

# ポリエチレンネットの静的および重錘衝突実験

## STATIC AND WEIGHT IMPACT TESTS ON A POLYETHYLENE NET

前川幸次\*, 田島与典\*\*, 岩崎征夫\*\*\*, 可児幸嗣\*\*\*\*  
 MAEGAWA Koji, IWASAKI Masao, TAJIMA Tomonori and KANI Koji

\*工博, 金沢大学教授, 大学院自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野2丁目40-20)

\*\*課長, (有)ライテック新潟事務所 (〒951-8141 新潟市関新1丁目2-34)

\*\*\*取締役技術部長, (有)サンワ設計 (〒812-0018 福岡市博多区住吉4丁目5-7)

\*\*\*\*金沢大学大学院, 自然科学研究科博士前期課程 (〒920-8667 金沢市小立野2丁目40-20)

キーワード: 落石防護柵, ポリエチレンネット, 重錘衝突実験  
 (rock-fence, polyethylene net, weight impact test)

### 1. はじめに

わが国において用いられている落石防護工法には、防護網、防護(止)柵、防護擁壁および覆工などがあり、落石のエネルギー、現場状況および重要度に応じて工法が選定されている<sup>1)</sup>。落石防護柵においては、強度と変形性能の大きなコンクリート充填鋼管柱とワイヤーロープの破断を防止するための緩衝装置を組み込んだ高エネルギー吸収タイプの防護柵<sup>2),3)</sup>が開発され、対応できる落石エネルギーは汎用型防護柵の50~100kJ程度と比べ、飛躍的に拡大して1000kJ程度となっている。そして、この10年間にワイヤー製リングネットやワイヤーロープ製ネットなどの新しい工夫を取り入れた種々の防護柵が開発され、落石防護工の高性能化の一方で建設コストの低減が行われている。

また、落石エネルギーが100kJ程度の小規模落石を対象とした研究も行われており、小さな衝撃力を発生しながら大きな変形で落石を捕捉するために小型の緩衝装置や大変形が可能な金網の開発が行われている<sup>4),5)</sup>。

ところで、これまでの落石防護柵では、落石が衝突する構成要素に金網やワイヤーロープなど金属材料を用いているが、安価で軽量のポリエチレンネット(以下、PEネットとする)を代用することができれば、経済性および施工性の面で有利である。耐水性、耐アルカリ性、耐酸性、耐衝撃性、耐寒性に優れており、熱や紫外線による耐候性については、ゴルフネットに関する強度劣化の測定結果から10年程度が目安になると見込まれる。したがって、斜面工事等に伴う落石防護仮設工のような短期間の使用では耐候性の問題は全くない。また、取り扱い易いことから転用・再利用も容易にできる利点がある。

本研究では、PEネットの静的載荷実験および重錘

衝突実験を実施し、耐衝撃性能の評価を行った。

### 2. 実験概要と結果

#### 2.1 PE ネット

PEネットは、安価・軽量で柔軟性もあり作業性が良いことから、漁網をはじめスポーツ用ネットおよび法面安定・落石防止ネットとして使用されている。また、汎用プラスチックでありリサイクルも容易に行える。実験に用いたPEネットの諸元を表-1に示し、網糸の引張試験結果を図-1に示す。網目は2本の子糸(素線133本を束ねた小縄を3本燃りしたもの)を図-2のように織り込んで形成されている(貫

表-1 PE ネットの諸元

素材	高密度黒色ポリエチレン	網糸強度	10.2 kN
網糸 <sup>1)</sup>	440Tex×800本, φ9mm	軟化点	100℃
目合	200mm (100mm菱目)	耐水性	吸水なし
比重	0.94~0.96	耐候性 <sup>2)</sup>	良

- 1) Texは糸の線密度の単位(g/km)で、ここでは1本当たり440(g/km)の糸を800本使用して網糸を構成している。
- 2) ゴルフネット(PE400Tex×36本・グリーン・10.5年使用)の強度保持率は80%である。440Tex×800本・黒色の場合、紫外線による劣化の影響はより小さくなる。

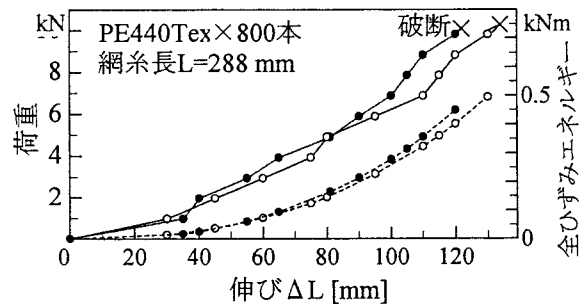


図-1 ポリエチレン網糸の引張試験結果

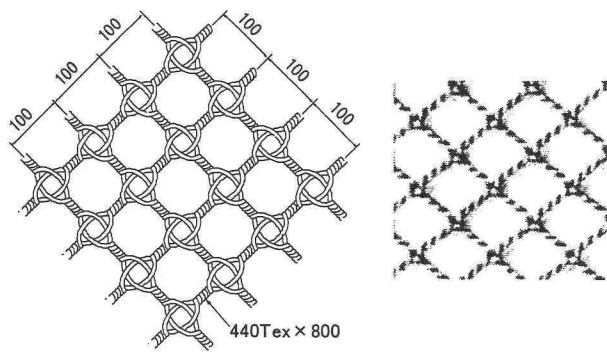


図-2 貫通型無結節網

表-2 PE ネット静的載荷試験用供試体

No.	幅×長さ	No.	幅×長さ
S1	3m×3m	S4	3m×6m
S2	3m×3m	S5	3m×6m
S3	3m×5m	S6	3m×7m

通型無結節網という)。そのため、真っ直ぐな網糸（2本の子糸）が持っている強度をそのまま活かすことができ目ズレの心配も無い。

## 2.2 PE ネットの静的載荷実験と考察

### (1) 実験概要

網糸は図-1 のように引張強度に至るまでほぼ線形弾性挙動を示すが、網糸の特性からネットとしての強度特性を推定する事は難しい。そこで、防護柵に適用する形状寸法（表-2）について静的載荷実験を行った。ネットの四辺には耳折り返しを設けて支持用 PE ロープ（φ22, 引張強度 60kN）が通されており、図-3(a)のようにネットおよび支持用ロープをネットの4隅でUボルトを介してH形鋼に連結した。図-3(b)のように吊り具を取り付けた重錘（頂部径 600mm, 胴部径 900mm）を載荷版としてネット中央部をクレーンにより引き上げた。ネットの 25 箇所（幅方向 5 点×長さ方向 5 点）にマーキングをし、各荷重ステップ時のそれらの座標をトータルステーションにより測定した。なお、ネットのクリープにより荷重値が低下する場合には、荷重値およびUボルトのひずみは安定するまで待つて計測した。

### (2) 実験結果と考察

図-4 は各供試体の荷重と荷重点変位の関係を表している。変位のゼロ点はH形鋼上面としている。ネットの初期たるみが大きいため、荷重値 5kN でも大きな変位を生じる。荷重値が約 40kN を超えるとほぼ線形挙動を示しており、120~150kN 前後において局所的な網糸に破断を生じた。その破断は、最初に載荷版の接触部に生じ、次に支持用ロープを通したUボルト近傍の網目に生じた。接触部の破断は、吊り具用鋼板が 200mm の目合の変形を阻害したた

め、限られた網糸の張力が大きくなったことが要因と思われる。供試体 S2 と S4 では、その破断が誘因となって重錘はネットを瞬時に突き破った。その他の供試体では、PE ロープが通された角部の網目のロープに沿った移動や網糸の破断により、載荷版を上昇させるのが危険となったため実験を中止した。ただし、PE ロープの損傷はなかった。

図-4 の各曲線を原点 (0,0) を通らない 2 次曲線で近似し、荷重値 0~最大荷重値に対応する変位についての積分値として求めた吸収エネルギーを図-5 に示す。これらの値は PE ネットに局所的な損傷が発生して荷重の上昇をできなくなるまでの吸収エネルギーであり、局所的な網糸の破断に伴うネットの塑

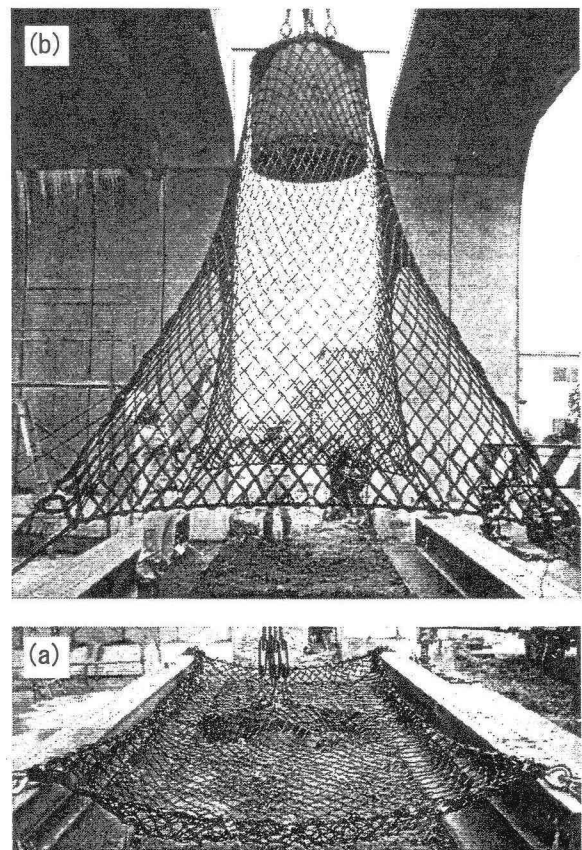


図-3 PE ネット静的載荷実験（供試体 S6）

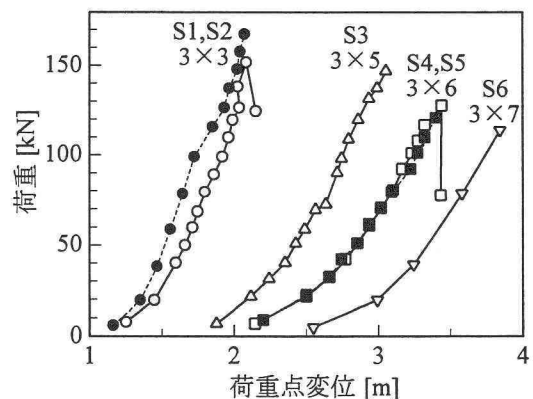


図-4 荷重-荷重点変位

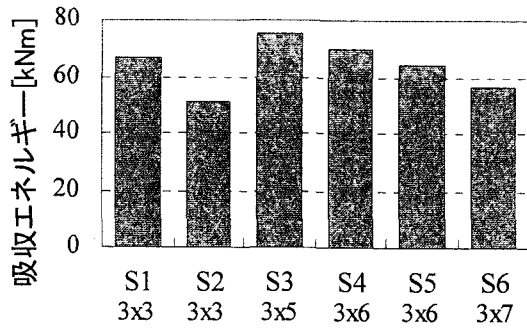


図-5 吸収エネルギー(静的載荷)

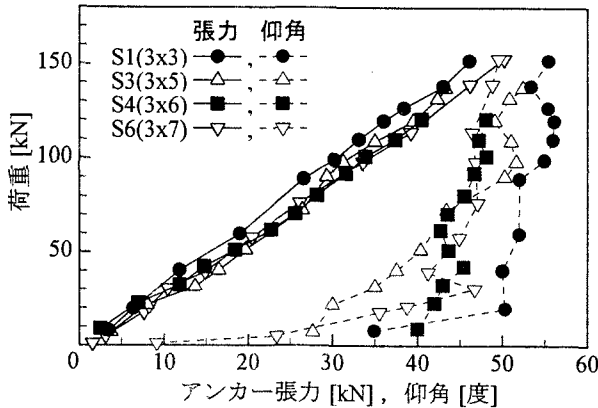


図-6 アンカー(Uボルト)張力とその仰角

性変形を許すのであれば吸収エネルギーはさらに大きくなる。

次に、PE ネットの支持用ロープを連結しているUボルトのひずみからアンカー張力を求めた。さらに、4隅のUボルトの仰角 $\theta$ が全て同じであるものと仮定し、次式によりUボルトの仰角を求めた。

$$\theta = \sin^{-1} \left( P / (T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \right) \dots (1)$$

ここに、 $P$ =荷重、 $T_i$ =各Uボルトのアンカー張力である。アンカー張力および仰角 $\theta$ と荷重の関係を図-6に示す。図のアンカー張力は4個のUボルトの平均値である。荷重値が約50kNを超えると仰角の変化は少なくなり、ネットの長さが短いものは仰角が大きい。また、荷重とアンカー張力は比例関係があり、供試体寸法による差はわずかである。最大荷重時のアンカー張力として40kN(S4)~50kN(S6)、アンカー張力の水平成分として26kN(S1)~33kN(S6)を見込めばよいことがわかる。

ところで、網目が100mm角であることから、直径900mmの載荷版に接する網糸の本数は少なくとも18本(=900/100×2)となる。18本の網糸はPEロープで支持されているので、その仰角はUボルトの仰角 $\theta$ ( $\neq 45$ )よりも小さくなることはない。したがって、PE ネット載荷部を対象にした終局強度 $P_u$ は、表-1の網糸強度 $N_u$ を用いて次式で求められる。

$$P_u \geq 18 \times N_u \sin \theta = 18 \times 10.2 \sin 45 = 130 \text{ kN} \dots (2)$$

また、図-1の長さ288mmの供試体における破断時全ひずみエネルギーの平均値0.465kJとPEネットの短辺が3mで網糸と辺のなす角が45度であることを用いて、載荷部の終局強度に対するひずみエネルギー $E_u$ は次式で求まる。

$$E_u = 18 \times 0.465 / 288 \times 3000 \sqrt{2} = 123 \text{ kNm (kJ)} \dots (3)$$

式(2)および式(3)で仮定した終局状態と実験終了時の破断状態は完全に一致するものでないこともあり、終局強度 $P_u$ は実験値に近いものの、ひずみエネルギー $E_u$ は図-5の吸収エネルギーを説明できる値ではない。また、載荷版(落石)に接する網糸がすべて破断しなくても落石はすり抜けると考えられるため、次節の実際的な落錘衝撃載荷試験によりPEネットの性能を把握する必要がある。

### 2.3 PE ネットの落錘衝撃載荷実験と考察

#### (1) 実験概要

PE ネットの耐衝撃性を確認するために重錘落下による衝撃載荷実験を表-3の4通りで行った。PE ネットを支持するために既設の構造物(CFT片持ちばり水平設置2本、塑性抵抗モーメント $M_p=550 \text{ kNm}$ 、初期曲げ剛性 $EI=27 \text{ MNm}^2$ )を用いた。図-7のように、PE ネット(幅3.5m×長さ5.6m)4辺の耳折り返しにPEロープ( $\phi 22$ , 両端ハート形シンプル付き、引張強度60kN)を通し、そのPEロープはUボルトを

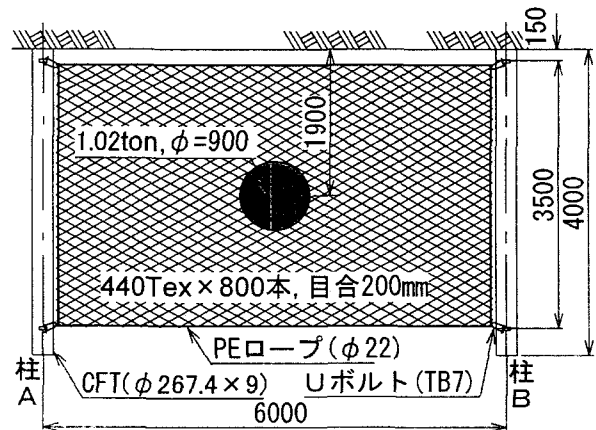


図-7 PE ネット落錘衝撃載荷実験 Setup

表-3 PE ネット落錘衝撃載荷条件と結果

No.	PE ネット	重錘・落下高	実験結果
D1	1重	1022 kg 10 m	ネット4隅破断 重錘捕捉
D2	1重	1022 kg 15 m	ネット4隅破断, ロープ破断, 重錘 落下
D3	2重	1022 kg 15 m	ネット4隅破断 重錘捕捉
D4	2重	1022 kg 20 m	ネット4隅破断 重錘捕捉

介してCFT片持ちばり（図-7中、柱A、柱B）と4隅で連結した。Uボルトにはひずみゲージを貼付し、張力の計測に用いた。なお、PE ネットを二重にした実験D3およびD4においても、ネット1枚ずつが異なるUボルトで柱に連結されている。重錘は板厚6mmの鋼殻にコンクリートを充填したもので、直径912mm、高さ950mm、底部球面半径900mm、質量1022kgである。重錘上面にひずみゲージ式加速度計（要領100G）が取り付けられており、Uボルトのひずみも含めて0.2ms間隔で計測を行った。

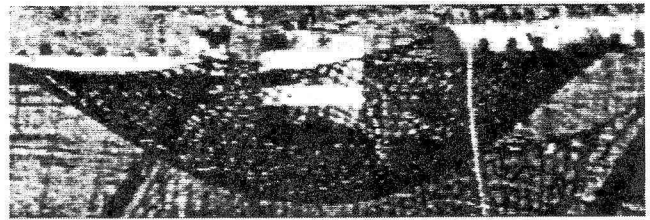
## (2) 実験結果と考察

図-8は1コマ5msで撮影した実験D1のビデオ画像である。PEネットの中央部は初期状態で約1.2m垂れ下がっており、これは衝突高に含まれている。全ての実験で図-8(c)および(d)のようにPEロープを通した角部の網目が2辺のPEロープに沿って移動しひき裂かれた。しかし、静的載荷実験とは異なって、重錘が衝突したネット中央部の網糸の顕著な破断は見られなかった。実験D2についてはPEロープの破断によって重錘が滑り落ちたが、その他の3ケースでは重錘を捕捉することができ、ネットと重錘は図-8(e)のように支柱位置よりも上まで跳ね上がった。

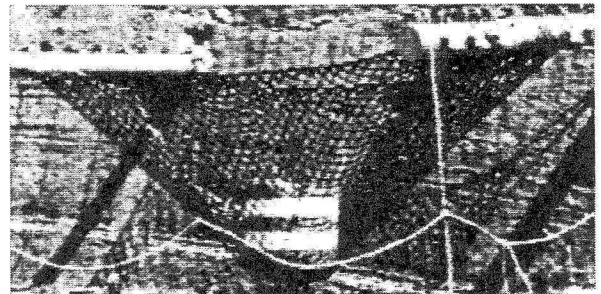
図-9(a)～(d)は各実験の重錘加速度から求めた衝撃力とUボルト張力の経時変化を示している。ただし、実験D3および実験D4におけるUボルト張力は上側のPEネット1枚についての計測値である。実験D2については、柱B側のPEロープの破断の兆候を $T_0+150ms$ におけるビデオ画像で確認しており、図-9(b)で波形が急変している時刻とほぼ一致する。

柔軟で変形に富むネットへの衝突であるため荷重作用時間は300ms以上に及んでおり、この間に図-8のようにPEロープが通された角部の網目の移動と網糸の破断、最大重錘変位（重錘速度ゼロ）および重錘の跳ね上がりが起こっている。各実験において4個のUボルトの張力には差があるものの、それらの平均張力が50kN前後のときの波形に変化が見られる。これは、静的載荷実験において角部の網目の移動と網糸の破断により荷重の上昇と持続ができなくなったときのアンカー張力が40～50kNであったことに関係があると考えられる。

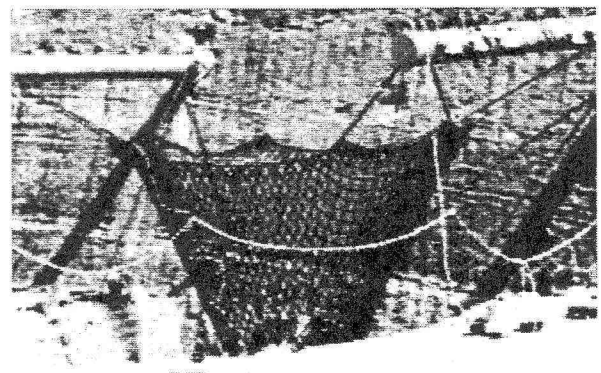
Uボルトの平均張力の最大値は70～80kNであり、100kNになっているUボルトもある。PEロープ2本の合力がUボルト張力であること、および2本のPEロープの間の角度がゼロではないことから、引張強度が60kNのPEロープでは実験D2と同様な破断に近い状態と考えられる。PEロープの強度を上げるとPEロープを通



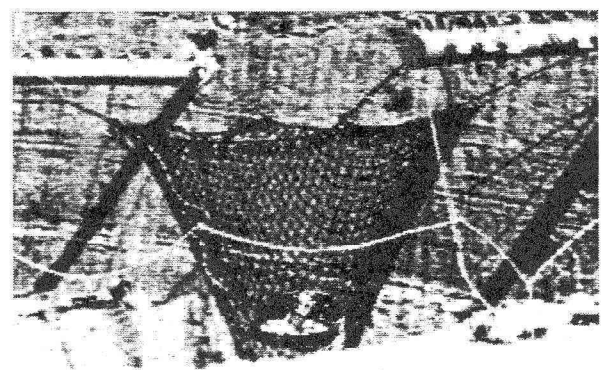
(a)  $T_0-40ms$  : 衝突前 40ms



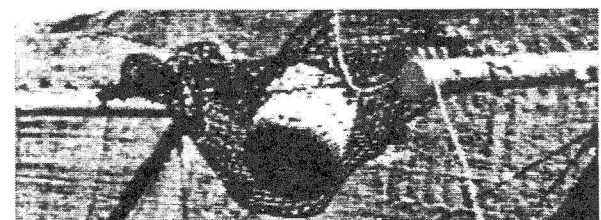
(b)  $T_0+60ms$  : 衝突後 60ms



(c)  $T_0+210ms$  : ほぼ最大変位 (PE ネット4隅が破損)



(d)  $T_0+310ms$  : 重錘跳ね上がり (上昇中)



(e)  $T_0+1200ms$

図-8 落錘衝撃載荷実験状況  
(No. D1,  $T_0$  : 衝突推定時刻)

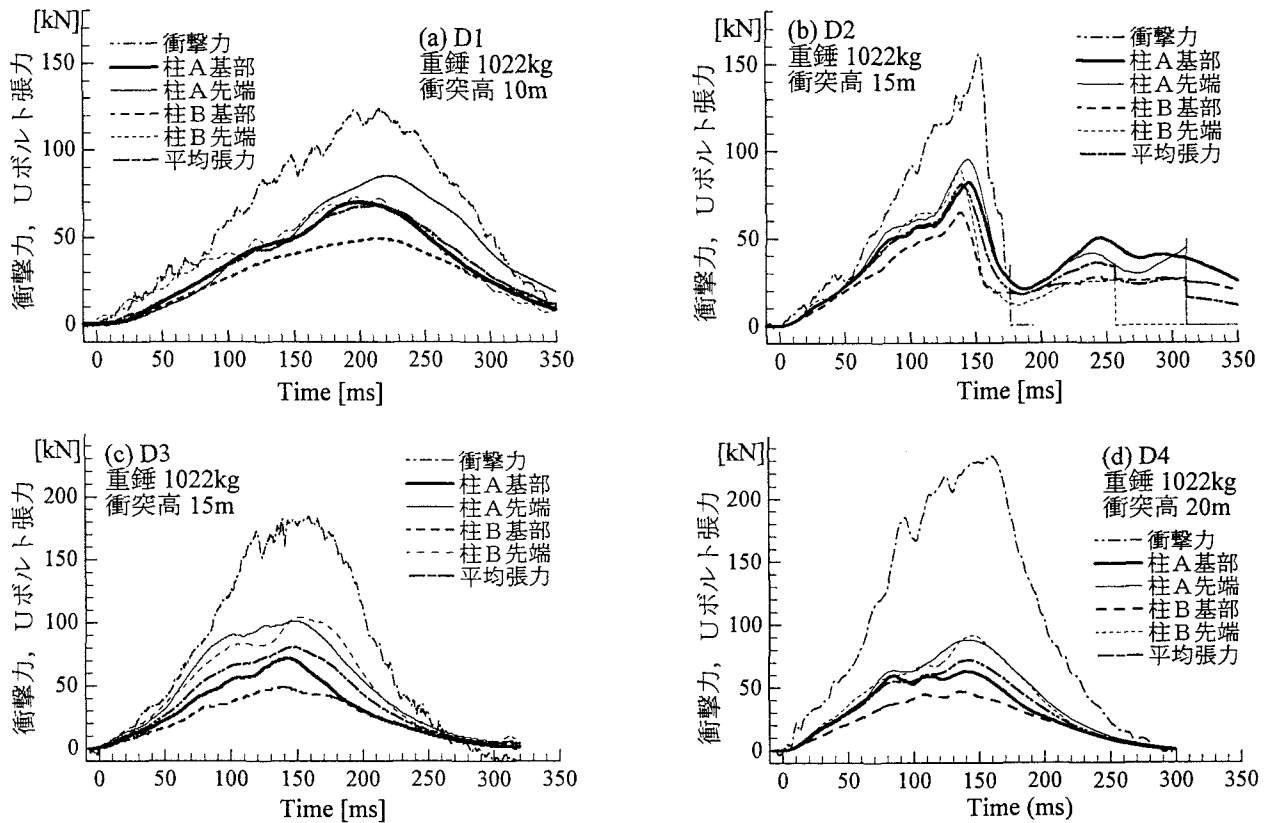


図-9 重錘衝撃力とUボルト張力の経時変化

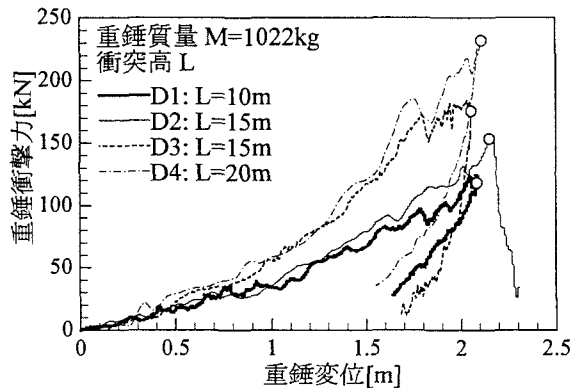


図-10 重錘衝撃力-変位

表-4 PE ネットの落錘衝撃載荷実験結果

No.	最大変位		落下高 H=L+d	位置 En. E (kJ)	仕事量 W (kJ)	W/E (%)
	d(m)	d'(m)				
D1	2.09	2.2	12.09	121.1	97.3	80.3
D2	2.17	2.4	17.17	172.0	131.6	76.5
D3	2.05	2.2	17.05	170.8	150.0	87.8
D4	2.11	2.2	22.11	221.4	177.9	80.4

註：d' = 高速度カメラ画像による推定値，L=衝突高

した網目の破損がさらに進行し、重錘の捕捉に支障をきたすと考えられる。また、実験 D3 に比べて衝突高の大きな実験 D4 では、衝撃力が大きいことや PE ロープを通した網目の損傷が

広がっていることを確認しているが、両者の U ボルト張力の差異はほとんどない。これらのことから、PE ネット 1 枚の落石捕捉性能を発揮させるためには、ネットを支持する PE ロープおよび U ボルトに作用する力としてそれぞれ少なくとも 60kN および 100kN を見込む必要がある。

図-10 は重錘衝撃力と衝突後の重錘変位の関係を表している。重錘変位は、衝突高 (L) から求めた自由落下による初速度 ( $\sqrt{2gL}$ ) を考慮して衝突後の重錘加速度の時間積分を 2 回行うことで求めた。各曲線中の○印は最大変位すなわち重錘の運動エネルギーがゼロの状態を表している。なお、重錘は図-8(e)のように傾きながら跳ね上り、正確な鉛直変位を加速度から求めることができなくなるので曲線の表示は途中までにしている。

PE ネット 1 枚の実験 D1 と実験 D2 では、衝突高が異なるため最大衝撃力に差を生じているものの、曲線波形はほぼ一致している。また、PE ネット 2 枚重ねの実験 D3 と実験 D4 でも同様なことが言える。衝突高が等しい実験 D2 と実験 D3 では、全範囲で D3 の衝撃力が大きく（あるいは変位が小さく）、D3 の PE ネットが 2 枚重ねであることによる高い剛性の影響が現れている。

次に、各曲線を最大変位まで積分して得られた重錘による仕事量  $W$ 、落下高  $H$  (=衝突高  $L$  + 最大変位  $d$ ) から求めた重錘の位置エネルギー  $E$  およびそれらの比を表-4 に示す。ただし、実験 D2 では PE ロープの破断により重錘が滑り落ちたため、重錘衝撃力が急激に減少した時点で評価を行った。なお、表には高速ビデオ (5ms/コマ) による最大変位の推定値  $d'$  も示されている。いずれの実験でも重錘の仕事量は位置エネルギーの 80%前後でしかないが、重錘を捕捉できなかった実験 D2 では重錘が停止していないため特に小さい。

実験 D2 で重錘を捕捉できなかった理由は支持ロープの破断であるが、実験 D1 および D4 でのネットの損傷が図-8(c) のように進んでいること、柱の変形による効果は最大重錘衝撃力と柱の曲げ剛性から 3~6kJ (kJ) 程度と推定できること、および表-4 の位置エネルギーを考慮して、4 辺をロープで支持された PE ネット 1 枚が捕捉できる落石エネルギーの限界を 110kJ とするのは妥当であろう。また、この限界値は、図-5 の静的載荷実験において PE ネット PE ネットのサイズがほぼ等しい S3, S4, S5 の吸収エネルギーが約 70kJ (kJ) であるのに比べて十分大きい。

### 3. まとめ

本研究では、静的載荷実験および重錘衝突実験により、PE ネットの耐衝撃性についての基本性能を確認した。実験では、PE ネットの耐衝撃性について、1 枚単独で 120kJ 程度、2 枚重ねた場合で 220kJ 程度の落石エネルギーを捕捉した。これら実際に捕捉したエネルギーは、PE ロープの破断ならびに PE ネットの損傷や柱の変形によるエネルギー吸収を割り引く必要はあるものの、落石対策工として使用するにあたって、機能的に問題ない数値と言える。

落石対策工として PE ネットを用いることが可能となれば、従来の落石防護柵の金網に替えて用いる防護工、斜面上の転石に対して上から PE ネットで覆い落下を防止する予防工など、幅広く適用できる。

今後、実際に PE ネットを落石対策工に適用していくに際し、次の課題があげられる。

#### (1) 支柱材質・形状の検討

本実験では、支柱に CFT を用いたが、CFT はコストが高いことから、PE ネットの低コストを相殺し、トータルコストで優位性が見出せないことが考えられる。したがって、安価かつ PE ネットの特性をいかにせる支柱材質・形状を採用する必要がある。

#### (2) 緩衝機構の採用

落石防護工として実績が増えている高エネルギー吸収タイプで採用されているような緩衝機構を併せて用いることにより、更に効果的にエネルギーを吸収できる可能性がある。

#### (3) 耐用年数の設定

PE ネットの唯一と言ってよい弱点は、熱や紫外線による耐候性である。仮設防護工として用いる場合はさほど問題とならないが、本設構造物として用いるに際しては、耐用年数が重要となる。昨今の社会資本整備にあつては、初期の建設コストを抑えることも重要であるが、構造物の使用期間において、適切に維持・更新を行うことにより、ライフサイクルコストを低減する考え方が取り入れられている。PE ネットを用いた落石対策工にあつても、PE ネットの交換を行い、かつライフサイクルコストを低減できれば、本設構造物としての適用も可能と考えられる。よって、PE ネットの劣化について実験・評価を行い、耐用年数を設定する必要がある。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.
- 2) 前川幸次，宮下裕：クリップ止めされたワイヤーロープ重複部のすべり特性に関する静的載荷実験，土木学会第 48 回年次学術講演会，I-656，pp.1460-1461，1993.
- 3) K. Maegawa and H. Yoshida：Collision Tests on a New Type of Rock Barrier，Proc. of EASEC-5，pp.1827-1832，1995.
- 4) 小畑康隆，他 3 名：エネルギー吸収型落石防護柵の衝撃挙動に関する実験的研究，土木学会第 54 回年次学術講演会，I-B313，pp.622-623，1999.
- 5) 細岡生也，他 6 名：衝撃荷重載荷による簡易型落石防護柵の基礎実験，土木学会第 56 回年次学術講演会，IV-327，pp.654-655，2001.