

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 金沢市小立野 2-40-20)

There is a limit in the rockfall energy, which can be absorbed by the rockfall protection works to stop the falling rock mass. Also a large amount of construction cost is needed for the protection works installation.

On the other hand, there is a limit concerning the geographical features in the construction of the rockfall prevention works that makes the rockfall fixed on a slope. Therefore, there are no appropriate measures (protection works) against a large unstable rock mass on a steep slope.

In view of the current state described above, a new falling rock inducement wire-net system with a high energy absorption capacity has been developed. When there are unstable rock masses on the slope, the wire-net covers the slope and induces them downward between the wire-net and the surface of the slope.

This paper is concerned with a series of tests, which were carried out to investigate the behavior of the wire-net when a rock mass hits to the wire-net.

Key words : 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。

最近では平成8年2月の豊浜トンネルや、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10年8月末の豪雨による落石災害が起きている。このような落石による災害を未然に防止するための、多種多様な落石対策工法が施されている。

落石対策工法は、落石予防工と落石防護工に大別される^{1), 2)}。落石予防工は、斜面上の落石予備物質が落下しないように、斜面上で固定する工法であり、落石防護工は、落下してくる岩塊を斜面の途中または斜面下端で停止させる工法である。落石防護工においては、停止させることができる落石エネルギーに限界があり、また、防護工設置には一般に多額の工費を必要とする。一方、斜面上で落石を固定させる落石予防工の施工または架設には地形上限界があり、急峻な斜面上の大きい不安定岩塊に対する適切な対策工法がなかった。

このような現状に鑑み、図-1に示すような不安定岩塊

を有する斜面を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、岩塊が飛び出すことなく地山とこの落石誘導工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下方に誘導することが可能である。また、亀裂が入った岩塊のトップリングにも、大きい効果を発揮するものと期待される。

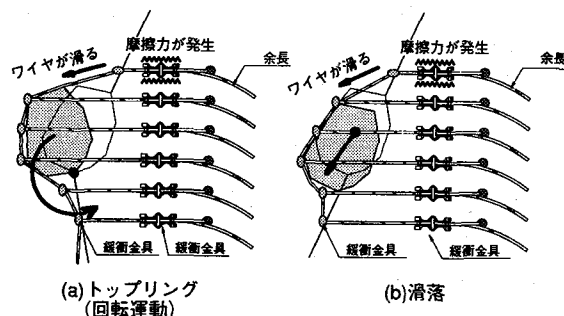


図-1 岩塊の落下メカニズム

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。そのためには、まず個々の緩衝金具の単体としての性能を評価し、それに基づいた落石誘導工全体の挙動を推定する必要がある。そこでまず、落石誘導工に使用する緩衝金具の単

体での性能試験を行った。

さらに、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

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することを特徴としている。

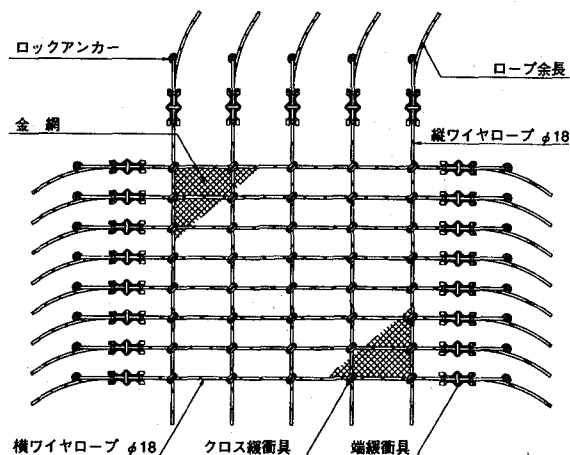


図-2 落石誘導工の構造概要

このように、落石誘導工は、巨岩の落下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落石誘導工下端部へ誘導する機能を有している。図-2に、落石誘導工の構造概要を示す。以下に、各緩衝具について説明する。

(1) 端緩衝具

図-3(a)に、端緩衝具の構造を示す。端緩衝具は、所定の間隔で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

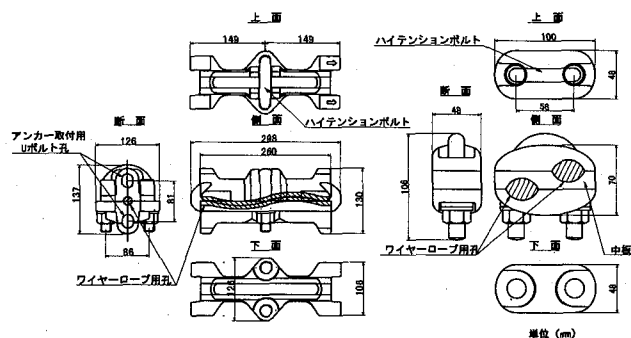
する。ワイヤロープを金具を介してハイテンションボルトで完全に締め付けることにより、滑り出す張力を一定に保持できるようになっている。

巨岩のトップリング、または岩塊の滑落により、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する。そのとき、端緩衝具は、ワイヤロープが一定の張力を保ったまま金具内を滑ることにより、発生する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。また、特定のワイヤロープのみに張力が集中することなく、隣接のワイヤロープに張力を分散させる効果も有している。

(2) クロス緩衝具

図-3(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。

格子状に張られたワイヤロープは、巨岩の衝突により、交差部が当初の位置から相互に移動しようとする。このときワイヤロープの交差部が固定されていれば、交差部には大きい力が発生する。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。



(a) 端緩衝具

(b) クロス緩衝具

図-3 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、節理などにより周囲の基岩と独立している不安定な岩塊は、風や地震などの外的要因の影響を受けて、岩塊の底面を回転の中心として傾き、トップリング的な挙動を示す可能性がある。すなわち、外的要因により巨岩に水平慣性力が作用すると、巨岩の底面を中心とする回転運動を開始する。この回転運動に

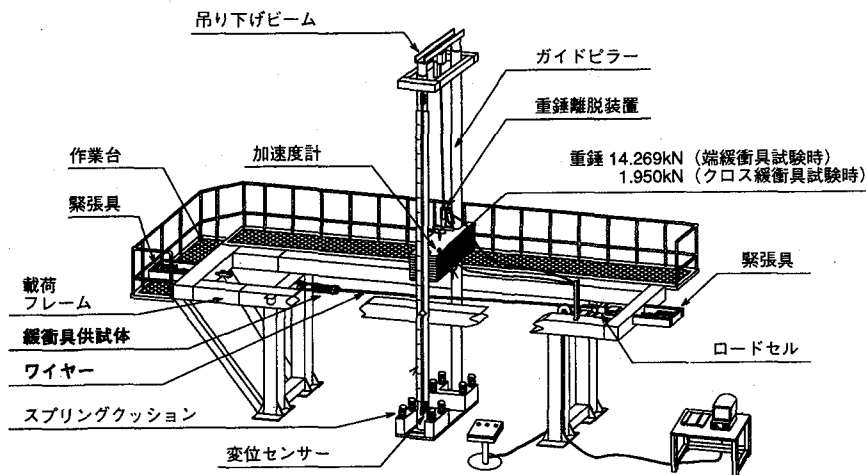


図-4 緩衝性能試験装置

より落石誘導工のワイヤロープに張力が発生し、張力がある一定以上に達すると端緩衝具内でワイヤロープが滑り、また、クロス緩衝具内でもワイヤロープが滑る。これらのワイヤロープの滑りに伴う摩擦により、巨岩の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

オーバーハング部でクラックの入った岩塊や、急斜面上にあるクラックにより独立した岩塊が、風や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。

巨岩が落下または滑落を開始すると、最初は縦ワイヤロープの張力が急速に増大し、張力がある一定値を超えると縦ワイヤロープ上端の端緩衝具で滑りが発生するが、横ワイヤロープの変形も次第に大きくなり、張力が増大して横ワイヤロープの両端の端緩衝具でも滑りが発生する。これらのワイヤロープの滑りによる摩擦力によって、岩塊の落下または滑落の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. 端緩衝具およびクロス緩衝具単体の性能試験

3.1 概要

落石誘導工は、落石の衝撃を受け、ワイヤロープに一定以上の張力が発生すると、一定の張力を保持したまま端緩衝具内でワイヤロープが滑り、また交差するワイヤロープ間に一定以上の張力差が発生すると、一定の張力差を保持したままクロス緩衝具内でワイヤロープが滑り、衝撃力を他のワイヤロープに分散させると同時にエネルギーを吸収する機構を有している。

落石誘導工全体の挙動を評価するためには、これらの緩衝具の単体としての性能を試験により求めておくことが必要である。このため、端緩衝具およびクロス緩衝具

単体としての緩衝性能試験を行った。

3.2 緩衝具の性能試験方法

(1) 試験装置

図-4 は、本試験に使用した落錘式衝撃性能試験装置である。供試体を載荷フレームの一端に固定し、他端はロードセルを介してスパン 5m で水平に固定する。前述のように、ワイヤロープが一定以上の張力または張力差に達すると、ワイヤロープはそれらの張力または張力差を保持したまま緩衝具内で滑るように設計・製作されている。したがって、重錘重量がある一定値以上であれば、ワイヤロープは緩衝具内で滑りが確認でき、それ以上の重錘重量に対しては、同一のワイヤ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⁾。したがって、端緩衝具およびクロス緩衝具の性能試験においては、十分な滑り長が確認できる重錘重量を用いることにする。初期張力は、初期たわみを少なくするために、一端の定着具の緊張ネジで約 1.96kN (0.2tf) を与える。端緩衝具に対する衝撃荷重は、重量 14.269kN の重錘をワイヤロープ上 1.0m の高さから鉛直落下させることにより作用させる。一方、クロス緩衝具に対しては、重量 1.950kN の重錘をワイヤロープ上 1.0m の高さから鉛直落下させることにより衝撃荷重を作用させる。

(2) 測定方法

緩衝具の緩衝性能試験は、以下のように行った。重錘がワイヤロープに衝突し、ワイヤロープの変形とともに落下し、停止するまでの重錘加速度の時間的変化を、重錘に取り付けた加速度計（東京測器研究所製：AR-50F、容量 50g、ひずみゲージ式）により測定する。同時に、ロードセル（東京測器研究所製：TRP-20B、容量 196kN、ひずみゲージ式）によりワイヤロープの張力、および変位計により重錘の移動量の時間的変化を測定する。これらのセンサーの出力を、0.25msec 間隔でサンプリングした。

3. 3 単体試験結果

端緩衝具およびクロス緩衝具に対する落錘式衝撃試験結果を表-1および表-2に示す。

表中、落下高さは重錘の落下開始前のワイヤロープからの高さであり、重錘変位は、重錘が落下して停止した時の重錘の移動量である。スリップ長は、緩衝具内で滑ったワイヤロープの長さである。

このとき、重錘のエネルギー(kN・m)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、緩衝具内で滑っているときのワイヤロープの平均張力が得られる。この平均張力は、落石誘導工のエネルギー吸収性能評価に用いられるものである。ワイヤロープの最大張力は、瞬間的に平均張力の約2倍になっているが、ワイヤロープの降伏強度に対しては十分な安全率を確保している。表中の平均張力はこのようにして得たものである。

表-1 端緩衝具落錘式衝撃試験結果

回数	トルク値 (N・m)	重錘重量 (kN)	落下高さ ※1 (m)	ワイヤロープ変位 ※2 (m)	重錘変位 ※3 (m)	重錘エネルギー (kN・m)	滑り量 (m)	平均張力 (kN)
1	588	14.269	1.000	1.110	2.110	30.108	0.503	59.86
2	588	14.269	1.000	1.210	2.210	31.534	0.592	53.27
3	588	14.269	1.000	1.130	2.130	30.393	0.502	60.54
4	588	14.269	1.000	1.250	2.250	32.105	0.625	51.37
5	588	14.269	1.000	1.230	2.230	31.820	0.612	51.99
6	588	14.269	1.000	1.140	2.140	30.536	0.525	58.16
7	588	14.269	1.000	1.180	2.180	31.106	0.564	55.15
8	588	14.269	1.000	1.120	2.120	30.250	0.498	60.74
9	588	14.269	1.000	1.210	2.210	31.534	0.591	53.36
10	588	14.269	1.000	1.120	2.120	30.250	0.505	59.90
11	588	14.269	1.000	1.130	2.130	30.393	0.505	60.18
12	588	14.269	1.000	1.140	2.140	30.536	0.512	59.64
13	588	14.269	1.000	1.170	2.170	30.964	0.551	56.20
14	588	14.269	1.000	1.170	2.170	30.964	0.552	56.09
15	588	14.269	1.000	1.130	2.130	30.393	0.550	55.26
平均								56.78
標準偏差								3.303

※1 落下開始位置～ワイヤロープ接触点の距離
※2 ワイヤロープ接触点～重錘停止位置の距離
※3 落下開始位置～重錘停止位置の距離

表-2 クロス緩衝具落錘式衝撃試験結果

回数	トルク値 (N・m)	重錘重量 (kN)	落下高さ ※1 (m)	ワイヤロープ変位 ※2 (m)	重錘変位 ※3 (m)	重錘エネルギー (kN・m)	滑り量 (m)	平均張力 (kN)
1	107.8	1.950	1.000	0.670	1.670	3.257	0.192	16.96
2	107.8	1.950	1.000	0.630	1.630	3.179	0.183	17.37
3	107.8	1.950	1.000	0.660	1.660	3.237	0.197	16.43
4	107.8	1.950	1.000	0.620	1.620	3.159	0.175	18.05
5	107.8	1.950	1.000	0.720	1.720	3.354	0.220	15.25
6	107.8	1.950	1.000	0.650	1.650	3.218	0.186	17.30
7	107.8	1.950	1.000	0.690	1.690	3.296	0.217	15.19
8	107.8	1.950	1.000	0.600	1.600	3.120	0.167	18.68
9	107.8	1.950	1.000	0.670	1.670	3.257	0.202	16.12
10	107.8	1.950	1.000	0.670	1.670	3.257	0.206	15.81
11	107.8	1.950	1.000	0.620	1.620	3.159	0.179	17.65
12	107.8	1.950	1.000	0.700	1.700	3.315	0.223	14.87
13	107.8	1.950	1.000	0.700	1.700	3.315	0.218	15.21
14	107.8	1.950	1.000	0.730	1.730	3.374	0.230	14.67
15	107.8	1.950	1.000	0.660	1.660	3.237	0.197	16.43
平均								16.40
標準偏差								1.240

※1 落下開始位置～ワイヤロープ接触点の距離
※2 ワイヤロープ接触点～重錘停止位置の距離
※3 落下開始位置～重錘停止位置の距離

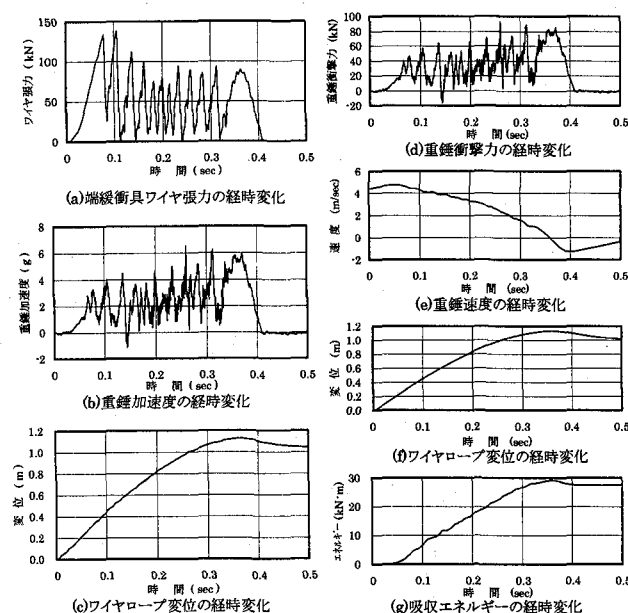


図-5 単体試験測定結果（端緩衝具）

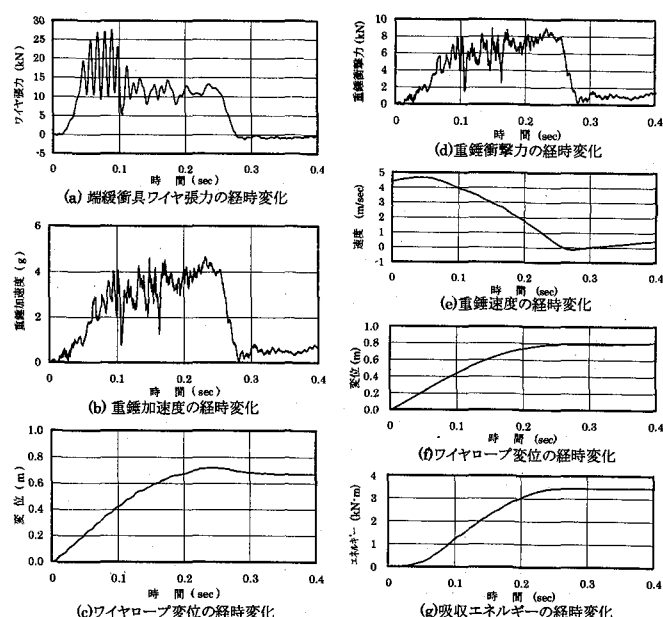


図-6 単体試験測定結果（クロス緩衝具）

トしたものの1例である。

これらの表および図より次の事項が考察される。

(1) 計測値

(a) 表-1 および表-2 より、ワイヤロープに作用する平均張力は、端緩衝具試験においては、51.37～60.74kN の範囲にあり、15 データの平均値は 56.78kN であり、標準偏差は 3.303 である。また、クロス緩衝具試験においては、14.67～18.68kN の範囲にあり、15 データの平均値は 16.40kN であり、標準偏差は 1.240 である。いずれもばらつきは比較的小さい。これらの平均張力は滑り開始時および停止時付近の比較的大きい張力が含まれている。

(b) 図-5(a)および図-6(a)の図に見られるように、ワイヤロープの張力は、端緩衝具試験およびクロス緩衝具試験のいずれにおいても、重錘の衝突後しばらくして急速に立ち上り、変動しながら最大値を示した後に少し減少し、ほぼ一定の振幅で変動し、エネルギーが吸収し終わると張力は消失する傾向を示す。このとき、緩衝具内で滑るワイヤロープの素線の凹凸により、張力に変動が生じている。立ち上がり時の張力が大きいのは、スリップを開始するとき大きい張力を必要とすることを意味している。また、重錘がワイヤロープに到達してもワイヤロープは水平に張設されているため、すぐには張力は発生せず、重錘の加速度も急に大きくはならない。

(c) 図-5(b)および図-6(b)の図に見られるように、重錘加速度(重錘衝撃力)は、端緩衝具試験およびクロス緩衝具試験のいずれにおいても、ワイヤロープに衝突後、ゆっくりと増加し、ワイヤロープに張力が発生すると値が変動しながら一定の割合で徐々に増加する傾向を示す。ワイヤロープの滑りが停止すると、加速度が上昇し、これに伴い、ワイヤロープの張力も増大するが、もはや緩衝具内で滑ることはない。エネルギーが吸収し終わると加速度は急速に減少する。

(d) 図-5(c)および図-6(c)の図に見られるように、変位計より測定されたワイヤロープ変位の経時変化は、時間とともに直線的に増加し、その後一定値に収束している。

(2) 重錘加速度からの計算値

(a) 図-5(e)および図-6(e)の重錘速度の経時変化に見られるように、重錘の速度は、自由落下速度で重錘がワイヤロープに衝突し、さらに速度が増加するが、その後は減少し続け、一旦零になった後にリバウンドする。

(b) 図-5(f)および図-6(f)のワイヤロープ変位の経時変化に見られるように、ワイヤロープの変位は、時間とともにほぼ直線的に増加し、その後一定値に収束する。

(c) 図-5(g)および図-6(g)の吸収エネルギーの経時変化に見られるように、時間的变化は、最初エネルギー吸収はわずかであるが、その後直線的に増加し、全エネルギーを吸収して一定値に収束する。

(d) ワイヤロープ変位および吸収エネルギーの測定値と計算値を比較すると、どの実験結果においてもよく一致

している。

(3) 結 論

以上の実験結果より、以下の結論を得た。

(a) 端緩衝具金具およびクロス緩衝具とも、実験結果はばらつきが小さく、安定したスリップ張力が得られた。これらの緩衝具の信頼性は高く、安定したエネルギー吸収能力を有する落石誘導工の設計が可能である。

(b) 端緩衝具およびクロス緩衝具内のワイヤロープの平均滑り張力は 56.78kN および 16.40kN であり、標準偏差は 3.303 および 1.240 である。

(c) 平均張力は、滑り開始時および停止時付近の比較的大きい張力も含まれるため、大きめの値を示す。これに対し、滑り開始時および停止時付近の比較的大きい張力を除いたワイヤロープが滑りつつある区間の平均滑り張力は、平均張力に比較して小さめの値を示す。これより、端緩衝具およびクロス緩衝具の設計滑り張力として、それぞれ、50 kN および 15kN を用いるものとする。

4. 実物実験の方法

4. 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。

4. 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。

本実験は、斜面の表面と落石誘導工の間を岩塊が衝突しながら斜面下端に誘導されるとき挙動を明確にするために行った。

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

縦ワイヤロープは、2m 間隔で 6 本配置し、その上端にのみ端緩衝具を取り付け、端緩衝具は U ボルトを介して架台に固定した。また、横ワイヤロープは、0.5m 間隔

で 21 本配置し、その両端に端緩衝具を取り付け、端緩衝具は U ボルトを介して架台に固定した。

また金網は、幅 2.3m×長さ 10.5m のものを縦ワイヤロープ間隔ごとに 30cm 分重ね合わせ、縦横とも 1m 間隔に結合コイルを用いてワイヤロープに取り付けた。

実験装置および供試体を図-7 に示す。

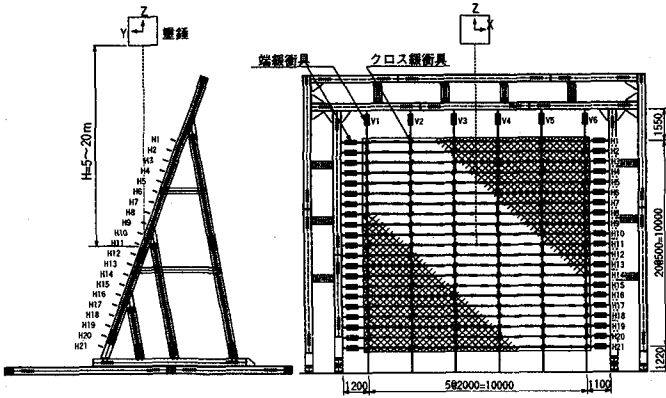


図-7 実験装置および供試体

4. 3 実験の種類

実験の種類は、表-3 に示す 7 種類とし、実験はそれぞれ 1 回づつ行われた。

表-3 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

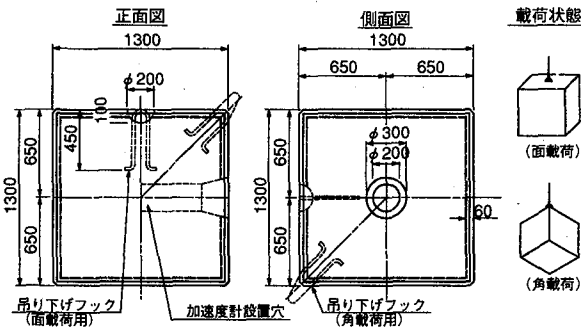


図-8 重錘形状

実験に用いた重錘の形状を図-8 に示す。

重錘は、一辺が 1.3m の立方体で、設計基準強度 $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ のコンクリートで製作した。また、重錘落下に対する欠け防止として、メッシュ筋を周囲に配置してある。重錘重量は、計測した結果、49.1kN であった。

立方体の重錘の 1 つの面が水平面に一致し、1 つの辺が横ワイヤロープと平行になるような落下方法（以後、面載荷という。）と、立方体の 1 つの角を吊下げ、水平を

成す 1 つの対角線が横ワイヤロープと平行になるような落下方法（以後、角載荷という。）の 2 種類とした。

クロス緩衝具を全ての縦および横のワイヤロープの交差部に配置した場合（クロス緩衝具一全）と千鳥に配置した場合（クロス緩衝具一千鳥）の 2 種類の比較も行った。

4. 4 測定項目および方法

(1) 測定項目および方法

重錘の衝撃加速度について、重錘の重心位置に取り付けた 3 方向加速度計（東京測器研究所製：ARS-50TB、容量 50g、ひずみゲージ式）を用いて測定した。なお、加速度計のリード線は重錘の回転軸方向から取り出すことにより、断線することなくリード線がねじれるのみで計測が可能であった。

縦ワイヤロープ 6 本の上端、および横ワイヤロープ 21 本の一端的 U ボルトにワイヤストレインゲージを貼り付けてワイヤロープの張力を測定した。

重錘の落下による変形状態および重錘の落下軌跡を確認するため、高速度ビデオカメラを用いて衝突状態の撮影を行った。

ワイヤロープの交差部に取り付けたクロス緩衝具の移動量を光学的方法で 3 次元的に測定し、ワイヤロープの変形状態を記録した。

各端緩衝具およびクロス緩衝具でのワイヤロープの滑り量を物差しで測定した。

(2) 実験方法

重錘をクレーン車にて所定の高さまで吊り上げ、離脱装置を用いて自由落下させた。重錘の供試体との衝突位置は、重錘の中心が表-3 に示す衝突位置に一致するようにした。

5. 実物実験結果

5. 1 重錘加速度

図-9 に、0.2msec 間隔でサンプリングした重錘加速度の経時変化の 1 例 (RCF010) を示す（実験番号は表-4 参照）。

(1) 加速度波形

面載荷では、重錘を吊り上げた状態での加速度計の方向は、鉛直方向を Z 軸、ワイヤネット正面方向に Y 軸、ワイヤネット面に向かって左方に X 軸とした（図-7 参照）。

面載荷の実験においては、重錘がワイヤネットに衝突すると、最初に、落下方向の Z 軸加速度が増加する。次に重錘は回転を開始し、進行方向が Y 軸方向へと変化するため、Y 軸加速度が増加する。さらに回転により、合成加速度のベクトルの方向は刻々と変化する。重錘が落石誘導工に衝突しても急激に大きい加速度が発生するこ

となく、徐々に加速度が増加し、次第に減少することがわかる。重錘が落石誘導工上を転がり落ちるとき、X軸は重錘の回転軸方向であるため、加速度はほとんど発生しない。

0.8秒近くの大きい波形は、重錘が地面に衝突したときに発生した加速度である。

一方、角載荷の実験においては、加速度計の軸線が傾いているため、X軸、Y軸およびZ軸ともに加速度は時間的に変化する。

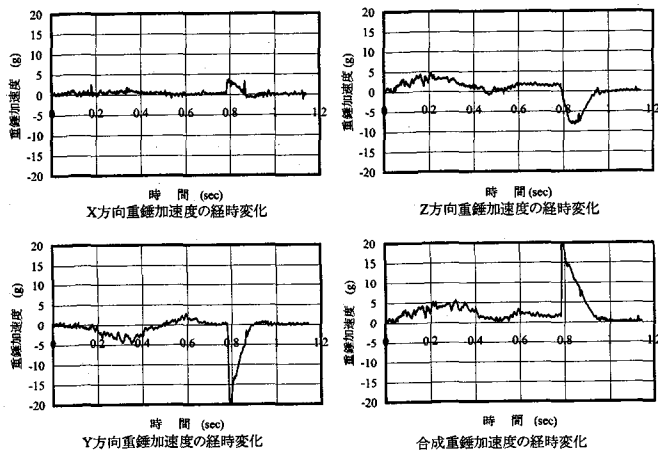


図-9 重錘加速度の経時変化(RCF010)

(2) 合成加速度波形

図-9より、合成加速度波形は、Y軸およびZ軸方向の加速度波形を反映した波形となっており、2つのピークを有している。重錘が落石誘導工に衝突すると、合成加速度は小さな増減を繰り返しながら全体としてなだらかに増加する。重錘が回転運動を始めると加速度波形はなだらかに減少し、零に近い状態となる。これは重錘が落石誘導工によって跳ね返され、瞬間的に自由落下に近い状態となるため、また、鉛直方向であった重錘の進行方向が、ワイヤネットに導かれて、ネットと平行に近づくためと考えられる。

(3) 加速度のピーク

図-10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。これは落石誘導工によって、重錘エネルギーがゆっくりと吸収されているためと考えられる。

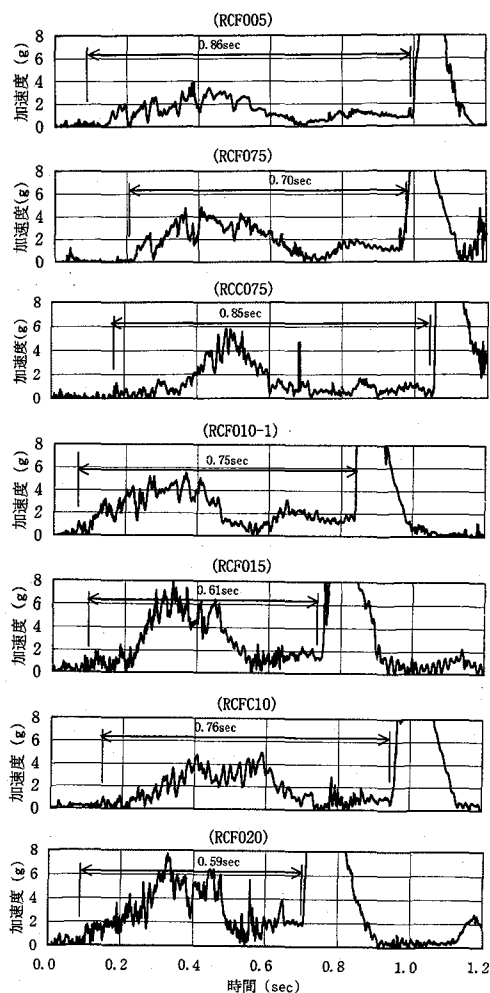


図-10 合成重錘加速度の経時変化

(4) 継続時間

重錘がワイヤネットに衝突してから地上へ到達するまでの時間(継続時間)は、最も重錘エネルギーの小さいケース(RCF005)で0.86sec、重錘エネルギーが最大のケース(RCF020)で0.59secであり、落下高さが大きいケースほど短い。ちなみに、同じ高さから重錘が自由落下したと仮定すると、所要時間は、上記各ケースにおいて0.48secおよび0.34secである。

角載荷のケース(RCC075)は0.85sec、同じ重錘エネルギーの面載荷のケース(RCF075)は0.70secであり、角載荷は面載荷に比べて継続時間が長い。

また、千鳥配置のケース(RCFC10)は0.76sec、同じ重錘エネルギーの全配置のケースは0.75secであり、千鳥配置のケースと全配置のケースでは継続時間に大きな差は見られない。

5. 2 ワイヤロープ張力

(1) 横ワイヤロープ

図-11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。

重錘が衝突しない横ワイヤロープには、張力は発生し

ない。重錘が衝突する横ワイヤロープの波形には、重錘の衝突時に大きい張力が発生し、端緩衝具内でワイヤロープがスリップする際に発生すると思われる櫛形の波形がみられる。重錘が通過すると、張力は消失する。

重錘の落下とともに、順次下段の横ワイヤロープに張力が発生する。

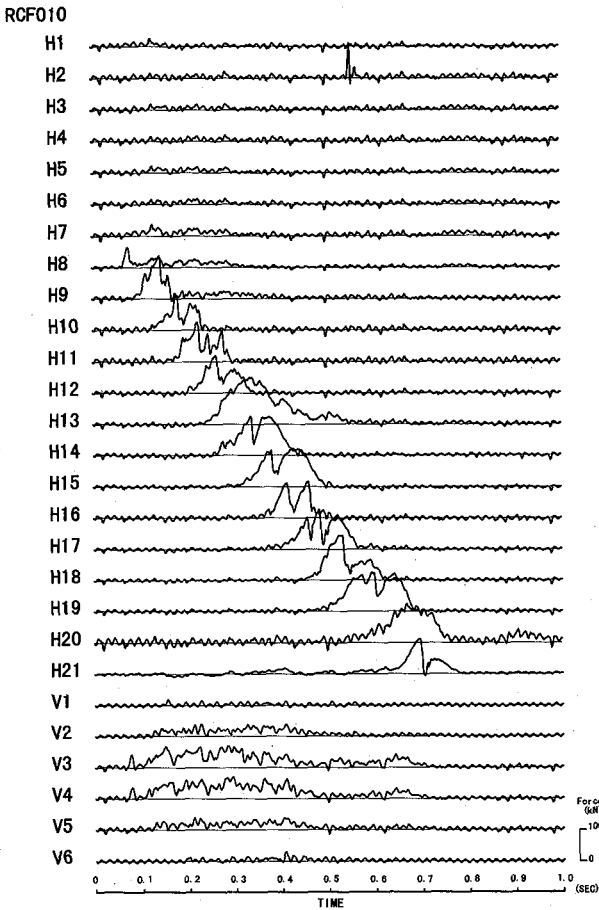


図-11 ワイヤロープ張力波形(RCF010)

横ワイヤロープとの重錘衝突時に見られる櫛形の波形は、端緩衝具の単体実験結果に見られる波形と類似している。図-12 より、発生張力のピーク値は重錘エネルギーの大小にかかわらず、120kN 程度であるが、張力発生時間内の平均張力は、端緩衝具の単体実験結果とほぼ同じになっている。

(2) 縦ワイヤロープ

図-11 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。後述のように、縦ワイヤロープのクロス緩衝具内の滑り量は重錘エネルギーに比例して大きくなっているが、端緩衝具内ではスリップしなかった。そのため、張力波形は小刻みで、かつ、なだらかになっている。

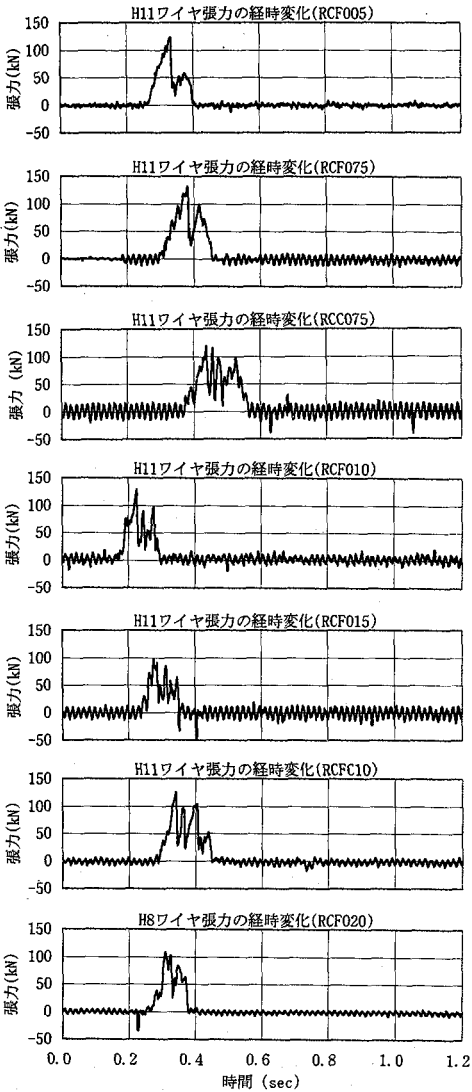


図-12 重錘衝突点でのワイヤロープ張力波形

5. 3 ワイヤロープの滑り量

(1) 横ワイヤロープの端緩衝具内での滑り量

図-13(a)および(b)に、落下高さが 10m(RCF010)および 20m(RCF020)のケースの各横ワイヤロープの左右端緩衝具内での滑り量を示す。いずれのケースにおいても重錘の落下点以下の横ワイヤロープでスリップが発生している。特に、重錘の自由落下および回転により、立方体の重錘の角が衝突した横ワイヤーに大きいスリップが発生している。

図-14(a)に、重錘エネルギーと端緩衝具内でのワイヤロープのスリップ長との関係を示す。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。

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。

図-13(b)に示すように、落下高さが 20m のケース

(RCF020)において、ワイヤロープの滑り量は、最も大きいもの(H8)で、左右合計354mmであった。

クロス緩衝具を千鳥配置にしたケースにおいては、横ワイヤロープ端緩衝具の滑り量の合計は、クロス緩衝具全配置のケースに比べ、2.29倍であった。

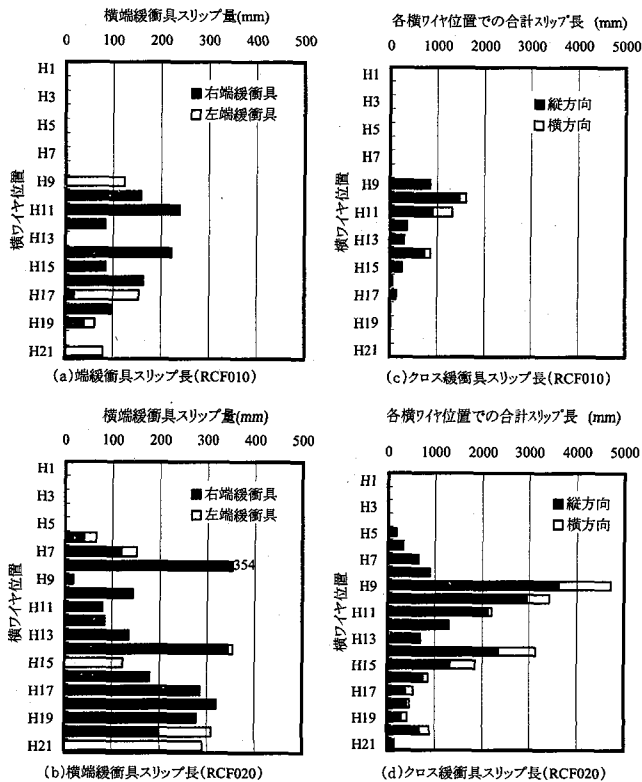


図-13 横ワイヤロープの滑り量

(2) 縦ワイヤロープの端緩衝具の滑り量

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。

前述の張力波形より、張力のピークは最大 50kN 程度のため、すべりを開始するには至らなかったと考えられる。

(3) クロス緩衝具の横および縦方向の滑り量

図-13(c)および(d)に、落下高さが 10m(RCF010)および 20m(RCF020)のケースのクロス緩衝具内での滑り量を示す。また、図-14(b)および(c)に、重錘エネルギーとクロス緩衝具内でのワイヤロープのスリップ長との関係を示す。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。

縦横ワイヤロープのクロス緩衝具内での滑り量は、縦方向が大きく、重錘エネルギーが大きいケースでは、横方向にも滑りが発生した。落下高さの小さいケースでは、重錘落下地点付近のクロス緩衝具は滑っているが、下方ではほとんど滑っていない。一方、落下高さの大きいケースでは、下方のクロス緩衝具も滑っている。滑り量は、重錘落下地点が最も大きく、下方にいくに従って、徐々に小さくなっていく。

クロス緩衝具を千鳥配置としたケースにおいては、クロス緩衝具 1 個あたりの滑り量は、全配置のケースの滑り量に比べ、平均 1.34 倍であった。

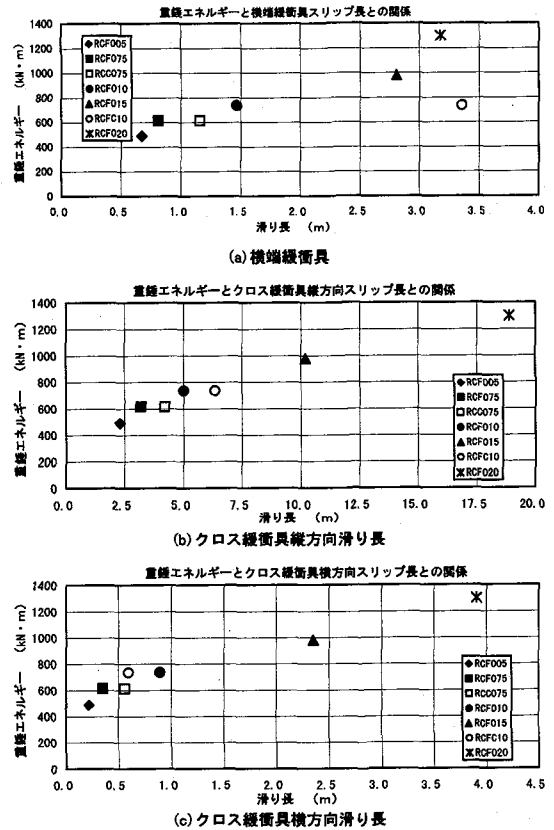


図-14 重錘エネルギーと緩衝具内滑り長との関係

5. 4 重錘の軌跡

図-15(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。

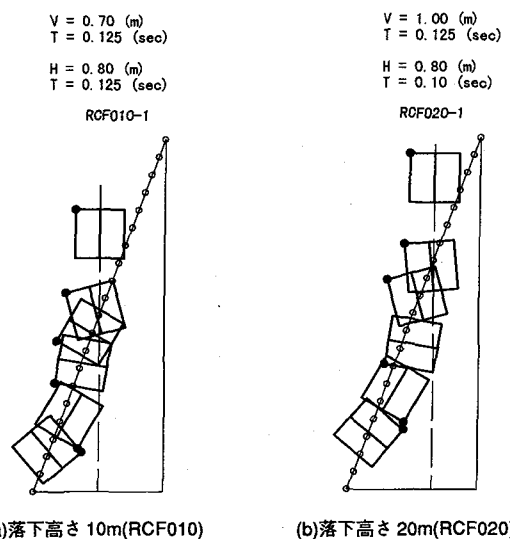


図-15 重錘の落下軌跡

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。

5. 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-4 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。

吸収エネルギーの算出は、次式による。

緩衝具による吸収エネルギー

$$= \Sigma L_o \times T_{ob} + \Sigma L_c \times T_{cb} \dots\dots(2)$$

ここに、

L_o : 端緩衝具のスリップ長

L_c : クロス緩衝具のスリップ長

T_{ob} : 端緩衝具の設計張力

T_{cb} : クロス緩衝具の設計張力

表-4 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 (kN・m)	端緩衝具 (m)	端緩衝具 (kN・m)	縦クロス (m)	横クロス (kN・m)	吸収エネルギー (kN・m)	比率 (%)
RCF005	全	面	49.0	5.0	490.0	0.675	2.306	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	

吸収エネルギーの算出に用いるワイヤロープの設計張力は、単体試験結果より、クロス緩衝具は 15kN、端緩衝具は 50kN とした。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。

表-4 より、最も重錘エネルギーの小さいケース (RCF005、重錘エネルギー 490.0kN・m) において、14.6% 吸収し、最も重錘エネルギーの大きいケース (RCF020、重錘エネルギー 1298.5kN・m) において、38.6% 吸収した。

また、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多い (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-16 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-16 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ことがわかる。

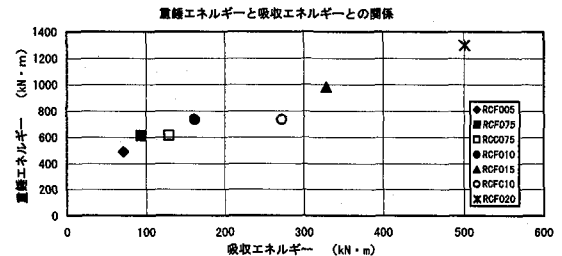


図-16 重錘エネルギーと緩衝具による吸収エネルギーの関係

(2) 重錘の回転エネルギー

図-15 に示したように、重錘がネットに衝突し、鉛直方向変位が最大に達したところから回転運動が発生する。回転速度は、高速ビデオカメラの映像より算出した。

重錘が回転運動を始めてからの平均角速度は、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回転軸回りの回転エネルギーは、図-17 より 227.1～446.2kN・m となる。

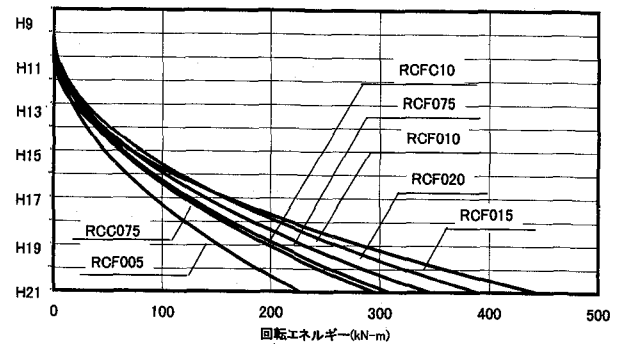


図-17 角速度より算出した回転エネルギー

(3) 重錘と落石誘導工との摩擦による吸収エネルギー

図-18 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、3 方向の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、縦の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、横の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。

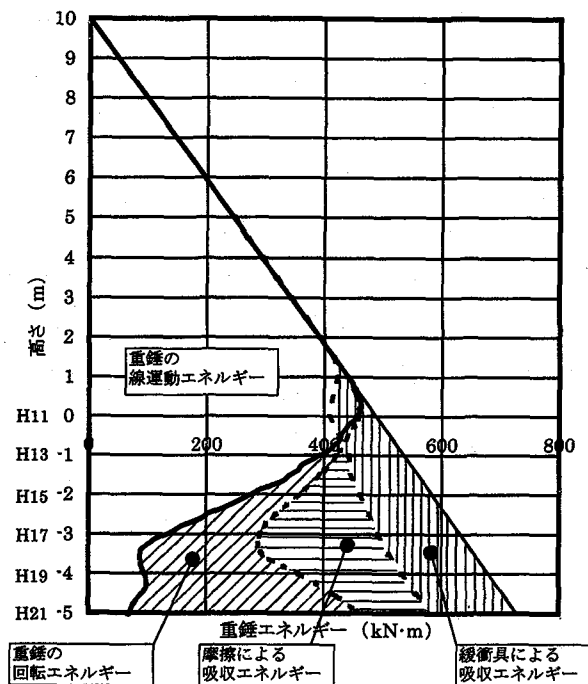


図-18 重錘の運動エネルギーと重錘位置関係(RCF010)

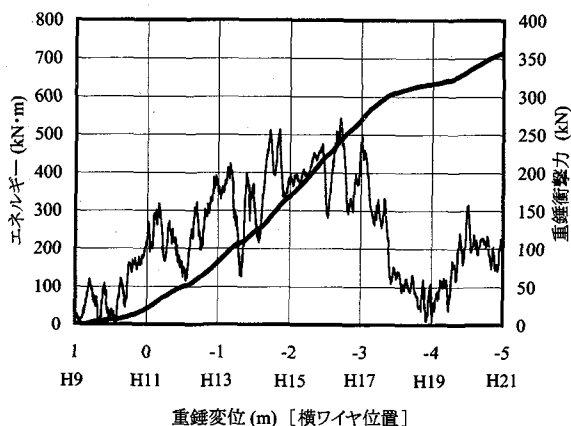


図-19 重錘衝撃力と重錘変位の関係および重錘変位とエネルギーの関係(RCF010)

図-19 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-18 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-18 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-20 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 の位置までは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。

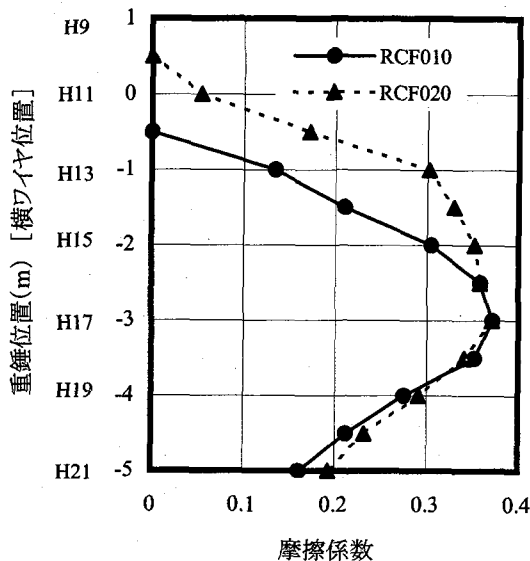


図-20 摩擦係数(RCF010,RCF020)

5. 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。クロス緩衝具は、下方向の滑り量が大きかった。
- (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。

6. 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。

まず、落石がネットに衝突したときの衝撃力を緩衝・分散させ、衝撃エネルギーを吸収させるために配置した緩衝具の単体実験を行い、その性能を確認した。次に、落石誘導工の実物大のモデルを用いて重錘落下実験を行い、重錘エネルギーがどのように分散・吸収させるかの検討を行った。

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。

謝辞：本実験を行うにあたり、金森藤平商事（株）の一杉欣志氏、富田航平氏、（株）プロテックエンジニアリングの野村利充氏、およびサムエンジニアリングの南和夫氏の方々に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，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：ロックシェッドの耐衝撃設計，土木学会，構造工学シリーズ8，1998年10月。
- 3) 吉田博，澤田直子，南和夫，窪田俊男：緩衝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，pp.101-106，1998年6月。

(1999年9月17日受付)