

落石による衝撃力の評価式

池田 憲二* 今野 久志** 藤野戸 宏樹***

1. はじめに

落石から道路交通の安全を確保するために建設される落石防護施設としては、落石防護網、落石防護柵、落石防護擁壁、落石覆道などがある。これらの設計は、落石防護網、落石防護柵および落石防護擁壁などのように落石の運動エネルギーに基づいて行う場合と、落石覆道のように落石による衝撃力を静的荷重に置き換えて行う場合とがあり、これは設計の対象となる落石防護工の規模、構造系の複雑さなどの違いから、それぞれに適した設計方法を採用しているためである。現在、落石覆道の設計は昭和 58 年度版の「落石対策便覧（日本道路協会）」や「道路防災工調査設計要領（案）（北海道開発局建設部道路建設課）」（以後、それぞれ落石便覧、局要領と示す）に基づいて行われており、この中で緩衝材として敷砂を用いた場合の衝撃力算定式は振動便覧の式と呼ばれる式(1)が示されている。本解説では、この式の理論上の適用限界と今後の設計法の展望について述べる。

2. 振動便覧式とその理論的な適用限界

「振動便覧（土木学会）」は衝撃力の算定式として式(1)を与えている。

$$P_{\max} = 2.455 \lambda^{2/5} W^{2/3} H^{3/5} \quad (\text{tf}) \quad (1)$$

ここで、 λ ：敷砂緩衝材のラーメの定数 (tf/m^2)、 W ：落石重量 (tf)、 H ：落下高さ (m) である。

式(1)は、落石と敷砂緩衝材の衝突現象を 2 つの弾性体間の衝突現象とみなし、弾性理論により誘導されたものであるが、その詳細は付録を参照願いたい。

さて、振動便覧式の理論的な適用限界について述べる。図 - 1 に示すように、落石（球体と仮定）の接触面の半径 a は式(2)で与えられる。

$$a = \left[\frac{3 \pi P_{\max} (k_1 + k_2) R_1 R_2}{4 (R_1 + R_2)} \right]^{1/3} \quad (2)$$

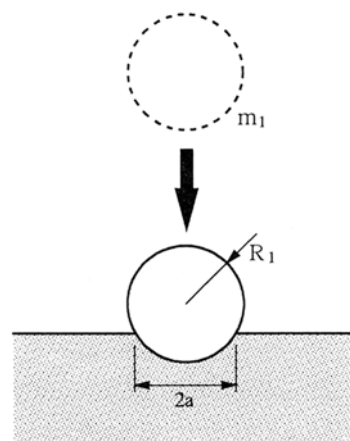


図-1 落石と敷砂緩衝材の衝突

ここに k は付録に示すヤング率とポアソン比の関数、 R は半径、添え字の 1, 2 はそれぞれ落石と緩衝材を示す。いま、 $k_1 = 0$ 、 $R_2 = \infty$ として、式(2)を変形整理すると、次式が得られる。

$$a = \left[\frac{9 P_{\max} R_1}{32 \lambda} \right]^{1/3} \quad (3)$$

接触面の半径 a は球の半径 R_1 より小さいことより、 $a_{\max} = R_1$ となる。従って、 $P_{\max}$ は

$$P_{\max} \leq \frac{32}{9} \lambda R_1^2 \quad (4)$$

式(4)と式(1)を連立して解くと、理論的な $H_{\max}$ は式(5)のように与えられる。

$$H_{\max} \leq 0.1306 \lambda \quad (\text{m}) \quad (5)$$

従って、敷砂緩衝材使用時の落石衝撃力評価式として式(1)を用いる場合には、最大落下高さに関する式(5)の条件式に留意する必要がある。式(5)を用いて最大落下高さを概算すると、 $\lambda = 100 \text{tf}/\text{m}^2$ の場合には $H_{\max} = 13.1 \text{m}$ となり、 $\lambda = 800 \text{tf}/\text{m}^2$ の場合には $H_{\max} = 104.5 \text{m}$ となる。

3. ラーメの定数 λ について

落石による衝撃力を式(1)で算定する場合に必要なラーメの定数 λ の値については、一般的には $\lambda = 100 \text{tf}/\text{m}^2$ が用いられている。これは、過去に行われた鋼

材倶楽部や金沢大学の重錘落下実験で計測された重錘衝撃力（重錘加速度と重錘質量の積）をもとに逆算したラーメ定数の値が 100tf/m^2 以下となっていたことによるものである。

しかしながら、上記重錘衝撃力は落石によって緩衝材上に作用する衝撃力であり、緩衝材の下にある落石覆道本体に作用する衝撃力（伝達衝撃力）ではない。当時の実験では緩衝材中を伝達してくる衝撃応力を精度よく測定できるセンサーがなかったため、伝達衝撃力の測定は不可能であったが、その後計測技術の進歩ならびに各種計測センサーが開発され、その計測が可能となった。

当研究室が行った敷砂緩衝材に関する研究結果によれば、覆道本体に作用する伝達衝撃力の最大値は敷砂の厚さが 90cm の場合で、敷砂の締固め度にもよるが $\lambda = 500 \sim 800\text{tf/m}^2$ で算定可能であることが明らかとなっている。

4. 今後の覆道設計法

平成 2 年 3 月に局要領が取りまとめられる以前においては、振動便覧式により落石衝撃力の算定は可能であっても、統一された載荷方法や照査基準、構造細目などが存在せず、我が国の落石覆道は合理的に設計されているとは言い難い状況にあった。局要領で統一された設計法の考え方は、その後、全国に普及し、現在改訂中の落石便覧に全面的に採用される予定であるが、当研究室と室

蘭工業大学では局要領が取りまとめられてから現在に至るまで、落石覆道に用いられる緩衝材の衝撃力評価に関する研究や三層緩衝構造の開発、ならびに覆道本体の耐衝撃挙動に関する研究を共同で数多く実施してきており、この分野における我が国の研究をリードしてきた。

平成 10 年に発行された土木学会構造工学シリーズ第 8 巻「ロックシェッドの耐衝撃設計」はその研究成果の集大成である。

これらの研究成果からラーメ定数を 800tf/m^2 にして式(1)で衝撃力を算定すると、衝撃力は約 2.3 倍となり、また、衝撃力の分散範囲についても現行の 45 度から落石径程度の範囲とすると、現行の設計法が危険側の設計となっているように思われるが、現行設計法は設計落石荷重に対しては十分な安全性を有していることが実験結果から確認されている。これは現行の設計では、落石覆道を単位幅を有する 2 次元フレームにモデル化し、落石衝撃力を静的荷重に置き換えて許容応力度法によって設計を行っているのに対して、実際の現象は道路方向に 1 ブロック 12m の延長を有する立体構造物が僅か数十 msec の継続時間の衝撃力の作用によって覆道本体が応答するという現象の違いによるものである。

当研究室ではこれまでの研究成果をもとに実際の衝撃挙動を考慮した合理的な落石防護施設の設計手法を提案し、局要領の改訂に寄与したいと考えている。



池田 憲二*

開発土木研究所
構造部
構造研究室
室長



今野 久志**

開発土木研究所
構造部
構造研究室
研究員



藤野戸 宏樹***

開発土木研究所
構造部
構造研究室
室員

付 録

式(1)は、落石と敷砂緩衝材の衝突現象を 2 つの弾性体間の衝突現象とみなし、弾性理論により誘導されたものである。

まず、図 - 2 に示すように互いに向かい合って互いの中心を結ぶ直線上を運動する 2 つの球が点 O において衝突した場合を考える。衝突後両球は反対方向にそれぞれ P なる力を受けその速度が変化する。球 1 および球 2 の質量をそれぞれ m_1 、 m_2 とし衝突時の速度をそれぞれ v_1 、 v_2 とすれば、衝突時の速度変化の割合は式(付.1)によって与えられる。

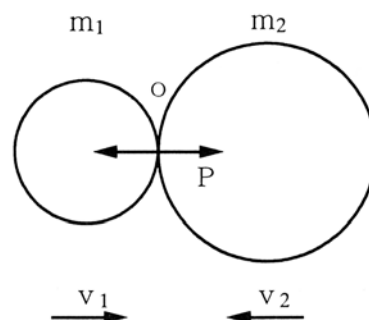


図 - 2 2 球の衝突

$$m_1 \frac{dv_1}{dt} = -P, m_2 \frac{dv_2}{dt} = -P \dots\dots\dots (付.1)$$

また、点0における局部的圧縮によって2つの球が互いに接近する距離をyとすると、yの時間的変化が相対速度であるから、

$$\frac{dy}{dt} = v_1 + v_2 \dots\dots\dots (付.2)$$

従って、加速度は式(付.1)を考慮して次式のように示される。

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{dv_1}{dt} + \frac{dv_2}{dt} = -P \left(\frac{m_1+m_2}{m_1m_2} \right) \dots\dots\dots (付.3)$$

ここで、yとPの間には接触する2つの球体間の圧力問題として解かれた式(付.4)の関係が成立するものと仮定する。なお、この式は初めてH. Hertzによって求められたことよりHertz(ヘルツ)式と呼ばれている。

$$y = \left[\frac{9\pi^2}{16} \frac{P^2(k_1+k_2)^2(R_1+R_2)}{R_1R_2} \right]^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (付.4)$$

ここで、 R_1 、 R_2 はそれぞれ球1、2の半径を示す。また、

$$k_1 = \frac{1-\nu_1^2}{\pi E_1}, k_2 = \frac{1-\nu_2^2}{\pi E_2} \text{ であり、} E_1, E_2 \text{ および } \nu_1$$

ν_2 はそれぞれ球1、2のヤング率、ポアソン比である。いま、

$$\frac{9\pi^2}{16} \frac{(k_1+k_2)^2(R_1+R_2)}{R_1R_2} = \frac{1}{n^2}, \frac{m_1+m_2}{m_1m_2} = m_r \text{ (付.5), (付.6)}$$

とくと、式(付.4)は式(付.7)のように、また式(付.3)は式(付.7)を用いて式(付.8)のように示される。

$$P = ny^{\frac{3}{2}}, \frac{d^2y}{dt^2} = -Pm_r = -nm_r y^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots (付.7), (付.8)$$

さらに、式(付.8)の両辺にdy/dtを乗じてt=0~tの間で積分すると、

$$\int_0^t \frac{dy}{dt} \frac{d^2y}{dt^2} dt = -nm_r \int_0^t y^{\frac{3}{2}} \frac{dy}{dt} dt \dots\dots\dots (付.9)$$

これを变形すると、

$$\frac{1}{2} \int_0^t \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 dt = -nm_r \int_0^y y^{\frac{3}{2}} dy \dots\dots\dots (付.10)$$

従って、

$$\frac{1}{2} \left[\left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right]_0^t = -\frac{2}{5} \left[nm_r y^{\frac{5}{2}} \right]_0^y \dots\dots\dots (付.11)$$

これより、最終的に次式を得る。

$$\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 - v_0^2 \right\} = -\frac{2}{5} nm_r y^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots (付.12)$$

ここで、 v_0 はt=0における2つの球の接近速度である。yの最大値は明らかにdy/dt=0のときに生じることより、式(付.12)においてdy/dt=0とすると式(付.13)が成立する。

$$y_{\max} = \left(\frac{5}{4} \frac{v_0^2}{nm_r} \right)^{\frac{2}{5}} \dots\dots\dots (付.13)$$

この値を式(付.7)に代入し、かつ式(付.6)を用いることにより、衝突時の最大圧縮力 $P_{\max}$ は次式のように示される。すなわち、

$$P_{\max} = n \left(\frac{5}{4} \frac{v_0^2}{nm_r} \right)^{\frac{3}{5}} = n^{\frac{2}{5}} \left(\frac{5}{4} v_0^2 \frac{m_1m_2}{m_1+m_2} \right)^{\frac{3}{5}} \dots\dots\dots (付.14)$$

ここで、nは式(付.5)より次式のように示される定数である。

$$n = \frac{4}{3\pi} \frac{1}{k_1+k_2} \left[\frac{R_1R_2}{R_1+R_2} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (付.15)$$

さて、添字1の球体を落石(球状で単位体積重量を $w_1=2.6\text{tf/m}^3$ と仮定)、添字2の球体を敷砂緩衝材とすると、落石は敷砂緩衝材に比較して十分剛であることより、 $E_1 = \infty$ ($k_1=0$)、 $m_2 = \infty$ 、 $R_2 = \infty$ と仮定できる。また、 $\nu_2=1/4$ と仮定すると、弾性論から $\lambda_2 = \mu_2$ となり、 E_2 およびnは次式のように示される。

$$E_2 = \frac{(1-\nu_2)(1-2\nu_2)}{\nu_2} \lambda_2 = \frac{\mu_2(3\lambda_2+2\mu_2)}{\lambda_2+\mu_2} = \frac{5}{2} \lambda_2, (付.16)$$

$$n = \frac{32}{9} \lambda_2 \sqrt{R_1} \dots\dots\dots (付.17)$$

ここで、落下高さをHとすると、落石の衝突速度は $v_1=v_0=\sqrt{2gH}$ となる。また、落石を球形に仮定していることより、落石重量は $W=m_1g$ 、 $W=(4/3)\pi R_1^3 w_1$ となる。 R_1 、 m_1 をWで置き換えることにより、最終的に $P_{\max}$ は次式のように示される。

$$P_{\max} = 2.455 \lambda_2^{2/5} W^{2/3} H^{3/5} \dots\dots\dots (1)$$

上式において、 λ の添字2は式を一般化するため省略した。式(1)は一般に振動便覧式と呼ばれ、落石対策便覧において、敷砂緩衝材を用いた場合の落石による衝撃力評価式として示されているものである。