

鉄道車両逸脱防止壁に作用する衝撃力の評価に関する研究

A study on the estimation of impact load due to the derailment accident

園田佳巨*・深澤仁**・曾我部正道***

Yoshimi Sonoda, Jin Fukazawa and Masamichi Sogabe

*工博, 九州大学大学院教授, 工学研究院建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

**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 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

***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 東京都国分寺市光町 2-8-38)

Recently, the risk of derailment accident caused by over-speed, earthquake and other reasons is concerned. For a bullet train, if derailment occurs, it brings about the unimaginable catastrophic accident. Thus, to prevent derailment accident of the bullet train is regarded as an important issue for the railway technology. As one of the effective measure, derailment stopper made of reinforced concrete is proposed. As it is difficult to evaluate the impact load under the collision between train and protective device, there are no design concepts for them against derailment accident. Therefore, this study aims at evaluating impact load by 3-dimensional non-linear FE analysis under the assumption of dynamic contact condition. From these calculations, impact load could be predicted, and failure possibility is estimated by analytical results.

Key Words: Impact load, derailment stopper, non-linear FE analysis

キーワード: 衝撃力, 逸脱防止壁, 非線形有限要素法

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, 我が国では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の開発が進められている. 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^{3,4)}, 鉄道車輪のように回転しながら衝突する物体による衝突を受ける構造物の衝撃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, 回転しながら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を定量的に把握するために, 3次元弾塑性有限要素解析^{5,6)}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に適用可能な衝撃力評価方法について考察を行ない, 衝撃力評価の指標の一つとして, 回転している衝突車輪と逸脱防止壁との間に発生する接触力を用いることが有用であることを確認した.

2. 解析モデルの概要

2.1 解析条件

図-1に解析モデルの全体図を示す. 車体, 台車, 車軸, 車輪の重量は, それぞれ実車重量を参考にして決定し, 各重量を簡易にモデル化した各部位の重心位置に鉛直集中荷重として与えた. なお, 衝突解析の精度を向上させるために, 逸脱防止壁と防止壁に衝突する車輪(以後, 衝突車輪と称する)については忠実に形状をモデル化し, 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. 特に高さについては, 鉄道車両の通常走行を阻害しない建築高さ限界を考慮して決定した. 図-3に衝突車輪モデルを示す. 衝突車輪は実物の車輪形状を元にモデル化し, 直径 921mm, 幅 125mm, 重量 4800N の鋼材とした. 逸脱防止壁に衝突しない車輪については, 計算時間を短縮するために, 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, 車両が等速度運動をすることを前提に換算した並進速度および角速度(地面と車輪との間に滑動はないものと仮定)を, 車輪自体が回転運動で変形を生じないように全節

点に対して入力した。また、参考までに図中に最初に衝突する部位（斜め衝突時）を破線で示した。図より車輪重心位置よりも衝突部位の方が低い位置であり、列車車両が横転することが予想されるが、本解析における列車速度および入射角度の解析条件では横転しないことが確認されている。

また、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を行った。直接時間積分法にはシングルステップフォーボルト法を用いた。時間間隔については、最小時間刻みを $1.0 \times 10^{-6} \text{sec}$ とした自動制御で行った。

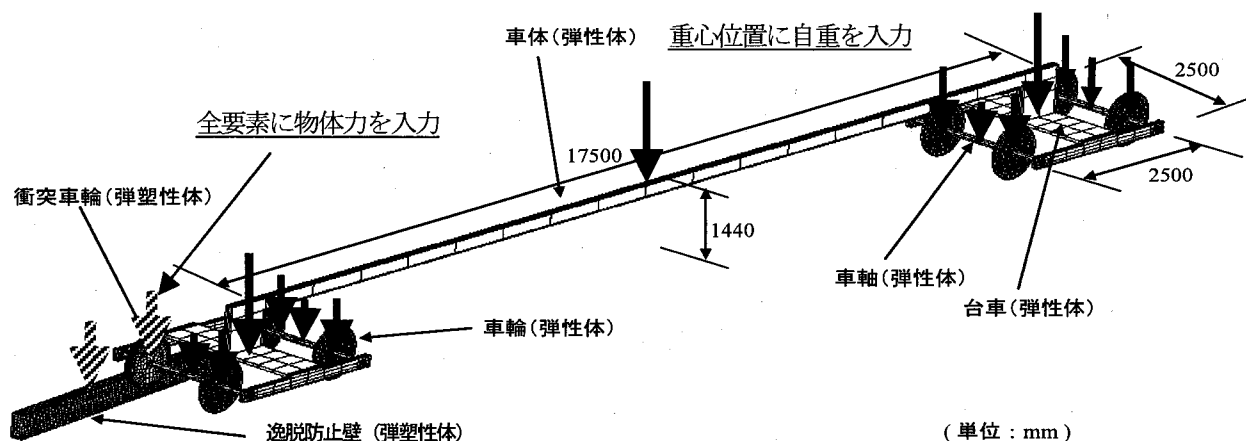
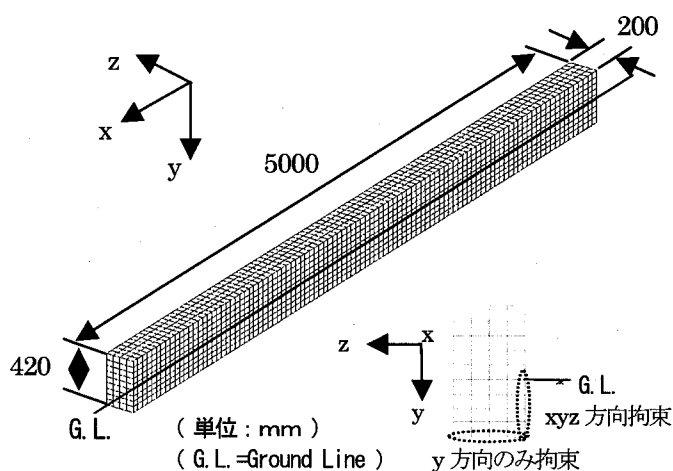
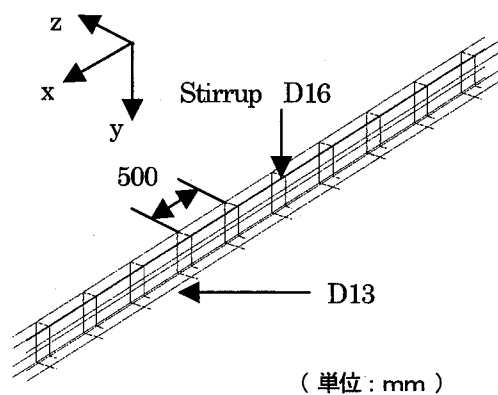


図-1 解析モデル全体図



(a) コンクリート部分



(b) 鉄筋部分

図-2 逸脱防止壁モデル

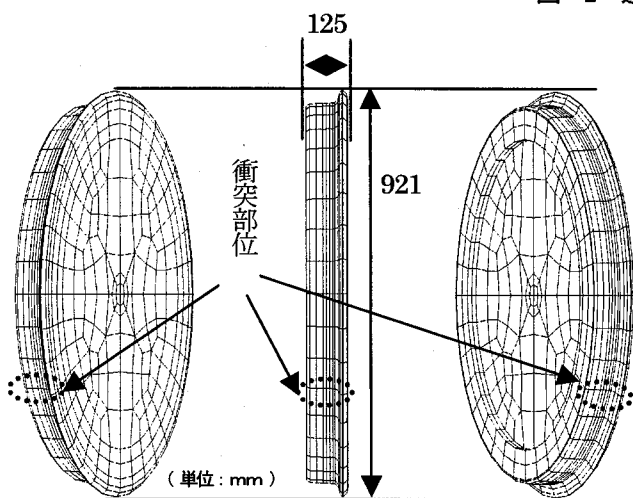
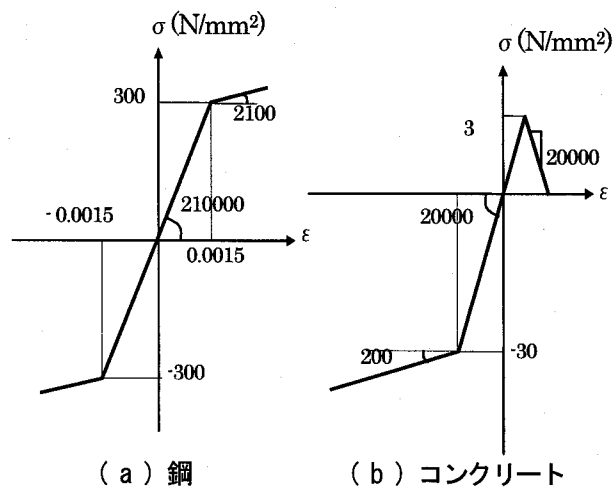


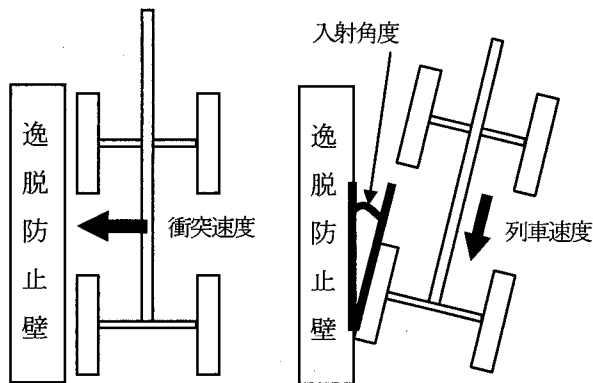
図-3 衝突車輪モデル



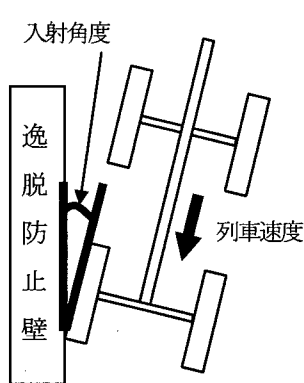
(a) 鋼

(b) コンクリート

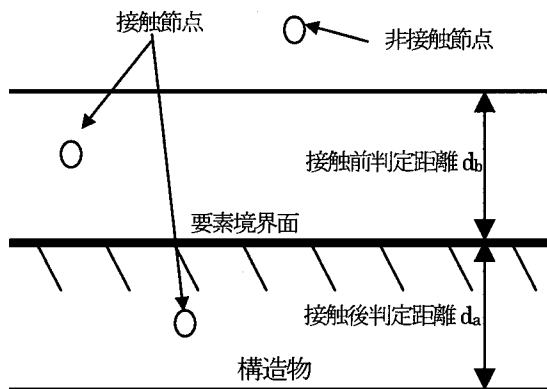
図-4 応力-ひずみ関係



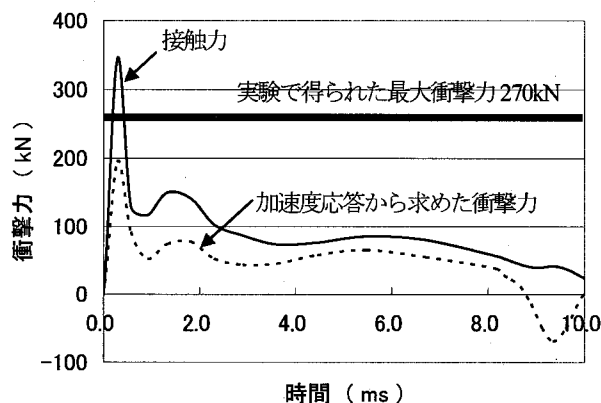
図—5 水平衝突モード



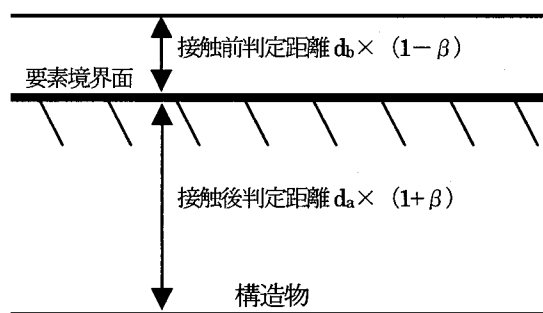
図—6 斜め衝突モード



図—7 接触判定要領



図—9 衝突速度 2.8km/h の解析値



図—8 バイアスファクターの設定要領

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、衝突車輪以外の部分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。鋼材の材料特性は、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て、軟化勾配には 20000 N/mm^2 の値を仮定した。なお、本研究ではコンクリートの圧壊は考慮していない。

3. 衝撃力評価方法

3.1 衝突モード

本研究では、図—5 に示すように、逸脱防止壁に対して真横に衝突する水平衝突モード（前輪と後輪は同時に壁に衝突するが、衝撃力等は 1 車輪換算で評価している）と、図—6 に示すような鉄道車両に列車速度および入射角度を与えた実現現象に近い斜め衝突モードの 2 通りを考えた。水平衝突モードは、水平衝突実験の既往の実験値と解析値を比較することで解析結果の定量的精度を確認するために

行うもので、斜め衝突モードにおいて実現現象を想定した逸脱防止壁の耐荷力特性と衝撃力を把握した。

3.2 接触力を用いた衝撃荷重の評価

衝撃力評価の指標の一つとして、汎用有限要素解析ソフト Marc の接触判定機能を用いた。Marc における接触判定は、図—7 に示すような接触判定前距離と後距離の中に存在する節点を接触対象とみなし、構造物側からの反力を与えるように設定されている。この機能を用いると、高速で物体が衝突するような場合に対して、被衝突物の表面から適切な接触前判定距離を設けることで、現実には起こり得ない物体内部への過度な貫入を防ぐことができる。本研究では、基本となる接触判定距離を衝突車輪の最小要素寸法長の $1/20$ に設定した上で、図—8 に示すような接触判定距離の前距離および後距離を調整するバイアスファクター β （本解析では過度の接触前反力が生じないように $\beta = 0.99$ を採用した）を用いて接触判定距離を調整した。

3.3 衝突車輪加速度から求めた衝撃力

衝撃力評価のもう一つの方法として、衝突車輪の全節点の加速度応答の平均値を求め、その平均加速度に車輪全体の質量を乗じる簡易な方法が考えられる。衝突車輪の加速度には、車体からの反力など種々の影響が含まれることから、接触力の妥当性を検証する目安とすることが望ましい

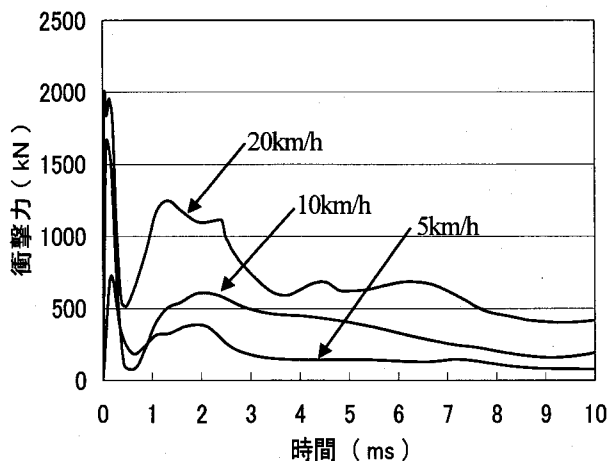


図-10 接触力

と思われる。そこで、本研究では3.2に記した接触力と加速度から求めた衝撃力を定量的に比較し、接触力を衝撃力として適用することの妥当性を検証した。

4. 解析結果および考察

4.1 水平衝突モード

(1) 衝撃力の実験値と解析値との比較

既往の大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験⁷⁾に準じて実施された衝突試験において、車輪が衝突速度2.8km/h程度で鋼製の剛な壁に衝突する場合の衝撃力が計測されており、270kN程度の最大衝撃力が生じる結果が得られている。そこで本研究では、水平衝突モードにおける衝突速度を2.8km/hに設定して衝撃解析を試みた。

衝突速度2.8km/h時の解析結果を図-9に示す。解析で求める接触力は、逸脱防止壁の接触部位の各節点に作用する反力を合算したものである。図-9より、接触力の最大値は約350kN程度であり、衝突車輪の加速度応答から求めた衝撃力の最大値は約200kNとなった。これらの水平衝突モードに関する解析より、実験値270kNは接触力の最大値と衝突車輪の加速度応答から求めた衝撃力の最大値の中間的な値を示すことがわかる。接触力と加速度から求めた衝撃力で衝突初期の値に大きな相違が認められるが、この原因としては、接触力が実際に衝突・接触している領域に生じる力をもとに計算しているのに対し、車輪加速度は車輪全体で平均値を求めたために、衝突初期の起ち上がりを緩和させた可能性があると考えられる。衝突初期の起ち上がり以降は、両者は良く似た波形を示すことが認められる。これらの結果から、接触力と加速度から求めた衝撃力の両者を比較・検討することで、概ね実際の衝撃力を把握できるものと考えられる。

(2) 衝突速度が衝撃力に与える影響

本解析では、衝突速度が5, 10, 20km/hの3ケースに対して解析を行い、接触力と衝突車輪の加速度応答から求めた衝撃力との比較を行なった。図-10に接触力を、図-11に加速度応答から求めた衝撃力を示す。これらの図から、接触力の最大値と加速度応答から求めた最大衝撃力は、概

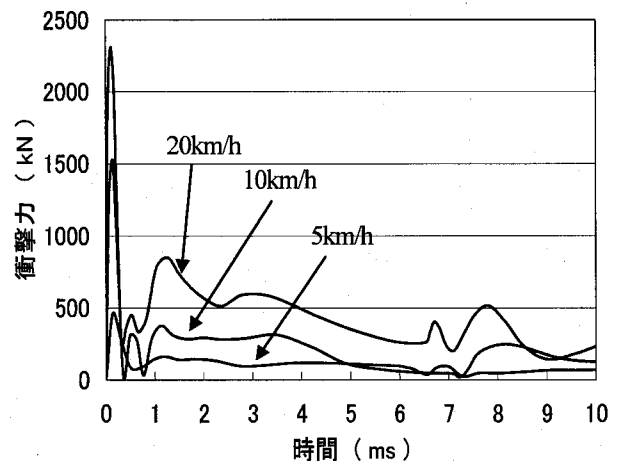


図-11 加速度応答から求めた衝撃力

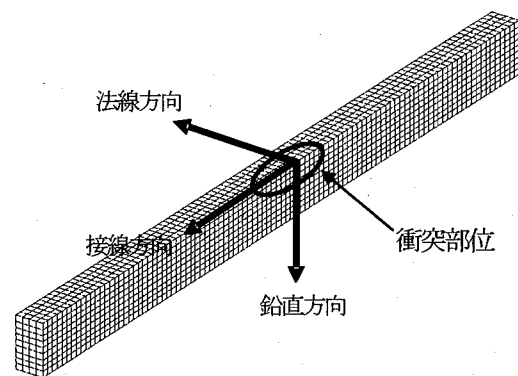


図-12 3方向成分

ね一致していることが分かる。両者とも、約1msの間に最大値が発生し、その後は減衰していく波形の特性が表されており、衝突現象における衝撃力の評価方法として接触力が十分に適用可能であることが認められた。なお、衝突直後以降の応答には車体からの反力の影響が含まれると考えられる。特に加速度応答から求めた衝撃力には車体を簡易にモデル化した影響が直接的に作用したと考えられることから、両者の1ms後の減衰波形形状に相違があるものと考えられる。

4.2 斜め衝突モード

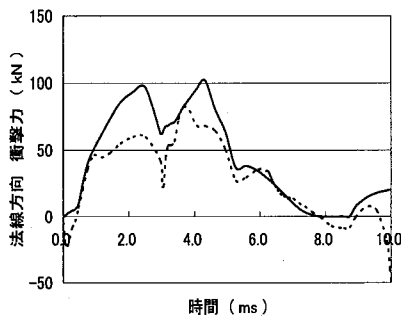
(1) 接触力と加速度から求めた衝撃力との比較

斜め衝突の条件として、列車速度を50, 60, 70km/h、入射角度を1度とした。発生衝撃力は、水平衝突モードの場合と同様に、逸脱防止壁の接触部位に作用する接触力と衝突車輪の加速度応答から求めた衝撃力の2種類を比較した。なお、斜め衝突の場合には、衝突部位が時間の経過とともに変化すること、衝突部位は車輪の回転による摩擦力の影響を受けることなどから、その挙動が複雑になることが予想される。そこで、図-12に示すように、衝撃力を法線、接線、鉛直方向の3方向成分に分けて考察した。

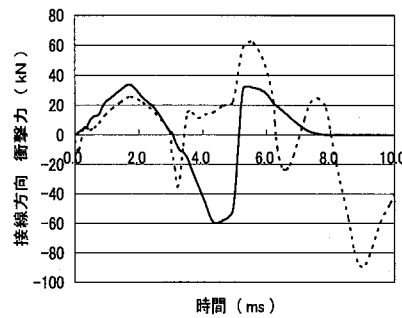
3種類の列車速度で斜め衝突した場合の解析結果を図-13、図-14、図-15に示す。実線は接触力を、点線は加速度応答から求めた衝撃力を表している。さらに、各成分から求めた合力についても図-16に示した。これらの

図より、逸脱防止壁に作用する接触力波形と、加速度応答から求めた衝撃力波形は、ほぼ一致していることが分かる。なお、ほとんどの波形において、加速度応答から求めた衝撃力の方が接触力よりも小さい最大値を示しているが、こ

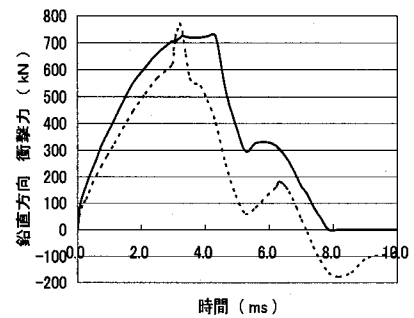
れは衝突車輪の加速度応答に車輪質量を乗じることで衝撃力を求める際、車輪加速度応答の平均値を用いたことが原因と考えられる。以上のことを踏まえると、斜め衝突の場合においても、接触力を発生衝撃力とみなすことができ



(1) 法線方向 衝撃力

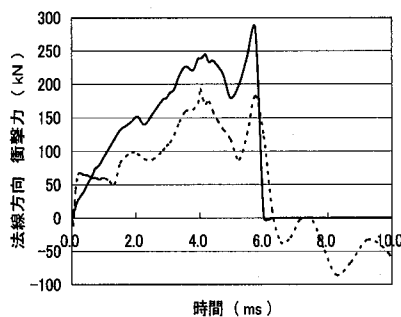


(2) 接線方向 衝撃力

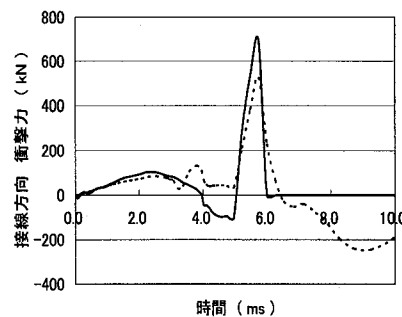


(3) 鉛直方向 衝撃力

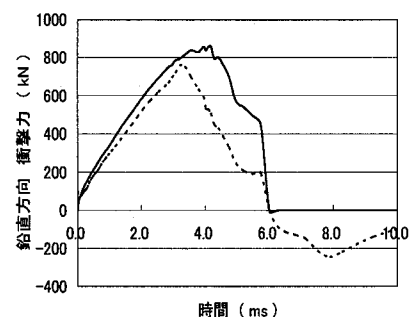
図-13 50km/h



(1) 法線方向 衝撃力

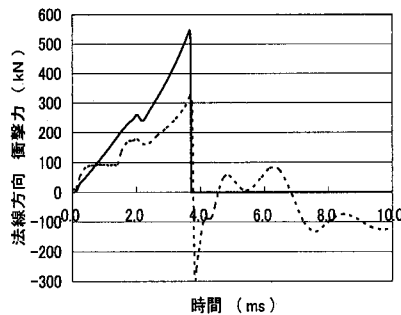


(2) 接線方向 衝撃力

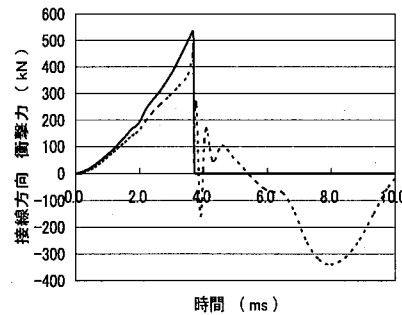


(3) 鉛直方向 衝撃力

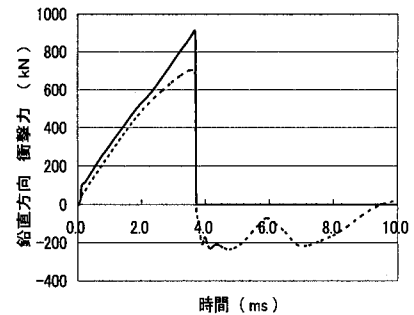
図-14 60km/h



(1) 法線方向 衝撃力

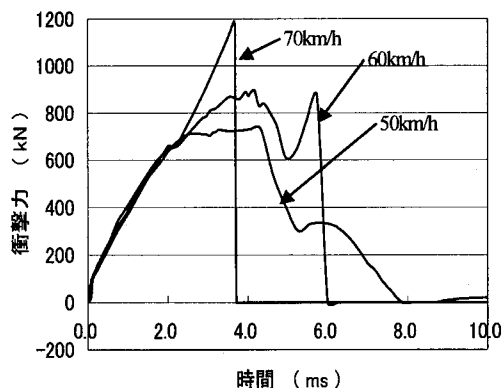


(2) 接線方向 衝撃力

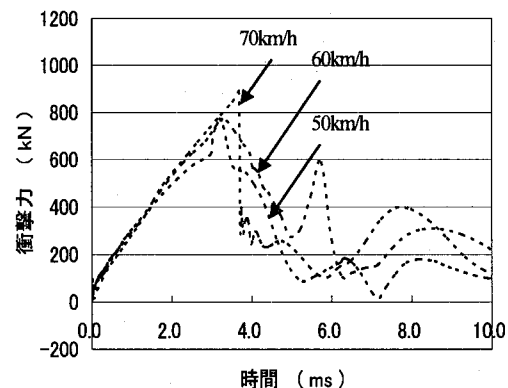


(3) 鉛直方向 衝撃力

図-15 70km/h



(1) 接触力



(2) 加速度から求めた衝撃力

図-16 各成分から合成された合力

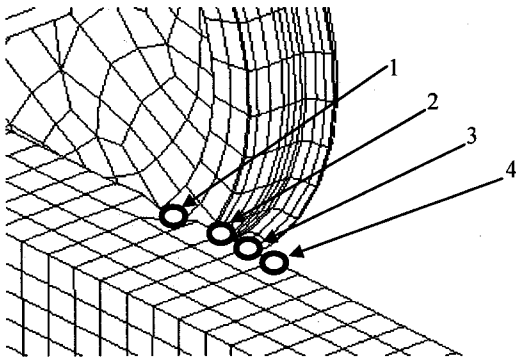


図-17 衝突部位近傍節点の位置

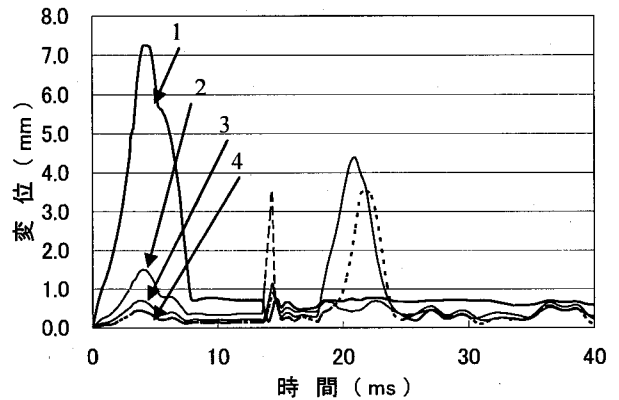


図-18 衝突部位近傍節点の変位応答

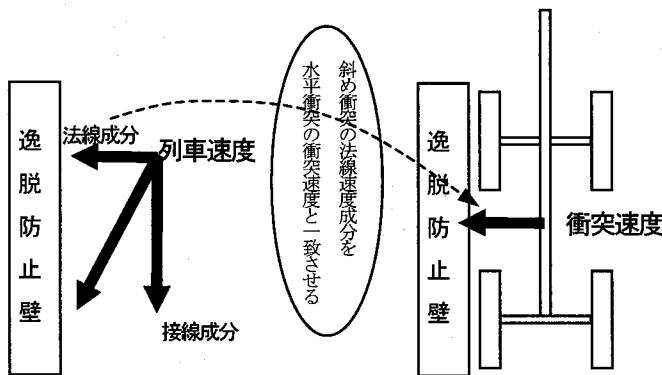


図-19 斜め衝突と水平衝突モードの比較

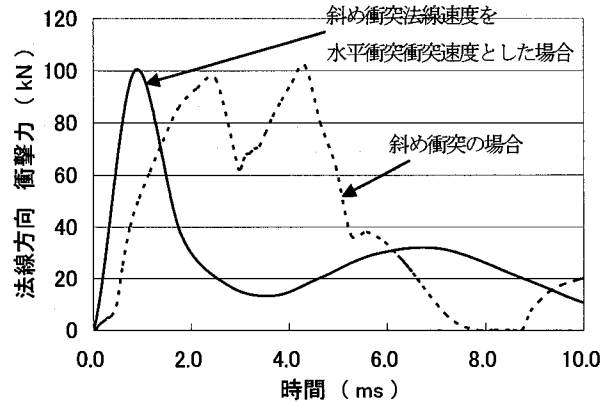


図-20 衝突モードと衝撃力波形の関係

ると判断される。

法線方向衝撃力は、列車速度の増加とともに大きくなることが明確に認められる。鉛直方向衝撃力は、衝突車輪が乗り上げるような挙動を示すためにその反力として得られるもので、列車速度にかかわらず概ね700～800kN程度の値となることが認められた。一方、接線方向衝撃力は、3ケースそれぞれで、衝撃力波形に相違が見られ、列車速度との明確な関連性は認められなかった。これは、各ケースで回転しながら衝突する車輪と逸脱防止壁の間に発生する摩擦力が異なるためであると考えられる。

(2) 衝突モードと発生衝撃力との比較

列車速度50km/hで斜め衝突した場合に、図-17に示す衝突部位近傍の逸脱防止壁4節点の変位応答を図-18に示す。この図より、斜め衝突の場合には衝突部位が時間とともに変化するために、各節点で変位応答が異なることが分かる。したがって、構造物側の変位応答を評価する場合の位置等の選定方法については今後検討する必要がある。

次に、衝突モードの違いによって発生衝撃力にどのような相違が見られるか調べた。両者を比較するために、斜め衝突モードの列車速度の法線方向成分と水平衝突モードの衝突速度を合わせて(図-19参照)比較を行い、ここまでの検討を踏まえて接触力を発生衝撃力とみなして考察を行った。

解析結果を図-20に示す。この図より、水平衝突モードは約0.5msの間に最大衝撃力が発生しているが、斜め衝突

モードは2～4.5msの時間にかけて最大衝撃力が発生しており、衝突モードによって逸脱防止壁に作用する衝撃力波形に明確な相違があることが分かる。このことから、斜め衝突の場合には、車輪が衝突部位上を擦るように逸脱防止壁に衝突・離反するまでの時間内は衝撃力が作用し続けることが最も大きな相違であることが認められた。

4.3 破壊の可能性の予測

ここでは、実現象に近い斜め衝突モードにおいて、列車速度と逸脱防止壁の変形状況の関係を調べた。鉄道車両の列車速度を150km/h、200km/h、270km/hの3通り、入射角度を1度として、逸脱防止壁に衝突した場合の挙動を再現した。各列車速度で、ミーゼスの降伏条件を仮定した相当塑性ひずみ分布を図-21、図-22、図-23に示す。コンクリート材料は圧力依存性を示すことから、ミーゼス換算の相当値は必ずしも適切ではないが、ここでは破壊範囲を知る目安として評価を試みている。図の白色部分は、相当塑性ひずみが3500 μ (コンクリート標準示方書に示された限界状態時のコンクリートの応力-ひずみ曲線⁹⁾の圧縮限界0.35%を適用)を超過する領域を表しており、破壊の可能性があると仮定した部分である。これらの図から、逸脱防止壁の変形は、衝突箇所の近傍において卓越することが認められる。また、列車速度が150km/h～270km/hに大きくなれば破壊領域も拡大していくが、5msまでの間で破壊の進行は終了し、5ms以降は鉄道車両が跳ね返されるために衝突部位の変形は進展しないことが確認できる。

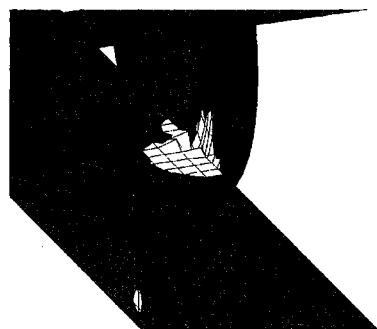
本解析では、相当塑性ひずみが 3500μ を越えた後も一定のひずみ硬化特性を与え、圧壊が発生することを考慮していない。したがって、危険側の評価をしている可能性があるが、図-21～図-23の結果から、鉄道車両は逸脱防止壁に広範囲にわたり衝突部位上を擦るように衝突し、軌道を修正されていくため、列車速度が 270km/h と高速の場合

においても、広域的にその衝撃に耐え、鉄道車両を円滑に軌道修正できるものと推測される。

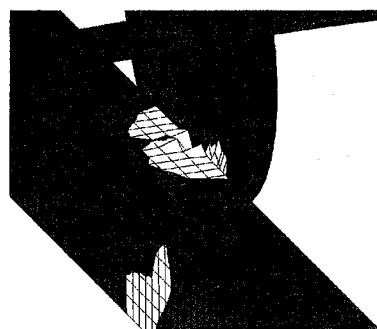
列車速度が 150km/h 、 200km/h 、 270km/h 時の発生衝撃力を接触力を用いて整理した結果を図-24に示す。図より、列車速度が 270km/h 時には、衝突直後の最大値が 3400kN に達していることが確認でき、この結果からも逸脱防止壁



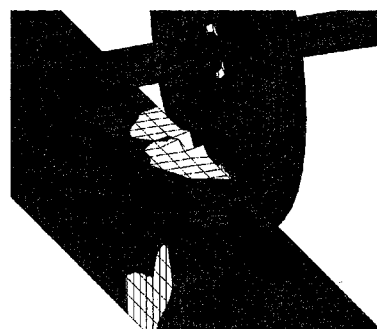
(1) 0.5ms 時



(2) 2ms 時

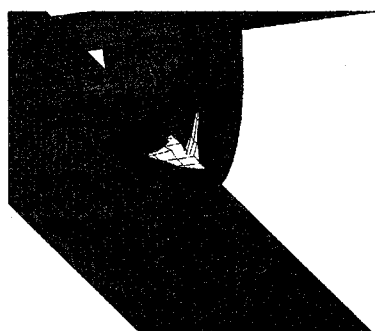


(3) 5ms 時

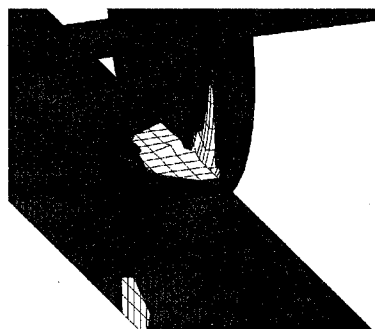


(4) 10ms 時

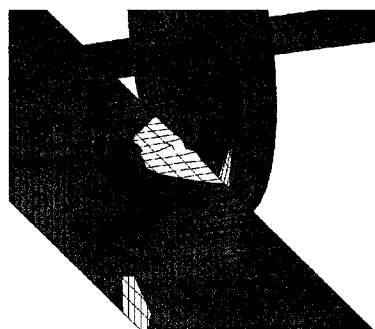
図-21 150km/h の
相当塑性ひずみ分布



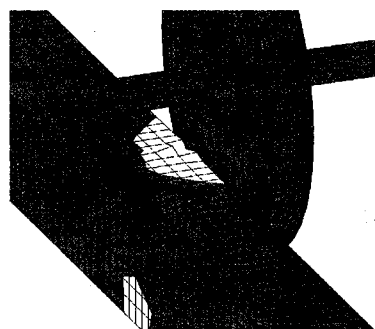
(1) 0.5ms 時



(2) 2ms 時

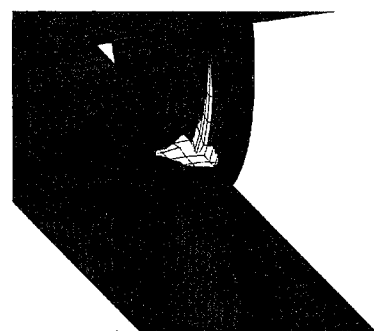


(3) 5ms 時

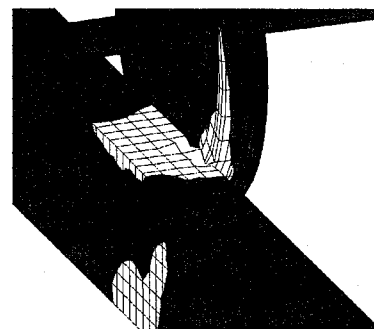


(4) 10ms 時

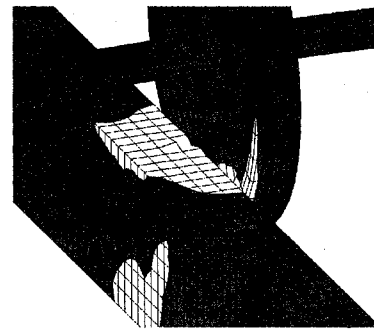
図-22 200km/h の
相当塑性ひずみ分布



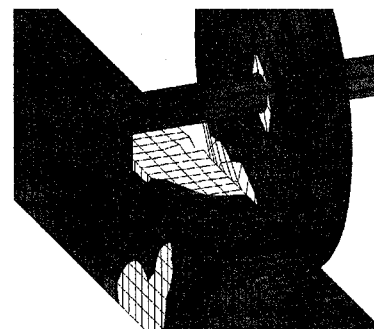
(1) 0.5ms 時



(2) 2ms 時



(3) 5ms 時



(4) 10ms 時

図-23 270km/h の
相当塑性ひずみ分布

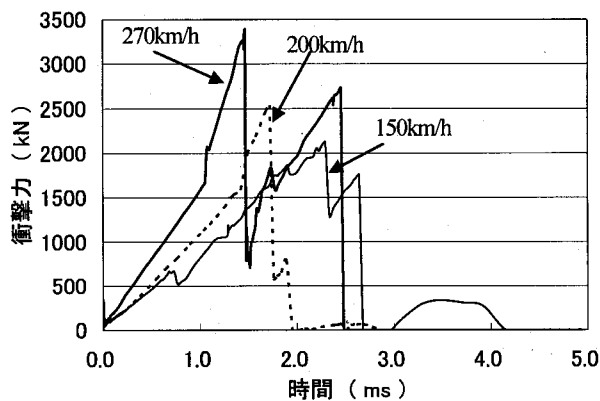


図-24 発生衝撃力

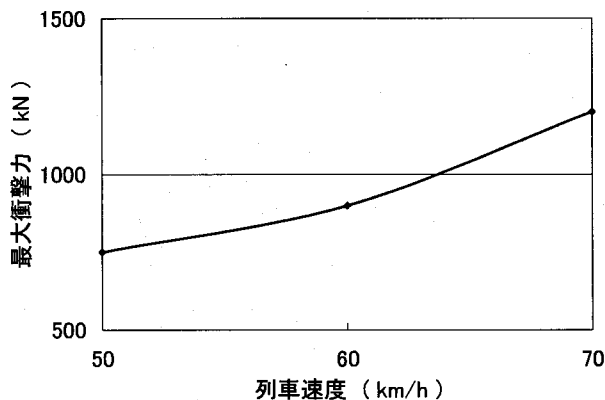


図-25 列車速度と最大衝撃力の関係
(50, 60, 70km/h 時)

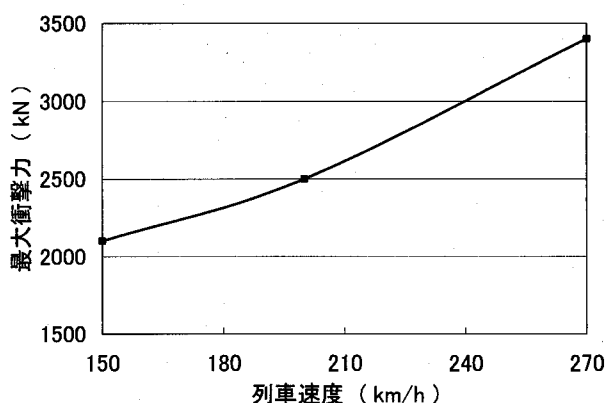


図-26 列車速度と最大衝撃力の関係
(150, 200, 270km/h 時)

の衝突部位には局所的に破壊が生じる可能性が高いことが予想される。図-25 および図-26 に列車速度と最大衝撃力の関係を示す。これらの図より、列車速度が速くなると最大衝撃力が明確に大きくなっていく傾向が確認できる。

5. 結論

本研究では、逸脱防止壁の耐衝撃設計を目的として、鉄道車両が衝突した際の衝撃力評価方法について考察を行い、以下の結論を得た。

(1) 実物大鉄道車両の衝突試験における実験値の最大衝撃力との比較および加速度応答から求めた衝撃力との比較から、水平衝突および斜め衝突どちらの場合でも、回転する衝突車輪と逸脱防止壁との間に作用する衝撃力評価の一つとして、接触力を用いることが可能であると確認できた。

(2) 接触力と衝突車輪の加速度応答から求めた衝撃力を比較すると、水平衝突および斜め衝突どちらの場合でも、接触力の方が大きくなる傾向にあることが分かった。これは、加速度応答の平均値に車輪質量を乗じたことに起因するものと考えられる。

(3) 実現象に近い斜め衝突モードにおいて、列車速度 270km/h で衝突させた場合、逸脱防止壁は局所的に破壊する可能性があるが、全体破壊に至らず、鉄道車両の軌道を修正できるものと推測される。

今後、逸脱防止壁の破壊（コンクリートの材料特性）を表現可能な材料モデルを用いることで、本解析で得られる衝撃力（主に接触力を用いて評価する）の定量的精度を改善させた上で、列車速度および入射角度をパラメータとした最大衝撃力の推定値を提示していく予定である。

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, 1995.3.
- 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, 1997.3.
- 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, 丸善, 2004.
- 4) 奥田広之, 涌井一, 田辺誠: レール溶接部凹凸によるフローティングラダー軌道の衝撃応答解析, 日本計算工学会論文集, No20010009, 2001.5
- 5) 久田俊明, 野口裕久: 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善, 2002.
- 6) Lawrence E. Malvern: Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium, 1969.
- 7) 宮本岳史, 松本信之, 曾我部正道, 下村隆之, 西山幸夫, 松尾雅樹: 大変位軌道振動による実物大鉄道車両の加振実験, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.72, No.706, 2005.
- 8) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書「構造性能照査編」, 丸善, 2002.

(2007 年 4 月 12 日 受付)