

PE ネットを用いた簡易型落石防護柵の重錘衝突実験

Weight impact tests on a simple and flexible Rock-fence using a PE-net

前川 幸次*, 田島 与典**, 岩崎 征夫***

Maegawa Koji, Tajima Tomonori, Iwasaki Masao

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

**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)

***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)

A rock-fence that protects vehicles against rock-falls is constructed out of posts, wire-ropes and a wire-netting. Those are usually made of steel. Since the special device has been developed to semi-fasten a wire-rope, the rock-fence is becoming to the manner against a rock-fall up to 1000kJ. The new type of rock-fence made of a polyethylene net is developed in this study, though its capacity for a rock-fall is 200kJ. A polyethylene net supported on four sides is investigated on the static-load test and the weight impact test. Then, the weight impact tests are carried out for the rock-fence made of posts, wire-ropes and polyethylene nets. It is found that a polyethylene net is effective in constructing a rock-fence easily and reducing the construction cost.

Key Words : rock-fence, polyethylene net, weight impact test

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

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¹⁾. 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^{2), 3)}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 に比べて飛躍的に拡大して 1000kJ 程度となった. 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 以下の小規模落石に対しての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^{4), 5)}.

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製ネット(以後, PE ネットという)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. ポリエチレンは, 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例では 10 年後の強度保持率 80%を得ている(表

-1 註 2)). 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生じず, PE ネットは安価で, 取替や再利用が容易であることから, 耐用年数がより明確になればライフサイクルコストの低減が可能な本設構造物としての適用の可能性もある.

本研究では, PE ネット単体の静的・落錘衝撃载荷実験および PE ネットを用いた簡易型落石防護柵の重錘衝突実験を実施し, PE ネットの耐衝撃性能の評価を行った. これら 3 種類の実験は簡易型落石防護柵を開発する過程で検討を加えながら実施したもので, PE ネットの素材は同じであるが寸法(幅×長さ)の統一は行われていない.

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 本撚りしたもの)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.

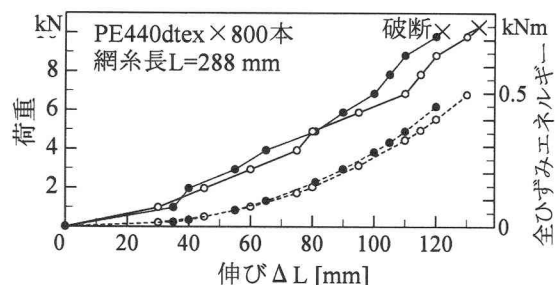


図-1 ポリエチレン網系の引張試験結果

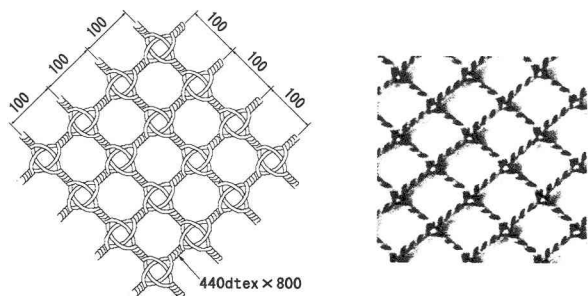


図-2 貫通型無結節網

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 ¹⁾	440dtex×800 本, φ9mm	軟化点	100℃
目合	200 mm (100mm 菱目)	耐水性	吸水なし
比重	0.94～0.96	耐候性 ²⁾	良

- 1) dtex は糸の線密度の単位 (g/10km) で、ここでは1本当たり 440 (g/10km) 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 (PE400dtex×36 本・緑色・10.5 年使用) の強度保持率は 80%。また、サンシャインウエザーメータによる素線の耐光試験 600 時間の範囲では時間にほぼ比例して劣化し、緑色 PE440dtex の強度劣化率は 0.033%/h で、黒色 PE 220dtex のそれは 0.024%/h を得ている (日東製網株式会社資料)。

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

2.2 PE ネットの静的載荷実験

(1) 実験概要

網糸は図-1 のように引張強度に至るまでは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。ネットの四辺には端部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 ボルトを介して基礎に固定された H 形鋼に連結した。U ボルトの直線部には 4 ゲージブリッジ回路を組み、圧縮試験機による荷重校正値を求めている。図-3(b) のように吊り具を取り付けた重錘 (頂

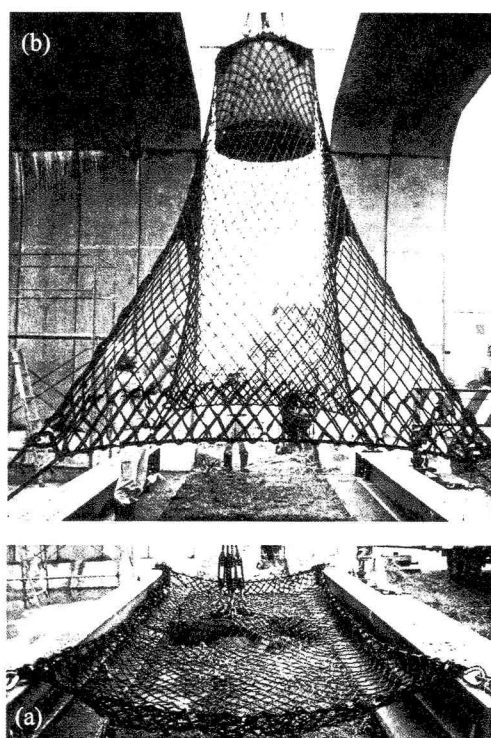


図-3 PE ネット静的載荷実験 (供試体 S6)

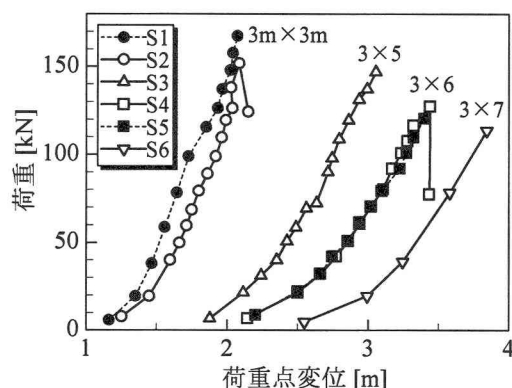


図-4 荷重—荷重点変位

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、各荷重値 (クレーンの引き上げ力で精度 0.5kN) における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、荷重値および U ボルトのひずみは安定するまで待って計測した。

(2) 実験結果と考察

図-4 は各供試体の荷重とゼロ点を H 形鋼上面とした荷重点変位の関係を表している。なお、供試体 S6 ではターゲットの位置が高くなり移動・設置に時間を要したため測定頻度が少ない。ネットの初期たるみが大きいため、荷重値 5kN でも大きな変位となる。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

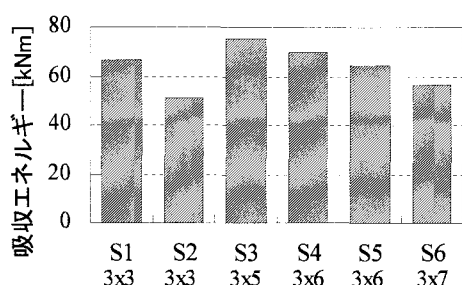


図-5 吸収エネルギー（静的荷重）

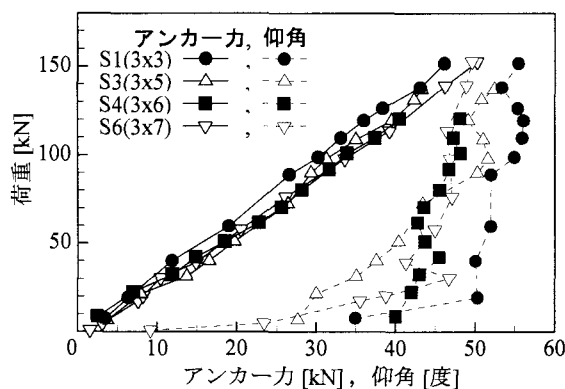


図-6 アンカー（Uボルト）張力とその仰角

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によると思われる。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荷重版を上昇させるのが危険に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が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ものと推定できる。

次に、PE ネットの支持用ロープを連結している U ボルトのひずみおよびその荷重較正值からアンカー力を求めた。さらに、4 隅の U ボルトの仰角 θ 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。

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

ここに、 P =荷重、 T_i =各 U ボルトのアンカー力である。アンカー力および仰角 θ と荷重の関係を図-6 に示す。図のアンカー力は 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力として 40kN (S4)～50kN (S6)、アンカー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 の荷重版に接する網糸の本数は少なくとも 18 本（＝900mm/100mm×2 方向）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 θ （ ≈ 45 ）よりも小さくなることはない。したがって、PE ネット荷重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。

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

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/m 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、荷重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。

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

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、荷重版（落石）に接する網糸がすべて破断しない場合でも落石はすり抜けると考えられるため、次節の実験的な落錘衝撃荷試験により PE ネットの性能を把握する必要がある。

2.3 PE ネット単体の落錘衝撃荷試験

(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荷試験を表-3 の 4 通りで行った。図-7 のように PE ネットを支持するために既設の構造物（水平な CFT 片持ちばり 2 本、塑性モーメント $M_p=550 \text{ kNm}$ 、初期曲げ剛性 $EI=27 \text{ MNm}^2$ ）を用いたため、PE ネットの寸法を幅 3.5m×長さ 5.6m とし、4 辺の端部折り返し部に PE ロープ（ $\phi 22$ 、両端ハート形シンブル付き、引張強度 60kN）を通し、その PE ロープを U ボルトを介して CFT 片持ちばり（図では、

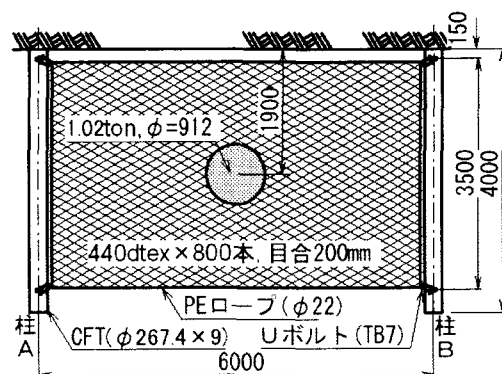


図-7 PE ネット単体の落錘衝撃荷試験平面図

表-3 PE ネット単体の落錘衝撃荷試験条件と結果

No.	ネット	重錘, 衝突高, 速度	実験状況
D1	1重	1022kg, 10m, 14.0m/s	4隅破損, 重錘捕捉
D2	1重	1022kg, 15m, 17.1m/s	4隅破損, ロープ破断, 滑落
D3	2重	1022kg, 15m, 17.1m/s	4隅破損, 重錘捕捉
D4	2重	1022kg, 20m, 19.8m/s	4隅破損, 重錘捕捉

柱A、柱Bとしている）と4隅で連結した。Uボルトにはひずみゲージが貼付されており、張力の計測に用いた。なお、PE ネットを2重にした実験 D3 および D4 においてもネット1枚ずつは異なる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、胴部直径912mm、高さ950mm、底部球面半径900mm、質量1022kgである。重錘のコンクリート面にひずみゲージ式加速度計（容量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 間隔でサンプリングを行った。

(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。全ての実験で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8(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。実際の防護柵では後述の図-13のように落石が地表（図-8では壁面側）に着地して停止するため防護柵の外へ跳ね出る危険はない。

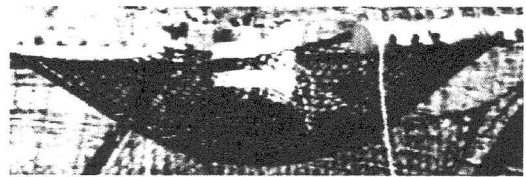
図-9(a)～(d)は各実験の重錘加速度から求めた衝撃力とUボルト張力の経時変化を示している。ただし、実験D3および実験D4におけるUボルト張力は上側のPE ネット1枚についての計測値である。実験D2については、柱B側のPE ロープの破断の兆候を $T_0+150\text{ms}$ におけるビデオ画像で確認しており、図-9(b)で波形が急変している時刻とほぼ一致する。

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前後から曲線の勾配が小さくなり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力が40～50kNであったことに関係があると考えられる。

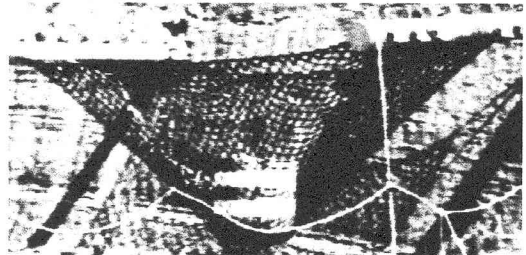
2本のPE ロープの間の角度を θ とし、PE ロープの張力を T 、Uボルト張力を F とすると次式が成り立つ。

$$F = 2T \cos(\theta/2) \quad (4)$$

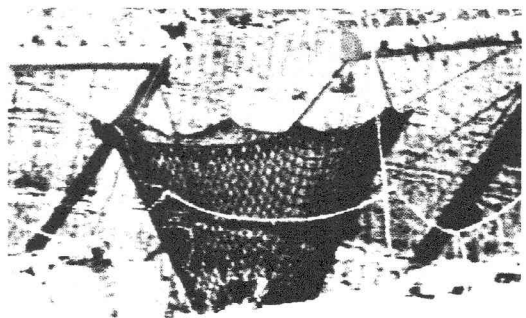
Uボルトの平均張力の最大値は70～80kNで、 F が100kNになっているUボルトもあることと $\theta > 0$ であることから、張力が最小でも50kNになっているPE ロープもある。したがって、引張強度が60kNのPE ロープでは実験D2と同様な破断に近い状態と考えられる。PE ロープの強度を上げるとPE ロープを通した網目の破損がさらに進行し、重錘の捕捉に支障をきたすと考えられる。また、実験D3に比べて衝突高の大きな実験D4では、衝撃力が大きいことやPE ロープを通した網目の損傷が広がっていることを確



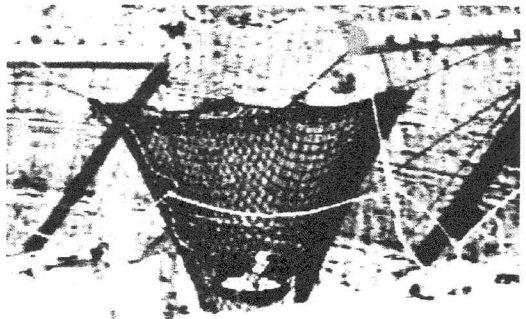
(a) $T_0-40\text{ms}$: 衝突前 40ms



(b) $T_0+60\text{ms}$: 衝突後 60ms



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



(d) $T_0+310\text{ms}$: 重錘跳ね上がり (上昇中)



(e) $T_0+1200\text{ms}$

図-8 落錘衝撃載荷実験状況 (No. D1, T_0 : 衝突推定時刻)

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

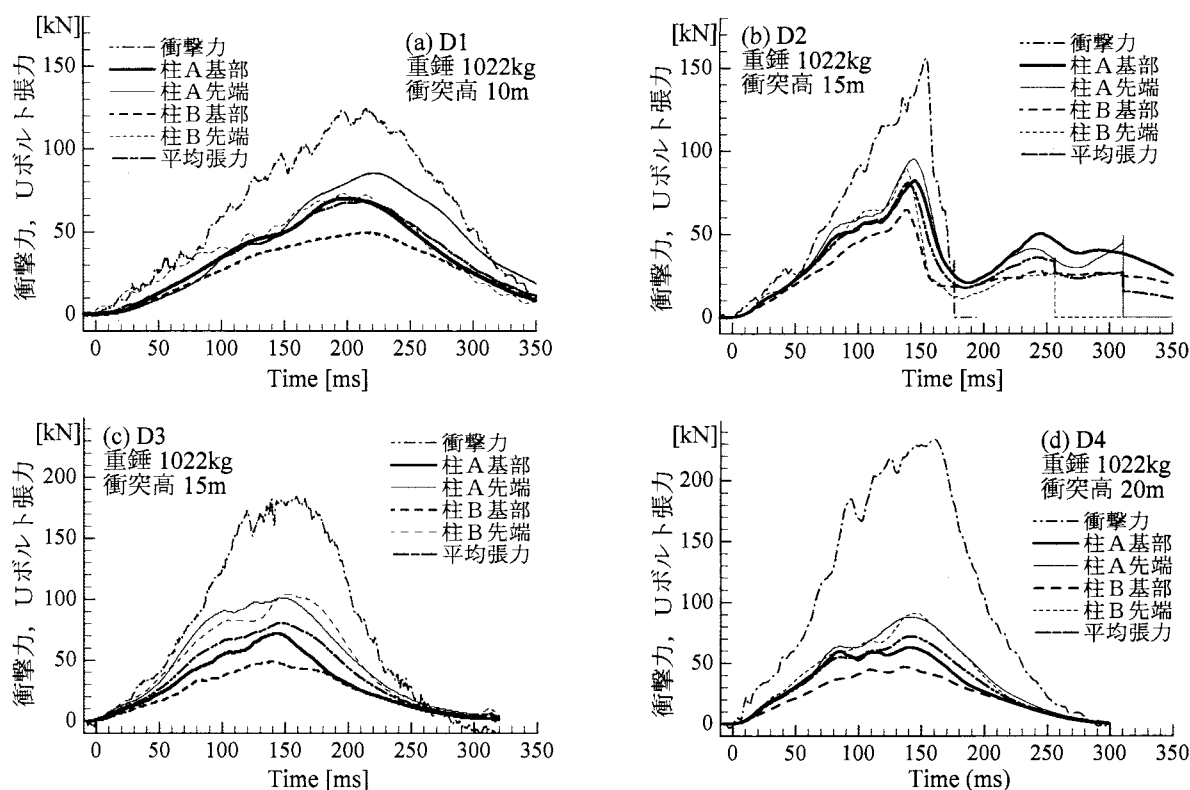


図-9 重錘衝撃力とUボルト張力の経時変化

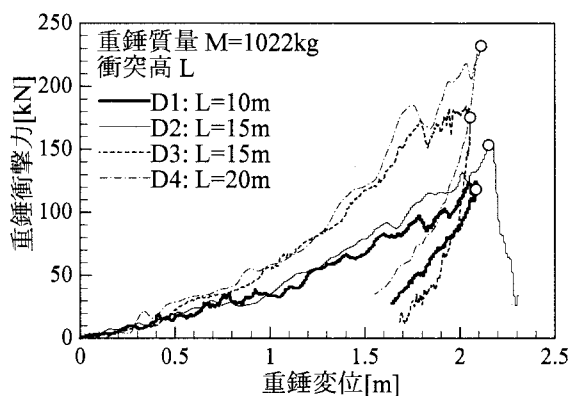


図-10 重錘衝撃力-変位

表-4 PE ネットの落錘衝撃载荷実験結果

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

注： d =高速度カメラ画像による推定値， L =衝突高

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がり、加速度から正確な鉛直変位を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剛性が高いことによる影響が現れている。

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 (=初期垂れ下がり量約 1.2m を含む衝突高 L +衝突による最大変位 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 の静的载荷実験において PE ネットのサイズがほぼ等しい S3, S4, S5 の局所的な損傷状態で評価した吸収エネルギーが約 70kJ (kJ)であるの比べて十分大きい。

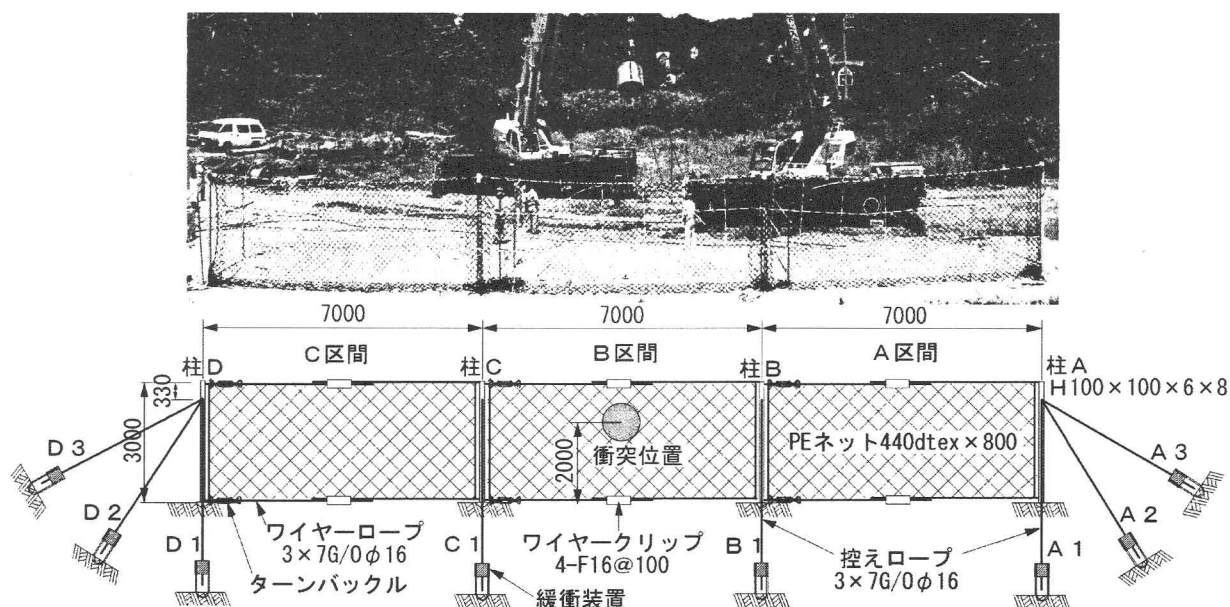


図-11 PE ネットを用いた簡易型落石防護柵の重錘衝突実験概略図（3スパン）

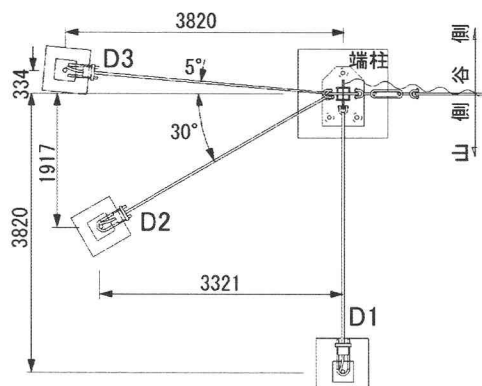


図-12 控えロープの配置平面図

2.4 PE ネット製簡易型落石防護柵の重錘衝突実験 (1) 実験概要

前2節では4辺をPEロープで支持したPEネット単体の性能に着目した静的載荷実験および落錘衝撃載荷実験を行った。本節では、PE ネット製簡易型落石防護柵の実物モデルに対する重錘衝突実験を行い、特性や問題点を検討する。

図-11 に示した PE ネット製簡易型落石防護柵の基本構造は、①有効柵高：3.0m、②支柱間隔：7.0m、③支柱構造：H形鋼・上部控えロープ形式・支柱下端は衝突方向の回転にはピン構造であるが、左右方向の回転にはピンのギャップの範囲（支柱の可倒角度5°）でヒンジ構造・支柱下端のピン構造は山側への転倒を抑制してあるので、谷側には控えロープを設けない（図-12 の端柱控えロープ配置図を参照）、④緩衝装置：ロープ把持部のすべり摩擦力（最大値 55.2kN、平均値 24.5kN）を利用、⑤PE ネット：3m×7m・ワイヤーロープで4辺を支持・柱 B および柱 C では隣接ネ

ットと谷側で連結、となっている。

PE ネットを支持している横方向ワイヤーロープは、2本を1組として各区間の中央部でクリップ4個を用いて連結し、ターンバックルで防護柵の所定の寸法を確保した（ネットの取付要領は前2節と同じであるが、PE ネットの自重が面内に作用するため図-3(a)や図-8(a)のようなたわみはない）。中央部のクリップ4個は、クリップの締め付けトルクを管理しすべり摩擦によりエネルギー吸収とロープ定着部への衝撃力の緩衝効果を期待するもので²⁾、滑車（質量 420kg・衝突速度 8m/s）とクリップ連結されたワイヤーロープ（3×7G/0φ16、クリップ F16 を4個、締め付けトルク 49Nm）の室内衝突実験を行い、滑り摩擦力の最大値および平均値としてそれぞれ 20.6kN および 7.8kN を得ている。締め付けトルクを大きくすると、安定した滑り摩擦力を得るのが困難なため、ロープ破断強度 157kN に比べて十分に小さくなっている。また、連結部の抜け出しを防ぐために滑り長 2.0m を確保し、ロープ端にはストッパーを取り付けている。

衝突方法は、2.2 節の静的載荷実験の載荷版を改良した重錘（鋼コンクリート製、胴部直径 900mm、胴部長さ 870mm、先端部平底径 600mm、先端部長さ 100mm、質量 1600kg）を図-11 上段の写真のように、クレーン1で所定の衝突位置で吊り下げ、クレーン2で落下高まで山側に引き上げ、離脱落下し円運動をさせる。エア式離脱装置の離脱完了までの時間差を考慮して、衝突位置の前方水平距離 1.5m に重錘が達すると光電管スイッチによりクレーン1のエア式離脱装置が作動し、所定の運動エネルギーを有する重錘が防護柵にほぼ水平に衝突する。重錘の寸法は 2.3 節の落錘衝撃載荷実験とほぼ同じであるが、円運動による衝突では十分な落下高の確保が安全上困難なため、鋼重を増すことで運動エネルギーを確保している。衝突の例を図

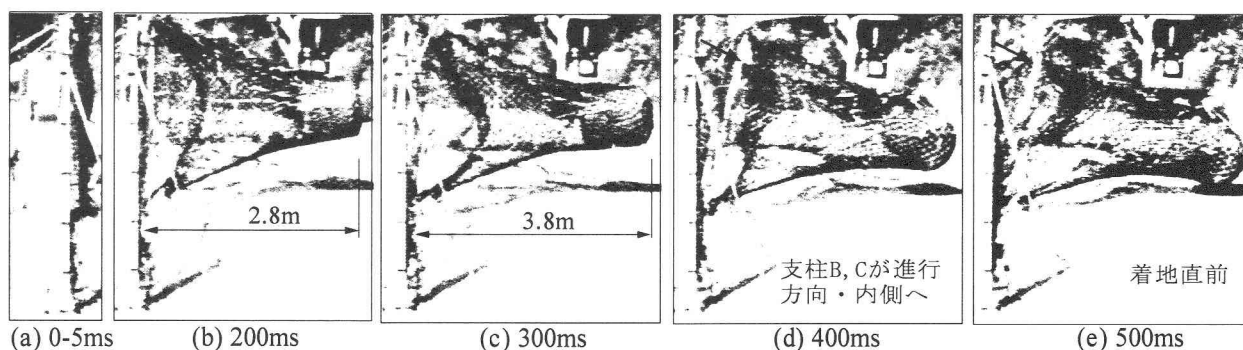


図-13 防護柵重錘衝突実験 (No. F6) のビデオ画像

表-5 防護柵の重錘衝突条件と結果 [衝突推定速度・最大変位：ビデオ画像解析による]

No.	スパン・衝突位置	区間 A, B, C ネット枚数	落下高 (m)	衝突エネルギー (kJ)	衝突理論速度 (m/s)	衝突推定速度 (m/s)	最大変位 (m)	最大重錘衝撃力 (kN)	重錘捕捉
F1	1・A	1, -, -	6.5	102	11.3	9.7	4.4	92	○
F2	3・A	1, 1, 0	6.5	102	11.3	12.8	3.8	82	○
F3	3・B	1, 1, 1	6.0	94	10.8	11.6	3.7	53	○
F4	3・B	1, 1, 1	10.0	157	14.0	-----		118	×
F5	3・B	1, 2, 1	10.0	157	14.0	14.7	4.1	205	○
F6	3・B	1, 2, 1	12.5	196	15.7	15.3	4.1	150	○
衝突実験後の状況									
F1	ネット角部（支柱 A 上側のみ）破損・控えロープ D1, D2 および上下横ロープが滑動								
F2	C 区間は上下横ロープのみ・ネット損傷軽微・支柱 B の下端が損傷・A, C 区間の上下横ロープが滑動								
F3	ネット損傷軽微・全区間の上横ロープおよび控えロープ A3 が滑動								
F4	B 区間のネットが衝突部で破断し、重錘が貫通・B 区間の上下ロープおよび控えロープ B1 が滑動								
F5	ネット損傷軽微・全区間の上下横ロープおよび控えロープ B1, C1, D3 が滑動								
F6	ネット損傷軽微・全区間の上下横ロープおよび控えロープ B1, C1 が滑動								

-13 に示す。

実験は表-5 の 6 回の衝突条件について行い、実験毎に PE ネットおよびワイヤーロープは取り替えた。実験 F1～F3 の落下高 (6.0m, 6.5m) は、前節で得られた PE ネット 1 枚が捕捉できる落石エネルギーの限界値 110kJ に基づいて決めた。実用上は 1 スパンの防護柵を用いることはないが実験 F1 では 1 スパンの防護柵とし、図-11 に示す 3 スパンの支柱 B を支柱 D で置き換えている。実験 F1, F2 および F3 では衝突区間と隣接区間の影響を検討する。実験 F4, F5 および F6 はより大きな落石エネルギーに対する検討であり、実験 F5 と F6 では衝突区間の PE ネットは 2 重になっている。ただし、横ワイヤーロープは 1 本とし、PE ネット 2 枚の端部折り返し部を一緒に支持している。

重錘衝撃力は重錘の重心部に取り付けたひずみゲージ式 3 方向加速度計 (容量各 50G) を用い、各ロープの張力は緩衝装置の U ボルトおよび水平方向ワイヤーロープのターンバックルのボルト部に貼付した軸ひずみゲージを用いて 0.2ms 間隔で計測した。

(2) 実験結果の概要

表-5 には実験結果の概要も示している。実験 F4 以外は PE ネットに軽微な損傷を生じたが重錘を捕捉することができた。衝突推定速度および最大変位は図-13 のように側面から 5ms 間隔で撮影したビデオ画像の解析により求めた。実験 F1 を除いて推定速度は理論値よりも大きい。自由落下と見なしてよいであろう。最大変位は支柱間隔 7m

の 53～63% の範囲であり実験 No. による大差はないが、PE ネットの角部が大きく破損した 2.3 節の落錘衝撃実験でも支柱間隔 6m の約 40% でしかなかったのに比べれば大きい。これは控えロープや横ワイヤーロープの滑りによる伸びの影響である。

図-14 は各実験の重錘衝撃力の経時変化を表している。重錘衝撃力 F_x , F_y および F_z は重錘に固定された加速度計の座標に対応しており、それぞれ衝突時の進行逆方向、鉛直上方向および進行右方向を正值とした加速度 G_x , G_y および G_z に重錘質量 1600kg を乗じた値である。また、時刻 0 は重錘離脱時の G_y (F_y) の変化とその後の G_x (F_x) および横ロープの張力の立ち上がりに基づいている。 G_y あるいは G_z の変化は重錘の方向に影響し、特に G_y が大きく変化する時刻には重錘が着地している。これは図-13 に示す実験 F6 の高速ビデオ画像とほぼ一致している。

各実験の重錘着地時刻は、重錘が PE ネットを突き破った実験 F4 では 900ms、重錘を捕捉したそれ以外の実験では 400～550ms で生じている。したがって、表-5 に示す最大重錘衝撃力は着地前の合成衝撃力 F の最大値で表すことにする。実験 F4 のみ PE ネットの衝突部が破断して重錘は貫通した。その最大重錘衝撃力は 118kN であり、PE ネット 1 枚の実験 F1～F4 の中では最も大きい。しかし、PE ネットの寸法がほぼ同一の落錘衝撃実験 D1 (図-9(a)) では、僅かではあるが F4 より大きい衝撃力 124kN でも衝突部は破断しなかった。実験 F4 の重錘先端部は直径 600mm

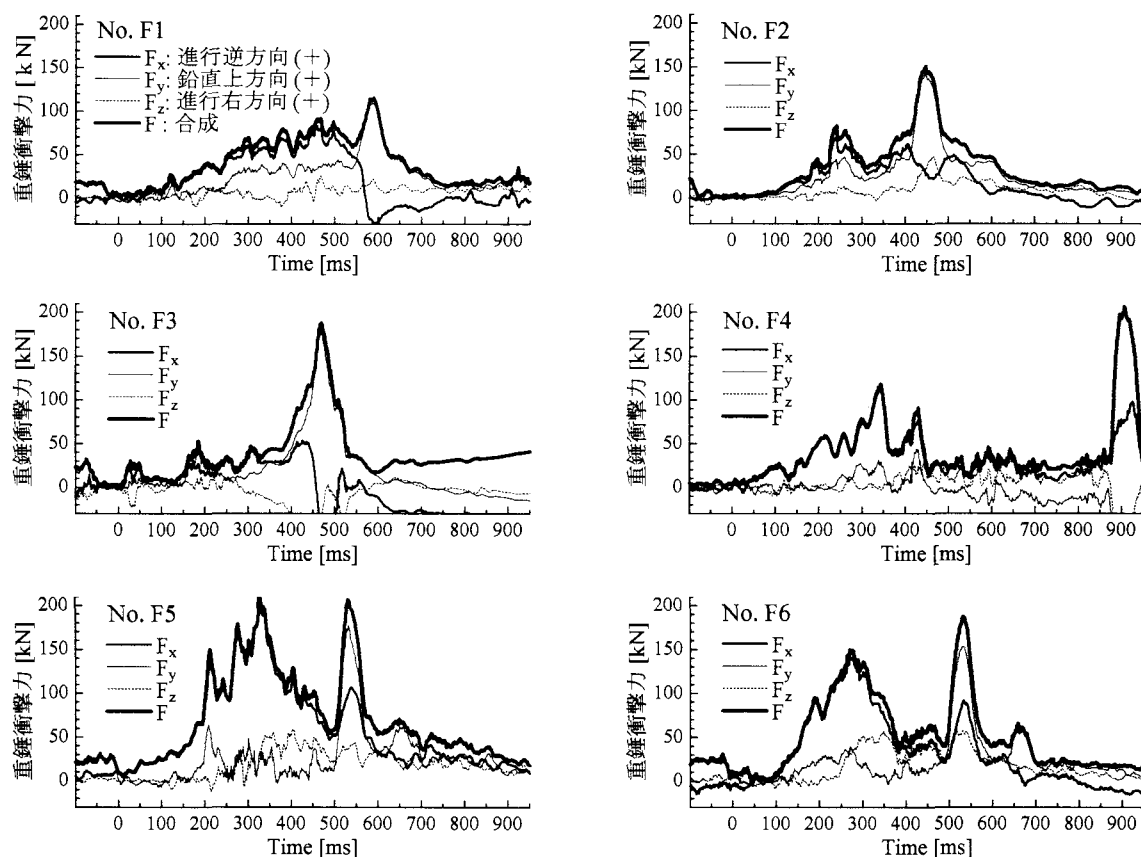


図-14 重錘衝撃力の経時変化

の平底面で、落錘衝撃実験 D1 のそれは半径 900mm の球面であることの影響が皆無とは言えない。しかし、落錘衝撃実験から得られた PE ネット 1 枚の捕捉できる重錘エネルギーの限界は 110kJ であることから、実験 F4 ではロープの緩衝装置によるエネルギー吸収が期待できるとはいえ重錘エネルギーの大きいことが破断に影響したと考えられる。

図-15 は主要なロープ張力の経時変化を表している。図中の記号「A1」～「D3」は図-11 の控えロープの名前に対応し、また、B 区間の上側横ロープであれば「B 上」のように表している。各ロープの滑り張力は、前述のように控えロープの緩衝装置（最大滑り摩擦力 55.2kN、平均滑り摩擦力 24.5kN）と横ロープのクリップ（最大滑り摩擦力 20.6kN、平均滑り摩擦力 7.8kN）を用いて設定したが、横ロープの張力は設定値を大きく超えているものがある。これはクリップ連結の滑り特性が安定していないことやクリップが PE ネットの端部折り返しの網目と絡まったこと

などが原因と考えられる。また、途中で計測できなくなったロープや実験終了時の張力がゼロ点から大きく離れているロープがある。これは、控えロープの延長部やネットがひずみゲージを打撃したためと思われる。

表-6 は、データ欠損による実験 F4 を除く各実験の横ロープのクリップ連結部と控えロープの緩衝装置における滑り量（実験後の標点のズレ）、およびその滑り量と実験室内で得られているそれぞれの平均滑り摩擦力から推定した滑り摩擦エネルギーと重錘エネルギーに対する分担率(%)を表している。なお、図-15 のロープ張力が設定した最大滑り摩擦力を超えていても滑り量を生じていない場合もある。

(3) 実験結果の考察

以下に、図-14, 15 および表-6 に基づいて考察する。

a) スパン数の影響 (F1: 1 スパン, F2: 3 スパン)

図-14 から最大衝撃力は、F1 がわずかに大きく 92kN で F2 が 82kN である。また、F1 は着地までの時間も長い。

表-6 横ロープおよび控えロープの滑り量 (cm)

No.	横ロープ							控えロープ									滑り摩擦エネルギー		
	A 上	A 下	B 上	B 下	C 上	C 下	計①(m)	A1	A2	A3	B1	C1	D1	D2	D3	計②(m)	①×7.8*	②×24.5*	合計 Es (kJ)
F1	200	111	—	—	—	—	3.11	0	0	0	—	—	5	3	0	0.08	24.2 (24)	2.0 (2)	26.2 (26)
F2	130	80	0	0	118	9	3.37	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	26.3 (26)	0.0 (0)	26.3 (26)
F3	101	0	64	0	123	0	2.88	0	0	1	0	0	0	0	0	0.01	22.5 (24)	0.2 (0)	22.7 (24)
F5	83	16	97	40	130	59	4.25	0	0	0	1	70	0	0	2	0.73	33.2 (21)	17.9 (11)	51.1 (32)
F6	90	23	110	130	130	32	5.15	0	0	0	50	29	0	0	0	0.79	40.2 (21)	19.4 (10)	59.6 (31)

* クリップ連結および緩衝装置の室内実験による平均滑り摩擦力 (kN), () 内は重錘エネルギーに対する分担率 ↑

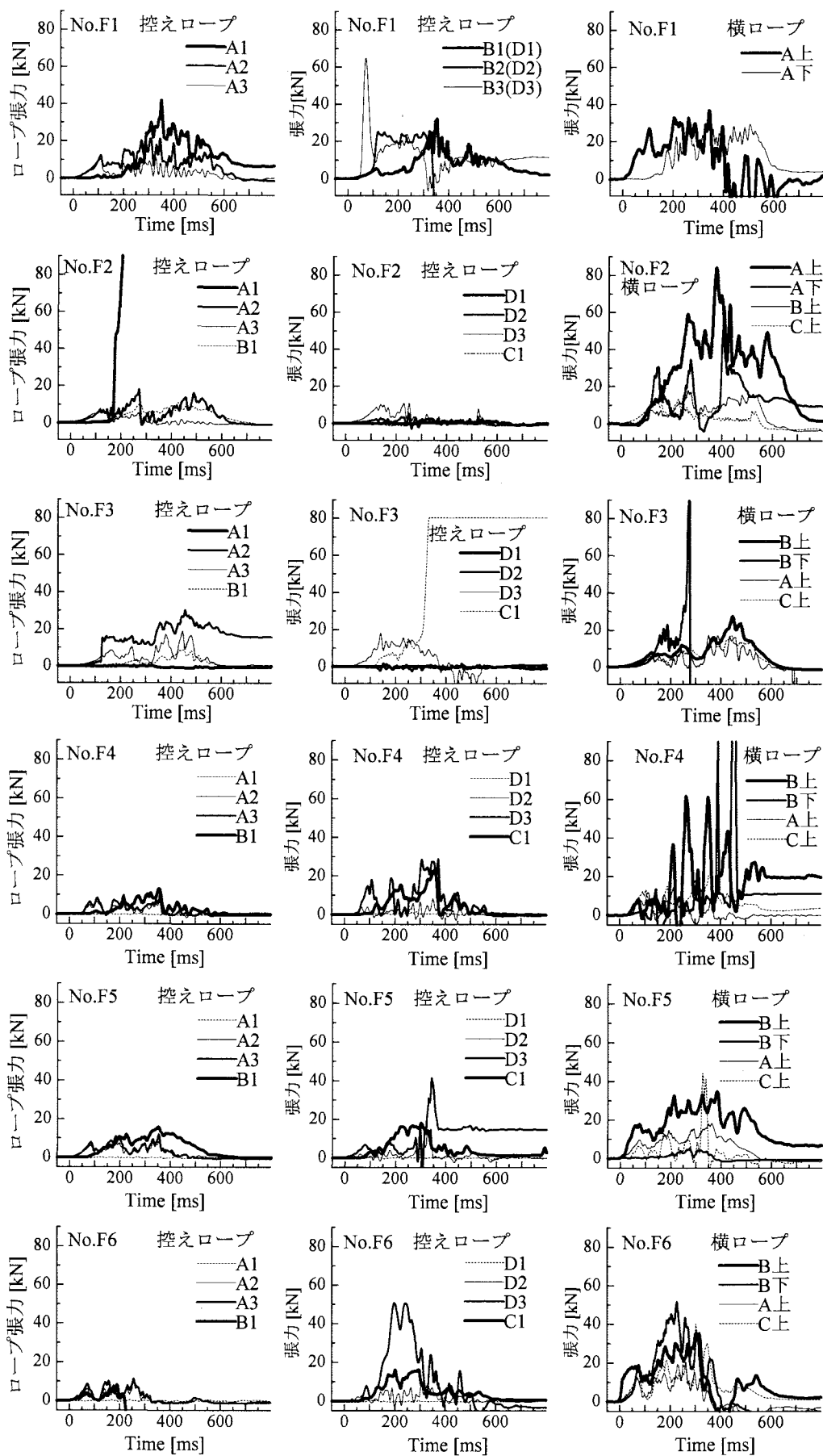


図-15 実験F1～F6における各ロープ張力の経時変化

図-15 から F2 では重錘の着地以降 (370ms~) も横ロープや控えロープに張力が生じており、重錘が進行方向の速度すなわち運動エネルギーを有する状態で着地したことを表している。F1 の控えロープ張力は F2 に比べて明らかに大きい、横ロープ張力は F2 が F1 より大きい。また、F2 では区間 B、C の横ロープ張力が発生しており、区間 C では上横ロープの滑り量も大きい。クリップ連結の滑り張力の設定値が小さいため、ロープの滑り摩擦エネルギーはほとんど横ロープに依存する結果となり、結果的には F2 では控えロープの緩衝装置は必要でない。表-6 に示した滑り摩擦エネルギーは、F1 と F2 の防護柵のスパン数が異なるにもかかわらず、間接的な推定値ではあるが一致している。また、F2 では控えロープ B1 が滑らずに区間 C の横ロープが大きく滑っているため、支柱 B が区間 A 側へ傾き、下端の防護柵面内方向の可倒角度を越えたため下端に損傷を生じた。

b) 衝突区間の影響 (F2 : 区間 A, F3 : 区間 B)

F3 の位置エネルギーは F2 の 92%であるが、F3 の最大重錘衝撃力 53kN は F2 の 67%でしかない。F3 の横ロープ張力は 3 区間とも同程度に発生し、端支柱 A、D の防護柵面内方向の控えロープ (番号 2, 3) の張力の発生も顕著である。また、F3 の横ロープ滑り量は区間 B よりも区間 A、C に大きく生じている。したがって、隣接区間 A、C の緩衝効果により F3 は損傷も少なく重錘を捕捉できたと言える。F3 の滑り摩擦エネルギーは F2 の 86%であるが、F3 の位置エネルギーが F2 の 92%であることから妥当な結果と言える。

c) 重錘衝突エネルギーの影響 (F4, F5 : 157kJ, F6 : 196kJ)

F4 の滑り摩擦エネルギーは不明であるが、F4 の横ロープ張力 B 上と B 下の波形は大きく振動しており、ロープが滑っていることが明確である。F4 および F5 の横ロープの本数が同じであることから、F4 の滑り摩擦エネルギーが F5 と同じ 51.1kJ であったと仮定すると、重錘衝突エネルギー 157kJ との差は 105.9kJ となる。これは、落錘衝撃実験から推定した PE ネット 1 枚が捕捉できる重錘エネルギーの限界値 110kJ と大差がないことより、F4 が重錘を捕捉できなかったことを説明できる。重錘衝突区間の PE ネットを 2 重にした F5 と F6 の最大重錘衝撃力は、重錘衝突エネルギーの小さな F5 の方が F6 の 1.37 倍になっている。F6 の横ロープ張力は F5 に比べて全横ロープで平均的に発生し、F6 の横ロープの合計滑り量が F5 の 1.21 倍になっていることから、F6 ではロープの緩衝効果がより働いたと言える。

d) 重錘衝突エネルギーの分担率

表-6 に示したロープによる重錘衝突エネルギー分担率は、F1, F2 および F3 のように控えロープが滑らない場合の横ロープで約 25%である。一方、F5 および F6 のように重錘衝突エネルギーが大きく控えロープが滑る場合、横ロープの分担率は 21%で、控えロープのそれは約 10%である。実験数は限られているが、異なる重錘衝突条件に対して推定した分担率がほぼ等しいことから、各ロープの限界滑り長さや PE ネットが吸収できるエネルギーの限界値に

達するまでは、分担率を設計に適用できる可能性がある。ただし、ここで推定した分担率は本防護柵固有の値であり、横ロープと控えロープの滑り特性の組合せによって変化すると考えられる。

3. まとめ

本研究では、PE ネットの静的載荷実験と落錘衝撃実験、および PE ネット製簡易型落石防護柵の重錘衝突実験により、それらの耐衝撃性能を確認し、以下のことがわかった。

(1) PE ネット 1 枚および 2 枚重ねの実験結果から 1 枚当たり 110kJ 程度の落石エネルギーを捕捉できる。ただし、PE ネットの支持ロープの発生張力が大きくなると PE ネットの損傷が大きくなる可能性があるため、支持ロープ張力約 60kN 以下がよいと思われる。

(2) PE ネットの損傷が進行しないよう支持ロープの張力を低く抑える緩衝装置を取り付けた PE ネット製簡易型落石防護柵では、横ロープおよび控えロープによる落石エネルギーの分担率が約 25~30%であり、残りを PE ネットが分担すると考える落石エネルギーの収支に基づく設計が可能である。

ところで、PE ネットは熱や紫外線の下での耐候性が問題視される。仮設防護工としては問題にならないが、本設構造物として用いるに際しては、耐用年数が重要になる。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ことも重要である。PE ネットを用いた落石防護柵における PE ネットの交換は容易であり、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。したがって、今後は PE ネットの劣化について実験と評価を行い、耐用年数を設定する必要がある。また、本研究では重錘エネルギーで評価したが、衝突速度の影響、すなわち小さい重錘直径 (質量小) で衝突速度が大きい場合の影響について検討の余地がある。

最後に、東幸弘・伊藤秀敏・山本吉郎君 (当時金沢大学学生)、金森藤平商事(株)および関係各位に謝意を表します。

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) 田母神宗幸, 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.

(2004 年 9 月 17 日受付)