土木学会

特殊ひし形金網および緩衝金具を配置した

落石防護網の実斜面実験について

Falling rock tests on the slope covered with new type drapery with the special net and installed buffer devices

> 窪田潤平*, 中村浩喜*, 吉田 博** Junpei KUBOTA, Hiroki NAKAMURA, Hiroshi YOSHIDA

*㈱シビル(〒950-0954 新潟県新潟市中央区美咲町1-8-1) **工博 ㈱ビーセーフ(〒932-0102 富山県小矢部市水島561)

Falling rock tests on a slope covered with new type drapery with the special net and installed the buffer devices have been carried out. This drapery consists of the anchorages, the normal cables and the special devices installed between the anchorages and the wire cables. This drapery suitable for the steep and extensive slopes and advantageous to the construction cost. Firstly this paper describes the testing results for each member, and secondly the testing procedure of the prototype experiments. Finally test results are compared with the numerical calculation results by LS-DYNA.

It becomes clear that the behavior of this type drapery can be estimated by the numerical calculation.

Key words:drapry, falling rock, prototype falling test, special diamond-shaped wire net, buffer device

キーワード: 落石, 実斜面実験, 特殊ひし形金網, 緩衝金具

1. まえがき

わが国は、国土の相当部分が急峻な地形と脆弱な地質 であるうえ、豪雨・豪雪の環境下にあり、また世界有数 の地震国であるという極めて厳しい自然条件にある.近 年では、平成8年2月の豊浜トンネル、平成9年8月の 第2 白糸トンネルにおける大規模な岩盤崩落、平成16 年11月福井県上中町国道303号で死亡事故など落石災害 が発生している.

このような災害を未然に防止するため,我が国では多 種多様な落石対策工が施されている.これらの落石対策 工には落石予防工と落石防護工がある¹⁾.落石予防工は, 斜面上の岩塊が落下しないように,岩塊を安定化させた り除去する等の対策である.これに対し落石防護工は, 落下する岩塊を斜面の途中および斜面下端等で防護する 対策である.これらの落石対策工を計画するに際しては, 落石予防工が効果的であると考えられるが、急峻かつ長 大な斜面での施工が困難な場合が多い.一方、落石防護 工は各種の工法があるが、岩塊を停止させることができ る吸収エネルギー量に限界があり、多額の工費を必要と する場合が多い.

そこで、急峻かつ長大な斜面に適し、経済的であるこ とを目標とし、新たに落石防護網の開発をおこなった. この落石防護網は、落石の発生源から保全対象に至る斜 面全体を覆い、岩塊に金網等の自重およびワイヤロープ の張力による抑止効果を期待できる.また、落石の発生 時には、岩塊の跳躍、衝撃および速度を緩和させ、岩塊 を保全対象外に誘導するものである.さらに、落石防護 網の上部に支柱を設け、遠方から落下する岩塊を捕捉し て保全対象外へ誘導する機能も有している.

この落石防護網の設計については、斜面および岩塊の 状況を踏まえ、落石防護網全体の挙動および負荷を推定 する必要がある.そこで,落石防護網を構成する各種部 材の性能を把握し,特殊機能を有する部材については, 単体での性能試験をおこなった.また,落石防護網全体 の挙動を推定するために,実斜面に落石防護網を設置し 重錐を落下させる実斜面実験をおこなった.

本論文は、各種部材の性能試験および実斜面実験をお こない、これらの結果を用いて岩塊の誘導性能およびエ ネルギー吸収能力等の検討をおこなったものである.ま た、大変形非弾性動的応答解析ソフトLS-DYNAを用いて 動的応答解析をおこない、実斜面実験の結果と対比をお こなった.

2. 構造と機能

2.1 構造

落石防護網の構造は、図-1のように金網(以下特殊 ひし形金網という)、ワイヤロープ、アンカー、緩衝金具 およびスリップロープ等の部材より構成されている.



(1) 特殊ひし形金網

特殊ひし形金網は, φ2.3mmの素線を3本用いてより 線に束ね,波型に曲げ加工し編みこまれたものである.



写真-1 特殊ひし形金網

この金網は、図-2に示すように従来から用いられる ひし形金網より引張強度が高く、3本の素線がねじれな がらより合わさるため、長く伸びる特徴を有している.

斜面に設置する方法は,幅 3m~4m の特殊ひし形金網 を斜面に覆い被せ,結合コイルで隣り合う金網同士の縦 継ぎ目(以下ラップという)を隙間なく連結する.



(2) ワイヤロープ

ワイヤロープは,直径 1.9mm の素線を7本に撚り,こ れを3本に束ねた公称径12mm を用いる.設置方法は,縦 横10m 間隔以下に設置されたアンカーを介して,四角形, ひし形および三角形に張り巡らせ,これらが重なり合う ように配置する.このように設置することで,落石の衝 撃力が広範囲の特殊ひし形金網,アンカーに伝達し易く なり,局所的な破損を防ぐ効果が期待できる.

(3) アンカー、緩衝金具、スリップロープ

アンカーは,直径 2.8mm の素線を7本に撚り,これを 3本に束ねた公称径 18mm のワイヤロープを用いて,片側 の端部に圧着端子を備え,一方の端部を逆三角形に索端 加工したものである.緩衝金具は,アンカーとスリップ ロープを直交するように挟み込み,高力ボルトで締め付 ける構造となっている.スリップロープは,直径 2.8mm の素線を7本に撚り,これを3本に束ねた公称径 18mm のワイヤロープを用いて,頭部にアイナットを取り付け たものである.

これらの部材は図-1および図-3のように連結さ れ,縦横10m以下の間隔に設置されている.緩衝金具は, スリップロープを挟み込んでおり,落石が通過する際に 一定の幅の摩擦力を保持しながら滑るように設計・製作 されている.また,緩衝金具は,スリップロープを滑ら せ摩擦力を発生させることによって落石の衝撃エネルギ ーを吸収する機能を有している.



図-3 緩衝機能

2.2 機能

落石防護網は、各種構成部材の複合作用により岩塊を 斜面下端に誘導する機能を有している.つまり、岩塊の 落下前には、落石防護網の自重およびワイヤロープ張力 等の作用により岩塊に抑止力を与える.岩塊が落下した 場合には、岩塊が落石防護網と斜面から同時に摩擦抵抗 を受け、落石エネルギーを吸収する.また、岩塊が跳躍 した場合は、スリップロープが滑り、緩衝金具により落 石エネルギーの一部を吸収する.このように、エネルギ ーを吸収された岩塊は斜面下端に誘導され停止する.

3. 性能試験

実斜面実験で落石防護網の挙動を把握するためには, 構成部材の性能を評価することが必要である.そこで, 特殊ひし形金網および緩衝金具のように,衝撃緩衝効果 が期待される部材については,単体での性能試験をおこ なった.

3.1 特殊ひし形金網

落石防護網に岩塊が衝突すると、特殊ひし形金網は大 きくたわみ、素線がねじれながら伸び、より線が波型か ら直線状に変形する.このように、落石による外力と特 殊ひし形金網の変形には、相対的な関係があると思われ るため、試験機を用いて試験をおこなった.

(1) 試験方法

試験方法は、100cm×100cm の範囲を支持点として、6 本の鋼棒で対向する2辺を固定して横方向変位を拘束し、 他の対向する2辺を7本の鋼棒で一様に引張荷重を作用 させることができる装置を用い、いずれかの素線が破断 するまで引張荷重を載荷した。



写真-2 引張試験方法

試験に用いた供試体は、ひし形金網(φ4×50), 亀甲 金網(φ4×100)および特殊ひし形金網(3×φ2.3×50) の3種類で試験結果を対比し評価した.

(2)試験結果

試験結果を表-1に示す.ここで,特殊ひし形金網の 目幅方向とは,素線の軸方向に引張荷重を作用させた場 合であり,目長方向とは素線の軸直角方向に引張荷重を 作用させた場合である.

(a)作用方向による違い

表-1より、ひし形金網については、目長方向の破断

荷重が 50.3kN で目幅方向が 52.6kN であり,目長方向の 破断時の伸びが 20.2cm で目幅方向が 20.0cm であった. これより,作用方向の違いよる破断荷重の差異はみられ なかった.同様に亀甲金網および特殊ひし形金網につい ても,作用方向の違いよる破断荷重の差異および破断時 の伸びの差異はみられなかった.

(b)金網種類による違い

破断荷重については、ひし形金網が約50kN, 亀甲金網 および特殊ひし形金網が約80kNであった.また、破断時 の伸びについては、亀甲金網が約11mm、ひし形金網が約 20mm、特殊ひし形金網が約29mmであった.

表-1 金網の引張試験結果

金網種類	方向	破断荷重(kN)		破断時の伸び(cm)	
	нĒ	48.5	52.2	20.8	19.7
7、1 形入網	цĸ	(平均)	50.3	(平均)	20. 2
いし形金衲	目	52.5	52.7	19.9	20.1
		(平均)	52.6	(平均)	20.0
	目長	82.7	82.5	12.2	11.0
备田众纲		(平均)	82.6	(平均)	11.6
电中並柄	目幅	80.1	81.3	11.5	10.8
		(平均)	80.7	(平均)	11.1
	目長	83.2	81.8	30.1	29.8
性砒7\1 形合綱		(平均)	82.5	(平均)	29.9
1寸がいし形並柄	目幅	80.2	78.8	28.1	28.3
		(平均)	79.5	(平均)	28.2

これらより,特殊ひし形金網は,相対的に強度が高く 破断時の変形量が大きい金網であることが判った.つま り,静的荷重載荷時において破壊に至るまでエネルギー を最も多く吸収したと考えられ,落石防護網に適してい るものと判断された.

また,別で実施した面外静的載荷試験および面外衝撃 試験の結果においても,特殊ひし形金網の強度が最も高 く,破断時の変形量も大きく,より多くの衝撃エネルギ ーを吸収した結果が示されている²⁾.

3.2 緩衝金具

落石防護網は、落石の衝撃を受けた際に、スリップロ ープに一定以上の張力が加わると、一定の張力を保持し ながら緩衝金具がスリップロープ軌道上を滑り、エネル ギーを吸収する機能を有している.

そこで,緩衝金具単体の性能を把握するために,緩衝 金具落錘式衝撃性能試験(以下落錘式試験という)をお こない,緩衝金具が滑る際の張力,スリップロープ軌道 上を滑った量および重錐のエネルギーを計測した.

(1)試験方法

図-4に示すように、スリップロープは載荷フレーム の一端に固定され、緩衝金具に挟まれている.また、ワ イヤロープは載荷フレームの一端に固定され、緩衝金具 に取り付けられたUボルトと連結されている.

試験方法は,所定の高さに設置した重錐をワイヤロー プに衝突させ,緩衝金具がスリップロープを挟み込みな



がら滑り、この時に生じる摩擦抵抗により重錐を停止させるものである.この際、スリップロープに生じる張力は、重錐がワイヤロープに衝突すると急激に上昇するが、 緩衝金具が滑り始めると同時に減少し、再び張力の上昇 および下降を繰り返し、重錐の停止と同時に重錐重量相 当の張力が残る(図-5参照).

このように緩衝金具は、ワイヤロープに一定以上の張 力が加わると、張力が一定の幅で上昇および下降を繰り 返しながら抑制され、スリップロープ軌道上を滑るよう に設計・製作されている.また、重錘重量が一定値以上 であれば、スリップロープは緩衝金具内で滑りが確認で き、それ以上の重錘重量に対しては、一定の幅でスリッ プロープの張力を保持したまま、滑り量のみが増加する ことが明らかにされている³.

よって、落錘式試験は、十分な滑り量が確認できるこ となどを考慮し、重量を 4.16kN,落下高さを 1.0m とし 衝撃荷重を作用させた.ワイヤロープ張力の測定方法と しては、ワイヤストレインゲージからリード線によりブ リッジボックスおよびひずみ測定アンプを介して、デー タ収集システムに 0.1msec 間隔でサンプリングした.

(2)試験結果

緩衝金具に対する落錘式試験結果を表-2および図 -5に示す.表中の落下高さは,落下前の重錘からワイ ヤロープまでの高さであり,重錘変位は重錘が落下し停 止した時の重錘の移動量である.滑り量は,緩衝金具内 で滑ったスリップロープの長さである.

このとき、重錘エネルギー(kJ)は、重錘重量(kN) ×重錘変位(m)で表され、重錘エネルギーをワイヤロー プの滑り量(m)で除すと、緩衝金具内で滑っているとき のワイヤロープ平均張力が得られる.

平均張力=(重錘重量×重錘変位)÷滑り量・・・式(1)

表-2 緩衝金具落錘式試験結果

	重錐	落下	重錐	重錐	滑り	平均	最大
NO	重量	高さ	変位	エネルキ゛ー	量	張力	張力
	(kN)	(m)	(m)	(kJ)	(m)	(kN)	(kN)
A- 1	4.158	1.0	1.85	7.684	0.291	26.41	46.48
A- 2	4.158	1.0	1.90	7.888	0.325	24.27	41.91
A- 3	4.158	1.0	2.02	8.378	0.429	19.53	42.00
A- 4	4.158	1.0	2.05	8.503	0.451	18.85	36.25
A- 5	4.158	1.0	1.96	8.137	0.390	20.86	41.31
A- 6	4.158	1.0	1.89	7.867	0.323	24.36	46.80
A- 7	4.158	1.0	1.85	7.684	0.303	25.36	51.33
A- 8	4.158	1.0	1.79	7.443	0.261	28.52	45.13
A- 9	4.158	1.0	1.82	7.551	0.275	27.46	47.87
A-10	4.158	1.0	1.86	7.721	0.315	24.51	41.18
A-11	4.158	1.0	1.95	8.108	0.363	22.34	34.37
A-12	4.158	1.0	1.90	7.879	0.323	24.39	39.23
A-13	4.158	1.0	1.97	8.200	0.380	21.58	44.62
A-14	4.158	1.0	1.99	8.266	0.415	19.92	40.73
A-15	4.158	1.0	1.97	8.171	0.391	20.90	38.78
		23.28					
標準偏差						2.98	

この平均張力は,緩衝金具のエネルギー吸収性能の評価 に用いられる.つまり,**表-2**より得られた平均張力に 落石防護網のスリップロープ滑り量を乗じたものが,落 石エネルギーの吸収量となる.この際,ワイヤロープの 弾性伸びによるエネルギー吸収量は僅かのため評価対象 から除いた.



以上の試験結果より,以下のことが判った.

(a) 図-5より、A-1において緩衝金具が滑っていると
 思われる区間での張力値の波形は、0kN~46.48kNの間で
 上昇・下降を繰り返している。

(b) 緩衝金具の平均張力は、動的載荷時において

18.85kN~28.52kN の範囲にあり, 平均値は 23.28kN, 標 準偏差は 2.98 であった.

(c) 最大張力値は 34.37kN~51.33kN であるが,スリップ ロープおよびアンカーの引張荷重は 150kN 以上有してお り,十分な安全性を確保している.

4. 実斜面実験

落石防護網は,特殊ひし形金網,ワイヤロープ,アン カー,緩衝金具およびスリップロープ等から構成されて おり,これらが相互に作用しあって効果を発揮するもの である.各種部材を単体として用いた場合の規格および 性能は3章で確認したが,実斜面に組み合わせた場合の 性能や挙動は確認していない.

そこで実斜面実験は,重錐を斜面と落石防護網に挟み 込まれるように落下させ,落石防護網の挙動および外力 等を計測し,落石に対する防護性能を把握する目的でお こなった.また,落石防護網を撤去した斜面(以下自然斜 面という)からも重錐を落下させ,落石防護網を設置し た斜面(以下ネット斜面という)と比較をおこなった.

4.1 実験概要

実斜面実験は、図-6のように斜面に落石防護網を設置し、これらの間に重錐が挟み込まれるように斜面の天端から落下させ、斜面の下端に誘導させた.



図-6 実斜面実験概要図

斜面は,勾配が約60°~70°,高さ約23mの凹凸がある岩盤斜面で,天端および下端が平坦に切土整形されている.

落石防護網は、特殊ひし形金網、ワイヤロープおよび アンカー等より構成されている.特殊ひし形金網は、重 錐が通過する中央の列に、幅約 10.0m,高さ約 25.0mの 範囲で設置した.

ワイヤロープは、四角形、ひし形および三角形の形状 に配置し、連結スリーブを用いて閉鎖状になるよう連結 した.アンカーは図-6のように縦横 5m~10m 間隔で設 置し、アンカーの頭部に緩衝金具とスリップロープを取 り付けた.重錐は、直径 2m、重量 95.5kN で、外殻が曲 げ加工された鋼板、内部に鉄筋および無収縮モルタルが 充填された鋼殻球体を用いた.

4.2 実験種類

実斜面実験の回数は、落石防護網の設置に要するコストが高いこと、実験結果と動的応答解析結果を比較するために必要な回数などを考慮して合計3回とした.まず、 第一回目(以下 TEST-1 という)および第二回目(以下 TEST-2 という)は、ネット斜面の天端に重錐を置きバックホウを用いて斜面に押し出し、重錐が斜面と落石防護網に挟み込まれるように落下させた.第三回目(以下 TEST-3 という)は、自然斜面の天端に重錐を置いてバックホウを用いて斜面に押し出し落下させた.

4.3 測定項目

(1) 張力測定

重錐が落石防護網に衝突した時のワイヤロープ張力 を測定するために、ワイヤロープにワイヤストレインゲ ージ(以下ゲージという)を貼り付けて表面ひずみを測 定した.



測定箇所については,重錐が通過し跳躍が想定される 箇所であること,ワイヤロープの組み方等を考慮し,図 -7のように TYPE-1~TYPE-3 のワイヤロープに F0C5~ F0C11 のゲージを貼り付けた.

また,アンカー張力については,ゲージをアンカーに 貼り付けて表面ひずみを測定した.測定箇所については 図-7に示すように,FOC-1~FOC-4のゲージを貼り付け た.

(2) スリップロープの滑り量

重錐が落石防護網に衝突した時のスリップロープの 滑り量を測定するために、実験の前後においてスケー ルを用いて滑り量を測定した.なお、測定は全てのスリ ップロープについておこなった.

(3) 重錐軌跡

重錐の落下軌跡は高速度カメラにて撮影し,これより 得られた画像から重錐の中心点をプロットした.また, 重錐軌跡と時刻の関係より重錐の速度を推定した.なお, 高速度カメラは,1sec 当り110 コマの撮影・記録できる ものを用いた.

5. 実験結果

TEST-1 および TEST-2 については,重錐を斜面と落石 防護網の間に挟み込みながら計 2 回落下させた.また, TEST-3 については,自然斜面の天端から重錐を 1 回落下 させた.これらの実験より,ワイヤロープ張力,アンカ 一張力,スリップロープすべり量,および重錐の落下軌 跡等について結果が得られた.

5.1 張力測定結果

(1) ワイヤロープ張力

(a) ワイヤロープの配置と張力

図-8は、ワイヤロープ張力の経時変化を 0.002sec の出力間隔で表示した一例(TEST-2)である. 図中のゲ ージ位置および斜面下端で示された時刻は、高速度カメ ラの画像から重錐が通過・到達した時刻を推定した値で ある. なお、波形が途切れた個所については、ワイヤロ ープが重錐に引き込まれた際、ゲージが破損した影響で あると思われる. なお、図-7に示すように一辺 10mの 正方形に配置されたワイヤロープを TYPE-1、一辺 14.1m のひし形に配置されたものを TYPE-2、斜辺 14.1mの三角 形に配置されたものを TYPE-3 と区分した.

a) T Y P E - 1 (F0C9)

波形の特徴は、細かな上下を一定の張力内で不規則に 繰り返す形状である. 張力値のピークは約43kNであり、 主に重錐がゲージ位置から斜面下端に到達する間におい て、張力が断続的に生じている.

b) TYPE - 2 (F0C5, F0C6, F0C8, F0C10)

波形の特長は、なだらかに上昇し頂点に達した後に下降する形状が複数箇所みられる.最大張力は約 29kN~63kN であり、重錐がゲージ近辺を通過する前後で発生している.

c) TYPE-3 (F0C7, F0C11)

波形の特長は、なだらかに上昇し頂点に達した後に下降する形状が複数箇所見られる.最大張力は約 16kN~30kN であり、重錐がゲージ近辺から斜面下端に到達する間において、張力が断続的に発生している.

(b) ワイヤロープの配置と緩衝効果

「3.2 緩衝金具」より、重錘重量が一定値以上であれば、 スリップロープは緩衝金具内で滑りが確認でき、それ以 上の重錘重量に対しては、一定の幅でスリップロープの 張力を保持したまま、滑り量のみが増加することが明ら かにされている³⁾.



また, **表-2**に示す落錘式試験より緩衝金具の最大張 力値は 34.37kN~51.33kN であり, 張力の波形がこの範囲 内で不規則な上下を繰り返す特徴を有していた.

この結果を踏まえて, TYPE-1 は最大張力が約 43kN で あること, 張力の波形に不規則な繰り返しがみられるこ とより, 緩衝金具が有効に作用していると思われる.こ れは, アンカー間隔が 10m と短く, 張力が緩衝金具に伝 達し易い状況であったからと思われる.

TYPE-2 については、最大張力が 62.58kN を記録し、波 形の特徴に不規則な繰り返しがみられないことより、緩 衝金具の効果が少なかったと思われる.これは、アンカ ーの間隔が 14.1m と長く、張力が緩衝金具に伝達し難い 状況であったからと思われる.

TYPE-3 については最大張力が 29.07kN で, 波形の特徴 に不規則な繰り返しがみられなかった. この原因として は, TYPE-3 を設置した箇所が重錐の落下軌道と異なって いたためであると思われる.

以上より, TYPE-2 のように緩衝効果が少ない部位については, 落石規模が大きい場合, 更に高い張力が作用すると思われる.したがって, ワイヤロープは, 落石規模に見合った強度, 数量および適切な配置等を考慮し設計する必要があると考えられる.

(2)アンカー張力

図-9は、アンカー張力の経時変化を 0.002sec の出力 間隔で表示した一例(TEST-1)である.



図中の中段および斜面下端で図示された時刻は,高速 度カメラの画像から重錐が通過した時刻を推定した値で ある.

波形の特徴は、なだらかに上昇し頂点に達した後に下降したり、細かな上下を繰り返す形状など様々である. 最大張力は全て47kN以下に抑制されており、緩衝金具が 有効に作用していると思われる.また、波形が途切れた 箇所については、スリップロープが引き込まれた際にゲ ージが破損したためであると思われる.

5. 2 スリップロープ滑り量

TEST-1 および TEST-2 のスリップロープ滑り量を図-10に示す.



図-10 スリップロープ滑り量

最大滑り量は, S10 のスリップロープで 2,300mm(TEST-1),および 995mm(TEST-2)が計測された. これは,この付近で重錐が大きく跳躍したことが影響し ていると思われる.滑り量の合計は,TEST-1で4,438mm, TEST-2で4,070mmであった.

5.3 重錐の軌跡

図-11は, TEST-1, TEST-2 および TEST-3 の重錘が 跳躍した後の軌跡を,約0.045sec 間隔にプロットしたも



のを重ね比較したものである.

TEST-1 は, 重錐が跳躍した後に斜面と接触することな く落石防護網に沿ってなだらかに斜面下端まで誘導され 停止した. TEST-2 では, 重錐が跳躍した後に斜面に押し 戻され, 再度斜面に衝突し斜面下端まで誘導され停止し た. なお, 斜面下端でのはらみだし量は TEST-1 および TEST-2 で約 0.5m であった.

また, TEST-3 では, 重錐が斜面から約4.4m 離れた地 点に落下し,約5.6m 転がり土堤に衝突し停止した.仮に, 土堤がなかった場合は, さらに相当の距離を転がり続け たと思われる.

このように、本実験のような急斜面において、落石防 護網が重錐の跳躍量を抑制し、斜面下端に重錐を誘導し 停止させたことを確認できた.

5.4 重錐速度と摩擦係数

落石防護網に求められる機能は,落石の落下速度を減 衰させながら斜面下端に誘導することである.そこで, 落石防護網による重錐速度の減衰効果を検証した.



図-12 重錐速度分布の上限値の比較

図-12に本実験の重錘速度の分布および自由落下速 度との比較を示す.これは、高速度カメラにより撮影し た画像をプロットし、移動距離により合成速度を算出し、 各々の速度分布の上限値を包含する放物線を描いたもの である.

なお,この放物線は自由落下速度に残存係数を乗じた

もので、以下のように算出した.

落石対策便覧によると,落石速度は,残存係数αと自 由落下速度を用いて式(2)のように表せる傾向にあるこ とが判っている¹⁾.

$$V = \alpha \cdot \sqrt{2gH} \qquad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \vec{x} \quad (2)$$

ここに,

V:落石速度 (m/s)

 α :残存係数

g:重力加速度 (m/s²)

H:落下高さ (m)

式(2)より TEST-1~TEST-3 までの残存係数は表-3のとおりとなる.

表-3 実斜面実験の残存係数

	落下高 $H(m)$	重錐速度 V(m/s)	残存係数 α
TEST-1	23.0	16.99	0.80
TEST-2	23.0	13.81	0.65
TEST-3	23.0	20.81	0.98

表-3よりネット斜面における残存係数を比較すると, TEST-1 が α =0.80, TEST-2 が α =0.65 であった. これ は, TEST-2 において, 重錐があまり跳躍せず, 斜面へ2 回衝突したからであると考えられる (図-11参照).

また,自然斜面である TEST-3 の残存係数は, α =0.98 でほぼ自由落下に等しい速度であった.これは,斜面が 凹凸がある急勾配の岩盤である影響と考えられる.

このように、落石防護網を用いることで自由落下相当 の重錐速度を 65%~80%程度に抑制したことを確認できた.

5.5 エネルギーの内訳

重錐は、斜面天端に設置された状態において位置エネ ルギーを保有している.これを落下させることにより、 位置エネルギーが運動エネルギーに変化する.さらに重 錐は、落石防護網と斜面に挟み込まれながらエネルギー が吸収され、相当のエネルギーを保持して斜面下端に到 達する.そこで、このような重錐の運動エネルギー、吸 収されたエネルギー(以下吸収エネルギーという)、斜面 下端に到達する直前のエネルギー(以下残存エネルギー という)を把握し、落石防護網のエネルギー吸収機構に ついて解明する.

表-4に示すように,重錐の運動エネルギー(E₁)は, 重錐が自由落下した場合のエネルギーであり,重錐重量 に落下高さを乗じて求めた.

また,重錐の残存エネルギー(E₂)は,重錐が斜面下端 に到達する直前に重錐が有するエネルギーである.算出 方法は,高速度カメラの画像から重錐速度を推定して求 めた.さらに吸収エネルギー(E₃)は,運動エネルギー(E₁) と残存エネルギー(E₂)の差である.その内訳は,緩衝金 具により吸収されたもの(E₃₋₁),重錐が落石防護網と斜面 の摩擦により吸収されたもの(E₃₋₂)に分けられる.緩

表-4 エネルギーの内訳 (単位:kJ)

内			訳	TEST	-1	TES	T-2	TEST-3
運動エネルキ	°-	(E_1)	W•H	2, 196	6.5	2, 19	96.5	2, 196. 5
残存工补持	1	(E_2)	$1/2 \cdot W/g \cdot V^2$	1,405	5.5	92	28.6	2, 108.6
吸収エネルキ	°	(E_3)	E1-E2	791	L. 0	1,20	67.9	87.9
緩	衝金具	(E_{3-1})	SL·T	88	3. 7	8	31.4	0.0
摩排	察による	(E_{3-2})	E3-E3-1	702	2.3	1,18	36.5	87.9
重錐重量	W=	95.5	kN	落下高	さ	: H=	23.	.0 m
重力加速度	使 g=	9.807	m/s^2					
落石速度	V=	16.99	m/s(TEST-1)	V=	13.	81	m/s(T	EST-2)
	V=	20.81	m/s(TEST-3)					
緩衝金具	SL=	4,438	mm(TEST-1)	SL=	4,0	70	mm (TE	ST-2)
平均張力	T=	20	kN					

衝金具により吸収されたもの(E_{3-1})はスリップロープす べり量の合計に,緩衝金具の平均張力を 20kN と仮定し乗 じて求めた.落石防護網と斜面の摩擦により吸収された もの(E_{3-2})は,吸収エネルギー(E_3)から緩衝金具による吸 収エネルギー(E_{3-1})を差し引いて求めた.

このような要領で求めた結果を図-13に示す.



図-13 吸収エネルギーの内訳

表-4および**図-13**より,落石防護網を用いて得られる効果は以下のように考えられる.

吸収エネルギー(E3)は、ネット斜面(TEST-1, TEST-2) の吸収量が自然斜面(TEST-3)の吸収量を約8倍以上 (791/87.9=8.99)うわまわり,高い効果が得られたことを 確認できた.この内訳は、落石防護網と斜面の摩擦抵抗 による吸収(E_{3-2})が大部分を占め、緩衝金具による吸収 (E_{3-1})については僅かであった.これは、落石防護網が重 錐の跳躍を抑制したことで、斜面と重錐の摩擦抵抗を得 られたことが要因と考えられる.また、緩衝金具につい ては、アンカーおよび一部のワイヤロープに対する衝撃 力の緩和に効果的であるが、運動エネルギーの吸収に対 しては効果が少ないことが判った.

6. 動的応答解析

実斜面実験では,落石防護網に加わる負荷,重錐エネ ルギーの吸収機構および重錐の誘導性能等を概ね把握す ることができた.そこで,本実斜面実験の解析モデルで 動的応答解析をおこない,実斜面実験の結果と対比する.

6.1 解析方法

動的応答解析は,汎用衝撃解析ソフトLS-DYNAを用いた.このソフトは,各種の複雑な物理現象の動的・静的 解析に適し,極めて大きい幾何学的非線形性および材料 非線形性を考慮した衝撃応答解析が可能なものである. また,特徴としては,非常に大きな変形挙動を計算でき ること,要素および材料モデルが豊富なこと,複雑な接 触計算が簡単であることなどが上げられる.

計算手法は,空間の離散化に有限要素法を,時間積分 法に陽解法を採用している.

6.2 モデル化

落石防護網のモデルは,実斜面実験と同一の構造およ び機能を有したものとする.斜面については,測量結果 に基づきモデル化した(図-14参照).

(1)モデル化の要領

(a) ワイヤロープ

図-14 A部に示すように、ワイヤロープは、水平 方向に 0.4m 間隔,鉛直方向に 0.4mm 間隔,斜め方向に 0.283m 間隔に節点を分割した.また、これらの節点間を ワイヤロープ要素とシートベルト要素でモデル化し、ワ イヤロープ要素には引張力に抵抗し圧縮力に抵抗しない 特性を与え、シートベルト要素には、アンカー頭部に備 えた滑車構造(以下スリップリングという)を介して要 素が移動し、摩擦抵抗が生じない特性を与えた(図-1 4参照).なお、節点数は 1804、要素数は 1799 であった. (b)特殊ひし形金網

特殊ひし形金網もワイヤロープと同様に,水平方向に 0.4m間隔,鉛直方向に0.4m間隔,斜め方向に0.283m間 隔に節点を分割し,節点間を金網要素でモデル化した(図 -14 B部参照).なお,節点数は9519,要素数は特 殊ひし形金網18751であった.

(c) アンカー

アンカーは,ワイヤロープ節点と斜面節点を結ぶ要素 で構成し,緩衝機能を有している.なお,要素数はアン カーが16,スリップリングが66である.

(d) 斜面, 落石

斜面については、節点数 3872, 要素数 3060 のソリッ ド要素に分割した.また、落石は実験で用いた重錘と等 価な直径 2m の球体にモデル化し、節点数 772, 要素数 384 のソリッド要素に分割した.

(2) 各種条件

(a) ワイヤロープと特殊ひし形金網



図-14 モデル図,節点および要素構成例

実斜面実験においては、ワイヤロープと特殊ひし形金 網が結合コイルにより連結されている.そこで、動的応 答解析では、ワイヤロープ節点と金網節点、ワイヤロー プ要素郡と金網要素郡を一体化したモデルと設定した. (b) 接触条件

落石と特殊ひし形金網の接触問題については,各要素 郡が互いに衝突可能な条件を設定している.また,落石 と斜面の接触問題についても,各要素が衝突可能な条件 を設定している.

なお,接触した際の摩擦は,落石と特殊ひし形金網で 摩擦係数を 0.2 と設定した⁵⁾

また落石と斜面の摩擦係数は、斜面が岩盤で凹凸があ り立木がないこと、重錘が球状であることより「落石対策 便覧表 1-3」の区分A~B相当と仮定し0.1と設定した¹⁾.

6.3 部材および材料の特性

(1)ワイヤロープ

ワイヤロープは,直径 1.9mm の素線を7本に撚り,こ れを3本に束ねた公称径12mmである.荷重-伸び関係は, 構造が類似した7×7の伸び特性を図-15に示す非線 形の曲線で近似した⁴⁾.

(2)特殊ひし形金網

特殊ひし形金網は, φ2.3mmの素線を3本よりに束ね, 波型に曲げ加工し編みこまれたものである. このように



図-15 ワイヤロープの荷重-伸び曲線

曲げ加工されたより線は、引張試験から荷重-伸び曲線 あるいは応力-ひずみ曲線を求めることが困難である.

そこで、写真-2に示す特殊ひし形金網引張試験の試 験体を図-16のようにモデル化した.



そして,引張試験と同様の引張荷重を与え,引張試験 結果に近似する荷重-伸び関係を試行錯誤的に再現した (図-17参照).この結果より,金網要素の応力ひずみ 関係を算定し解析に用いることとした²⁰.

図-17 面内引張試驗結果

。 変位(cm)

(3)緩衝金具

緩衝金具は、ワイヤロープに一定以上の張力が加わる と、張力が一定の幅で上昇および下降を繰り返しながら 抑制され、スリップロープ軌道上を滑るように設計・製 作されている.そこで解析においては、緩衝金具に一定 の張力が加わると、その張力を維持したまま伸びるバネ 要素を設定した.また、バネ要素が伸び始める張力は、 **表-2**の落錘式試験の平均張力が23.28kN であったこと から、20kN から伸びるように設定した.

(4)斜面

斜面は硬岩相当と仮定しポアソン比0.3を設定した⁶⁾.

また変形係数は、花崗岩相当と仮定しE = 3.0×10⁶kN/ m²と設定した⁷⁾.

(5)落石

実験に使用した重錘は、外殻が鋼製、内部に無収縮モ ルタルを充填したもので、容積の大部分を無収縮モルタ ルが占めている.そこで動的応答解析の落石はコンクリ ート相当であると仮定し、無収縮モルタルの設計基準強 度 52.5N/mm²から、ヤング係数を E_c=3.5×10⁴N/mm²、ポ アソン比を 1/6 とした⁸⁾.また落石重量は実験に使用し た重錘と同じく 95.5kN と設定した.

6.4 実斜面実験結果と動的応答解析結果の対比(1)ワイヤロープ

図-18は、ワイヤロープ張力の経時変化を 0.002sec の出力間隔で表示し、実斜面実験結果(TEST-2)および動 的応答解析結果を対比したものである.



(a) 波形の形状

図-18に示すように波形の特徴は、実斜面実験がな だらかな形状であるのに対し、動的応答解析では急激な 増減を繰り返す形状がみられた.この動的応答解析の波 形形状は,弾性波の影響によるものと思われる.つまり, 実斜面実験においては、ロードセルの精度が低いこと、 ワイヤロープが斜面の凹凸に沿って設置されたことによ り、弾性波が消滅し易かったと思われる.また、実験値 と解析値の波形形状については、FOC-5、FOC-8、FOC-9 および FOC-10 で増減の傾向がやや似ていた.また、FOC-6、 FOC-7 および FOC-11 の解析値については、張力があまり 生じておらず実験値と対比できなかった.

このように、動的応答解析では張力が生じた箇所の有 無に偏りがあり、張力が生じた場合には、実験値と解析 値で波形の増減傾向に似た箇所がみられた.

(b) 最大張力

図-18に示すように、実験値および解析値の最大張 カについては、FOC5 および FOC10 が概ね近似していた. また、FOC-8 および FOC-10 以外は、実験値が解析値を上 回っていた.この原因としては、実斜面実験においてス リップリングが有効に機能しなかったからと思われる. つまり、動的応答解析のスリップリングはワイヤロープ に摩擦抵抗が生じない機能を与えたが、実斜面実験では アイナットの内径 60mmの中に、直径 12mmのワイヤロープ が最大6本挿入され、摩擦抵抗が増し高い張力が計測さ れたと思われる.また、アイナット付近のワイヤロープ に一部断面欠損がみられたことも、スリップリング機能 が上手く作用しなかったと結果と思われる.

(2) アンカー

図-19は、アンカー張力の経時変化を 0.002sec の出 力間隔で実斜面実験結果(TEST-1)および動的応答解析結 果を対比したものである.

動的応答解析の波形は、「6.3(3)緩衝金具」に示すよう に 20kN から伸びるバネ要素を設定しているため、20kN を超過した箇所が平坦に表示されている.

(a) 波形の形状

図-19に示すように、実験値および解析値の波形の 形状は、FOC-1およびFOC-2で張力の増減に似た傾向が 伺えるが、FOC-3およびFOC-4については解析値の増減 が小さく実験値と差異がみられた.

(b) 平均張力

アンカーについては,「5.1 張力測定結果(2)アンカ 一張力」より,緩衝金具の張力抑制効果が確認されている. そこで,実験値と解析値の比較は,緩衝金具のエネルギ 一吸収性能の評価に用いられる平均張力でおこなう.

図-19に示すように、実験値および解析値の平均張 力は、FOC-1、FOC-2およびFOC-4で概ね合致していたが、 FOC-3については2.5倍ほど高く(12.57/4.90=2.56)差異 がみられた.

また,実験値および解析値の平均張力は,全て 20kN 以下であった. 「3.2 緩衝金具 (2)試験結果」より,緩衝 金具の平均張力は 23.28kN であり,実斜面実験および動 的応答解析において,緩衝金具が有効に作用したと判断 された.



(3) 落下軌跡および落下速度

(a) 落下軌跡

図-20は、実斜面実験結果および動的応答解析結果の落下軌跡を重ねて比較したものである.これよりネット斜面 TEST-1 および TEST-2と動的応答解析の落下軌跡は概ね合致していた.



(b) 落下速度, 重錐エネルギー

図-21および表-5は、実斜面実験および動的応答解 析における重錐速度および重錐エネルギーを比較したも のである.

この結果より重錐の残存速度は、ネット斜面で行った 実験 TEST-1 が 16.99m/s, TEST-2 が 13.81m/s であるのに 対し,動的応答解析では 10.39m/s であり相違がみられた. これは、動的応答解析の斜面モデルにおいて、実斜面を 詳細にモデル化できなかったこと、ネット斜面での実験 回数が不足していたことが原因と思われる. つまり、斜 面モデルは、実斜面を 3 断面×13 箇所の計 39 箇所の測 量をおこない作成したが、落石運動をより詳細に捉える ためには、さらに多くの測量点が必要であったと思われ る.



図-21 重錐速度分布の上限値の比較

表-5 残存係数および重錐エネルギー

	落下高さ	重錐速度	残存係数	重錐エネルギー
	H(m)	V(m/s)	α	$E=1/2 \cdot W/g \cdot V^2$
TEST-1	23.0	16.99	0.80	1, 411. 4
TEST-2	23.0	13.81	0.65	932.5
動的解析	23.0	10.39	0.49	526.8

また, 表-5に示すように斜面下端における重錐エネ ルギーは, ネット斜面で行った実験 TEST-1 が 1, 411. 4kJ, TEST-2 が 932. 5kJ に対し,動的応答解析では 526. 8kJ で あった. つまり実斜面実験の衝撃力は,動的応答解析を かなり上回っていたと考えられ,ワイヤロープ張力の結 果にも少なからず影響があったと思われる.

7.結論

7.1 実斜面実験

落石防護網の実斜面実験より以下のことが明らかに なった.

(1) アンカーに加わる張力は全ての箇所で 50kN 以下で あり,緩衝金具が有効に作用したと判断される.

(2) ワイヤロープに加わる最大張力は,配置の形状および設置箇所によりばらつきがみられた.また,アンカー 間隔が10mを上回る場合は,最大張力が50kNを上回った 箇所もあり,緩衝金具による衝撃抑制の効果が少ないと 考えられる.したがって,設計に際しては,斜面形状お よび落石規模を考慮し,ワイヤロープの適切な配置と数 量調整が必要と考えられる.

(3) 落石防護網を用いることで,重錐の跳躍量を抑制し, 斜面下端に誘導し停止できたことを確認した.また,自 由落下相当の重錐速度を 65%~80%程度に抑制した.

(4) エネルギーの吸収量は,落石防護網と斜面の摩擦に よるものが殆どを占めた.緩衝金具によるエネルギーの 吸収量は僅かであった.

7.2 実斜面実験と動的応答解析の対比

実斜面実験結果と動的応答解析結果を対比し以下の ことが判った.

(1) ワイヤロープに生じる張力は、実斜面実験値と動的

応答解析値で相違がみられた.これは、実斜面実験の重 錐エネルギーが動的応答解析よりもかなり高かったこと (表-5参照)が起因していると考えられ、ワイヤロー プに予想以上の摩擦抵抗が生じたと考えられる.また、 ワイヤロープの摩擦抵抗を減少させるために、スリップ ロープ頭部のアイナット構造を見直す等の必要がある. (2)アンカーに生じる平均張力は、実斜面実験値と動的 応答解析値で一部を除き概ね合致していた.また、動的 応答解析の平均張力も 20kN 以下に抑制されており、緩衝 金具の機能を再現できたと判断される.

(3)動的応答解析は斜面,落石防護網および重錐をモデル化し,重錐の誘導効果,落石防護網の挙動および緩衝 金具の機能について信頼できる結果を得られた.

7.3 まとめ

本論文は,落石防護網を構成する部材の性能試験およ び落石防護網の実斜面実験をおこない,これらの結果よ り重錐の誘導性能およびエネルギー吸収能力等の検証を おこなった.

これらの性能試験からは、特殊ひし形金網の強度、お よび緩衝金具の平均張力が得られた.実斜面実験からは、 落石防護網に加わる負荷とその要因、およびエネルギー 吸収機構等について把握できた.また、落石防護網が重 錐を誘導し斜面下端で停止させることが可能であること を確認できた.

さらに,動的応答解析は,実斜面実験での落石防護網 の挙動と緩衝効果を概ね再現できた.

今後は、これらのデータを参考として様々な現場に対 して対処できる設計方法を確立する予定である.

謝辞:本実験を行うにあたり、(㈱サムエンジニアリング の南和夫氏,勢田土石㈱武田順治氏および㈱ビーセーフ 松嶋秀士氏の方々の多大なご協力があったことを記し, ここに,これらの方に感謝の意を表します.

参考文献

1)日本道路協会:落石対策便覧, 2000.

 (親ビーセーフ:高性能落石防護柵 開発実験報告書.
 (謝)吉田博,澤田直子,南和夫,窪田俊男:緩衝金具を配置したワイヤネット工の性能に関する実験的研究,構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集,第4回, pp101-106,1998.

4)神鋼鋼線工業㈱:神鋼鋼線のワイヤロープ〈No.32〉.
5)K. Gieck著:工学公式ポケットブック,2005.
6)日本道路協会:道路橋示方書・同解説(耐震設計編),2002.

7) 日本道路公団:設計要領第2集, 1998.

8) 日本道路協会:道路橋示方書·同解説(共通編), 2002.

(2007年9月18日受付)