を上回った。3POまくらぎについてはJISの規格値を下回るものが見られたが、その低下の程度は正曲げよりも小さかった。

2.2.2 圧縮強度試験および静弾性係数試験

図8および図9にコンクリートの圧縮強度試験結果と静弾性係数試験結果をそれぞれ示す。3PRまくらぎと3POまくらぎに明確な違いが見られなかったことから同じグラフにプロットした。さらに、同図には、PCまくらぎのコンクリートの設計基準強度49.1N/mm²と鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物（以下、設計標準⁸⁾）に示される設計基準強度に対応した静弾性係数の標準値33kN/mm²を示した。図より、すべてのサンプルで圧縮強度は設計基準強度を上回るが、通トンの大きいものほど圧縮強度が全般的に低い傾向にあることが分かる。また、静弾性係数は33kN/mm²を中心に、最大で60kN/mm²程度、最小で20kN/mm²程度であり、大きくばらつくことがわかる。なお、設計標準に示される設計基準強度に応じたコンクリートの静弾性係数の標準値は全国の調査結果の平均的な値であり、骨材の種類と品質の程度、地域により大きくばらつくことが知られている⁸⁾。

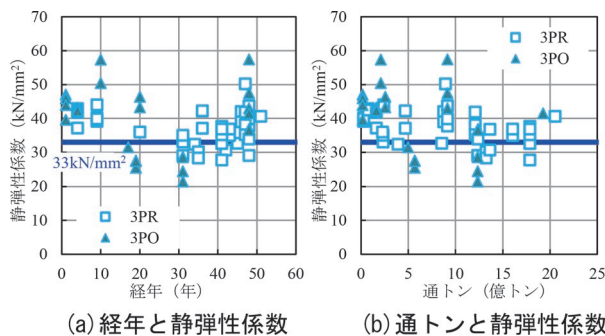


図9 静弾性係数の測定結果

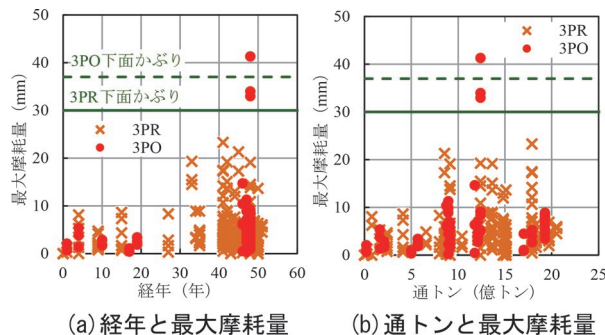


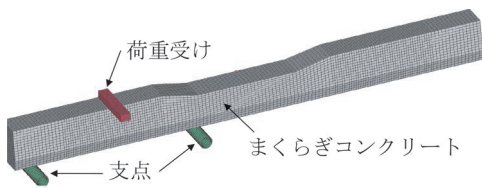
図10 PCまくらぎ底面の摩耗量

2.2.3 PCまくらぎ底面の摩耗量測定試験

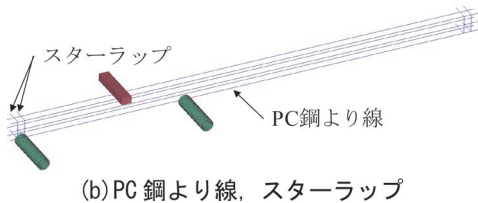
図10にPCまくらぎ底面の摩耗量の測定結果を示す。図より、今回のサンプルでは、3PRまくらぎについては底面のかぶりを超える摩耗量は測定されなかったが、3POについては40mmを超える摩耗量が見られる。なお、このように緊張方式により最大摩耗量に違いが生じた要因については、今回対象としたPCまくらぎ1本1本の敷設箇所を詳細に把握しているわけではないので今回の調査のみでは明らかにすることができない。また、累積通トンの増加とともに最大摩耗量が増加する傾向が見られる。しかしながら、例えば経年40年付近の最大摩耗量に着目すると最大値が23mmであるのに対し、数mmの摩耗しか生じていないものもあり、非常にばらつきが大きいことがわかる。このことから、ある最大摩耗量を閾値として耐用期間を一律に決めてしまうのは合理的ではない可能性があると考えられる。

3. 各種パラメータがPCまくらぎの耐荷力に及ぼす影響に関する数値解析による検討

本章では、2章の曲げ試験結果における最大荷重が経年や通トンに伴い低下する要因について、数値解析により検証を行った。ただし、時間の変化に伴う材料劣化を再現したわけではなく、単純にコンクリートやPC鋼材の物性が変化した場合に耐荷力に及ぼす影響を検証した。



(a) まくらぎコンクリート, 支点, 荷重受け



(b) PC鋼より線, スターラップ

図 11 3PR まくらぎの曲げ試験に関する
数値解析モデル (1/2 モデル)

3.1 解析方法

3.1.1 数値解析モデル

図 11 に数値解析モデルの概要を示す。図 2 に示した 3PR まくらぎの正曲げ試験をモデル化した。

本解析モデルは、PC まくらぎを構成するコンクリート、PC 鋼より線、スターラップ、曲げ試験を表現するための荷重受けおよび 2 つの支点からなる。レール締結用の埋込栓やその周辺のスパイラル筋はモデル化していない。また、解析時間の短縮を図るために、構造の対称性を考慮した 1/2 モデルとした。コンクリート、荷重受けおよび支点は 8 節点ソリッド要素で、PC 鋼より線およびスターラップは梁要素でモデル化した。要素積分点は、ソリッド要素には 1 点積分を、梁要素には 4 点積分を適用した。ただし、荷重受けおよび支点については剛体とした。要素サイズは 10mm を基準とし、最大でも 20mm 以下とした。解析モデル全体での総節点数は 42262、総要素数は 34856 となった。

境界条件は、解析モデルの対称境界には面対称を考慮した拘束を行い、荷重受けは鉛直方向（載荷方向）以外の自由度を、支点は全自由度を拘束した。PC まくらぎと荷重受け間、PC まくらぎと支点間、面と面の接触を定義した。また、PC 鋼より線およびスターラップの梁要素はコンクリート要素内に埋め込んでモデル化し、PC 鋼より線やスターラップの梁要素の節点がコンクリート要素に完全に付着しているものとした。

3.1.2 材料モデル

表 2 に本解析で用いた材料定数を示す。コンクリートの材料定数は、テストピースの一軸圧縮強度の値と設計標準⁸⁾を参考に設定した。PC 鋼より線の材料定数は、弾性係数およびポアソン比は設計標準の値を、降伏応力および引張強度についてはミルシートから読み取った。

図 12 に本解析で用いた材料モデルを示す。図 12 (a) にコンクリートに関する単軸換算の応力-ひずみ関係を示

表 2 解析に用いた材料定数

材料	静弾性係数 E (kN/mm ²)	ポアソン比	圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	引張強度 f_t (N/mm ²)
コンクリート	35.0	0.20	60.0	3.53
PC 鋼より線	200.0	0.30	降伏 σ_y : 1500.0 最大 σ_u : 1998.0	
スターラップ	200.0	0.30	弾性体	
荷重受け・支点	剛体			

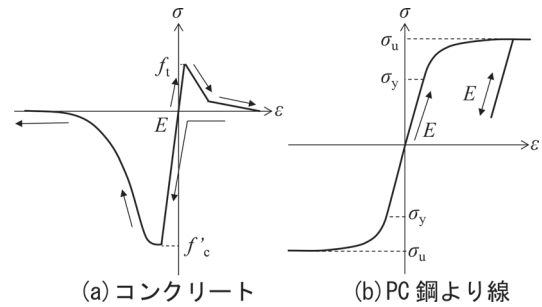


図 12 材料モデル

表 3 解析ケース

着目パラメータ	値
コンクリートの設計基準強度 (N/mm ²)	60, 50, 40, 30
PC 鋼より線の強度 (σ_y および σ_u に対する倍率)	1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6
有効緊張率 (%)	100, 90, 80, 70, 60

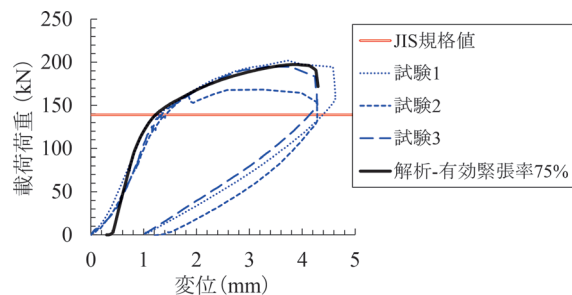


図 13 試験結果と解析結果の比較

す。圧縮側は圧縮強度に達した後にひずみ増加に応じて徐々に応力が軟化するモデルを⁹⁾、引張側は引張強度に達した後の軟化曲線をコンクリートの引張破壊エネルギーに基づき 2 直線で近似するモデルとした⁸⁾。図 12 (b) に PC 鋼より線に関する単軸換算の応力-ひずみ関係を示す。本材料モデルは、ミルシートから読み取った引張試験力-伸び関係を応力-ひずみ関係に換算して入力した。

3.1.3 JIS の曲げ試験の再現方法

JIS の曲げ試験の再現は 2 つのステップで行った。第 1 ステップでは、緊張力に相当する引張応力を各 PC 鋼より線の梁要素に導入し、平衡状態を求めることでプレストレスを考慮した PC まくらぎの応力状態を求めた。なお、PC 鋼より線に導入される緊張力 (28.7kN/本) の有効率 (有

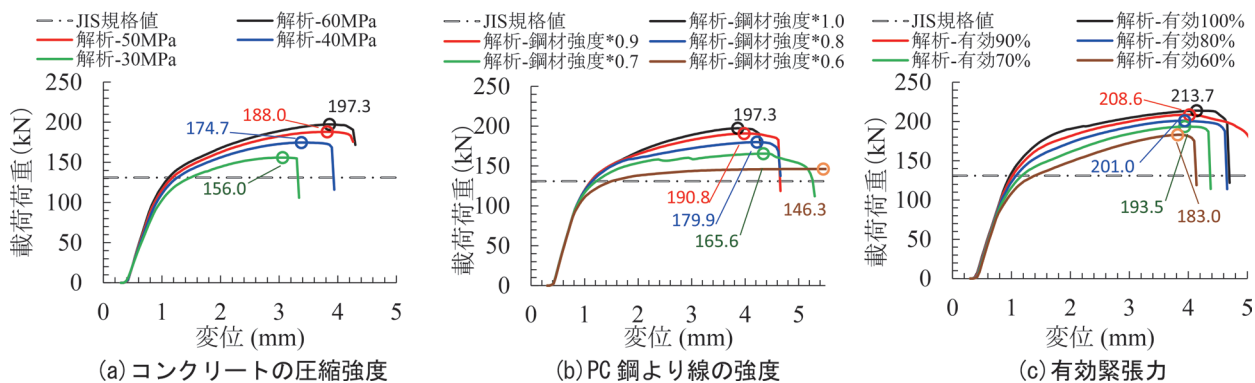


図 14 各種パラメータが耐力に及ぼす影響

効緊張率)は後述する実測結果との整合性より75%とした。第2ステップでは、第1ステップで求めた平衡状態のPCまくらぎに荷重受けおよび支点との接触を考慮し、荷重受けに鉛直方向の強制変位を与えることで曲げ試験を再現した。曲げ試験時の載荷荷重については、強制変位を与える荷重受けの反力から計算した。また、載荷変位については、実際の曲げ試験に合わせて荷重受けの変位とした。なお、時間積分法には中央差分を用い、その時間刻みは 1.5×10^{-6} 秒程度(載荷速度:20mm/sec)とした。

3.1.4 解析ケース

表3に解析ケースを示す。コンクリートの設計基準強度、PC鋼材の強度、プレストレス力をパラメータとした。ここでは2章での結果を踏まえて、経年による材料劣化や列車荷重の繰返し作用等によって、これらの値が変動するものと仮に想定した場合に、耐力への影響を検証するために、材料強度を低下させる方向で値を設定した。なお、コンクリートの静弾性係数は設計標準⁸⁾に基づき、設計基準強度に対応した値を設定した。また、これらの値の低下が複合する場合も当然想定されるが、今回の検討では、まず個々の要因を把握するため、個別に値を変化させることとした。

3.2 解析結果

3.2.1 数値解析の妥当性

図13に試験結果と解析結果の比較を示す。試験結果は3本のPCまくらぎの試験結果を示した(試験1,2,3)。解析モデルにおける有効緊張率75%は試験結果と解析結果の荷重-変位関係が近くなるように試行錯誤的に決定した。図より、表2に示した材料定数を使用することおよび有効緊張率を75%とすることで、PCまくらぎの曲げ試験時のひび割れに伴う剛性低下や耐力(最大荷重)、破壊までの荷重-変位関係を精度よく再現可能であることが分かる。なお、PCまくらぎの設計ではPC鋼より線の有効緊張率として65%が使用される¹⁰⁾が、65%とすると解析結果は試験結果よりも小さい荷重-変位関係となり、試験結果を精度よく再現することはできなかった。

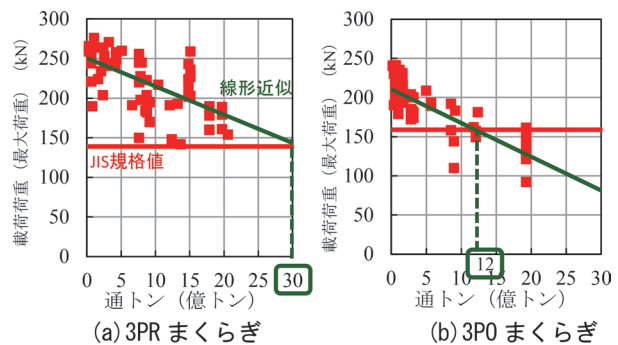


図 15 PCまくらぎの耐用期間の参考値の提案

3.2.2 各種パラメータの影響

図14に表3で設定した各種パラメータが耐力に及ぼす影響を示す。当然のことながら、材料強度や有効緊張力(プレストレス力)を減少させれば耐力は低下する。例えば、コンクリートの圧縮強度が 60N/mm^2 から 30N/mm^2 に低下すると最大荷重は20%程度($197.3\text{kN} \rightarrow 156.0\text{kN}$)減少、PC鋼材の強度が60%に減少すると最大荷重は26%程度($197.3 \rightarrow 146.3$)減少、有効緊張力が100%から60%に減少すると最大荷重は15%程度($213.7\text{kN} \rightarrow 183.0\text{kN}$)減少した。前述の通りPCまくらぎの耐力にはこれらのパラメータの初期強度の違いが大きく影響するが、2章で示した通り、曲げ試験結果における最大荷重が経年や通トンに伴い低下した要因や、PCまくらぎは工場製品であり製造初期でJISの規格値を満足しないことはほぼ考えられないが、サンプルとしたPCまくらぎにはJISの規格値を満足しないものが存在した要因について、これらの材料強度の低下がある一定の影響を及ぼしている可能性が示唆された。ただし、コンクリートやPC鋼材の要因が複合した場合の影響の評価、経年や列車荷重の繰返し作用等に伴う材料強度への影響に関する現象解明や検証は今後の課題としたい。

4. PCまくらぎの耐用期間の参考値の提案

図15に2章の評価結果に基づく3PRまくらぎおよび

表4 今回の検討結果に基づく
3号 PC まくらぎの耐用期間の参考値

種別	耐用期間の参考値 (通トン (億トン))
3PR	30
3PO	12

3PO まくらぎの耐用期間の参考値を示す。ここでは、レール位置断面の正曲げ試験における累積通トンと載荷荷重（最大荷重）の関係に基づき、測定値を線形近似した近似直線がJISに規定される曲げ破壊荷重を下回る累積通トンを耐用期間の参考値を提案することとした。その理由としては、①図4から図7より、経年の増加とともにひび割れ発生荷重及び最大荷重が低下する傾向が見られたが、大都市の高密度線区と地方の閑散線区を同じ経年で管理するのは合理的でないこと、②まくらぎ中央断面の負曲げ試験ではJIS規格値を下回る結果がほとんどなかったこと、③圧縮強度はすべてのサンプルで圧縮強度が設計基準強度を上回っていたこと、④静弾性係数は閾値となる規格値が定められているわけではないこと、⑤PC鋼線が露出するほどの摩耗量が測定されるのは極めて稀であることなどである。

以上の観点から整理したPCまくらぎの耐用期間の参考値を表4に示す。具体的には、3PR まくらぎは、累積通トンで30億トン、3PO まくらぎは、累積通トンで12億トンを参考値として提案した。

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) 経年PCまくらぎ(3PR, 3PO)の曲げ試験を実施した結果、ひび割れ発生荷重および最大荷重ともに経年や通トンの増加とともに低下する傾向にあることを明らかにした。
- (2) 数値解析により各種パラメータが耐荷力に及ぼす影響を検討した結果、材料強度や有効緊張力(プレストレス力)を減少させると耐荷力は低下する。PCまくらぎの耐荷力にはこれらのパラメータの初期強度の違いが大きく影響するが、2章で示した通り、曲げ試験結果における最大荷重が経年や通トンに伴い低下した要因、あるいはPCまくらぎは工場製品であり、製造初期でJISの規格値を満足しないことはほぼ考えられないが、サンプルとした経年PCまくらぎにはJISの規格値を満足できないPCまくらぎが存在した要因について、これらの材料強度の低下がある一定の影響を及ぼしている可能性が示唆された。

- (3) 本研究で実施した経年PCまくらぎの実態調査の結果を踏まえて、PCまくらぎの耐用期間の参考値を提案した。

- ・3PR まくらぎは、累積通トンで30億トン
- ・3PO まくらぎは、累積通トンで12億トン

今後も経年PCまくらぎを対象とした調査を行い、経年や累積通トンに伴う耐荷力の変化を継続的に把握し続けるとともに、PCまくらぎの経年劣化現象のメカニズムの解明についても検討を進めていきたい。また、本研究では、あくまでPCまくらぎ1本を対象とした評価結果に基づくものであり、軌道全体の性能に基づくものではない。このため、軌道全体の性能を踏まえたPCまくらぎの交換のタイミングを精査し、より合理的な耐用期間を提案することが今後の大きな課題であると考えている。

文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準（軌道編）の手引き，pp.236-237，2007
- 2) 渡辺勉，後藤恵一，飯島亨，盛田慶：寒冷地におけるAEコンクリートを使用していない経年PCまくらぎの性能評価，第28回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.377-382，2019
- 3) 箕浦慎太郎，渡辺勉，飯島亨，石田哲也：凍害を受けたPCまくらぎの実態調査と健全度判定基準の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.665-670，2020
- 4) 箕浦慎太郎，渡辺勉，井上寛美，片山雄一郎：縦ひび割れの発生したPCまくらぎの健全度評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.1585-1590，2016
- 5) 渡辺勉，後藤恵一，箕浦慎太郎，飯島亨：塩害環境下に敷設された経年PCまくらぎの性能評価，第29回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.161-166，2020
- 6) 渡辺勉，箕浦慎太郎，後藤恵一，松岡弘大：各種不整を考慮したPCまくらぎの動的応答特性に関する研究，第21回鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.21，pp.205-212，2017
- 7) 松岡弘大，渡辺勉，箕浦慎太郎，曾我部正道，面高陽紀：損傷PCまくらぎの振動モード特性と打音による簡易検知手法の開発，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造），Vol.74，No.3，pp.158-175，2018
- 8) 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
- 9) Peter Grassel: CDPM 2: A damage-plasticity approach to modelling the failure of concrete, International Journal of Solids and Structures, 2013.
- 10) 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

ゲージコーナき裂の抑制を図った レール断面形状選定手法

辻江 正裕* 幸野 真治* 曄道 佳明**

Rail Profile Selection Method to Reduce Gauge Corner Cracking Initiation

Masahiro TSUJIE Masaharu KONO Yoshiaki TERUMICHI

Gauge corner cracking (GCC) occurs on heat treated rails of the high rail in curved sections with a radius of 600 to 800 m. In our previous research, we proposed a countermeasure method for suppressing the GCC initiation by applying a rail with worn profiles to the high rail in curved sections to reduce contact pressure between wheel and rail. In this study the cross-sectional rail profile that is the most effective in suppressing crack initiation was selected by numerical analysis for the high rail in curved sections with a radius of 600 to 800 m.

キーワード：ゲージコーナき裂，摩耗進展，疲労指数，マルチボディダイナミクス，機械学習，ニューラルネットワーク

1. はじめに

在来線の半径 600～800m の曲線外軌に敷設した熱処理レールのゲージコーナ部において、ゲージコーナき裂（以下、「GCC」とする）の発生が多数確認されている（図1）。GCCは、大きく進展するとレール折損を引き起こす危険性があるものの、連続的に発生するため、頭部補修溶接法¹⁾により除去することは困難である。したがってGCCは、その発生を予防することが重要となる。

筆者らは、摩耗進展によって車輪／レール間の接触がなじむことに着目し、GCCの発生が懸念される曲線外軌にレール削正を施工して摩耗形状を適用することにより、車輪／レール接触の緩和を図り、転動疲労き裂であるGCCの発生を抑制する手法を提案した²⁾。しかし本手法では、曲線半径をはじめとする軌道条件や列車の走行条件によって、得られるレール摩耗形状も異なる結果が予想される。したがって、本手法を実際の営業線で施工するためには、各箇所に応じたレール摩耗形状を予測

するだけでなく、レール摩耗形状へとレール削正を施工する方法についても個別に検討する必要がある。

そこで本研究では、GCCの発生が懸念される半径 600～800m の曲線外軌を対象に、機械学習により車輪／レール接触状態の緩和を図るレール断面形状を探求し、最もき裂抑制効果が高いレール断面形状を選定する手法について検討した。

2. き裂発生評価

レール頭頂面を起点として発生する、シェリングやゲージコーナき裂のような転動疲労き裂の発生を評価する指標として、シェイクダウン理論³⁾⁴⁾に基づいた疲労指数 (FI: Fatigue Index) により評価する手法（以下、「FIモデル」とする）が、先行研究⁵⁾において提案されている。本手法では、転がり接触疲労は、車輪／レール接触部における面圧やクリープ力に依存する、という考え方に基づいている。そして、接触状態がシェイクダウン限界を超過すると、塑性ひずみが蓄積し、転動疲労き裂の発生に至ると評価する。FIモデルにおける疲労指数の値は、以下の式(1)で与えられる。

$$FI = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z} - \frac{k_s}{p_0} \quad (1)$$

ここで、FIは疲労指数、 F_x ならびに F_y はそれぞれ縦クリープ力ならびに横クリープ力、 F_z は車輪／レール間の接触力である。また、 k_s はレール鋼のせん断強度であり、 p_0 は最大接触面圧である。

FIモデルでは、式(1)で与えられる疲労指数の値により、き裂発生リスクを評価している。つまり、式(1)で

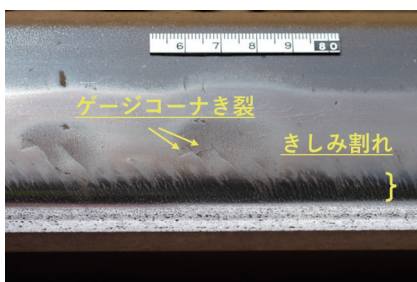


図1 ゲージコーナき裂の発生例

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

** 上智大学

与えられ得る FI の値が高いほど、き裂発生リスクは高くなると考えられる。先行研究²⁾より、熱処理レール材においては、 FI の値が -0.8 を超過した際に、き裂の発生を確認した。

3. 摩耗進展解析によるレール摩耗形状予測

本章では、GCCの発生の抑制を図るレール摩耗形状について検討するため、営業線においてGCCの発生が確認された曲線区間を対象として、摩耗進展解析を実施し、レール摩耗形状を予測した。

3.1 摩耗進展解析モデルの概要

本節では、摩耗進展解析で用いた摩耗形状予測モデル⁶⁾について概要を記載する。図2に摩耗進展解析の解析フローを示す。

本モデルでは、マルチボディダイナミクスソフトSimpackを活用した車両運動解析、ならびにそれらの解析結果に基づく摩耗形状予測から構成される。はじめに、Simpackにおいて対象とする車両／軌道モデルを構築し、それらのモデルによる車両運動解析を実施する。つぎに、Simpackより得られた解析結果に基づき、車輪／レール接触状態を評価する。そして車輪／レール接触状態から、各箇所におけるレールの摩耗量を算出する。算出した摩耗量ならびにはじめにモデル化したレール断面形状より、レールの摩耗形状を構築する。最後に、構築したレール摩耗形状を再びSimpackの軌道モデルに再配置することで、摩耗形状の軌道モデルに更新する。以上の手順を繰り返すことにより、レール摩耗形状の時系列変化を予測することができる。

また、1車両の通過によって算出される摩耗量はごくわずかであり、それによる断面形状の変化はほとんど見られず、車輪／レール接触への影響もほとんどないと考えられる。そこで図2に示す摩耗形状の更新については、先行研究⁷⁾に基づき、摩耗量を10000倍しても、その後の断面形状更新に影響を及ぼすことがないため、1車両の通過によって算出される摩耗量を10000倍して摩耗形状を形成した。

3.2 解析条件

前節で記述した摩耗形状予測モデルを活用し、営業線においてGCCの発生が懸念される半径600、700、800mの曲線外軌を対象に、レール摩耗形状を予測した。解析条件(軌道モデル)を表1に示す。なお、この軌道モデルを通過する車両モデルについては、在来線修正円弧踏面を有する通勤型車両(走行速度:105km/h)を対象に構築した。

先行研究⁸⁾より、GCCに混在するきしみ割れの発生

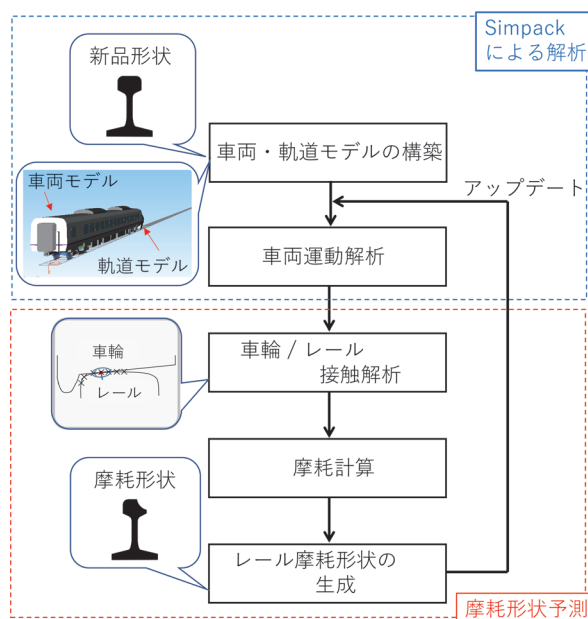


図2 摩耗進展解析の解析フロー

(図1)については、台車前軸における車輪／レール接触が影響している。GCCについても、きしみ割れと同様に、台車前軸における車輪との接触帯域で発生していることから、前軸における車輪／レール接触が影響していると考え、前軸の車輪／レール接触を対象として摩耗進展解析を実施した。

レール摩耗形状は通過する車輪の形状(設計形状や摩耗形状)の影響を受けるが、車輪の摩耗形状は一意に定まらないため、設計形状の車輪においては車輪／レール間の接触面圧が高く、より摩耗進展が促進すると考え、図2に示す車両運動解析の車輪形状は常に設計形状とした。つまり、車輪における摩耗進展は考慮せず、レールのみ摩耗進展させる条件で実施した。なお図2に示す断面形状の更新については、削正車による施工でレール摩耗形状を製作することを鑑み、一晩での施工能力から摩耗深さ(削正深さ)が約0.3mmに収まるよう、15回実施した(本研究では以下、レール断面形状の更新回数を n とする)。

3.3 解析結果

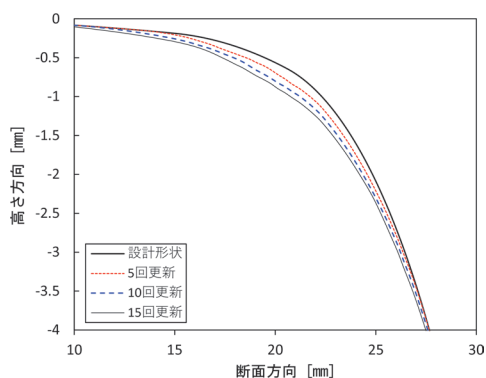
前節に示す条件で実施した摩耗進展解析より算出した、曲線外軌におけるレール頭頂面形状について、更新

表1 解析条件(摩耗進展解析)

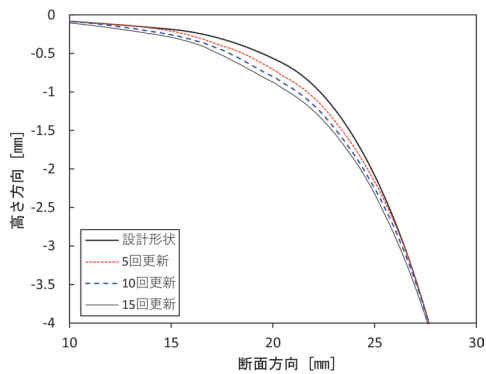
	Case 1	Case 2	Case 3
曲線半径[m]	600	700	800
カント量[mm]	105		
断面形状	JIS 60kg		

回数5回、10回、15回の結果を図3に示す。ただし、いずれの図においても、横軸はレール頭頂面中心からゲージコーナ側への距離を示す。また、摩耗深さならびに摩耗による形状変化をより顕著に示すため、縦軸は拡大して示す。

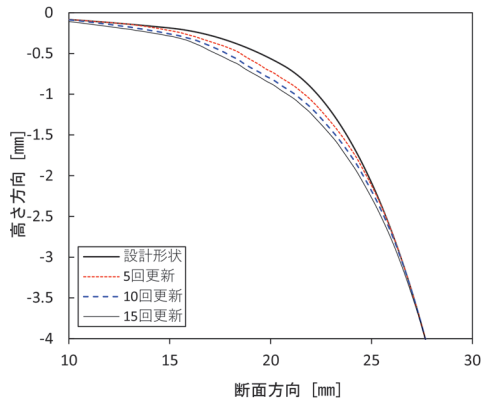
図3に示すように、いずれの曲線半径においても、断面形状を更新するにつれて、レールゲージコーナ部の曲率は減少する傾向が確認できる。一方で、曲線半径の違いにより、摩耗帯域や深さ方向の摩耗進展に差が生じていることが確認できる。このような差が見られる要因として、曲線半径の差が影響し、車輪／レール間の接触状



(a) Case 1 (曲線半径 : 600m)



(b) Case 2 (曲線半径 : 700m)



(c) Case 3 (曲線半径 : 800m)

図3 摩耗進展解析結果

態(接触位置や接触応力)に差が生じたことが考えられる。

4. レール摩耗形状によるき裂発生評価

本章では、前章に引き続き、機械学習に用いる教師データを蓄積するため、3章で実施した摩耗進展解析より得られたレール摩耗形状を用いて、車輪／レール接触解析を実施した。そして、2章に記載したFIモデルを適用し、レール摩耗形状のき裂発生に対する影響について評価した。

4.1 解析条件

車輪／レール接触解析は前章と同様、半径600, 700, 800mの曲線区間を対象に実施した。ただし円曲線区間の外軌については、設計形状(n=0)ならびに前章の摩耗進展解析により得られた更新15回分の摩耗形状(n=1~15)を配置した。本節で実施した車輪／レール接触解析の解析条件(9ケース)を表2に示す。

表2に示すように、本節における車輪／レール接触解析においては、GCC発生の抑制効果が高いレール断面形状を、機械学習(次章に記載)により選定するための教師データを蓄積するため、前章でのレール摩耗形状に対応する曲線半径に加え、その他の曲線半径についても適用して解析を実施した。つまり、前章の摩耗進展解析において半径600mの曲線区間におけるレール摩耗形状(前章Case1の解析より得られた摩耗形状(n=1~15)ならびに設計形状(n=0))を、本節の車輪／レール接触解析では半径600mの曲線区間(表2に示すCase4-a)だけでなく、半径700m(表2に示すCase5-a)ならびに800m(表2に示すCase6-a)の曲線区間にも適用した。同様に、半径700m(前章Case2の解析より得られた摩耗形状)ならびに半径800m(前章Case3の解析より得られた摩耗形状)の曲線区間におけるレール摩耗形状についても、摩耗進展解析とは異なる半径の曲線区間にも適用し、車輪／レール接触解析を実施した。そして、車輪／レール接触解析より得られた接触点(レール頭頂面中心からゲージコーナ側に約20~22mmの点)における車輪／レール接触状態から、2章に記載したFIモデルを適用し、き裂発生評価を実施した。なお車両モデルについては、前章と同じ通勤型車両ならびに走行条件を採用した。

4.2 疲労指数によるき裂発生評価

表2に記述した条件で実施した車輪／レール接触解析の解析結果を式(1)に適用し、円曲線外軌における疲労指数を算出した。なお式(1)におけるせん断強度 k_s については、対象である熱処理レール材の引張強度の値が 1200N/mm^2 であることから、この値を $\sqrt{3}$ で除した値を採用した。その結果を表2に示す解析条件(Case4~6)

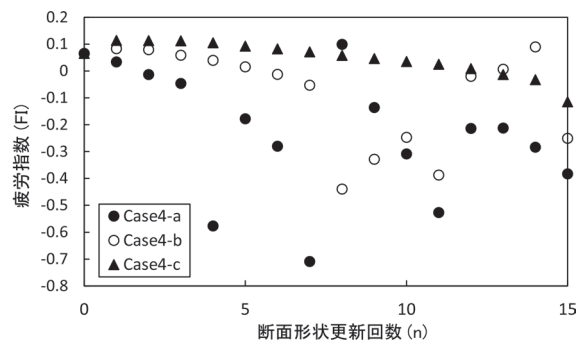
表2 解析条件（車輪／レール接触解析）

試番	曲線半径 [m]	レール形状
Case 4-a	600	設計形状 (n=0) 摩耗形状 (Case1 : n=1~15)
Case 4-b		設計形状 (n=0) 摩耗形状 (Case2 : n=1~15)
Case 4-c		設計形状 (n=0) 摩耗形状 (Case3 : n=1~15)
Case 5-a	700	設計形状 (n=0) 摩耗形状 (Case1 : n=1~15)
Case 5-b		設計形状 (n=0) 摩耗形状 (Case2 : n=1~15)
Case 5-c		設計形状 (n=0) 摩耗形状 (Case3 : n=1~15)
Case 6-a	800	設計形状 (n=0) 摩耗形状 (Case1 : n=1~15)
Case 6-b		設計形状 (n=0) 摩耗形状 (Case2 : n=1~15)
Case 6-c		設計形状 (n=0) 摩耗形状 (Case3 : n=1~15)

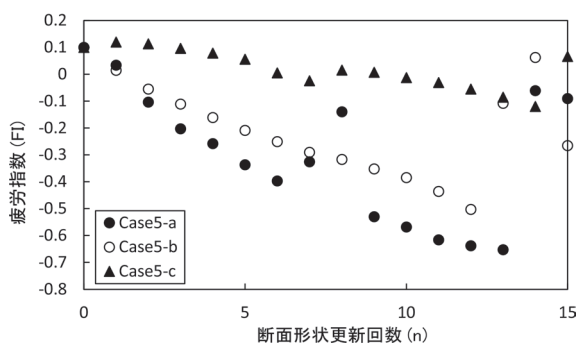
別に、図4 (a) ~ (c) に示す。なお、いずれの図とも、横軸は摩耗進展解析におけるレール断面形状の更新回数 (n) である。なお、車輪／レール接触解析において複数点で車輪／レールが接触していた場合は、安全側の評価となるよう、最も疲労指数が高い、すなわちき裂発生リスクが高い値を採用した。

図4に示すように、いずれの曲線半径に対しても曲線外軌に摩耗形状を適用すると、設計形状 (n=0) と比べて、疲労指数は後述する一部を除いて概ね減少する傾向が見受けられる。特にこの傾向は、曲線半径が700mのCase5、ならびに曲線半径800mのCase6において、より顕著に確認できた。一方で、Case4やCase5に示す複数の結果（例として、Case4-aにおけるn=8の結果やCase4-bならびにCase5-bにおけるn=14、Case5-cにおけるn=15の結果）については、車輪／レール間で多点接触したために、局所的に高い接触面圧が発生するような接触状態となり、結果として疲労指数の値が高くなった。

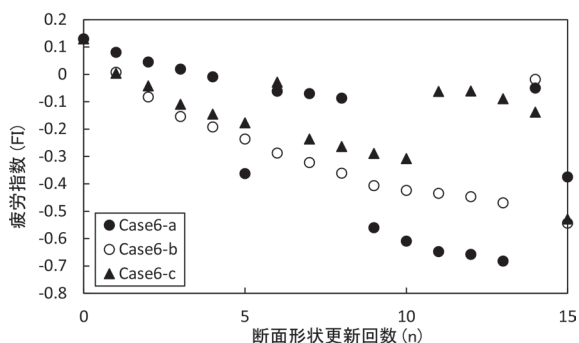
全体的な傾向として、本研究で実施した解析の範囲内では一部の条件を除き、車輪との接触状態から算出される疲労指数は、設計形状を適用（図4 (a) ~ (c) のn=0）した場合と比べて、曲線外軌に摩耗形状を適用することにより、減少する傾向が確認できた。



(a) Case 4 (曲線半径 : 600m)



(b) Case 5 (曲線半径 : 700m)



(c) Case 6 (曲線半径 : 800m)

図4 解析結果（き裂発生評価）

5. 機械学習によるレール断面形状の選定

本章では、3章で実施した摩耗進展解析より予測したレール摩耗形状（図3）、ならびに4章で実施した車輪／レール接触解析より算出した疲労指数（図4）を教師データとする機械学習により、半径600~800mのいずれの曲線に対しても、き裂発生の抑制効果が高いレール断面形状を探索した。ただし断面形状の探索において、3章で得られたレール摩耗形状を一律に教師データとして機械学習に活用すると、さまざまな曲線半径における摩耗形状を組み合わせた、滑らかでない凸凹な断面形状が最適解として収束する可能性が考えられる。そして、そのような断面形状においては、車輪／レール接触がな

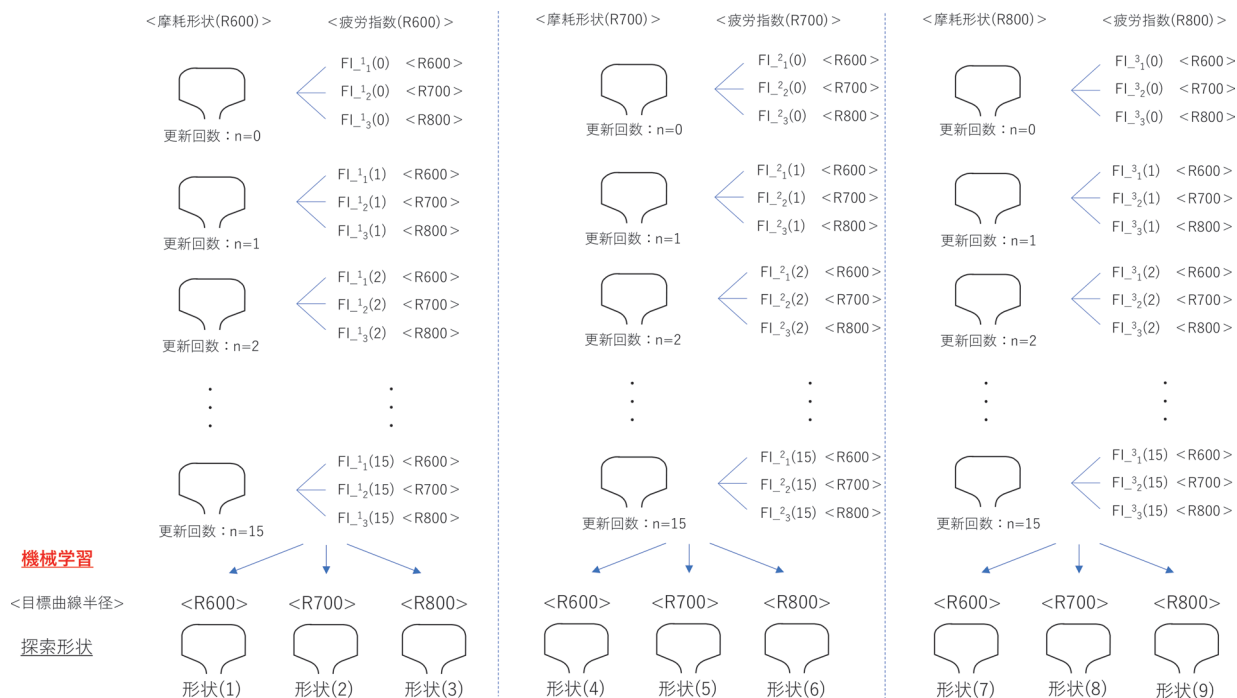


図5 機械学習による断面形状探索

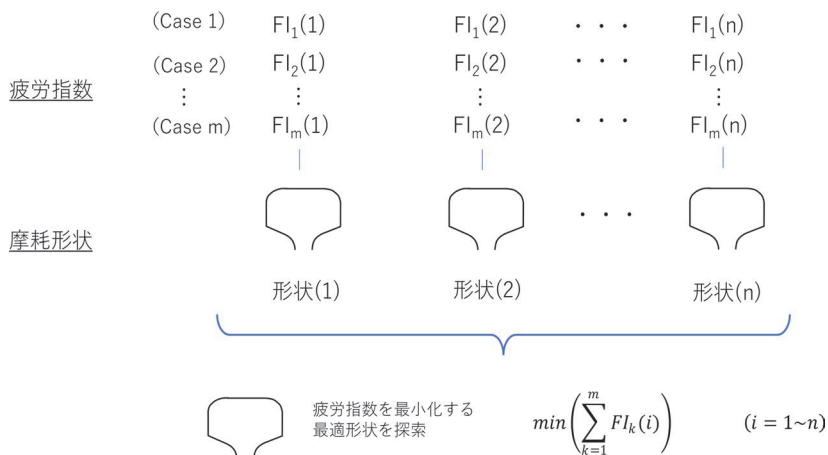


図6 最適形状の探索

じまず、結果として多点接触や局所的に高い接触面圧が発生するような、特異な接触状態となりうる懸念がある。そこで本研究では、各曲線半径において予測したレール摩耗形状を一括りに取り扱うのではなく、曲線半径別にき裂抑制効果が高いレール断面形状を探索することとした。この手法であれば、単一の曲線半径をモデルとしたレール摩耗形状をもとに探索した断面形状であるため、さまざまな曲線半径の摩耗形状を組み合わせた特異な形状となることや、特異な車輪／レール接触状態となることを回避することが期待できる。そこで、3章の摩耗進展解析ならびに4章の車輪／レール接触解析を含め、

- ① 各曲線半径を対象としたレール摩耗形状を予測

- ② 予測したレール摩耗形状を用いた車輪／レール接触解析を実施し、各条件における疲労指数を算出
- ③ 曲線半径別のレール摩耗形状から、最も疲労指数が低くなる形状を機械学習により探索
- ④ ③により探索したレール断面形状候補の中から、すべての曲線半径に対して疲労指数を低下させる効果のあるレール断面形状を選定

という4つのステップで、き裂抑制効果が高いレール断面形状を選定した。①～③のスキームを図5に、④のスキームを図6に示す。また各ステップの詳細について、以下に記述する。

(ステップ①)

はじめに、3章で実施したように半径600～800mの円曲線外軌を対象とした摩耗進展解析を実施し、図3で示すようにレール摩耗形状を予測する。なお図5においては、半径600, 700, 800mの摩耗形状(n=0～15)に該当する。

(ステップ②)

つぎに、①で得られたレール摩耗形状を曲線外軌に適用した車輪/レール接触解析を実施し、車輪/レール接触状態から疲労指数を算出した。4章でも記載したように、車輪/レール接触解析から算出される疲労指数の値は機械学習での教師データとして活用するため、摩耗進展解析でモデルとした曲線半径に加えて、それ以外の曲線半径についても車輪/レール接触解析を実施した。算出した疲労指数は、図5において $FI_{-1/2}^1$ (1)や $FI_{-1/3}^2$ (2)等に該当する。ここで図5における $FI_{-1/2}^1$ (1)は、半径600mをモデルとした摩耗進展解析について、断面形状の更新を1回実施(n=1)した際のレール摩耗形状を半径700mの曲線外軌に適用した際の疲労指数である。同様に、 $FI_{-1/3}^2$ (2)は、半径800mをモデルとした摩耗進展解析について断面形状の更新を2回実施(n=2)した際のレール摩耗形状を半径600mの曲線外軌に適用した際の疲労指数である。本研究では、半径600, 700, 800mの3つの曲線半径を対象に摩耗進展解析を実施し、それぞれ15回の断面形状の更新(n=1～15)を実施している。さらに、同じ3つの曲線半径を対象に車輪/レール接触解析を実施していることから、図5において48個のレール断面形状データ(n=0は設計形状のため同一形状)、ならびに各断面形状に関連付けられる総計144個(n=0は同一形状であるため、疲労指数の値も同じ)の疲労指数がデータとして算出される。

(ステップ③)

本章のはじめにも記載したように、ステップ②で得られた48個のレール断面形状データならびに144個の疲労指数を一括りに扱ってレール断面形状を探索すると、さまざまな曲線半径の摩耗形状を組み合わせると、凸凹で滑らかでない断面形状が最適解として収束する可能性が考えられる。そこで本研究では、これらの問題点を回避するため、同一の曲線半径の摩耗形状ならびにそれに対応する疲労指数を教師データとした機械学習を行い、曲線半径ごとに最適形状を探索した。つまり図5において、半径600mの曲線区間をモデルとした摩耗進展解析より予測した16個のレール断面形状(n=0～15)と、それぞれに対応する合計48個の疲労指数 $FI_{-1/1}^0$ (0)～ $FI_{-1/3}^{15}$ (15)を教師データとし、それらから半径600, 700, 800mに適用した際に最も疲労指数が低くなる形

状を機械学習により探索した。機械学習により得られた断面形状をそれぞれ形状(1)、形状(2)、形状(3)とする(図5)。同様に、半径700mの曲線区間をモデルとして予測したレール断面形状とそれに対応する疲労指数、半径800mの曲線区間をモデルとして予測したレール断面形状とそれに対応する疲労指数をもとに、最も疲労指数が低くなる断面形状として、形状(4)～形状(9)を探索した。なお本研究における機械学習については、5層のニューラルネットワークを構築して実施した。

(ステップ④)

最後に、ステップ③で得られた9つの断面形状である形状(1)～形状(9)について、半径600, 700, 800mの3つの曲線外軌に適用した、円曲線外軌における車輪/レール接触状態から、疲労指数(FI_1 (1)～ FI_m (n))を算出した(図6)。なお本研究では、上述のように適用した曲線半径は3種類、断面形状候補は9候補あることから、図6において $m=3$, $n=9$ となる。図6に示すように、各断面形状について算出される疲労指数について、以下の式(2)に示すように各条件における疲労指数の総和を算出することで、その断面形状を適用した際の適用度が算出されると考えられる。つまり、半径600, 700, 800mの3つの曲線外軌に適用した際に、すべての曲線半径に対してき裂抑制効果が高ければ、算出される疲労指数の総和は低くなる。逆に、き裂抑制効果が低ければ、疲労指数の総和は高くなる。

$$FI_i = \sum_{k=1}^m FI_k(i) \quad (i=1 \sim n) \quad (2)$$

ただし FI_i は疲労指数の総和、 $FI_k(i)$ は各断面形状を適用した際に算出される疲労指数である。

このように、さまざまな条件に適用した際に算出される疲労指数の総和によって、いずれの曲線半径に対しても最もき裂抑制効果が高いレール断面形状を選定することができる。図5に示す9個の断面形状候補について、半径600, 700, 800mの3つの曲線外軌にそれぞれ適用した車輪/レール接触解析を実施し、各曲線半径別に疲労指数を算出した。そして、式(2)で与えられる、半径600, 700, 800mの3つの曲線外軌に適用した疲労指数の総和を算出した。それらの結果を図7に示す。なお比較のため、JIS60kgレール断面形状についても同様に適用した結果を合わせて示す。

図7より、本研究において検討した9つの断面形状候補は、いずれもJIS60kgレール断面形状に比べて、式(2)で与えられる疲労指数の総和が低い値となっていることから、き裂発生の抑制効果が認められる。特に9つの断面形状候補の中では、形状(3)が最も低い値となっ

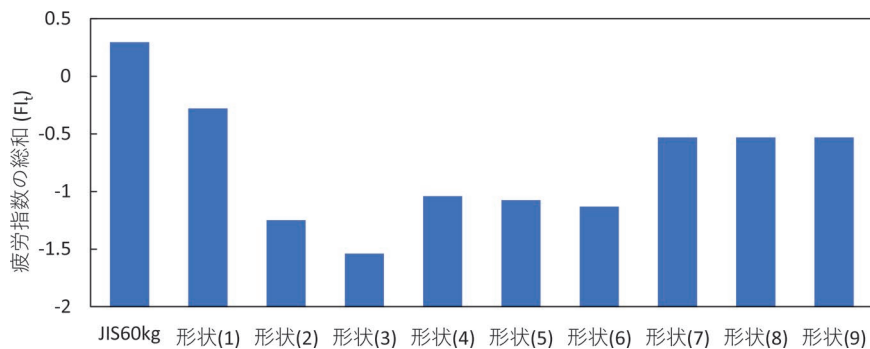


図7 形状候補における疲労指数の算出結果

たことから、本研究で検討した範囲内では最もき裂抑制効果が高い断面形状であると考えられる。そこで本研究では以下、この形状(3)の断面形状をGCCの抑制効果が最も高い断面形状(以下、「最適形状」とする)として取り扱う。

6. 提案形状によるき裂抑制効果

本章では、前章において選定した最適形状について、車輪/レール接触解析結果に基づき、き裂抑制効果を評価した。

はじめに、最適形状とJIS60kgレール断面形状を重ね合わせた結果を図8に示す。また、最適形状における設計形状との高さ方向の差を図9に示す。なお、いずれの図においても、断面方向の正の側がゲージコーナ側となるようプロットしている。また断面形状の差をより顕著に示すため、縦軸については拡大して表示している。

図8に示すように、最適形状はゲージコーナ側の一部が摩耗した形状となっている。また顕著な凹凸もなく、滑らかな形状であることが確認できる。

図9に示すように、最適形状とJIS60kgレール断面形状を比較すると、ゲージコーナ側で最大約0.3mmの差が確認できる。したがって、本研究で提案する最適形状については、JIS60kgレール断面形状を図9で示す位置、量を研削すること、もしくは図8に示す最適形状となるよう鋼片を圧延することで製作することができる。

つぎに、最適形状における曲線半径別のき裂抑制効果を評価するため、前章で行った車輪/レール接触解析より、半径600, 700, 800mの3つの曲線外軌に最適形状を適用した際の疲労指数をもとに検討した。

最適形状ならびにJIS60kgレール断面形状を半径600, 700, 800mの3つの曲線外軌に適用した際の疲労指数について算出した結果を図10に示す。なお2章でも記載した通り、先行研究²⁾より熱処理レール材においては、FIの値が-0.8を超過した際に、き裂の発生を確認していることから、この値を基準にプロットした。

図10に示すように、いずれの曲線半径においても、

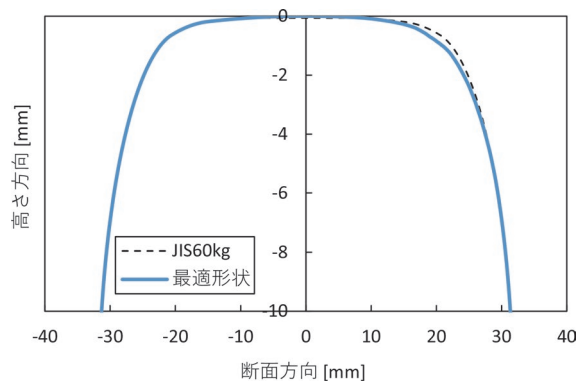


図8 最適形状の断面形状

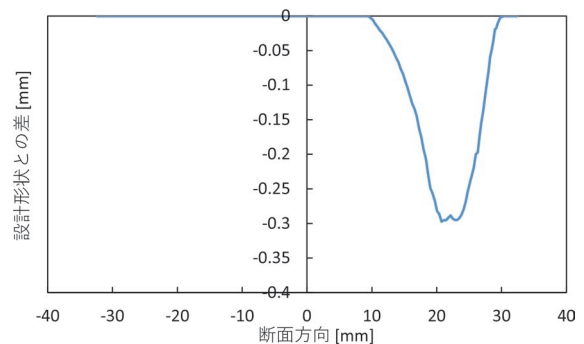


図9 最適形状における削正量

最適形状における疲労指数の値は、JIS60kgレール断面形状に比べて減少する結果となった。特に半径700mならびに半径800mにおいては、疲労指数の減少する傾向が大きいことを確認した。これらの結果より、提案形状を半径600~800mの曲線外軌に適用することにより、JIS60kg形状のレールを敷設した状況に比べて、ゲージコーナ部におけるき裂の発生状況を緩和する効果が期待できる。

7. まとめ

本研究では、複数の曲線半径に対して、GCCの起点となるゲージコーナ部のき裂発生を抑制するレール断面

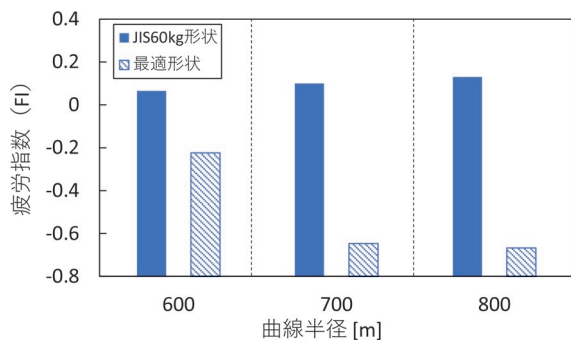


図 10 曲線半径別の疲労指数の比較

形状を提案するため、き裂発生を評価する疲労指数を最小化するレール断面形状を選定することを目的とした。得られた結果は以下の通りである。

- ・マルチボディダイナミクスを活用した摩耗進展解析、ならびに予測したレール摩耗形状を曲線外軌に適用した車輪／レール接触解析を実施した。そして、これらの解析より得られたレール摩耗形状ならびにその断面形状に対応する疲労指数を教師データとした機械学習を実施した。さらに、機械学習により探索した各レール断面形状に対する疲労指数の総和を算出することで、疲労指数を最小化するレール断面形状を選定するプロセスを示した。
- ・半径 600, 700, 800m の曲線区間を対象に、上記のプロセスを適用し、これらの曲線半径に対して疲労指数を最小化するレール断面形状を選定した。
- ・選定したレール断面形状について、半径 600, 700, 800m の曲線外軌に適用した際のき裂抑制効果を評価した。その結果、JIS60kg レール断面形状と比較すると、疲労指数が減少する傾向を確認した。したがって、選定した断面形状のレールをこれらの半径の曲線外軌に適用することで、ゲージコーナ部のき裂発生を緩和する効果が期待できる。

本研究では、マルチボディダイナミクスの観点から、

最適形状におけるき裂抑制効果を検討した。今後は FEM による車輪／レール接触応力解析，ならびに実物大の車輪／レール断面形状を有する試験輪を組み合わせた転動疲労試験を実施し，本研究で提案した最適形状におけるき裂抑制効果を検証する予定である。

文献

- 1) 伊藤太初, 梅内一行, 寺下善弘, 辰巳光正, 山本隆一: テルミット頭部補修溶接法を用いたレール補修方法, 鉄道総研報告, Vol.28, No.6, pp.41-46, 2014
- 2) 辻江正裕, 沖田雅佳, 陳樺, 曄道佳明: 摩耗進展による車輪／レール接触の緩和を図ったゲージコーナき裂抑制手法の検討, 日本機械学会論文集, Vol.88, No.908, DOI: 10.1299/transjsme.21-00327, 2022
- 3) K.L. Johnson, "The strength of surfaces in rolling contact," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Vol.203, pp.151-163, 1989.
- 4) A.F. Bower, K.L. Johnson, "Plastic flow and shakedown of the rail surface in repeated wheel-rail contact," Wear, 144, pp.1-18, 1991.
- 5) A. Ekberg, E. Kabo, H. Andersson, "An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels," Fatigue Fracture Engineering Master Structure, 25, pp. 899-909, 2002.
- 6) 辻江正裕, 沖田雅佳, 陳樺, 曄道佳明: 混合すべり条件下におけるレール摩耗形状予測モデルの構築, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.890, DOI: 10.1299/transjsme.20-00056, 2020
- 7) 辻江正裕, 吉岡亜陸, 水谷祐貴, 曄道佳明: マルチボディダイナミクスによるレール摩耗形状予測モデルの構築と妥当性の検証, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.854, DOI: 10.1299/transjsme.17-00074, 2017
- 8) Y. JIN, F. Aoki, M. Ishida, A. Namura, "Investigation and analysis of the occurrence of rail head checks," International Journal of Railway, Vol.2, No.2, pp.43-49, 2009.

列車前方画像を用いた木まくらぎ劣化度判定システム

加藤 爽* 坪川 洋友* 長峯 望**
合田 航** 前田 梨帆** 糸井 謙介***

Inspection System for Evaluating Wooden Sleeper Deterioration Using Image Analysis of Video

So KATO Yosuke TSUBOKAWA Nozomi NAGAMINE
Wataru GODA Riho MAEDA Kensuke ITOI

In order to save labor work in inspecting track facilities using a low-cost and simple inspection system, we have developed a system for inspecting wooden sleepers using forward view images of camcorders from train cabs. The system uses deep learning to judge the deterioration of wooden sleepers from images. In this paper, we report the outline of the system: judgment accuracy, and verification results to see if the progress of deterioration can be assessed.

キーワード：木まくらぎ検査, 列車前方画像, 画像処理, ディープラーニング

1. はじめに

軌道に敷設された木まくらぎは、保線技術者が1本ごとに目視または打音により劣化度を判定し、管理を行っている。レールの締結力が機能しない不良な木まくらぎが連続した場合、車両走行時の横圧により軌間が拡大し、脱線事故を引き起こす可能性があることから、木まくらぎ検査は軌道の重要な検査の1つである。また、木まくらぎの敷設数は膨大であることから、軌道変位検査や分岐器検査などの他の検査に比べて労力を必要とすることに加え、昨今の保線技術者不足の状況を踏まえると、効率的かつ個人の技術力に左右されない検査手法の開発が必要である。

一方で、検査をシステム化する場合、閑散線区においては、高額な検査装置はコストの負担が大きいいため、簡易かつ低コストの検査手法が求められる。

そこで、本研究では、安価な機材やシステムで検査を行う方法として、列車前方にハンディカメラを設置し、その映像から木まくらぎの劣化度を自動的に判定する手法を提案した¹⁾。本手法は、4K (829万画素) 以上の画像解像度を有する市販のハンディカメラを使用するため、安価な機材で容易に撮影できる。また、ディープラーニングを用いて木まくらぎの劣化度判定を行うため、保線技術者の経験年数や個人差に左右されずに検査を実施することが可能である。

本稿では、開発した木まくらぎ劣化度判定システムの

概要およびシステムで用いるアルゴリズムの判定精度を報告したのち、本システムによる木まくらぎの劣化進行状態の把握の可否について述べる。

2. 木まくらぎ劣化度判定システム

2.1 木まくらぎ劣化度判定システムの概要

本システムは、車上で撮影された列車前方の画像（以下、列車前方画像という）を基に、地上で劣化度を判定するものである（図1）。

本システムにおける木まくらぎ劣化度判定アルゴリズムのフローを図2に示す。まず、列車前方画像に対し、射影変換を用いて疑似的な床下画像（以下、疑似床下画像という。）を生成する。次に、ディープラーニングで事前に学習した木まくらぎ劣化度判定モデルによって、生成した疑似床下画像から木まくらぎを抽出し、劣化度を判定する。疑似床下画像の生成は、列車前方画像における木まくらぎの縦横比が一様でないため、ディープラーニングによる木まくらぎの抽出や劣化度判定の際の精度に影響を与えるのを防ぐことを目的としている。また、フレーム間の物体等の移動ピクセル数を算出し、列車の走行速度と進んだ距離を求めることで、抽出した木まくらぎにキロ程情報を紐付けている。その後、疑似床下画像に木まくらぎの抽出位置および、劣化度ランクを表記して出力を行う。また、疑似床下画像からレール継目を検出し、撮影した画像に存在するレールの本数と各レールに付随するまくらぎの本数をクラスタリング処理により正確に識別する。これにより、レール1本ごとにまくらぎの管理を行うための帳票を出力する。

* 軌道技術研究部 軌道管理研究室

** 情報通信技術研究部 画像解析研究室

*** 元 軌道技術研究部 軌道管理研究室

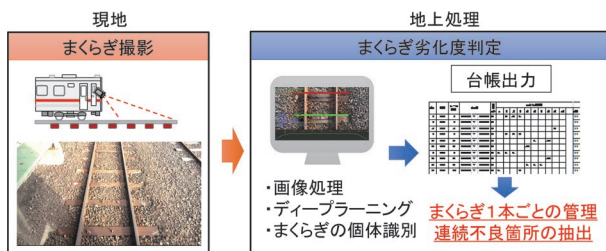


図1 木まくらぎ劣化度判定システム

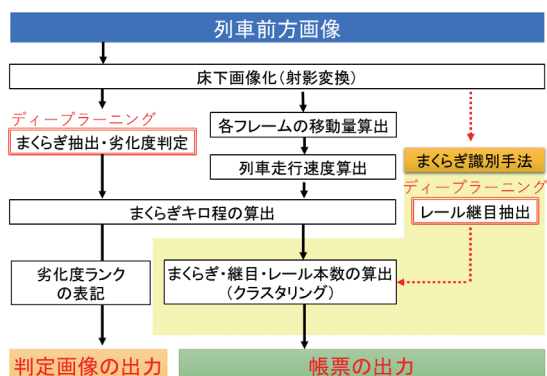


図2 木まくらぎ劣化度判定アルゴリズムのフロー



図3 カメラの設置状況

表1 本研究で使用したカメラの主な仕様

カメラ	焦点距離	有効画素数
FDR-AX50	7.5m	829万画素

2.2 列車前方からの木まくらぎ撮影

木まくらぎの撮影は、図3に示すように、運転台の貫通扉や前面の窓にハンディカメラを固定し、俯角を付けた状態で行う。表1に、本研究で使用したハンディカメラの主な仕様を示す。カメラの解像度は4K以上を有していれば、本システムによる処理・判定が可能である。また、一般的なフレームレートである30fpsであれば、列車最高速度を勘案してもまくらぎを撮り逃すことがないことを確認している。

2.3 射影変換による疑似床下画像の生成

列車前方画像を床下画像の様に真上から俯瞰した画像に変換するために、台形の2次元画像を長方形に変換す



図4 射影変換による疑似床下画像処理

る手法として射影変換を用いる。図4に、射影変換を行った結果の例を示す。列車前方画像は、画像手前から奥にかけて物体が細くなり、台形状に映る。そのため、射影変換では必要とする台形の領域(abcd)の座標4点から、実際のまくらぎの縦横比と合致するように長方形(abc'd)の座標4点を求めることで、列車前方画像を俯瞰した画像に変換することができる。変換後の画像のサイズは1920×800pixelであり、まくらぎ2本程の範囲を映した画像となる。

2.4 キロ程の推定²⁾

鉄道設備は、キロ程を基準に維持管理されている。例えば、軌道検測車で測定されるデータは、軌道内に設置されたキロ程を付与された不動点(データデポ)を検知して位置合わせ(位置情報の付与)を行っている。画像解析においても、同様な手法で不動点を検知して各フレームにキロ程を付与する方法もあるが、本研究ではハンディカメラのみによって実現することを目的としているため、列車前方画像からキロ程の算出を行う。

キロ程データは、2枚の画像間から画像解析によって算出した列車の移動速度を用いて作成する。オプティカルフローを用いて画像中のすべてのピクセルにおける速度場(速度ベクトル)を算出し、外れ値を除去して最頻値を求め、このフレームにおける列車の移動速度[pixel/frame]とする。

各フレームでのピクセル移動速度を累積することで、ピクセル単位での移動距離データを作成する。動画開始時の距離を0とするとき、フレームtでのピクセルの移動距離は、移動速度をフレーム0からtまでの区間で積分することによって求められる。画像フレームに対するピクセル単位距離データと撮影開始時点のキロ程および走行距離

を用いて、画像フレームごとにピクセル単位距離の調整を行い、画像フレームに対するキログラムデータを作成する。

2.5 ディープラーニングを用いた劣化度判定

木まくらぎの抽出及び劣化度判定は、疑似床下画像に対し、事前にディープラーニングで学習した劣化度判定モデルを用いて行う。以下に詳細を示す。

2.5.1 学習データの作成

まず、劣化度判定モデルを構築するため、Microsoft社が提供している VoTT (Visual Object Tagging Tool) を用いて、木まくらぎの領域にタグ (形状や劣化度の情報) の付与を行い、学習用のデータを作成する。劣化度の状態は、図5に示す木まくらぎの劣化度判定標準を基に、不良まくらぎをA1~Bランク、軽微な損傷をCランク、良好なものをDランクとし、まくらぎの表面の多くが、バラストや草等で隠れていたり、埋没したりしていることにより画像上からは適正な劣化度判定が行うことができない場合は未判定 (判定を行わない)、PCまくらぎ判定の計7クラスで評価する。特にA1~Bランクは、まくらぎの不良状態を示している。なお、処置標準は、A1ランクは速やかに交換、A2ランクが3本連続した場合は速やかに交換、Bランクは経過監視となっている。

図6に、VoTTを用いて作成した学習データの一例を示す。

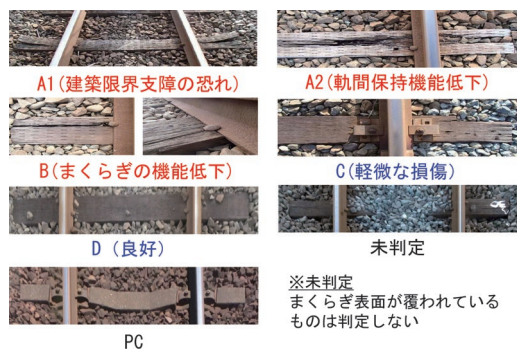


図5 木まくらぎの劣化度判定標準

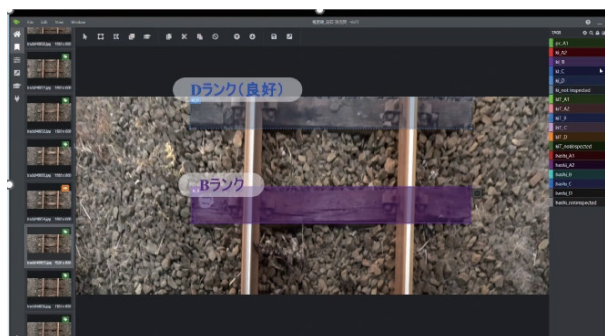


図6 VoTTを用いて作成した学習データ

2.5.2 学習データの拡張³⁾

これまでに得られた疑似床下画像の多くは、良好なまくらぎであり、不良まくらぎの学習データが不足していた。不良まくらぎの学習データを得るには、様々な区間を撮影する必要があるため、データの作成作業に多くの労力を要する。また、学習データ量の不足が、不良まくらぎの判定精度を低下させる要因の1つになると考えられることから、不良まくらぎの学習データを効率的に得ることが課題となる。

そこで、2.5.1項の学習データに使用した画像 (以下、オリジナル画像という。) に対し画像処理を施すことで、疑似的に複数パターンの学習データを得られるように拡張を行った。拡張方法は大きく分けて2つの手法を用いた。

まず1つ目は、画像の色調処理である。図7に示すように、オリジナル画像に対して「明るさ」と「コントラスト」の強弱を変更した4パターンの画像を作成した。なお、色調処理を行う際は、実際の撮影時に起こり得る環境変化として、天候や太陽の動きによる色調の影響を想定し、明度や明暗の比率に対して±60%の強弱をつけた。

2つ目は、ノイズの付与である。図8に示すように、2パターンのノイズ処理を実施した。1つは撮影時に発生するホワイトノイズを想定し、乱数によりRGB値と付与する位置を決め、1枚のオリジナル画像に対し1,000個のドットを発生させた。もう1つは、列車の振動や撮影時の明るさが暗い場合に発生する画像のブレを想定し、平均化フィルタによる平滑化処理によって画像

オリジナル画像				
拡張1	明るさ : 高 コントラスト : 高			
拡張2	明るさ : 高 コントラスト : 低			
拡張3	明るさ : 低 コントラスト : 高			
拡張4	明るさ : 低 コントラスト : 低			

図7 学習データの拡張 (色調処理)

オリジナル画像 (拡大)	拡張5	ホワイトノイズ	拡張6	平滑化

図8 学習データの拡張 (ノイズ処理)

をぼかした処理を施した。

2.5.3 劣化度判定モデルの構築

2.5.2項で述べた学習データの拡張により、不良まくらぎのA1ランクについては既存データの約4倍、A2・Bランクについては約5倍、Cランクについては約1.5倍のデータ数となった。表2に、既存のオリジナル画像（約10万枚）にタグ付けしたまくらぎの数量と、拡張した画像（約10万枚）に対してタグ付けしたまくらぎの数量を示す。

作成した学習データ（約37万タグ）に対し、ディープラーニングを適用して劣化度判定モデルを構築した。ディープラーニングには、ネットワークアーキテクチャとしてYOLOXを用いた。YOLOXは、ディープラーニングにおける物体の検出と識別を同時に実施可能なネットワークモデルを構築することができる。入力画像に対してYOLOXの識別器にかけると、出力として物体カテゴリ、カテゴリクラスの信頼度（確率）、横位置、縦位置、横幅、縦幅が得られる。

2.6 まくらぎの識別

列車前方画像から変換した疑似床下画像には、同一のまくらぎやレール継目が複数フレームにわたって映るため、それらを1つのまくらぎとして判定する必要がある。複数のフレームでそれぞれキロ程を付与した際に、距離が近いものは、同一のまくらぎやレール継目であると考えられる。そこで、クラスタ分析手法のうち、最短距離法（単連結法）によって、同一のまくらぎか否かのクラス分けを行った。このとき、クラス数がまくらぎやレール継目の設置数となる。ここで、違うクラスとして分類するまくらぎおよびレール継目間の最短距離の閾値は、まくらぎについては、まくらぎの幅から20cmに、レール継目についてはレール長さが10m以上の場合がほとんどあり、少なくとも1m-2mは離れているため、閾値を1m-2mとしている。なお、まくらぎ不良のランクについては、クラス内の識別で最も状態の悪いランクを採用し、安全側の判定とすることとした。

表2 タグ付けしたまくらぎの数量（本）

判定内容	オリジナル画像タグ数	拡張画像タグ数	合計タグ数
A1	12	49	61
A2	3,754	17,575	21,329
B	12,719	55,801	68,520
C	33,364	45,415	78,779
D	103,552	60,484	164,036
未判定	2,138	10,674	12,812
PC	23,450	—	23,450
合計	178,989	189,998	368,987

3. 劣化度判定の精度検証

3.1 判定精度の評価方法

本アルゴリズムの判定精度については、以下の2つの方法で判定精度を評価した。まず1つ目の方法では、保線技術者が疑似床下画像を目視にて確認し判定した結果（以下、画像判定結果という。）とアルゴリズムの判定結果（以下、システム判定結果という。）を比較し評価を行った。

2つ目の方法では、保線技術者が現地にて目視および打音により判定した結果（以下、現地検査結果という。）とシステム判定結果を比較し評価を行った。

3.2 劣化度判定の精度（画像判定結果との比較）

本アルゴリズムで検出したまくらぎ16,033本に対し、画像判定結果を正解値とし、システム判定結果と比較した。システム判定結果の例を図9に示し、表3に木まくらぎの各劣化度に対する判定の一致率を示す。

木まくらぎの劣化度に対する一致率は、Cランクでは88.6%であり、DランクおよびB～Aランクでは90%以上である。また、未判定では72.1%、PCまくらぎでは98.5%である。また、まくらぎの検出精度についても、全まくらぎ本数16,111本に対し、検出したまくらぎ本



図9 木まくらぎ検出と劣化度判定結果

表3 木まくらぎの劣化度判定の正解率

	A2	B	C	D	未判定	PC
画像判定数(本)	404	1,292	3,387	10,476	208	266
システム判定数(本)	380	1,178	3,001	9,662	150	262
正解率	94.1%	91.2%	88.6%	92.2%	72.1%	98.5%

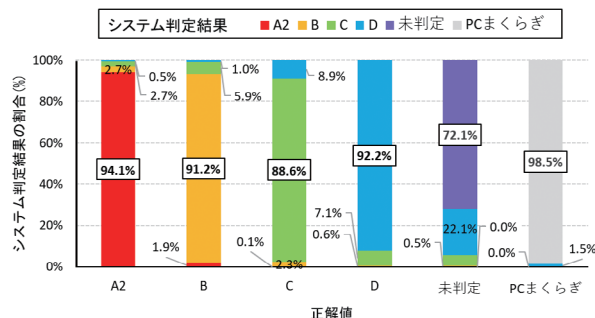


図10 画像判定結果に対するシステム判定結果の割合

数は16,033本（検出率99.5%）であり、高い確率でまくらぎを検出することができた。図10に、画像判定結果に対するシステム判定結果の割合を示す。図10より、不良まくらぎ（A2・Bランク）が不良でないまくらぎ（C・Dランク）と判定された割合は、約7%であった。

3.3 劣化度判定の精度（現地検査結果との比較）⁴⁾

本アルゴリズムで検出したまくらぎ695本に対し、現地検査結果を正解値とし、システム判定結果と比較することで、現在実施されているまくらぎ検査との整合性を検証した。

判定ランクが一致した場合の一致率および判定ランク「A2・B」を「不良なまくらぎ」、判定ランク「C・D」を「不良でないまくらぎ」とし、各2ランク内に含まれていれば正解（A2ランクをB、DランクをCランクと判定した場合も正解とする）とした場合の正解率を表4に示す。

A2ランクの一致率は53%であり、Bランクは86%、Cランクは0%、Dランクは78%であった。Cランクについては、今回判定した画像ではまくらぎ表面に損傷に見えるものが多かったことからA2ランクまたはBランクと判定された割合が多かった。

また、表3の画像判定結果における一致率と比較すると、すべてのランクで現地検査結果との一致率が低かった。これは、現地検査結果では画像上で判断の難しい損傷などを打音等により詳細に把握できることが影響したと考えられる。

表4 劣化度ランクごとの判定正解率

ランク	A2	B	C	D
現地検査結果(本)	119	133	26	417
システム判定結果(本)	63	115	0	325
一致率	53%	86%	0%	78%
現地検査結果(本)	252		443	
システム判定結果(本)	249		328	
正解率	99%		74%	

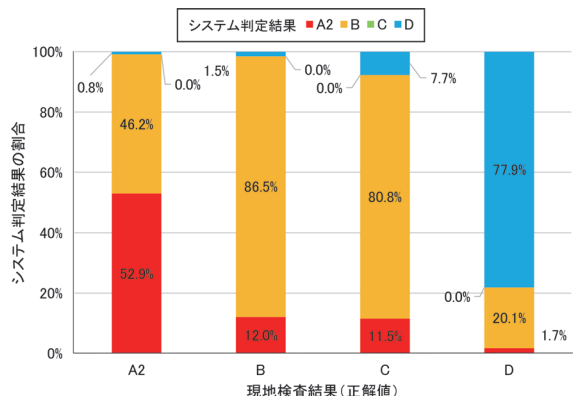


図11 現地検査結果に対するシステム判定結果の割合

なお、不良なまくらぎ（A2・Bランク）と不良でないまくらぎ（C・Dランク）の二つに分けた場合の正解率は、99%および74%であった。したがって、不良なまくらぎか否かの判定については、十分な判定精度を有していると考えられる。また、図11に現地検査結果に対してシステム判定結果が占める割合を示す。図11より、現地検査結果に対し、システムが危険側に判定した割合は、A2ランクで47%、Bランクが2%、Cランクが8%であった。なお、A2ランクにおいて不良でないまくらぎ（C・Dランク）と判定した割合は1%であったことから、不良まくらぎ（A2・Bランク）を不良でないまくらぎ（C・Dランク）と誤判定する確率は低いと考えられる。

3.4 判定結果のばらつき⁵⁾

218本分のまくらぎ画像を評価用データとして用意し、画像判定結果とシステム判定結果におけるそれぞれの判定のばらつきについて確認した。図12に劣化度ランクごとの画像判定結果とシステム判定結果を示す。図12より、どちらの判定結果もばらつきが生じていることが分かる。また、Cランクについては、画像判定結果の方がばらつきが少ない。これは、限られた学習データから判定するシステム判定に比べ、画像判定結果では、判断が難しい損傷についても画像をより詳細に確認することができたためであると考えられる。

次に両者の正答率のばらつきについて分析する。例えばBランクのまくらぎについて、画像判定結果およびシステム判定結果でBランクとなった場合のスコアを0

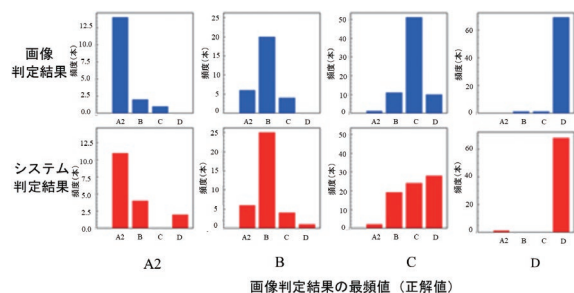


図12 画像判定結果およびシステム判定結果の分布

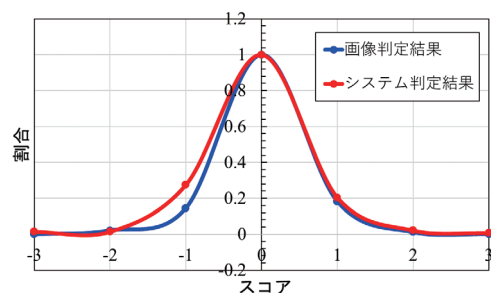


図13 判定結果のスコアの分布

とし、A2ランクと判定をした場合+1、Cランクと判定した場合-1、Dランクとしたとき-2のスコアをつける。全まくらぎの判定結果をスコア付けした結果のヒストグラムを図13に示す。両者のヒストグラムは形状が似ていることが視覚的に読み取れ、このことから全体の傾向として、システム判定結果は画像判定結果と同様の傾向が得られていると考えられる。

4. 劣化度の進行状態の把握⁴⁾

2021年度の現地検査結果と2022年度現地検査結果を比較し、木まくらぎの劣化度に進行が見られた128本のまくらぎについて、システム判定結果における劣化度の進行の有無を確認した。

図14に現地検査結果とシステム判定結果の劣化度の進行状態ごとの数量を示す。表5に現地検査結果における劣化度の進行とシステム判定結果による劣化度の進行が一致した割合を示す。また、今年度のシステム判定結果が昨年度のシステム判定結果より劣化側に進行した割合を合わせて示す。

不良でないまくらぎ(C・Dランク)からBランクへの進行については、70~90%程度で一致、各ランクからA2ランクへの進行については、30~50%程度が一致した。また、劣化度のランクに関わらず、劣化度の進行が認められたまくらぎの割合は83%であった。したがって、一致率は高くないが、現地検査結果からまくらぎの劣化度の進行があったものについては、劣化度の進行を80%程度の精度で把握できる可能性がある。

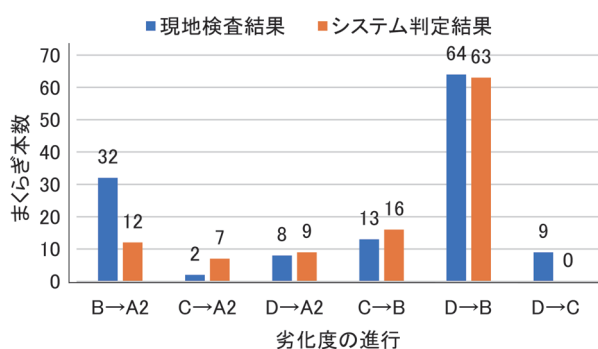


図14 劣化度の進行状態ごとの数量

表5 劣化度進行ごとの一致率

劣化度の進行	B→A2	C→A2	D→A2	C→B	D→B	D→C
現地検査結果(本)	32	2	8	13	64	9
システム判定(本)	10	1	3	9	56	0
一致率	31%	50%	38%	69%	88%	0%
現地検査結果(本)	128					
システム判定(本)	107					
進行した割合	83%					

5. まとめ

木まくらぎ検査を効率的かつ低コストで行うため、ハンディカメラで撮影した列車前方画像から、木まくらぎの劣化度を判定する手法を開発した。保線技術者が疑似床下画像から目視で判定した結果(画像判定結果)と、本アルゴリズムの判定結果(システム判定結果)を比較した結果、システムの判定精度は90%以上であることを確認した。次に、保線技術者が現地にて目視および打音により判定した結果(現地検査結果)とシステム判定結果を比較した結果、一致率はやや低かったものの現地検査結果で不良まくらぎ(A2・Bランク)と判定したまくらぎについて、本システムでA2ランクもしくはBランクと判定できた割合は99%であった。また、画像判定結果とシステム判定結果のばらつきについて確認した結果、システム判定結果は画像判定結果と同一のデータ分布を持ち、全体として画像判定結果の精度に類似していることを確認した。さらに、本システムで木まくらぎの劣化度の進行状態を把握できるか検証した結果、現地検査で劣化度の進行が認められたまくらぎに対して80%程度の割合で劣化度の進行状態を把握することができた。以上のことから、本システムを活用することで、不良まくらぎを高い精度で検出でき、かつ、木まくらぎの劣化度の進行状態を効率的に把握することができる可能性がある。

今後は、木まくらぎ検査への本システムの適用方法について検討を行い、実用化を目指す。

文 献

- 1) 糸井謙介, 坪川洋友, 長峯望, 合田航, 大場久良, 加藤爽: 列車前方画像を用いた木まくらぎ劣化度判定アルゴリズムの開発, 土木学会第76回年次講演会, 2021
- 2) 合田航, 長峯望, 向嶋宏記, 糸井謙介, 坪川洋友, 加藤爽: 列車前方画像を用いたオプティカルフローによるキロ程推定, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, TER-21-059, 2021
- 3) 糸井謙介, 長峯望, 合田航, 坪川洋友, 加藤爽: 列車前方画像を用いた木まくらぎ検査手法の精度向上, 第28回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2021), 2021
- 4) 加藤爽, 坪川洋友, 長峯望, 合田航, 前田梨帆, 山崎雅仁, 糸井謙介: 木まくらぎ劣化度判定システムによる劣化度の経時変化の評価, 第29回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2022), 2022
- 5) 前田梨帆, 長峯望, 合田航, 坪川洋友, 加藤爽: 列車前方画像を用いた木まくらぎ劣化度判定AIシステムの開発, 第29回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2022), 2022

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

谷村幸裕

■企画・監修

鈴木浩明	川崎邦弘	長倉 清	日比野有
伊積康彦	石毛 真	神田政幸	重枝秀紀
桃谷尚嗣	布川 修	新井英樹	福田光芳
松井元英	上半文昭	斉藤実俊	水上直樹
富田 優	小島謙一		

鉄道総研報告 第37巻 第4号

2023年4月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2023 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先
総務部広報 電話 042-573-7219

RTRI REPORT

Vol. 37 No. 4

Apr. 2023

PAPERS

- Evaluation of Relationship between Water Flow Rate and Tangential Contact Force of Wheel/Rail Using Twin-disc Rolling Machine
.....D.YAMAMOTO (1)
- Numerical Analysis of Local Scour Around Pier Based on 3D Movements of Sediment Particles
.....H.ISHII, K.MUROTANI, K.NAKADE (9)
- Evaluation of Service Life of Aged Prestressed Concrete Sleeper
.....T.WATANABE, K.GOTO, S.MINOURA, M.IKEDA (17)
- Rail Profile Selection Method to Reduce Gauge Corner Cracking Initiation
.....M.TSUJIE, M.KONO, Y.TERUMICHI (25)
- Inspection System for Evaluating Wooden Sleeper Deterioration Using Image Analysis of Video
.....S.KATO, Y.TSUBOKAWA, N.NAGAMINE, W.GODA, R.MAEDA, K.ITOI (33)

