

富士山新五合目駐車場における落石事故の検証

(株)第一コンサルタンツ 右城 猛

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。前日の20時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によって検証できないかという相談であった。

実験をするには、最低でも落石の質量、防護柵に衝突したときの速度、落石防護柵の種類が分かっているなければならない。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、その後に測定した結果によれば約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約1.5kmの距離を転がり落ち、落石防護柵を突破してキャンピングカーを直撃している。斜面の勾配は20度～30度。落石防護柵は、一般的な高さ3mの防護柵ということであった。現時点で分かっているのは、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。「盲、蛇に怖じず」とは、このようなことを言うのだろうと思った。しかし奇遇にも、落石防護柵の性能を確認するために、高さ1.5mの落石防護柵を設置して、コンクリート塊を衝突させる準備をしていたので、それを利用すれば実験を行うことが可能であった。

以上のような経緯で、落石実験を引き受けた。高エネルギー吸収型の落石防護柵では実験が行われているが、従来から使用されている一般的な落石防護柵に対しては本格的な実験は行われておらず、防護柵のエネルギー吸収性能もよく分かっていない。実験によって貴重な結果が得られたのでここに公表する。

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)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。地形を測量する時間的余裕はない。

この現場の場合、斜面の末端に高さ約3mの擁壁があり、その前が駐車場になっている。擁壁の上に設置されていた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る。飛行軌跡がわかれば、理論的に落石の速度や運動エネルギーが計算できる。そこで、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いる取材班に測定してもらって私に教えて欲しいとお願いした。

教えてもらった情報を元にして、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。落石が防護柵を突破した位置から路面着地点までの高さは $Y=4.2\text{m}$ 、水平距離は $X=10\text{m}$ である。

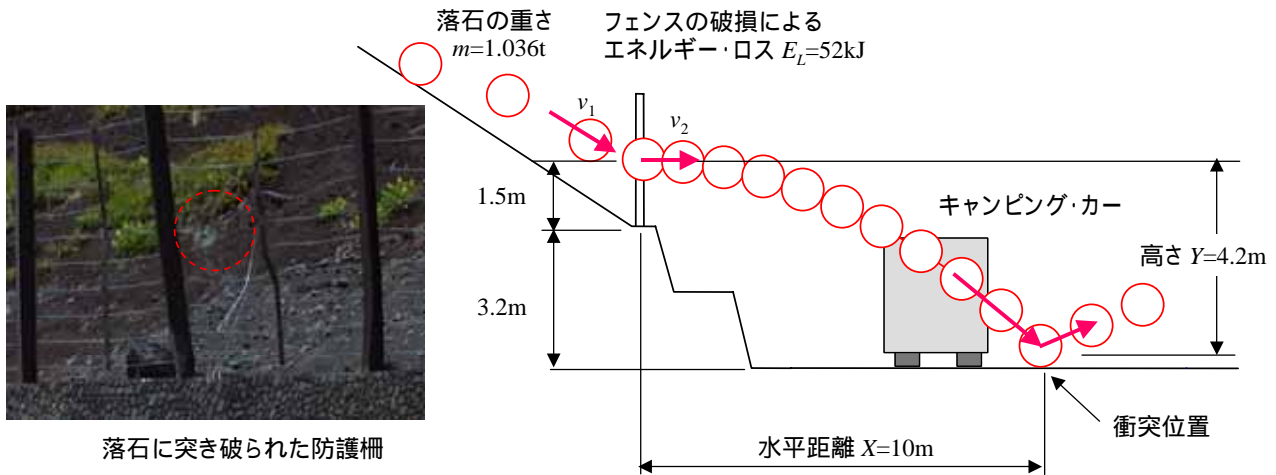


図 1 防護柵突破後の落石の飛行軌跡

防護柵を突破した落石が水平に飛び出したと仮定すると、着地するまでの飛行時間はニュートンの運動力学で次のように計算できる。ただし、落石はキャンピングカーの屋根を貫通しているが、それによるエネルギー消費は少なく無視できるものとする。

$$t = \sqrt{\frac{2Y}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 4.2}{9.8}} = 0.926(\text{s})$$

防護柵突破後の初速度 v_2 は、

$$v_2 = \frac{X}{t} = \frac{10.0}{0.926} = 10.8\text{m/s} \text{ (39km/h)}$$

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キャンピングカーを直撃していることから、防護柵で消費された運動エネルギーは $E_L=52\text{kJ}$ と考えられる。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。

$$E_1 = E_2 + E_L = 58 + 52 = 110\text{kJ}$$

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。

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

斜面をバウンドしながら落下してきた落石の速度は、一般道を走る自動車の速度程度であったと推測される。

現場の落石防護柵が、図 2 に示す一般的な可能吸収エネルギー 52kJ のもので間違いないと確信したのは、7月15日の産経新聞の「静岡県道路局は、落石防止柵は直径 60cm、重量約 300kg の石が高さ 40m の斜面から落下しても耐えられるように設計していたとコメントされている。」という記事であった。

設計では 0.05 ~ 0.35 の範囲内の等価摩擦係数を採用しているが、等価摩擦係数を 0.35 と見なし、落石による運動エネルギーを下記のように 51kJ と推定し、これに耐えうる防護柵を採用していたものと思われる。

部材表

(50m単位)

部材名	規格・寸法	単位	数量	重量(kg)	備考
端柱	支柱	H200x200x6x12x3850	2	651.4	月田、7月、26、現在設置状況不明
	基礎金具	φ25x500	20	74.0	
中柱	支柱	H200x100x5.5x3850	8	724.5	
	ワイヤロープ	M12	80	11.7	
	鋼線ロープ	M4-5	18	0.2	
鋼線ロープ	鋼線ロープ	FRB5x4.5x800	2.25	87.5	
	ワイヤロープ	M12	100	13.0	
ネット	ネット	3x7.5/O #18	300m	330.0	
	鋼線	φ3.2x50x50	3.04	279.0	
	鋼線	φ4	0.11	6.2	
	鋼線	φ2	0.03	1.8	

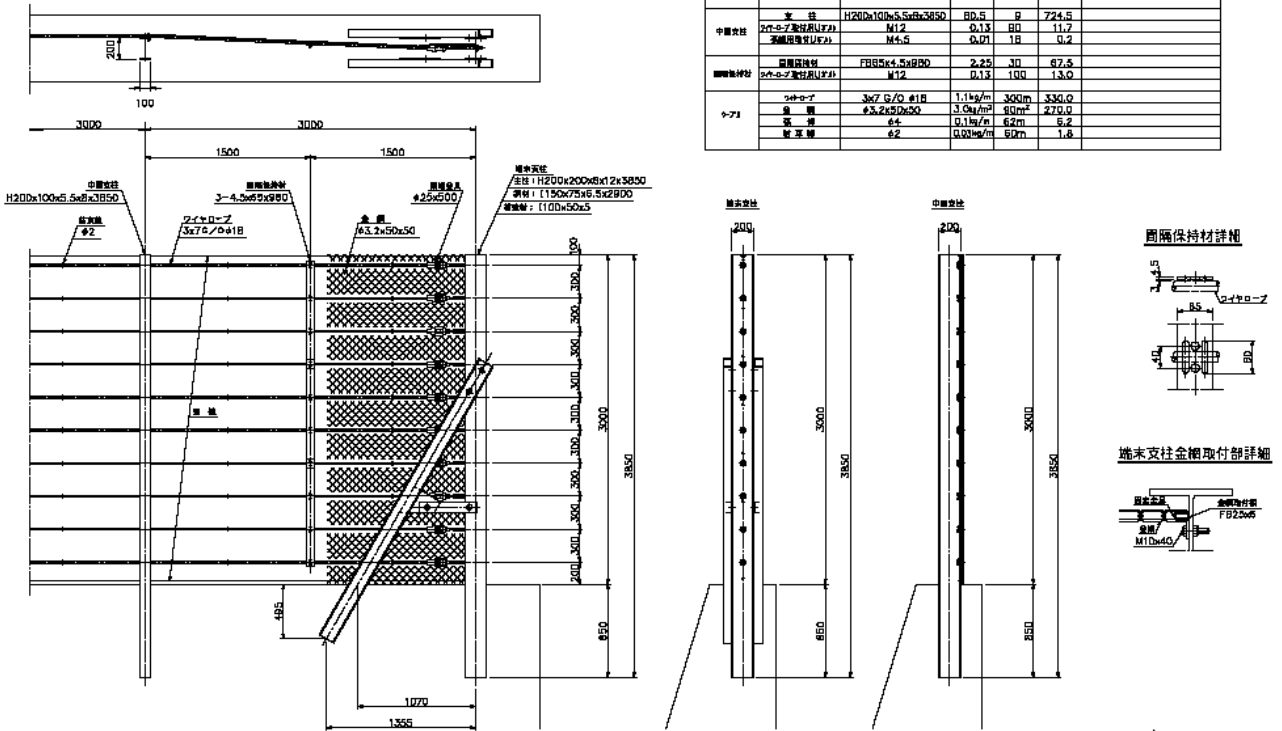


図 2 富士山の落石事故現場に設置されていたものと同じ落石防護柵

$$E = mgH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) (1 + \beta) = 0.3 \times 9.8 \times 40 \times \left(1 - \frac{0.35}{\tan 30} \right) (1 + 0.1) = 51 \text{ kJ} < 52 \text{ kJ (O.K.)}$$

落石の落差を 40m としているのは、「落下高さが 40m 付近で終端速度に達する」という経験則に基づいたものである。

落石の速度に関して、7月15日のTBS「みのもんたの朝ズバッ！」で、某大学教授は「車に衝突したときの速度は時速 200~360km」とコメントされていた。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、いずれも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。

$$v_1 = 0.816 \sqrt{2gH} = 0.816 \sqrt{2 \times 9.8 \times 600} = 88.5 \text{ m/s (319 km/h)}$$

また、等価摩擦係数を $\mu = 0.35$ として落石対策の実務で用いられている手法で速度と運動エネルギーを算定すると、下記の値になる。

$$v_1 = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right)} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 600 \times \left(1 - \frac{0.35}{\tan 25} \right)} = 54 \text{ m/s (195 km/h)}$$

$$E_1 = mgH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) (1 + \beta) = 1.0 \times 9.8 \times 600 \times \left(1 - \frac{0.35}{\tan 25} \right) (1 + 0.1) = 1,613 \text{ kJ}$$

マスコミから取材を受けた学識経験者は、上記のような計算結果を拠り所として速度や運動エネルギーについてコメントされたものと思われる。

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、学識経験者の方々が言われるように新幹線並であれば、落石の着地点は落石防護柵の位置から 50m 以上離れた所になる。速度が 80km/h 以上であれば、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 3 に示すように頭上を飛び越えていたはずである。

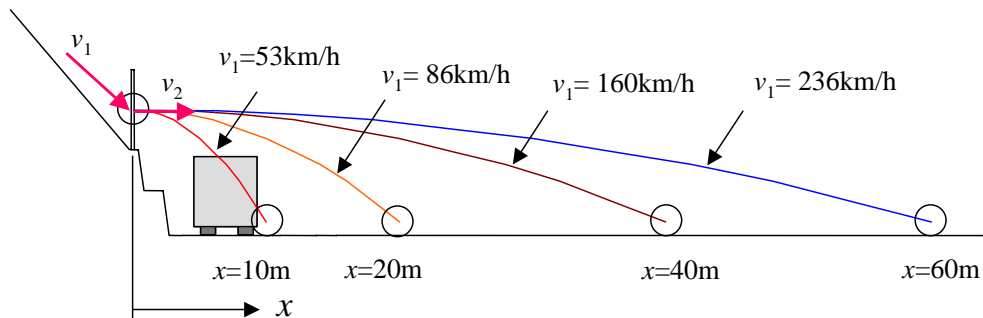


図 3 落石の速度と飛行距離

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)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。

$$\mu = \left(1 - \frac{v_1^2}{2gH} \right) \tan \theta = \left(1 - \frac{14.8^2}{2 \times 9.8 \times 600} \right) \tan 25 = 0.46$$

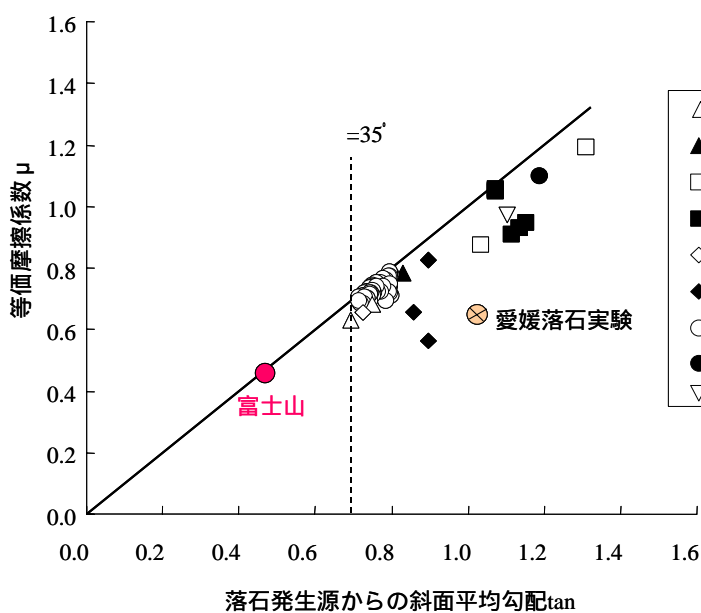


図 4 斜面の勾配と等価摩擦係数

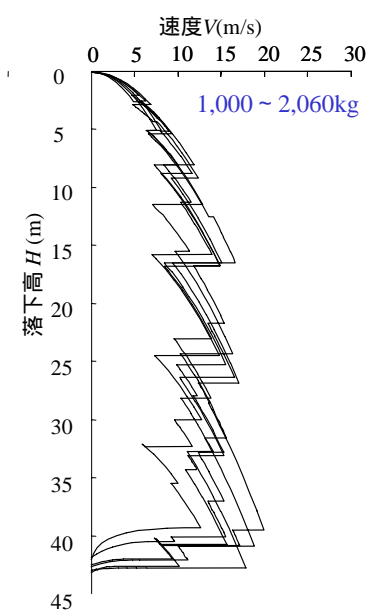


図 5 落石の速度の変化

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 4 のようになる。等価摩擦係数 μ は、斜面の平均勾配 \tan 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。

このような傾向が現れる理由は、落石の運動形態にあると思われる。図 5 は、国土交通省四国地方整備局が愛媛県の土居町で行った落石実験(平成 15 年度落石防護対策検討業務委託)から得た落石の速度分布である。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。

私のこれまでの経験では、落石事故が発生する斜面は傾斜角が 35° より急な斜面である。斜面傾斜角が 35° よりも緩いと、大抵の落石は斜面の途中で停止する。しかし、落石の形状や斜面の状況によっては、転がりながら(厳密には飛行距離の小さいバウンドを繰り返しながら)斜面の下まで落下することが稀にある。

4. 落石による衝撃力

取材を受けた記者から、落石が衝突するとどの程度の衝撃力が加わるのかという質問を受けた。衝撃力は、落石の質量と落石が衝突時に受ける加速度の積で表される。加速度の大きさは、落石の速度の影響も受けるが、衝突する相手の硬さによって変化する。コンクリートのような固い壁に衝突すると加速度が大きくなり衝撃力も大きくなる。

落石が防護柵に衝突したときの衝撃力は、平成 13 年度に国土交通省四国地方整備局が行っているコンクリート塊衝突実験(平成 14 年度落石防護柵基礎の設計手法検討業務委託)の結果から推測することができる。

この実験では、高さ 1.5m、延長 3m~9m の落石防護柵に、質量 0.47t の振り子のある高さから衝突させて、コンクリート塊の加速度を測定している。実験結果によると、衝撃波形は正規分布曲線のようになり、コンクリート塊を衝突させる速度が速いほど衝撃力は大きな値を示すが、衝撃力の作用時間は衝突速度にあまり関係なく 0.1 秒程度になっている。衝撃波形を三角形パルスに換算すると、作用時間は $t=0.08$ 秒程度である。

運動の第 2 法則「運動量の変化は力積に等しい」は次のように表される。

$$mv_1 - mv_2 = \int Fdt$$

衝撃波形を三角形パルスと仮定すると、力積は次のようになる。

$$\int Fdt = \frac{1}{2}ma\Delta t$$

上記の 2 つの式より、最大衝撃力 F は下記のように表される。落石の質量は $m=1t$ 、衝突前の速度は $v_1=14.8m/s$ 、衝突後の速度は $v_2=10.8m/s$ 、衝撃作用時間は $t=0.08$ 秒とすると、最大衝撃力は 100kN となる。

$$F = 2m \frac{v_1 - v_2}{\Delta t} = 2 \times 1.0 \times \frac{14.8 - 10.8}{0.08} = 100kN = 10 \text{ トン}$$

5. 検証実験

5.4 実験の概要

実験は、図6に示すように斜面上に設置したレールの上を、重さ2tのコンクリート塊を滑走させ、レールの前方に設置した防護柵に衝突させるものである。レールの傾斜角は45度であるが、下端は23度になっている。実験前に想定した落石速度は10m/sで、運動エネルギーは100kJ。実験に用いた防護柵は、図7に示す高さ1.5m、延長9mのもので、可能吸収エネルギーは55kJ(計算上の値)である。

富士山で起きた落石は、重さが1tで、推定された速度は14.8m/s、運動エネルギーは110kJ。防護柵は高さ3mのもので、可能吸収エネルギーは52kJ(計算上の値)である。落石事故現場の条件を完全に再現していることにはならないが、ほぼ同等の条件と言える。

実験は7月16日と17日の2回行った。当初は1回だけの予定であったが、実験に不備があり落石事故現場で起きたような防護柵の破壊を再現することができなかったため、実験方法に改良を加えて再度行った。実験場所は、南国市にある田中工業(株)の資材置場で、地盤工学会四国支部・落石対策研究委員会がロングスパン等の落石防護工の実験を行っている所である。

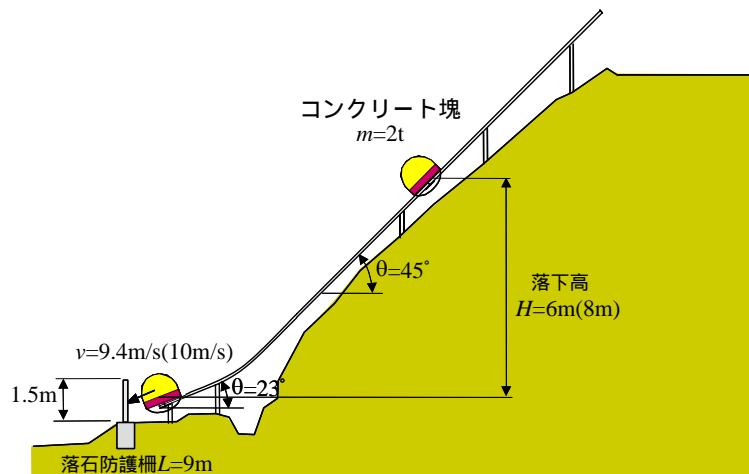


図6 実験の方法

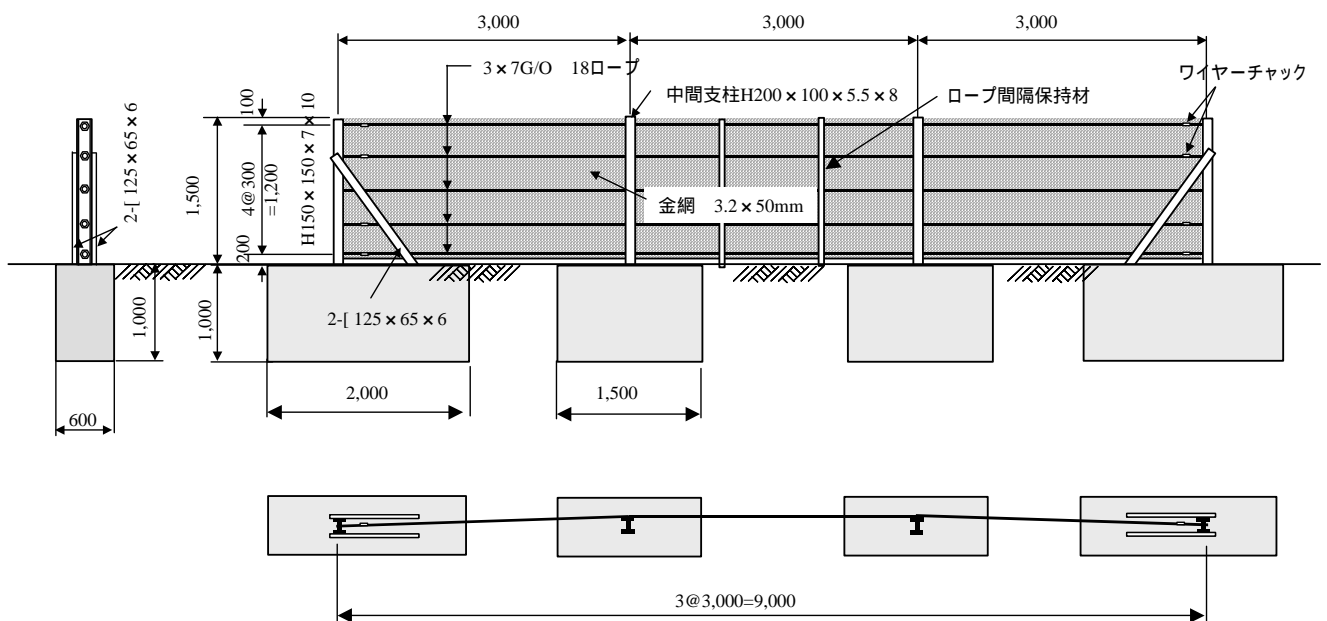


図7 実験に使用した落石防護柵

表 1 落石防護柵の条件

	柵高	柵延長	ワイヤロープ	金網	中間支柱	端支柱	吸収エネルギー
富士山	3.0m	30m 以上	3×7G/O 18-10 段	3.2 × 50mm	H-200 × 100@3m	H-150 × 150	52kJ
実験	1.5m	9m	3×7G/O 18-5 段	3.2 × 50mm	H-200 × 100@3m	H-150 × 150	55kJ

表 2 検証実験の条件

	落石質量	落下高	斜面勾配	運動形態	衝突速度	運動エネルギー
富士山落石	1 t	600m	30～20°	バウンド	14.8m/s (53km/h)	110kJ
第 1 回目実験	2 t	6m	45～23°	滑走	9.4m/s (34km/h)	88kJ
第 2 回目実験	2 t	8m	45～23°	滑走	10.0m/s (36km/h)	100kJ

富士山の落石現場と今回の実験の条件を比較すると、表 1、表 2 のようになる。なお、表 2 のコンクリート塊の速度は計測値である。

第 1 回目の実験ではレール下端の 2 箇所には光電スイッチを設置し、コンクリート塊がこの間を通過する時間を測定することにより速度を測定した。スピードガンでも測定したが、計測値は光電スイッチの測定結果とほぼ同じ値であった。第 2 回目の実験では、スピードガンのみで測定した。

5.5 第 1 回目の検証実験

第 1 回目の検証実験は、7 月 17 日(金)の午後に実施した。重さ 2t のコンクリート塊を高さ 6m から落下させた。光電スイッチで測定した衝突時の速度は 9.4m/s(34km/h)であった。運動エネルギーは、富士山の落石事故の 80%に相当する 88kJ であった。それでも落石防護柵の可能吸収エネルギーの 1.6 倍に当たる。



写真 1 第 1 回目の検証実験の実験装置



写真 2 第 1 回目の検証実験の実験装置



写真 3 防護柵の破損状況。端末支柱が倒れ、2 段目の引付棒が破断。



写真 4 倒れた端末支柱の根元



写真 5 破断した引付棒

実験の結果は、写真 3～写真 5 に示す。左側の端末支柱と斜材(溝形鋼)を連結していた 2 本のボルトの内、前面に使用していた六角ボルト M30 が破断した。ナットは数メートル先に吹っ飛んでいた。背面側には高力ボルト M16(F10T)を使用していたので破断することはなかったが、溝形鋼のボルト孔が破損した。これによって、端末支柱は写真 3 のように内側に根元から倒れた。なお、右側の端末支柱と斜材の連結には、前後ともに高力ボルト M16(F10T)を使用していたので損傷が起きなかった。

端末支柱の根元は、写真 4 のように局所座屈していた。根元に亀裂が見えるが、これは倒れていた支柱を重機で引き戻した際に入ったものである。

下から 2 段目の引付棒(25, SS490)は、ネジ部で破断した。なお、引付棒の座金には、端部を補強するために 120mm × 6mm × 150mm の鋼板(SS400)を使用していた。

6. 第 2 回目の検証実験

第 1 回目の検証実験では、コンクリート塊が地面に衝突し、地面がコンクリート塊の運動エネルギーの一部を吸収してしまったため、予定していた運動エネルギーを落石防護柵に作用させることができなかった。このため、レール設置高さを第 1 回目よりも 10cm 上げると共に、防護柵の前方の地盤を溝状に掘り下げた。

端末支柱は根元が損傷していたので、H 形鋼(H-200 × 200)で補強した。

第 2 回目の実験は、7 月 18 日(土)の午後 1 時より実施した。コンクリート塊の落下高さは 8m に変更した。スピードガンで測定した速度は 10.0m/s (36km/h)で、運動エネルギーは 100kJ であった。

実験設備を写真 6、写真 7 に示す。写真 8 は、コンクリート塊が防護柵に衝突する直前である。レールを 10cm ほど持ち上げたため、コンクリート塊に取り付けてある車輪が地面に接触することなく防護柵を直撃している様子が分かる。

コンクリート塊の衝突による防護柵の破損状況を写真 9～写真 15 に示す。



写真 6 末端支柱を H 形鋼で補強。コンクリート塊はレール下端より 8m 上方へ固定。



写真 7 防護柵の前方の地盤を溝状に掘り下げた。



写真 8 コンクリート塊が防護柵に衝突する直前



写真 9 コンクリート塊が防護柵を突破して、溝の端まで転がって停止した。



写真 10 ワイヤロープが破断。金網は中央スパンに引き寄せられた。



写真 11 防護柵の破損状況。最上段のロープは、ワイヤチャックから引き抜けている。



写真 12 上のロープはストランドが1本抜けている 写真 13 ャックからストランドの抜け出し



写真 14 3本のストランドが外れている

写真 15 2本のストランドが外れている

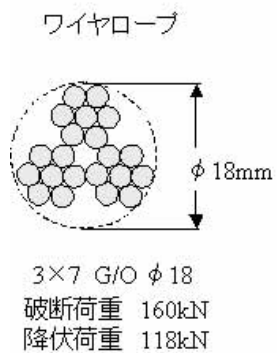


図 8 ワイヤロープ

写真 16 ワイヤチャックと楔

落石防護柵には図 8 に示す 3×7G/O 18 というワイヤロープが使用されている。これは、7本の素線で編んだ3本のストランドをより合わせて作られている。G/O という記号は、亜鉛メッキ、赤ロープグリース(O)を施した普通Z撚りのG種ということの意味している。破断荷重は 160kN、降伏荷重は 118kN である。

ワイヤロープと引付棒を連結するには、写真 16 に示すワイヤチャックと呼ばれる金具が用いられている。ワイヤロープをチャックに固定させるには、写真にあるような楔が使用されている。ワイヤロー

ブを引っ張れば引っ張るほど楔がチャックの中に食い込んでローブを締め付けるので、ローブが抜け出すことはない。しかしながら、落石のような衝撃力が加わると、ローブが振動して引張力と圧縮力が交互に作用する。この結果、楔が緩んでローブが引き抜けるのではないかと思えた。

ワイヤローブはチャックの中で3本のストランド分けられて、その中に楔を撃ち込むことで固定しているが、いろいろな理由で3本のストランドに力が均等に伝達されないのではないかと思われる。

今回の実験では、ワイヤローブの破断荷重より小さい力で、ワイヤローブがチャックから引き抜けた。3本のストランドが引き抜けるケースと、1本あるいは2本のストランドだけが引き抜けるケースが見られた。

6.4 実験で気がついたこと

今回の実験は、富士山で起きた落石事故を検証することが目的であった。事故現場の状況から落石の速度は14.8m/s(53km/h)、落石の運動エネルギーは110kJと推定されたが、この落石エネルギーで防護柵が突き破られるかどうかを確認するねらいがあった。7月19日の夕方の番組で放映しなければならないという時間的制約があり、通常の実験で行われている加速度、ひずみ、変位などの計測は省略した。

それでも多くの知見が得られた。落石防護柵の問題点も明らかになった。実験で気がついた点を以下に列挙する。

- (1) 実験に使用した落石防護柵は、可能吸収エネルギーが55kJのものであった。それが88kJのコンクリート塊の運動エネルギーで破壊した。可能吸収エネルギーの1.6倍の運動エネルギーを加えたのだから破壊するのは当然であるが、一般の土木構造物に比べて安全余裕が少ない。
- (2) 落石防護柵の設計では、ワイヤローブと支柱の変形による歪みエネルギーが計算されているのみで、ワイヤローブ、柵端金具(引き付け棒とワイヤチャック)、端末支柱と斜材、中間支柱の破壊に対する検討が行われていない。経験的に決められた仕様で設計・施工されているが、問題が多いと思われる。
- (3) 計算では、ワイヤローブの歪みは全長にわたって一定であると仮定しているが、実際には中間支柱との間に摩擦があるため、落石が衝突したスパンのワイヤローブの張力が大きくなっている。
- (4) メーカーのカタログには、柵端金具(引出棒、ワイヤチャック)の強度はワイヤローブの破断荷重(160kN)以上であると明記されているが、衝撃荷重を受けたときにその強度が発揮されるか疑問である。衝撃によってワイヤチャックの楔が緩んでローブが引き抜ける。
- (5) 引出棒は端末支柱のウェブにボルト・ナットで固定されているが、ワイヤローブにわずかな張力が働いただけでウェブが局所的に変形し、降伏荷重以下の力でウェブは破壊する。
- (6) 端末支柱と斜材の連結ボルトの強度を照査しておく必要がある。
- (7) 中間支柱の計算では、ワイヤローブの反力が支柱のウェブ方向(強軸方向)に作用すると仮定しているが、実際にはウェブ方向と一致しない。このため、支柱がねじりを伴いながら座屈変形する。反力の作用方向を考慮した計算が必要である。

7. あとがき

落石防護柵は落石対策の代表的工法として古くから使われてきているが、構造計算手法は確立されていない。設計・施工には、製品メーカーが経験的に作った標準図面を利用しているのが実情である。このため、落石防護柵の実際のエネルギー吸収性能や耐衝撃性能は明らかになっていない。

通常の土木構造物は 2~3 倍の安全余裕を持つように設計されている。落石防護柵についても同様の安全余裕があるものと思っていた。ところが、コンクリート塊を 88kJ の運動エネルギーで衝突させたところ防護柵は大破した。

今回の実験でいろいろなことが明らかになった。しかし、時間的制約がある中で行った 1 ケースの実験であるため、これらのことが一般的に言えるかどうかさらに検証する必要がある。今後も実験を継続し、既存の落石防護柵のエネルギー吸収性能や耐衝撃性能を向上させるための技術開発に取り組むと共に、より合理的な落石防護柵の構造解析手法を提案する予定である。



写真 17 7月18日の二回目の実験での取材に応える筆者

今回のように 3 日間もテレビ局の記者とお付き合いさせていただいたのは、初めての経験であり、非常に勉強になった。

7月16日の13時に来社されることを事前に聞いていたので、前日に落石の運動のメカニズムや落石の運動エネルギーを推定した根拠などの資料を準備していた。いざ説明すると、私の言っていることがほとんど通じないのである。「エネルギーとは何ですか、エネルギーが大きいと力大きいということですか、キロジュールとは何ですか、速度を秒速に直すといくらになりますか？」などの質問をされて、どのように答えれば良いのか分からず困ってしまった。誰にでも分かるような表現の仕方を学ばなければならないと思った次第である。

実験の結果は、7月19日18時からの「真相報道バンキシャ!」(日本テレビ)で約10分間にわたって放送されたが、コンクリート塊が防護柵を直撃する場面が繰り返し映し出され、私が取材を受けて話したコメントが紹介されたのは、「このフェンスは、1トンの自動車が時速40キロで衝突しても大丈夫なものです」の一言だけであった。私が喋った専門的なことなどは全く興味がないようであった。視聴者に落石の脅威を訴えるには、実際の現象を見せるのが最も効果的であるのは確かである。

今回の実験は、日本テレビの依頼を受けて(株)第一コンサルタンツが実施したものである。実験に際しては、愛媛大学防災情報研究センターの矢田部龍一教授、田中工業(株)の田中登志男会長、(株)ピーセーフの松島秀士社長、(株)ロイヤルコンサルタントの筒井秀樹社長、日本プロテクト(株)の加賀山肇社長、五大開発(株)の高森秀次様にご協力いただきました。心より感謝申し上げます。

(2009年7月23日記)