

論文 鉄道車輪とまくらぎ間で発生する接触力に関する研究

後藤 恵一^{*1}・曾我部 正道^{*2}・浅沼 潔^{*3}

要旨：本論文は、脱線した鉄道車両の車輪とまくらぎが衝突した際に生じる接触力を精度良く評価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 まくらぎの衝撃実験を行い、併せてその数値シミュレーションを実施したものである。実験結果と解析結果の比較により、最大衝撃力や衝撃力継続時間に倍半分程度の差があることが分かった。また、解析結果に影響を与えと考えられる各種材料物性モデルについて検討を行った結果、コンクリートの圧縮強度を簡易に 3 倍と仮定することで、衝撃力波形をある程度を再現できることが分かった。

キーワード：脱線、鉄道車輪、まくらぎ、コンクリート、衝撃力、有限要素法、材料物性モデル

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 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^{5),6)}。

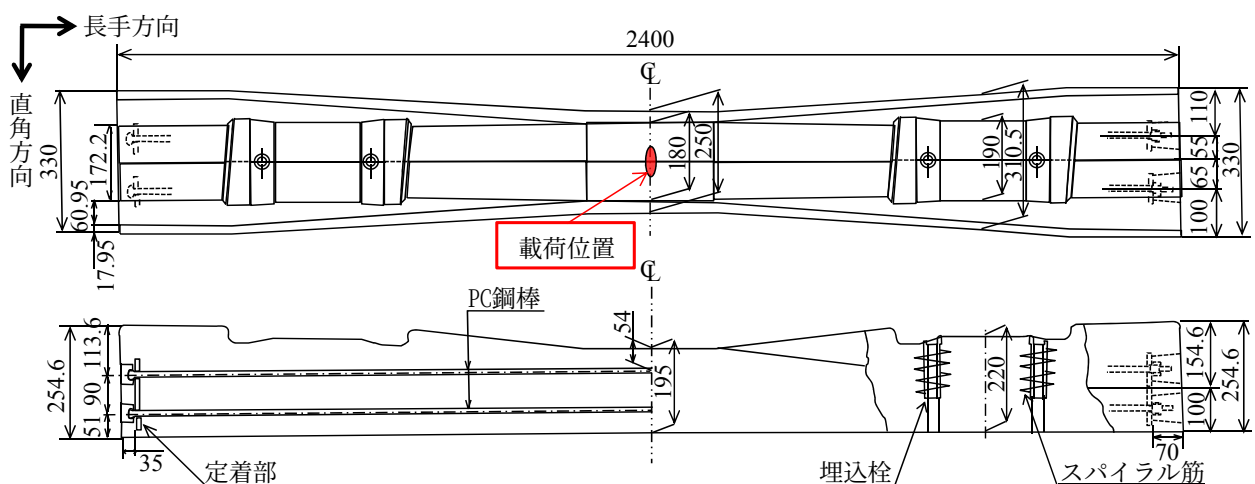


図-1 PC まくらぎの形状寸法 (単位: mm)

*1 (公財) 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 (公財) 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 (公財) 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)

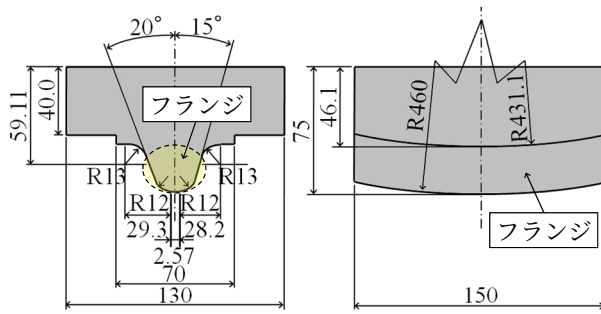


図-2 接触子の形状寸法（単位：mm）

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

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もに、更なる解析精度向上のために解析結果に影響を与えると考えられる各種材料物性モデルについて検討を行った。

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。表-1、表-2 に PC まくらぎに使用されたコンクリート及び PC 鋼棒の材料諸元を示す。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⁷⁾、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、これを用いて衝撃実験を実施した。

(2) 実験方法

図-3 に衝撃試験機を示す。本実験は、重錘 (直径 20cm, 高さ 25cm, 加速度計内蔵) に上述した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、電磁石を用いて所定の高さまで吊り上げた後、载荷試験機に取り付けてあるガイドレールに沿って自由落

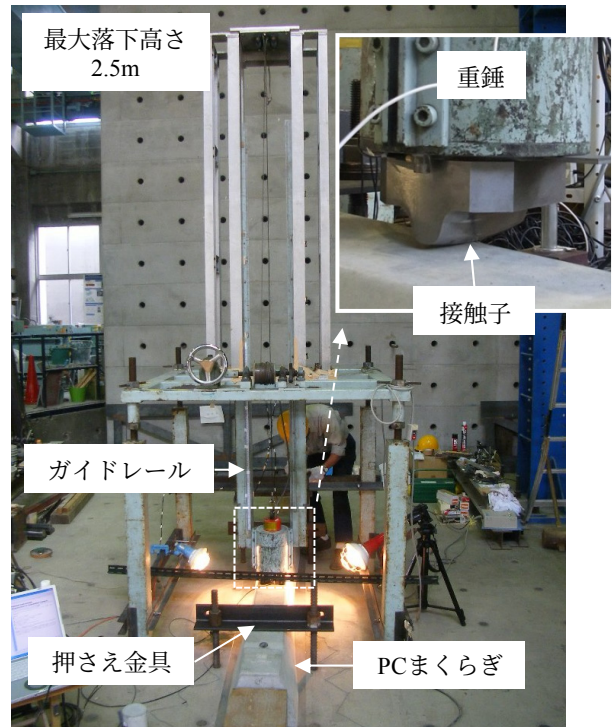


図-3 衝撃試験機

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長手方向に 2 箇所固定した。

落下位置に関しては、図-1 に示す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 ~ 2000mm 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。なお、一部の落下高さについては単一载荷も実施したが、測定された衝撃力に大きな差は見られなかった。

(3) 測定方法

本実験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, 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。

2.2 数値解析による検討方法

数値解析による検討には、陽解法に基づく非線形構造解析用汎用解析コード LS-DYNA(ver.971)⁸⁾を用いた。

(1) 数値解析モデル

図-4 に数値解析モデルを示す。本解析モデルは、PC まくらぎを構成するコンクリート及び PC 鋼棒、さらに重錘、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なる。PC まくらぎ及び接触子はそれぞれ図-1、図-2 に示す形状寸法を再現したモデルとなっている。また、コンクリート要素、重錘要素、

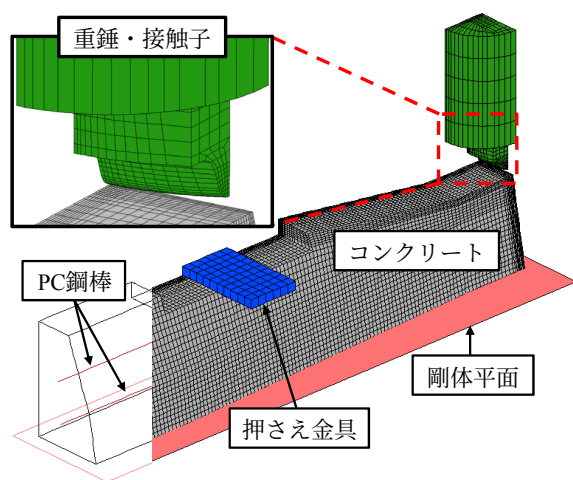


図-4 数値解析モデル (1/4 モデル)

押さえ金具要素は8節点固体要素で、PC 鋼棒は梁要素を用いてモデル化を行った。要素積分点に関しては固体要素が1点積分、梁要素が4点積分である。

要素分割に関しては、解析時間の短縮を図るため構造の対称性を考慮した 1/4 モデルとし、載荷点近傍のメッシュサイズを他の部分よりも細かくした。本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对称、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なっている。この時、各接触要素間の摩擦については考慮していない。コンクリート要素と PC 鋼棒要素の節点については完全付着を仮定した。

本解析は、重錘が PC まくらぎに衝突した時点から開始するものとし、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。ここで、実験では漸増載荷と単一載荷における衝撃力の差を確認できなかったため、載荷条件による影響は小さいものと判断し、解析では単一載荷条件とした。解析時間は、重錘が PC まくらぎと衝突した後に跳ね上がり、完全に非接触となる 5msec 間とした。減衰については考慮していない。

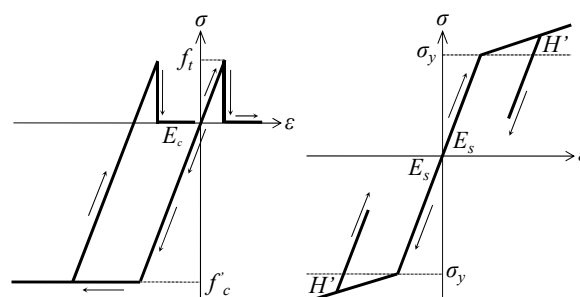
(2) 材料物性モデル

表-3 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 σ —相当ひずみ ε の関係を示す。圧縮側に関しては、圧縮強度 f'_c を降伏応力とする完全弾塑性のバイリニア型とし、引張側に関しては、引張強度 f_t に達した段階で引張力を伝達しないカットオフモデルとした。ここでの引張強度は圧縮強度の 1/10 と仮定した⁷⁾。

表-3 本解析で用いた材料定数一覧

材料	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (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



(a) コンクリート要素 (b) PC 鋼棒要素

図-5 本解析で用いた材料モデル

図-5 (b)に PC 鋼棒要素に関する相当応力 σ —相当ひずみ ε 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。また、落下高さが増すにつれて、1 波目以降の波の発生時間が早くなり、落下高さが 1000mm の場合においては、1 波目の成分が零になる前に 2 波目が発生している。これら 1 波目以降の成分については、まくらぎ製造時の仕上げ等に起因する底面の凹凸の影響により生じたものである。この凹凸により、まくらぎと反力床の間に若干の隙間が生じ、この隙間の存在により重錘衝突時に一瞬まくらぎがたわみ、鉛直下向きの加速度を持ち続けた重錘と再衝

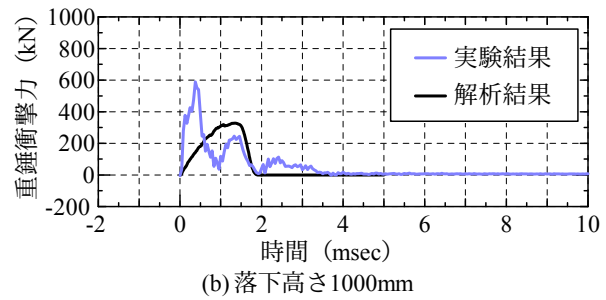
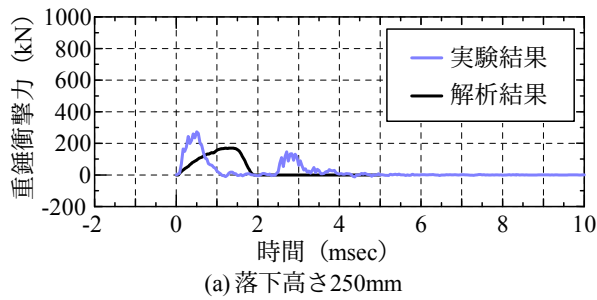


図-6 重錘衝撃力波形の例

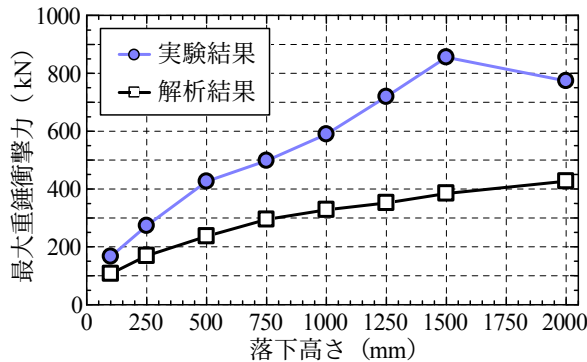


図-7 最大重錘衝撃力と落下高さの関係

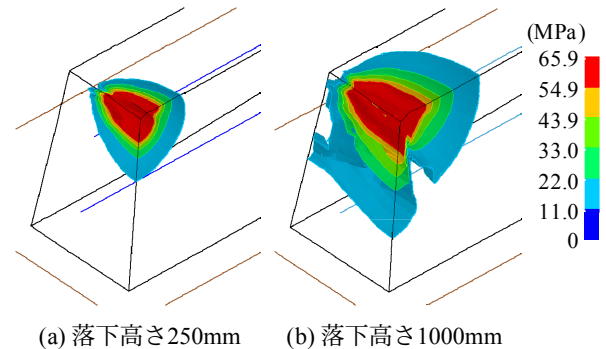


図-8 コンクリート要素の相当応力のコンター図

突することで2波目、3波目が立ち上がる。そこで、実験結果の衝撃力波形に関しては1波目だけに注目することとする。

一方、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波形が1波のみ生じている。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くなっていることが確認できる。また、衝撃力継続時間も約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であることが分かる。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えない。

3.2 解析精度向上策の検討

(1) 実験結果と解析結果の差異についての考察

ここではまず、前節の実験結果と解析結果の差異について考察を行う。図-8に落下高さ250mm及び1000mmの場合におけるコンクリート要素の相当応力のコンター図を示す。本コンター図は、各落下高さにおいて最大衝撃力が生じる約1.3msec時の表示であり、コンター図で赤く囲まれている箇所は、その要素が圧縮強度に達して降伏したか、その付近まで応力が上昇している範囲を示している。この図から、重錘の落下高さが増しても鉛直

方向（重錘の落下方向）には降伏応力近辺まで応力が上昇した要素の範囲はほとんど広がっておらず、接触子に沿ってまくらぎ直角方向に広がっている様子のみが確認できる。これは、载荷点近傍の要素のみが圧縮力を受けて変形し続け、まくらぎ全体として重錘衝撃力に抵抗できていない可能性があることを示している。

そこで上記を、衝撃実験と同様の車輪型接触子を用いて著者らが過去に実施したPCまくらぎの静的実験⁹⁾と照らし合わせ確認する。図-9に静的実験で得られた荷重と変位の関係を示す。横軸の変位は接触子がまくらぎ上面に接した時点を零としており、この変位はそのまま接触子がまくらぎに食い込んだ量と置き換えることができる。また、縦軸の荷重は接触子をまくらぎに押し付けた際の反力をロードセルによって測定したものである。さらに、この図には解析結果も併せて示している。この解析は衝撃解析と同様の解析モデル・材料物性モデルを用いて、重錘の全節点に与えていた初速度の代わりに、重錘上部の全節点に強制変位を与えて実施したものである。荷重は強制変位を与えた重錘上部の全節点の鉛直反力を合計して算出した。

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関数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载荷開始～1.5mm程度までは実験結果とほぼ同等の勾配を有しているが、その後の変位に対する荷重増加割合が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。これは前述したように、

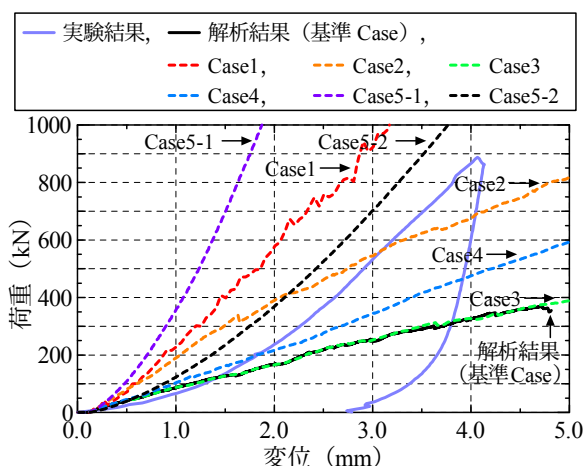


図-9 静的実験における荷重と変位の関係

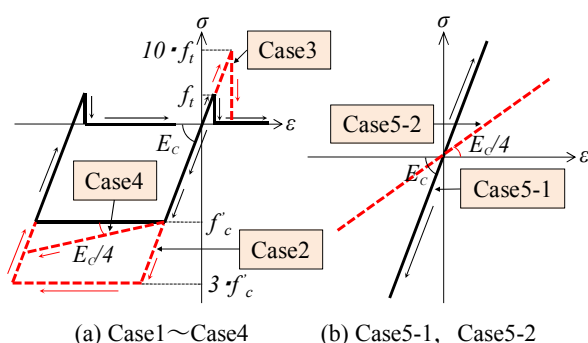


図-10 検討材料物性モデルの概念図

本解析モデルにおいては、早い段階で載荷点近傍のコンクリート要素の応力が圧縮強度に達して、荷重に対して抵抗できないためであると考えられる。また、荷重が線形的に増加するのは、変位が増加するにつれて接触子がまくらぎに接触する面積が増加するためである。

(2)各種材料物性モデルによる検討

前項の考察により、本解析で用いたコンクリート要素の材料物性モデルでは、本実験のように圧縮場が卓越する場合の衝撃力波形及び荷重－変位関係を表現することは難しいと考えられる。しかしながら、本解析で用いたコンクリート要素の材料物性モデルを変更し、静的実験の荷重－変位関係を表現可能な材料物性モデルとした場合には衝撃実験における衝撃力波形の再現も可能になると思われる。よって、ここでは静的実験の荷重－変位関係を表現可能なコンクリート要素の材料物性モデルについて検討するために、降伏条件式や材料構成則、材料定数について解析結果に与える影響を検討した。

検討を実施した項目を表-4 にまとめて示す。基準 Case はこれまで使用した表-3 及び図-5 に示す材料物性モデル、Case1 は降伏条件式を von Mises 型からコンクリートに対して用いられることが多い Drucker-Prager 型に変更したもの、Case2～Case4 は図-10 (a)に示すように材料定数及び材料構成則の影響を検討したもの、さら

表-4 検討材料物性モデル一覧

検討ケース	【変更点】(上段) 詳細 (下段)
基準 Case	【これまでの材料物性モデル】 表-3, 図-5 (a)
Case1	【降伏条件式】 Von Mises → Drucker-Prager
Case2	【圧縮強度】 65.9MPa → 197.7MPa (3 倍)
Case3	【引張強度】 6.59MPa → 65.9MPa (10 倍)
Case4	【圧縮側降伏後の履歴】 完全弾塑性 → 降伏後 E/100 で硬化
Case5-1	【弾性体】 塑性化を考慮しない弾性体モデル
Case5-2	【弾性係数】 Case5-1 の弾性係数を $E \rightarrow E/4$

に参考として Case5-1 は図-10 (b)に示すようにコンクリート要素を弾性体としたもの、Case5-2 は Case5-1 に対して弾性係数の影響を検討したものである。

図-9 に各検討 Case による解析結果を示している。図より、Case1～Case4 については傾きが変化しているものの、基準 Case と同様に荷重－変位関係が線形関係にあることが分かる。また、引張強度の影響を検討した Case3 については基準 Case と大差は見られない。次に、コンクリート要素を弾性体とした Case5 についてはその他のケースとは異なり、荷重が変位に対して二次関数的に増加していることが確認できる。さらに弾性係数の影響を検討した Case5-2 については実験結果に近い荷重－変位関係を有していることが分かる。

以上より、荷重－変位関係に影響を与える支配的要因が圧縮強度 (降伏条件式を含む)、弾性係数、又は両者の複合であることが予想される。本解析で使用したこれらの材料定数は、円柱供試体の一軸圧縮試験により求めた値であり、本実験のように圧縮場が卓越し、かつ接触子とまくらぎが局所的に接触する場合では、材料試験により得られた圧縮強度と弾性係数をそのまま解析に使用できない可能性がある。この点については、現在明確な知見が得られていないため、今後の課題としたい。

上記の検討結果を踏まえ、図-11, 図-12 にコンクリートの圧縮強度を 3 倍にした材料物性モデルである Case2 を用いて、再度、衝撃実験の数値シミュレーションを実施した結果を示す。ここでは、材料物性モデルを弾性体とした場合、重錘衝突時のまくらぎの塑性変形等を算出することができないことから本研究では除外し、静的実験の最大変位である約 4mm 時に発生した荷重に最も近く、かつ圧縮強度という 1 つパラメータを変更するのみで簡易に材料物性モデルを変更可能であることから Case2 を選択した。

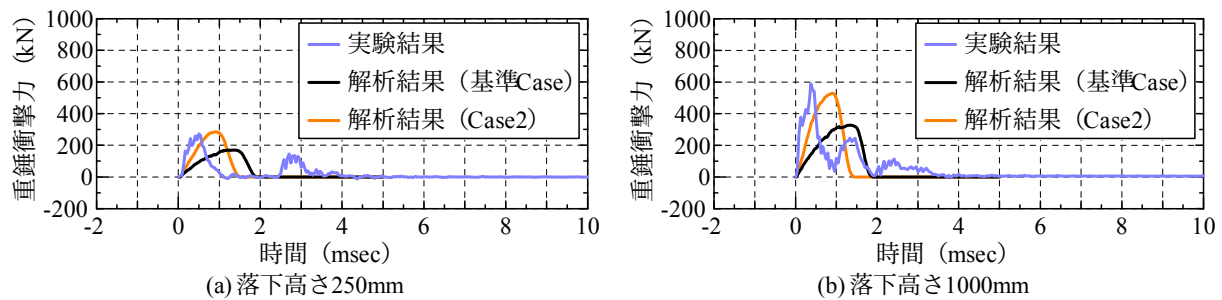


図-11 実験結果と材料物性モデルを変更した解析結果の重錘衝撃力波形の比較

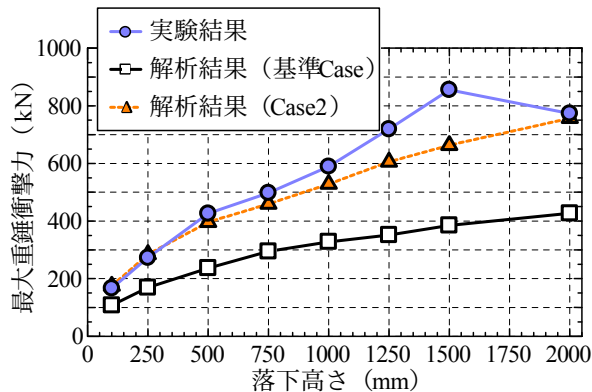


図-12 最大重錘衝撃力と落下高さの関係

この図より、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、最大重錘衝撃力についても各落下高さについてある程度実験結果を再現できていることが分かる。

4. まとめ

本研究では、脱線した鉄道車両の車輪とまくらぎが衝突した際に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 まくらぎの衝撃実験を実施するとともに、その数値シミュレーションを実施した。さらに、解析結果に影響を与えると考えられる各種材料物性モデルについて検討を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 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衝撃力は約半分程度小さく、衝撃力継続時間は 2 倍程度長くなる結果となった。
- (2) 実験と解析の差異を考察した結果、本解析に用いた材料物性モデルでは載荷点近傍の要素のみが降伏し、まくらぎ全体として荷重に抵抗できていない可能性があることが分かった。
- (3) 静的実験の荷重－変位関係と比較する形で解析モデルの各種材料物性モデルの影響について検討した結果、コンクリートの圧縮強度を簡易に 3 倍にすることで重錘衝撃力波形をある程度再現可能であ

ることが分かった。

今後は静的実験の荷重－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、降伏条件式についてさらに検討するとともに、重錘衝撃力波形のみではなく、重錘の跳ね上がり量や接触子のまくらぎへの食い込み量を指標とした数値解析の検証を進めていく予定である。

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：I 報告・提言編，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「調査と緊急提言」，2004.10
- 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，pp.27-32，2009.2
- 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) 後藤恵一，曾我部正道，渡辺 勉，浅沼 潔，小尾博俊：鉄道車輪と走行案内路の接触力に関する研究，鉄道力学論文集，No.13，pp.62-69，2009.7
- 6) 相川 明：高速回転車輪とまくらぎとの衝撃挙動に関する不連続変形法解析，理論応用力学講演会論文集，Vol.58，pp.299-300，2009.6
- 7) 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
- 8) John O.Hallquist: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, Mar.2006
- 9) 後藤恵一，曾我部正道，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，No2，pp.769-774，2010.7