

(29) 鉄道車両逸脱防止装置の耐衝撃性能評価に関する解析的研究

Analytical studies on the crashworthiness evaluation of train derailment stopper

園田佳巨*, 瀧上翔太**

Yoshimi Sonoda*, Shota Fuchigami**

*博士(工学), 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, 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)

Key Words: (steel derailment stopper, crashworthiness, 3-D elasto-plastic FE analysis)

キーワード: 鋼製逸脱防止装置, 耐衝撃性能, 3次元弾塑性有限要素解析

1. 序論

地震や列車の速度超過などの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, 車輪が脱線した際, 脱線後の逸脱を防止するために, レールの外側に鋼製の逸脱防止装置を設置する工法が考えられている. 従来, 構造物の衝撃問題に関する研究^{1,2)}は数多く報告されているが, 鉄道車両の脱線時に想定される高速で回転する車輪と構造物の衝突問題に関する研究^{3,4)}はあまり報告されていない. そこで本研究では, 鋼製逸脱防止装置の耐衝撃性能の評価を目的として, 3次元弾塑性衝撃応答解析により, 衝突時の鉄道車両と鋼製逸脱防止装置の挙動に関する定量的な考察を行った. 本研究で対象とする鋼製逸脱防止装置は, 複数の鋼製部材で構成される本体部が, コンクリート路盤にボルト接合により設置される構造形式で, その耐衝撃性能は本体の耐力だけでなくボルトの耐力にも大きく依存すると考えられる. よっ

て, 解析の第一段階として鋼製逸脱防止装置の静的及び動的荷重に対する破壊形態に関する考察を行った. 次に, 高速度で一定の入射角度で進行してくる逸脱車両に対し, 鋼製逸脱防止装置が, どの程度の耐衝撃性能を有するか, 基礎的な解析シミュレーションを試みた.

2. 鋼製逸脱防止装置の破壊形態に関する考察

2.1 解析条件

図-1に解析モデルを示す. 本装置が期待される逸脱防止性能を発揮するには, 各部材を締結するM16, M20ボルトの破断が生じる前に, 装置本体を支えるコンクリート路盤に破壊が生じないことが重要である. そこで, 鉄道車両と鋼製逸脱防止装置の衝突シミュレーションを行う前に, 本装置のコンクリート路盤締結部(以下, 締結部と称する)を対象に, 静的荷重及び衝撃荷重が作用した場合の破壊形態の検討を行い, コンクリート路盤に破壊が生じる

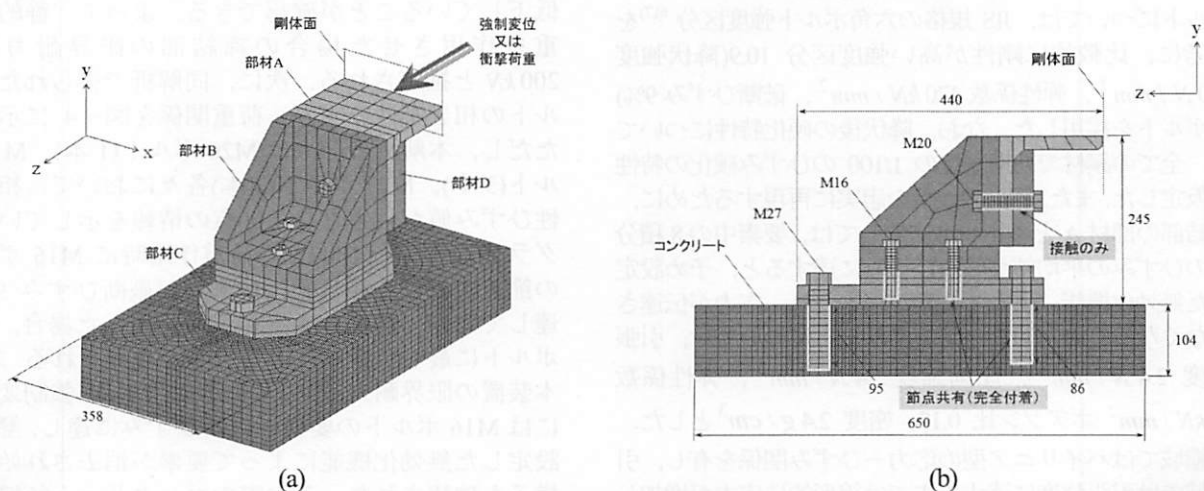


図-1 解析モデル(締結部)

単位: mm

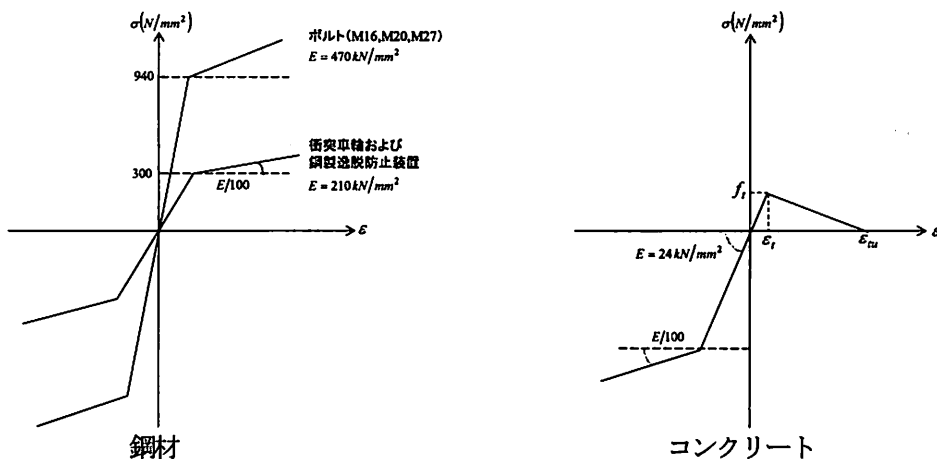


図-2 応力-ひずみ関係

可能性について検証した。本解析では、鋼製逸脱防止装置及びコンクリートを8積分点を有するソリッド要素を用いてモデル化し、コンクリート路盤部分の側面及び底面については全自由度を固定している。締結部は、図-1(a)に示すように、複数の部材(A~D)をM16, M20, M27の3種類のボルトにより締結する構造となっており、各ボルトには式(1)より得られる設計ボルト軸力³⁾を入力した。

$$N = \alpha \cdot \sigma_y \cdot A_{be} \quad (1)$$

ここに、 N は設計ボルト軸力、 α は降伏点に対する比率(0.8)、 σ_y はボルトの降伏強度、 A_{be} はねじ部の有効断面積を示す。表-1に各ボルトの設計ボルト軸力を示す。また、各ボルトと構造部材の付着特性については、M20ボルトは接触状態を、M16ボルトと部材C及びM27ボルトとコンクリート要素は完全付着を仮定した。また、M27ボルトのコンクリートへの埋め込み長は、前方86mm後方95mmとする。

2.2 材料特性

図-2に本解析で用いた構造材料の応力-ひずみ関係を示す。鋼製逸脱防止装置(ボルトを除く)の鋼材については、降伏強度 300 N/mm^2 、弾性係数 210 kN/mm^2 、ポアソン比 0.3、密度 7.8 g/cm^3 、破断ひずみ 20%とした。ボルトについては、JIS規格の六角ボルト強度区分⁹⁾を参考に、比較的剛性が高い強度区分 10.9(降伏強度 940 N/mm^2 、弾性係数 470 kN/mm^2 、破断ひずみ 9%)のボルトを採用した。なお、降伏後の硬化特性については、全ての鋼材で初期剛性の 1/100 のひずみ硬化の特性を仮定した。また、鋼材の破断を忠実に再現するために、締結部の部材Aと各ボルトに関しては、要素中の8積分点のひずみの平均値が破断ひずみに達すると、予め設定した無効化機能によって要素が消去され、応力が伝達されなくなるものとした。コンクリートについては、引張強度 24 N/mm^2 、圧縮強度 24 N/mm^2 、弾性係数 24 kN/mm^2 、ポアソン比 0.17、密度 2.4 g/cm^3 とした。圧縮域ではバイリニア型の応力-ひずみ関係を有し、引張域では引張強度に達するまでは線形的に応力が増加し、

表-1 設計ボルト軸力

ねじの呼び	α	$\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	$A_{be}(\text{mm}^2)$	$N(\text{kN})$
M16	0.8	940	157	118
M20			245	184
M27			459	345

その後は線形的に徐々に応力が低下していくような軟化挙動を示すものと仮定した。また、この材料モデルにおける終局引張ひずみ ϵ_{tu} は、式(2)より算出した。

$$G_f = \frac{1}{2} f_t (\epsilon_{tu} - \epsilon_t) h \quad (2)$$

ここに、 G_f は引張破壊エネルギー、 f_t は引張強度、 h は平均要素長さ、 ϵ_t は降伏ひずみを示す。なお、引張破壊エネルギー G_f は 0.1 N/mm とした。

2.3 静的荷重による破壊形態

まず、静的荷重による破壊形態について検討するために、締結部の部材Aに水平方向(図-1(a)に示すz軸方向)に強制変位(最大10mm)を与える静的解析を行った。本解析において、コンクリート路盤の破壊の可能性については、コンクリート路盤内の引張破壊領域の分布により評価した。図-3に締結部の静的荷重-変位関係を示す。この図より、4.7mm強制変位時に最大耐力を示し、その後は徐々に耐力が低下していることが確認できる。よって、静的に荷重を作用させた場合の締結部の限界耐力は約200kNと推定される。次に、同解析で得られた各ボルトの相当塑性ひずみ-荷重関係を図-4に示す。ただし、本解析の結果はM20ボルト(1本)、M16ボルト(3本)、M27ボルト(2本)各々において、相当塑性ひずみ値が最大となる節点の情報を示している。グラフより、約180kNの荷重作用時にM16ボルトの節点における相当塑性ひずみが破断ひずみ9%に達しており、静的な水平荷重が作用した場合、M16ボルトに最も負荷が生じることが推測される。また、本装置の限界耐力200kNを示す4.7mm強制変位時にはM16ボルトの要素が破断ひずみに達し、解析で設定した無効化機能によって要素が消去され始める様子も確認された。その際のコンクリート領域のひ

ひずみ分布を図-5に示す。コンクリートの引張特性については、図-2の応力-ひずみ関係と式(2)の破壊エネルギーの概念に基づき、引張軟化後に $\epsilon \geq 0.0083$ に達すると応力伝達機能を失うものとし、コンクリートが引張破壊した領域として黒色表示されるように設定した。しかし、図-5に見られるように、コンクリート表面上部とM27ボルト基部にひずみが卓越していることが確認されるが、いずれもコンクリートの終局引張りひずみには達していない。以上より、本研究で対象とする鋼製逸脱防止装置は、静的荷重が作用した場合にはM16ボルトが先行して破断し、コンクリート路盤に破壊が生じる危険性は無いことが認められた。

2.4 衝撃荷重による破壊形態

次に、締結部の部材Aに水平方向(図-1(a)に示すz軸方向)に衝撃荷重が作用した場合の破壊形態について検討した。図-6に部材Aに作用させた衝撃荷重-時間波形を示す。荷重継続時間については、鋼製逸脱防止装置の構造上の特性から、列車速度 270 km/h で進行する鉄道車両の1車輪が締結部を通過する時間が約 2 msec であることを根拠に設定した。最大衝撃力 P については、ボルト及びコンクリートの破壊形態を確認するため、想定される静的限界耐力よりも大きい 500 kN とした。図-7に各ボルトの相当塑性ひずみ-時間関係を示す。最大衝撃

力作用直後(1 msec 経過時)にM16ボルトの節点における相当塑性ひずみが破断ひずみ9%に達しており、静的荷重を作用させた場合と同様に、M16ボルトに最も荷重が生じることが推測される。最大衝撃力作用時のコンクリート領域のひずみ分布を図-8に示す。M27ボルト締結部の側面にひずみが卓越していることが確認されるが、終局引張りひずみには達しておらず、破壊面を形成するような現象は確認されなかった。従って、本研究で対象とする鋼製逸脱防止装置は、衝撃荷重が作用した場合にも、静的解析と同様にM16ボルトの破断が先行し、コンクリート路盤に破壊が生じる危険性は無いことが認められた。

3. 鉄道車両の衝突シミュレーション

3.1 解析条件

図-9に解析モデルの全体図を示す。鉄道車両は先頭の1車両のみをモデル化し、車体、台車、輪軸、車輪に関しては、それらが衝突箇所となる可能性が無いことから弾性体とみなした。車体部分には、乗車人員の重量を加えた実車重量を等分布荷重として与え、台車、輪軸、車輪には各部位の重心位置に鉛直集中荷重として与えた。鋼製逸脱防止装置に衝突する車輪と装置本体に関しては、衝突解析の精度を向上させるために、形状などを忠実にモデル化し

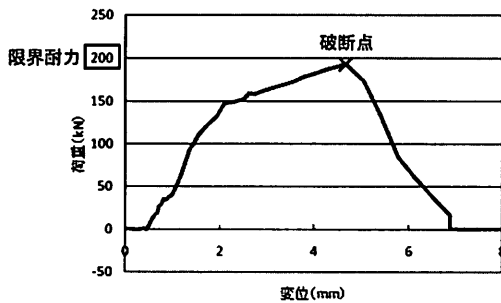


図-3 静的荷重-変位関係

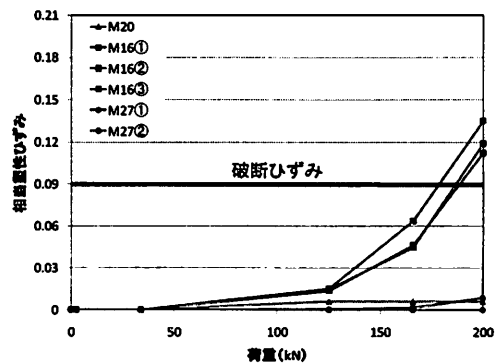


図-4 相当塑性ひずみ-荷重関係(静的荷重)

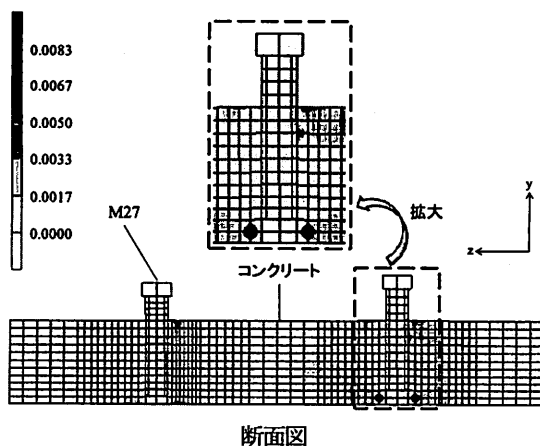


図-5 コンクリートの引張軟化時におけるひずみ分布図
(4.7 mm 強制変位時)

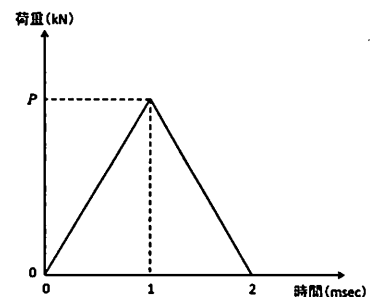


図-6 衝撃荷重-時間波形

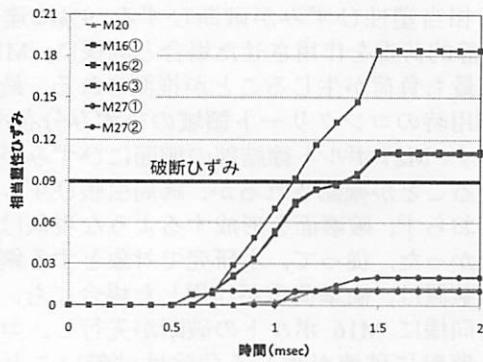
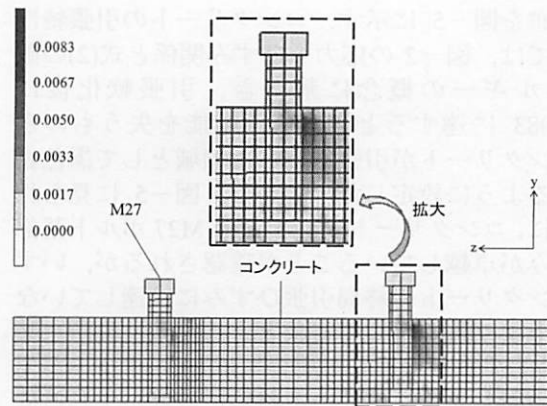


図-7 相当塑性ひずみ-時間関係(動的荷重)



断面図

図-8 コンクリートの引張軟化時におけるひずみ分布図 (最大衝撃力作用時)

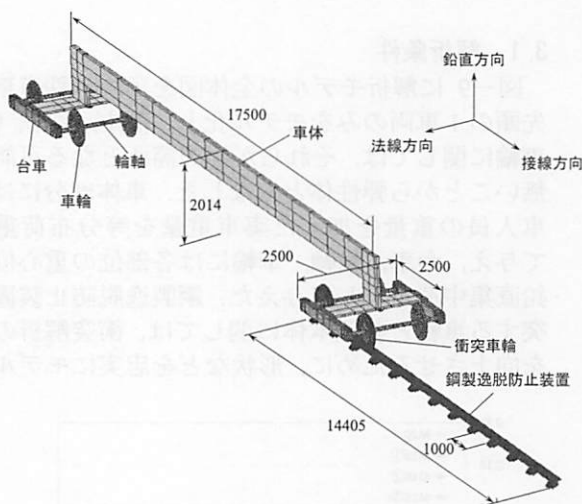


図-9 解析モデル全体図

単位: mm

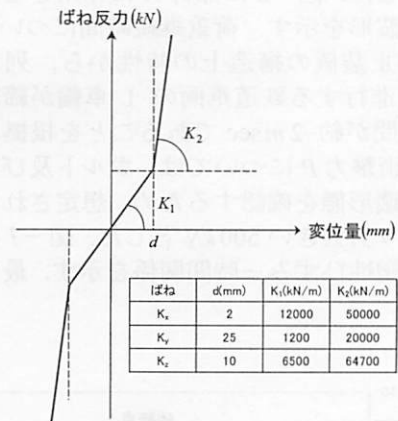


図-10 ばね特性

た弾塑性体とし、自重は各要素に対する物体力として設定した。鋼製逸脱防止装置については、2.で行った検討によって、ボルトの破断に先行してコンクリートの破壊が生じることはないと考えられることから、計算時間短縮のため図-1に示す部材Cとコンクリート路盤及びそれらを締結する M27 ボルトは剛体として簡易にモデル化した。なお、鋼製逸脱防止装置の全長は約 14.4 m とし、締結部が 1 m 間隔で設置されることを仮定した。衝突車輪に関しては、実物の形状を忠実に再現し、直径 921 mm、幅 125 mm、重量 4.8 kN の鋼製車輪モデルを作成した。また、輪軸と台車の間には実車両の足回りの特性を反映させるために、接線方向、鉛直方向、法線方向にそれぞれ K_x 、 K_y 、 K_z の緩衝ばねを挿入している。本解析で用いた緩衝ばねの特徴として、初期のばね定数 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で K_2 に増大するような非線形な特性を考慮している(図-10 参照)。

3.2 材料特性

衝突車輪以外の車両については、弾性体としてモデル化している。衝突車輪の材料特性については、鋼製逸脱

防止装置(ボルトを除く)に用いた鋼材の応力-ひずみ関係と同様の特性を仮定した(図-2 参照)。

3.3 衝突モード及び解析ケース

本研究では、鉄道車両が一定の入射角度で鋼製逸脱防止装置に衝突する状態を想定し、装置に対して斜め方向から入射する実速度を列車速度と定義する。列車速度には、新幹線の最大営業速度に相当する 270 km/h を仮定した。なお、車両の入射角度については、後輪がレール上にあり、前輪部分だけが脱線した状態で衝突すると考えると、車両寸法及びレールと鋼製逸脱防止装置間の距離の関係から、最大入射角度が約 0.3° と概算できる。そこで、0.3° と 0.1° の 2 種類の入射角度を想定し、270 km/h の速度で車両が衝突した場合の本装置の車両逸脱防止性能と耐衝撃性能について検証した。

3.4 衝突シミュレーションに関する考察

(1) 発生衝撃力に関する検討

図-11 に列車速度 270 km/h、入射角度 0.3° の場合に部材 A に作用する衝撃力-時間関係を示す。この図より、車輪が衝突直後に瞬間的に約 300 kN の最大

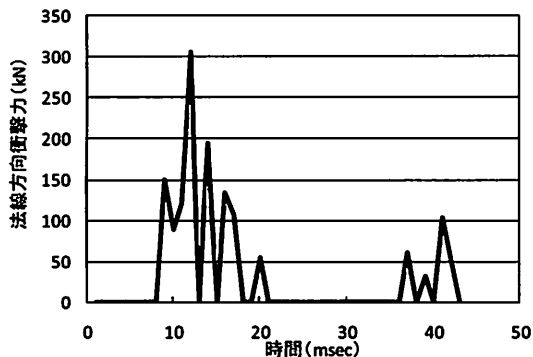


図-11 衝撃力-時間関係

衝撃力が発生することが確認された。最大衝撃力の荷重継続時間は非常に短時間であるため、簡単な比較はできないが、2.の検討で求めた締結部の静的限界耐力(M16ボルトの破断耐力)が約200kNであることから、列車速度270km/h、入射角度0.3°で車両が衝突した場合には、M16ボルトに破断が生じる可能性があると考えられる。なお、衝撃力-時間関係には瞬間的に発生衝撃力がゼロになるなど、時間的な変動が激しいことが分かる。これは、本研究で対象としている現象が、鋼製の車輪が高速で擦り合い、被衝突物側の鋼製逸脱防止装置には顕著な塑性変形が生じるなど、非常に複雑な動的接触挙動であることに起因している。この種の現象を精度良く評価するには、接触解析が高精度であることが不可欠であると考えられるので、今回得られた衝撃力は、鋼製逸脱防止装置の破壊の可能性を検討する際の一次評価に用いる方が望ましいと考えられる。発生衝撃力を指標に本装置の破壊の可能性を評価する場合には、より精度が高い衝撃力の算定方法を検討する必要があると考えられる。

(2) 部材Aの破損状況

図-12に部材Aの破損状況を示す。図中の黒色部分は、鋼材の相当塑性ひずみが20%を超えた箇所

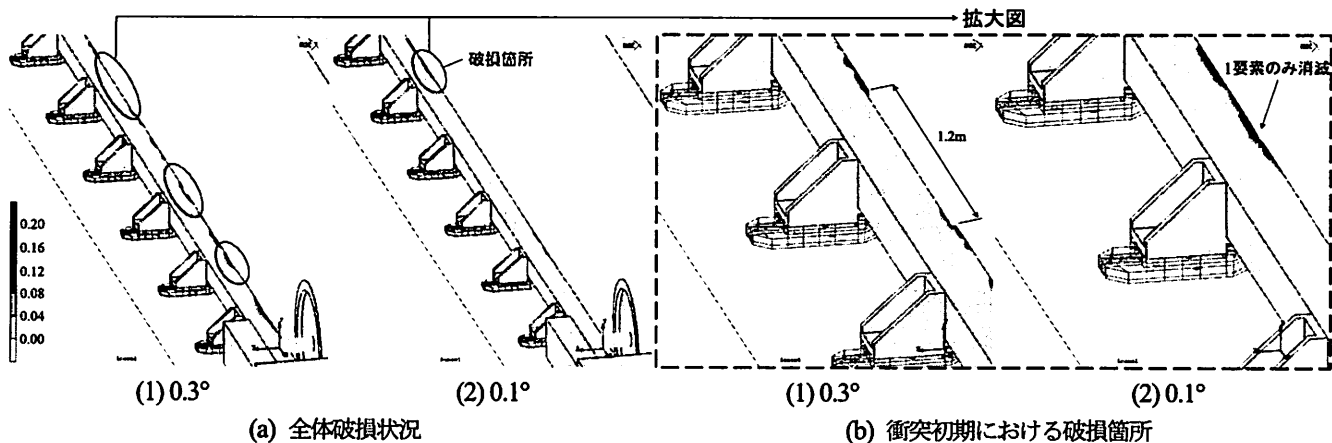


図-12 部材Aの破損状況

であり、図-12(a)の丸枠で示す部分は要素が消去された領域である。この図より、入射角度が0.3°の場合に損傷領域が広範囲に及んでいるが、鋼製逸脱防止装置全体に破壊を招くような過度な塑性変形は生じておらず、車両自体は本来の進行方向へ円滑に軌道を修正されていることが確認できた。また、図-12(b)に示す拡大図より、衝突初期における破損箇所は入射角度が0.3°の場合、車両進行方向に沿って部材A領域内の最前列の要素群が約1.2mにわたり消滅していることが確認できる。一方、入射角度が0.1°の場合は、1個の要素が消滅したのみであり、部材Aの損傷度に衝突車両の入射角度が与える影響が顕著に認められた。なお、いずれの衝突条件においても部材Aの顕著な塑性変形により衝撃エネルギーが吸収され、車両の入射角度は徐々に減少していく傾向にあり、車輪が鋼製逸脱防止装置を乗り越える可能性は小さいと考えられる。

(3) 締結ボルトの塑性ひずみ応答

図-13にM20ボルトの相当塑性ひずみ-時間関係を示す。図中のデータは、衝突領域内の全てのボルトを示しており、各ボルトにおいて相当塑性ひずみ値が最大となる節点の情報を示している。この図より、M20ボルトについては、いずれの解析ケースにおいても破断ひずみには達せず、車両の衝突に対して十分な耐力を有していることが確認できる。また、入射角度が減少すると、ボルトの応答ひずみは大幅に低減されており、僅かな入射角度の相違がボルトの損傷度に大きく影響することが認められた。図-14にM16ボルトの相当塑性ひずみ-時間関係を示す。この図より、2.の破壊形態に関する考察で最も耐力が小さかったM16ボルトについて、入射角度が0.3°と厳しい条件でも相当塑性ひずみの最大値が6.6%程度にとどまることが確認できた。従って、2.の締結部に想定される静的及び衝撃荷重を作用させた簡易な考察では、M16ボルトの破断が懸念されたが、今回の衝突シミュレーションの結果によると、M16ボルトに破断が生じる可能性は小さく、

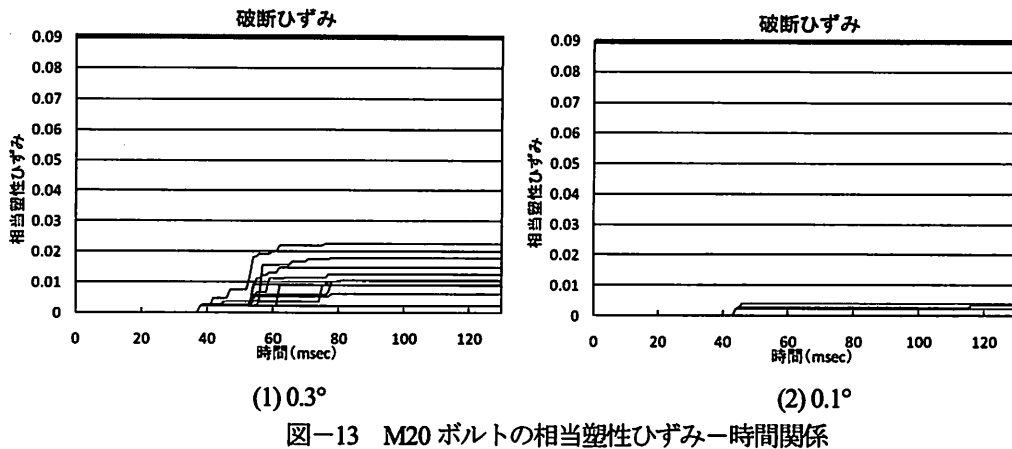


図-13 M20 ボルトの相当塑性ひずみ-時間関係

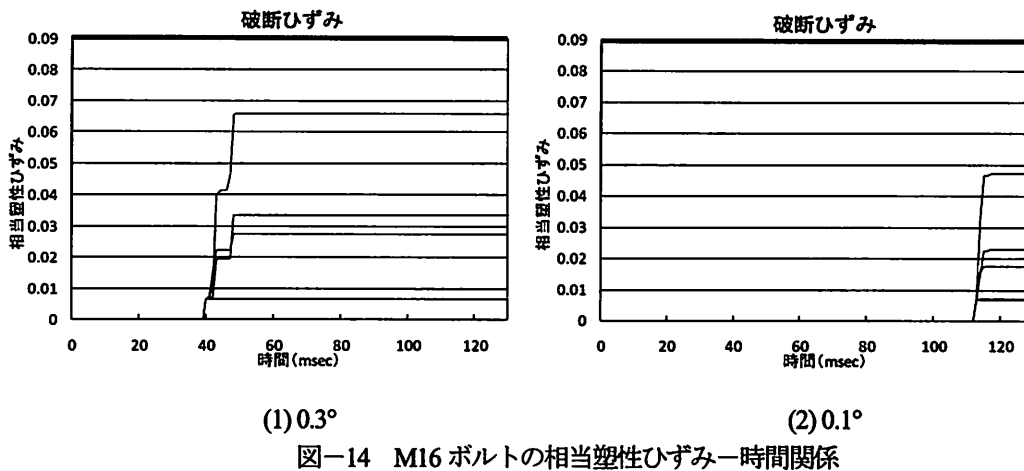


図-14 M16 ボルトの相当塑性ひずみ-時間関係

逸脱防止構造全体として十分な耐力を有していることが推察された。また、入射角度が 0.1° の場合、0.3° の場合と比較して、相当塑性ひずみの立ち上がりが遅れていることが確認できる。これは、入射角度の減少で、M16 ボルトのせん断変形に寄与すると考えられる車両進行方向に直交する成分の荷重が低減したためと考えられる。

4. 結論

本研究は、鋼製逸脱防止装置の耐衝撃性能と逸脱防止性能の把握を目的とした基礎的な検討を行ったもので、得られた成果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 締結部に静的及び衝撃荷重を作用させて破壊形態について検証した結果、いずれの解析においても M16 ボルトに最も大きな負荷が生じ、最初に破壊することが分かった。したがって、M27 ボルトの引抜きなどによるコンクリート路盤の破壊が生じることはないと考えられる。
- (2) 部材 A の損傷度は、車両の入射角度が大きくなるほど顕著に増加し、衝突箇所近傍では部材に一部破損する可能性があることが認められた。しかし、想定した最大入射角度 0.3° の場合でも、部材 A が全体破壊を起こすような過度な塑性変形が生じることはなく、衝突車両も円滑に軌道修正がなされることが

確認された。

- (3) 車両衝突シミュレーションによれば、いずれの解析ケースにおいても破断ひずみに達するボルトは存在せず、構造全体として車両の衝突に対して十分な耐力を有していることが推察された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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, pp273-280, 2007.8
- 4) 洲上翔太, 園田佳巨: 鉄道車両の脱線により鋼製逸脱防止装置に作用する衝撃力に関する解析的研究, 第 14 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp579-582, 2007.12
- 5) 土木学会, 鋼構造委員会: 高力ボルトの摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案), 鋼構造シリーズ 15, 丸善, 2006
- 6) 小栗富士雄, 小栗達男: 標準機械設計図表便覧, 改新増補 4 版, 1998
- 7) 大西清: JIS にもとづく機械設計製図便覧, 1998