新しく開発した落石防護柵用柵端金具の実証実験

(株)第一コンサルタンツ 右城 猛

1.まえがき

2009 年 7 月 13 日の夜,富士山スカイラインの富士宮口新五合目駐車場で,落石が防護柵を突き破ってキャンピングカーを直撃し,キャンピングカーの中にいた男性が死亡するという事故が発生した。

筆者らは,日本テレビから依頼を受けて,この事故の検証実験を行った。実験は2回であったが,端 末支柱と柵端金具(引付棒,ワイヤチャック)が予想以上に弱いことが判明した。端末支柱を補強し,緩 衝機能を備えた柵端金具に取り替えれば,在来の落石防護柵のエネルギー吸収性能を高めることが可能 と思われる。

そこで,写真2に示す新しい柵端金具を開発した。この柵端金具の効果を確認する目的でコンクリート塊を衝突させる実験を行った。柵端金具を取り替えた以外は,富士山落石事故の検証で行った第2回目の実験と同様の条件で実験を行った。その結果,新しく開発した柵端金具を使用すれば,落石防護柵のエネルギー吸収性能が従来よりも2~3倍大きくなることを確認することができた。

2. 実験条件

実験は,図1,写真1に示すように斜面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,防護柵の損傷を観察した。

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。コンクリート塊の落下高さは 8m とした。これは,富士山落石事故の検証実験で行った第2回目の実験と同じであり,防護柵に衝突する速度は 10m/s(36km/h),運動エネルギーは 100kJ である。



図 1 実験の方法



写真 1 実験装置とコンクリート塊



図 2 落石防護柵

実験に使用した防護柵を図2,写真1,写真2に示す。富士山落石事故の検証実験で使用した防護柵 を利用した。ただし,金網とワイヤロープは新しいものと取り替えている。金網は 3.2×50 の菱形金 網で一般的に使用されているものと同じであるが, ワイヤロープには 7×19A/Z 18 を使用している。 19本の小さい径の素線で編んだ7本のストランドをより合わせて作られているので,一般の落石防護柵 に使用されている 3×7G/O 18よりもロープの断面が真円に近い。破断荷重は 200kN であり, 3×7G/O 18よりも 1.25 倍強い。



(左上)正面 (左下)上面 (右)側面写真 2 新しく開発した柵端金具を取り付けた状態

新しく開発した柵端金具は,金沢大学名誉教授の吉田博(工学博士,技術士)先生が考案した緩衝装 置を組み込んで作った柵端金具である。ワイヤロープ(7×19A/Z 18)の破断荷重は 200kN であるが, 50kN 以上の力が作用すると,柵端金具の中をワイヤロープがスリップする仕組みになっている。スリ ップしている間の摩擦力を一定に保つために,緩衝装置に各種の工夫がなされているが,使用できるワ イヤロープは7×19A/Z 18,あるいは7×7G/O 18 である。落石対策で一般に用いられているワイヤ ロープ3×7G/O 18 は,断面が三角形に近いので適用できない。

3. 実験結果

質量2トンのコンクリート塊を,速度10m/sで衝突させたときの状況を写真3に示す。中間支柱が前 方へ倒されている。端末支柱に固定した柵端金具の中を通して外に出しているワイヤロープに注目する と,衝突前と衝突中で垂れ下がったロープの長さが変化している。ワイヤロープが引っ張られて,柵端 金具の中をスリップしたためである。



(a) 衝突前(b)衝突中写真 3 コンクリート塊を防護柵に衝突させた瞬間の写真



写真 4 防護柵の変形



写真 5 ワイヤロープの変形



写真 6 中間支柱の根元が座屈



写真 7 中間支柱の傾斜

写真 8 防護柵の変形と柵端金具 写真 9 衝突後の柵端金具

中間支柱は根元が座屈して前方へ大きく倒れた。写真 4, 写真 7, 写真 8の破線は, 衝突前のワイヤ ロープの位置を表している。倒れたことによる頭部の水平変位は,正面から見て左側が 70cm(傾斜角 30°), 右側が 75cm(傾斜角 32°)であった。



衝突前

衝突前



衝突後 (a) 左側柵端金具

衝突後 (b) 右側柵端金具

写真 10 柵端の状況

	左側	右側	計
5段目	201	54	255
4段目	162	122	284
3段目	168	248	416
2段目	176	172	348
1段目	0	0	0
合計	707	596	1,303

表 1 柵端金具位置のワイヤロープのスリップ長 (mm)

写真 10 は,コンクリート塊を衝突させる前と衝突させた後の柵端部の状況を示している。ワイヤロ ープに巻いた白いビニールテープの位置が衝突前後で表1 に示すように変化している。1 段目(最下段) のワイヤロープは変化していないが,それ以外のワイヤロープは左右で255~416mm スリップしている。 全体では1303mm スリップしている。

従来の柵端金具を用いた実験では,引付棒の破断,ワイヤチャックの楔の緩みでワイヤロープが引き 抜けるという問題が発生した。しかし,新しく開発した柵端金具では,写真 8~写真 10 で明らかなよう に全く変状が見られない。

写真 11 は,コンクリート塊を撤去した後の防護柵の状態である。金網,ワイヤロープは塑性変形している。ワイヤロープにも局所的には降伏荷重 150kN を越える張力が作用したことを物語っている。しかしながら,富士山落石事故の検証実験で見られたようなワイヤロープの破断や金網の破網といった損傷は見られない。



写真 11 ワイヤロープと金網の状態

4. ワイヤロープ,中間支柱の変位と応力度

(1)中間支柱の変位

中間支柱の変位を図3に示す。根元付近が座屈して大きく傾いた。先端位置での水平変位は,正面より見て左側が70cm,右側が75cmであった。傾斜角はそれぞれ30°,32°である。



(2)ワイヤロープのたわみ

中間支柱の変形とワイヤロープの変形を図4のように仮定すると,防護柵中央におけるワイヤロープのたわみ量 x2を次式で求めることができる。

$$x_{2i} = \sqrt{\left(\lambda_1 + \lambda_2 + \frac{\Delta si + \Delta \varepsilon i}{2} - \sqrt{\lambda_1^2 + x_{1i}^2}\right)^2 - \lambda_2^2 + x_{1i}}$$

ここに ,

x_{2i}:i段目のワイヤロープの防護柵中央におけるたわみ量

x_{1i}: i 段目のワイヤロープの中間支柱位置におけるたわみ量

支柱上端の水平変位量を 725mm(左右の支柱の平均値)とすると, i 段目のワイヤロープ位置の水平変 位量は次式で求めることができる。



図 4 中間支柱とワイヤロープの変形の模式図

$$x_{1i} = \frac{725}{1300} y_i$$

 $y_i: 1$ 段目のワイヤロープから i 段目のワイヤロープまでの高さ。

 $y_1=0$, $y_2=300$ mm, $y_3=600$ mm, $y_4=900$ mm, $y_5=1200$ mm

1:端末支柱と中間支柱の間の距離。3,000mm

2:中間支柱から防護柵中心までの距離。1500mm

 s_i : i 段目のワイヤロープのスリップ量。

$$\Delta \varepsilon i = \frac{T_i}{EA}I$$

 T_i : i 段目のワイヤロープの張力。

E:ワイヤロープのヤング係数。100000N/mm²

A:ワイヤロープの断面積。7×19 18の場合,A=155mm²

L:防護柵の延長。9,000mm。

1 段目以外のワイヤロープはスリップしているので, *T_i=*50kN と仮定すると, *ε*=29mm となる。 以上により,各段のワイヤロープのたわみ量を求めると図 5 となる。



ワイヤロープの折れ角 ₁i, ₂i は次式で求められ,表1となる。

(3)中間支柱の応力度

コンクリート塊の衝突で防護柵が図6のように変形したとすると,中間支柱付け根の応力度 は,次 式で求めることができる。

$$\sigma = \sqrt{{\sigma_x}^2 + {\sigma_y}^2}$$

ここに ,

: 中間支柱付け根の曲げ応力度

x:中間支柱付け根の曲げ応力度の強軸方向成分

y:中間支柱付け根の曲げ応力度の弱軸方向成分

$$\sigma_x = \frac{M_x}{Z_x}$$
, $\sigma_y = \frac{M_y}{Z_y}$

*M*_x:中間支柱付け根の強軸方向の曲げモーメント
*M*_y:中間支柱付け根の弱軸方向の曲げモーメント

$$M_x = 2\sum_{i} T_i \sin\left(\frac{\phi_{2i} - \phi_{1i}}{2}\right) \cos\left(\frac{\phi_{2i} + \phi_{1i}}{2}\right) h_i$$
$$M_y = 2\sum_{i} T_i \sin\left(\frac{\phi_{2i} - \phi_{1i}}{2}\right) \sin\left(\frac{\phi_{2i} + \phi_{1i}}{2}\right) h_i$$

 T_i : i段目のワイヤロープの張力

h_i: 支柱の下端から i 段目のワイヤロープまでの距離



図 6

 $T_1=0$, $T_2=T_3=T_4=T_5=50$ kN として支柱下端の曲げモーメントおよび応力度を計算すると表 3 のようになる。

支柱の応力度は =441N/mm²となって,H 形鋼(SS400)の降伏強度 _y=235N/mm²を大きく超過した結 果になっている。これは,応力計算を弾性体と仮定して行ったためである。支柱が降伏して,大きく変 形したことを意味している。

		1段目	2段目	3段目	4段目	5段目	合計
ロープ高	h(m)	0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	-
ロープ張力	T(kN)	0	50	50	50	50	200
支柱反力	R(kN)	0	20.6	19.0	10.7	3.8	54.2
モーメント	Mx(kN-m)	0	10.0	14.5	11.3	5.2	41.0
	My(kN-m)	0	2.7	4.5	3.2	1.4	11.8
断面係数	$Zx(mm^3)$	181000	181000	181000	181000	181000	181000
	$Zy(mm^3)$	26700	26700	26700	26700	26700	26700
応力度	$x(N/mm^2)$	0	6	8	6	3	23
	y(N/mm ²)	0	101	170	118	51	440
	(N/mm^2)	0	101	170	118	51	441

表 3 中間支柱の応力計算結果

(4)中間支柱が降伏するときのワイヤロープの折れ角

ワイヤロープの張力が T で,中間支柱でのワイヤロープの折れ角がのときの支柱反力は次式で与えられる。

$$R = 2T\sin\frac{\phi}{2}$$

$$M = 2Th\sin\frac{\phi}{2}$$

支柱下端の曲げ応力度は次式で求められる。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$
$$\sigma_x = \frac{M}{Z_x} \cos \frac{\phi}{2}$$
$$\sigma_y = \frac{M}{Z_x} \sin \frac{\phi}{2}$$

T=200kN(ロープ4本分), *h*=0.8m(合力位置), Zx=181000 mm³, Zy=26700mm³として, 折れ角 と応力 度の関係を計算すると図8となる。

ワイヤロープの折れ角が =12[°] となった時点で支柱が降伏する。このときの支柱基部の曲げモーメントは, *Mx*=34.6kN-m, *My*=3.8kN-m, *M*=34.8kN-m である。

強軸の降伏モーメント My=42.5kN-mの約80%のモーメントで支柱が降伏することになる。



5.吸収したエネルギーの内訳

(1)柵端金具による吸収エネルギー

実験に用いた柵端金具は,50kN 以上の力が作用すると,柵端金具の中をワイヤロープがスリップする仕組みになっている。スリップしている間の摩擦力 50kN で一定に保たれるように特殊な工夫がされている。したがって,摩擦力とスリップ量の積が柵端金具によって吸収されたエネルギーなる。

ワイヤロープのスリップ量 1.303m

吸収エネルギー *Es*=50kN×1.303m=65.15kN-m 65.2kJ



図 9 ワイヤロープに作用する衝撃力

(2)金網の変形による吸収エネルギー

鉄道総合技術研究所では,一般的な落石防護柵を想定し,支柱間隔3m,高さ2mになるように1スパン分を切り出し,図10に示すような静的載荷試験を行い,荷重-変位関係を図11のように求めている。

この図の鉛直変位に相当する変位は、「最大たわみ - 中間支柱の変位量」として求められる変位であ り、今回の実験による変位は、図5より

第3段目ワイヤロープ位置 1.143-0.335=0.808m

となる。図 11 には,この変位量を赤丸印で表示してある。



金網の水平変位 x(m) 金網の水平変位 x(m)

1.5

0

0.5

1

1.5

図 12 菱形金網(3.2×50GS)の変形特性 図 13 菱形金網(3.2×50GS)の吸収エネルギー

1

0.5

0

図 12 は村石らの実験データを用いて,菱形金網(3.2×50GS)の荷重-変位曲線を描いたものである。 金網による吸収エネルギーは,図 12 の曲線を積分して求めることができる。数値積分して求めたもの を図 13 に示す。

今回の実験による水平変位は 0.8m であるので, 金網による吸収エネルギーは E_N=2.4kJ となる。

(2)中間支柱の塑性変形による吸収エネルギー

支柱の変形による吸収エネルギーは次式で算定する。

$$E_P = \int_0^\delta R \delta d\delta$$

ここに,

E_P: 支柱の変形による吸収エネルギー

R: ワイヤロープの張力によって支柱に作用する水平力

$$R = 2T\sin\frac{\phi_2 - \phi_1}{2}$$

:水平力作用点の水平変位

$$\delta = 2\sin\frac{\phi_1}{2}$$

1, 2: ワイヤロープの折れ角。 1を仮定し,支柱の応力度 が降伏応力 Y と一致するような 2を求める。

$$\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \equiv \sigma_Y$$
$$\sigma_x = \frac{R}{Z} h \cos \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$$

$$\sigma_y = \frac{R}{Z_x} h \sin \frac{\phi_1 + \phi_2}{2}$$

h: 支柱の下端からす R の作用点までの高さ

- :支柱の応力度
- _x , 」_y:支柱の強軸方向 , 弱軸方向の応力度
- Z_x, Z_y: 強軸, 弱軸に関する支柱の断面係数



計算結果を図 15~図 18 に示す。支柱の応力度が降伏応力(y=235N/mm²)ときのワイヤロープ折れ角を図 15 に示す。また,そのときに支柱に作用する水平荷重を図 16 に示す。

支柱に作用する水平力 R と水平力作用点の水平変位 の関係は図 17 となる。水平力作用点(*h*=0.8m) の水平変位は ,今回の実験では0.335m(第3段目のワイヤロープ位置)であった。したがって 0 から 0.335m の間で積分すれば支柱の吸収エネルギーを求めることができ , *E_P*=6.3kJ となる。これは支柱 1 本分であ るので , 2 本分の吸収エネルギーは 12.6kJ となる。

図18は支柱の水平変位と吸収エネルギーの関係を表している。

設計の実務では,支柱の許容傾斜角を =15度として,下記のように支柱の吸収エネルギーを算定しているが,このように計算すると吸収エネルギーを1.8倍過大に評価することになると考えられる。

 $E_P = M_Y \theta = \sigma_Y Z_x \theta = 235 \times 181000 \times \frac{15 \times \pi}{180} = 11.1 \text{ kJ / } \texttt{A}$



(4)吸収エネルギー

吸収エネルギーの合計は,表4のようになる。

落石防護柵の吸収エネルギーとして,柵端金具とワイヤロープの摩擦による損失,金網の塑性変形, 中間支柱の塑性変形を考慮したが,この他にもワイヤロープの塑性変形(中央径間は残留歪みが残っている),端末支柱の変形,その他の部材や継手部の変形,基礎コンクリートの局部破壊(亀裂等),基礎地盤の変形等によるエネルギー損失が考えられる。

部材	エネルギー(kJ)	備考
柵端金具	65.2	柵端金具とワイヤロープの摩擦による損失
金網	2.4	金網の塑性変形。鉄道総研の実験を参考にして推定。
中間支柱	12.6kJ	支柱の塑性変形
その他	19.8	ワイヤロープの塑性変形,地盤の塑性変形など
合計	100	

表 4 吸収エネルギー

この結果を見ると,金網や中間支柱の変形による吸収エネルギーが以外と少ないことが分かる。逆に, 今回開発した緩衝装置を組み込んだ新しい柵端金具のエネルギー吸収効果が非常に大きいことが明ら かになった。

6. 従来の柵端金具と新しい柵端金具の比較

今回は,緩衝装置を組み込んだ新しい柵端金具を取り付けた高さ1.5m,延長9mの落石防護柵に,質量2トンのコンクリート塊を速度10m/s(36km/h),運動エネルギー100kJの条件で衝突させる実験を行ったが,1週間前に柵端金具が異なるだけで,その他は同じ条件で実験を行っているので両者を比較する。 比較した結果を表4に示す。

	従来の柵端金具を使用した場合	新しく開発した柵端金具を使用した場合
柵端金具	引出棒 + ワイヤチャック 「「「」」」 「「」」」 「」」」 引出棒 + ワイヤチャック 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」」 「」	緩衝装置を組み込んでいる ですべきなし
端末支柱	補強プレートが変形	デージョン (1990) 100 (19900) 100 (19900) 100 (19900) 100 (1990) 100 (1990) 100 (1990) 100 (1990) 100 (1990) 100 (1990) 1
ワイヤロープ	3×7G/O 18	7×19A/Z 18
実験結果		

表 5 従来の柵端金具を使用した場合との比較



7.結 論

緩衝装置を組み込んだ新しい柵端金具を開発し,それを用いて実験を行った。

模擬落石として用いたのは,質量2トンのコンクリリート塊であり,それを10m/sの速度で防護柵に 衝突させた。運動エネルギーは,100kJである。実験に用いた落石防護柵の可能吸収エネルギーは,55kJ とされているので,その約2倍に当たる。

この実験の1週間前に行った在来の柵端金具を用いた実験では,コンクリート塊が防護柵を簡単に突き破った。

しかし,新しい柵端金具を取り付けることで,大きなエネルギーを見事に吸収し,コンクリート塊を 受け止めることができた。ワイヤロープや端末支柱などに変状が全く見られなかった。新しい柵端金具 で,ワイヤロープの張力が 50kN を越えないように制御できたためである。

100kJの運動エネルギーの内,その65%を今回開発した柵端金具で吸収した。金網の吸収エネルギー は従来言われている値の約1/10の2.4kJ,中間支柱の吸収エネルギーは現行の設計法で求められる値の 約1/2の12.6kJであると推定される。今回開発した柵端金具のエネルギー吸収性能が非常に優れている ことが明らかになった。

この柵端金具は新設の落石防護柵は勿論のこと,既設の落石防護柵に対しても利用できる。今回開発した柵端金具を付けるだけでエネルギー吸収性能を2~3倍に高められるものと思われる。

今後の課題としては,コンクリート塊を衝突させたときに生じる加速度やワイヤロープ張力,支柱の 応力を計測し,新しい柵端金具を取り付けた防護柵の落石衝突時の応答を詳細に調べ,落石防護柵のよ り合理的な設計手法を確立させる必要があると考えている。そして,金網,ワイヤロープ,柵端金具, 端末支柱,中間支柱の強度的バランスがとれ経済的な落石防護柵を開発していく予定である。