

(30) 鉄道車両の衝突に対するRC防護壁の耐荷性能に関する基礎的考察

A fundamental study on the crashworthiness of a RC derailment wall under a collision of railroad vehicle

園田佳巨*, 綿島理晃 **
Yoshimi Sonoda*, Toshiaki Watajima**

*博士(工学),九州大学教授,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:(RC protective barrier, crashworthiness, 2-D elasto-plastic FE analysis)

キーワード: RC 防護壁, 耐衝撃性能, 2次元弾塑性有限要素解析

1. 序論

近年,鉄道車両が速度超過や突風,地震などの不測の事態により脱線した場合,停止するまでの間に軌道を逸脱し,車両横転や転覆あるいは高架橋からの落下などの大惨事を招く危険性が指摘されている.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安全対策として,まず,車体に逸脱防止ガイドを取り付け(逸脱防止ガイド),次にレールの外側に逸脱防止装置を設置し(逸脱防止装置),さらにその外側に,鉄筋コンクリート製の防護壁(RC防護壁)を設置する3段階の逸脱防止システムが提案されているが,脱線時の車両の挙動には様々な可能性が想定され,システム全体の性能評価は非常に困難であると考えられる.そこで,本研究では車両の転覆や高架橋からの落下を防止するために設けられるRC防護壁単体に着目し,車体との衝突が発生した場合の耐衝撃性能を把握する基礎的な考察を試みる.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車両と構造物の衝突問題に関する研究は殆ど見られない.本研究では,RC防護壁の耐衝撃性能の簡易解析による評価を目的として,平面ひずみ状態を仮定した2次元弾塑性衝撃応答解析により,耐荷性能に関する定量的な考察を行った.

具体的には,RC防護壁に静的荷重が作用した場合の破壊形態に関する考察を行い,その後に新潟県中越地震時の鉄道車両の挙動(脱線現象)を振動解析により推定し,車両が脱線・衝突した際の防護壁の耐衝撃性能について基礎的な解析シミュレーションを試みた.

2. 防護壁の静的耐力評価

2.1 解析モデルおよび解析条件

防護壁の衝撃荷重に対する耐荷性能を検討する前に,静的耐力に関する解析を行った.静的解析では,防護壁上端に載荷部に局所破壊が生じないように剛体を配置し,剛体を水平に強制変位させた際の反力と防護壁上端の水平変位の関係を求めた.

図-1に防護壁の解析モデルを示す.防護壁は弾塑性体でモデル化し,RC構造としている.主鉄筋に関しては,D32,スターラップに関しては,D19の鉄筋を採用した.本解析では,防護壁のコンクリートおよび鋼材は4積分点を有する平面ひずみ要素を用いてモデル化し,奥行き長を150mmに設定し,全要素に対して自重を物体力として与えている.境界条件としては,防護壁の側面および底面の節点で全自由度を拘束している.本解析で用いた鋼・コンクリート材料の応力-ひずみ関係を図-2に示す.主鉄筋に関しては降伏強度 300N/mm^2 ,弾性係数 210kN/mm^2 ,ポアソン比0.3,密度 7.8g/cm^3 ,破断ひずみ20%とした.また,スターラップに関しては,防護壁内に150mm間隔で配置されていることを考慮し,体積換算で等価剛性を主鉄筋の1/10とした.なお,全ての鋼材で降伏後の硬化特性については,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.コンクリートの力学特性については,引張強度を 3N/mm^2 ,圧縮強度を 30N/mm^2 ,弾性係数 20kN/mm^2 ,ポアソン比0.17,密度 2.4g/cm^3 とした.圧縮域ではパイリニア型の応力-ひずみ関係を有し,圧縮強度以降は初期剛性の1/100の剛性でひずみ硬化すると仮定した.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み ε_3 は,式(1)より算出し,軟化勾配を 1000N/mm^2 とした.

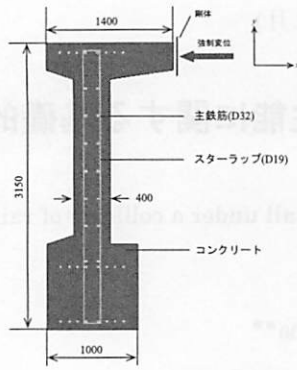
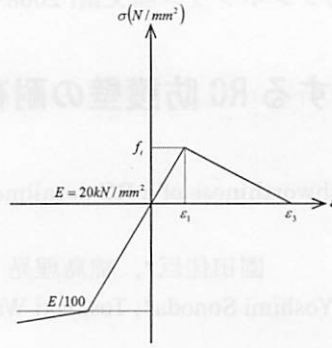
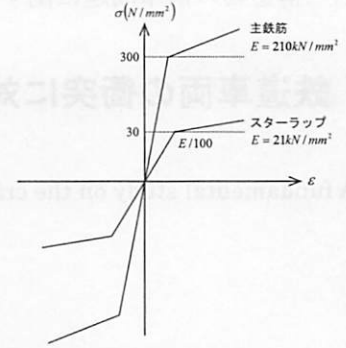


図-1 防護壁モデル 単位:mm



コンクリート



鋼材

図-2 応力-ひずみ関係

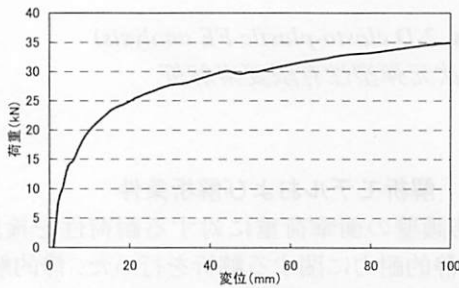
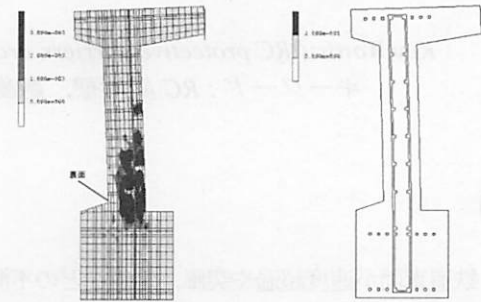


図-3 荷重-変位曲線



(a) コンクリート

(b) 鋼材

図-4 ひずみ分布

$$G_f = \frac{1}{2} f_t (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) h \quad (1)$$

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_1 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。

2.2 静的耐力の評価

本解析では、防護壁の静的耐力を評価するために、防護壁上端の突起部に水平方向（図-1に示すx軸方向）に最大100mmまでの強制変位を与える静的解析を行った。防護壁の破壊の可能性については、コンクリートの引張破壊領域の分布により評価した。

図-3に静的解析によって得られた静的荷重-変位曲線を示す。この図より、荷重15kNまではほぼ線形挙動を示していることから、荷重15kNまでは弾性範囲であると考えられる。また、図4(a),(b)に、荷重30kN時のコンクリートおよび鋼材のひずみ分布を示す。コンクリートの圧縮特性については、 $\varepsilon \geq 0.0035$ に達するとコンクリートは圧縮破壊の可能性があるとみなし、圧縮破壊した領域を黒色で示している。しかし、図-4(a)に見られるようにわずかに防護壁基部裏面に黒色表示の領域の存在が確認されるが、コンクリートの圧縮破壊の可能性はないと推察される。一方、引張特性については、図-3の応力-ひずみ関係と式(1)の破壊エネルギーの概念に基づき、 $\varepsilon \geq 0.0030$ に達すると引張応力の伝達

ができなくなり、引張破壊したとみなして領域を赤色で示している。図-4(a)より、防護壁基部に黒色表示の領域が広範囲に存在することが確認でき、耐荷性能がかなり低下していることがわかる。以上のことから、静的荷重が作用した場合の防護壁の限界耐力は、約30kNであると推定される。なお、図-4(b)において鋼材(鉄筋およびスターラップ)はいずれも破断ひずみには達していないことから、破断の可能性はないものと推察される。本解析で得られた静的荷重-変位曲線にはポストピーク領域が認められないが、これはコンクリートの圧縮破壊を解析で想定していないことが原因であると考えられる。

3. 鉄道車両による衝撃応答解析

3.1 解析モデルおよび解析条件

図-5に解析モデル全体図を示す。解析モデル全体は、平面ひずみ要素でモデル化し、奥行き150mmと設定した。鉄道車両(車体、台車、輪軸)に関して車体はアルミ合金、それ以外は鋼材とした。アルミ合金については、降伏強度270N/mm²、弾性係数70kN/mm²とし、降伏後に初期剛性の1/100の剛性でひずみ硬化するものと仮定した。また、防護壁に衝突する車体に関しては弾塑性体を仮定し、それ以外は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。なお、自重は各要素に対する物体力として設定した。また、図-6に示すように、車体と台

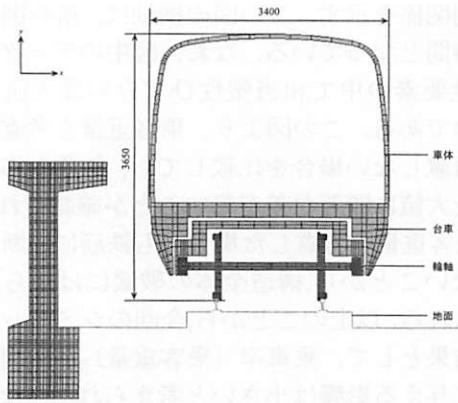


図-5 解析モデル全体図 単位:mm

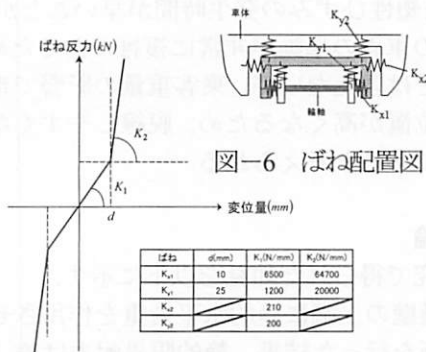


図-6 ばね配置図

ばね	d(mm)	K_1 (N/mm)	K_2 (N/mm)
K_{11}	10	6500	64700
K_{12}	25	1200	20000
K_{21}		210	
K_{22}		200	

図-7 ばね特性

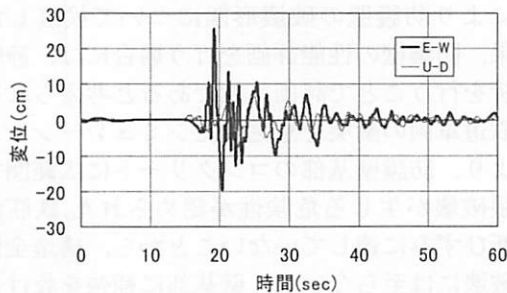


図-8 入力地震波形

車、台車と輪軸の間には実車両の足回りの特性を反映させるために、水平方向、鉛直方向にそれぞれ緩衝ばねを挿入している。台車と車体間の緩衝ばねに関しては、線形的なばね特性を有し、輪軸と台車間の緩衝ばねに関しては、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-7 参照)

本解析では、地震動によって脱線した鉄道車両による衝突シミュレーションを試みた。地震動は、地面(剛体)に強制変位を与えることで再現した。なお、地面(剛体)と防護壁下端の底面および側面は完全固定している。地震波形は図-8 に示すように、新潟中越沖地震時に観測された波形を入力し、実現象を忠実に再現するため水平振動 (E-W) および鉛直振動 (U-D) を考慮した。

3.2 解析結果

図-9 に鉄道車両衝突の際に防護壁上端の突起部に作用する衝撃力-時間関係を示す。この図より、車体衝突直後に約 80 kN の最大衝撃力が瞬間的に発生していることが確認された。2.の検討で求めた防護壁の静的限界耐力である約 30kNであることを考えると、瞬間的ではあるが静的耐力の3倍近い荷重が作用することから破壊の可能性が懸念されたが、図-10 に示すように、構造全体の破壊につながるような損傷は確認されなかった。

なお、衝撃力-時間関係の解析結果には、衝撃力が瞬間的にゼロになる時間も見られ、荷重の時間的な変動が激しいことから、図-9 の結果は精度が低いと考えられる。したがって、本試算で得られた衝撃力は、防護壁の破壊の可能性を検討する際の一次評価用の情報とし、荷重による安全性の照査を行うには、より精度が高い接触判定および衝撃荷重の算定法を検討する必要があると考えられる。

図-11 に車両衝突から 60ms 経過後に生じるコンクリートの最大ひずみ分布を示す。防護壁の破壊条件については2.の検討で用いたものと同様である。引張破壊の可能性のある領域は黒色で表示した。この図より、防護壁基部に引張破壊を示す黒色表示の領域が確認でき、鉄道車両の衝突で基部コンクリートに引張破壊が生じる可能性が高いことが認められる。また、衝突箇所近傍においてもコンクリートの引張破壊が起こる可能性が確認された。これは衝突時に車体の速度ベクトルが水平方向に 1.4m/s、鉛直方向に 1.0m/s と、鉛直方向の相対速度も大きく、車体が壁に鉛直方向に擦れるように衝突すること

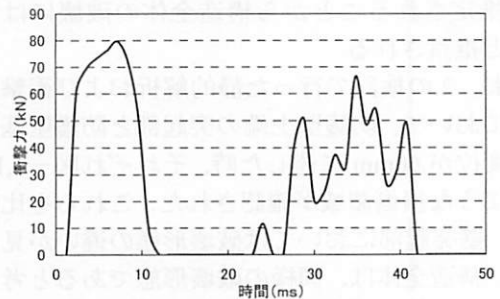


図-9 衝撃力-時間関係

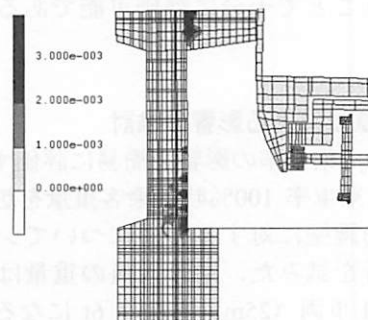


図-10 コンクリートのひずみ分布 (最大衝撃力作用時)

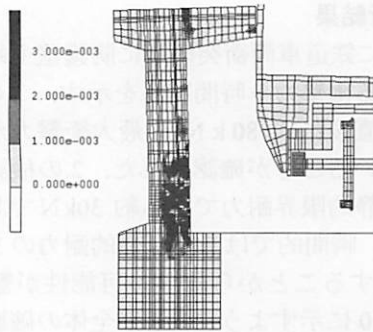


図-11 コンクリートの最大ひずみ分布

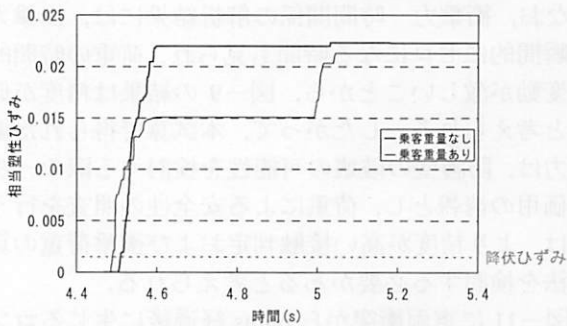


図-12 鉄筋の相当塑性ひずみ

から、その際に発生する摩擦力の影響があると推察される。なお、圧縮破壊に関しては、わずかに防護壁基部の裏面に破壊領域が確認されたが、構造全体の破壊につながる可能性は小さいと推察される。また、鉄筋のひずみに関しては降伏値は超えているが、破断ひずみ 20%には達しておらず、破断の可能性はないと確認された。以上のことから、鉄道車両の衝突で防護壁基部のコンクリートに引張破壊が生じる可能性が認められるが、鉄筋の破断は生じないと推定されることから構造全体の破壊には至らないと推察される。

なお、2.の検討で行った静的解析および衝撃応答解析において、防護壁上端の突起部と防護壁基部の相対変位が 60mm に達した時、それぞれ図-4,11 に示すような損傷領域が確認された。これらを比較すると、壁突起部においては破壊形態の違いが見られるが、構造全体は、同様の破壊形態であると考えられる。よって、防護壁の基礎的な耐荷性能は、静的解析を行うことで十分に評価可能であると考えられる。

3.3 乗客重量による影響の検討

ここでは、乗車率の影響を簡易に評価するため、車体内部に乗車率 100%時の乗客重量を想定し、車両および防護壁に対する影響についてシミュレーション解析を試みた。乗車人員の重量は、乗車率 100%時に 1 車両 (25m) あたり 6t になることを想定した上で、車体内部に等分布荷重として与えた。

図-12 に鉄筋 (スターラップ) の相当塑性ひずみ

一時間関係を示す。この図の横軸は、解析開始時からの時間となっている。なお、図中のデータは、鉄筋の全要素の中で相当塑性ひずみの最大値を示したものである。この図より、乗客重量を考慮した場合と考慮しない場合を比較しても、鉄筋の応答ひずみの最大値に顕著な差が無いことが確認された。また、乗客重量を考慮した場合でも鉄筋に破断が生じていないことから、構造全体の破壊には至らないと考えられる。以上のことから、今回のシミュレーションの結果として、乗車率 (乗客重量) が防護壁の損傷度に与える影響は小さいと考えられる。なお、乗客重量を考慮した場合、考慮しない場合と比較して、相当塑性ひずみの発生時間が早いことがわかる。脱線時の車両の挙動が非常に複雑であるため、確定的なことは言えないが、乗客重量の影響で車両全体の重心位置が高くなるため、脱線しやすくなることが一因であると考えられる。

4. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 防護壁の上端に静的水平荷重を作用させて耐力評価を行った結果、静的限界耐力は約 30kN であると推定される。また、静的および動的解析により防護壁の破壊形態について検証した結果、防護壁の性能評価を行う場合には、静的解析を行うことで評価可能であると考えられる。
- 2) 鉄道車両の衝突を想定したシミュレーションにより、防護壁基部のコンクリートに広範囲で引張破壊が生じる危険性が認められた。鉄筋が破断ひずみに達していないことから、構造全体の破壊には至らないが、壁基部に補強を設けることが望ましいと考えられる。
- 3) 乗客重量を考慮したシミュレーション解析を行ったが、鉄筋の相当塑性ひずみなどに顕著な違いは見られないことから、防護壁の損傷度に与える影響は小さいと推察された。

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) コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.