

富士山新五合目駐車場における落石事故について

落石事故 落石速度 等価摩擦係数

(株)第一コンサルタンツ 国際会員 ○ 右城 猛

(株)相 愛 正会員 中村 和弘

1. まえがき

2009 年 7 月 14 日の午後、日本テレビの番記者より電話が入った。13 日の午後 8 時過ぎに富士山登山道の新五合目駐車場で起きた落石事故を実験で検証できないかという相談であった。

落石の大きさは、事故発生直後には直径約 1.2m、重さ約 3t と報道されていたが、その後の測定結果で約 1t ということであった。落石は標高 3000m 付近から、約 600m 下の駐車場までバウンドしながら落下し、防護柵を突破してキャンピングカーを直撃している。斜面の平均勾配は約 30 度。落石防護柵は、ワイヤロープ金網式の一般的な高さ 3m の防護柵である。分かっているのはこれだけである。このような状況でありながら、5 日後の「真相報道バンキシャ!」という番組で放映するので、実験は 3 日後の 17 日に行いたいという要望であった。常識的には考えられない話であるが、奇遇にも落石防護柵を設置して新しく開発した柵端金具の性能実験を行う準備をしていたので、それを利用すれば実験は可能であった。

以上のような経緯で落石実験を引き受けることになり、実験に必要な落石の速度、防護柵に持ち込まれた運動エネルギーを新聞やテレビで報道された情報に基づいて推定した。本稿では、その結果を発表する。

2. 落石の速度と運動エネルギーの推定

落石の速度を推定する方法には、落石の運動をすべり運動と見なした「そりモデル」(等価摩擦係数法とも呼ぶ)による方法、コンピューターで数値シミュレーションをする方法がある。落石対策の実務では「そりモデル」がよく使われているが、算定される速度の精度は低い。数値シミュレーションを行うには、落石発生源から防護柵の位置までの地形データが必要であるが、測量する時間的余裕はない。

この現場には、斜面末端に高さ約 3m の擁壁があり、その前が駐車場になっている。擁壁上に設置されている防護柵を落石が突破してキャンピングカーを直撃し、貫通して路面に落下した後、バウンドして前方の車に衝突している。防護柵の穴の位置、落石が路面に衝突した位置の座標が分かれば、落石の飛行軌跡を推定することができ、軌跡から理論的に落石の速度が計算できる。そこで、日本テレビにお願いし、防護柵の穴の位置と落石が路面に衝突した位置の座標を現地に行った取材班に測定してもらって教えてもらった。その情報を元に防護柵を突破した後の落石の軌跡を推定すると図 1 のようになる。

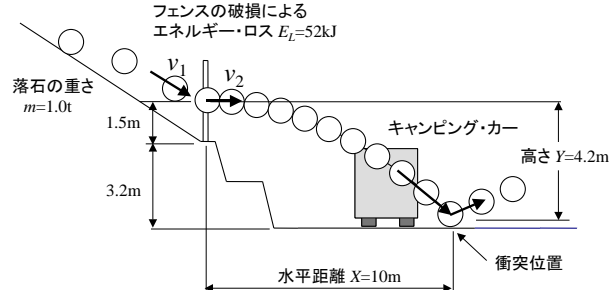


図 1 防護柵突破後の落石の飛行軌跡

落石が水平に飛び出したと仮定すると、防護柵突破後の初速度 v_2 はニュートン力学で次のように計算できる。ただし、落石がキャンピングカーの屋根を貫通したことによるエネルギー消費は無視できるものとする。

$$v_2 = \frac{X}{\sqrt{\frac{2Y}{g}}} = \frac{10.0}{\sqrt{\frac{2 \times 4.2}{9.8}}} = 10.8\text{m/s} \quad (39\text{km/h})$$

この時の運動エネルギー E_2 は

$$E_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2} \times 1.0 \times 10.8^2 = 58\text{kJ}$$

落石は、52kJ の運動エネルギーに耐えられる防護柵を突破していることから、防護柵で $E_L=52\text{kJ}$ のエネルギーが消費されたことになる。したがって、防護柵に持ち込まれた運動エネルギー E_1 は次のようになる。

$$E_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + E_L = \frac{1}{2} \times 1.0 \times 10.8^2 + 52 = 110\text{kJ}$$

防護柵に衝突する直前の落石の速度 v_1 は下記のように求められる。

$$v_1 = \sqrt{\frac{2E_1}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 110}{1.0}} = 14.8\text{m/s} \quad (53\text{km/h})$$

落石の速度に関して、7 月 15 日の TBS「みのもんたの朝ズバツ!」で、某大学教授は「車に衝突したときの速度は時速 200~360 キロ」とコメントされていた。新幹線並みの速さであり、私が計算で導き出した値の 5~9 倍である。日本テレビの番記者も、いろいろな専門家から速度や運動エネルギーについて取材をしたそうであるが、私が出した推定値よりはるかに大きかったようである。

落石を円柱と仮定して、転がり速度を計算すると、次のようになる。

$$v_1 = 0.82\sqrt{2gH} = 0.82\sqrt{2 \times 9.8 \times 600} = 88.9\text{m/s} \quad (320\text{km/h})$$

落石対策の実務で用いられている手法^りで、等価摩擦

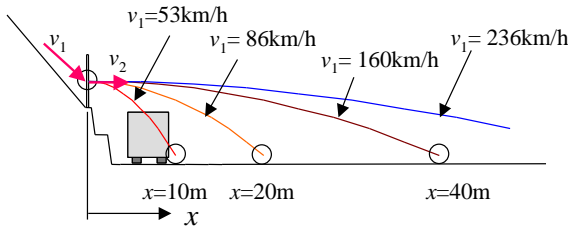


図 2 落石の速度と飛行距離

係数を $\mu=0.35$ として推定すると、下記の値になる。

$$v_1 = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta}\right)} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 600 \times \left(1 - \frac{0.35}{\tan 30}\right)}$$

$$= 68\text{m/s} \quad (245\text{km/h})$$

$$E_1 = mgH \left(1 - \frac{\mu}{\tan\theta}\right) (1 + \beta)$$

$$= 1.0 \times 9.8 \times 600 \times \left(1 - \frac{0.35}{\tan 30}\right) (1 + 0.1) = 2,500\text{kJ}$$

私のこれまでの経験では、上記のように計算すると速度を過大に見積もる。斜面を落下する落石は、転がりや滑りではなく、飛行と衝突を繰り返すバウンド運動となる。飛行している時は加速されるが、衝突するとエネルギーを消費して減速する。このため、落石の速度は円筒の転がり速度よりもはるかに遅くなる。

もしも落石の速度が新幹線並であれば、落石はキャンピングカーを直撃することにはならない。図 2 に示すように頭上を飛び越えていたはずである。

3. 等価摩擦係数

落石対策の実務においては、落石の運動をすべり運動と見なした「そりモデル」(等価摩擦係数法)¹⁾で落石の速度や運動エネルギーを算定している。斜面の平均傾斜角を $\theta=25^\circ$ として、推定された速度 v_1 から等価摩擦係数 μ を逆算で求めると次のようになる。

$$\mu = \left(1 - \frac{v_1^2}{2gH}\right) \tan\theta = \left(1 - \frac{14.8^2}{2 \times 9.8 \times 600}\right) \tan 30 = 0.57$$

事故後の静岡県富士土木事務所の現地調査結果によれば、落石発生源は、事故現場から約 400m 上の標高 2790m 地点にある溶岩が固まってできた崖部であり、落石の速度は 20m/s(72km/h)であったと発表されている²⁾。この結果から等価摩擦係数を逆算しても $\mu=0.55$ となり、前述の逆算値とほとんど変わらない。

過去の落石事故現場から逆算で求められた等価摩擦係数は、図 3 のようになる。等価摩擦係数 μ は、斜面の平均勾配 $\tan\theta$ より若干小さ目であることがわかる。斜面勾配が緩い斜面ほど等価摩擦係数は小さくなる傾向がある。落石は飛行と衝突を繰り返しながら斜面を落下する。斜面勾配が急なほど飛行時間が長くなり速度も大きくなるが、斜面に衝突すると多くの運動エネルギーを消費する。

斜面勾配が緩いと、飛行してもすぐに着地するので飛行

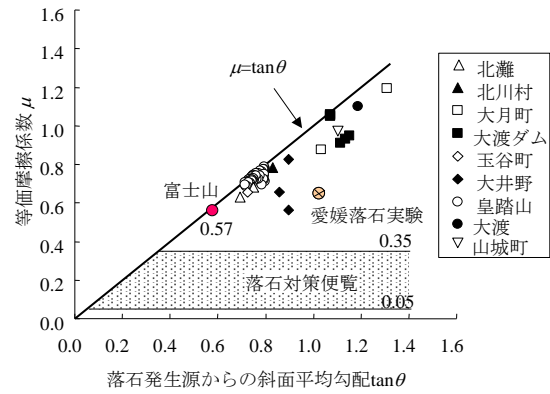


図 3 逆算で求められた等価摩擦係数

時間は短い。このため、斜面に衝突して失われる運動エネルギーも小さくなる。この結果、斜面の勾配が緩いと等価摩擦係数が小さくなるものと考えられる。

4. 落石事故の教訓

富士山の事故現場から逆算された等価摩擦係数は、著者がこれまでに調査してきた現場の等価摩擦係数と同様に $\tan\theta$ に近い値であることが明らかになり、落石対策の実務で用いられている等価摩擦係数 0.05~0.35 の値は、小さすぎるということが改めて確認された。

誤った等価摩擦係数 μ_i を用いて求められる運動エネルギー $E(\mu_i)$ と正しい等価摩擦係数 μ を用いて求められる運動エネルギー $E(\mu)$ の比は次式で表される。今回の事故現場の場合 $\mu=0.35$ とすると、落石エネルギーを 31 倍も過大に評価することになる。

$$\frac{E(\mu_i)}{E(\mu)} = \frac{\tan\theta - \mu_i}{\tan\theta - \mu} = \frac{\tan 30 - 0.35}{\tan 30 - 0.57} = 31$$

Ritchie(1963)らの研究によると、斜面勾配が 1:1.3(38°)より緩い斜面では落石は生じにくいとされている³⁾。著者らのこれまでの経験でも、傾斜角が 35° より緩い斜面では落石事故が起きていない。今回の事故は特異なものであったと言える。このことは、静岡県警山岳遭難救助隊の方の「富士山での落石は傾斜が急な 8 合目から頂上付近にかけて起きることが多く、5 合目付近での落石事故は極めて珍しい。普通の落石なら 5 合目までは落ちず、途中で止まる。フェンスを突き破ったのは初めてではないか⁴⁾という証言からも裏付けられる。

最後に、落石事故で亡くなられた筒井良孝さんのご冥福をお祈り申し上げます。

[参考文献]

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 日経コンストラクション：フェンスを突き破った重さ 1t の落石で車中の 1 人が死亡，2009.8.14
- 3) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料-落石シミュレーション手法の調査研究資料一，2002.4

地盤工学会四国支部平成 21 年度技術研究発表会 2009 年 11 月

4) 読売新聞, 2009 年 7 月 15 日