

Study on Performance of Pocket-type Rockfall Protective Nets using Shock Absorber

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/45378

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学 位 論 文 要 旨

緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の

防護性能に関する研究

Study on Performance of Pocket-type Rockfall Protective Nets using Shock Absorber

金沢大学大学院自然科学研究科

環境科学専攻

学 籍 番 号 1323142002

氏 名 難 波 正 和

ABSTRACT

Due to abnormal weather and earthquakes natural disasters including rockfall accidents have occurred frequently in recent years, and the rockfall accidents will occur increasingly rather than decrease because of the geological features and abnormal weather of Japan. Therefore a rockfall protective structure is desired not only to have the high strength but also to be an applicable and efficient countermeasures suited to a limit budget. Because of this, in recent years a new pocket-type rockfall protective net adopting shock absorbers has been devised to increase the ability to absorb rockfall energy. In order to introduce the newly devised protective net as an efficient countermeasure its performance has to be confirmed in a practical scale experiment. In this study the full-scale impact tests on a new pocket-type rockfall protective net adopting shock absorbers were carried out by using a real slope to reproduce an actual falling rock. Based on the nonlinear dynamic FEA software LS-DYNA, a numerical simulation model was created to simulate the test results. The net's protective performance or the limit energy absorption capacity was confirmed by investigating its analytical behavior in a variety of rockfall conditions. Consequently, a new pocket-type rockfall protective net which has not only the high strength but also an economical applicability due to shock absorbers was developed through full-scale impact tests and numerical analyses.

1. 序論

我が国の国土は、約 2/3 が山岳地帯で急峻な地形を呈しており、地方部における生活道路を担う主要幹線道路の多くは山岳地帯に建設されている。また、我が国は降雨・降雪量が多く、環太平洋地震帯の上に位置しており、世界でも有数の火山国、地震国である。このように極めて厳しい自然状況下に加え、近年では地球温暖化に伴う異常気象や多発する地震等により、自然災害の発生頻度は高まっている。中でも我々に最も身近な自然災害である落石災害については、今後も減少することではなく、限られた予算の中で効率的に落石対策を実施していく必要がある。そのためには、コストパフォーマンスに優れる高耐力かつ高性能な新たな構造形式を用いた落石防護工が望まれている。ただし、従来と異なる新たな構造形式を用いた防護工については、実験データ等により、落石防護性能や適用範囲を確認することが求められていることから、実規模実験と解析を行い、構造体の防護性能を評価することが必要である。

本研究では、多岐にわたる落石防護工の中から、近年、急速に開発や普及が進み着目されてきている緩衝装置を用いた高エネルギー吸収型のポケット式落石防護網を研究対象とした。過去の研究で同構造のポケット式落石防護網について実規模実験と動的応答解析により、防護性能の検証を試みている。ただし、当時の実験では、実験場所と実験装置の制約から、実構造とは異なる重錘衝突方向であったことや重錘を鉛直落下させる実験であったため重錘の回転エネルギーを加えることができなかったことが、研究課題として残されていた。そのため、本研究では、実際の構造物と同様、実斜面に供試体を設置し、重錘の衝突方向を水平とし、かつ回転エネルギーが加わった時のエネルギー吸収性能について確認することを目的に実規模実験を行った。さらに、その実験結果を基に LS-DYNA を用いた動的応答解析により、実験再現解析モデルを構築し、構造体に与える回転エネルギーの影響や実験では確認できなかった構造体の限界吸収エネルギーについて、解析により検証した。また、従来から用いられている金網（以下、従来金網という）に比べ高強度の金網（以下、高強度金網という）を用いた構造体についても実験、解析を行い、高性能かつ経済的なポケット式落石防護網の研究開発を行った。

2. 緩衝装置を用いたポケット式落石防護網に関する実験

ポケット式落石防護網の主要部材である緩衝装置、金網についての基本性能や落石防護特性等の基礎資料を得ることを目的に部材単体の性能確認実験を行った。さらに、それら主要部材を用いた実物大の供試体を実際の構造物と同様、斜面下部に構築し、構造物のエネルギー吸収性能や落石防護性能を確認することを目的に斜面上部から重錘を転落させ衝突させる実規模重錘衝突実験を行った。

2.1 緩衝装置の性能確認実験

写真 2.1 は、本研究で用いた U ボルト型、リング型について、それぞれ標準仕様の緩衝装置を示している。U ボルト型、リング型いずれの緩衝装置も 2 枚の鋳造板で構成される本体部品でワイヤロープを挟み込み定着させる形式である。衝撃等によりワイヤロープに一定以上の張力が作用するとワイヤロープが滑り、ワイヤロープ表面と本体部品である鋳造板内面との間に生じる摩擦力により、ワイヤロープが制動される構造である。この摩擦抵抗で、エネルギーが吸収される仕組みとなっている。

性能実験は、実験装置に供試体を固定し、所定の重錘を鉛直落下により载荷させる実験方法とした。実験の結果、計測値にばらつきもなく、設計滑り張力値である U ボルト型標準仕様 30kN、低規格仕様 22kN、リング型標準仕様 28kN、低規格仕様 13.5kN を確認した。図 2.1 には代表例として U ボルト型、リング型とも標準仕様のワイヤロープ張力-変位波形を示している。重錘が供試体に衝突した時刻を 0ms としている。U ボルト型は、重錘が供試体に衝突後、急激に上昇し、最大張力に達した以降は減少していくが、リング型は、衝突後の急激な上昇はなく、一定の振幅で継続している。リング型は U ボルト型に比べ、比較的小さい張力で滑りだすことから、リング型の方が滑りやすい緩衝装置といえる。これは、U ボルト型とリング型で使用しているワイヤロープ種別や径および緩衝金具の固定方法による摩擦抵抗の相違が大きく関係していると推察する。

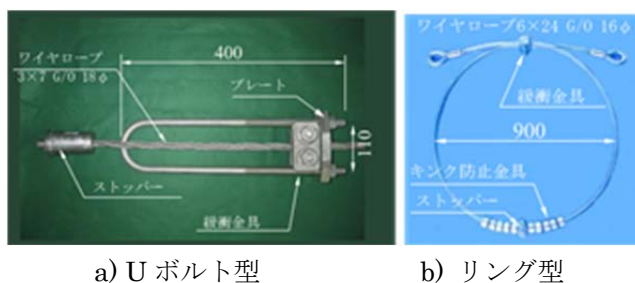


写真 2.1 緩衝装置（標準仕様）

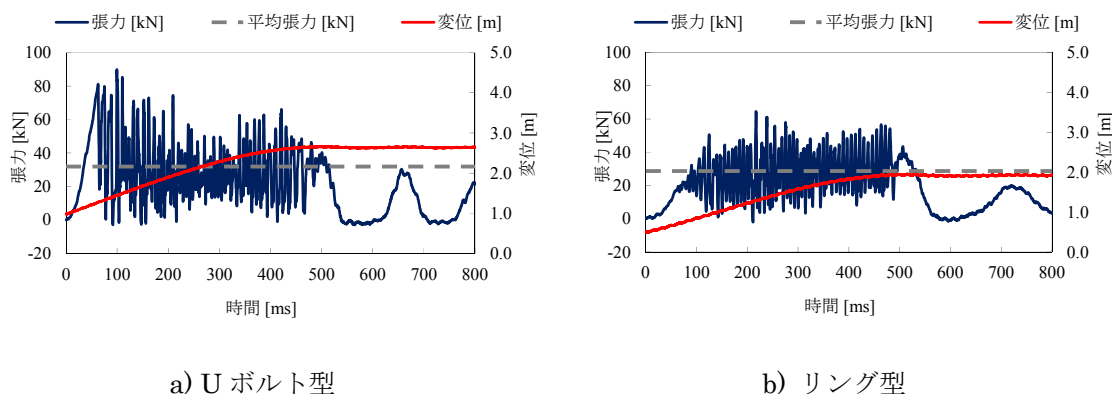


図 2.1 緩衝装置（標準仕様）ワイヤロープ張力-変位

2.2 高強度金網の重錘衝撃载荷実験

線径、網目の異なる3種類の高強度金網に対して、重錘衝撃载荷実験を行い、高強度金網単体の限界吸収エネルギーを確認した。図2.2は、実験方法の模式図を示している。重錘の形状寸法は、SAEFLで制定されている性能認証指針を採用し、質量の異なる0.612ton, 0.918ton, 1.000tonの3種類を用いて、目標とする衝突エネルギーに応じて落下高さを変化させた。表2.1は、実験結果の概要を示している。実験は、4ケースについて実施しているが、周囲のワイヤロープが破断したNo.2を除き、φ3.2-50×50は、102.4kJ, φ4.0-50×50は、157.1kJ, φ4.0-40×40は、174.5kJの重錘を捕捉し、高強度金網の吸収エネルギーとして評価した。

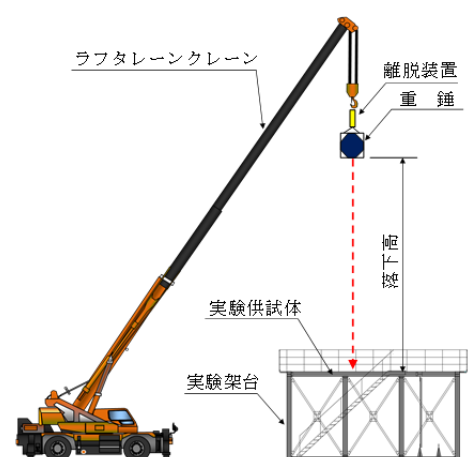


図2.2 実験方法模式図

表2.1 実験結果概要

No.	金 網	重錘 質量 m (ton)	落下高 H (m)	横ロープ 最大張力 t_1 (kN)	縦ロープ 最大張力 t_2 (kN)	金網 残留変位 δ (mm)	位置 エネルギー E (kJ)	重錘捕捉
	規格 線径・網目							
1	SWG F-3 φ3.2-50×50	0.612	15.0	40.8	84.3	2060	102.4	○
2	SWG F-3 φ3.2-50×50	0.918	16.0	89.0	159.0	2370	165.3	△ ロープ破断
3	SWG F-3 φ4.0-50×50	0.918	15.0	69.1	60.4	2460	157.1	○
4	SWG F-3 φ4.0-40×40	1.000	15.0	43.1	85.0	2810	174.5	○

2.3 実斜面を用いたポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験

過去の研究課題であった実際の構造物と同様、実斜面に供試体を設置し、重錘の衝突方向を水平とし、かつ回転エネルギーが加わった時のエネルギー吸収性能や落石捕捉挙動を確認することを目的に実斜面を用いた実規模実験を行った。また、本実験で用いた金網は従来金網と高強度金網の2種類とし、高強度金網のポケット式落石防護網における適用性についても検証した。図2.3は、実験方法を模式的に示している。本実験で用いた実斜面は、斜面高約35m、斜面勾配約55°の砂岩斜面である。実験は、斜面上端の架台に重錘をセットした後、クレーンにより架台端を吊り上げて重錘を転落させ、斜面下端に設置した供試体に衝突させた。重錘はEOTAが定めるETAG27に規定される重錘形状を採用し、2.5ton, 4.2ton, 5.2tonの3種類を用いた。

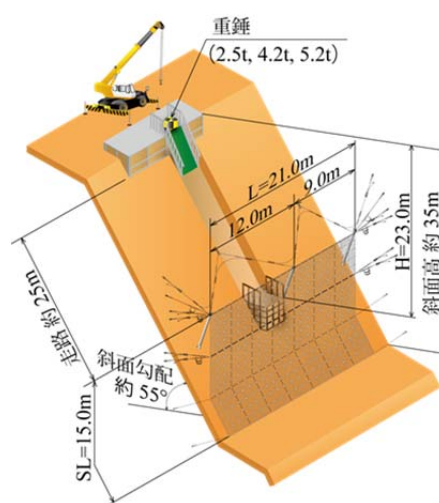


図2.3 実験方法模式図

図 2.4 は、実験供試体の形状・寸法を示しており、網高 15.0m、支柱間隔 12.0m と 9.0m の非対称となる 2 スパン構造、全長 21.0m とした。本来、本構造体の最大支柱間隔である 12.0m の 2 スパン構造で実験を実施することが理想であったが、実験場の制約から、最大支柱間隔 12.0m と最小支柱間隔 9.0m を組み合わせて実験供試体を構築した。主要部材は、支柱 (SS400, H-150×150×7×10, 支柱高 $h=4.0$ m)、金網 (GS-3 5.0φ-50×50, GF-2 4.0φ-50×50 の 2 種類)、吊・縦横主ロープ (3×7 G/O 18φ)、縦横主ロープの間に配置した補助ロープ (3×7 G/O 14φ)、滑車装置に取り付ける

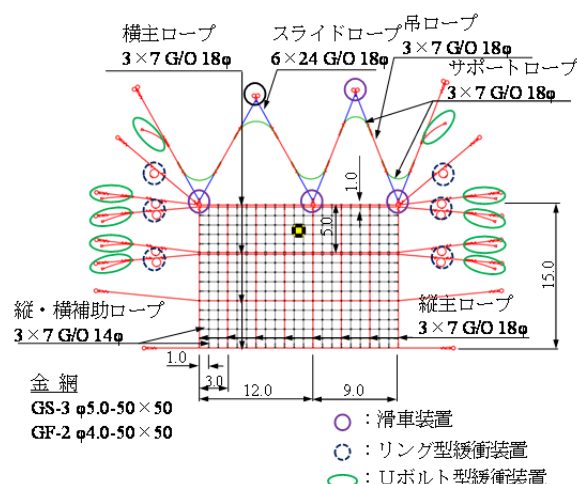


図 2.4 実験供試体形状・寸法

スライドロープ (6×24 G/O 18φ)、吊ロープ破断時の滑車装置からのすり抜けを防止するためのサポートロープ (3×7 G/O 18φ)、アンカー (D29-3000) 及び緩衝装置 (U ボルト型、リング型とも標準仕様の 2 種類)、滑車装置で構成されている。横主ロープは、5 m 間隔で配置し、重錘が直接衝突する範囲である最上段と 2 段目については、重錘の衝撃力に耐えた後に荷重を分散させることや緩衝装置の個数を増やしてエネルギー総吸収量を高めること等を目的として、各々 2 段配置としている。縦主ロープは、3 m 間隔で配置し、横・縦主ロープ間に 1.0 m 間隔で補助ロープを配置している。実験は、従来金網あるいは高強度金網を用いた構造体に対して、それぞれ衝突エネルギーを 3 段階に設定した合計 6 ケースの実験を実施した。なお、高強度金網の規格寸法は、強度の増加により、線径を小さくすることが可能と判断し、従来金網より線形を小さくした。これにより金網重量の軽量化が図られ、金網架設の施工性や架設費の軽減に寄与できる。表 2.2 は、実施した全 6 ケースについて、実験結果の概要を示している。

表 2.2 実験ケースの設定条件・結果概要

実験 No.	金網	横主ロープ 緩衝装置	重錘 質量 $m(\text{ton})$	理論値	実験値					
				衝突エネルギー E_t (kJ)	捕捉 状況	線速度 $V(\text{m/s})$	線速度エネルギー $E_v(\text{kJ})$	回転 速度 $\omega(\text{rad/s})$	回転エネルギー $E_r(\text{kJ})$	*衝突エネルギー $E_a(\text{kJ})$
Case1-1	従来 GS-3 φ5.0-50 ×50	リング型	2.5	554.5	○	14.2	252.1	19.0	69.3	321.4 (0.58)
Case1-2		リング型	4.2	931.5	△	14.6	447.6	16.7	126.6	574.3 (0.62)
Case1-3		Uボルト型 リング型	5.2	1153.3	○	15.0	585.0	16.0	161.5	746.5 (0.65)
Case2-1	高強度 GF-2 φ4.0-50 ×50	リング型	2.5	554.5	○	14.6	266.5	18.1	62.9	329.4 (0.59)
Case2-2		リング型	4.2	931.5	○	14.2	423.4	14.8	99.4	522.9 (0.56)
Case2-3		リング型	5.2	1153.3	×	14.6	554.2	15.2	145.8	700.0 (0.61)
Case2-3C		リング型	5.2	1153.3	○	14.9	577.2	14.3	129.0	706.3 (0.61)

*実験値の衝突エネルギーで () 内の値は理論値との比率を示す。

実験の結果，従来金網を用いた Case1-2 で金網に衝突してからの停止，斜面法尻への誘導までは問題はなかったが，法尻に到達した後，重錘が金網の浮き上がりにより抜け出した．実用に際しては，網高の調整や浮き上がり防止の押さえアンカーを配置することで解消される．高強度金網を用いた Case2-3 については，縦ロープと横ロープを接続している交点クリップの締付け不足により金網を貫通したため，締付作業を適正に行い，再実験を行った．再実験の結果，金網に一部局所的な破断は見られたが，他ケース同様に重錘を捕捉した．他のケースでは，ポケット式落石防護網が必要とされる機能である，金網等の防護面で重錘を受け止めて回転運動を停止させ，衝突エネルギーを吸収した後，重錘を下方のポケット部に落とし込み斜面法尻まで重錘を誘導し，防護網の前面へ抜け出すことなく重錘を停止させる一連の捕捉挙動と防護性能が確認できた．

高速度カメラの画像解析により算定した実験衝突エネルギー E_a については，落石対策便覧の算定式で求められる理論値 E_t の 58%～65%であった．これは，実斜面を重錘が転落する際の線速度が理論値に比べ遅かったことが要因である．重錘が斜面を転がる際，地山との間に非弾性衝突（摩擦抵抗）が発生し，線速度は減衰するが，その減衰の度合いは斜面の性状に応じて異なる．本実験の限られたケースだけで断定することはできないが，実務設計で用いられる落石便覧の算定式から算定される衝突エネルギーには，相応の安全余裕が含まれていると考えられる．本実験から，従来金網を用いた構造体で 746.5kJ，高強度金網を用いた構造体で 706.3kJ の最大衝突エネルギーに対して防護可能であることを確認した．

また，実験値を考慮した可能吸収エネルギーに対してエネルギーロスを検証した結果，衝突エネルギーが小さいケースでは，実験値として算定したエネルギーロスの方が，理論値で求められるエネルギーロスより小さい結果となった．しかしながら，実験の挙動をみてもわかるとおり，いずれのケースについてもエネルギーロスの挙動である重錘と金網が一体となって重錘を停止し，誘導させる挙動が確認されていることから，エネルギーロスについては，実験供試体範囲から算定される理論値程度を見込むことが妥当と考える．

3. 緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の動的応答解析

実規模実験を実施した全 6 ケースについて，LS-DYNA を用いた動的応答解析により，実験再現解析モデルを構築し，妥当性を検証した．また，その再現解析モデルを用いて実験では確認できなかった構造体に対する限界吸収エネルギーについて，回転エネルギーを考慮した場合と考慮しない場合で検証した．図 3.1 は実験再現解析モデルを示している．

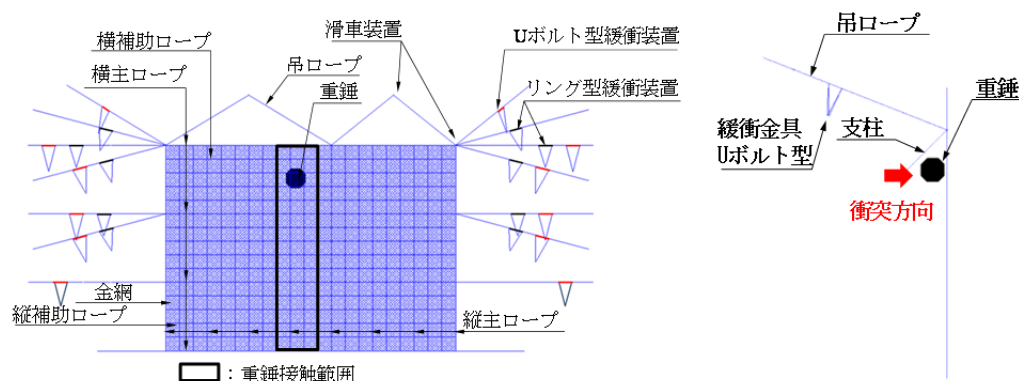


図 3.1 実験再現解析モデル図

図 3.2 は、代表的な一例として、従来金網の最大衝突エネルギーを付与した Case1-3 の実験と解析の比較を示している。実験再現解析モデルの重錘捕捉挙動については、解析では地表面をモデル化していないため、防護網下端での重錘の捕捉・停止までは再現できていないが、重錘が金網を貫通することなく重錘を捕捉する挙動については、全てのケースで再現することができた。また、実験同様に重錘が金網に衝突した際、最大となる突出量まで凸型に変形し、その後、重錘と金網が一体となって、金網全体で挙動している状況についても再現できていた。

実験と解析の相違点としては、解析の方が実験に比べて落下が早いことである。2.0s 付近で実験の方が遅くなることは、重錘と地山の接触の影響が考えられる。一方、重錘が金網に衝突してから金網下端への誘導が始まる 0.8s 付近から解析の方が早くなる理由としては、重錘と金網およびワイヤロープとの摩擦係数の影響が考えられる。また、Case1-1 を除くケースで衝突面の金網に破断が見られた。金網の破断範囲は、従来金網を用いた Case1-2, Case1-3 に比べ、高強度金網を用いた Case2-1～Case2-3C の範囲が大きかった。これは、部材の材料特性である従来金網の伸びが 30% に対して、高強度金網の伸びが 4% と小さく、この差が解析で顕著に現れ、金網の破断が発生した原因と考えられる。

ワイヤロープ張力については、最大張力値や発生する箇所に相違は見られるが、横ロープ、吊ロープとも張力の時刻歴波形は、実験値と同様の傾向であった。緩衝装置のスリップ長については、1 ケースを除いて解析値の方が 1.3～2.5 倍以上スリップした結果となった。実際の緩衝装置は、ワイヤロープの凹凸によって緩衝装置との接触面が一定でないことから、張力が振幅しながら変動する特性に対して、解析では緩衝装置を簡易的にモデル化したことが要因と考えられる。金網の最大変形量については、全ケースにおいて解析値の方が実験値に比べ、少ない結果であり、従来金網を用いた構造体の差が大きかった。これは、緩衝装置のスリップ長とも関連性が見られ、吊・サイドロープのスリップ長を金網変形量に加えた全体的な構造体の変形量として見ると類似した結果となった。

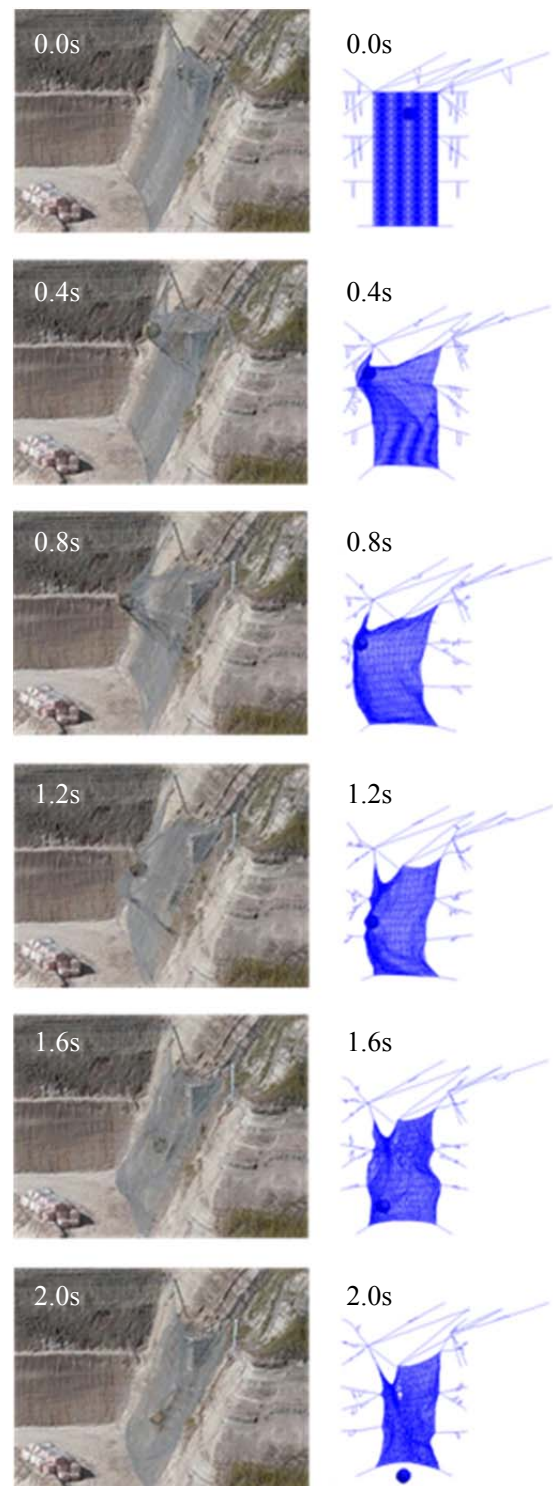


図 3.2 実験-解析画像 (Case1-3)

表 3.1 限界吸収エネルギー解析結果

実験 Case	Case1-1		Case1-2		Case1-3	
回転	有	無	有	無	有	無
重錘質量 $m(\text{ton})$	2.5		4.2		5.2	
限界吸収エネルギー $E_L(\text{kJ})$ (比率)	1100.9 (0.78)	1402.8 (1.00)	998.8 (0.83)	1199.5 (1.00)	1201.0 (0.80)	1497.6 (1.00)
衝突エネルギー(実験値) $E_a(\text{kJ})$ (理論値)	321.4 (554.5)	—	574.3 (931.5)	—	746.5 (1153.3)	—
実験 Case	Case2-1		Case2-2		Case2-3C	
回転	有	無	有	無	有	無
重錘質量 $m(\text{ton})$	2.5		4.2		5.2	
限界吸収エネルギー $E_L(\text{kJ})$ (比率)	501.5 (0.84)	599.5 (1.00)	506.3 (0.72)	703.3 (1.00)	705.2 (0.89)	796.3 (1.00)
実験値衝突エネルギー $E_a(\text{kJ})$ (理論値)	321.4 (554.5)	—	574.3 (931.5)	—	746.5 (1153.3)	—

限界吸収エネルギーの算出については、各ケースとも重錘の形状と質量は変化させず、重錘に与える速度によりエネルギーを 100kJ ずつ変化させて解析を行った。重錘が金網、ワイヤロープを破断し、貫通または大破した場合は限界時の破壊モードと定義し、その一つ前の衝突エネルギーを限界吸収エネルギーとした。表 3.1 は、全ケースにおける限界吸収エネルギー解析結果を示している。従来金網と高強度金網の比較では、同一の重錘を付与したケースで比較すると、従来金網の方が限界吸収エネルギーは大きい結果となった。また、従来金網を用いた全ケースは、実験値はもとより、理論値で算定された衝突エネルギー以上であったが、高強度金網を用いたケースでは、概ね実験値と近似した結果となった。この結果からも実験で付与した衝突エネルギーが限界に近かったことが確認できる。回転エネルギーの影響については、全ケースで回転を考慮したケースが回転を考慮しないケースに比べ、比率として 72%～89%と限界吸収エネルギーが小さい結果となり、解析においても回転が構造体の吸収性能に与える影響が大きいことが確認できた。そのため、実務設計においては、回転エネルギーを考慮して構造体を照査することが安全側の設計と言える。

4. 緩衝装置を用いた簡易型ポケット式落石防護網の開発

これまでエネルギー吸収性能やポケット式落石防護網における適用性を検証してきた高強度金網を主体としたポケット式落石防護網について、実斜面を用いた実規模重錘衝突実験と LS-DYNA による動的応答解析により、新たな構造形式とした緩衝装置を用いた簡易型ポケット式落石防護網の開発を試みた。開発にあたっては、従来型ポケット式落石防護網以上の性能を目標とし、かつ衝突面の構造を簡素化することにより、落石防護性能と経済性のバランスに配慮したポケット式落石防護網を開発目標とした。適用範囲については、従来型ポケット式落石防護網の適用範囲である 150kJ と既に本研究で検証した最大 1200kJ 程度の中間的な適用範囲を目標とした。これにより、実設計で過大な構造体を選定することなく、適用範囲に応じた構造体を選定することが可能となり、経済性と防護性能にバランスがとれ、実用範囲は拡大するものとする。具体的な適用範囲としては、400kJ 以下の中規模な落石を対象とした。

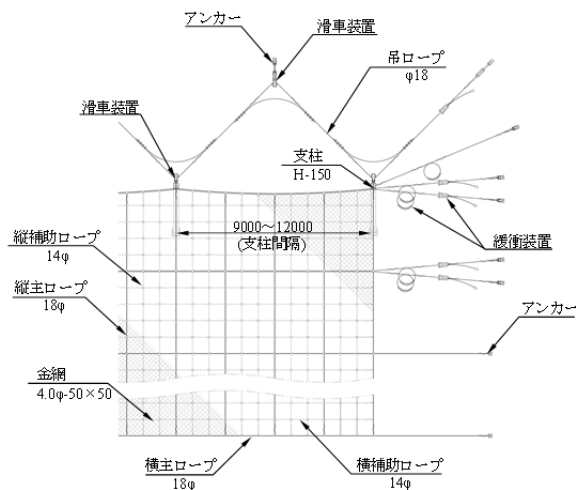


図 4.1 緩衝装置を用いたポケット式落石防護網

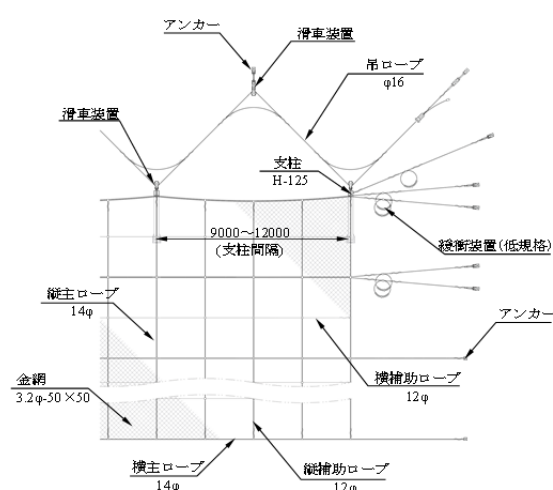


図 4.2 緩衝装置を用いた簡易型

ポケット式落石防護網

図 4.1 は、これまでのポケット式落石防護網の概要図を示し、図 4.2 は、新たに開発したポケット式落石防護網の概要図を示す。新たな構造体については、従来型構造に比べ効果が確認されている支柱背面の吊ロープ、滑車装置構造、支柱間隔は変更せずに、主要部材のサイズダウンや衝突面の縦横補助ロープの間隔を拡大、簡素化し、従来型ポケット式落石防護網に近い構造とした。

表 4.1 は、実験ケースの設定条件と実験結果を示している。衝突エネルギーは、目標とした 400kJ 以上を付与させるため、1.9t の重錘を用いて理論値衝突エネルギー 421.4kJ とした。重錘の捕捉挙動については、非常に良好であり、主要部材である金網や支柱の破損、ロープの破断およびアンカーの抜け出し等もなく重錘を捕捉した。補助ロープ間隔が簡素化されたことにより、重錘が衝突した後の挙動は、金網が全体的に柔らかく重錘を受け止めている印象が強く感じられた。

実験の線速度および回転速度から算定した実験値の衝突エネルギー E_a については、192.4kJ であり、これまでの実験と同様に理論値衝突エネルギー E_t に対して 46% と低い結果となった。実験では、主要部材の損傷もなく重錘を捕捉しており、限界時の破壊モードまで達していないことから、限界吸収エネルギーについては、LS-DYNA による動的応答解析により検証した。

表 4.1 実験ケースの設定条件・結果概要

実験 No.	金網	横主ロープ 緩衝装置	重錘 質量 $m(\text{ton})$	理論値	実験値					
				衝突エネルギー E_t (kJ)	捕捉 状況	線速度 $V(\text{m/s})$	線速度エネルギー $E_v(\text{kJ})$	回転 速度 $\omega(\text{rad/s})$	回転エネルギー $E_r(\text{kJ})$	*衝突エネルギー $E_a(\text{kJ})$
Case1	高強度 GF-2 $\phi 3.2 \cdot 50 \times 50$	リング型 (低規格)	1.9	421.4	○	13.0	160.0	16.2	31.8	192.4 (0.46)

*実験値の衝突エネルギーで () 内の値は理論値との比率を示す。

表 4.2 限界吸収エネルギー解析結果

回転	重錘質量 $m(\text{ton})$	線速度 $V(\text{m/s})$	回転速度 $\omega (\text{rad/s})$	線速度 エネルギー $E_v(\text{kJ})$	回転速度 エネルギー $E_r(\text{kJ})$	限界吸収 エネルギー $E_U(\text{kJ})$	実験値 衝突エネルギー $E_d(\text{kJ})$ (理論値)
有	1.9	19.6	17.3	365.0	36.2	401.2	192.4 (421.4)
(参考)無		23.0	—	502.6	—	502.6	—

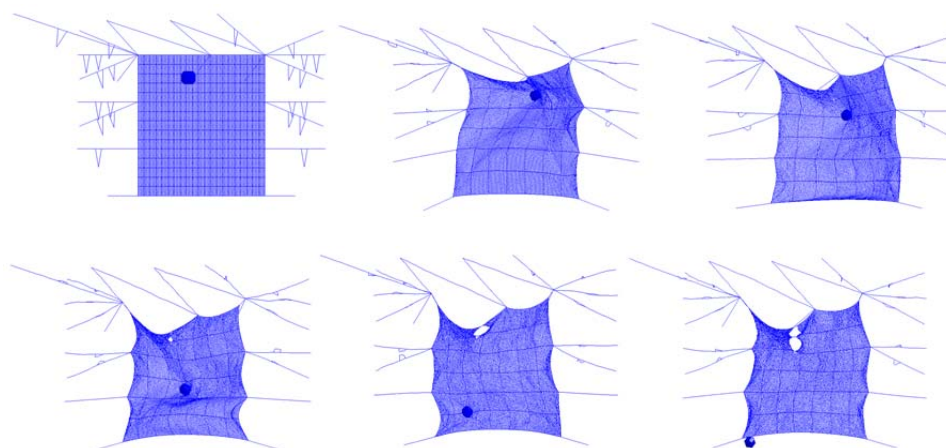


図 4.3 限界吸収エネルギー（回転有 401.2J）

表 4.2 は、動的応答解析による限界吸収エネルギー結果を示し、図 4.3 は、回転を考慮した限界吸収エネルギーの解析画像を 0.4s 間隔で示している。解析の結果、回転を考慮した限界吸収エネルギーは、401.2kJ であり、開発目標としていた適用範囲の上限である 400kJ に対して達成することができた。ただし、解析画像を見ると、重錘衝突時の金網に変状はみられないものの、重錘が金網下部に到達する時点で金網上部の金網と重錘接触範囲との境界から外れていく現象が見られた。本解析では、終局限界状態を確認することが主目的であるため、捕捉までの挙動が良好かつその時点までに金網の大きな変状が見られないことから、限界吸収エネルギーを評価する上では、問題はないと考える。

5. 結論

本研究では、多岐にわたる落石防護工の中から、ポケット式落石防護網を研究対象とし、従来型構造とは異なる緩衝装置を用いた構造体について、実際の落石挙動と同様に回転エネルギーが加わった時の防護性能を確認するため、実斜面を用いた実規模重錘衝突実験を行った。実規模重錘衝突実験結果を基に、LS-DYNA を用いた実験の再現解析を行った結果、工学的に有意な再現性を得ることができた。また、実験では確認できなかった構造体に対する限界吸収エネルギーについても、解析から評価することができた。算定した限界吸収エネルギーを基に回転エネルギーが構造体に与える影響について検証した結果、回転エネルギーを考慮した方が限界吸収エネルギーは小さく、回転エネルギーを見込むことが安全側の設計であることが確認できた。

さらに、これまでの知見を踏まえて、落石防護性能と経済性のバランスに配慮した低規格な部材を用いた簡易型のポケット式落石防護網の開発を試みた結果、中規模落石（400kJ）に対応可能な構造性能および落石防護性能について、一定の評価が得られ、その実用性を明らかにした。

平成 28 年 1 月 29 日

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目

緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の防護性能に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境科学 専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^{なんば} ^{まさかず}
難波 正和

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

本学位申請論文に対して、平成 28 年 1 月 29 日 13:00～14:30 に開催した第 1 回論文審査委員会において面接および口頭試問を行った。さらに、同日 15:00～16:15 に開催した公聴会での質疑応答を踏まえて、第 2 回審査委員会（同日 16:30～17:00）で研究内容と業績および研究能力と国際的なコミュニケーション能力について審議を行った結果、以下のように判定した。

従来型ポケット式落石防護網の施工実績は多数あるが、実斜面環境下での落石の落下運動や衝突に対する挙動の検討が無かったこともあり、最近その設計法の信頼性について実務の混乱があった。また、従来型の性能が 150kJ 程度しかないことから、本論文では緩衝装置や滑車装置を用いることで高落石エネルギーに対応できるポケット式落石防護網を考案し、実斜面での落石衝突実験による落石の運動、衝撃力、金網の損傷およびワイヤーロープ張力など貴重なデータの収集と分析を行った。次に、実験時の同防護網の挙動を再現するために衝撃解析コード（LS-DYNA）による解析モデルを構築し、このシミュレーション技術により実規模実験だけでは困難な種々の落石衝突条件下の同防護網の限界吸収エネルギー等の性能評価を行った。

本論文の成果は、従来型も含めたポケット式落石防護網の性能評価の信頼性をより高くすることに寄与するものであり、その工学的知見は高く評価できる。

よって、本論文は博士（工学）の授与に値するものと判定する。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印） ☒ 合 格 ・ ☐ 不 合 格

(2) 授与学位 博 士（工 学）

5. 学位論文及び参考論文に不適切な引用や剽窃が無いことの確認

確認済み（確認方法：「iThenticate」による検証と審査委員による確認）