

鉄道車両用逸脱防止壁の性能評価に関する研究

A study on the crashworthiness estimation of the derailment barrier

深澤 仁*・園田佳巨**

Jin Fukazawa and Yoshimi Sonoda

*九州大学大学院博士課程学生, 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)

**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)

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 crashworthiness of the stopper, there are no design concepts for them against derailment accident. Therefore, this study aims at evaluating the crashworthiness by 3-dimensional non-linear FE analysis under the assumption of dynamic contact condition. From these calculations, the crashworthiness of the stopper could be predicted, and failure possibility is estimated by analytical results.

Key Words: crashworthiness estimation, derailment stopper, non-linear FE analysis

キーワード: 性能評価, 逸脱防止壁, 非線形有限要素法

1. 緒言

2004 年 10 月に発生した新潟県中越地震において, 昭和 39 年に東海道新幹線が開業して以来, 初めて営業中の新幹線が脱線するという事故が発生した。事故発生直後から国土交通省においては, 新幹線脱線対策協議会が設置され, 当面の安全対策が検討されている。また, 高速鉄道ではないが, 2005 年 4 月には JR 福知山線において脱線事故が発生し, 多くの人命が失われた。これらの事例は, 鉄道脱線事故に対する十分な安全対策の必要性を認識させるもので, 鉄道車両の脱線に対する安全対策にはさらなる確実性が求められている。

高速走行中の鉄道車両が地震等の影響によって脱線した場合, 減速し完全に停止するまでの間に, 車両はかなりの長い距離を走行し続けることが予想される。鉄道車両が脱線し, 速度を保った状態で軌道を逸脱すれば, 対向車両やトンネル, その他の構造物に激突するなどの最悪の事態を誘発する恐れも考えられる。そこで, たとえ脱線してもその後の鉄道車両の逸脱を防止し, 進行方向を円滑に誘導するような安全対策が必要であると思われる。これらのことを背景に, 本研究では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, 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を対象とした検討を行う。

この種の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・誘導する目的を達成するためには, 鉄道車両の衝突時の挙動を熟知するとともに, 逸脱防止壁に発生する衝撃荷重を正確に把握することが重要である。これまで, 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^{1,2)}, その大半が重錘落下実験や数値解析^{3,4)}を主体とした研究などであり, 鉄道車輪のように回転しながら衝突する物体によ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⁵⁾。本装置と同様の目的で設置される自動車車両の逸脱防護柵は, 設置基準・同解説⁶⁾に規定されている性能照査法をもとに対策工が施され, 実車衝突実験や数値シミュレーションによって, 個々の防護柵について安全性能が評価されている。しかしながら, 鉄道車両の逸脱防止装置については, 明確な設置基準がないことに加え, 実車両の衝突実験は実験規模が非常に大きいことからコストや多大な労力を要し, 実施することは極めて困難である。以上のことから, 鉄道車両衝突シミュレーションを実施し, 逸脱防止装置の耐衝撃性能を概ね予測することが重要であると考えられる。

本研究は, 脱線した鉄道車両の車輪部分が, 鉄筋コンクリート製逸脱防止壁に衝突する際の衝撃挙動を定量的に評価するために, 3次元弾塑性有限要素解析^{7,8)}による数値シミュレーションを試みるものである。

2. 逸脱防止システムの概要

鉄道車両の逸脱防止システムとして、図-1に示すように、大きく分けて3つの段階を有する仕組みが考えられる。まず、①に示すような、初期の脱線を防ぐ目的の車体取り付けタイプの車両逸脱防止ガイド機構、②に示すような、脱線後の車両の初期の逸脱を防止するレール固定台取り付けタイプの逸脱防止装置、③に示すような、車体の路線外への逸脱や転倒を防止する防護壁である。それぞれ、対象としている衝突部位が異なっており、①の車両逸脱防止ガイド機構はレールとの衝突、②の逸脱防止装置は車輪との衝突、③の防護壁は車体本体との衝突が想定される。

本研究では、②の逸脱防止装置（鉄筋コンクリート製構造物を仮定）を解析対象とするが、②の逸脱防止装置は、逸脱防止システム全体の中で第2段階の防護構造物であることから、軌道外へ逸脱しようとする鉄道車両の逸脱防止性能、もしくは、車両の進行方向の円滑な誘導性能について評価した。これらを着目点として、逸脱防止壁の耐衝撃性能について数値シミュレーション結果を用いて評価した。

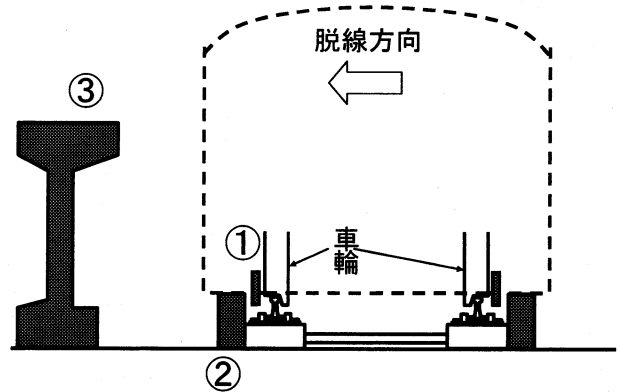


図-1 逸脱防止システム

3. 解析モデルの概要

3.1 解析条件

地震動や速度超過による遠心力、突風による浮き上がりなどが、列車車両の脱線を誘発する要因として考えられ、それぞれの要因によって、解析条件が異なると考えられる。

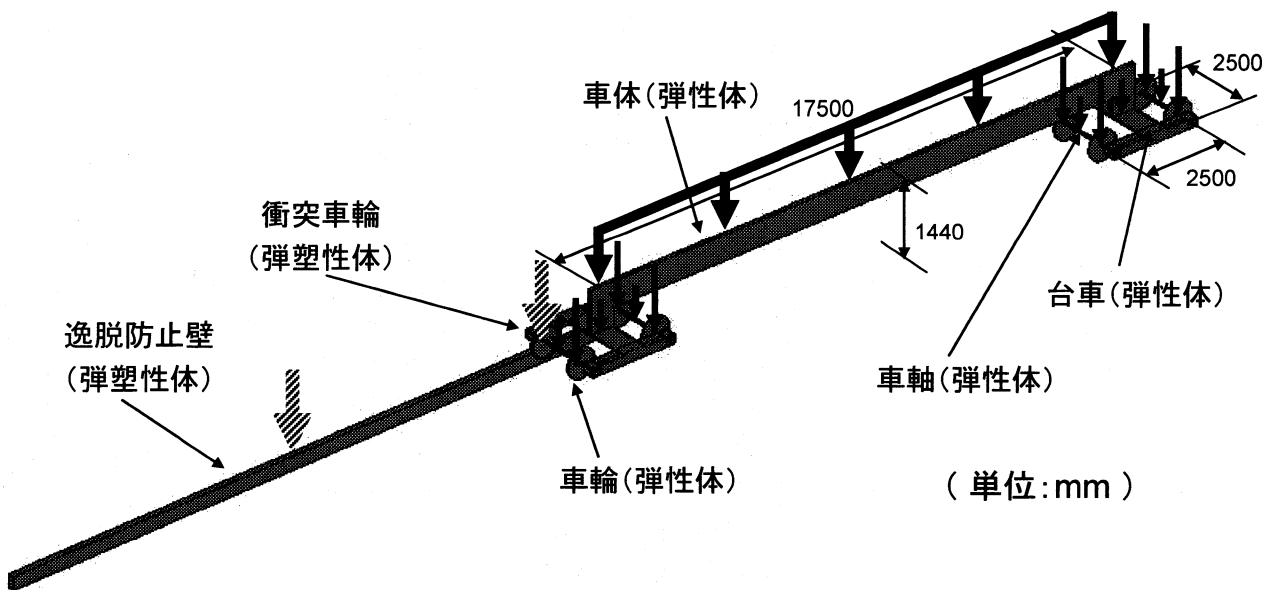


図-2 解析モデル全体図

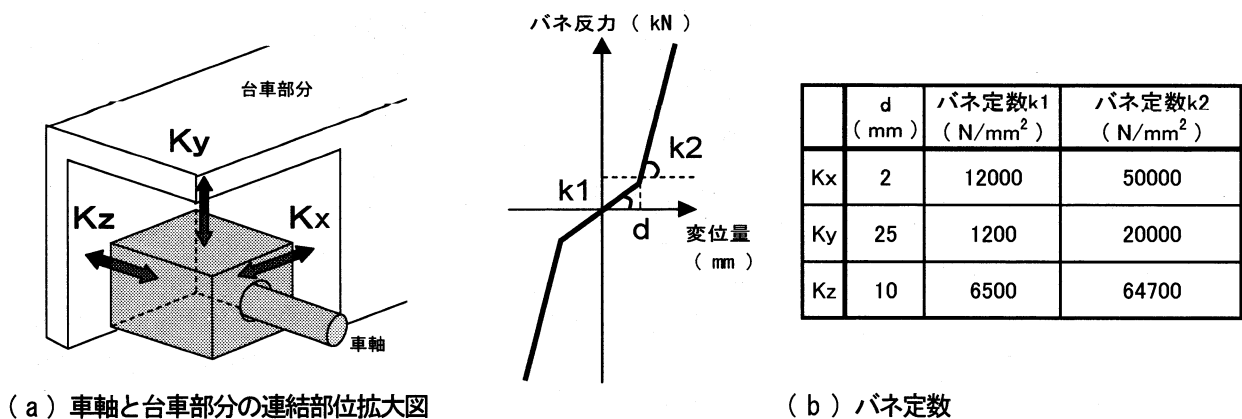


図-3 車軸と台車部分の連結部位およびバネ定数

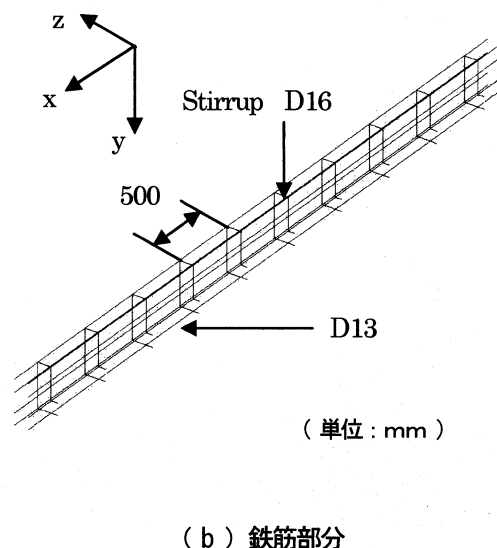
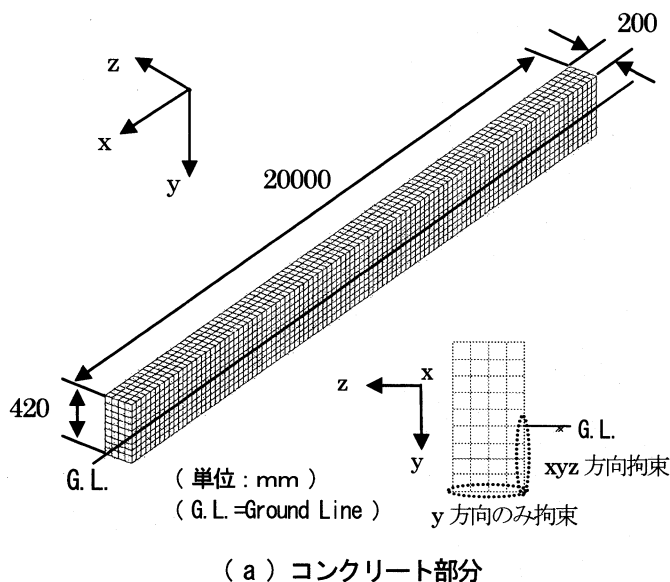


図-4 逸脱防止壁モデル

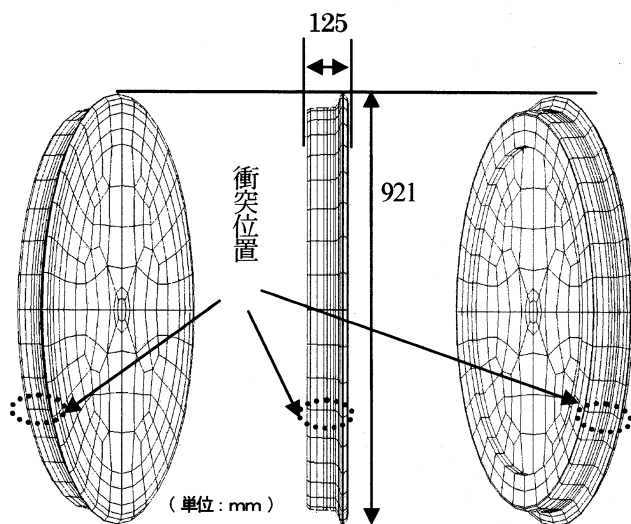


図-5 衝突車輪モデル

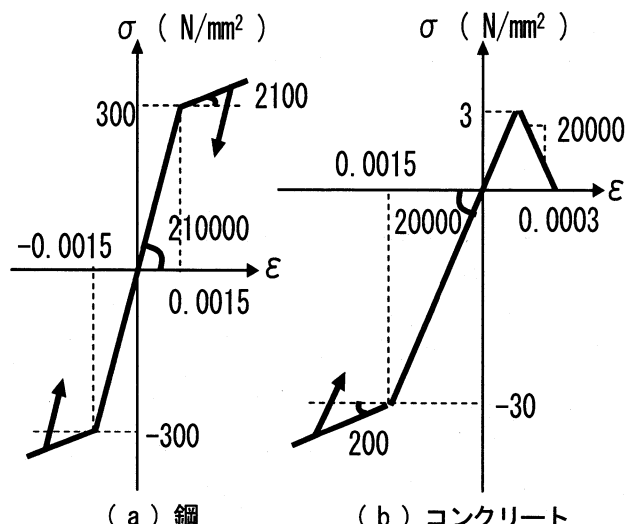


図-6 応力-ひずみ関係

しかし、本研究では、逸脱防止壁の性能評価を実施するため、すでに脱線した列車車両が、予想される入射角度と列車速度をもって逸脱防止壁に衝突することを想定した。また、実際の列車車両は10数両の車両により構成されており、逸脱防止壁に衝突する際の挙動は、前後の車両の影響を受けると考えられるが、本研究では1車両のみの衝突を仮定し、逸脱防止壁の定量的な性能評価を実施した。

図-2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。また、図-3(a)に示すように、車軸と台車は K_x 、 K_y 、 K_z のバネ要素によって

連結しており、より実現象を再現することに努めた。図-3(b)にそれぞれのパネ定数を示す。初期のパネ定数 k_1 が、所定の変位量 d に達すると、台車と輪軸が接触することを考慮して k_2 に増大する非線形バネ特性を与えた。パネ定数の値は、実車両の緩衝材を一本のパネ特性に換算して入力した。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-4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20000mm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。逸脱防止壁は、レール固定台に連結する構造であると仮定したため、側面の下方部分の境界条件を全固定とした。また、下面については鉛直方向のみを拘束した。図-5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位置を破線で示す。図より車輪重心位置よりも衝突位置の方が低いことがわかる。このことから、衝突体（列車車両）の比較的低い位置で衝突現象が起これと考えられ、本研究で対象とする衝突現象の特徴の一つである。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、一連の衝突による車体の傾きが小さい値を保つことから、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 $1.0 \times 10^{-9} \text{ sec}$ とした自動制御で行った。

3.2 材料特性

図-6 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。

3.3 解析ケース

図-7 に示すように、後台車部分がレール上にあり、前台車部分のみが脱線し逸脱防止壁に衝突すると考えると、壁とレールとの距離が 230 mm であるので、構造上の特性から最大入射角度が約 0.8 度と算出できる。よって、車両の入射角度パラメータを $0.8 \cdot 0.5 \cdot 0.3 \cdot 0.1$ 度の4種類とした。また、列車速度は、新幹線の営業速度が 270 km/h で

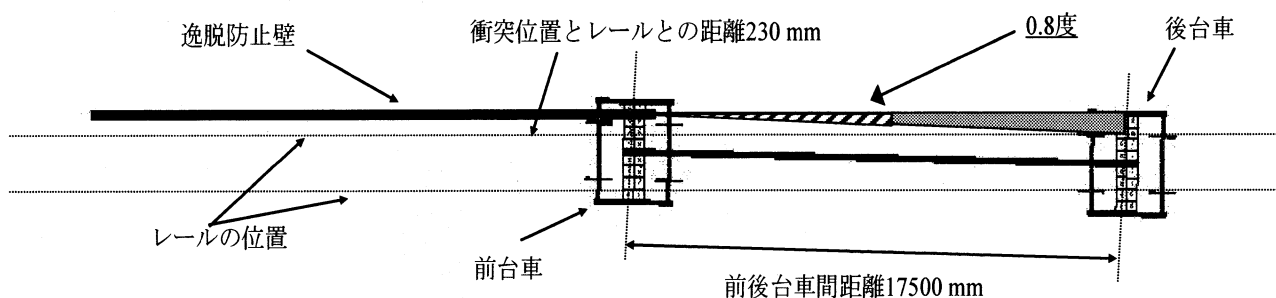
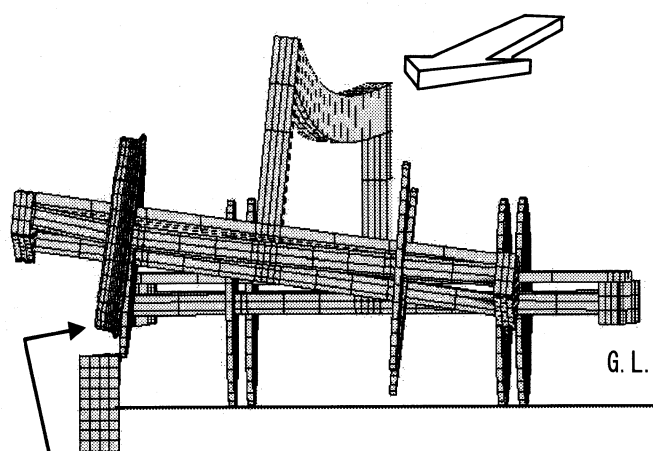


図-7 上面図

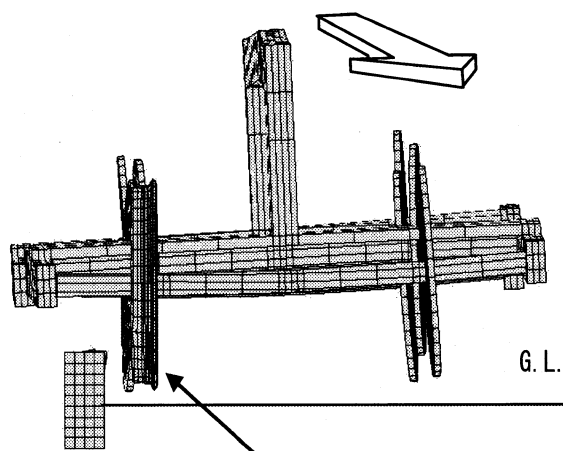
入射角度を保っている

入射角度が離散角度に転じている



車輪底部が壁上面よりも高位置に跳ね上がっている

(a) 逸脱防止できない（記号×）



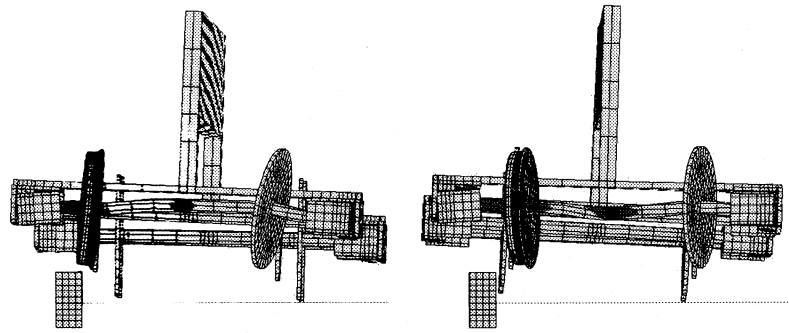
車輪底部が壁上面よりも低位置を保っている

(b) 逸脱防止できる（記号◎）

図-8 性能評価方法

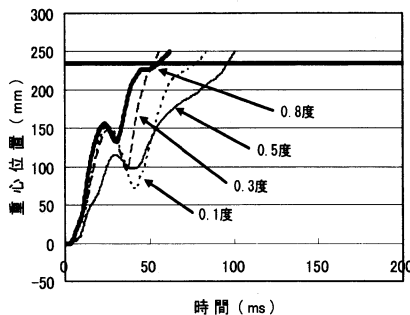
表-1 逸脱防止壁の性能評価表

		入射角度(度)			
		0.1	0.3	0.5	0.8
列車速度 (km/h)	150	○	○	○	×
	200	○	△	×	×
	270	○	×	×	×

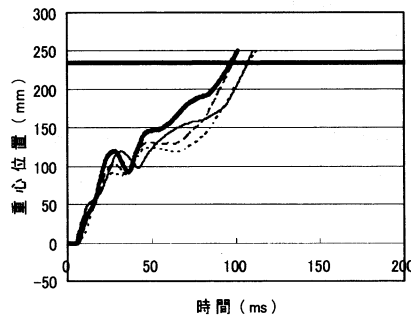


(a) 270km/h, 0.8度 (b) 270km/h, 0.1度

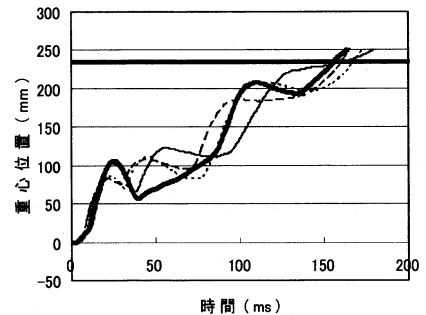
図-9 代表的な解析図



(a) 270km/h

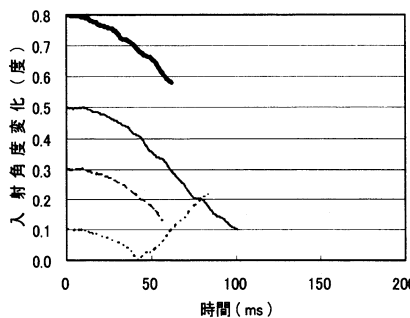


(b) 200km/h

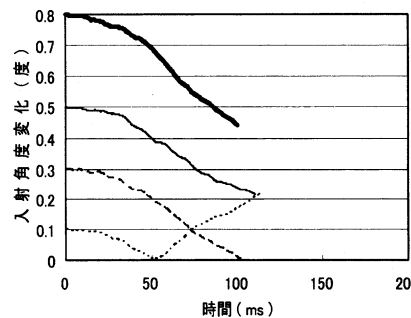


(c) 150km/h

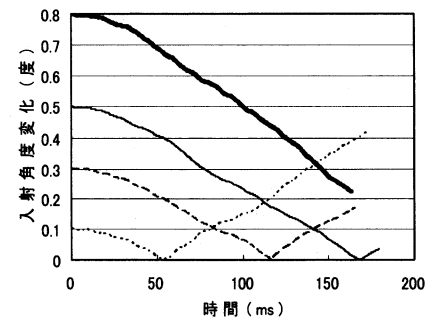
図-10 車輪重心位置の鉛直高さ



(a) 270km/h



(b) 200km/h



(c) 150km/h

図-11 入射角度の変化

あることを考慮して、270・200・150 km/h の3種類を列車速度パラメータとした。本研究では、入射角度と列車速度をそれぞれ組み合わせた12ケースを解析ケースとした。

4. 逸脱防止壁の性能評価方法

逸脱防止壁の性能評価方法として、図-8(a)に示すように、衝突車輪底部が壁上面よりも高い位置まで跳ね上がり、かつ入射角度を保っている場合は、車両の逸脱を防止できないと仮定した(記号×)。一方、図-8(b)に示すように、一連の衝突現象の中で、衝突車輪底部が壁上面よりも低い位置を保ち、かつ入射角度が減少して離散角度に転じた場合に車両の逸脱を防止し進行方向を修正できたと仮定した(記号○)。また、衝突車輪底部が壁上面よりも高い位置まで跳ね上がることがあっても、入射角度が離散角度に

転じた場合についても、車両の逸脱を防止できたと仮定した(記号○)。ここで、入射角度や離散角度は、前台車中心点と後台車中心点を結ぶ直線と逸脱防止壁がなす角度により求めたもので、車体全体と壁のなす角度のことである。

5. 解析結果および考察

5.1 車両挙動

前述した要領により評価した逸脱防止壁の性能を表-1に、代表的な解析結果を図-9に示す。全ケースにおいて衝突車輪底部が壁上面よりも高く跳ね上げられる結果が得られたが、いくつかの衝突条件では入射角度が離散角度に転じることが確認された。最も厳しい解析条件である列

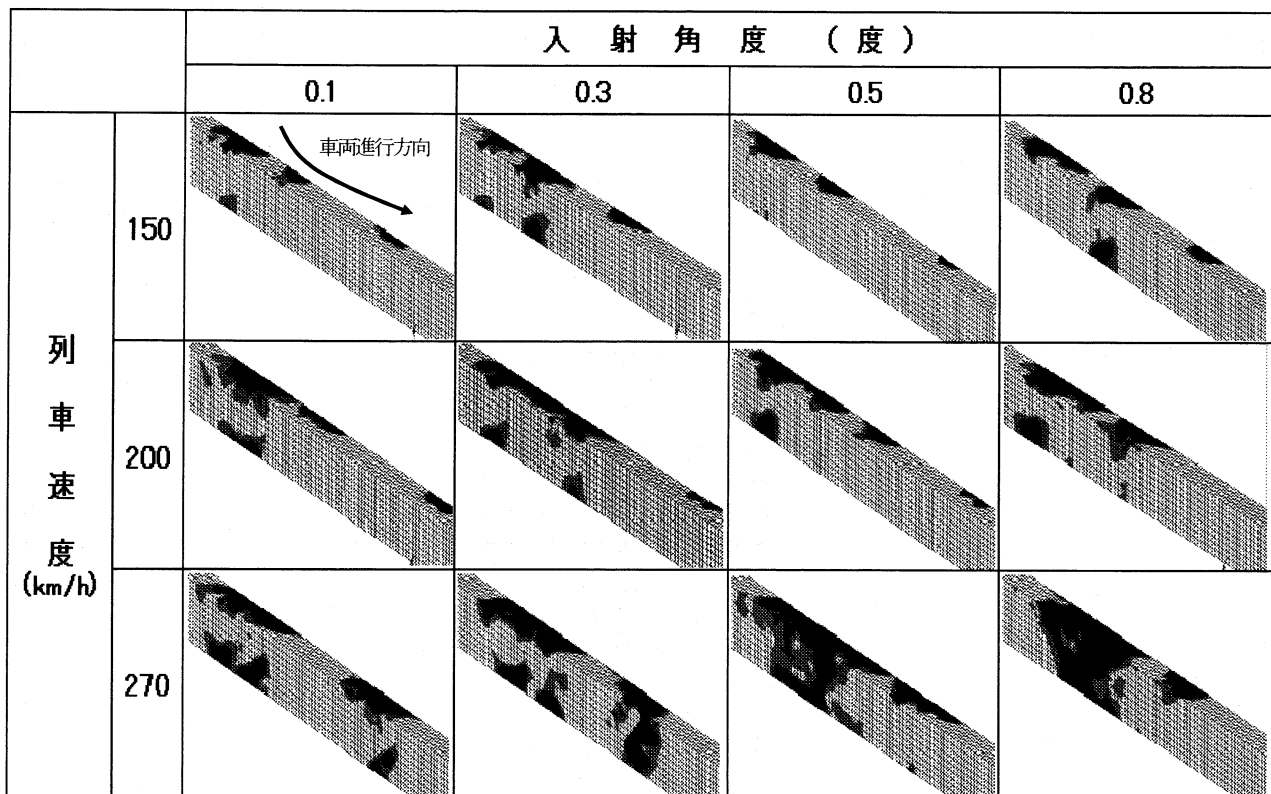


図-12 列車車両衝突後の相当塑性ひずみ分布

車速度 270km/h、入射角度 0.8 度の場合、車輪底部は壁上面よりも高く跳ね上がり、かつ、入射角度が離散角度に転じるほど低減しないことが確認され、壁は車両の逸脱を防止できないと判定した。一方、最も緩い解析条件である列車速度 150km/h、入射角度 0.1 度の場合には、車輪底部は壁上面よりも高く跳ね上がるが、入射角度が離散角度に転じたことから、壁は車両の逸脱を防止できると判定した。同様の考えに基づき評価すると、列車速度 270km/h のとき入射角度は 0.1 度まで、列車速度 200km/h のとき入射角度は 0.3 度まで、列車速度 150km/h のとき入射角度 0.5 度まで、壁は車両の逸脱を防止できると推測される。

また、図-9(a)および図-9(b)に示すように、列車速度 270km/h の場合、車軸が大きく変形していることが分かる。図の黒色部分は相当塑性ひずみが 0.2 を越えた部分であり、鋼材である車軸が損傷する可能性が高いと考えられる部分である。車軸中央および車軸と衝突車輪との接合部分に相当塑性ひずみが非常に大きな領域が認められ、衝突条件によっては車軸が損傷することが推測される。このことから、実際の衝突現象では車両の一部破壊など、より複雑な挙動をしないと考えられる。本解析では車両本体の破壊を考慮していないが、車両本体の破壊は一連の衝突挙動に影響を与えることが予想されるため、より正確な判定を実施するには、その影響を検討する必要がある。

次に、衝突車輪が跳ね上げられるまでの入射角度の減少程度を比較したところ、列車速度 270km/h、入射角度 0.8 度の解析結果を基準として、列車速度が約 60km/h 程度遅

くなるにつれて、入射角度は約 0.2 度大きく減少することが確認された。また、初期入射角度が 0.8 度から 0.1 度と小さくなるにつれて、衝突車両を跳ね返す可能性が高くなることが確認された。これらのことより、壁の逸脱防止の可能性は、列車速度および入射角度に大きく依存することが明確に認められる。

5.2 入射角度の影響

車輪重心位置の鉛直方向高さを図-10に示す。横太線は、逸脱防止壁上面高さである 235mm を示している。車輪重心位置の鉛直高さが横太線 (235mm) を越えた時に、衝突車輪は壁上面より上に跳ね上げられたと考えた。また初期入射角度 (0.8 度、0.5 度、0.3 度、0.1 度) によって線種を区別表示しており、この表示は図-11 と統一されている。図-10 より、車輪重心位置が壁上面より上に跳ね上げられるまでの時間は、270km/h のときが 50ms~100ms、200km/h のときが 100ms 程度、150km/h のときが 170ms 程度と推移することが分かる。これらのことから、車輪が跳ね上げられるまでの時間は、初期入射角度にはほとんど依存せず、列車速度の影響を強く受けるものと考えられる。

また、各列車速度での入射角度の変化を図-11 に示す。図より、入射角度の減少勾配は、初期入射角度や列車速度にかかわらず、ほぼ同程度の勾配であることが分かる。すなわち、入射角度の初期値が小さい方が、入射角度が離散角度に転じ易い傾向にあると言える。

図-10 および図-11 の結果から、車輪が跳ね上げられる

までの時間が長く（列車速度が遅く）、かつ、初期入射角度が0.8度から0.1度と小さくなるにつれて、壁は逸脱を防止できる傾向にあると考えられる。

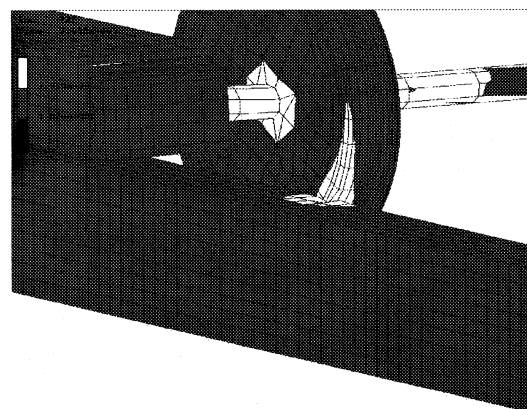
5.3 逸脱防止壁の破壊の可能性

図-12に列車車両が衝突した後の逸脱防止壁の相当塑性ひずみ分布（ミーゼスの降伏条件を仮定）を示す。車両は左上方向から右下方向に進行した。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。図の黒色部分は、相当塑性ひずみが 3500μ （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。図より、列車速度が速くなるにつれて、かつ入射角度が深くなるにつれて、破壊が予想される領域が大きくなっていることが分かる。特に270km/h、0.8度および0.5度の場合では、相当塑性ひずみが 3500μ を超える部分が、壁背面のかなり大きな領域まで達していることが確認できる。これらのことから、列車速度や入射角度がある程度厳しい条件での衝突が予想される箇所では、逸脱防止壁の形状や材料を改善し、破壊に耐える構造とする必要があると考える。

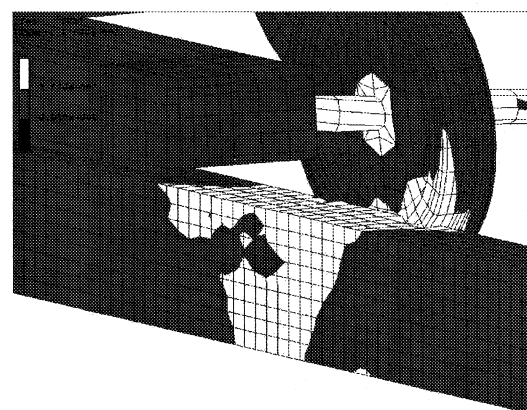
また、最も厳しい解析条件である列車速度270km/h、入射角度0.8度のときの、逸脱防止壁の変形の進行状況を調べた。ミーゼスの降伏条件を仮定した逸脱防止壁の相当塑性ひずみ分布を図-13に示す。図の白色部分は、相当塑性ひずみが 3500μ を超過した領域である。この図からも、逸脱防止壁は、衝突箇所の近傍において大きく変形することが認められる。本解析では、相当塑性ひずみが 3500μ を越えた後も一定のひずみ硬化特性を与え、圧壊が発生することを考慮していない。したがって、危険側の評価をしている可能性があるが、破壊領域が15ms以降拡大していないことから、15msまでの間に1回目の衝突による破壊の進行は概ね終了することが分かる。それ以降は、車両が跳ね返されたり跳ね上げられたりして壁と数回程度衝突するものの、車両は進行し、新たな箇所と衝突するため、1回目の衝突部位の変形はあまり進展しないと考えられる。よって、列車速度が270km/hと高速の場合においても、逸脱防止壁の破壊領域は壁の軸方向に対して局所的なものになると推測される。

6. 結論

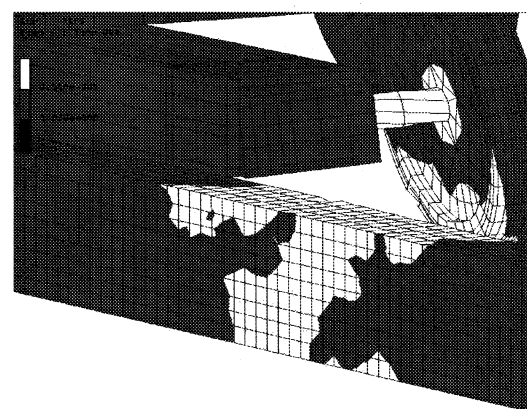
本研究では、逸脱防止壁の性能評価を目的として、鉄道車両が逸脱防止壁に衝突する場合の数値シミュレーションを試み、以下の結果が得られた。なお、本解析はいくつかの仮定のもとに計算しており、実車衝突実験や簡易なモデル実験等を実施して、本解析結果の妥当性を検討することが重要であると考えられる。



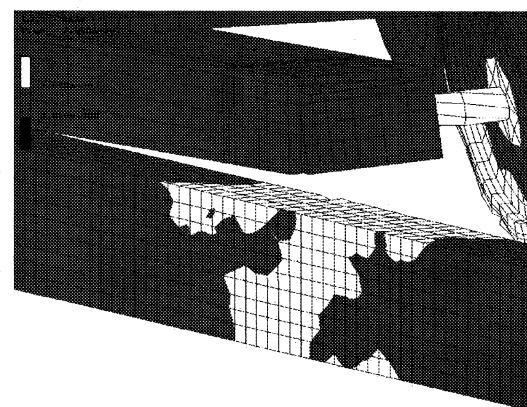
(a) 3ms



(b) 10ms



(c) 15ms



(d) 20ms

図-13 270km/h、0.8度時の相当塑性ひずみ分布

(1) 逸脱防止壁が車両の逸脱を防止できる衝突条件として、列車速度 270km/h で入射角度 0.1 度以下、列車速度 200km/h で入射角度 0.3 度以下、列車速度 150km/h で入射角度 0.5 度以下、と 3 通りの速度に対する限界の入射角度が推測された。

(2) 列車速度 270km/h の場合、車軸が大きく変形し、車軸が損傷すると推測される。

(3) 車輪が跳ね上げられるまでの時間は、列車速度の影響を受けるため、列車速度 270km/h、入射角度 0.8 度の解析結果を基準として、列車速度が約 60km/h 程度遅くなるにつれて、入射角度は約 0.2 度大きく減少することが確認された。

(4) 入射角度の減少勾配は、列車速度や初期入射角度によらずほぼ一定であることから、入射角度の初期値が小さい方が、入射角度が離散角度に転じ易い傾向にあると考えられる。

(5) 列車速度が 270km/h と高速の場合でも、逸脱防止壁の破壊範囲は壁軸方向に関して局所的なものになることが推察された。

今後、想定される最も厳しい衝突条件である列車速度 270km/h で入射角度 0.8 度の場合においても、本装置のみで列車車両の逸脱を防止できるように、使用材料や形状の改善策を検討したい。また、車両本体の損傷を考慮するこ

とにより、より実際の現象に近い衝突挙動の再現を試みる必要がある。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 園田佳巨，深澤仁，曾我部正道：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，応用力学論文集，Vol.10，2007 年 8 月
- 6) (社)日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，丸善，2004.3
- 7) 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.
- 8) Lawrence E. Malvern：Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium，1969.
- 9) 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.

(2008 年 4 月 14 日 受付)