

(20) 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

Experimental study on performance of Wire-Net with shock absorption material

吉田 博*・澤田 直子**・南 和夫***・窪田 俊男****
 Hiroshi YOSHIDA, Naoko SAWADA, Kazuo MINAMI, Toshio KUBOTA

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

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

***金森藤平商事 (株) 開発部長 (〒933-0946 富山県高岡市昭和町)

**** (株) シビル 代表取締役 (〒950-0951 新潟県新潟市鳥屋町)

キーワード：落石, ワイヤネット, 重錐落下
 falling stone, Wire-Net, weight falling test

1. はじめに

これまでの落石発生源での予防対策工として、各種のものがあるが¹⁾、ワイヤロープを用いたものに、ワイヤロープ掛け工、ロープネット工などが用いられてきた。ワイヤロープ掛け工は、斜面上の岩塊にワイヤロープを掛けて、ワイヤロープの両端をアンカーに固定して岩塊を斜面上に固定しようとするものである。一方、ロープネット工は、不特定多数の落石となりうる浮石や転石のある斜面にワイヤロープを格子状に張り、浮石や転石を現位置で押さえ込むことによりそれらの移動を抑止し、斜面を安定させる工法である。

ワイヤロープ掛け工は、比較的大きい岩塊に対して用いられるが、その設計思想が明確にされておらず、経験的な設計・施工が行なわれてきた。したがって地震時の岩塊の移動や転落に対しては必ずしも適切に配慮がされているとはいえない。

ロープネット工は、比較的小規模の落石予備物質が散在する斜面に用いられており、大きい岩塊の落下予防には適用しがたい工法である。小規模の落石に対しては、防護工法も各種のものがあるが、比較的大きい岩塊に対しては、防護工では対応不可能であることから、一般には発生源で予防することが得策であるとされている。しかし、落石調査で発見される不安定な岩塊に対しては、その対策工は限定されたものとなっている。

すなわち、このようなどうにか安定を保っている

岩塊では、予防対策工中に発生する振動をできる限り抑えて、岩塊を安定化させることが必要であり、さらに、地震時においても、岩塊の落下を抑止して性能を有する落石予防工の開発が望まれてきた。

本論文では、このような実状に鑑みて開発した、高エネルギー吸収ワイヤネット工に対する基礎的実験およびモデル実験結果について述べる。

2. 高エネルギー吸収ワイヤネット工の構造

2.1 構造

高エネルギー吸収ワイヤネット工は、既存のワイヤロープ掛け工やロープネット工では対応が不可能である巨岩の落下防止工として考案されたものである。巨岩を格子状にワイヤロープで取り囲み、ワイヤロープ端を緩衝金具（以後、端緩衝具という）を介してアンカーに取付け、また、ワイヤロープの交差部にも緩衝金具（以後、クロス緩衝具という）を取り付けて、地震時などで巨岩が移動するときに、その運動エネルギーを吸収しようという工法である。

ワイヤロープ端は、ワイヤロープがある一定の張力に達すると滑りだし、張力を一定に保ったまま所定量まで滑り、エネルギーを吸収する機構を備えた端緩衝具を介してアンカーに固定されている。

また、格子状のワイヤロープの交差部が相互に移動しようとするとき、ワイヤロープの相互間の作用力がある一定値までは移動しないが、ある一定値に達するとその作用力を保持したまま交差部が移動す

ることによりエネルギーを吸収することができるクロス緩衝具が、交差部に取り付けられている。

これらの端緩衝具およびクロス緩衝具により、ワイヤロープの張力を制御して、衝撃によるワイヤロープの切断やアンカーなどの破損を防止するとともに、ワイヤロープの滑りに伴う摩擦力によって、衝撃エネルギー吸収量を飛躍的に増大させている。

図2. 1にこの高エネルギー吸収ワイヤネットの構造概要を示す。

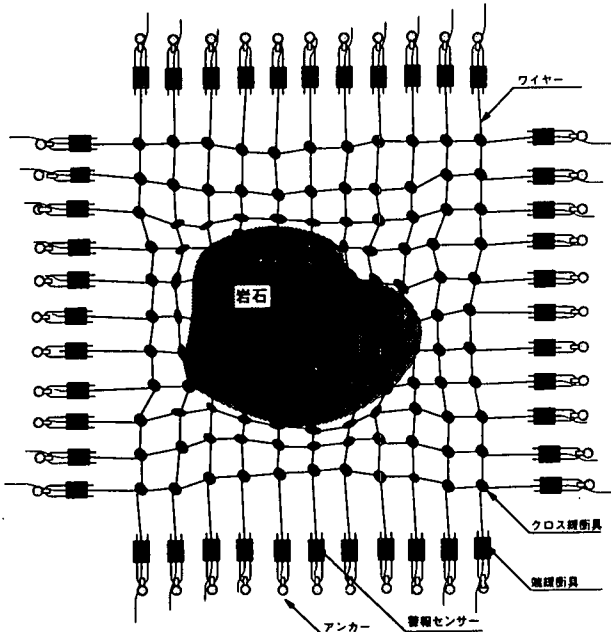


図2. 1 高エネルギー吸収ワイヤネットの構造概要

(1) 端緩衝具

端緩衝具は、所定の間隔で縦横に張られたワイヤロープ端にワイヤロープの余長を確保して取り付けられる。端緩衝具の取り付けには、2個の金具内にワイヤロープをとおし、ボルトにより2個の金具を可能な限り締付ける。これにより、ワイヤロープが一定の張力に達したとき、滑りが開始するようになっている。このように端緩衝具は、ワイヤロープが締付けにより発生する摩擦力に抵抗して滑ることにより、衝撃エネルギーを吸収する機能を備えたものである。

(2) クロス緩衝具

巨岩の移動により、格子状に張られたワイヤロープ交差部が、当初の位置から相互に移動しようとする。ワイヤロープの交差部が相互に固定されていれば、ワイヤロープ相互間にはある作用力が発生する。この作用力がある一定値まではワイヤロープは相互に移動しないが、ある一定値に達した際に作用力を保持したまま交差部が移動可能なクロス緩衝具を取付けることにより、さらにエネルギーを吸収するこ

とが可能である。

(3) 警報装置

巨岩がある一定値以上移動した場合、端緩衝具内をワイヤロープが移動する。このワイヤロープのわずかな移動を検知することにより、警報装置を作動させ、巨岩の落下の可能性を道路標識に表示すると同時に、管理機関に通報することができる。

3. 端緩衝具およびクロス緩衝具の性能試験

3. 1 試験方法

(1) 試験装置

供試体は荷重フレームの両端にロードセルを介して水平に固定する。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) の初期張力を与える。端緩衝具に対する衝撃荷重は、質量 1.53t の重錘をワイヤロープ上 1.0m の高さから鉛直に落下させることにより作用させる。

(2) 測定方法

緩衝具の緩衝性能試験においては、重錘に取付けた加速度計（東京測器製 AR-200E）により、重錘が供試体の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の加速度の時間的変化を測定する。同時に、ロードセル（東京測器製 TLP-20B）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。測定では操作盤からの操作により、重錘が離脱してから2秒間、0.25msec間隔でサンプリングした。

3. 2 試験結果

(1) 端緩衝具

図3. 1は、端緩衝具単体の重錘落下試験より得られたワイヤロープの張力の一例を示したものである。図には、生の測定結果とその0.025sec間の移動平均値の経時変化が示されている。張力の移動平均値には、ワイヤロープの初期張力が加えられている。

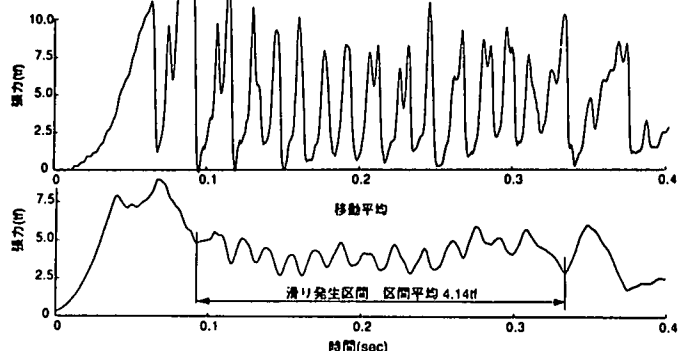


図3. 1 ワイヤロープ張力
(端緩衝具単体の重錘落下試験)

(2) クロス緩衝具

図3. 2は、クロス緩衝具単体の重錘落下試験より得られたワイヤロープの張力および重錘加速度の経時変化の一例を示したものである。図には、生の測定結果とその0.025sec間の移動平均値の経時変化が示されている。なお、クロス緩衝具の実験では、重錘をワイヤロープに接触した状態から落下させたが、クロス緩衝具の滑り張力が小さく、クロス緩衝具のみではエネルギー吸収能力が十分でないため、重錘を途中で停止させた。図3. 2は、重錘の停止直前までの記録を示している。これより、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ので、すぐにはワイヤロープに張力が発生しない。したがって、衝突時の大きい加速度の変動は見られるものの、その後は重錘の加速度変動はわずかである。重錘の落下と共に張力は増大するが、初めはクロス緩衝具での滑りは発生しない。この時点でのワイヤロープのたわみは小さいので、重錘への反力は小さく、重錘加速度の急激な増加は認められない。また張力が増大すると、それまでクロス緩衝具で固定されていたワイヤロープが滑りを開始し、それにともない、張力は漸減し、その後ある一定値を保ったまま滑りが進行する。このとき、クロス緩衝具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。クロス緩衝具でワイヤロープが滑っている区間(図3. 2の0.3sec~0.7sec)の平均張力は、0.95tf、滑り量は、1.55mであった。

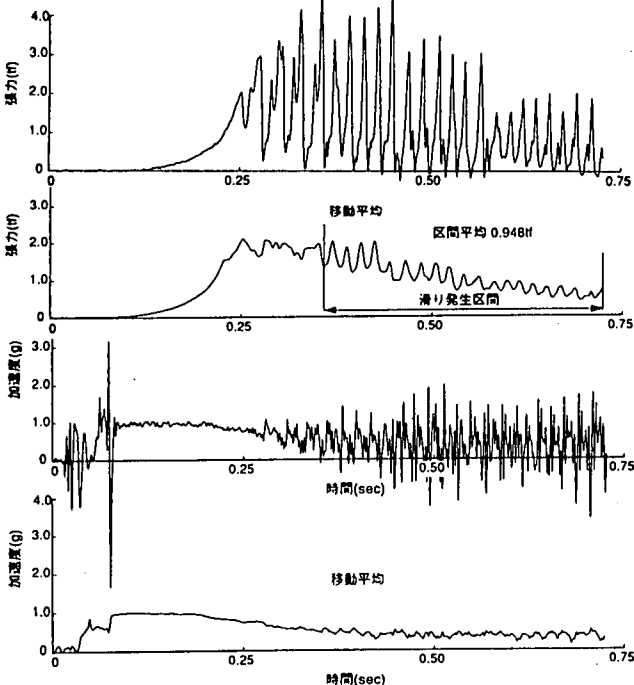


図3. 2 ワイヤロープ張力および加速度
(クロス緩衝具単体の重錘落下試験)

3. 3 考察

表3. 1は、端緩衝具単体の実験結果をまとめたものである。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ときの重錘の移動量である。滑り量は、端緩衝具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 (tf-m) は、重錘重量(tf)×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で除すと、端緩衝具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。表中の平均張力はこのようにして得られたものである。

この平均張力と、図3. 1中に示した区間平均張力の差異は、表3. 1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も含まれているのに対し、図3. 1中の区間平均張力は、ワイヤロープが滑りつつある区間の平均値である。

同様のことは、クロス緩衝具に対してもいえることであり、設計に際しては、表3. 2の滑り張力を基本とするのがよい。ただし、設計において大きい滑り量を用いる場合には、これらの値を低減させるものとする。

表3. 1 端緩衝具の実験結果

重錘重量 (tf)	落下高さ (m)	重錘変位 (m)	重錘エネルギー (tf-m)	滑り量 (m)	平均張力 (tf)
1.53	1.00	2.44	3.73	0.77	4.84

表3. 2 滑り張力

	滑り張力(tf)
端緩衝具	4.0
クロス緩衝具	0.9

4. 実物実験

4. 1 実験方法

(1) 供試体

高エネルギー吸収ワイヤネット工は一般に鉛直または斜面に平行に設置され、落石はワイヤネットにほぼ垂直または斜面に沿って衝突すると仮定して設計されるが、実験では重錘を水平または斜に衝突させることが困難であることから、ワイヤネットを水平に架設した。すなわち、コンクリートスラブ上に高さ2.651m、一辺6.188m四方の架台を設置し、その内側の5m×5mの範囲に高エネルギー吸収ワイヤネットを張設した。ワイヤロープは、縦横それぞれ7本づつとし、その両端に端緩衝具を取付け、端緩衝具をUボルトを介して架台に固定した。ワイヤロープのすべての交差部にクロス緩衝具を取付けた供試体と、クロス緩衝具の効果を確認するために交差部に千鳥にクロス金具を取付けた供試体の2種類について実験を行った。高エネルギー吸収ワイヤネット工の部材、部品の配置および寸法を図4. 1に示す。

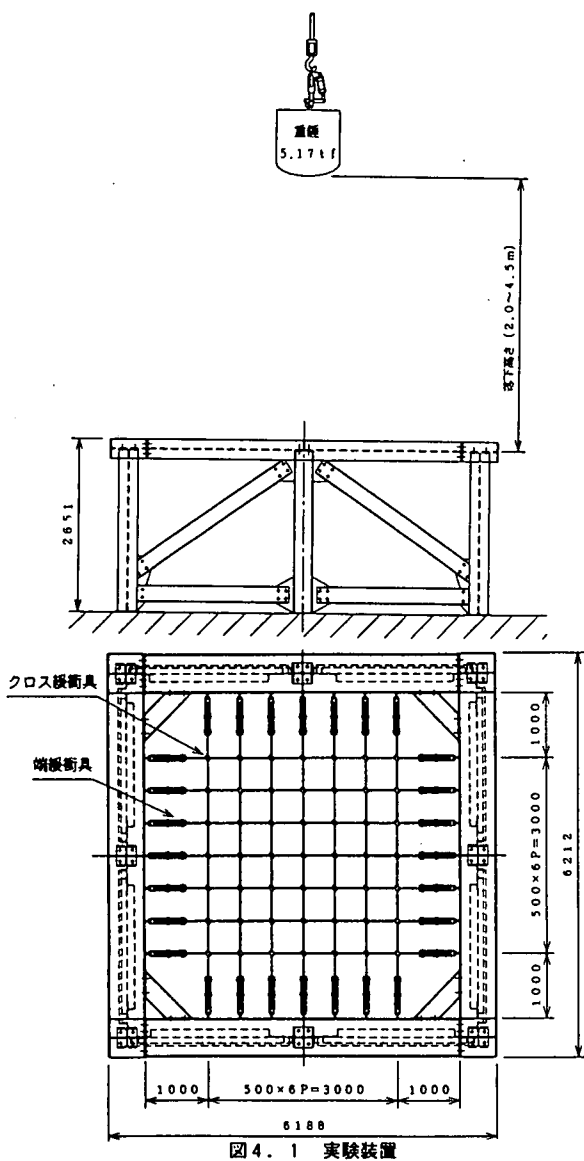


図4.1 実験装置

(2) 実験の種類

実験の種類は、表4.1に示す7種類とした。各実験ごとに、ワイヤロープ、端緩衝具およびクロス緩衝具等はすべて新品と取り替えた。

表4.1 実験種類

NO.	重錘重量 (tf)	落下高 (m)	クロス緩衝具	NO.	重錘重量 (tf)	落下高 (m)	クロス緩衝具
1	5.17	2.00	全	5	5.17	2.00	千鳥
2	5.17	3.00	全	6	5.17	2.00	千鳥
3	5.17	4.00	全	7	1.02	20.00	全
4	5.17	4.50	全				

(3) 測定方法

重錘の衝撃加速度は、重錘表面の中心位置に取付けた加速度計（東京測器研究所製：AR-200E、容量200g）を用いて測定した。

ワイヤロープの張力は、重錘が落下したときを測定するために、端緩衝具を架台に固定するためのUボルトにワイヤストレインゲージを貼り付けた。そのUボルトは、縦横各7本のワイヤロープの一方の端のUボルトである。ワイヤストレインゲージを貼

り付けたUボルトは、図4.2に示す端緩衝具のA1~A7およびB1~B7のUボルトである。

各緩衝具でのワイヤロープの滑り量は、重錘の落下後、各端緩衝具およびクロス緩衝具での滑り量をコンベックスで測定し、各滑り量を算出した。

ワイヤロープの変形状態は、ワイヤロープの交差部に取付けたクロス緩衝具の移動量を3次的に測定した。

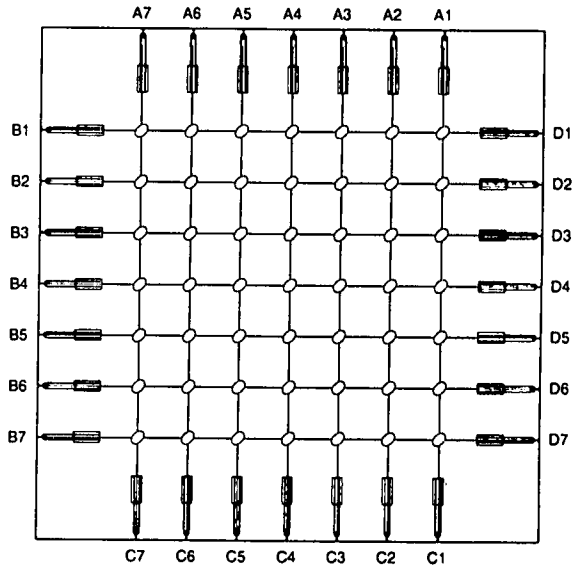


図4.2 端緩衝具

4.2 実験結果

(1) 重錘加速度

図4.3に、加速度波形の一例を示す。加速度波形は、ワイヤネットに重錘が衝突した瞬間に大きい値を示すが、これは衝突による重錘内の応力波によるもので、ワイヤネットの応答には影響していない。その後加速度は大小の振幅はあるものの漸増し、最大値付近で大きい振幅を伴うが、その後徐々に減少してゆく。この傾向はすべてのケースについて共通であった。

衝突加速度の最大値は、落下高さ2.0mの場合約6gであり、4.5mの場合約8.8gであった。他の実験ケースにおいても、加速度の最大値は重錘重量1.02tf、落下高さ20mの場合を除いて、この両ケースの中間値を示していた。

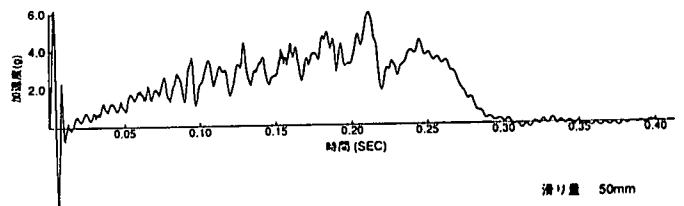


図4.3 加速度波形(実験NO.1)

(2) ワイヤロープの張力

図4.4に、Uボルトに貼付けたワイヤストレージの測定ひずみから計算した各ワイヤロープ張力の経時変化の一例を示す。図中には、後述するワイヤロープの端緩衝具での滑り量が示されている。

ワイヤロープは約5.3kN(0.54tf)の架設時の初期張力を有している。重錘がワイヤロープに衝突後、しばらくして、まず中央のワイヤロープに張力が発生し、その後、両側のワイヤロープへと時間差を生じて張力が発生していた。

ワイヤロープの張力は、ある一定値に達すると一旦減少し、その後再び増加する鋸歯形の波形を呈している。これは、ワイヤロープが端緩衝具で滑りを生じるときのワイヤロープの素線の凹凸に起因している。図4.5は、この鋸歯形の波形の0.02sec間の移動平均値の経時変化を示している。すなわち、時刻tのワイヤロープの張力の移動平均値は、時刻t-0.01secから時刻t+0.01secまでの張力の平均値であり、張力の平均的な変化を見ることができる。

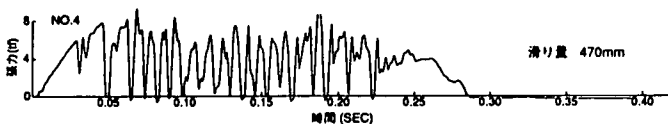


図4.4 ワイヤロープ張力(X方向中央ワイヤー)

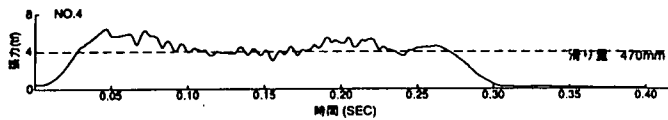


図4.5 ワイヤロープ張力の移動平均(X方向中央ワイヤー)

(3) ワイヤロープの滑り量

表4.2は、重錘重量5.17tfで落下高さが2.0mおよび4.5mの重錘落下実験で測定した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示す。すなわち、ワイヤロープの両端に取付けた端緩衝具内の滑り量をその固定位置ごとに示し、さらに、その両端の滑り量の合計値、滑り量の比率、中央のワイヤロープを対称の中心とした両側のワイヤロープ

の滑り量の平均値およびそれらの中央のワイヤロープに対する分担比率を一覧表で示した。また、各クロス緩衝具の各ワイヤロープ方向の移動量を示し、そのワイヤロープごとの合計および全体の合計値を示した。

4.3 考察

(1) 重錘加速度

実験における測定加速度から、落下高さ4.5mの場合、ワイヤネットへの作用衝撃力は、ピーク値でも約431kN(44tf)程度であり、ロックシェッドのサンドクッション上の落石衝撃力(落石対策便覧式では、約1100kN(112tf))に比較して約2.5分の1であり、極めて大きい緩衝効果を発揮することが明らかとなった。

この重錘衝撃力の減少は、まず、水平に張られたワイヤロープに重錘が衝突するが、この時点ではワイヤロープには張力が発生しない。さらに、重錘が落下するとワイヤロープに張力が徐々に発生し、次第に衝撃力も増大する。張力がある一定値に達すると端緩衝具で滑りを開始し、ワイヤロープの張力はこれ以上増大しない。同時にワイヤロープの交差部に取付けたクロス緩衝具でも滑りを生じ、端緩衝具とクロス緩衝具でエネルギーを吸収しながら変位が増大し、やがて重錘は停止する。

(2) ワイヤロープの張力

ワイヤロープは約34~39kN(3.5~4.0tf)の張力で端緩衝具内を滑っており、滑り量が大きいワイヤロープでは、その張力を保持している時間が大きく、滑り量の小さいワイヤロープでは短くなっていた。

(3) ワイヤロープの滑り量

端緩衝具の滑り量の比率は、落下高さにはほとんど無関係で、重錘が直接落下する中央のワイヤロープを1.00とすると、隣接のワイヤロープでは約0.85、

表4.2 緩衝具内スリップ量(W=5.2tf,H=2.0m)

固定位置	端緩衝具	クロス緩衝具							端緩衝具合計	固定位置	端緩衝具合計	端緩衝具割合	端緩衝具割合平均	分担比率	
		1	2	3	4	5	6	7							合計
A1	0	0	0	0	0	10	20	30	60	190	C1	190	0.0987	0.0649	0.266
A2	0	0	0	0	0	10	30	30	70	300	C2	300	0.1558	0.1117	0.457
A3	0	0	0	0	10	20	100	50	180	470	C3	470	0.2442	0.2013	0.824
A4	10	0	0	10	0	20	40	40	110	460	C4	470	0.2442	0.2442	1.000
A5	15	0	0	15	5	15	25	15	75	290	C5	305	0.1584		
A6	10	0	0	10	10	20	30	30	100	120	C6	130	0.0675		
A7	0	0	0	0	0	0	10	10	20	60	C7	60	0.0312		
小計	35								615	1890		1925			
D1	20	0	0	10	10	10	0	0	30	30	B1	50	0.0236	0.0660	0.292
D2	110	0	0	10	20	20	10	0	60	40	B2	150	0.0708	0.1179	0.521
D3	320	0	0	20	130	30	30	0	210	25	B3	345	0.1627	0.2028	0.896
D4	470	0	0	70	100	10	10	0	190	10	B4	480	0.2264	0.2264	1.000
D5	510	0	0	70	110	25	0	0	205	5	B5	515	0.2429		
D6	350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	B6	350	0.1651		
D7	230	0	0	0	0	10	0	0	10	0	B7	230	0.1085		
小計	2010								705	110		2120			
合計	2045								1320	2000	合計	4045			

その外側では約0.40、さらに外側では約0.2であり、他の落下高さに対してもほぼ同様の値を示している。

表4. 3は、クロス緩衝具を千鳥に取付けたワイヤロープネットに対し、重錘重量 5.2tfで落下高さが2.0mの重錘落下実験で測定した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示している。この場合の端緩衝具の滑りの分担比率は、中央のワイヤロープを1.00とした場合、隣接のワイヤロープは約0.50であり、クロス緩衝具を千鳥に取付けた場合、分担比率が極端に減少することがわかる。

5. まとめ

本研究では、新しく開発された高エネルギーワイヤロープネット工の耐衝撃性能を明らかにするために、段階的に試験を進めた。その結果を要約すると以下ようになる。

(1) エネルギー吸収の基本部分となる緩衝具の性能を明らかにするために、端緩衝具およびクロス緩衝具の単体試験を行なった。

端緩衝具の試験では重量 1.53tfの重錘を高さ 1mから、クロス緩衝具の試験ではワイヤロープに接触させて落下させる衝撃载荷とし、重錘の衝撃加速度、ロープの張力および滑り量を測定した。単体の試験結果より、表3. 2に示した値を設計の基本となる各緩衝具の標準滑り張力とした。ただし、滑り長が大きい場合には、それらの値を低減させる必要がある。

(2) 実物の高エネルギー吸収ワイヤネット工の一部を用いた一連のモデル実験を整理したのが、表5. 1である。表には、各実験ケースごとに得られた重錘エネルギーと端緩衝具およびクロス緩衝具の全滑り量が示されている。

また、端緩衝具での滑り量が1.0mを、クロス緩衝具での滑り量が0.5mを越えるものが多いことから、端緩衝具の滑り張力を標準滑り張力4.0tfの80%の3.0tfとし、クロス緩衝具の標準滑り張力0.9tfの50%の0.45tfとして、緩衝具類の全吸収エネルギーを計算した結果も表に示されている。

表5. 1より、上記の低減率で全ての実験結果を概ね評価できると考えられる。したがって、実設計においては、一般的に滑り張力の低減率として端緩衝具では0.8を、クロス緩衝具では0.5を採用すればよい。

(3) クロス緩衝具のエネルギー吸収量は、全体の吸収エネルギー量に占める割合が比較的小さいことから、安全性を考慮して設計においてはクロス緩衝具の吸収エネルギーを無視するのがよい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983.

表4. 3 緩衝具内スリップ量 (W=5.2tf, H=2.0m, 千鳥配置2)

固定位置	端緩衝具	クロス緩衝具							端緩衝具	固定位置	端緩衝具	端緩衝具	端緩衝具	端緩衝具	分担比率
		1	2	3	4	5	6	7							
A1	55	10		10				5	30	30	C1	85	0.0412	0.0326	0.079
A2	35		10		95			710	815	100	C2	135	0.0654	0.0739	0.178
A3	15	15		65				385	815	470	C3	485	0.2349	0.1865	0.450
A4	30		20		30			780	830	825	C4	855	0.4141	0.4141	1.000
A5	90	10		80				285	475	195	C5	285	0.1380		
A6	20		10		75			105	190	150	C6	170	0.0823		
A7	25	10		15				55	85	25	C7	50	0.0240		
小計	270								3240	1795		2065			
D1	10	65		5				0	75	30	B1	40	0.0203	0.0253	0.069
D2	150		10		5			5	20	5	B2	155	0.0785	0.0835	0.228
D3	40	10		20				0	130	350	B3	390	0.1975	0.2076	0.566
D4	695		581		5			5	591	30	B4	725	0.3671	0.3671	1.000
D5	420	320		475				30	110	935	B5	430	0.2177		
D6	160		10		5			0	15	15	B6	175	0.0886		
D7	50	10		20				0	30	10	B7	60	0.0304		
小計	1525								1826	450		1975			
合計	1795								5066	2245	合計	4040			

表5. 1 実験結果総括表

NO.	重錘重量 (tf)	落下高さ (m)	クロス緩衝具	落下点たわみ (m)	重錘エネルギー (tf-m)	全滑り量(m)		吸収エネルギー (tf-m)
						端緩衝具	クロス緩衝具	
1	5.17	2.0	全	0.997	15.494	4.045	1.320	12.729
2	5.17	3.0	全	0.934	20.339	5.698	7.830	20.618
3	5.17	4.0	全	1.280	27.298	7.710	13.385	29.153
4	5.17	4.5	全	1.471	30.870	8.580	9.845	30.170
5	5.17	2.0	千鳥	0.661	13.757	3.753	5.395	13.687
6	5.17	2.0	千鳥	0.872	14.848	4.040	5.067	14.400
7	1.02	20.0	全	1.280	21.706	6.939	5.775	23.416