

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

○[土] 後藤 恵一 [土] 曾我部 正道 [土] 浅沼 潔 [土] 渡辺 勉 (鉄道総合技術研究所)
[土] 田中 良弘 [土] 小尾 博俊 (大成建設)

A Study on Evaluation of Contact Force between a Train Wheel and a Track Runway made of Ultra-high Strength Fiber Reinforced Concrete

○Keiichi Gotou, Masamichi Sogabe, Kiyoshi Asanuma, Tsutomu Watanabe (Railway Technical Research Institute)
Yoshihiro Tanaka, Hirotohi Obi (Taisei Corporation)

In the October 23, 2004, Chuetsu Earthquake, Jouetsu Shinkansen "Toki No.325" was derailed between Urasa St. and Nagaoka St. As a result, many vehicle guide devices has been developed that minimized vehicle damage when railway vehicle was derailed by a large-scale earthquake. we evaluated of contact and impact force between a train wheel and a track runway made of ultra-high strength fiber reinforced concrete(UFC). UFC posses surprising mechanical properties so that no active reinforcement such as reinforcing bars in needed. In this study, We clarified the following items: Firstly, ultimate strength of the track runway depends on a load position from its. In the case of 35mm of the load position, ultimate strength was 216kN. Secondary, there were two mode of ultimate state, edge and punching destruction according to a cover thickness of track runway for rail fastening system. Thirdly, Initial stiffness calculated from wheel digging depth and contact force was about 200kN/mm.

キーワード：車輪走行路，超高強度繊維補強コンクリート，脱線，衝撃，逸脱防止装置

Keywords : track runway, ultra-high strength fiber reinforced concrete, derailment, impact, vehicle guide device

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。本研究ではこの内，脱線後の車輪走行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，車輪走行路のうち，締結装置部分は箱抜き構造としている。この車輪走行路は，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の一種であるダクタル(Ductal)により構築することが検討されている。ダクタルに関しては既に，供試体を用いた耐久性・耐衝撃性能に関する報告がなされているが²⁾，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，車輪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，適切な耐荷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³⁾。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⁴⁾⁵⁾。

以上より本研究では，研究の目的を次のように定めた。

- (1)地震時に車輪と車輪走行路との間で生じる衝撃的な接触力に関して，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荷力を静的及び衝撃実験により評価する。
- (2)地震時に車輪と車輪走行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，接触剛性を評価する。

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。高

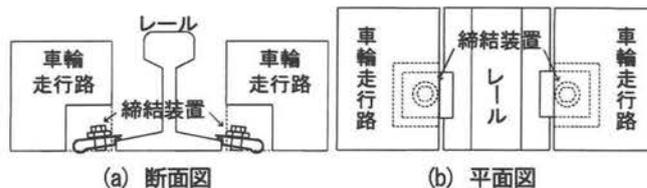


図-1 車輪走行路の概略図

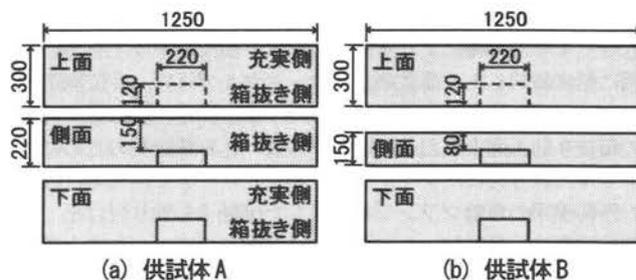


図-2 供試体一覧(単位:mm)

表-1 供試体の材料諸元

圧縮強度(N/mm ²)	196.3
引張強度(N/mm ²)	10.6
弾性係数(×10 ⁴ N/mm ²)	5.07

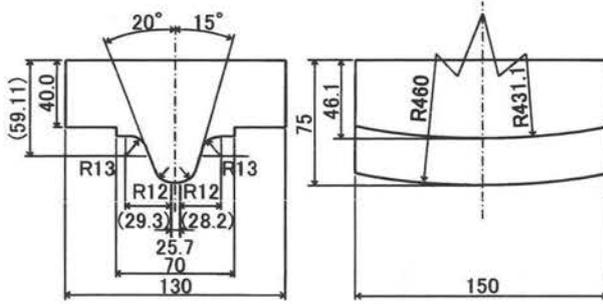


図-3 接触子形状寸法 (単位: mm)

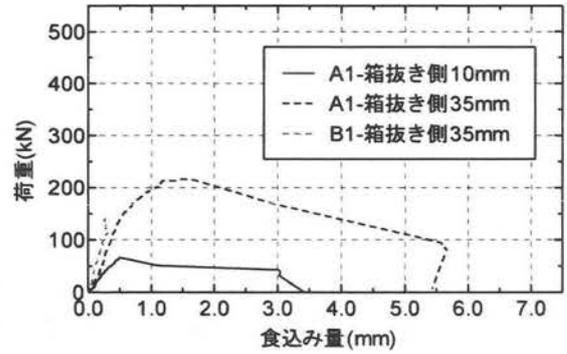


図-8 箱抜き側載荷の荷重と食込み量の関係

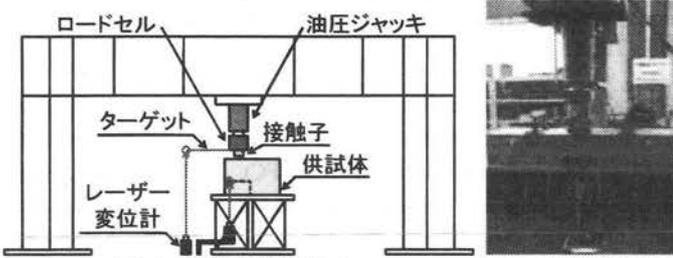


図-4 静的載荷試験図

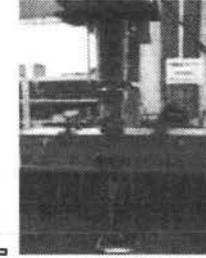


図-5 静的試験状況

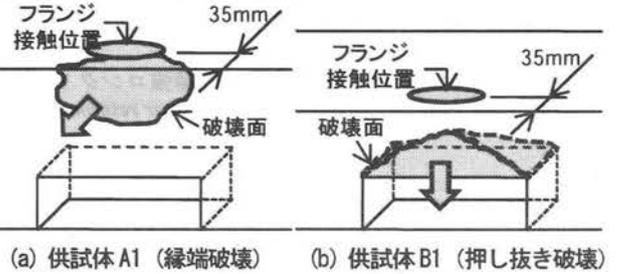
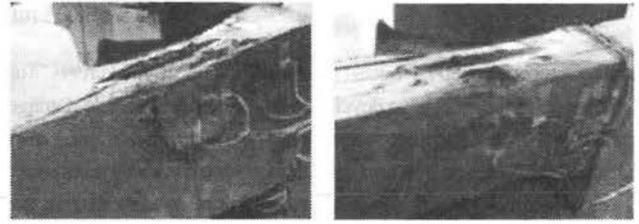


図-9 箱抜き側縁端から 35mm 載荷での破壊状況

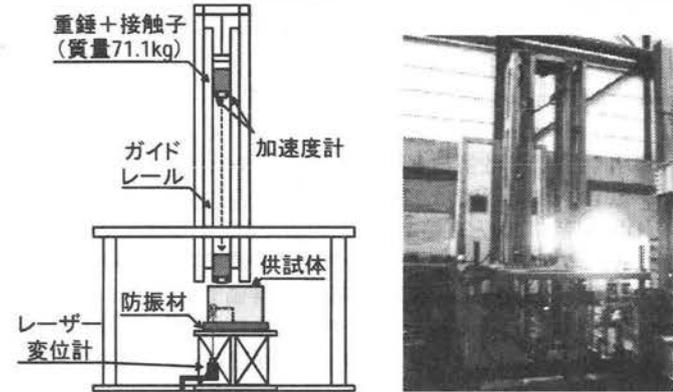


図-6 衝撃載荷試験図

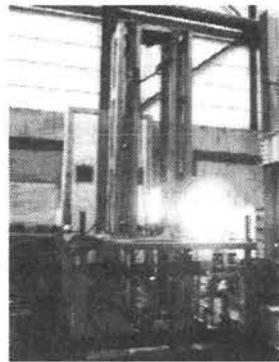


図-7 衝撃試験状況

さが 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、高さ 150mm の供試体 B を製作した。静的載荷試験で用いた供試体を A1, B1, 衝撃載荷試験で用いた試験体を 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実験を行った。

2.2 静的実験

図-4 に静的載荷試験図を、図-5 に試験状況を示す。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および接触子の食い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用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箱抜き側から 35mm, 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。

2.3 衝撃実験

図-6 に衝撃載荷試験図を、図-7 に試験状況を示す。本載荷試験では、重錘 (直径 20cm, 高さ 25cm, 加速度計内臓) に静的載荷試験と同様の接触子を取り付けた。

接触子を取り付けた状態での重錘質量は 71.1kg であった。重錘は載荷試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。落下位置およ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 の場合は箱抜き側縁端から 35mm の位置に落下高さ 250mm, 250mm, 500mm, 500mm, 750mm, 1000mm の計 6 ケースを繰り返し載荷した。供試体 B2 の場合は箱抜き側縁端から 35mm の位置に、落下高さ 100mm, 250mm, 500mm, 750mm, 1000mm, 1500mm, 2000mm の計 7 ケースを繰り返し載荷した。

衝撃力は、加速度計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載荷試験と同様であるが、剛な接触子を取り付けた重錘と剛なダクトル供試体が衝突した際の作用時間を調整する目的で、供試体の下に防振材を 4 枚敷設した。防振材には Getzner 社の SYLODYN (材質: 発砲ポリウレタン) を用いた。

3. 実験結果

3.1 静的実験

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 の位置での載荷における荷重と接触子の食い込み量の関係を示す。図-9 に載荷終了時の破

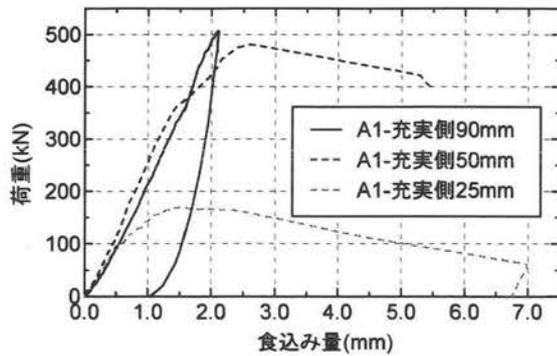


図-10 充実側載荷での荷重と食込み量の関係

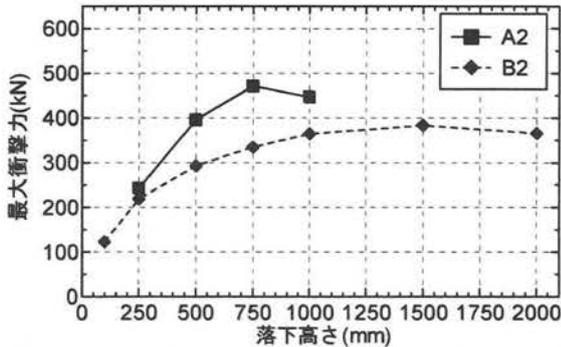
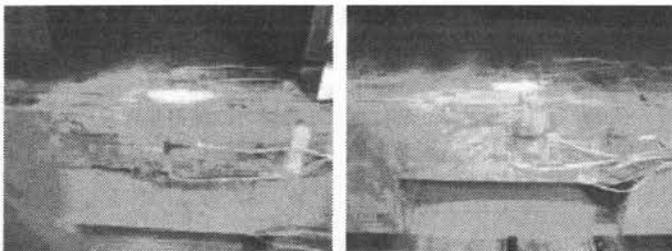


図-11 最大衝撃力と落下高さの関係



(a) 供試体 A2 (b) 供試体 B2

図-12 載荷終了時の破壊状況

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て、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、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、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 の位置での載荷結果を示す。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、90mm の場合はロードセルの測定

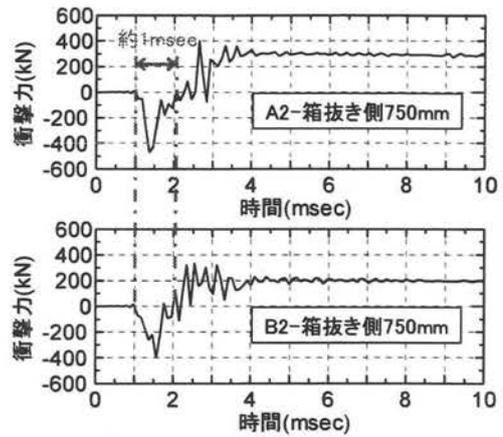


図-13 供試体 A2 及び B2 の衝撃力波形 (落下高さ 750mm)

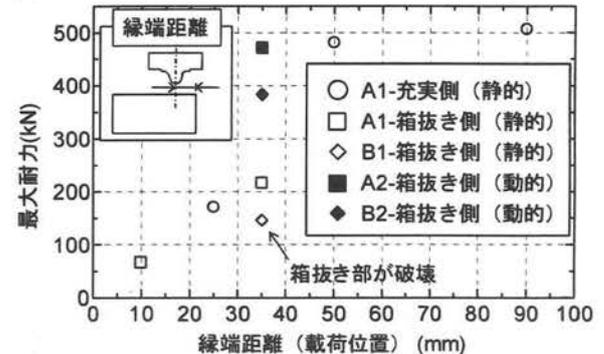


図-14 縁端距離 (載荷位置) と最大耐力の関係

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。

3.2 衝撃実験

図-11 に供試体 A2 及び供試体 B2 の重錘落下試験の最大衝撃力と落下高さの関係を示す。図-12 に載荷終了時の破壊状況を示す。

図-11 から供試体 A2 は、落下高さ 750mm で、最大衝撃力 471kN を記録した。この時点で静的実験に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-12(a) に示すように、静的載荷である供試体 A1-箱抜き側 35mm の静的実験と同様の縁端破壊であった。

図-11 から供試体 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-12(b) に示すように静的載荷である供試体 B1-箱抜き側 35mm の静的実験と同様の押し抜き破壊であった。

図-13 に供試体 A2 及び供試体 B2 の落下高さ 750mm の衝撃力波形を示す。どちらの衝撃力波形も、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。本実験における作用時間はいずれも 1msec 前後であった。

3.3 耐荷力評価

図-14 に縁端距離 (載荷位置) と耐荷力の関係を示す。図から、縁端距離が縁端破壊の耐力に及ぼす影響を定量的に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遊間により定まるが、予想衝撃力と同図から求まる耐荷力を指標にすれば定量的にその限界を設定することができる。静的実験の耐力と衝撃実験の耐力の間には 2.5 倍程度の開きがあ

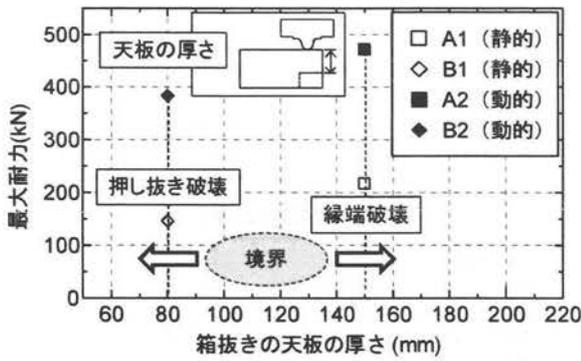


図-15 箱抜き部天板厚さと最大耐力の関係

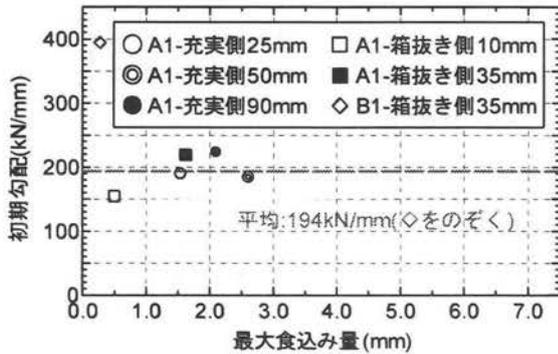


図-16 車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配の関係 (長手方向)

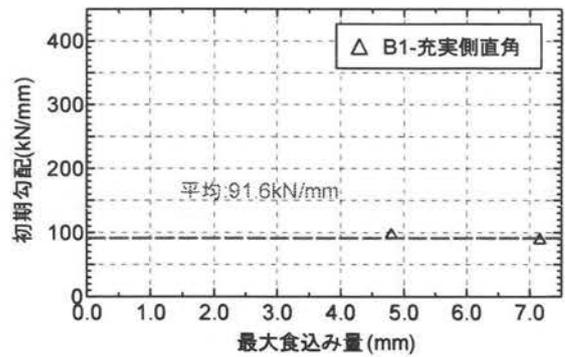


図-17 車輪先端の食込み量と弾性域における初期勾配の関係 (直角方向)

る。耐力は、実際には載荷速度に依存することとなるが、1msec～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 B1 静的実験 35mm と B2 衝撃実験 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-15 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 80～150mm の間に存在すると考えられる。

3.4 接触力評価

図-16 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する。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-17 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。車輪走行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)地震時に車輪と車輪走行路との間で生じる衝撃的な接触力に関して、縁端距離と耐荷力の関係を定量的に示した。例えば、縁端距離 35mm のそれは約 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 80～150mm の間に存在すると考えられる。
- (3)衝撃実験の耐力は静的実験の耐力の 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する。

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 一変位制限、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) 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、土木学会、No.11、pp.69-74、2007。
- 4) 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。
- 5) Dan Brabie, Journal of System Design and Dynamics, Vol.1, No.3, pp.468-480, 2007。