

報告 鉄道車輪と超高強度繊維補強コンクリート走行案内路の接触力に関する研究

後藤 恵一*1・曾我部 正道*2・渡辺 勉*3・小尾 博俊*4

要旨：本報告は、逸脱防止装置の一つとして提案されている走行案内路について、車輪形状を模擬した接触子を用いた静的及び衝撃载荷実験を実施したものである。この実験より、車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、载荷位置と耐力の関係を明らかにした。また、締結装置箱抜き部の天板の厚さにより破壊モードが縁端破壊と押し抜き破壊に分類されることを明らかにした。さらに、接触力に関して、車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配が静的に 200kN/mm 程度となることを示した。

キーワード：走行案内路、超高強度繊維補強コンクリート、脱線、衝撃、逸脱防止装置

1. はじめに

2004年新潟県中越地震以降、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、軌道からの逸脱防止装置等を利用し、鉄道システム全体として減災に努める必要があること等が指摘されている¹⁾。

こうした背景から、大規模地震動による鉄道車両の脱線を想定し、その際の被害の最小化を図るために、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。本研究ではこのうち、脱線後の走行案内路に相当する部分について検討したものである。

図-1に本構造の概略図を示す。同図に示すように、走行案内路のうち、締結装置部分は箱抜き構造としている。この走行案内路は、耐衝撃性能、加工性、維持管理性、及び経済性等を考慮し、超高強度繊維補強コンクリート²⁾の一種であるダクトル (Ductal) により構築することが検討されている。ダクトルに関しては既に、爆風や高速飛翔体による耐衝撃・吸収性能に関する報告がなされているが³⁾、地震動により生じる鉄道車両のロッキング振動に伴い車輪がレールから脱輪・落下する挙動は、走行案内路に相当に高い衝撃力を与えることが予想されるため、適切な耐力設計が必要となる。

加えて、逸脱防止装置を用いる場合、そ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、計算機能力の面から実用的ではない。従って、実務では、要素実験や部分 FE モデルに基づき、ペナルティ関数法など簡易なマクロモデルを構築し、これを MBS 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^{5),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)地震時に車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、車輪形状を模擬した接触子を作成し、当該走行案内路の耐力を静的及び衝撃载荷実験により評価する。
- (2)地震時に車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、車輪形状を模擬した接触子を作成し、両者間の接触剛性を評価する。

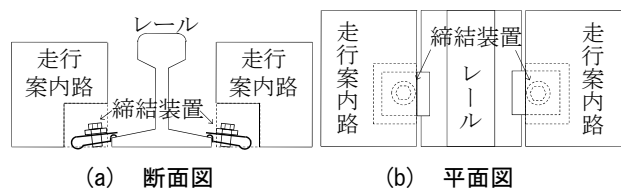


図-1 走行案内路の概略図

2. 実験方法

2.1 供試体及び接触子

図-2に供試体一覧を示す。表-1に供試体の材料諸元を示す。箱抜き部天板厚さが 150mm (高さ 220mm) である標準の供試体を A とした。また、線路方向に縦断勾配を設けた場合の漸減する高さを考慮して、箱抜き部

*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 工博 (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研究員 工修 (正会員)

*4 大成建設 (株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室主任研究員 工修 (正会員)

天板厚さが80mm(高さ150mm)の供試体Bを製作した。静的載荷実験で用いた供試体をA1, B1, 衝撃載荷実験で用いた供試体をA2, B2と区別した。

図-3に接触子形状寸法を示す。接触力は接触要素形状に依存するため、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)を作成し、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-4に静的載荷実験図を、図-5に実験状況を示す。供試体は貫通させた4本の鋼棒により固定しており、油圧ジャッキを用いて単調に鉛直載荷した。荷重測定はロードセルで行い、変位測定は2つのレーザー変位計を用いて行った。変位測定位置は載荷部裏側の箱抜き部上面中央及び接触子の食込み量計測のためにロードセルに取り付けたターゲットとした。ロードセル先端には前述の新幹線の車輪フランジを模擬した接触子を取り付けた。

載荷位置は、供試体A1に関しては接触子フランジ方向と供試体長手方向を平行に設置し、箱抜き側縁端から10mm, 35mm, 反対側の充実側縁端からは25mm, 90mm, 50mmの順に載荷を実施した。また、供試体B1に関しては、供試体A1の載荷方向と同様に平行の場合、その他に直角に設置した場合の2ケースを実施した。平行に設置した場合は、供試体(箱抜き部の天板の厚さ)の違いによる評価を行うために、供試体A1と同様に箱抜き側から35mmの位置に、直角に設置した場合はフランジ中央が充実側端部に接触するように載荷を実施した。

本静的載荷実験においては、同一供試体を用い、載荷位置を変えて実験を行っているため多少なりとも載荷履歴の影響が考えられる。しかしながら、各載荷における最終的な破壊面及び発生したひび割れが繋がっていなかったこと、また、荷重と載荷面変位の関係においても初期勾配がほとんど変化していないことが確認できたため、載荷履歴の影響については考慮しないこととした。

2.3 衝撃載荷実験

図-6に衝撃載荷実験図を、図-7に実験状況を示す。本載荷実験では、重錘(直径20cm, 高さ25cm, 加速度計内蔵)に静的載荷実験と同様の接触子を取り付けて載荷を行った。

接触子を取り付けた状態での重錘質量は71.1kgであった。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、重錘は載荷実験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。落下位置及び落下高さに関しては、接触子フランジ方向と供試体長手方向を平行にし、供試体A2の場合は、落下高さ250mm, 250mm, 500mm, 500mm, 750mm, 1000mm

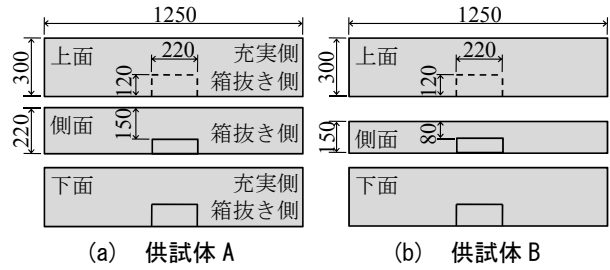


図-2 供試体一覧(単位:mm)

表-1 供試体の材料諸元

弾性係数(GPa)	50.7
圧縮強度(MPa)	196.3
引張強度(MPa)	10.6

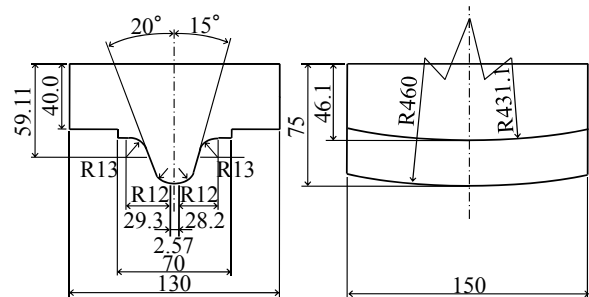


図-3 接触子形状寸法(単位:mm)

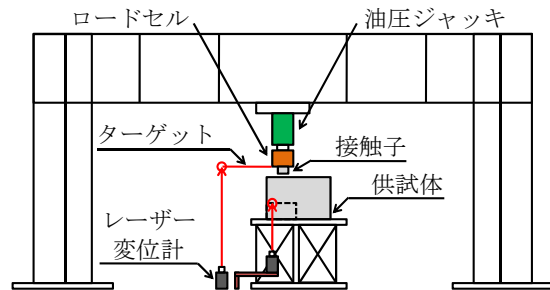


図-4 静的載荷実験図



図-5 静的載荷実験状況

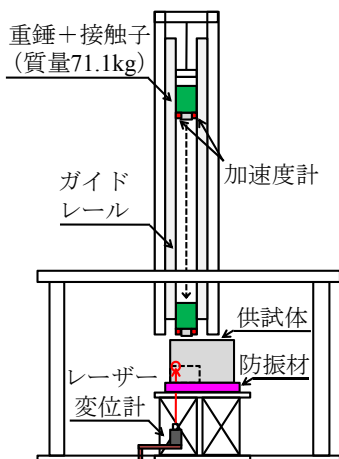


図-6 衝撃载荷実験図



図-7 衝撃载荷実験状況

の計6ケースを繰り返して荷重した。供試体B2の場合は、落下高さ100mm, 250mm, 500mm, 750mm, 1000mm, 1500mm, 2000mmの計7ケースを繰り返して荷重した。落下位置に関しては、静的荷重実験との比較を行うことができるように、どちらの供試体の場合も箱抜き側縁端から35mmの位置を重錘の落下位置とした。

衝撃力は、加速度計出力に重錘質量を乗じて算出した。加速度計は、1000G対応のRION社のPV94を用いた。サンプリング周波数は10240Hzとした。

供試体の固定方法は静的荷重実験と同様であるが、供試体の下に防振材を敷設した。防振材にはGetzner社のSYLODYN(材質:発泡ポリウレタン)を用いた。

3. 実験結果

3.1 静的荷重実験

図-8に、供試体A1の箱抜き側縁端から10mm, 35mmの位置及び供試体B1の箱抜き側縁端から35mmの位置での荷重における荷重と接触子の食込み量の関係を示す。図-9に荷重終了時の破壊状況を示す。

供試体A1-箱抜き側10mmの場合、66kN程度で最大荷

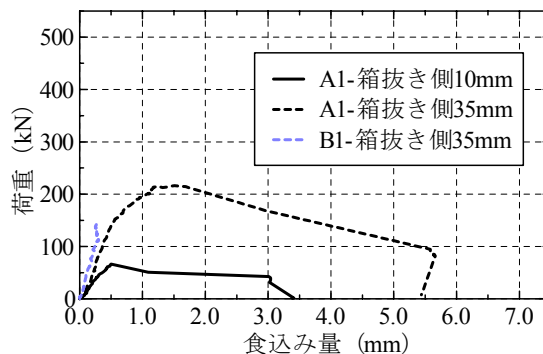
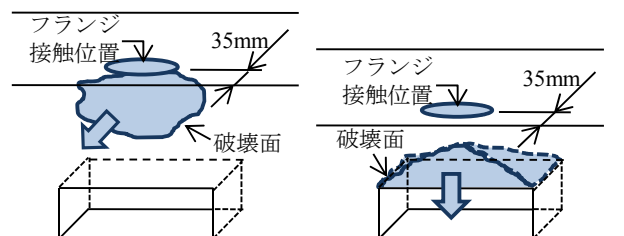


図-8 箱抜き側荷重での荷重と食込み量の関係



(a) 供試体A1(縁端破壊) (b) 供試体B1(押し抜き破壊)

図-9 箱抜き側縁端から35mm荷重での破壊状況

重となった。その後、鋼繊維補強の効果により50kNほどの荷重を維持したが、供試体側面がせり出すように半円弧状に破壊面を形成し、縁端破壊により荷重が大きく低下した。供試体A1-箱抜き側35mmの場合、約216kNに達したところで最大荷重を記録した。その後、供試体A1-箱抜き側10mmの場合と同様に、鋼繊維補強の効果により緩やかに荷重が低下し、図-9(a)に示すように、接触子接触点中央から大きな斜めひび割れが端部まで発生し、供試体A1-箱抜き側10mmよりも大きな半円弧状の破壊面を形成し、縁端破壊により荷重低下した。

供試体B1-箱抜き側35mmの場合、最大荷重が約146kNとなり供試体A1-箱抜き側35mmの場合と比べて30%ほど最大荷重が低い値となった。ただし、図-9(b)に示すように、供試体B1-箱抜き側35mmは箱抜き部上部が押し抜かれた破壊形態となった。供試体側面には、荷重点位置から箱抜き部上縁まで斜めにひび割れが入り、また、箱抜き部上面の3辺にも大きなひび割れが発生し破壊面が形成された。

図-10に供試体A1の充実側縁端から25mm, 50mm, 90mmの位置での荷重結果を示す。それぞれの最大荷重は、25mmの場合が約170kN, 50mmの場合が約492kNであった。いずれも半円弧状の破壊面を形成した。また、

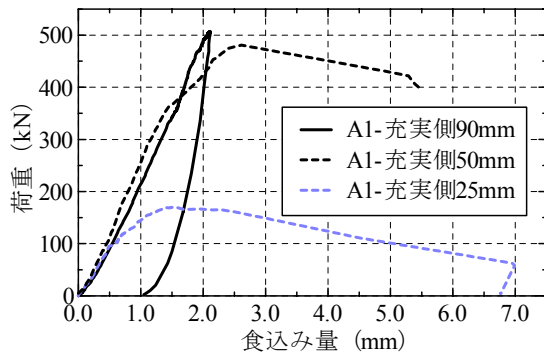


図-10 充実側載荷での荷重と食込み量の関係

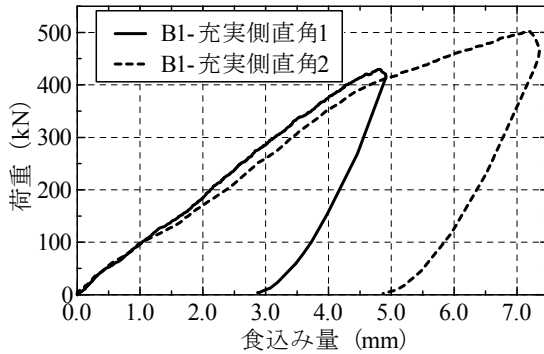


図-11 充実側直角載荷での荷重と食込み量の関係



図-12 充実側直角載荷での損傷状況

90mm の場合はロードセルの測定限界である 500kN を上回ったが、供試体には載荷点の凹み以外に変状が見られなかったため載荷を終了した。

図-11 に供試体 B1 の充実側直角載荷の結果を示す。充実側直角載荷の場合、他の静的載荷結果と比べ接触子の食込み量に対する荷重の増分が少ない結果となった。これは端部載荷のために、供試体の変形が比較的許される条件であったためと考えられる。充実側直角載荷の場合も、供試体 A1 の充実側載荷と同様に測定限界に迫ったため載荷を終了した。破壊状況は図-12 に示すように、供試体縁端が剥がれるように損傷した。

3.2 衝撃載荷実験

図-13 に供試体 A2 及び供試体 B2 の衝撃載荷実験の最大衝撃力と落下高さの関係を示す。ここでの最大衝撃力は、2 つの加速度計により測定された衝撃力の平均値とした。また、図-14 に載荷終了時の破壊状況を示す。

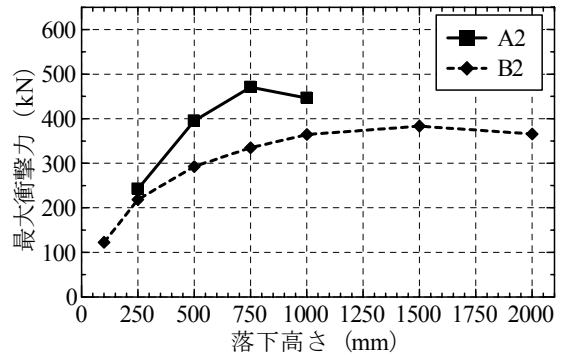
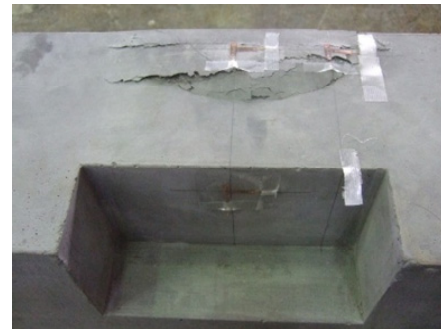


図-13 最大衝撃力と落下高さの関係



(a) 供試体 A2 (縁端破壊)



(b) 供試体 B2 (押し抜き破壊)

図-14 衝撃載荷実験終了時の破壊状況

図-13 に示すように、供試体 A2 は落下高さ 750mm で、最大衝撃力 471kN を記録した。この時点で静的載荷実験で見られた半円弧状の破壊面が形成されていた。落下高さ 1000mm では、衝撃力は 446kN に留まったが、破壊面のひび割れが進展した。この破壊形態は図-14 (a) に示すように、静的載荷である供試体 A1-箱抜き側 35mm の場合と同様の縁端破壊であった。

図-13 に示すように、供試体 B2 は落下高さ 500mm で、衝撃力 293kN を記録した。供試体側面には、載荷点位置から箱抜き部上縁まで斜めにひび割れが入り、箱抜き部上面にも 30mm ほどの大きなひび割れが生じ破壊面が形成された。落下高さ 1500mm では、最大衝撃力 383kN を記録した。この破壊形態は図-14 (b) に示すように静的載荷である供試体 B1-箱抜き側 35mm の場合と同様の押し抜き破壊であった。

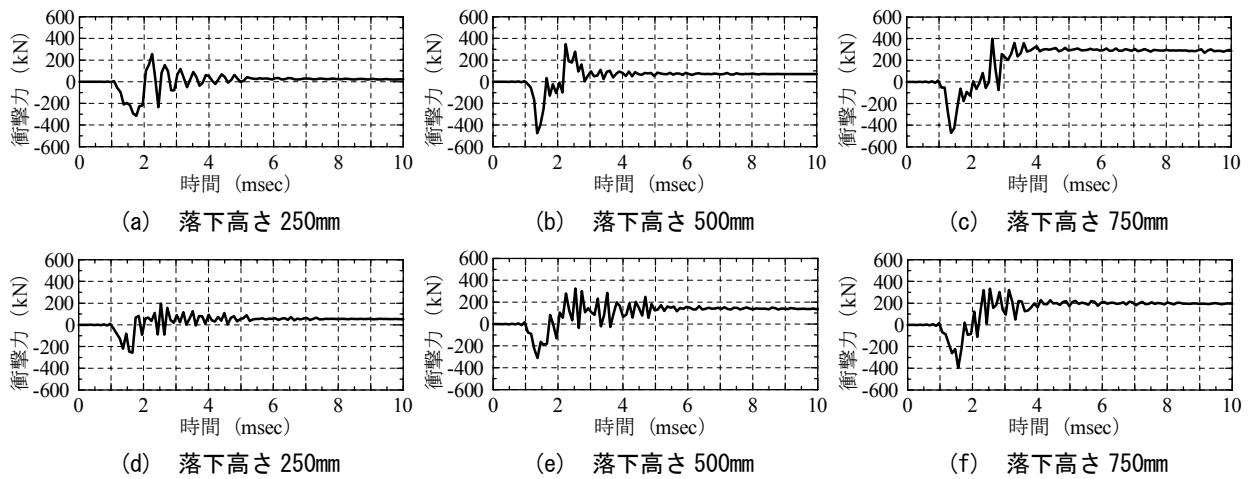


図-15 衝撃力波形（上段：供試体 A2，下段：供試体 B2）

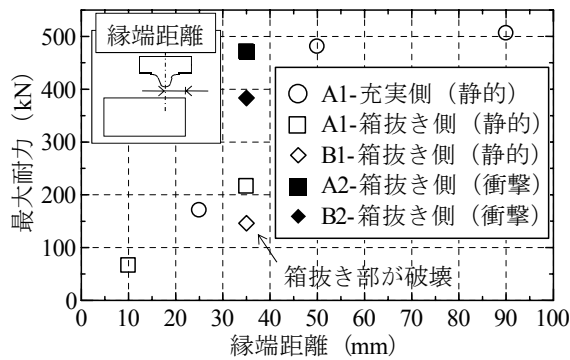


図-16 縁端距離（载荷位置）と最大耐力の関係

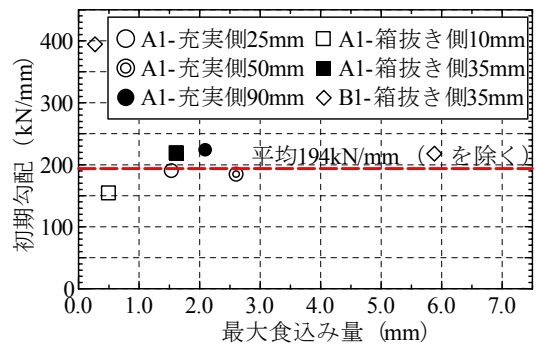


図-18 車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配の関係（長手方向）

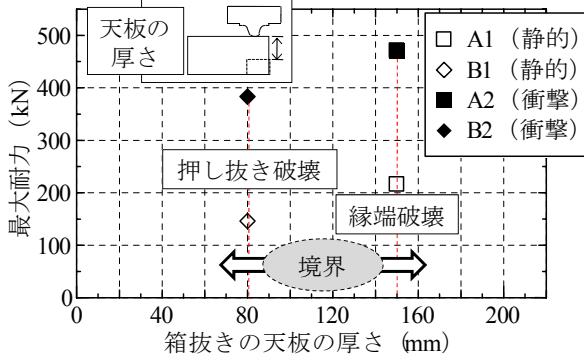


図-17 箱抜き部天板厚さと最大耐力の関係

図-15 に供試体 A2 及び供試体 B2 の落下高さ 250mm, 500mm, 750mm の衝撃力波形を示す。ここでは、2つの加速度計により測定された衝撃力波形のうち一方の衝撃力波形のみを示した。いずれの衝撃力波形も、1msec 程度の極めて短い作用時間の中に大きな衝撃力が生じていることが分かる。本実験における衝撃力の継続時間は、供試体 A2 の方が供試体 B2 よりも長い傾向にあったが、いずれも 1msec 前後であった。

3.3 耐力評価

図-16 に縁端距離（载荷位置）と最大耐力の関係を示す。図から、縁端距離が縁端破壊の耐力に及ぼす影響を評価することができる。実際に車輪が位置する縁端距離

の限界は、車輪と逸脱防止装置の離隔により定まるが、予想衝撃力と同図から求まる耐力を指標にすればその限界を設定することができる。静的载荷実験の耐力と衝撃载荷実験の耐力の間には 2.5 倍程度の開きがある。耐力は、実際には载荷速度に依存することとなるが、1msec から静的の間は本実験の程度であると見なし、実務上はより小さな値である静的载荷実験の値を設計に用いれば安全側の評価になる。押し抜き破壊となった静的载荷の供試体 B1-箱抜き側 35mm と衝撃载荷の供試体 B2-箱抜き側 35mm は、同一条件の A シリーズに比べて耐力が低下する傾向となった。

図-17 に供試体の箱抜き部天板厚さと最大耐力の関係を示す。3.2 節、3.3 節で述べたように、A シリーズと B シリーズの間には明確な破壊モードの違いが存在した。その境界は 80mm から 150mm の間に存在すると考えられる。

3.4 接触力評価

図-18 に車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配の関係を示す。そのばね定数は概ね静的に 200kN/mm 程度であった。得られたばね定数は、ペナルティ法のばね定数に等価に換算できる訳ではなく、また

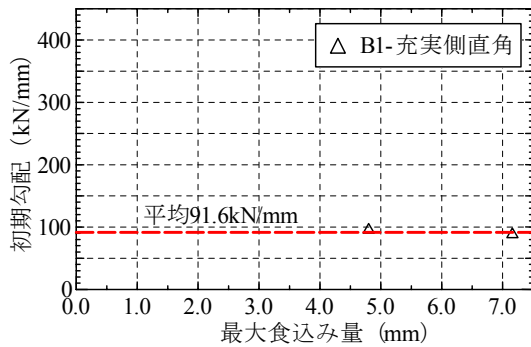


図-19 車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配の関係（直角方向）

動的なひずみ速度の影響等も考えられるため、厳密な値とは言えないが、MBSにより数値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。供試体 B1 は箱抜き部のたわみが大きくなり、車輪先端の食込み量が抑えられる結果となった。

図-19 に接触子フランジを縁端に対して直角に接触させた場合の、車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配の関係を示す。走行案内路は線路方向に連続するが、一定間隔で施工目地の設置が必要となる。図は、この場合の接触力評価に資することができる基本ばね定数を提供したものであり、そのばね定数は静的に 100kN/mm 程度であったことが推察される。値の解釈については前図と同様である。

4. 結論

- (1)車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、縁端距離と耐力の関係を実験的に明らかにした。例えば、縁端距離 35mm の位置に載荷した場合の耐力は約 216kN であった。
- (2)箱抜き部の天板の厚さにより破壊モードが縁端破壊と押し抜き破壊に分類される。その境界厚さは 80mm から 150mm の間に存在すると考えられる。

(3)衝撃載荷実験の耐力は静的載荷実験の耐力の 2.5 倍程度となった。耐力は衝撃力の作用時間にもよるが、実務上はより小さな値である静的載荷実験の値を設計に用いれば安全側である。

(4)地震時に車輪と走行案内路との間で生じる接触力に関して、車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配は、静的に 200kN/mm 程度であった。フランジを縁端に対して直角に接触させた場合の、初期勾配は静的に 100kN/mm 程度であった。これらの値は厳密なものとは言えないが、MBS により数値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。

今後、有限要素法解析等により本実験の検証を進めるとともに、MBS モデルにより逸脱防止装置の性能評価を実施していきたい。

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) 土木学会コンクリート委員会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，2004
- 3) 小尾博俊，加納宏一，七井慎一，末田隆敏：衝撃荷重を受けるコンクリート造と UFC 造の比較解析，大成建設技術センター報，第 39 号，pp.29-1-29-6，2006
- 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
- 6) Dan Brabie:Wheel-Sleeper Impact Model in Rail Vehicles Analysis, Journal of System Design and Dynamics, Vol.1, No.3, pp.468-480, Feb.2007