

(12) 剛性防護柵に於ける衝突荷重の理論算出式について

A THEORITICAL VEHICLE IMPACT FORCE AT RIGID BARRIER

松葉 美晴

Yoshiharu MATSUBA

正会員 日本サミコン株式会社（〒950 新潟市弁天橋通り1丁目）

キーワード：剛性防護柵、衝突車両の挙動、理論衝突荷重

(rigid barrier, behavior of clash vehicle, theoretical impact load)

1. はじめに

近年、車両の大型化・高速化に伴い交通安全施設もそれに対応して行く事が望まれるようになって来た。特に防護柵は高速化・大型化の影響を直接受けることから最近では改良や新形式のものが開発されている。その中でも中央分離帯については、狭い空間で突破防止を図るためコンクリート製の剛性防護柵が採用されるようになって来た。しかし、設計に必要な衝突荷重に関しては、まだ整備されておらず、現行の規定値や実車衝突実験によって得られた値を用いて設計されているのが現状である。筆者は、さまざまな実物実験を行った剛性防護柵の開発に参加してきたが、その中で設計に必要な衝突荷重の理論算出式を導いた。今後、実験結果を踏まえた改良が必要であるが、今回はその基本式の誘導について紹介する。

2. 防護柵に於ける衝突車両の挙動と剛性防護柵

衝突車両の挙動は次の3種類になると言われている。

- 1) 防護柵の乗り越え（対向車線或いは進入禁止域への飛び込み）－乗り越え
- 2) 防護柵位置での停止（激突状態での停止）－取り込み
- 3) 通行車線への車線復帰 －車線復帰

コンクリート製剛性防護柵は、剛性が高く、鉛直部材がない連続壁を構成するので、上記のうちの車両の取り込み・車両の乗り越えの可能性が極めて少なく、衝突時の防護柵の損傷が少ないため事故修復費が少ないと言う特徴を持つ。

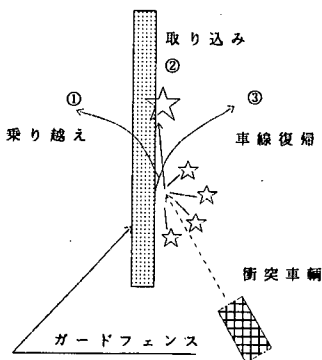


図-a 衝突車両の挙動

2-1. 剛性防護柵の機能確保

剛性防護柵は次の防護柵としての機能を持つことが求められているとともに、本体の健全性も求められる。

1) 衝突車両の安全性の確保

1. 乗員の安全性

イ. 車両重心の減加速度最大値 (50msec平均値) の許容値規定

進行方向: 2.5 g 直角方向: 1.5 g 合成値: 2.5 g

ロ. 頭部減加速度から計算されるH I C値の許容値規定 (注: 現在は参考値)

H I C ≤ 1 0 0 0 (→脳しんとうが生じる限界値)

2. 車両の安全性 (後続車との衝突回避等)

イ. 離脱角度 → 入射角度の60%以内 (隣接車線への進入を防ぐ)

ロ. 離脱速度 → 入射速度の75%以内 (乗員への減加速度を小さくする)

ハ. 車両の挙動 → 転倒を起こしてはならない。

2) 防護柵本体の機能確保 (衝突による破壊がない)

1. 本体の破壊が発生しない。

2. 衝突によって躯体が転倒しない。 } 鋼製の場合は本体の破壊によってエネルギーを吸収する。

3. 既存の設計計算荷重式 (PGF-F1型用)

コンクリート製剛性防護柵に関しては、プレキャストガードフェンス協会からF型についての荷重式が、実車衝突実験の測定値を基に導かれている (式-A、式-B)。

既存の設計荷重は防護柵天端に線荷重として与えられているので協会の提案式も線荷重として導かれている。この式は、F型に関しては比較的好都合であるが、他の形式にはそのまま適用できない。

A. 構造計算用設計荷重式 (PGF-「F1型」 ~ h=1.0m用)

Ph=0.4 · E_y^{0.5} = 0.4 · (1/2 · W/g · V² · SIN²θ)^{0.5} (式-A)

ここに、Ph: 設計用線荷重 (t/m) E_y: 防護柵直角方向運動エネルギー (t·m)

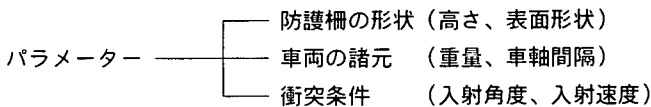
W: 車両重量 (t) V: 衝突速度 (m/s) θ: 衝突角度 (deg)

B. 安定計算用設計荷重式 (PGF-「F1型」 ~ h=1.0m用)

Ph=0.0526 · E_y^{0.5} (式-B)

4. 一般性のある設計衝突荷重の算定式

以上を踏まえて、一般性のある荷重算定式を、ある程度理論的に導くことを試みた。荷重を算出するに当たっては、パラメーターとして下記の項目を考慮した。



上記のパラメーターを念頭に、設計で使える簡易式を下記の手順で導く。

- ①. 衝突車両を大胆にモデル化。
- ②. 剛度が高く、十分な高さを持つ直壁の防護柵を基準に、荷重基本式を誘導。
- ③. それを表面スロープのついた防護柵用に変換 (荷重低減係数の算出。)
- ④. 以上を基に、固定式の場合は、防護柵の高さを考慮した天端水平荷重を算出、埋め込み式の場合は、弾性床上の梁に負荷する部分当分布荷重を算出する。

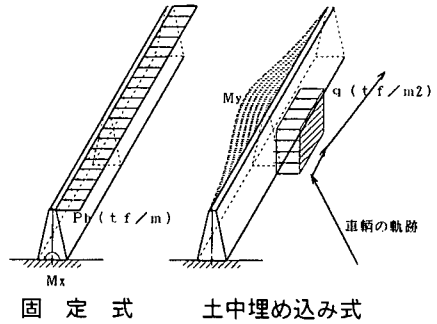
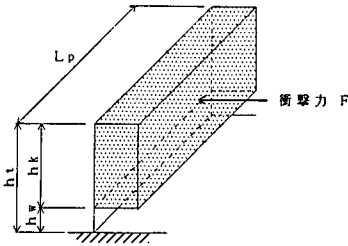


図-1b 車両衝突荷重の荷重作用域

固定式 土中埋め込み式

以上は、衝突車両側の安全性は確保されているものとして行われる。設計荷重の概念を図示すると図-1b のようになる。図中のFは荷重基本式から得られる衝撃力であり、 L_p および h_k はそれらを部分等分布に置き換えるための荷重範囲である。この等分布荷重が負荷された場合の剛性防護柵の挙動を考慮して、固定式の場合は天端水平荷重とし、埋め込み式の場合は部分当分布荷重として断面力を算出する。

4-1. 荷重基本式の基本的概念

車両の衝突荷重を類推するにあたり、下記の運動方程式を採用する。

$$m v_1 - m v_2 = F t \quad \text{(式-1)}$$

式-1は、運動量は力積に等しいと言う、物理の基本式である。式-1を変形すれば、

$$F = (m v_1 - m v_2) / t \quad \text{(式-2)}$$

となり、外力Fが計算できる。この外力Fを、車両が剛性防護柵に与える衝突荷重と考えることにする。

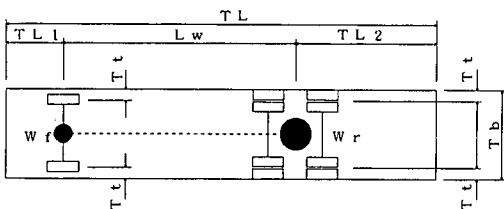
式-2に於いて、荷重作用時間、衝突速度 v_1 及び離脱速度 v_2 が特定出来れば、衝突荷重Fが計算出来ることになる。式-2で、 v_2 を下記のように置き換え、速度の方向を考慮すると、式-4となる。

$$v_2 = e_v \cdot v_1 \quad \text{(式-3)}$$

$$F = (m \cdot v_1 - m \cdot v_2) / t = (m \cdot v_1 + m \cdot e_v \cdot v_1) / t \\ = m \cdot v_1 \cdot (1 + e_v) / t \quad \text{(式-4)}$$

但し、 v_1 ：防護柵に直角方向の衝突速度 v_2 ：防護柵に直角方向の衝突速度
 e_v ：衝突車両全体の剛性防護柵に対する反発係数（実験によれば e_v は、0.0~0.2）

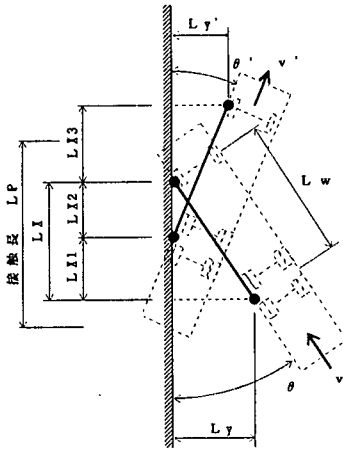
4-2. 衝突速度 v_1 ・衝突時間 t の誘導



衝突荷重の基本式を誘導する場合の車両を下記の通りとする。（大型貨物車両）

- W_f ：車両の前輪軸重量
- W_r ：車両の後輪軸重量
- W ：車両重量
- $W = W_f + W_r$

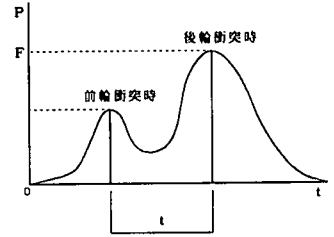
衝突荷重の誘導において、車両は W_f 、 W_r の2質点が距離 L_w で剛結された物体と仮定し、車両のボディ・荷台等の衝突は考えない事とする。衝突時の車両の挙動は図-1に示す様に、最初に前輪軸が衝突して、



時間も後に後輪軸が衝突するものとする。これは、実験の加速度波形および鉄筋ひずみ波形において、2つのピーク値が現れ、後のピーク値が大きいことから仮定された。(図-1-1)

左図において、

- θ : 入射角度 (度)
- θ' : 離脱角度 (度)
- v : 入射速度 (m/sec)
- v' : 離脱速度 (m/sec)
- L_{x2} : 前輪衝突位置と後輪衝突位置との距離 (m)
- L_p : 接触長 (m)



である。

図-1-1 衝突波形のモデル

図-1 車両の衝突挙動のモデル化

4-2-1. 前輪衝突時

前輪が剛性防護柵に衝突する場合は、速度 v ・入射角度 θ を持っているものとする(図-2)。従って、防護柵の直角方向及び軸方向の成分は次式で表される。

$v_x = v \cdot \cos \theta$	$L_x = L_w \cdot \cos \theta$	(式-5)
$v_y = v \cdot \sin \theta$	$L_y = L_w \cdot \sin \theta$	

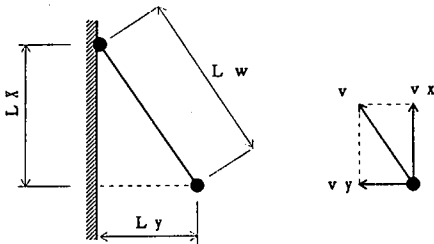


図-2 前輪衝突時

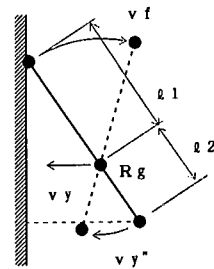


図-3 車両の回転

4-2-2. 前輪衝突直後の車両の回転

前輪衝突直後の車両速度 v'' は次式で表されるものとする。

$v'' = e_f \cdot v$	(式-6)
---------------------	-------

但し、 e_f は前輪での反発係数である。車両は前輪の衝突によって回転し、後輪の衝突速度は回転速度が付加されて増加する。後輪の衝突速度は衝突速度 \sin 成分 v_y に回転速度 v_y'' を単純に足すものとする(タイヤの摩擦等は考慮にいけない)。また、車両の回転は2質点の重心位置 R_g で回転するものと考え、後輪の防護柵直角方向の衝突速度 v_y' は式-7となる。

$l_1 = L_w \cdot W_r / W$	$l_2 = L_w \cdot W_f / W$	(式-7)
$v_f = v'' \cdot \sin \theta$	$v_y'' = v_f \cdot l_2 / l_1$	
$\therefore v_y' = v_y + v_y''$		

以上から、前輪が衝突して後輪が衝突するまでの時間 t' は次式で簡単に求められる。

$$t' = L_y / v_y' \quad (\text{sec}) \quad (\text{式-8})$$

その間に車両が進む距離 L_{x1} は、式-9となる。

$$L_{x1} = v'' \cdot \cos\theta \cdot t' \quad (\text{式-9})$$

4-2-3. 後輪衝突時

後輪の衝突する位置は前輪の衝突位置から L_{x2} 分だけずれる事になる。

$$L_{x2} = L_x - L_{x1} \quad (\text{式-10})$$

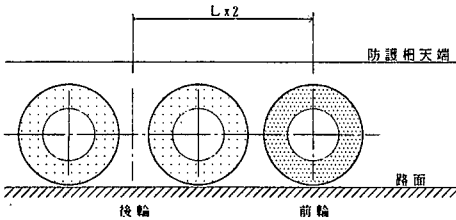


図-4 車輪軸の衝突位置

4-3. 設計衝突荷重の算出

4-3-1. 荷重作用時間

式-1における荷重作用時間 t を、式-8で表される前後輪の衝突時間差 t' と考え、式-7に、式-5・式-6を代入し整理すると以下の様になる。

$$\begin{aligned} v_y'' &= e_r \cdot v \cdot \sin\theta \cdot W_f / W_r \\ v_y' &= v_y + v_y'' \\ &= v \cdot \sin\theta \cdot (1 + e_r \cdot W_f / W_r) \end{aligned} \quad (\text{式-11})$$

式-8に上記の式を代入し、 $t = t' \cdot e_r = 1$ と置けば式-12を得る。

$$t = \frac{L_w}{v} \cdot \frac{W_r}{W} \quad (\text{式-12})$$

ここに、 L_w : 車両の車軸間隔 (m) v : 車両の衝突速度 (m/sec)
 W_r : 車両の後輪軸重 (tf) W : 車両全重量 (tf)

4-3-2. 力積からの衝撃力: F_t

式-4に於いて、 m は車両の全質量、速度は回転速度を加えた後輪の衝突速度と考えて、

$$v_1 = v_y', \quad m = W/g \quad (\because g : \text{重力加速度} = 9.8 \text{ m/sec}^2)$$

と置き、重力単位 (tf) で表すと式-13となる。

$$F_t = \frac{W}{L_w} \cdot \left(\frac{v}{g}\right)^2 \cdot (1 + e_v) \cdot \sin\theta \cdot \left(\frac{W}{W_r}\right)^2 \quad (\text{式-13}) \quad [\text{tf}]$$

ここで、式-13を変形して整理すると式-13-1の様になる。

式-13-1は、車両衝突時の衝撃力は、衝突角度が一定の場合、その運動エネルギー分力に比例することを表している。この結果は米国の研究成果と同じである。

$$F_t = \frac{2 \cdot (1 + e_v)}{g \cdot L_w \cdot \sin \theta} \cdot \left(\frac{W}{W_r} \right)^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{g} \cdot v^2 \cdot \sin^2 \theta$$

$$= K_k \cdot E_y \quad (\text{式-13-1})$$

ここに、 $K_k = \frac{2 \cdot (1 + e_v)}{g \cdot L_w \cdot \sin \theta} \cdot \left(\frac{W}{W_r} \right)^2$: 比例係数

$E_y = \frac{1}{2} \cdot \frac{W}{g} \cdot v^2 \cdot \sin^2 \theta$: 防護柵直角方向の運動エネルギー

4-4. 荷重作用域

4-4-1. 荷重作用高さ: h_k

図-5に一般的な貨物車両の側面図を示す。車両は剛度の高い骨組みとその周りを囲む薄板のボディで構成されている。各種の実験等から、衝撃を与える構成部材は剛度の高い骨組み部分であることが認められるので、ここでは、荷重作用高さを車軸中心から荷台の台座部分までの範囲と想定する。

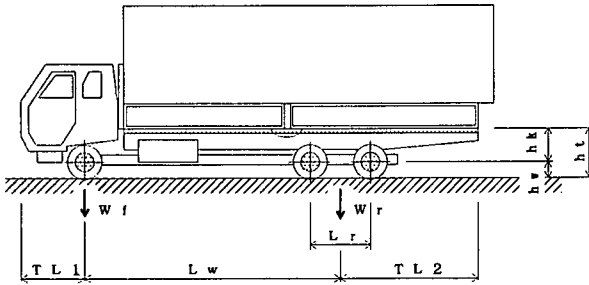


図-5 大型貨物車両の構造寸法

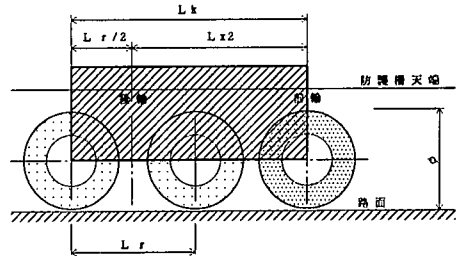


図-6 構造計算用の荷重作用長さ

4-4-2. 構造計算用の荷重作用長さ: L_k

実験の計測波形から見て、剛性防護柵への衝突荷重は前後輪の輪軸の衝突によって発生する。従って、構造計算では、前後輪の衝突ずれ量 L_{x2} に後輪の車軸間隔、 L_r の $1/2$ を加えた長さを荷重作用長さ L_k と考える事にする。式-10を展開し、安全側を考慮して $e_f=1$ として整理すると式-14となる。

$$L_k = L_w \cdot \cos \theta \cdot W_r / W + L_r / 2 \quad (\text{式-14})$$

4-5. 剛性防護柵の前斜面の影響 (斜面効果による低減係数: K_t)

剛性防護柵の衝突面が角度 β の斜面の場合、車両は図-7に示す様に衝突角度 θ で進入すると面ABCの斜辺ABを駆け上がる事になる。その時の斜面角度 α は次式で表される。

$$\therefore \alpha = \tan^{-1} (\sin \theta / \tan \beta) \quad (\text{式-15})$$

車両が速度 v (m/sec) で衝突すると、斜面ABに平行な分速度 v_v は車両が斜面を駆け上がる力に利用され (車両の持ち上がり及び回転)、衝撃力に寄与しないものと考えられる。従って、防護柵に衝撃力を与える分速度は v_h となる。この分速度 v_h は、鉛直方向分速度 v_{hv} 及び水平方向分速度 v_{hh} に分けられて、防護柵を転倒させる速度 (衝撃力を与える速度) は v_{hh} となり、また、転倒を抑える速度は v_{hv} となる。

$$v_{hv} = v_h \cdot \cos \alpha = v \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{1}{2} \cdot \sin(2\alpha) \cdot v$$

$$v_{hh} = v_h \cdot \sin \alpha = v \cdot \sin^2 \alpha = K_t \cdot v \quad (\text{式-16})$$

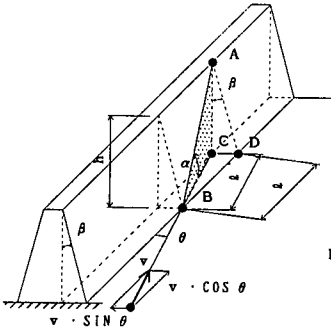


図-7 衝突面が角度 β の斜面の場合

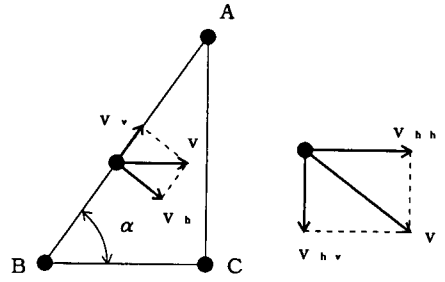


図-8 衝突速度の低減(分力)

$$K_t = \sin^2 \alpha \quad (\text{式-17})$$

ここで、 $K_t = \sin^2 \alpha$ を斜面効果による低減係数と呼ぶ。

剛性防護柵の斜面効果を考慮する場合は、式-13に於いて、衝突速度 v に低減係数 K を掛けて斜面衝突速度 v_s を算出し、その値を用いて荷重基本式を計算すればよい。

4-6. 剛性防護柵の断面力

紙面の都合により、ここでは設計方法の概念のみを述べることにする。

4-6-1. 固定式の天端水平力： P_h

剛性防護柵を下図のような片持ち梁と考え、部分等分布荷重 wk が作用するとし、それによって発生するモーメントを用いて天端水平荷重に変換する。

$$wk = F_t / (h_k \cdot L_p), \quad Ma = wk \cdot a \cdot (b + a/2)$$

$$P_h = Ma / h \quad (\text{式-18})$$

4-6-2. 埋め込み式剛性防護柵の場合

剛性防護柵の道路軸方向の解析は、半無限長の弾性床土上の梁に部分等分布荷重が載荷されたものとして、断面力の計算を行う。

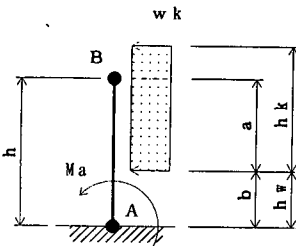


図-9 固定式の場合の設計荷重

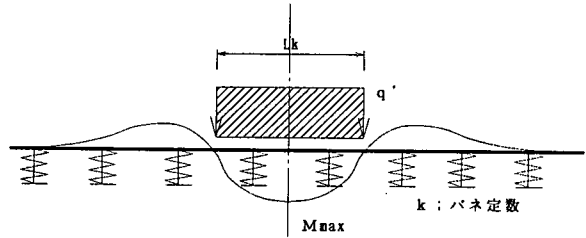


図-10 埋め込み式の場合の設計荷重(弾性床土上の梁)

以上が现阶段の設計荷重式であるが、今後、実験結果を踏まえて改良を加えたいと考えている。

参考文献

- 1) 建設省・道路公団・セメント協会共同研究、「高速化対応型剛性防護柵の開発」報告書、平成7年3月
- 2) プレキャスト・ガードフェンス協会技術資料 他
- 3) 構造工学シリーズ6・構造物の衝撃挙動と設計法 P61~P73 土木学会 平成6年1月

