

緩衝金具を配置した落石誘導ワイヤネットシステムの実規模実験について

Real scale experiment of a falling rock inducement wire-net system with buffer devices

澤田 直子*, 吉田 博**, 藤井 智弘**, 窪田 潤平***, 前川 幸次****

Naoko SAWADA, Hiroshi YOSHIDA, Tomohiro FUJII, Junpei KUBOTA, Koji MAEGAWA

* (株) エイ・シー・デイ (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸 3903)

**工博 (株) エイ・シー・デイ (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸 3903)

*** (株) シビル (〒950-0591 新潟県新潟市鳥屋野 3-14-13)

****工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

キーワード：落石, 実規模実験, 緩衝金具, ワイヤネット

(falling rock, real scale experiment, shock absorber, wire-net)

1. はじめに

日本の国土は、4分の3が山地で急峻な地形と脆弱な地質であるうえ、豪雨・豪雪の環境下であり、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。

今日、落石による災害を未然に防止するために、多種多様な落石対策工法が施されているが^{1) 2)}、大規模な岩塊に対しては、適切な対策工法が無いのが現状である。そこで、不安定岩塊が滑落またはトッピングする際には、新たに開発した落石誘導ワイヤネットシステム(以下、落石誘導工と呼ぶ。)で覆うことにより、岩塊に発生するエネルギーを吸収しつつ斜面下端へ誘導することが可能となり、大きな効果を発揮するものと期待される。

この落石誘導工の設置にあたっては、不安定岩塊の規模や現地状況に適した設計を行う必要がある。

そこで著者らは、実規模実験に先立ち緩衝具単体の実験を行い、その性能を確認した後³⁾ 実規模の落石誘導工をモデル化し、重錘を衝突させることによって誘導工全体の挙動を調べ、緩衝具の単体性能試験結果を用いて落石誘導工のエネルギー吸収機構および能力、落石の誘導性能などの検討を行った。本論文では、これらの実験結果について述べ、その考察を行う。

2. 落石誘導工の構造および機能

2.1 構造

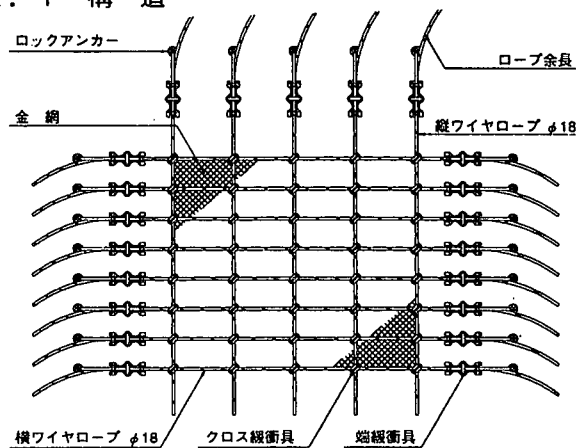


図-1 落石誘導工の構造概要

図-1に、落石誘導工の構造概要を示す。本落石誘導工は、斜面上の崩壊危険岩塊を水平方向および鉛直方向のワイヤロープで格子状に取り囲み、水平方向のワイヤロープ(以下、横ワイヤロープという。)の両端および鉛直方向のワイヤロープ(以下、縦ワイヤロープという。)の上端を緩衝金具(以後、端緩衝具という)を介してアンカーに固定し、また横および縦ワイヤロープ交差部にも緩衝金具(以後、クロス緩衝具という)を取り付ける工法である。

この工法は、落石誘導工の内側から落石の衝撃を受けたとき、端緩衝具およびクロス緩衝具内でワイヤロープが滑り、ワイヤロープの張力を制御して、

ワイヤロープの破断やアンカーの破損を防止するとともに、滑りに伴う摩擦力によって、落石の運動エネルギーを吸収し、岩塊が飛び出すことなく落石誘導工下端部へ誘導する機能を有している。以下に、各緩衝具について説明する。

(1) 端緩衝具

図-2(a)に、端緩衝具の構造を示す。端緩衝具は、横ワイヤロープの両端および縦ワイヤロープの上端に、ワイヤロープの余長を確保して取付け、これを岩盤に打ち込んだアンカー頭部に U ボルトを介して固定する。ワイヤロープに設定張力以上の張力が発生すると、ワイヤロープと端緩衝具の間で滑りが発生し、ワイヤロープが断線することなく、一定の張力を保ったまま金具内を滑ることにより、摩擦力によってエネルギーを吸収する機能を有している。

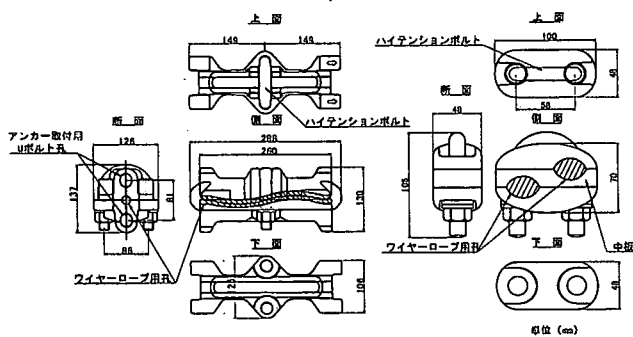
端緩衝具の単体での性能試験を行った結果、滑り中に発生したワイヤロープ張力は、平均で 56.78kN であった。これより端緩衝具の設計滑り張力は、50kN とする。

(2) クロス緩衝具

図-2(b)に、クロス緩衝具の構造を示す。クロス緩衝具は、交差するワイヤロープを相互に接触することのないように、中板を挟んで両側からボルトで締め付けて取り付けられる。

クロス緩衝具を取り付けることにより、作用力がある一定値に達するまでの間は、ワイヤロープの交差部は相互に移動しないが、一定値に達すると、作用力を保持したまま金具内を滑ることにより、エネルギーを吸収するとともに、ワイヤロープに加わる作用力を分散させることができる。

クロス緩衝具の単体での性能試験を行った結果、滑り中に発生したワイヤロープ張力は、平均で 16.40kN であった。これより端緩衝具の設計滑り張力は、15kN とする。



(a)端緩衝具

(b)クロス緩衝具

図-2 緩衝具

2. 2 機能

落石誘導工は、巨岩の移動の抑止に対し、次の2通りの挙動が期待されている。

(1) 巨岩のトップリング防止

ほぼ鉛直に近い斜面上で、周囲の基岩と独立している不安定な岩塊は、地震などの外的要因の影響を受けて、岩塊底面を中心として回転する、いわゆるトップリング的な挙動を示す可能性がある。この回転運動により発生する回転エネルギーを吸収し、巨岩の回転変位を抑止しつつ斜面下方へ誘導することができる。

(2) 不安定岩塊の落下・滑落の誘導

急斜面上にあるクラックにより独立した岩塊が、地震などの外的要因により落下または斜面上を滑落する場合がある。この際発生する、岩塊の落下または滑落による運動エネルギーを吸収し、岩塊が飛び出すことなくスムーズに落石誘導工下端部まで誘導することができる。

3. 実物実験の方法

3. 1 概要

落石誘導工は、ワイヤロープ、端緩衝具、クロス緩衝具、金網などからなっており、これらが有する機能が相互に作用しあって初めて期待される効果を発揮するものである。

そこで、実物の一部を取り出した落石誘導工に重錘を落下させ、その挙動を測定することにより、設計で要求される性能の確認を行う。

3. 2 実験装置および供試体

落石誘導工は、一般に鉛直または斜面に沿って設置され、落石は落石誘導工の内側からある角度で衝突するものと仮定して設計される。

実斜面上で実験することは困難であることから、実験は鋼製山留材によって斜面勾配 70° の載荷フレームを製作し、落石誘導工を取り付け、重錘を鉛直落下させることによって行った。

使用した主な材料を以下に示す。

ワイヤロープ：3×7 G/O φ18mm

Uボルト：SS400, φ18.3mm

金網：Z-GS3, 目合い50×50mm,
心線径4mm

端緩衝具, クロス緩衝具, 結合コイル
実験装置および供試体を図-3 に示す。

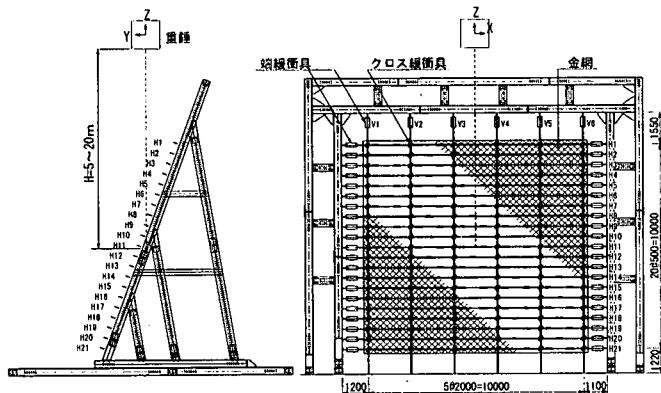


図-3 実験装置および供試体

3. 3 実験の種類

実験の種類は、表-1 に示す 7 種類とし、実験はそれぞれ 1 回づつ行われた。

表-1 実験種類

実験番号	クロス緩衝具配置	重錘衝突面	供試体衝突位置	落下高 (m)	重錘重量 (kN)
RCF005	全	面	H11,V3~V4	5.0	49.10
RCF075	全	面	H11,V3~V4	7.5	49.10
RCC075	全	角	H11,V4~V5	7.5	49.10
RCF010	全	面	H11,V3~V4	10.0	49.10
RCF015	全	面	H11,V4~V5	15.0	49.10
RCFC10	千鳥	面	H11,V3~V4	10.0	49.10
RCF020	全	面	H8,V3~V4	20.0	49.10

立方体の重錘の面を下にして落下させる方法（以後、面載荷という）と、角を下にして落下させる方法（以後、角載荷という）の 2 種類を行った。

クロス緩衝具をワイヤロープの交差部全てに配置した場合（クロス緩衝具—全）と千鳥に配置した場合（クロス緩衝具—千鳥）の比較も行った。

4. 実物実験結果

4. 1 重錘加速度

図-4 に、加速度計より 0.2msec 間隔でサンプリングした X,Y,Z 方向それぞれの加速度の絶対値を合計した合成加速度波形を示す。

図-4 より、重錘がワイヤネットに衝突したときの加速度のピーク値は、重錘エネルギーが最小のケース（RCF005）で 4g、重錘エネルギーが最大のケース（RCF020）において 7g 程度であった。ここに g は、重力の加速度である。

重錘エネルギーが 4 倍に達しているにもかかわらず、加速度のピーク値はあまり変化しておらず、重錘エネルギーに比例しない。これは落石誘導工のエネルギー吸収効果によるものと考えられる。

4. 2 ワイヤロープ張力

(1) 横ワイヤロープ

図-5 に、実物実験により得られたワイヤロープ張力の経時変化の 1 例（RCF010）を示す。

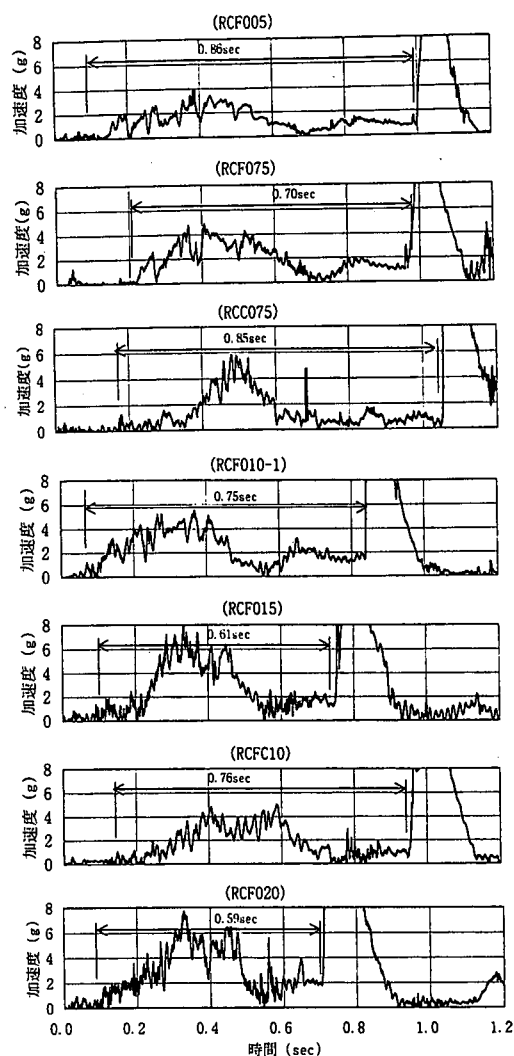


図-4 合成重錘加速度の経時変化

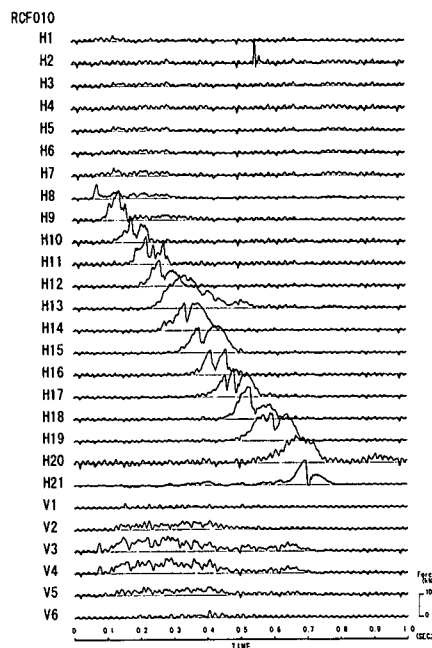


図-5 ワイヤロープ張力波形(RCF010)

重錘が衝突する横ワイヤロープの波形には、重錘の衝突時に張力が発生し、重錘が通過すると、張力

は消失する。張力のピークは、120kN 程度であり、緩衝具による張力の抑止効果が表れている。

(2) 縦ワイヤロープ

図-5 より、縦ワイヤロープは、重錘の落下方向に張設されているため、重錘接触から地面への落下に至るまで、継続的に張力が発生している。

重錘エネルギーの大小にかかわらず、縦ワイヤロープに発生する最大張力は 0~50kN 程度で増減を繰り返す、端緩衝具が滑りを開始する張力には至っていない。

4. 3 ワイヤロープの滑り長

(1) 端緩衝具の滑り長

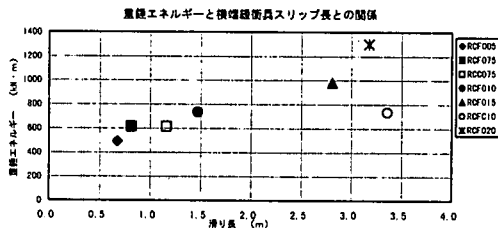


図-6 重錘エネルギーと端緩衝具内滑り長との関係

図-6 に、最下段の横ワイヤロープ H21 の位置での重錘エネルギーと横方向端緩衝具内でのワイヤロープの滑り長との関係を示す。図に見られる分布より、重錘エネルギーと横緩衝具内の滑り量の関係は、クロス緩衝具を千鳥配置としたケース (RCFC10) を除いて、重錘エネルギーの大きさにはほぼ比例していることがわかる。千鳥配置のケースは、クロス緩衝具が少ない分を端緩衝具で補い、エネルギーを吸収したと思われる。

一方、いずれの実験ケースにおいても縦ワイヤロープは、その上端に設置した端緩衝具内で滑ることはなかった。

(2) クロス緩衝具の滑り長

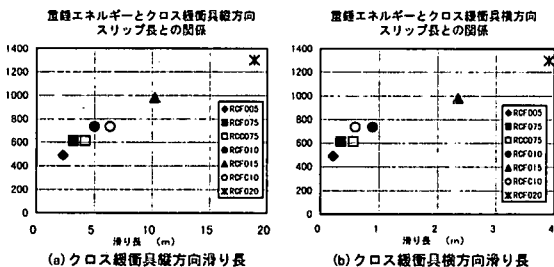


図-7 重錘エネルギーとクロス緩衝具内滑り長との関係

図-7(a)および(b)に、最下段の横ワイヤロープ H21 の位置での重錘エネルギーとクロス緩衝具内でのワイヤロープの滑り長との関係を示す。

縦横ワイヤロープのクロス緩衝具内での滑り量は、縦方向に大きく滑りが発生した。また、重錘落下地

点に近いクロス緩衝具は大きく滑った。図-7(a)および(b)より、重錘エネルギーと滑り量には、ほぼ比例している。

4. 4 重錘の軌跡

図-8(a)および(b)は、高速ビデオカメラから読みとった実験ケース RCF010 と RCF020 の重錘の軌跡を、0.1sec 間隔で示している。

軌跡図の上に示す数値は、鉛直方向(V)、水平方向(H)それぞれについての、重錘がネットに衝突してから変形が最大となるまでの時間(T)と最小変位を示す。

重錘はネットに衝突してから鉛直方向に沈み込み、鉛直方向の変形が最大になったところから回転運動に移行している。ネット面からの最大鉛直変位は RCF010 の場合 0.7m, RCF020 の場合 1.0m であり、ネットに衝突してから回転に移行する以前に最大を示す。また、ネット面からの最大水平変位は RCF010 および RCF020 の場合とも 0.8m であり、鉛直方向と同じくネットに衝突してから回転に移行する以前に最大を示す。

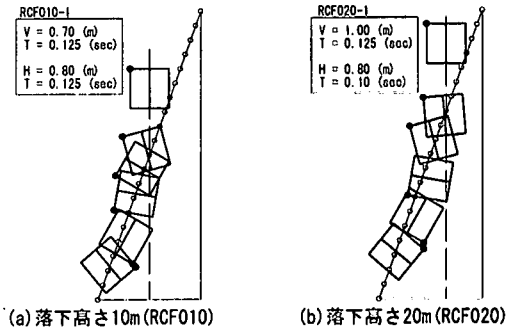


図-8 重錘の落下軌跡

4. 5 エネルギー収支

(1) 緩衝具とワイヤロープとの摩擦による吸収エネルギー

表-2 に、重錘エネルギーと、緩衝具の単体試験結果の平均値を用いて算出された緩衝具による吸収エネルギーの一覧を示す。

表-2 実物実験結果 (吸収エネルギー)

実験番号	配置	重錘衝突面形状	重錘重量 (kN)	落下高 (m)	重錘エネルギー (kJ)	端緩衝具長 (m)	縦クロス (m)	横クロス (m)	吸収エネルギー (kJ)	比率 (%)
RCF005	全	面	49.0	5.0	490.0	0.675	2.305	0.218	71.61	14.6
RCF075	全	面	49.0	7.5	612.5	0.812	3.180	0.352	93.58	15.3
RCC075	全	角	49.0	7.5	612.5	1.160	4.198	0.562	129.40	21.1
RCF010	全	面	49.0	10.0	735.0	1.470	5.018	0.894	162.18	22.1
RCF015	全	面	49.0	15.0	980.0	2.807	10.212	2.347	328.74	33.5
RCFC10	千鳥	面	49.0	10.0	735.0	3.359	6.346	0.597	272.10	37.0
RCF020	全	面	49.0	20.0	1298.5	3.175	18.892	3.909	500.77	38.6

この表における重錘エネルギーは、最下段の横ワイヤロープ H21 の位置での値である。

同じ重錘エネルギーの状態では、面載荷より角載荷の方が吸収エネルギー量が大きい (面載荷

RCF075 : 93.58kN・m, 角載荷 RCC075 : 129.40kN・m). これより, 角の多い岩石は, ワイヤネットによく食い込んで, エネルギーをよく吸収できるが, 球に近い形状で, 表面がなめらかな岩塊に対しては, エネルギーの吸収は少ないものと推察される.

また, 同じ重錘エネルギーの状態では, クロス緩衝具を全配置したものにくらべ, 千鳥配置の方が横方向の端緩衝具のスリップ量が大きかったため, 吸収エネルギーが大きい (全配置 RCF010 : 162.18kN・m, 千鳥配置 RCFC10 : 272.10kN・m). これは, 千鳥配置の方が, ワイヤロープの変形に対する制約が少ないため, 端緩衝具がよく滑って吸収エネルギーが大きくなったのではないかと考えられる.

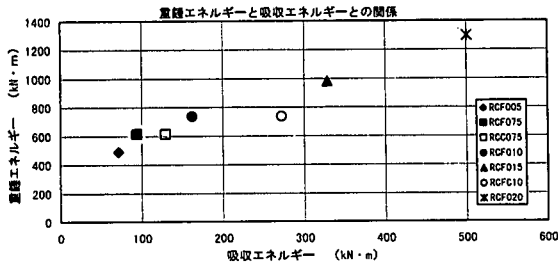


図-9 重錘エネルギーと緩衝具による吸収エネルギーの関係

図-9 に, 重錘エネルギーと, 設計張力により算出された吸収エネルギーの関係を示す.

図-9に見られる分布より, クロス緩衝具全配置・重錘面載荷のケースにおいては, 緩衝金具の吸収エネルギーは, 重錘エネルギーにほぼ比例して大きくなるのがわかる.

(2) 重錘の回転エネルギー

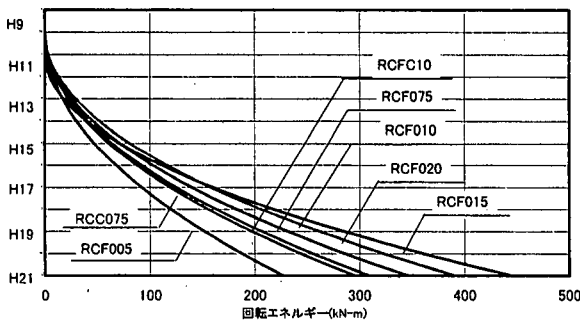


図-10 角速度より算出した回転エネルギー

高速ビデオカメラ映像より測定した重錘の平均角速度は, 10.5~12.6rad/sec であり, 落下高さに関係なくほぼ一定の値を示す. また, 角速度と時間の関係には線形関係が認められる. 重錘が最大に沈み込んだ時点から回転を開始し, 最終横ワイヤロープ (H21) の位置で 20.9~25.1rad/sec となる. 算出された角速度から求められる重錘図心軸回りの回転エネルギーは, 図-10 より 227.1~446.2kN・m となる.

(3) 重錘と落石誘導工との摩擦による吸収エネルギー

図-11 は, 重錘の運動エネルギーと重錘位置関係の一例 (RCF010) を示したものである.

図中, 太線で示す重錘の線運動エネルギーは, 合成加速度を時間で積分した速度から求めたものである. 一方, 細線は重錘を自由落下させた場合の重錘の運動エネルギーである. また, 縦軸の重錘位置は, 得られた重錘速度を時間で積分することにより算出した重錘変位を用いた. ここで両方のエネルギー差が, 重錘の回転エネルギーと落石誘導工で吸収された緩衝具による吸収エネルギー, およびワイヤネットと重錘の摩擦による吸収エネルギーと考えられる. この図において, 縦ハッチング部分が端緩衝具およびクロス緩衝具が吸収したエネルギーであり, 斜線部分が重錘の回転エネルギー, 横ハッチング部分が落石誘導工と重錘の摩擦による吸収エネルギーである. この落石誘導工と重錘の摩擦による吸収エネルギーから, 落石誘導工と重錘の摩擦係数の算出を試みる.

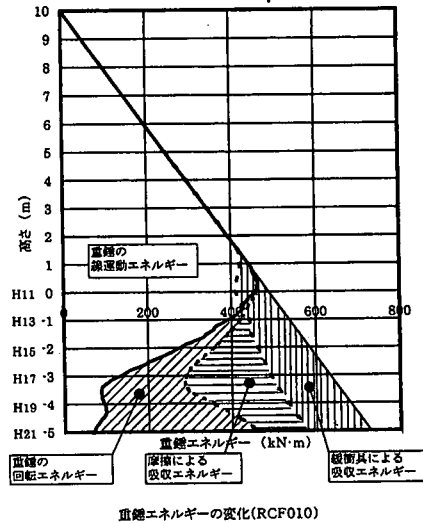


図-11 重錘の運動エネルギーと重錘位置関係(RCF010)

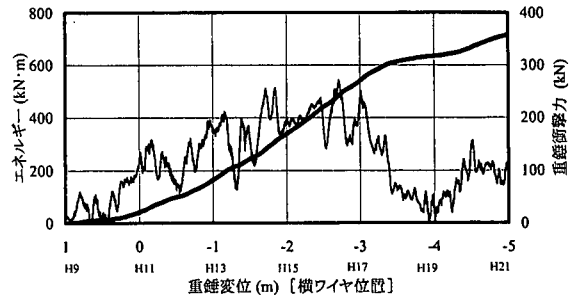


図-12 重錘衝撃力と重錘変位の関係および重錘変位とエネルギーの関係(RCF010)

図-12 は, 重錘衝撃力と重錘変位, および重錘エネルギーと重錘変位の関係を示したものである. 図中, 細線は重錘が落石誘導工に衝突し離脱するまで

の3方向の合成加速度に重錘質量を乗じた重錘衝撃力である。また、太線は重錘衝撃力を重錘の変位で積分した重錘エネルギーを示している。横軸の重錘変位は、図-11で使用した縦軸の重錘位置と一致している。

重錘と落石誘導工間の摩擦は、重錘衝撃力に比例するものと仮定する。図-11に示される各高さでの摩擦によるエネルギーに等しくなるように、重錘衝突位置からの各変位での重錘衝撃力を用いて摩擦係数を計算しプロットしたものが図-13である。図中、●および▲印は、それぞれ、実験ケース RCF010 および RCF020 を示している。縦軸は横ワイヤロープ H11 の地点を 0m とし、摩擦が生じた時点からプロットを開始した。この図から、摩擦係数は、増加区間、一定区間および減少区間に分類できる。増加区間は落下高さに関係なく一定勾配で増加している。また、一定区間は落下高さが高いほど長く、3.5m の位置までほぼ一定値を保っている。このときの摩擦係数はどちらも 0.35 程度である。減少区間は、両ケースとも 3.5m の位置から一定勾配で減少していることがわかる。このことから、落石誘導工と重錘の摩擦係数は、重錘の落下高さに関係なく、最大 0.35 程度と考えてよい。

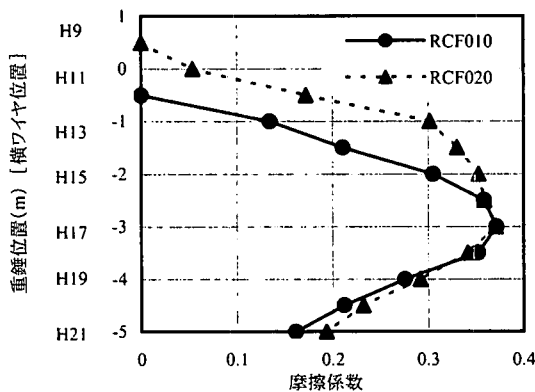


図-13 摩擦係数(RCF010,RCF020)

4. 6 結論

実物実験結果から以下の結論を得た。

(1) 横ワイヤロープにはいずれの実験ケースにおいて最大で約 120kN の張力が発生し、端緩衝金具内でスリップした。これより、緩衝金具は衝撃力の大小にかかわらず安定したスリップ張力を持っていると判断できる。一方、縦ワイヤロープの張力は最大で約 50kN であり、端緩衝具がスリップするには

至らなかった。

(2) 重錘の落下軌跡は、重錘落下高さに関わらず、鉛直方向の変形が最大になった点から回転運動に移行する傾向にある。

(3) 緩衝金具による吸収エネルギーは、重錘エネルギーの大きさにほぼ比例し、割合は、落下高さ 5m のケースでは 14.6%、落下高さ 20m のケースでは 38.6% を占める。

(4) 重錘と落石誘導工との摩擦による吸収エネルギーより算出した摩擦係数は、増加区間、一定区間、減少区間に分けられる。重錘の落下高さにかかわらず、一定区間の摩擦係数は最大 0.35 程度である。

5. まとめ

本論文では、斜面上の不安定岩塊が飛び出すことなく、斜面とネットの間を落下させることにより、岩塊に大きいエネルギーを発生させることなく誘導が可能な落石誘導工を開発し、その挙動の解明に必要な基礎的な実験方法および結果について述べた。

これらの結果より、エネルギー吸収メカニズムが明らかになり、また、ワイヤロープに大きい張力を発生させることなく、落石を斜面下方に誘導可能であることが明らかになった。また、緩衝具単体衝撃試験からはスリップ張力、実物実験からは落石誘導工と重錘との摩擦係数等の、設計方法を確立する上での必要なデータが得られた。今後、これらのデータを用い、落石が斜面と落石誘導工の間を滑落する場合の落石誘導工の設計手法について検討していく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会, 落石対策便覧, 日本道路協会, 1983年7月。
- 2) 土木学会衝撃問題研究小委員会: ロックシェットの耐衝撃設計, 土木学会, 構造工学シリーズ8, 1998年10月。
- 3) 澤田直子, 吉田博, 藤井智弘, 窪田潤平, 前川幸次: 緩衝具を配置したワイヤネットシステムの実規模実験について, 構造工学論文集Ⅲ, Vol.46A, pp.1853-1864, 2000年3月