

(25) 鉄道車両逸脱防止壁に作用する衝撃力に関する基礎的考察

A fundamental study on the impact force to the derailment stopper

深澤 仁*, 園田佳巨**, 曾我部正道***
Jin Fukazawa, Yoshimi Sonoda, Masamichi Sogabe

*九州大学大学院修士課程学生, 工学府建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

**工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1)

***博士(工学), 鉄道総合技術研究所, 鉄道力学研究部構造力学研究室 (〒185-8540 東京都国分寺市光長 2-8-38)

キーワード: 鉄道車両, 逸脱防止壁, 衝撃力
(rail vehicle, derailment stopper, impact force)

1. 緒言

不測の事態によって生じる可能性がある鉄道車両の脱線事故に対して, その被害を最小に抑えるための手段の一つとして, レール外側に鉄筋コンクリート製の逸脱防止壁を設ける工法がある. 本装置を用いて鉄道車両の逸脱を防止し, 円滑に車両の進行方向を修正・誘導するためには, 鉄道車両の衝突時の挙動を熟知するとともに, 逸脱防止壁の耐衝撃性能を正確に把握することが重要である. これまで重錘落下実験や数値解析^{1), 2)}を主体とした研究などにより, 鉄筋コンクリート構造物の衝撃挙動に関する研究成果は数多く報告されているが³⁾, 鉄道車輪のように回転しながら衝突する物体による衝撃を受ける構造物の挙動に関する研究は殆ど見受けられない.

本研究は, 脱線した鉄道車両の車輪が鉄筋コンクリート製逸脱防止壁に衝突した場合に生じる衝撃力や衝突箇所の変位を把握するために, 3次元弾塑性有限要素解析による数値シミュレーションを試みたもので, 逸脱防止

壁の耐衝撃設計法の確立を目的とした基礎的考察を行った.

2. 解析モデルの概要

2.1 解析条件

図-1に解析モデル全体図を示す. 車体, 台車, 車軸, 車輪の重量は, それぞれ実車重量値を参考にして決定し, 各重量をそれぞれの部位における重心位置に鉛直集中荷重として入力した. なお, 衝突解析の精度を向上させるために衝突車輪と逸脱防止壁については, 詳細な要素分割を行い, その自重は各要素に対して物体力として与えた. 逸脱防止壁内の鉄筋にはトラス要素を用い, それ以外の列車車両部分と逸脱防止壁内コンクリート領域には8積分点を有するソリッド要素を用いた. 図-2に逸脱防止壁モデルを示す. 逸脱防止壁は, 高さ420mm, 幅200mm, 長さ5000mmの寸法を有する鉄筋コンクリート構造とした. 図-3に衝突車輪モデルを示す. 衝突車輪は実物の車

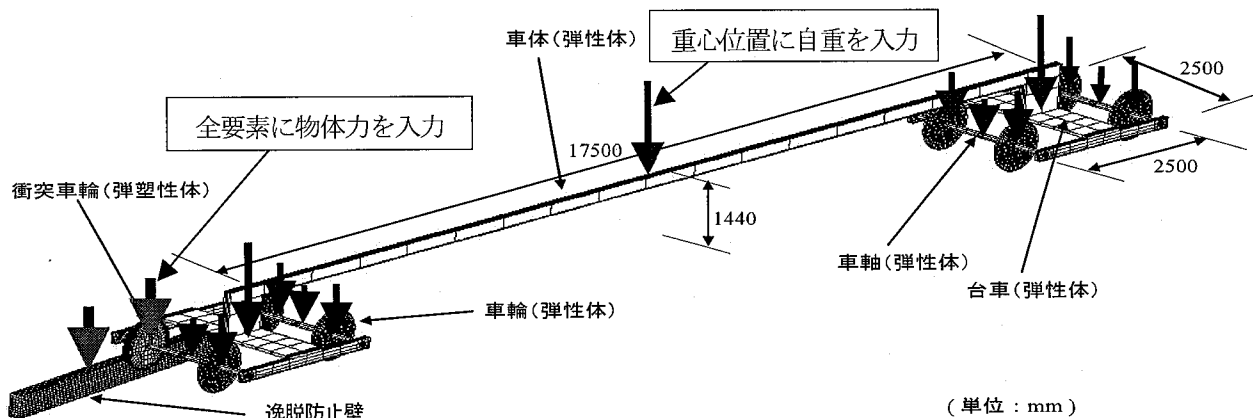


図-1 解析モデル全体図

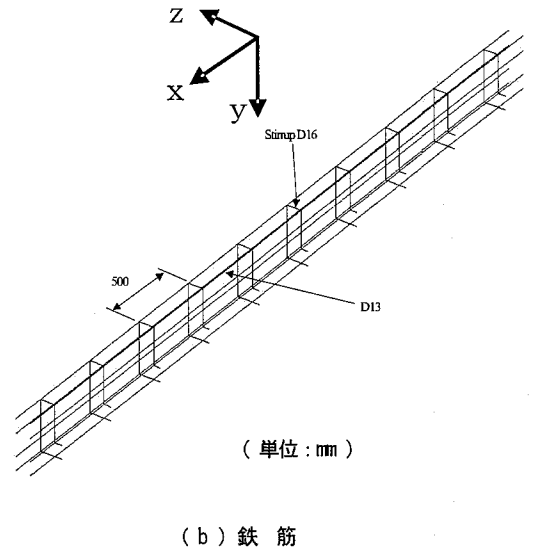
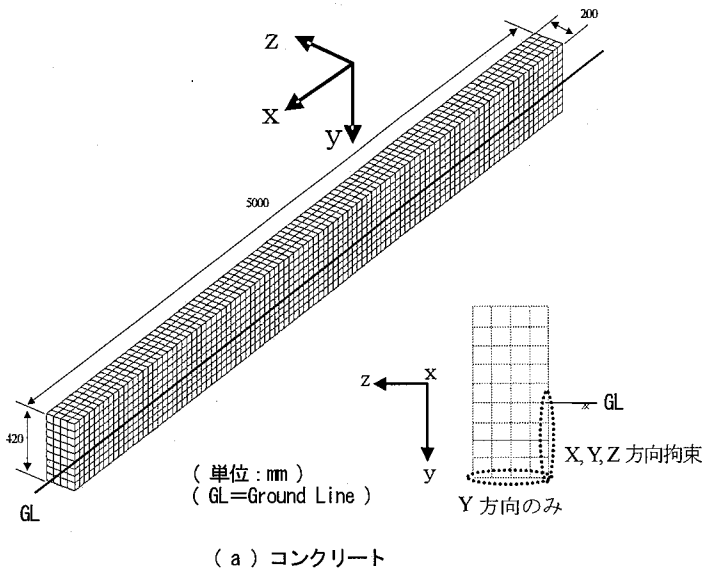


図-2 逸脱防止壁モデル

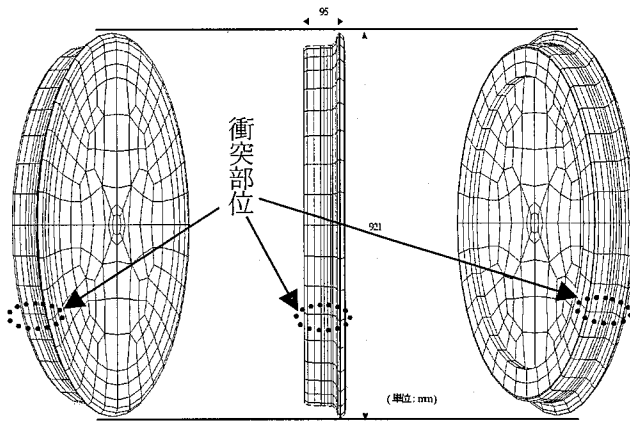


図-3 衝突車輪モデル

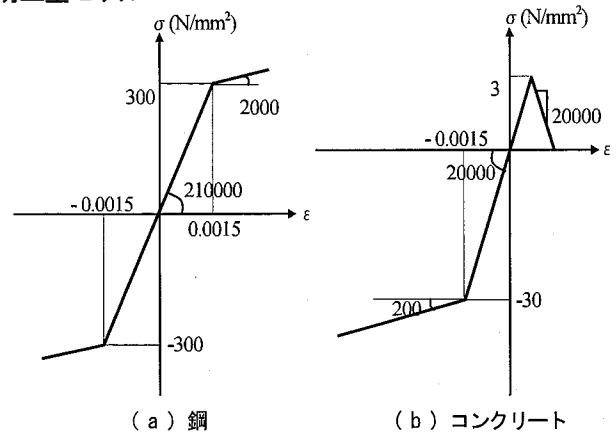


図-4 応力-ひずみ関係

輪形状を元にモデル化し、直径 921mm、幅 90mm、重量 4800N の鋼材を仮定した。図中には、最初に衝突する部位を破線で示している。その他の逸脱防止壁に衝突しない車輪については、計算時間短縮のために 1 つの円盤形状の弾性体モデルとみなした。車輪の初期条件として、全ての車輪に車両の速度から換算される並進・角速度(地面との間に滑動はないものと仮定)を設定した。

2.2 材料特性

図-4 に、本解析で用いた構造材料の応力-ひずみ関係を示す。列車車両については、衝突車輪以外は弾性体としてモデル化した。衝突車輪と逸脱防止壁(鉄筋を含む)は弾塑性体としてモデル化している。鋼材の材料特性として、降伏強度を 300 N/mm^2 とし、それ以降は初期剛性の $1/100$ の剛性でひずみ硬化するものと仮定した。また、逸脱防止壁のコンクリート材料については、圧縮強度を 30 N/mm^2 とし、それ以降は初期剛性の $1/100$ の剛性でひずみ硬化する材料特性を与えた。また、引張域については引張強度を 3 N/mm^2 とし、それ以降は引張軟化を考慮し、軟化勾配には 20000 N/mm^2 の値を仮定した。なお、鉄

筋要素とコンクリート要素の境界面では、完全付着を仮定した。

3. 解析方法

本研究では、汎用解析ソフト MSC.MARC2005r3 を用いて弾塑性衝撃応答解析^{4),5)}を行った。直接時間積分法にはシングルステップフォーバルト法を用い、解析時間を 30msec とした。時間間隔については、最小時間刻みを $1.0 \times 10^{-9} \text{ sec}$ とした自動制御で行った。ここでは、鉄道車両の逸脱防止壁への衝突時の速度を 50km/h (13.9m/s) とした。なお、逸脱防止壁がレール外側 230mm の位置に存在し、列車の前輪のみが脱線した状態での衝突を仮定すると、衝突時の入射角度は約 0.75 度となることから、本解析では車両の入射角度を 1 度と仮定した。

計算結果から発生衝撃力を評価するために、車輪の衝突を受ける防止壁内の衝突箇所近傍の節点(車輪と接触した要素を構成する節点)に作用する衝撃力の総和を算出した。一方、逸脱防止壁の変位には、衝撃力の評価対象とした衝突箇所近傍の節点変位の平均値を用いた。な

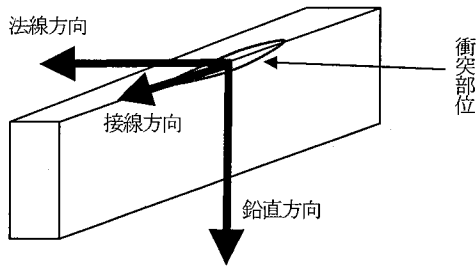
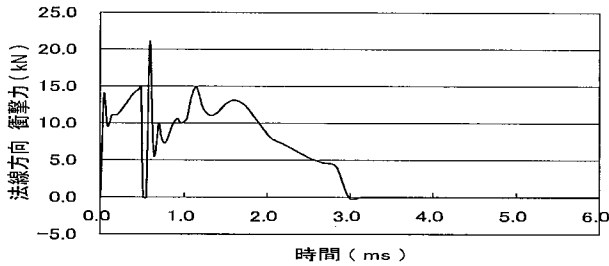
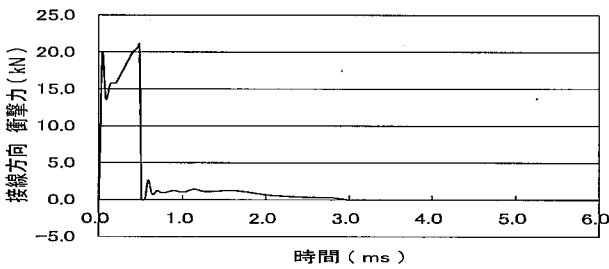


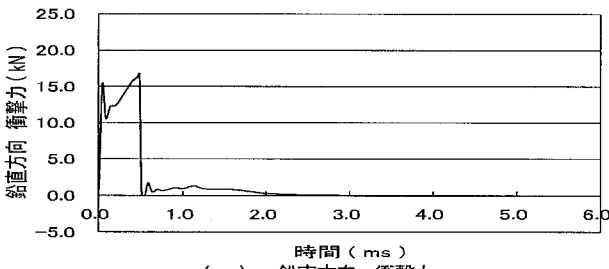
図-5 解析結果の方向成分



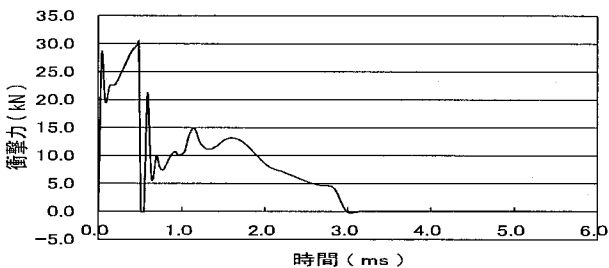
(a) 法線方向 衝撃力



(b) 接線方向 衝撃力



(c) 鉛直方向 衝撃力



(d) 衝撃力

図-7 衝撃力-時間 関係

お、解析で想定した車輪の入射角度が1度と非常に小さいこと、逸脱防止壁の高さが車輪の重心よりも低いことなどから、発生衝撃力は各成分が混在した複雑な値となることが予想される。そこで、図-5に示すように、衝突箇所で発生する衝撃力および変位は、法線方向、接線方向および鉛直方向の3成分に分けて評価することにし、3成分を合算した値についても算出した。

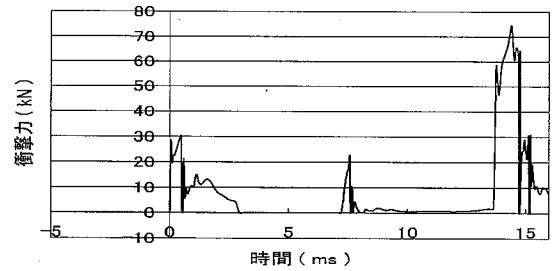
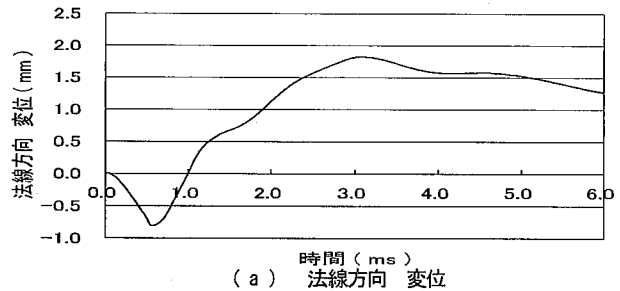
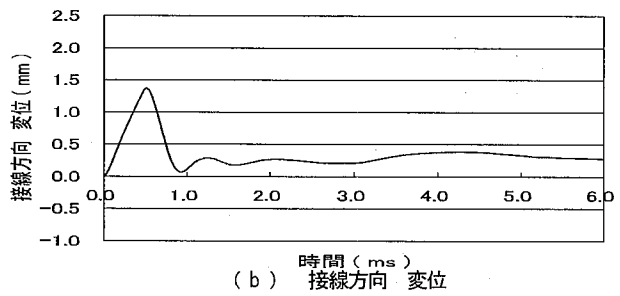


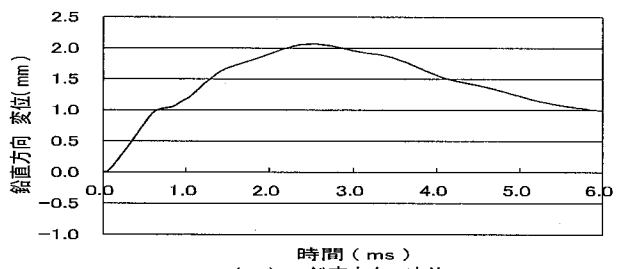
図-6 15msec の間の衝撃力-時間関係



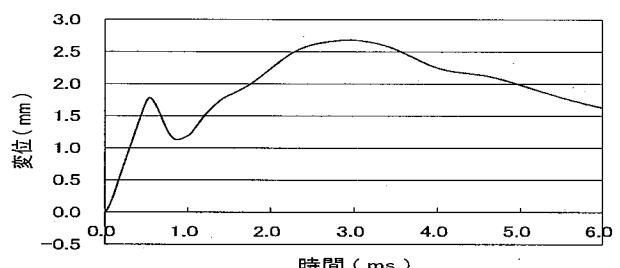
(a) 法線方向 変位



(b) 接線方向 変位



(c) 鉛直方向 変位



(d) 変位

図-8 変位-時間 関係

4. 解析結果および考察

図-6は、逸脱防止壁に車輪が衝突した際の衝撃力-時間関係を示したものである。この図より、逸脱防止壁と衝突車輪は15msecの間に3回の衝突と離反を繰り返すが、本解析で用いた列車モデルは車体本体を簡易なモデルとして表現しているため、車体の剛性・慣性が強く影響すると思われる2回目以降の衝突については実現象を

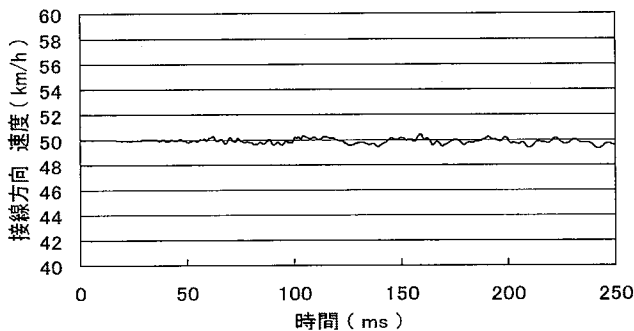


図-9 車両重心位置の接線方向速度-時間関係

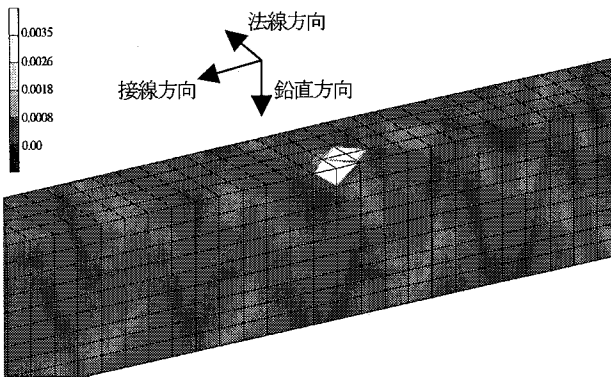


図-10 3msec 時の相当塑性ひずみ分布

忠実に再現できているとは限らない。そこで、本解析では1回目の衝突のみ(0~6msecの間)を考察の対象とした。

図-7は、車輪が衝突した箇所の衝撃力-時間関係を示したものである。この図より、法線、接線、鉛直方向いずれの方向に対しても、最大衝撃力は20 kN程度の値となる結果が得られた。なお、これら3成分を合算した全衝撃力の最大値は約30 kNとなった。車両重量や衝突速度50km/h(13.9m/s)の値から考えると、重錘落下実験等の研究³⁾で報告されている衝撃力に比べて本解析で得られた衝撃力は非常に小さい値を示しているが、これは衝突する車両が1両のみであることおよび車両の入射角度が1度と小さく、車体の進路変更に要する力積が小さいためであると考えられる。

図-8は、逸脱防止壁の衝突箇所における変位-時間関係を示したものである。この図より、法線および鉛直方向の最大変位は2.0mm程度であり、接線方向最大変位は約1.3mmとなった。全方向変位を合成すると、最大変位は2.6mmとなった。各変位応答は衝突時間3msecの間に最大変位が発生した後に明確な残留変位を示しており、今回の解析対象である逸脱防止壁には局所的な塑性変形が発生することが予測された。

接線方向変位については、車輪と逸脱防止壁の間の動摩擦係数や車両の入射角度によってその値は異なるものと考えられる。また、図-9は車両重心の接線方向の速度変化を示しているが、車両重心の接線方向の速度は、衝突の前後でほとんど変化していない結果が得られており、

衝突による接線方向の運動量の減少は非常に小さいものと考えられる。したがって、逸脱防止壁の安全性照査を変位応答を用いて行なう場合には、法線および鉛直方向変位が指標となりうると思われる。

図-10は、3msec時の相当塑性ひずみ分布を示したものである。図中の白色部分の領域は相当塑性ひずみが3500 μ を越えている部分であり、局所的に圧壊等の破壊が生じる可能性があるものと推測される。

5. 結論

本研究では1ケースのみであるが、鉄道車両の逸脱防止壁に対する衝突現象のシミュレーションを行った。本研究で得られた成果を要約すると以下のとおりである。

- (1) 衝突速度50km/h(13.9m/s)、入射角度1度で車両1両が逸脱防止壁に衝突する場合、最初の衝突で衝突箇所が発生する最大衝撃力は30 kN程度、最大変位は2.6mm程度となることが推測された。
- (2) 今回の試算では逸脱防止壁の最大変位は、法線および鉛直方向は約2.0mm、接線方向は約1.3mmとなった。各方向の変位は、車両の衝突条件等によって変化すると考えられるが、逸脱防止壁の安全性照査を変位応答を用いて行なう場合には、法線および鉛直方向変位が指標となりうると思われる。
- (3) 今回の衝突条件(車両1台、衝突速度50km/h、入射角度1度)で、解析対象とした鉄筋コンクリート製逸脱防止壁には、衝突箇所近傍に局所的に圧壊等の破壊が生じる可能性があると考えられる。

今回は、列車が脱線した際の逸脱防止壁への車輪の衝突現象1ケースのみ(衝突速度50km/h、入射角度1度)をシミュレートした。今後、衝突速度や入射角度をパラメータとした解析を行い、総合的な評価をする必要がある。

参考文献

- 1) 井元勝慶, 大野友則, 佐々木昇, 小暮幹太, : 重錘落下衝突を受けるRCはり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性, 構造工学論文集, Vol. 41A, pp1201-1212, 1995年3月。
- 2) 岸徳光, 三上浩, 小室雅人, 松岡健一: 弾塑性衝撃応答解析法のRC梁への適用性, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp1579-1588, 1997年3月。
- 3) 土木学会: 衝撃実験・解析の基礎と応用, 構造工学シリーズ15, 平成16年。
- 4) 久田俊明, 野口裕久, : 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 平成14年
- 5) Lawrence E. Malvern : Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium, 1969