

報告 鉄道車輪と PC まくらぎの接触力に関する基礎的研究

後藤 恵一^{*1}・曾我部 正道^{*2}・浅沼 潔^{*3}・渡辺 勉^{*1}

要旨：本報告は、脱線時に車輪との衝突が予期される PC まくらぎについて、車輪形状を模擬した接触子を用いた静的及び衝撃載荷実験を実施したものである。本実験により、まくらぎ長手方向端部での載荷を除き、静的及び衝撃載荷での最大荷重はほぼ同程度であることを示した。また、破壊モードに関しては、実験方法によらず載荷位置によって、曲げ破壊、側面剥離、せん断破壊に分類できることを明らかにした。接触剛性に関しては、載荷方法及び載荷位置によって異なり、静的載荷に対する衝撃載荷の接触剛性の比は、まくらぎ直角方向中央部載荷で 4.7 倍、端部載荷で 2.7 倍であった。

キーワード：脱線、逸脱防止装置、鉄道車輪、MBS、衝撃、PC まくらぎ、最大荷重、接触剛性、破壊モード

1. はじめに

2004 年の新潟県中越地震において、走行中の新幹線が脱線するという事故が発生した。それ以降、各所で地震時列車走行性に関する様々な研究が進められている。鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）では、大規模地震動に対して単一の対策のみで列車の走行安全性を確保することが困難であること、従って、大規模地震動に対しては、地震早期検知システム、構造物の補強、軌道の安全対策等を利用し、鉄道システム全体として減災に努める必要があることが指摘されている¹⁾。

こうした背景から、軌道については、脱線した車両を反対線や線路外部に逸脱させないための各種逸脱防止装置の開発が進められている^{2), 3)}。しかしながら、バラスト軌道においては、地震動により車両が脱線した場合には車輪がまくらぎ上に落下し、その後も走行し続けることが予想される。その際、車輪はまくらぎを損傷させながら、場合によってはまくらぎ上で大きく跳ね上がりながら走行する可能性も考えられるため、車輪衝突によるまくらぎの挙動、作用する荷重の大きさ及び破壊モード等を把握し、さらに、上記のようなまくらぎ上走行においても逸脱防止装置がどのようなメカニズムで機能するか、どの程度までの地震動に対して機能するのかな等の逸脱防止性能を明らかにする必要がある。こうした検討には通常、Multi Body System（以下 MBS という）モデルが用いられる⁴⁾。この過程で重要となるのが、各構成要素の接触力の評価、とりわけ車輪と軌道部材等（本研究ではまくらぎ）との接触モデルである。

理想的には、両者を非線形の有限要素 (Finite Element, 以下 FE という) モデルとし、接触力を厳密に評価するのがよいが、現在の計算機能力の面からすると必ずしも実用的ではない。従って、実務では、要素実験や部分 FE

モデルに基づき、ペナルティー関数法⁵⁾など簡易なマクロモデルを構築し、これを MBS モデルに組み込み、現象解明や性能設計を実施するのが一般的である⁶⁾。

以上より本研究では、研究の目的を次のように定めた。

- (1) 地震時に脱線した車輪とまくらぎの間に生じる接触力に関して、車輪形状を模擬した接触子を用いた、まくらぎの静的及び衝撃載荷実験を実施し、載荷位置ごとの最大荷重および破壊モードを明らかにする。
- (2) 上記実験より、MBS モデルに導入可能な車輪とまくらぎ間の接触剛性について評価する。

2. 実験方法

2.1 供試体及び接触子

図-1 に試験体である新幹線用ポストテンション式 PC まくらぎ (4H) の形状寸法を示す。本研究では便宜的に図に示すようにまくらぎ長手方向を「長手方向」、その直角方向を「直角方向」と向きを定義した。使用セメントは早強ポルトランドセメント、質量は約 318kg である。表-1、表-2 にまくらぎに使用したコンクリート及び PC 鋼棒の材料諸元を示す。

図-2 に接触子の形状寸法を示す。接触力は接触要素形状に依存するため⁵⁾、新幹線用円弧踏面形状に基づく車輪フランジを模擬した接触子 (材質: S45C) を製作し、これを用いて静的及び衝撃載荷実験を行った。

2.2 静的載荷実験

図-3 に静的載荷実験状況を示す。静的載荷実験は 1000kN の載荷能力を有する万能材料試験機を用いて漸増載荷により行った。まくらぎは載荷に伴う移動を防止する目的で押さえ金具により長手方向に 2 箇所固定した。測定項目は荷重及び接触子の鉛直変位であり、荷重測定は接触子上部に配置したロードセルで、変位測定は接触

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部構造力学研究室研究員 工修 (正会員)

*2 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部構造力学研究室主任研究員 博 (工) (正会員)

*3 (財) 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部構造力学研究室室長 (正会員)

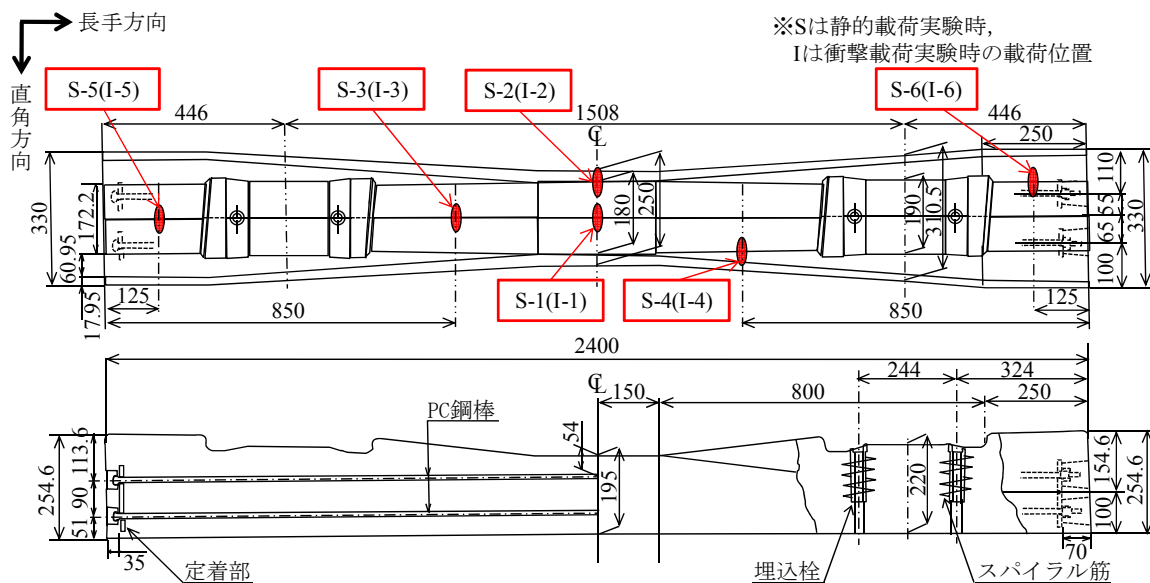


図-1 PC まくらぎの形状寸法（単位：mm）

表-1 コンクリートの材料諸元

弾性係数 (GPa)	圧縮強度 (MPa)	密度 (g/cm ³)
38.4	65.9	2.39

表-2 PC 鋼棒（φ13）の材料諸元

弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	緊張力 (kN)
201.0	1372	1462	122.6

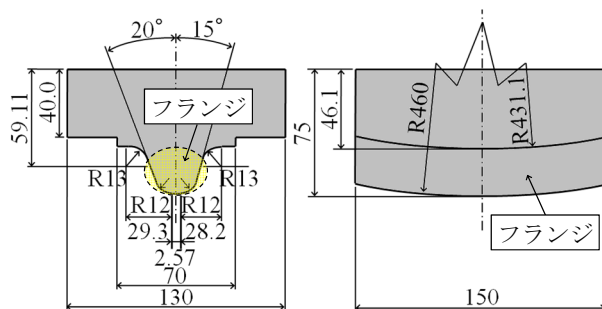


図-2 接触子の形状寸法（単位：mm）

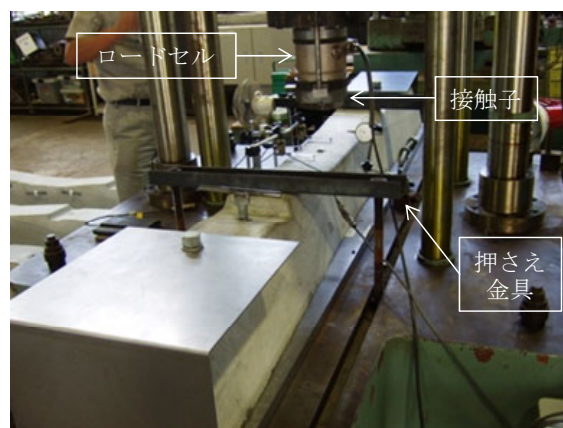


図-3 静的載荷実験状況

子に取り付けたターゲットと試験機台座に設置した接触式変位計で行った。以下、接触子の鉛直変位に関しては、まくらぎに接触子が食込んだ量と等しいと仮定し、食込み量と呼ぶこととした。ここでの食込み量は、まくらぎの弾性及び塑性変形量の両方を含んだものである。

接触子はフランジ方向とまくらぎ長手方向が直角になるように配置し、その載荷位置は図-1 に示す S-1～S-6 の 6 箇所である。S-1, S-3, S-5 については、まくらぎ直角方向中央部に載荷しており、S-2, S-4, S-6 については、まくらぎ上面端部への載荷とし、接触子のフランジ中央部がまくらぎ上面端部に接触するように載荷を行った。また、静的載荷に用いたまくらぎは 2 本であり、1 体目は載荷 S-1 のみ、2 体目は載荷 S-2～S-6 を行った。

2.3 衝撃載荷実験

図-4 に衝撃載荷実験状況を示す。本載荷実験は、重錘（直径 20cm、高さ 25cm、加速度計内蔵）に静的載荷と同様の接触子を取り付けて行った。

接触子を取り付けた状態での重錘質量は 71.1kg であり、この重錘質量に関しては、特に実際の車輪質量等を想定してはいない。また、重錘は電磁石を用いて所定の高さまで吊り上げ後、載荷装置に取り付けてあるガイドレールに沿って自由落下させた。まくらぎは鋼板を敷いた反力床上に直接置き、重錘落下衝突時のまくらぎの跳ね上がりを防止するために、鋼棒と押さえ金具からなる跳ね上がり防止用治具を用いて固定した。

落下位置に関しては、図-1 に示す静的載荷時と同様である。以降、静的載荷と区別するために、衝撃載荷時の載荷位置の名前を S-1 から I-1 のように先頭のアルファベットを“S”に変更して呼ぶものとする。また、衝撃載荷に用いたまくらぎは 2 本であり、1 体目は載荷 I-1 のみ、2 体目は載荷 I-2～I-6 を行った。各載荷位置にお

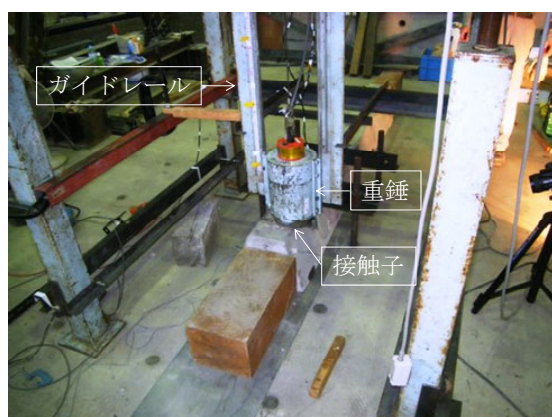


図-4 衝撃载荷実験状況

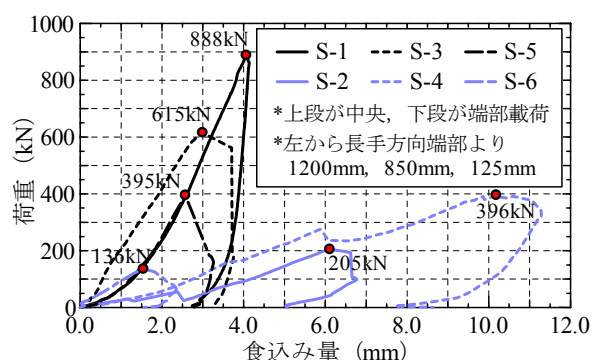


図-5 荷重と食込み量の関係



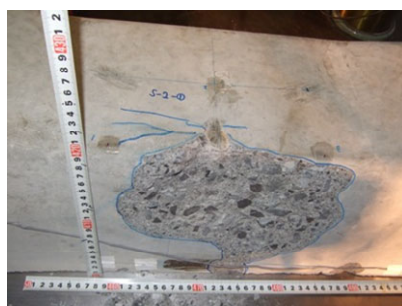
(a) S-1 (曲げ破壊)



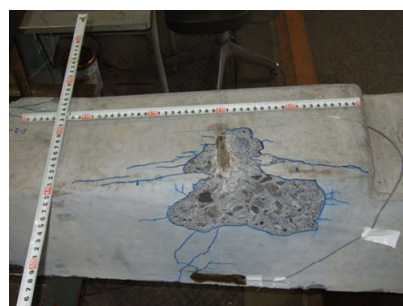
(c) S-3 (曲げ破壊)



(e) S-5 (せん断破壊)



(b) S-2 (側面剥離)



(d) S-4 (側面剥離)



(f) S-6 (せん断破壊)

図-6 载荷終了時の破壊状況

ける重錘の落下高さは、250mm, 500mm, 750mm, 1000mm, 1500mm, 2000mm を基本として、载荷位置は変えずに1回ずつ繰り返し漸増载荷した。この時、発生衝撃力が前回の落下高さのものより小さくなった場合、もしくはまくらぎの損傷が大きくなった場合には载荷を中止した。

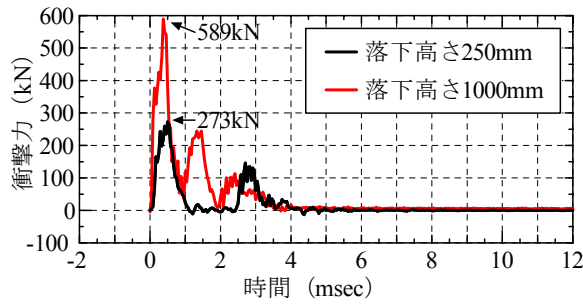
衝撃载荷における測定項目は衝撃力及び载荷点におけるまくらぎ表面の接触子の食込み量である。衝撃力に関しては重錘内部に埋め込まれた加速度計出力に重錘質量を乗じて評価した。用いた加速度計は測定周波数範囲が1Hz から10kHz, 最大測定加速度が1000G のRION社製せん断型圧電式加速度計、型式PV94である。また、サンプリング周波数は24kHzとし、フィルター処理は施していない。食込み量に関しては、载荷位置ごとにノギスにより測定した。ここでの食込み量は、载荷後の測定であるため弾性変形量を考慮できていない。しかし、衝

突現象が極めて短い時間で起こっており、弾性変形量の測定は困難であることから、今回は载荷終了後の塑性変形量のみを食込み量として採用した。

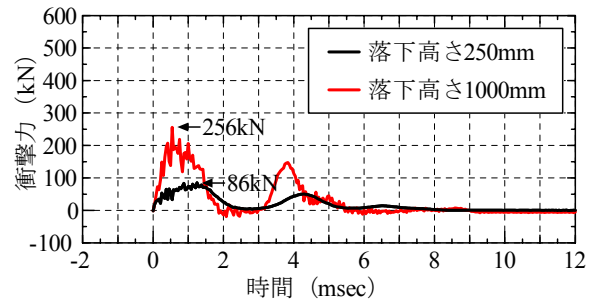
3. 実験結果

3.1 静的载荷実験

図-5 に各载荷位置における荷重と食込み量の関係を最大荷重と併せて示す。また、図-6 には载荷終了時の破壊状況を示す。図-5 より、まくらぎ直角方向中央部に载荷した場合と端部に载荷した場合を比較すると、中央部载荷の場合が食込み量に対する荷重の増加割合が大きいことが確認できる。また、中央部载荷の場合は食込み量に対して荷重が単調に増加しているが、端部载荷であるS-2及びS-4の場合は、それぞれ50kN, 270kN程度で荷重が一度低下する箇所がある。これは端部载荷で



(a) 载荷位置 I-1



(b) 载荷位置 I-2

図-7 衝撃力波形の例

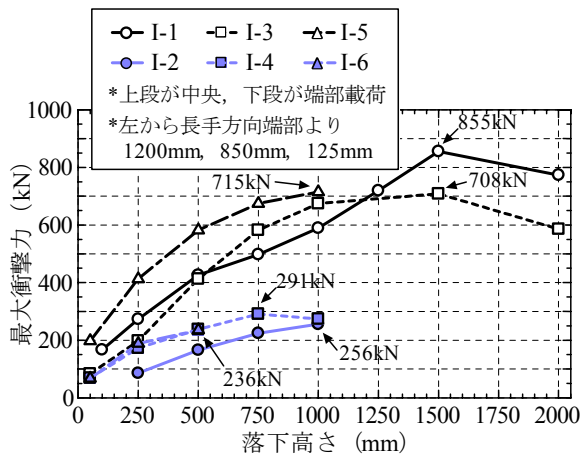


図-8 最大衝撃力と落下高さの関係

は荷重が増加するにつれて図-6(b), (d)に示すように端部が段階的に破壊するためである。

次に、まくらぎ長手方向の载荷位置が同じ場合（例えば S-1 及び S-2）で比較すると、直角方向端部に载荷した場合よりも中央部に载荷した場合に最大荷重が大きくなっていることが分かる。その差はまくらぎ長手方向 1250mm の位置で 4.3 倍、850mm の位置で 1.6 倍、125mm 位置で 2.9 倍となった。

さらに、まくらぎ直角方向の载荷位置が同じ場合（例えば S-1, S-3 及び S-5）で比較すると、中央部及び端部ともに 125mm 位置が最小値となった。また、最大荷重との差は、中央部で 1.6～2.2 倍、端部で 1.5～2.9 倍であり、まくらぎ長手方向の载荷位置によってばらついていることが分かる。

破壊モードに関しては、図-6(a), (c)に示すように中央部载荷の場合は、载荷位置近傍のコンクリートの圧壊及びまくらぎ下面から上面に向かうひび割れが発生する曲げ破壊であった。ただし、ここではまくらぎを試験機台座上に設置していることから、純粋な曲げ破壊とは異なることに注意が必要である。それに対し図-6(b), (d)に示す端部载荷では、側面のコンクリートが剥離する破壊モードであった。これらの破壊モードは、まくらぎ長手方向の载荷位置が変わっても同様の傾向を示し

た。ただし、まくらぎ長手方向 125mm 位置に载荷した S-5 及び S-6 については、両者とも図-6(e), (f)に示すように载荷位置からまくらぎ長手方向端部に向かう大きなひび割れを生じるせん断破壊であった。

3.2 衝撃载荷実験

図-7 に、载荷位置 I-1 及び I-2 の落下高さ 250mm, 1000mm における衝撃力波形を示す。図-7(a)の落下高さ 250mm の場合、継続時間が 1msec 前後の正弦半波波形が 2 波励起している。この 2 波目については、重錘衝突後にまくらぎが床の反力により跳ね上がり、鉛直下向きの加速度を持ち続けた重錘と再衝突したために生じたものと考えられる。そこで各衝撃力波形に関して 1 波目だけに着目すると、落下高さが高くなるにつれ最大衝撃力は大きくなるとともに、その発生時間は早くなり、衝撃力継続時間も短くなっていることが分かる。また、落下高さが増すにつれて高周波成分も多く計測された。次に、まくらぎ直角方向の载荷位置の違いである I-1 及び I-2 を比較すると、端部载荷の場合が中央部载荷よりも衝撃力継続時間が長くなっている。この傾向はどの波形でも同様であり、中央部载荷の継続時間は 0.8msec～1.4msec であったのに対し、端部载荷では 1.5msec～2.6msec であった。

図-8 に各载荷位置における最大衝撃力と落下高さの関係を示す。図中には各载荷位置における最大値も併せて示した。この図より静的载荷結果と同様、直角方向端部に载荷した場合と比較して、中央部に载荷した場合に最大値が大きくなっていることが確認できる。この時、まくらぎ長手方向の载荷位置が同じ場合（例えば I-1 及び I-2）で比較すると、端部载荷に対する中央部载荷の最大値の比は、1250mm の位置で 3.3 倍、850mm の位置で 2.4 倍、125mm 位置で 3.0 倍程度であった。

また、まくらぎ直角方向の载荷位置が同じ場合（例えば I-1, I-3 及び I-5）で比較すると、静的载荷結果と同様、125mm 位置で最大値が小さい傾向にあった。しかし、载荷位置での差は中央部、端部载荷とも 1.2 倍程度であり、静的载荷結果とは異なり、長手方向の载荷位置での差は

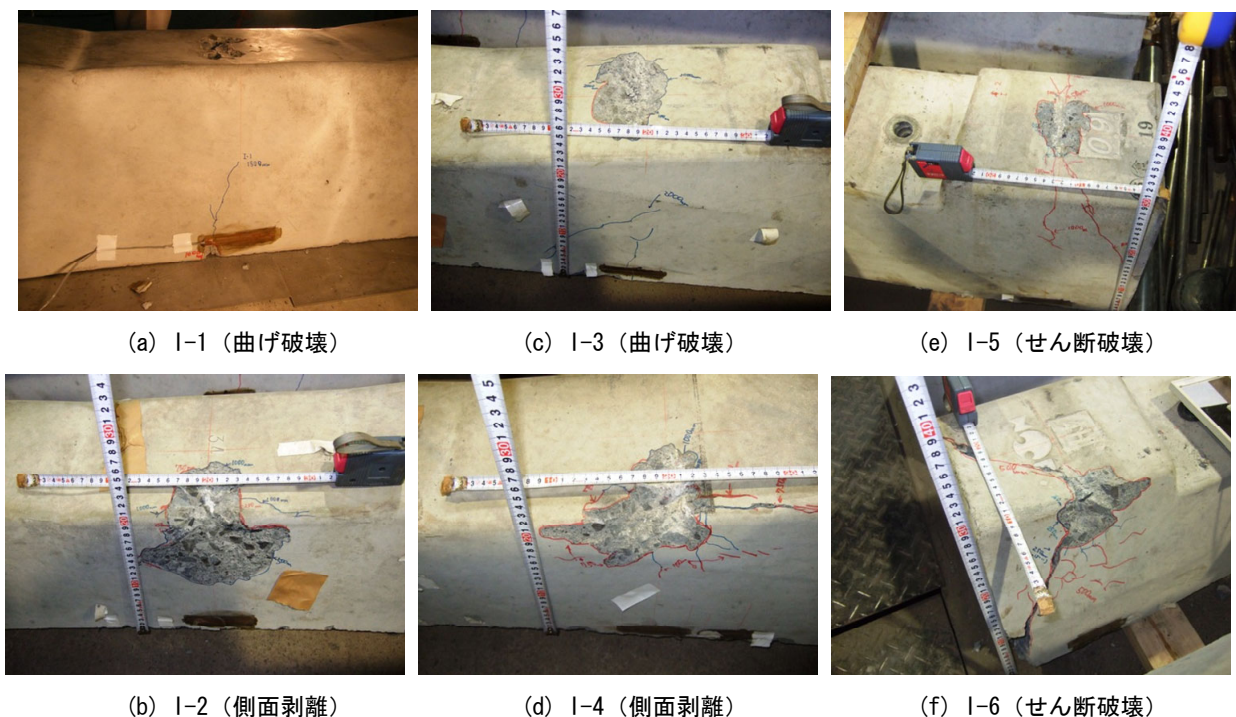


図-9 各载荷位置における破壊状況

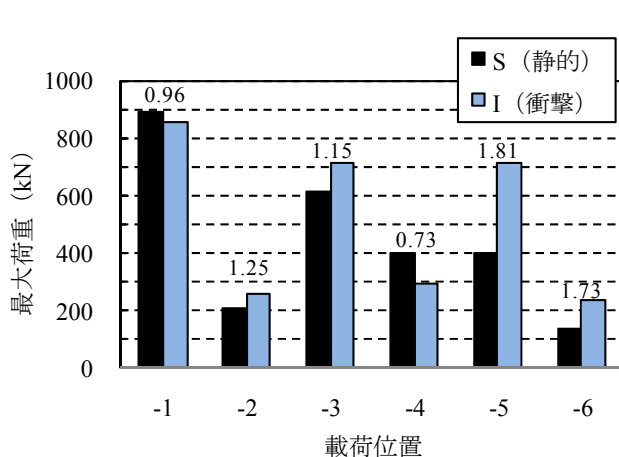


図-10 各载荷位置における最大荷重の比較

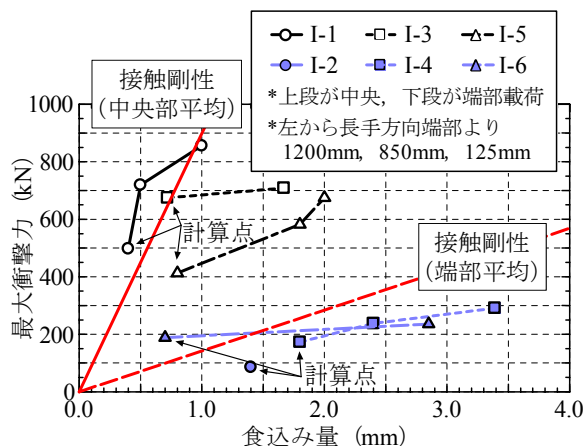


図-11 最大衝撃力と食込み量の関係

あまり見られなかった。

図-9 に载荷終了時の破壊状況を示す。この図と図-6 に示す静的载荷時の破壊状況を比較すると、静的及び衝撃载荷における破壊モードがほぼ同様であるため、破壊モードに関しては载荷方法によらず载荷位置によって、曲げ破壊、側面剥離、せん断破壊に分類できることが分かった。

3.3 最大荷重評価

図-10 に静的及び衝撃载荷実験の各载荷位置における最大荷重を示す。図中には、静的最大荷重に対する衝撃最大荷重の比を併せて示した。この図から、各载荷位置における静的最大荷重に対する衝撃最大荷重の比は、まくらぎ長手方向 125mm 位置 (端部) 载荷である 5, 6 を除けば 0.73~1.25 倍であり、静的及び衝撃最大荷重は

ほぼ同程度であった。しかし、長手方向端部载荷 5, 6 については、1.73 倍及び 1.81 倍と 2 倍近い差となった。

3.4 接触剛性評価

図-11 に衝撃载荷実験で得られた各载荷位置及び各落下高さにおける最大衝撃力と食込み量の関係を示す。食込み量についてはノギスにより測定が可能であった点のみ図中に示した。また、図中には衝撃载荷実験により求められた接触剛性も示した。ここで、接触剛性は、各载荷位置における最初の食込み量の測定点を接触剛性の計算点とし、その点の衝撃力をその食込み量で除し、まくらぎ直角方向中央部载荷の 3 箇所及び端部载荷の 3 箇所それぞれ平均化して算出した。図-12 に、まくらぎ直角方向中央部及び端部载荷における静的载荷と衝撃载荷の接触剛性の比較図を示す。ここで、静的载荷に

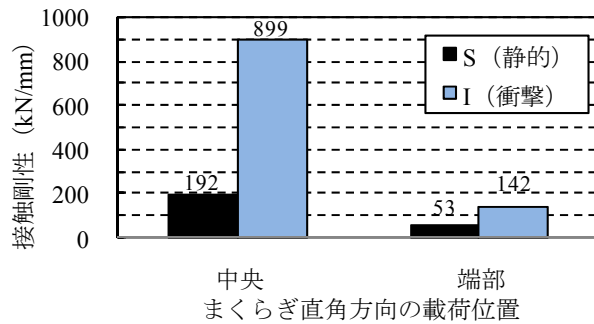


図-12 荷重方法及び荷重位置での接触剛性の比較

おける接触剛性は、図-5 に示す荷重と食込み量の関係において、各最大荷重点をその点の食込み量で除し、まくらぎ直角方向中央部荷重の3箇所及び端部荷重の3箇所それぞれ平均化したものである。この図より、静的及び衝撃荷重といった荷重方法によって接触剛性が異なることが分かる。ここで、各荷重方法における食込み量について、静的荷重での食込み量は弾性及び塑性変形量の両方を考慮したものであるのに対し、衝撃荷重での食込み量は塑性変形量のみであるために単純には比較できないが、本実験では、静的荷重に対する衝撃荷重の接触剛性の比は、まくらぎ直角方向中央部荷重の場合で4.7倍、端部荷重で2.7倍となった。また、まくらぎ直角方向の荷重位置に関しても、端部荷重に対する中央部荷重の接触剛性が、衝撃荷重の場合で6.3倍となり、荷重位置に関しても異なる値となった。

4. 結論

本研究では、地震時に脱線した車輪とまくらぎとの間で生じる接触力に関して、まくらぎの荷重位置ごとの最大荷重および破壊モードを明らかにするとともに、MBSモデルに導入可能な車輪とまくらぎ間の接触剛性について評価することを目的とし、車輪形状の接触子を用いた荷重位置ごとのまくらぎの静的及び衝撃荷重実験を実施した。本研究において得られた結果は、以下の通りである。

- (1) 最大荷重に関して、荷重位置における静的最大荷重に対する衝撃最大荷重の比は、まくらぎ長手方向125mm位置（端部）での荷重を除けば0.73～1.25倍であり、静的及び衝撃最大荷重はほぼ同程度であった。
- (2) 破壊モードに関して、まくらぎ直角方向の荷重位置によって破壊モードが異なる結果となった。まくらぎ直角方向中央部に荷重した場合は、荷重部のコンクリートの圧壊及び下面から上面に向かうひび割れが発生する曲げ破壊であったのに対し、端部に荷重

した場合は側面が剥がれるような破壊モードであった。また、まくらぎ長手方向端部に荷重した場合は、直角方向の荷重位置に関わらず、荷重位置から長手方向端部に向かう大きなひび割れを生じるせん断破壊であった。静的及び衝撃荷重での破壊モードはほぼ同様であった。

- (3) 接触剛性に関して、本実験では、静的荷重に対する衝撃荷重の接触剛性の比が、まくらぎ直角方向中央部荷重の場合で4.7倍、端部荷重で2.7倍となった。また、まくらぎ直角方向の荷重位置に関しても、端部荷重に対する中央部荷重の接触剛性が、衝撃荷重の場合で6.3倍となり、荷重位置に関しても異なる値となった。今回の実験により算出された接触剛性は厳密なものとは言えないが、MBS解析を行う際に要求される接触剛性の精度はオーダーレベルであるため、本実験によりMBS解析を実施するための一定のオーダーは示されたものと考えられる。

本実験では、まくらぎを平らな面上に設置している点や荷重点数が少ない点、また、衝撃荷重実験では、実際の列車速度と比較して非常に低速である点など、最大荷重や接触剛性に与える影響要因が幾つか考えられる。これらの点については、今回得られた実験結果を基にした有限要素解析等により補間していきたいと考えている。最終的には、算出した接触剛性を用いたMBS解析を実施し、列車脱線時の逸脱防止装置等の性能評価を行っていきたい。

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 - 変位制限，丸善，2006.2
- 2) 土木学会・第二次調査団：平成16年新潟県中越地震 社会基盤システムの被害等に関する総合調査「調査結果と研究提言」，I報告・提言編，2004.12
- 3) 浅沼 潔，曾我部正道，渡辺 勉，岡山準也，涌井一：逸脱防止機能を有するバラスト・ラダー軌道の開発，鉄道総研報告，Vol.23，No.2，2009.2
- 4) 曾我部正道，浅沼 潔，涌井 一：地震時列車逸脱防止ガードの性能評価法の開発，鉄道力学論文集，No.11，pp.69-74，2007.7
- 5) 土木学会構造工学委員会 衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会：衝撃実験・解析の基礎と応用，丸善，2004.3
- 6) Brabie, D.: Wheel-Sleeper Impact Model in Rail Vehicles Analysis, Journal of System Design and Dynamics, Vol.1, No.3, pp.468-480, Feb.2007