

コンクリート製防護柵の動的載荷試験法に関する一考察 ～力積による衝突現象の整理と動的載荷試験への適用～

安藤和彦

1. まえがき

橋梁・高架部や中央分離帯に設置されているコンクリート製の車両用防護柵（以下「コンクリート製防護柵」という。）は、既設柵の老朽化等に伴い、更新が容易な新たな構造等の開発が盛んになってきている¹⁾。このようなコンクリート製防護柵の開発にあたっては、まず衝撃度（実車衝突時の衝突車質量、衝突速度、衝突角度により設定され、防護柵直角方向の衝突エネルギーに相当）を構成因子とする衝突荷重算定式²⁾により衝突荷重を求めて強度設計を行い、次に実車衝突試験により性能評価を行うことが基本となる³⁾。その際に、開発段階で基部や接合部等の部分的な強度確認のために大がかりな実車衝突試験を行うことは不経済であり、落錘等による小規模な動的載荷試験で代用されることも多い。このとき動的載荷試験では、一般的に衝撃度をもとに試験条件（落錘質量と落下高さの組み合わせ）を設定する方法がとられている。ただし、衝撃度は衝突エネルギーに関連した式であり、衝突荷重と衝突条件や車両挙動との関係を直接的に表す力積（衝突荷重×衝突荷重の作用時間＝衝突物の質量×衝突物の速度変化）が明確でないため、小規模な動的載荷試験で車両衝突現象を適切に再現できているかどうかは、現在のところ明らかになっていない。

そこで、本検討は衝突荷重算定式の作成根拠となった一連の実験をとりまとめている土木研究所共同研究報告書第207号⁴⁾（以下「共同研究報告書」という。）に示されている車両挙動に着目し、計測された衝突荷重や車両挙動等を力積として評価し、その結果を動的載荷試験の条件設定に適用することを試みた。なお検討に当たっては、共同研究報告書内で実験内容が詳細に報告されている大型車衝突実験（実験条件；単スロープ型コンクリート製防護柵－20t貨物車－衝突速度100km/h－衝突角度17度－衝撃度660kJ）の実験結果（以下「大型車実験結果」という。）に着目した。

2. 衝突荷重算定式

コンクリート製防護柵に車両が衝突したときに発生する衝突荷重は、衝突荷重算定式によって算定することができる。

衝突荷重算定式は式(1)に示すとおりであり、式(2)の車両の衝撃現象をモデル化した衝撃モデル式と、衝撃モデル式で算出される計算値と実際に発生した衝突荷重とを整合させるための補正比例係数 k_f で構成されている。式(2)の I_s が衝撃度(kJ)である。

$$F_t = k_f \times F_m \quad \text{式(1)}$$

$$F_m = \{2 \times (1 + e_v) / L_w\} \times (m / m_r)^2 \times a / \sin \theta \times I_s \quad \text{式(2)}$$

ここで、 F_t ；衝突荷重(kN)、 k_f ；補正比例係数、 F_m ；衝撃モデル式で算出される衝撃力(kN)、 θ ；衝突角度(度)、 e_v ；車両の反発係数、 L_w ；軸距(m)、 m ；車両総質量(t)、 m_r ；後輪軸質量(t)、 a ；防護柵の斜面低減率、 v ；衝突速度(m/s)、 $I_s = 1/2 \times m \times (v \times \sin \theta)^2$ である。

衝突荷重算定式は防護柵の強度指標である衝撃度と関連付けられ、防護柵の種別を設定すれば衝突荷重が求められるように工夫されている。ただし、実車衝突試験をもとに作成された衝突荷重算定式を小規模な動的載荷試験に適用させる方法は明らかになっていない。

3. 車両衝突時の力積関係と衝突荷重

3.1 基本的な車両衝突モデルによる検討

まず、車両が防護柵に衝突する場合の基本的な力積関係をもとに、衝突荷重と車両質量、衝突速度、衝突荷重の作用時間（以下「作用時間」という。）との関係について整理する。基本的な衝突モデルとしては、1質点の剛な車両が防護柵に衝突し減速して離脱するモデルを想定する（図-1）。

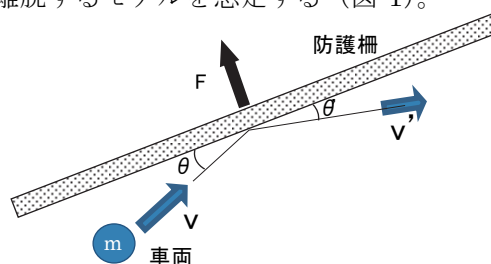


図-1 基本的な衝突モデル

図-1で車両がコンクリート製防護柵に衝突するとき、防護柵直角方向に発生する衝突荷重と質量、速度等の関係は式(3)となる。

$$F \times t = m \times v \times \sin\theta + m \times v' \times \sin\theta' \quad \text{式(3)}$$

ここで、 F ：衝突荷重(kN)、 t ：作用時間(s)、 m ：車両質量(t)、 v ：衝突速度(m/s)、 v' ：離脱(衝突後の)速度(m/s)、 θ ：衝突角度(度)、 θ' ：離脱(跳ね返り)角度(度)である。

大型車実験結果をもとに、衝突荷重 F を求めると表-1のとおりとなる。

表-1 大型車実験結果と衝突荷重 F の計算値

m	v	v'	t	θ	θ'
20t	27.8m/s	23.5m/s	0.3s	17度	0度
$F=20 \times (27.8 \times \sin 17 + 23.5 \times \sin 0) / 0.3 = 542 \text{ kN}$					

これまで防護柵への車両衝突現象は、車両や防護柵の損傷状況から、衝撃現象の一つとして捉えられてきた⁵⁾。計算された542kNの衝突荷重は落石等が土木構造物に作用する衝撃力⁶⁾や車両が剛壁に正面衝突した場合に発生する衝撃力⁷⁾に比べ比較的小さいものの、防護柵への斜め衝突現象であることを考慮すれば、衝撃力としては妥当な値であると考えられる。

しかし、実際に作用した衝突荷重(防護柵の鉄筋歪みをもとに解析)は約140kNとさらに小さく、図-1のような衝撃現象をもとにした考えでは、説明することができない。

3.2 車両衝突現象の整理

上述を踏まえ、以下では防護柵衝突時の車両挙動に着目して再度整理を行う。

(1) 車両挙動

コンクリート製防護柵に大型貨物車を高速度で衝突させた大型車衝突実験では、図-2に示すように前部の衝突(以下「初期衝突」という。)と後部の衝突(以下「二次衝突」という。)に分かれて、二度の衝突現象が発生している。このとき、初期衝突では左前輪軸を中心としてキャブ(運転席部)が衝突し、二次衝突では荷台部のねじれにより左後輪部を中心として衝突している。

車両衝突が、初期衝突、二次衝突に分かれた原因としては、載物物が車両に固定されていないため車体と積載物の挙動が異なること、大型車の車体が剛構造ではなく比較的たわみ、変形しやすい構造となっていることなどが挙げられる。

(2) 衝突荷重および作用時間

衝突荷重は、初期の前輪部を中心とした衝突時に約100kN、左後輪部を中心とした二次衝突時に約140kN計測されている(図-3)。

衝突荷重の作用時間は、初期衝突時に0.1秒程度、また二次衝突時に0.2秒程度計測された。初期衝突時の作用時間はキャブ側面が接触した時間程度、また二次衝突時の作用時間は、後輪軸を中心とした5m程度の接触長と推定される。

3.3 衝突荷重と衝突質量の検討

実験で計測された衝突荷重は、落石等が土木構造物に作用する衝撃力等に比べかなり小さい。これについて、力積計算のための三因子である衝突速度、衝突に関与する車両質量(以下「衝突質量」とい

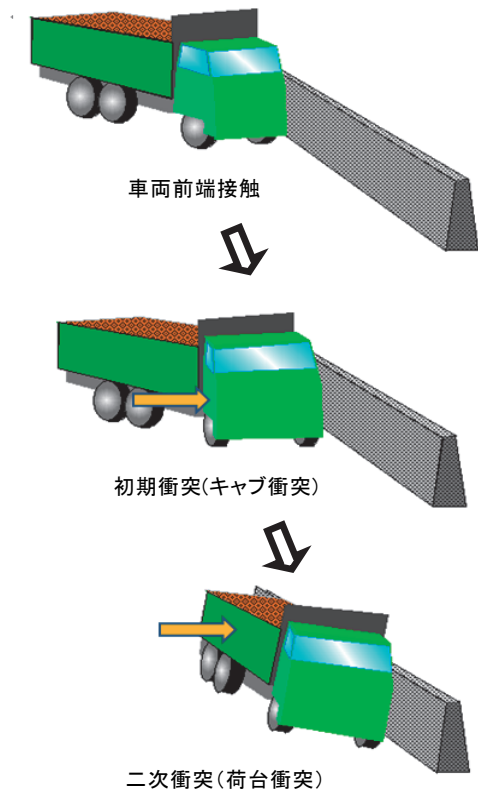


図-2 防護柵衝突時の車両挙動

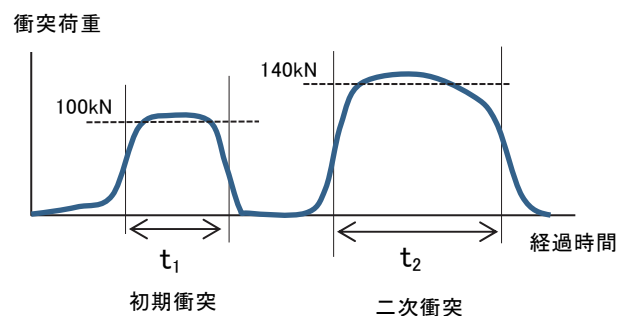


図-3 発生する衝突荷重の時系列変化³⁾

土研センター

う。) および作用時間のうち、衝突速度、作用時間は計測されているかあるいは推定できるので、衝突荷重が小さくなる要因として衝突質量に着目し、大型車実験結果をもとに検討する。

(1) 衝突現象のモデル化

検討にあたり、車両衝突時に二段階の衝突が生じるような車両モデルとして、図-4の二つの質量をヒンジ、バネ、ローラ連結した車両モデルを考える。この車両モデルにより、図-4の①～④の衝突現象を想定する。

(2) 衝突荷重と衝突質量との関係

衝突荷重と衝突質量との関係式は以下のとおりである。なお大型車実験結果により、離脱角度θ、離脱時の防護柵直角方向速度はゼロとしている。

$$m_1 = F_1 \times t_1 / (v_1 \times \sin\theta) \quad \text{式(4)}$$

$$m_2 = F_2 \times t_2 / (v_2 \times \sin\theta) \quad \text{式(5)}$$

ここで初期衝突時は、衝突質量 m_1 、衝突荷重 F_1 、衝突速度 v_1 、作用時間 t_1 、衝突後速度 v_2 とし、二次衝突時は衝突質量 m_2 、衝突荷重 F_2 、衝突速度 v_2 、作用時間 t_2 、衝突後速度 v_3 とする。速度変化は図-5の関係を仮定し、 v_2 は計測結果が報告されていないため式(6)により推定する。

$$v_2 = v_1 - F_1 / (F_1 + F_2) \times (v_1 - v_3) \quad \text{式(6)}$$

1) 初期衝突時

大型車実験結果から、初期衝突時に関与する衝突質量は表-2のように計算される。

2) 二次衝突時

大型車実験結果から、二次衝突時に関与する衝突

表-2 大型車実験結果と衝突質量 m_1 の計算値

F_1	v_1	t_1	θ
100kN	27.8m/s	0.1s	17度
$m_1 = 100 \times 0.1 / (27.8 \times \sin 17) = 1.2t$			

質量は表-3のように計算される。

表-3 大型車実験結果と衝突質量 m_2 の計算値

F_2	v_2	t_2	θ
140kN	26.0m/s 式(6)	0.2s	17度
$m_2 = 140 \times 0.2 / (26.0 \times \sin 17) = 3.7t$			

3) 衝突に関与する質量からみる衝突現象

初期衝突時には、主として左側の前輪が接触しているが、衝突質量は1.2tとなり左前輪質量(2.5t)の1/2程度(車両総質量の6%程度)になっている。また、二次衝突時には左側の後輪を中心として接触しているが、衝突質量は3.7tとなり左後輪質量(7.5t)の1/2程度(車両総質量の19%程度)になっている。

これらから、防護柵衝突時には、初期、二次衝突のいずれでも図-1のように車両総質量が一度に作用することはなく、初期衝突時には左前輪部を方向転換する程度の力が、また二次衝突では左後輪部を保持し荷台部を誘導する程度の力が作用しているものと考えられる。いずれも、車両の進行方向を変え誘導するためには大きな力を必要としないことがわかる。

これは、防護柵への車両衝突現象が、車両という4点を回転する車輪で支持された比較的たわみ性と

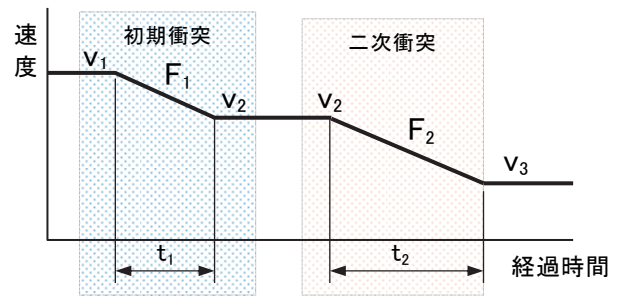


図-5 車両速度の変化

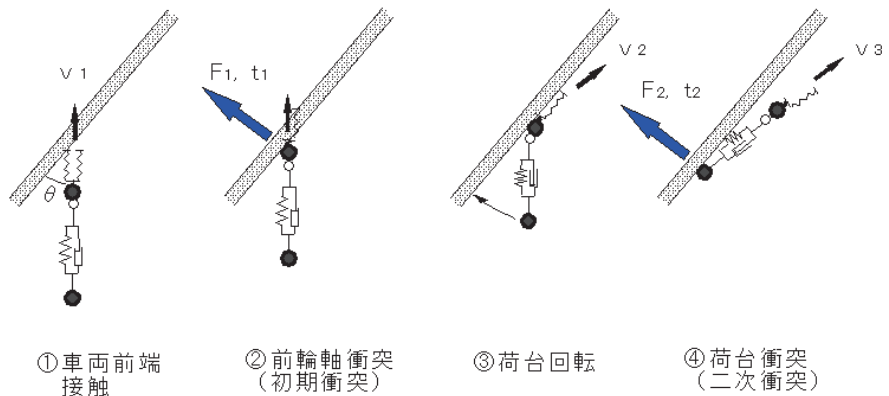
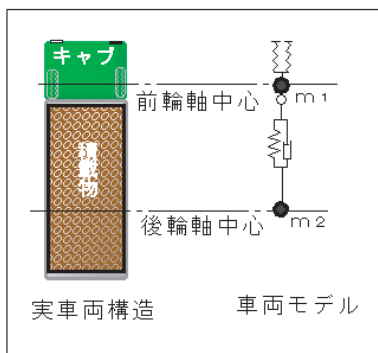


図-4 設定した車両モデルと防護柵衝突時の時系列変化

緩衝性のある物体が、構造物に斜め衝突する特異な現象であり、図-1のような一般的な衝撃現象とは同等に取り扱えないことを示している。

また、衝撃モデル式の計算結果を実際に発生した衝突荷重に整合させるために用いられている補正比例係数は、今回の検討結果からみると、衝撃度と関連付けるための補正の他、衝撃力から車両誘導に必要な作用力への低減補正を含め、車両挙動や車両の緩衝性を反映させた複合的な役割を担っているものと考えられる。

4. 動的載荷試験への適用

動的載荷試験は、振り子により、あるいは斜面上を滑降させて、重錘を供試体に衝突させる方法等が用いられ、そのときの衝突条件としては、設計する防護柵の衝撃度をもとに重錘質量や落下高さを設定する。このとき、力積条件（例えば作用時間の設定）が考慮されることはほとんどないよう見受けられる。今回の検討結果から、衝突質量が小さくなる動的載荷試験でも実車衝突現象をある程度再現できるものと考えられるが、力積条件は衝突荷重に大きく影響するので、例えば、ほとんど緩衝性のないコンクリート製や鋼製の重錘を用いた場合、発生する衝撃力は大きいものの作用時間は短く、実際の車両の衝突現象を再現するような評価を行えないことも予想される。それぞれの載荷試験に応じた力積条件を設定し、その条件に適する緩衝材を併用した試験を行う必要がある。これについては、強度の異なるアルミハニカムを組み合わせて車両のバンパー部を再現した模擬車両（台車）等を使った方法⁸⁾が参考になる。

これらを考慮した一連の動的載荷試験方法を一例として整理すると、以下の手順が考えられる。なおこの手順の妥当性については、今後の試験により検証することが必要になる。

(1) 衝突条件の設定と衝突荷重の算定

- ① 衝突条件（衝撃度）を設定する。
- ② 防護柵構造を設定する。
- ③ 衝突荷重算定式から衝突荷重 F を算定する。

(2) 試験方法の設定

- ④ 実験に用いる重錘質量 m を設定する。
- ⑤ 実験に用いる重錘落下高さ h を設定する。
- ⑥ 落下高さから衝突速度 v を求める

$$(v=(2 \times g \cdot h)^{1/2}). \quad g: \text{重力加速度}(m/s^2)$$

- ⑦ 荷重作用時間を求める（式(3)で $v'=0$ 、 $\theta=90$ 度とすると、 $t=v \times m/F$ ）。

できれば作用時間は0.1s程度以上確保する。

(3) 緩衝材の選定

- ⑧ 重錘の衝突面に取り付けるアルミハニカム等の緩衝材について、⑦で想定した衝突速度と作用時間を満足する材料を選定する。

(4) 試験の実施と評価

- ⑨ 選定した緩衝材を重錘の衝突面に接合し動的載荷試験を実施する。
- ⑩ 供試体の変形量、健全性などを評価する。また、発生荷重、作用時間等を併せて計測する。

5. あとがき

これまで、防護柵と車両との衝突現象について力積をもとに検討された事例は少ない。今回の検討結果から、車両の防護柵衝突現象が、一般的な衝撃現象としてよりも車両の進行方向を転換する誘導現象として捉えることが妥当であることがわかった。また、車両の衝突を想定した動的載荷試験において、衝撃度や重錘の緩衝性を考慮した試験手順を整理できた。今後は、今回整理した手順の妥当性の確認が課題として残されている。

参考文献

- 1) 例えば、<https://www.okumuragumi.co.jp/technology/engineering/pdf/r15.pdf>
- 2) 公益社団法人日本道路協会；車両用防護柵標準仕様・同解説、2016
- 3) 公益社団法人日本道路協会；防護柵の設置基準・同解説、平成28年12月
- 4) 建設省土木研究所等；高速化対応型コンクリート製防護柵に関する共同研究報告書、共同研究報告書第207号、平成10年6月
- 5) 石川他；基礎からの衝撃工学、森北出版社、2008
- 6) 公益社団法人日本道路協会；落石対策便覧、平成12年6月
- 7) 水野幸治；自動車の衝突安全、名古屋大学出版会、2012.2
- 8) 例えば、<http://www.showa-aircraft.co.jp/business/products/combine/>

安藤和彦



(一財) 土木研究センター技術研究所
道路研究部長
Kazuhiko ANDO