

高エネルギー吸収型落石防止柵の開発 (ハイジュールネットの開発)

正 木 聡

日本は国土の約4分の3が山岳地域であり、それらを切り開いて道路の開発が進んできたことにより、道路や民家への落石事故がしばしば発生しており、落石防止対策が必要となっている。落石対策工は、発生源の浮石を押える予防工と発生した落石による被害を軽減するため落石防止柵や落石防止網等の防護工がある。ここで取り上げる対策工は、落石防止柵で従来品の吸収エネルギーは100 kJ程度であるが、近年では更に大きな落石事故が発生しているため、それに対応する落石防止柵が求められている。本稿は250 kJ～3,000 kJの大きなエネルギーを吸収する高エネルギー吸収型落石防止柵“ハイジュールネット”の開発経緯および技術的な特徴について紹介する。

キーワード：落石, エネルギー, 吸収, ケーブル, 緩衝装置

1. はじめに

ハイジュールネットは、スイス国のイソフェール社が既にISO-STOP（スイス国の数々の公的機関、スイス連邦森林降雪植栽研究所自然災害部“WSL”等において承認された落石防止柵で250 kJ, 500 kJ, 1,000 kJ, 1,500 kJ, 2,000 kJ, 3,000 kJの6種類の型式がある。）として開発した技術を基本としており、その適用範囲を日本国内向けに拡張するために実物大性能確認試験を実施し、落石の捕捉性能と変形性能を実証した落石防止柵である。

2. 技術の概要

ハイジュールネットは、発生源から落下終端に至る斜面途中に設置するもので、落石エネルギーの大きさによって可能吸収エネルギーは、ISO-STOP同様の250 kJ～3,000 kJに対応する6種類がある。

基部がピン構造の鋼製支柱と支柱を支える保持ケーブル、支柱の上下部に張られた二重平行ケーブル（上下部ケーブル）、ブレイキエレメント（衝撃緩衝装置）、さらに上下部ケーブル間に設置する格子状のロープ（ケーブルネット）等により構成されたシステム全体で落石による衝撃を吸収する。また、ケーブルネットの網目より小さな落石は、金網で捕捉する（写真－1）。



写真－1 ハイジュールネットの概要写真

3. 開発の目的

日本の山岳地形は、欧米に比べ狭く複雑な箇所が多いことと現場状況により、必ずしも支柱間隔を ISO-STOP と同じ 10 m で設置できるとは限らない。そこで、支柱間隔の設定範囲を ISO-STOP より狭い範囲の 5 m ~ 10 m とした。

柵高については、石の跳ね上がり量と経済性を考慮して、エネルギーレベルによるが、ISO-STOP の 75% ~ 100% とした。落石エネルギーを吸収するシステムとして、支柱間隔を狭く、また柵高を低くするという、より厳しい条件を開発の目的とした。

また、維持補修の容易性も同時に追求した。

表一 1 に ISO-STOP とハイジュールネットの有効柵高と支柱間隔の違いを示す。

表一 1 ISO-STOP とハイジュールネットの比較

吸収エネルギー (kJ)	ISO-STOP		ハイジュールネット	
	有効柵高 WSL 許容範囲 (m)	支柱間隔	有効柵高 (m)	支柱間隔
250	2.0 ~ 4.0 (旧基準値)	10 m	3.0 4.0	5 m ~ 10 m
500	3.0 ~ 4.5		3.0 4.0 5.0	
1,000	4.0 ~ 6.0		3.0 4.0 5.0 6.0	
1,500	4.0 ~ 6.0		3.0 4.0 5.0 6.0	
2,000	5.0 ~ 7.5		4.0 5.0 6.0 7.0	
3,000	5.0 ~ 7.5		4.0 5.0 6.0 7.0	

4. 開発の目標

吸収エネルギー 250 kJ ~ 3,000 kJ の範囲で、以下の 3 項目を開発目標として開発を行なった。

(1) 支柱間隔 5 m ~ 10 m で、所定の落石エネルギー

の吸収が可能であること。

(2) 有効柵高 3 m ~ 7 m (ISO-STOP の 75% ~ 100% 即ち ISO-STOP より低い柵高) で、所定の落石エネルギーの吸収が可能であること。

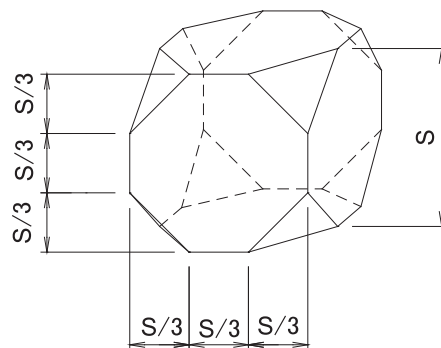
(3) ネットの部分補修が可能であり、かつその部分補修により所定の機能が回復できること。

5. 実物大性能確認試験

(1) 試験条件

システム全体で柔軟に落石エネルギーを吸収する柵に対する性能確認試験基準は、現在日本で制定されていないため、スイスで制定された試験基準に準拠して性能確認試験を実施することとした (表一 2)。試験方法は、落石を想定した重錘 (図一 1) を約 32 m 上空から自然落下により、供試体に速度 25 m / 秒 (90 km/h) で衝突させ、落石捕捉性能と変形性能を確認する (図一 2)。合否判定は、

- ① 重錘がネットで停止しネットに穴があくことなく重錘を捕捉すること。
- ② 重錘捕捉後のネットのふくらみ量は基準値以内であること。



図一 1 重錘の寸法

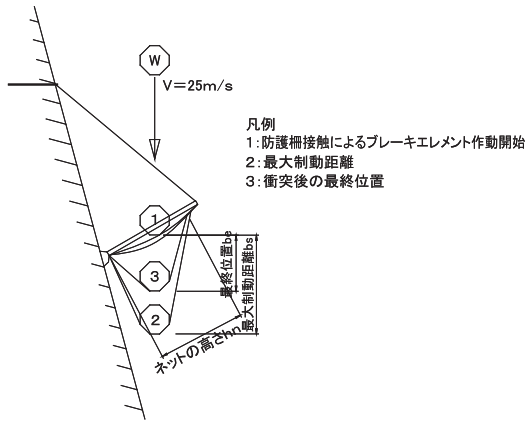
表一 2 スイス国 WSL 基準 (落石防護柵認証のためのガイドラインより抜粋)

エネルギー区分	ネット高さ (m)	エネルギー (kJ)	重錘質量 (kg)	重錘先端長 S (m)	許容最大制動距離 (m)	ネットの最低高さ (m)
1	1.5	100	320	0.52	4.0	0.75
2	2.0	250	800	0.70	5.0	1.0
3	3.0	500	1,600	0.88	6.0	1.5
4	3.0	750	2,400	1.01	7.0	1.5
5	4.0	1,000	3,200	1.11	8.0	2.0
6	4.0	1,500	4,800	1.27	9.0	2.0
7	5.0	2,000	6,400	1.40	10.0	2.5
8	5.0	3,000	9,600	1.60	12.0	2.5
9	6.0	5,000	16,000	1.90	15.0	3.0

注 1. ハイジュールネットは、エネルギー区分 2, 3 および 5 ~ 8 欄に示す性能に該当する。

注 2. ネットの高さとは、落石捕捉前の支間中央部における高さ。

注 3. ネットの最低高さとは、落石捕捉後の支間中央部における高さで、この値以上高くなければならない。



図一2 スイス試験場の断面

は、三次元測量を行ない試験前後の変形差を求めた。ネットと支柱の変形は、目視による確認とメジャーで測定し、ブレイキエレメントの作動量は、メジャーで測定した(写真一2, 図一3, 4)。



写真一2 ロードセル No.IX, X の取付状況

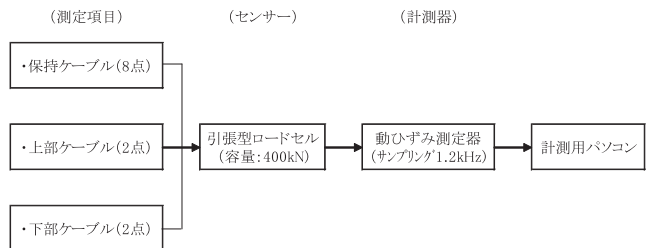
③捕捉後の有効柵高(ネット高さ)は捕捉前の高さの1/2以上であること。

これらの3項目を全て満足しなければならない。

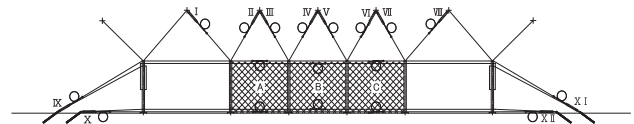
試験内容を表一3に示す。供試体は、1,000 kJ型で支柱間隔5.0 mとし、開発目標に該当する試験は試験1, 4, 6, 7であり、試験2, 3, 5は、ネット以外の部材に落石が衝突した場合や連続的な落石があった場合についてシステムの挙動と安全性を確認するために行なった。

(2) 測定項目および測定方法

各ケーブルの張力は、引張型ロードセルによりサンプリング速度1.2 kHz (1,200 データ/秒)で測定した。重錘の落下速度は、2台の高速度カメラにより撮影速度250 Hz (250 フレーム/秒)で撮影し、その画像解析により落下速度を求めた。重錘の運動エネルギーは、画像解析により求めた落下速度と試験前に測定した重錘の質量から算出した。ケーブルネットと支柱の変形



図一3 ロードセルでのケーブル張力測定フロー



図一4 ロードセル配置図 (I~XIIはロードセル番号)

表一3 試験条件一覧

試験番号	供試体番号	支柱間隔(m)	有効柵高(m)	試験の目的	落下位置	重錘質量(t)	落下エネルギー(kJ)	開発目標		
								(1)	(2)	(3)
試験1	1	5	4	落石捕捉性能と変形性能の確認。	中央スパン Bネット	3.2	1,000	○		
試験2	2	5	4	支柱に衝突させてシステム全体および支柱の挙動、ケーブル張力の確認。	支柱	3.2	250 落下高さ8m			
試験3		5	4	支柱破損状態でのシステムの機能確認。支柱変形状態の変化の観測。	中央スパン Bネット	1.6	500			
試験4	3	5	4	補修したネットに衝突させて、落石捕捉性能と変形性能の確認。	中央スパン Bネット	3.2	1,000			○
試験5	4	5	4	保持ケーブルに衝突させてシステム全体およびケーブルの挙動と張力の確認。	保持ケーブル	3.2	250 落下高さ8m			
試験6	5	5	4	落石捕捉性能と変形性能の確認。	端スパン Aネット	3.2	1,000	○		
試験7	6	5	3	柵高を3.0mにした場合における落石捕捉性能と変形性能の確認。	中央スパン Bネット	3.2	1,000		○	

(注):3 スパンでA ネットは左端スパン、B ネットは中央スパンの意味

表－4 全試験結果一覧

試験内容			試験結果							
試験番号	試験の目的	落下位置	重錘質量m (t)	落下速度V(m/s)	落下エネルギーE=1/2mV ² (kJ)	吸収エネルギーE+m・g・bs(kJ)	重錘の捕捉	制動距離bs<8.0m	ネット高さ(hn>柵高×50%) hn>2.0m or 1.5m	判定
試験1	支持耐力と変形性能の確認。	中央スパンBネット	3.24	26.48	1,136	1,255	○	bs=3.73m < 8.0m	hn=2.51m > 2.0m	OK
試験2	支柱に衝突させてシステム全体および支柱の挙動、ケーブル張力の確認。	支柱	3.22	11.44	211	258	○	測定なし	測定なし	OK
試験3	支柱破損状態でのシステムの機能確認。支柱変形状態の変化の観測。	中央スパンBネット	1.64	26.26	565	609	○	bs=2.75m < 8.0m	hn=2.44m > 2.0m	OK
試験4	補修したネットに衝突させて、支持耐力と変形性能の確認。	中央スパンBネット	3.22	26.58	1,137	1,277	○	bs=4.43m < 8.0m	hn=2.35m > 2.0m	OK
試験5	保持ケーブルに衝突させてシステム全体およびケーブルの挙動と張力の確認。	保持ケーブル	3.22	9.62	149	203	○	測定なし	測定なし	OK
試験6	支持耐力と変形性能の確認。	端スパンAネット	3.22	25.29	1,030	1,194	○	bs=5.18m < 8.0m	hn=2.82m > 2.0m	OK
試験7	柵高を75% (3.0m)にした場合における支持耐力と変形性能の確認。	中央スパンBネット	3.22	25.06	1,011	1,164	○	bs=4.84m < 8.0m	hn=2.26m > 1.5m	OK

(3) 試験結果

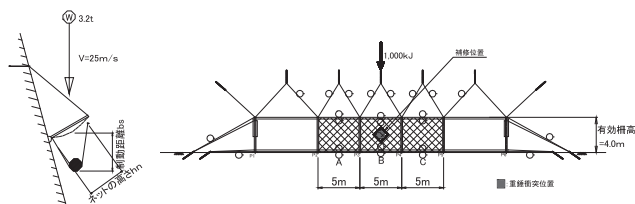
試験結果を表－4に示す。

試験1は、支柱間隔5.0m、有効柵高4.0mの供試体で中央スパンに重錘3.2tを高さ32mから落下させて1,000kJのエネルギーを負荷した。その結果、重錘を捕捉し、最大制動距離は3.73mであり基準値8.0m以内であることを確認した。重錘衝突後のネットの最低高さは2.51mであり、基準値2.0m以上であることを確認した。

試験6は、供試体の端スパンに試験1同様に1,000kJのエネルギーを負荷した。その結果、重錘を捕捉し、最大制動距離は5.18mであり基準値8.0m以内であることを確認した。重錘衝突後のネットの最低高さは2.82mであり、基準値2.0m以上であることを確認した。

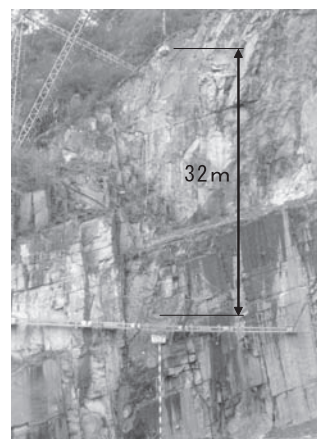
試験7は、ISO-STOP仕様の有効柵高4.0mの75%で3mとし、1,000kJのエネルギーを負荷した。その結果、重錘を捕捉し、最大制動距離は4.84mであり基準値8.0m以内であることを確認した。重錘衝突後のネットの最低高さは2.26mであり、基準値1.5m以上であることを確認した。

試験4は、供試体の中央スパンのネットを構成して

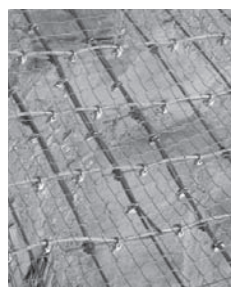


図－5 試験4 補修後1,000kJ負荷

いるケーブルを8箇所切断した後補修を行ない、そのスパンに1,000kJのエネルギーを負荷した。結果は、重錘を捕捉し最大制動距離は4.43mであり基準値8.0m以内であることを確認した。重錘衝突後のネットの最低高さは2.35mであり、基準値2.0m以上であることを確認した。一例として図－5と写真－3は、試験4の状況を示す。



写真－3 (1) 試験前重錘高さ32m吊上げ状況



写真－3 (2) ネット補修後の状況



写真－3 (3) 試験4重錘捕捉状況

これらの結果から試験番号 1, 6, 7, 4 は 1,000 kJ 強の落石エネルギーを吸収し、捕捉性能および変形性能を満足したことにより、開発目標の全項目が検証できた。

6. 考察

(1) 1,000 kJ 型におけるケーブルに発生した張力

各ケーブルに発生した最大張力を支柱間隔 10 m (WSL の認証書の荷重) の場合と今回の試験の支柱間隔 5 m の場合を比較すると、支柱間隔 5 m の場合の方が、全体的に荷重が低くなっている。これは、上下部ケーブルについては、支柱との交点におけるケーブルの折れ曲がり角度が支柱間隔 10 m の場合より支柱間隔 5 m の場合の方が大きくなったことによって、交点部での摩擦によるエネルギー吸収が大きくなるため、ケーブル張力は小さくなったものと考えられる。

また、保持ケーブルについてはネット、上下部ケーブル、支柱を通して保持ケーブルへの伝達が支柱間隔 5 m の方が速いため、支柱間隔 10 m の場合よりブレーキエレメントの作動量が大きくなるためエネルギー吸収が大きくなったものと考えられる。よってロードセル荷重は、支柱間隔 10 m の場合より支柱間隔 5 m の場合の方がケーブル張力は小さくなっている。

試験 6 の場合の下部ケーブルの最大張力は、179 kN で支柱間隔 10 m の場合の下部ケーブルの最大張力 154 kN に比べ上回っている。これは端末スパンに重錘を衝突させたため、その端末スパンに近い側のロードセルに荷重が集中したものと思われるが、ケーブルの破断強度に対しては 71% で許容範囲内である。

(2) 3,000 kJ 型支柱間隔 5 m におけるケーブルに発生する張力の検討

1,000 kJ 型支柱間隔 5 m と 10 m の違いによりケーブルに発生した張力と、ISO-STOP 3,000 kJ 型の支柱間隔 10 m におけるケーブルに発生した張力 (WSL の認証書の荷重) から、ハイジュールネット 3,000 kJ

型の支柱間隔 5 m におけるケーブルに発生する張力を算定する (表-5)。

ここで T1: ハイジュールネット 1,000 kJ 型支柱間隔 5 m の場合のケーブル張力 (4 試験データの最大値)

T2: ISO-STOP 1,000 kJ 型支柱間隔 10 m の場合のケーブル張力 (WSL の報告書データ)

T3: ISO-STOP 3,000 kJ 型支柱間隔 10 m の場合のケーブル張力 (WSL の報告書データ)

T4: ハイジュールネット 3,000 kJ 型支柱間隔 5 m の場合のケーブル張力

$$T4 = T1 / T2 \times T3$$

上記の検討結果から 1,000 kJ 型支柱間隔 5 m におけるケーブル張力の最大値をもって 3,000 kJ 型支柱間隔 5 m の各ケーブル張力を算定したが、それらの値は、ケーブルの破断荷重に対して最大で 65% (保持ケーブル) となった。ハイジュールネットと ISO-STOP とは、250 kJ ~ 3,000 kJ まで同様なエネルギー吸収システムであることから型式が異なっても、支柱間隔 5 m の場合でも十分な落石捕捉能力を有していると考えられる。

(3) 1,000 kJ 型の吸収エネルギー保有能力の検討

試験 1, 4, 7 の結果から中央スパンに負荷したエネルギーの平均値は、1,230 kJ であった。

ブレーキエレメントの作動距離を実測した結果、それらが吸収したエネルギーは平均 890 kJ であった。従って、ケーブルネット等が吸収したエネルギーは $1,230 - 890 = 340$ kJ となる。

また、試験 6 の結果から端末スパンに負荷したエネルギーは 1,190 kJ であった。ブレーキエレメントの作動距離を実測した結果、それらが吸収したエネルギーは 510 kJ であった。従って、ケーブルネット等が吸収したエネルギーは $1,190 - 510 = 680$ kJ となる。

ここでネット等の吸収エネルギーは少なくとも 680 kJ あることがわかった。

実物大試験において作動した位置のブレーキエレメントが、性能の 100% まで吸収したとすると、中央ス

表-5 T1, T2, T3, T4 の各ケーブルに発生する張力一覧

張力kN	試験内容	エネルギー(kJ)	支柱間隔(m)	保持ケーブル張力(kN)								上部ケーブル張力(kN)				下部ケーブル張力(kN)			
				I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X I	X		X II			
T1	実物大試験1.4.6.7	1,000	5	17.5	59.5	72.4	57.2	60.3	95.2	34.0	14.7	159.2	152.6	178.8	149.8				
T2	WSL試験	1,000	10	ロードセル無	ロードセル無	120.0	ロードセル無	108.0	65.0	32.0	24.0	195.0	177.0	154.0	150.0				
T3	WSL試験	3,000	10	ロードセル無	90.0	178.0	169.0	214.0	136.0	ロードセル無	ロードセル無	228.0	242.0	222.0	266.0	-	182.0	226.0	215.0
T4	推定値	3,000	5	-	-	107.4	-	119.5	199.2	-	-	186.1	197.6	191.4	229.3	-	211.3	225.7	214.7
	破断荷重割合			-	-	35%	-	39%	65%	-	-	51%	54%	53%	63%	-	58%	62%	59%

パン負荷試験1, 4, 7ではブレーキエレメントのエネルギー吸収量は、平均1,490 kJとなりケーブルネット等のエネルギー吸収能力を加算すると $1,490 + 680 = 2,170$ kJとなる。

同様に、端末スパン負荷試験6では、ブレーキエレメントのエネルギー吸収量は1,350 kJとなり、ケーブルネット等のエネルギー吸収能力を加算すると $1,350 + 680 = 2,030$ kJとなる。

これらの計算結果から、1,000 kJ型は公称エネルギーに対して十分な落石捕捉能力を有しているものと推定される。

(4) 3,000 kJ型の吸収エネルギー保有能力の検討

1,000 kJの実物大試験で作動した位置と同じ位置の3,000 kJ型のブレーキエレメントが性能の100%まで吸収したとすると中央スパン負荷試験1, 4, 7ではブレーキエレメントのエネルギー吸収量は平均6,690 kJとなりケーブルネット等のエネルギー吸収能力を加算すると $6,690 + 680 = 7,370$ kJとなる。

同様に、端末スパン負荷試験6では、ブレーキエレメントのエネルギー吸収量は6,070 kJとなりケーブルネット等のエネルギー吸収能力を加算すると $6,070 + 680 = 6,750$ kJとなる。

また、3,000 kJ用のケーブルネット等のエネルギー吸収量は、使用部材径が太く、ネットメッシュが細かいため680 kJより大きくなると考えられる。

これらの計算結果より、3,000 kJ型も公称エネルギーに対して十分な落石捕捉能力を有しているものと推定される。

7. まとめ

ハイジュールネットは、6種類のエネルギー型式のうち1,000 kJ型を例として実物大性能確認試験を実施し、WSLの規定をすべて満足したことが確認された上、公称エネルギーに対し十分な落石捕捉能力を有していることが上記の結果から確認された(1,000 kJと3,000 kJ)。

以上により、ハイジュールネットの各型式(250 kJ～3,000 kJ)は、エネルギークラスが異なってもエネルギー吸収機構が同様のシステムであるので、公称エネルギーに対し十分な落石捕捉能力を有してい

ると考えられる。

ハイジュールネットはISO-STOPの標準仕様に対し、日本国内向けに支柱間隔の適用範囲を5 mまで、また最小有効柵高の適用範囲を試験7により3 m (ISO-STOP標準仕様の75%)まで拡張させても所定の落石エネルギーを吸収できることが実証された。

また、試験2, 3により支柱に落石が衝突した後、続いて落石があった場合および、試験5で保持ケーブルに落石が衝突した場合でも落石を捕捉できることが確認された。

このことは、1,000 kJハイジュールネットシステムのエネルギー吸収が構成部材である上部ケーブル、下部ケーブル、保持ケーブル、ブレーキエレメント、支柱、ケーブルネット、金網のそれぞれの変形、相互の相対変形により、実現されていることを示している。

以上の結果、ハイジュールネットは250 kJ～3,000 kJの各エネルギー型式において支柱間隔5 m～10 m、有効柵高3 m (ISO-STOP標準仕様の75%)～7 mで所定の落石エネルギーを吸収できることが確認された。

8. おわりに

ハイジュールネットは、三重県(尾鷲)をはじめ兵庫県(養父)等で多数の施工実績を有している。また本誌に記述した実験が認められ、このたび建設技術審査証明を取得することができた。

本開発に当たり、多大なるご指導とご助言を頂きました技術審査証明委員会の委員長はじめ委員の方々並びに、事務局の皆様に厚く御礼を申し上げます。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) Guideline for the approval of rockfall protection kits Amendment 2006
(落石防護柵認証のためのガイドライン改正2006年)

【筆者紹介】

正木 聡 (まさき さとし)
神鋼建材工業(株)
技術部 開発室
課長

