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*, 渕上翔太**, 綿島理晃** Yoshimi Sonoda*,Shota Fuchigami**,Toshiaki Watajima**

*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)

Recently, the risk of derailment accident caused by over-speed, earthquake and the other reasons is concerned. If bullet trains derail and collide against structures such as tunnel and building at high-speed, the unimaginable catastrophic accident will occur. Thus, as one of the effective measure for safety, the steel derailment stopper is proposed. But the collision phenomenon between a rotating wheel and steel derailment stopper could be extremely complex problem. From these backgrounds, this study aims at evaluating crashworthiness of steel derailment stopper by using 3-D elasto-plastic FE analysis. From the results of this study, it is confirmed how much train velocity and incident angle would affect critically crashworthiness of derailment stopper.

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

近年、鉄道車両技術の発展による営業速度の増加や路 線が市街地内を通行している状況などにより,列車が速 度超過や地震等により脱線し、その後甚大な被害を招く という事態が生じている.このような不測の事態によっ 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(図-1参照).同装置を用いて鉄道車両の逸脱を防 止し、進行方向を修正するためには、鉄道車両の衝突時 の挙動を熟知し、十分な耐衝撃性能を有する構造形式を 採用する必要がある.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, 汎用非線形解析ソフトウェア MSC.Marc2005r3 を用 いた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分が、コンクリート路盤 にボルト接合により締結される構造形式で、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基本的な耐荷能力を把握するため に静的解析を行い、その上で動的荷重による破壊形態に ついて考察を行った.次に、実際の高速鉄道の走行・脱 線時の状態を想定し、高速度で一定の入射角度を有して 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

本研究で対象とする鋼製逸脱防止装置は、コンクリー ト路盤にボルト接合により締結された構造形式で、主に 地震動による脱線を想定したもので、将来的には全線へ の適用が考えられている. そのため、本装置が十分な逸 脱防止性能を有するには、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構造物(以 下, 締結装置と称する)を対象に, 静的荷重および衝撃 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可能性について検証した. 図-2 に締結装置の解析モデルを示す.本解析では、鋼製逸 脱防止装置およびコンクリートを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 側面および底面については全自由度を固定している. 締 結装置は、図-2(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 となっていることから、各ボルトに式(1)より得られる設 計ボルト軸力5を入力した.設計ボルト軸力に関しては, 各部材とボルト頭部の接触面に所定の設計ボルト軸力 と同等の反力が作用するように、各ボルトのねじ部の要 素に初期応力を入力した.表-1 に各ボルトの設計ボル ト軸力を示す.

 $N = \alpha \cdot \sigma_{y} \cdot A_{be}$ (1) N:設計ボルト軸力 ア - 際化トレストレオスル 家(2.2)

α:降伏点に対する比率(0.8)

 σ_y :ボルトの降伏強度

```
Abe: ねじ部の有効断面積
```

また,各ボルトと構造部材の付着特性については, 部材AとBがボルト軸力による支圧接合であること からM20ボルトは接触状態を,部材BとCおよび部 材Cとコンクリートはねじ締結されていることか ら,M16ボルトと部材Cおよび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. 表一1 設計ボルト軸力

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

2.2 材料特性

図-3 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)の鋼材の材料 特性については,降伏強度 300N/mm²,弾性係数 210 kN/mm² ポアソン比 0.3, 密度 7.8g/cm³, 破断ひずみ 20% とした. ボルトの材料特性については、JIS 規格の六角ボ ルトの強度区分^{6,7)}を参考に、比較的に剛性が高い強度区 分10.9(降伏強度940N/mm², 弹性係数210kN/mm², 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,既往の研究などでも鋼材の塑性モデルに 良く用いられる値として、初期剛性の 1/100 の剛性でひ 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、 締結装置の部材 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 トの材料特性については、引張強度を2.4N/mm²、圧縮強 度を 24N/mm², 弾性係数 24kN/mm², ポアソン比 0.17, 密度 2.4g/cm³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するものとし、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

$$G_f = \frac{1}{2} f_t \left(\varepsilon_{tu} - \varepsilon_t \right) h \tag{2}$$

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 0.1N/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関する検討を行った.なお,車両が線路外に逸脱する際には,車輪が逸脱防止装置を図-2(a)に示す Z 軸方向に押し出





して破壊することが想定されるので, 締結装置の部 材AにZ方向に強制変位(最大10mmまで)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-4 に締結装置の静的荷重-変位関係を示す.こ の図より、4.0mm 強制変位時において最大耐力を示 し、その後はM16ボルトの破断が進行し、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装置の限界耐力は 168.5kN 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分布を図-5 に示す.本装置 が最大耐力を示す4.0mm 強制変位時に部材 B と部材 C の水平方向の相対的なずれに伴うせん断力によ り, 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消去され始める様子が 確認された. その際のコンクリート断面領域のひず み分布を図-6 に示す. コンクリートの引張特性に ついては、図-3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 $\epsilon \ge 0.0083$ に達すると応力伝達機能を失うものとみなし、コン クリートが引張破壊した領域として灰色で表示され るように設定した. 図-6 より、コンクリート表面



図-5 各ボルトの相当塑性ひずみ分布図



図-7 衝撃荷重-時間波形

上部とM27ボルト基部の一部の要素が終局引張ひず みに達していることが確認できる.しかし,コンク リート内部に破壊面を生じるような破壊形態は見ら れなかった.以上のことから,本研究で対象とする 鋼製逸脱防止装置は,静的な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 盤に破壊面を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、締結装置の部材AにZ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-7に 部材Aに作用させた衝撃荷重一時間波形を示す.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270km/hで進行してくる鉄道 車両の車輪が締結装置を通過する時間が約2msecで あることを根拠に設定した.最大衝撃力Pについて は、ボルトおよ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 500kNとした.なお、本研究におけるすべての動的 解析では、逸脱防止装置の耐力を簡易にかつ安全側 に評価するためにひずみ速度効果を考慮しない解析 を行った.図-8に各ボルトの相当塑性ひずみ分布



図-8 各ボルトの相当塑性ひずみ分布図

を示す.最大衝撃力作用直後に M16 ボルトの破断が 確認された.また,最大衝撃力作用時のコンクリー ト断面領域のひずみ分布を図-9 に示す.図より, M27 ボルト締結部の側面の要素が終局引張ひずみに 達していることが確認できるが,コンクリート内部 に明確な破壊面を生じるような破壊形態は見られな かった.したがって,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 ト路盤に破壊面を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

2.の解析により、締結装置の耐荷力と破壊形態を 把握することができた.ここでは、2.の結果をもと に、鉄道車両が鋼製逸脱防止装置に衝突した際の挙 動を調べ、本装置の逸脱防止性能を評価するために、 シミュレーション解析を試みた.

3.1 解析条件

図-10 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(右前輪を除く)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右前輪(以下、衝突車輪と称す る)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.また、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 ート路盤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-2 に示す部材 C とコンクリート路盤およ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14.4mとし、締結装置が1m 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 921mm、幅 125mm, 重量 4.8kN の鋼製車輪モデルを作成した. 衝突解析において車輪に与える初期条件は、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無いと仮定) を、車輪に変形が生じない(領域内の節点に相対並 進・回転速度が生じない)ように、全節点に個々の位 置を考慮して求めた値を入力した.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, K, K₂の緩衝ばねを挿入している.なお、本解析で用い た緩衝ばねには,鉄道総合技術研究所(構造力学研究 室)の助言をもとに、初期のばね定数 K₁ 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。 に増大するような非線形な特性を考慮している(図





-11, 図-12参照).

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-3参照).

3.3 衝突モードおよび解析ケース

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 (図-13 参照). なお本解析では、車輪がレール上か ら脱線して次第に落下しながら鋼製逸脱防止装置に 衝突することを考慮するため、解析開始時は車輪底 部が路盤から 9mm の高さにあるとみなしている.列 車速度には、新幹線の営業速度である 300km/h, 270km/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、車両寸法およびレ 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°と考えると、そこで解析ケース として、列車速度および入射角度をそれぞれ 300km/h、0.3°と 270km/h、0.1°



の3ケースの解析を行い、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.なお、本研究で は逸脱防止装置の基本性能を把握するために最初の 衝突時の現象を再現することを目的としており、最 前軸の1車輪が部材Aに衝突することを想定した解 析を行った.

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-14 に列車速度 270km/h,入射角度 0.3°の場合 に鋼製逸脱防止装置の衝突部材(部材 A)に作用する 衝撃力-時間関係を示す.図-2の締結装置モデル において,X方向に作用する最大衝撃力が 342kN,Z 方向に作用する最大衝撃力が 334kN となり,車両進 行方向および進行方向に対して水平直交成分の荷重 が卓越することが確認された.また,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装置の静的 限界耐力(M16 ボルトの破断耐力)が 168.5kN 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,本解析においては, 衝突車輪および鋼製逸脱防止装置の塑性変形を考慮 した接触判定計算を行い,衝撃力の算定を行ったが,



(b) Y 万回 図-14 衝撃力一時間関係(270km/h,0.3°)

衝撃力ー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ためには、解析ソフトの接触 判定計算が高精度であることが不可欠であると考え られるので、今回のシミュレーションで得られた衝 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.発生衝撃力を用いて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.また、本解析 ケースにおける台車と輪軸の接触に関しては、接線 方向のみ、ばね定数 K2の領域に達しており、両者が 接触する可能性があることが認められた.

(2) 部材 A の破損状況

鋼製逸脱防止装置の中で車輪の衝突を直接受ける 部材Aに関しては、要素中の8積分点におけるひず みの平均値が破断ひずみ 20%に達すると、その要素 は破壊(無効化機能により消去)し、応力を伝達しな くなるものと仮定した. 図-15 に 130msec 経過時に おける部材 A の破損状況を示す. 図中の灰色部分は, 鋼材の相当塑性ひずみが 20%を超えた箇所であり、 赤枠で示す部分は要素が消去された領域である. 図 より, 衝突条件が厳しくなるに伴い, 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 ることが確認された.また、図-16に示す初期衝突 位置における部材 A の破損状況より, 破損箇所の領 域が 300km/h, 0.3° は 1.6m, 270km/h, 0.3° は 0.6m, 270km/h, 0.1°は1要素のみとなり、部材 A の損傷 度に関して衝突車両の列車速度および入射角度が与



図-15 部材 A の破損状況(130msec 経過時)



図-16 初期衝突位置における部材 A の破損状況



える影響が顕著に認められた.

(3) 締結ボルトの塑性ひずみ応答

M16, M20 ボルトに関しても, 要素中の 8 積分点 におけるひずみの平均値が破断ひずみ 9%に達した 場合に無効化機能により消去し, 応力を伝達しなく なるものと仮定した. 図-17, 図-18 に M20 ボルト および M16 ボルトの相当塑性ひずみ-時間関係を示 す. ただし, 図中のデータは衝突領域内に存在する 各々のボルトにおいて, 相当塑性ひずみ値が最大と なる節点の情報を表示したものである(図-19 参 照). いずれのボルトにおいても, 図-15 に示す部 材 A の破損箇所近傍における締結部のボルトが大き な相当塑性ひずみ値を示すことが確認された. 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. M16 ボルト については、入射角度の増加に伴い相当塑性ひずみ 値が顕著に増大することが分かった. 270km/h, 0.3° の場合には、図-15に示す3番目の破損箇所近傍で 相当塑性ひずみの最大値が8.8%と破断ひずみに近い 値が得られた.しかし、300km/h、0.3°の場合には 全体のひずみ応答は大きな値を示すが、同様の現象 は確認されなかった.よって、車両の入射角度が同 じであれば、列車速度が多少変化しても M16 の損傷 度に大差はないことが推察される.また、今回の衝 突シミュレーションでは、2.の破壊形態に関する考 察で最も耐力が小さかった M16 ボルトについては, 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 8.8%程度にとどまることが確認できた. したがって, 2.の締結装置に想定衝撃荷重を作用さ 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,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.

(4) 衝突車両の挙動に関する考察

図-20に衝突車輪における車輪重心位置-時間関 係を示す、本解析では、車輪がレール上から脱線し て路盤に落下しながら鋼製逸脱防止装置に衝突する ことを考慮するため,解析開始時は車輪底部が路盤 から 9mm の高さにあるとみなしており, 解析開始時 の衝突車輪の重心位置を基準点としている.図より, 列車速度および入射角度の増加に伴い、車輪重心位 置の上昇距離も大きくなることがわかった.特に, 300km/h, 0.3°の場合には、衝突直後に車輪重心位 置が 2.6mm 上昇することが確認されるが、その後は 次第に低下して, 車輪が鋼製逸脱防止装置を乗り上 げるような挙動は示さないと考えられる. また, い ずれの解析ケースにおいても車輪重心位置が 9mm 以上低下しているが、これは台車と輪軸間に挿入し ている緩衝ばねの作用により、衝突の衝撃で車輪が 傾いたためと考えられる. 図-21 に車両の入射角度 -時間関係を示す、いずれの解析ケースにおいても、 入射角度は徐々に減少するが,列車速度および入射 角度の増加に伴い、入射角度の減衰率が大きくなる ことが確認できる.この要因として、衝突により生 じた構造全体の塑性ひずみエネルギーが、300km/h, 0.3°の場合には 270km/h, 0.3°の場合の 1.1 倍, 270km/h, 0.3°の場合には 270km/h, 0.1°の場合の 3.1 倍となり、衝突条件が厳しくなるとともに、顕著 な塑性変形が生じるために衝撃エネルギーが吸収さ れたことによると考えられる.



図-21 車両の入射角度-時間関係

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) 締結装置に静的およ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) 実車両の衝突を想定したシミュレーションにより, 部材Aには車両が衝突した場合に,相当塑性ひずみ が20%を超える領域が存在し,衝突箇所近傍で部材 に一部破損する可能性があることが認められた.
- (3) 部材 A の損傷度は、車両の列車速度および入射角度 が大きくなるほど顕著に増加す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.
- (4) 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.なお、入射角度 の増加に伴い、ボルトの応答ひずみも急増する傾向 にあることから、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考えられる.
- (5) 車両の入射角度が同じであれば、列車速度が多少変 化しても M16 の損傷度に大差はないことが推察さ れる.
- (6)本研究で対象とする鋼製逸脱防止装置は、いずれの 衝突条件においても車両の入射角度は徐々に減少し ていくことが認められ、車輪が鋼製逸脱防止装置に 乗り上げる可能性は小さいと考えられる。

なお、本研究で対象とする車輪の高速衝突は容易に実

験できるものではなく,解析の精度を検証することは現時点では困難である.よって,今後の課題として,円盤状の鋼材を用いた模型による衝突実験などで解析精度の検証を行う必要があると考えている.

謝辞:本研究を行うにあたり,財団法人鉄道総合技術研 究所構造力学研究室の方々に貴重な意見を賜りました. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 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,曽我部正道: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)渕上翔太,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)小栗冨士雄,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 (2008 年 9 月 18 日受付)