鉄道車輪と PC まくらぎの接触力に関する研究

後藤 恵一* 曽我部 正道 浅沼 潔(鉄道総合技術研究所)

Study on Evaluation of Contact Force between a Train Wheel and a PC Sleeper Keiichi Goto^{*}, Masamichi Sogabe, Kiyoshi Asanuma (Railway Technical Research Institute)

In order to evaluate contact force between a train wheel and a PC sleeper when a railway vehicle running on ballasted track is derailed by a large-scale earthquake, the authors carried out falling-weight impact experiments using a contact shoe to simulate the Sinkansen wheel shape and numerical analysis with three-dimensional elasto-plastic finite element method (FEM) and compared analytical results with experimental results. In this study, we showed there is possibility that numerical analysis simulate accurately the experimental results by selecting appropriate material characterizations, material constitutive model and yield criterion.

キーワード:脱線,鉄道車輪, PC まくらぎ, 衝撃力, 有限要素法 (Derailment, Train wheel, PC sleeper, Impact force, Finite Element Method)

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。しか しながら、これまでに高速走行する車輪と軌道部材の衝突, 特にコンクリート部材との接触モデルに関する知見はほと んど得られていない現状にある。

よって本研究では、高速走行する車輪とまくらぎの間で 生じる接触力を精度良く表現可能な解析手法の確立を目的 として、車輪型接触子を用いた PC まくらぎの衝撃載荷実験 及びその数値シミュレーションを実施し、実験結果と比較 することで解析精度を検証するととともに、更なる解析精 度向上策について検討した。

2. 検討方法

〈2・1〉実験による検討方法

(1) PC まくらぎ及び接触子 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。PC まくらぎに使用したコンクリートの圧縮強度は 65.9MPa, PC まくらぎ 1 体当りの質量は約 318kg である。

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 いて衝撃載荷実験を行った。

(2)実験方法 図3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,



図3 衝撃載荷実験状況

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に示すようにまくらぎ長手方 向及び直角方向の中央とした。重錘の落下高さは,100mm, 250mm,500mm,750mm,1000mm,1500mm,2000mm と して,載荷位置は変えずに1回ずつ繰り返し漸増載荷した。

(3)計測方法 衝撃載荷における測定項目は衝撃力で あり重錘内部に埋め込まれた加速度計出力に重錘質量を乗 解析モデルは, PC まくらぎのコンクリート及び PC 鋼棒, 重錘, 跳ね上がり防止用の押さえ金具, PC まくらぎ底面に 配置された剛体平面から構成される。PC まくらぎ及び接触 子はそれぞれ図 1, 図 2 に示す寸法を再現したモデルとなっ ている。コンクリート要素, 重錘要素, 押さえ金具要素は 8 節点固体要素, PC 鋼棒は梁要素を用いてモデル化を行い, 要素積分点に関しては全て 1 点積分とした。

図4に数値解析モデルを示す。

(1)数値解析モデル

要素分割に関しては,解析時間の短縮のため構造の対称 性を考慮した 1/4 モデルとした。解析モデルの総節点数は 67873,総要素数は 60990 である。

境界条件に関しては,モデルの対称境界は面対称,重錘 要素は鉛直方向以外の自由度を拘束した。押さえ金具要素 に関しては剛体として空間に固定した。また,各構成要素 間には面と面との接触を定義しており,リバウンドを表現 可能なモデルとした。摩擦については考慮しておらず,PC まくらぎのコンクリート要素と PC 鋼棒要素は完全付着と 仮定した。

解析パラメータである重錘の落下高さに関しては,エネ ルギー的に等価な衝突速度に置き換えて,あらかじめ衝突 位置に配置した重錘要素の全節点に初速度として与えた。

(2) 材料物性モデル 表1に本解析で用いた材料定数 の一覧を示す。また,図5に本解析で用いた材料モデルを 示す。

図 5(a)にコンクリート要素に関する相当応力-相当ひず みの関係を示す。圧縮側に関しては、圧縮強度 f'eを降伏応 力とする完全塑性型とし、引張側に関しては、引張強度 fi に達した段階で引張力を伝達しないモデルとした。ここで の引張強度は圧縮強度の 1/10 と仮定した⁽⁶⁾。

図 5(b)に PC 鋼棒要素に関する相当応力-相当ひずみの関係を示す。PC 鋼棒要素に関しては、塑性硬化係数 H'を弾性係数 E_sの 1/100 とするバイリニア型の等方弾塑性体とした。

重錘要素に関しては,実験時終了時に変形が見られなかったことから弾性体としてモデル化した。また,重錘要素の密度は重錘質量 71.1kg を重錘要素の総体積で除した値と

材料	密度 (g/cm ³)	弹性係数 (GPa)	ポアソン 比
コンクリート	2.39	38.4	0.167
PC 鋼棒	7.85	205.0	0.300
重錘	8.38	205.0	0.300
押さえ金具	7.85	205.0	0.300

1000

表1 本解析で用いた材料定数の一覧



した。

なお、コンクリート要素及び PC 鋼棒要素の降伏条件は von Mises の降伏条件に従うものとした。また、ひずみ速度 効果の影響については、本実験の範囲内では解析結果の応 答性状に与える影響は小さいと判断し、本解析では考慮し ていない。

3. 検討結果

(3.1)実験結果と解析結果の比較 図6に重錘衝撃力 波形の例を実験結果と解析結果を比較する形で示してい る。縦軸には重錘衝撃力値を,横軸には時間を重錘衝突時 点を零として整理している。図中,薄い実線により実験結 果を,濃い実線により解析結果を示している。

図より,実験結果の衝撃力波形は重錘衝突開始後に鋭く 立ち上がり,継続時間が 1msec 前後の正弦半波波形が 2 波 もしくは 3 波励起していることが確認できる。この2・3 波 目については,まくらぎ底面の凹凸の影響により重錘衝突 後に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である。そこ





図6 重錘衝撃力波形



で、実験結果の衝撃力波形に関しては 1 波目だけに着目す ることとする。

解析結果はまくらぎ底面の凹凸の影響を加味していない ため正弦半波が1 波のみが生じている。この波形は実験結 果に比べて衝撃力の立ち上がりが鈍く,それに伴い最大重 錘衝撃力発生時間も遅れていることが確認できる。また, 継続時間も約1.8msecと実験結果に比べ2倍程度長くなって いる。

図7には最大重錘衝撃力と落下高さの関係を示している。 図より,落下高さが大きくなるにつれて最大重錘衝撃力が 増加する傾向は実験結果と解析結果は同様であるが,各落 下高さの最大重錘衝撃力に関しては,解析結果は実験結果 の約半分程度と大きな差が生じていることが分かる。即ち, 本解析結果は,車輪とPCまくらぎ間で発生する接触力に関 しては十分に再現できたとは言い難い。

(3・2)解析精度向上策の検討 上記の実験結果と解析結 果の差異について考察を行う。図 8 に車輪型接触子を用い た PC まくらぎの静的載荷実験結果⁽⁶⁾とその解析結果を示 す。縦軸は実験結果ではロードセルにより測定した荷重, 解析結果では強制変位を与えた節点反力の合計値である。 横軸は入力変位である。

この図より,実験結果については変位が増加するにつれ て荷重が二次曲線的に増加していることが分かる。一方, 解析結果については載荷開始~1.0mm 程度までは実験結果 とほぼ同等の勾配を有しているが,その後の荷重増加割合 は実験結果に比べて小さく,荷重と変位の関係が線形関係 にある。これは,本解析モデルにおいて早い段階でコンク リート要素に発生する応力が圧縮強度に達して荷重に対し て抵抗できなくなっているものと考える。

上記考察に関して,図8の実験結果の荷重と変位の関係 から最大荷重点付近を通るようにコンクリート要素の圧縮 強度を調整(3.5倍)した解析結果を図6,図7に示す。図 6の衝撃力波形に関しては荷重の立ち上がり及び衝撃力継 続時間が改善され、実験結果に近づいていることが確認で きる。また、図7の最大重錘衝撃力に関しても実験結果を 十分に再現できていることが分かる。

本解析では静的載荷実験の最大荷重点を通るように簡易



図8 静的載荷実験における荷重と変位の関係

にコンクリート要素の圧縮強度を調整したが,静的載荷実 験の荷重-変位関係をトレースできる適切なコンクリート の材料特性,材料構成則,降伏条件を選択・組み合わせる ことで,さらに精度良く実験で得られる衝撃力波形を再現 可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究では,車輪型接触子を用いた PC まくらぎの衝撃載 荷実験について数値シミュレーションを実施した。得られ た結果は以下の通りである。

- ・本数値解析により得られた重錘衝撃力波形は、実験結果 と比べて最大値及び継続時間が大きく異なっていること から、車輪と PC まくらぎ間で発生する接触力に関して十 分に再現できたとは言い難い。
- ・数値解析モデルのコンクリートの圧縮強度を 3.5 倍とすると衝撃力の立ち上がり及び継続時間が改善され、最大重錘衝撃力についても十分に再現できる。
- ・静的載荷実験の荷重-変位関係をトレースできる適切な コンクリートの材料特性,材料構成則,降伏条件を選択・ 組み合わせることで、実験で得られる衝撃力波形をさら に精度良く再現可能であると考えられる。

文 献

- (1) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準,同解說一変位制限, 丸善(2006)
- (2) 土木学会・第二次調査団:平成16年新潟中越地震 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」、1報告・提言 編 (2004)
- (3) 浅沼潔・曽我部正道・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 pp.27-32 (2009)
- (4) 曽我部正道・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)
- (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)後藤恵一・曽我部正道・浅沼潔・渡辺勉:「鉄道車輪とPCまくらぎの接触力に関する基礎的研究」、コンクリート工学年次論文集、 Vol.32, No.2 pp.769-774 (2010)