

技術報文

繊維素材を用いた落石対策工の研究

前田工織（株）斜面環境保全推進部 吉田 眞輝

1. はじめに

日本は国土の約 70%が山岳地で山地災害の発生しやすい地形である。近年では気候の変化による大雨をはじめ、地震の多発などさらに斜面災害が発生しやすい状況にある。

発生頻度の高い落石対策は 1990 年台初頭から使われ始めた高エネルギー柵など進化を遂げ、近年では繊維素材を用いた対策工も開発され、防災・安全対策に広く使用されている。

その中、平成 29 年に改訂された落石対策便覧¹でこれまで基準がなかった高エネルギー柵の評価手法が明確に記載された。これまでも高エネルギー柵は実証実験を元に評価されてきたが、開発側の独自手法であり評価法にばらつきがみられた。特に繊維素材は従来の鋼製製品に比べ歴史も浅いことから、従来工法のような信頼性の向上が得られにくい状況であった。

今回の改定で評価手法に統一性ができたことで、今後の信頼性向上につながると考え同便覧手法による実証実験を実施した。本文では実証実験内容と今後の技術展開について見解を述べたい。

2. 落石対策工の歴史と落石対策便覧

(1) 落石防護工の歴史

落石対策工は 1960 年代初頭に金網・ワイヤーケーブルを用いた構造として実証実験された。その後 1990 年代にヨーロッパよりリング式ワイヤーネット工法が導入されこれまでコンクリート製の重構造物であった大規模落石対策に対し、コンパクトなフェンス形状のタイプとなり高エネルギー柵の先駆けとなった。同じ時期に日本製の高エネルギー柵が開発されてからは同タイプの工法が続けて開発され、2010 年代中盤までに国土交通省 NETIS に登録される工法だけで 40 工法を超えていた（筆者調べ）。本文で紹介する繊維素材の高エネルギー柵も 2010 年前後に開発されたものである。

(2) 落石対策便覧の概要

落石対策便覧は昭和 58 年 7 月（1983 年）に初版が発刊された。その内容は基準的な記載は少なく、事例や実験に基づく紹介事例が多かった。その後平成 12 年 2 月に第 2 版が発刊され、その中では現在よく使用されている H 型鋼や金網を使用した防護柵の設計手法や必要柵高さの基準などについて記載され、より実務的なものとなった。それから 20 年近く落石に対する実務書として利用されてきた。その期間に各法令をはじめ、道路土工構造物技術基準²による性能規定、新工法の発展に対する基準の整備などへの対応が必要となり平成 29 年 12 月およそ 17 年ぶりに改定となった（以後改定便覧）。改定内容で特に①性能規定②性能照査実験法が大きな内容となる。

3. 改定便覧内容

(1) 性能規定

落石対策便覧改定前に平成 27 年 3 月道路土工構造物技術基準が発刊され道路防災における道

路構造物に求められるレベルが設定され、落石対策工はレベル2基準を有するとされた。これは改定便覧にも反映され、今回新たに定められた性能照査法による実証実験をクリアするものがレベル2以上の性能とされた。

(2) 性能照査条件

改定便覧に示す主な条件を表-1に示す。

表-1 実証実験共通条件

項目	衝突速度 (m/s)	支柱スパン	スパン長 (m)	重錘形状
設定値	25.0	3	任意	多面体

実験条件で大きなポイントは衝突速度が統一されたことである。過去に実施されている実験は位置エネルギーによる条件設定が多く、同一重量の重錘を用いて、衝突スピードで入力エネルギーを変化させていた。その場合重錘重量が大きいほど、低い速度で設置面積が大きくなることになり、同じ入力エネルギーであっても速度が速いものに比べ比較的有利に働くと考えられる。位置エネルギーと運動エネルギー算出式を式1)、2)で示す。

$$\text{位置エネルギー } E = m \cdot g \cdot h \quad \dots 1)$$

$$\text{運動エネルギー } E = 1/2 m \cdot V^2 \quad \dots 2)$$

E : 落石エネルギー (kJ)

m : 落石質量 (t)

g : 重力加速度 (m/s²)

h : 落下高さ (m)

V : 落石速度 (m/s) ($=\sqrt{2 \cdot g \cdot h}$)

100kJのエネルギーとしたとき式1)で0.5tの重錘であれば落下高さは約20.0mとなり落下速度は19.8m/sである。式2)で落下速度を改定便覧の25.0mとした場合100kJでm=0.32tとなる。落石の単位重量を26kN/m³とし球体に換算した直径では約72cmと約62cmとなり10cm程度(約14%)小さくなる。すなわち重錘重量を一定として落下高さで入力エネルギーを調整した場合、大きな重錘を使用すれば速度が遅く設置面積が広くなり使用する重錘で実験条件にばらつきがでる。今回の改定で設定された一定速度での実験ではエネルギーによって重錘重量を変化させる必要があり、その場合、式2)によりエネルギーが算出されるため、mは一定となり同一条件での実験となる。

今回の改定で条件設定が一定になり評価の統一性ができたため、本実験をクリアした構造は素材に関係なく同一性能として評価することができる。

4. 実験体構造及び構造部材

(1) 実験体の構造

実験体の標準図(正面)及び断面設置図を図-1に示す。繊維ネットは伸び強度があり衝撃吸収性が高いが、その分落石衝突時の変形量が大きいため防護対象からの離隔を取る必要があり、斜面上での設置となる。本構造は阻止面の大きな変形でエネルギーを吸収することが特徴で、支柱部材への負担(衝撃力)が小さくなる。そのため斜面上で基礎構造含め簡易的な構造となり繊維ネットの特性を十分発揮できる構造として採用した。

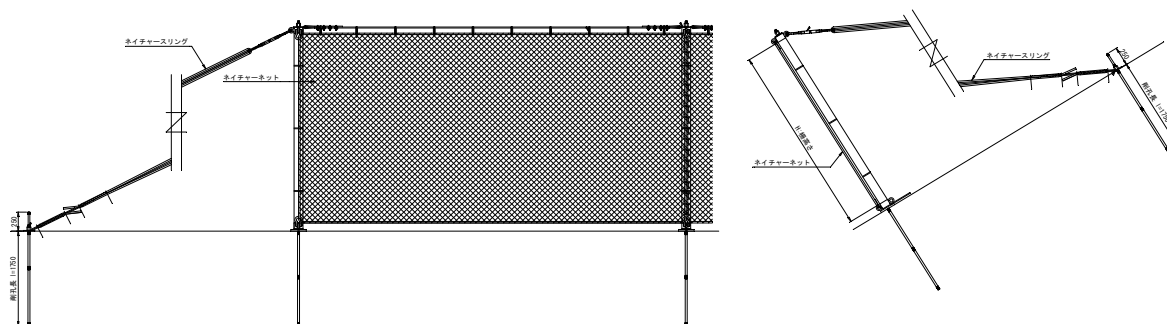


図-1 実験体構造(正面および断面図)

(1) 構造部材

a) ラッセル網

阻止面には極太高強度ラッセル網(以後Nネット)を採用している。実験にはNネット単体とNネットの衝突部保護材としてモノフィラメントを挿入した剛性のあるラッセル網(以後Gネット)を併用した2タイプを使用した。NネットおよびGネットの物性を表-2、ネット外観を写真-1~3に示す。

表-2 繊維製防護ネット物性

項目	Nネット	Gネット
素材	ポリエステル製ラッセル網	複合ポリエステル製ラッセル網
構成 (フィラメント)	1720 dtex×144本(マルチ)	1720 dtex×24本(マルチ) 11500 dtex×1本(モノ)
目合い(mm)	50	25
引張り強さ(N)	6000	950
伸び率(%)	30	30

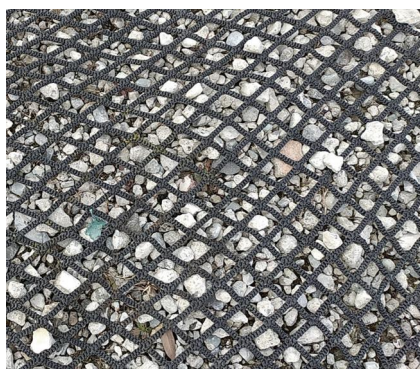


写真-1 Nネット外観

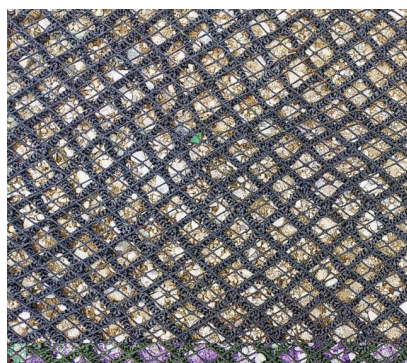


写真-2 Gネット併用外観

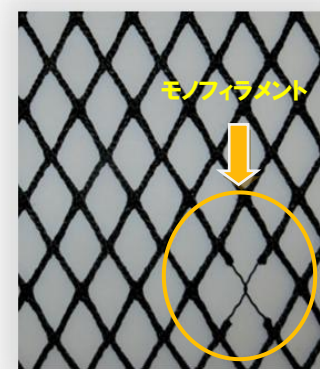


写真-3 Gネット外観

a) 外周ロープ

ネット形状を成型する周回ロープの物性を表-3 に示す。ネットが受けた衝撃力を緩和するため特殊な高伸度素材を用いている。写真-4 に外観、図-2 に形状図を示す。

表-3 周回ロープ特性

素材	表層材：ビニロン 芯材：ポリエステル
呼称太さ (mm)	φ20
引張強度 (kN)	20
伸び率 (%)	140

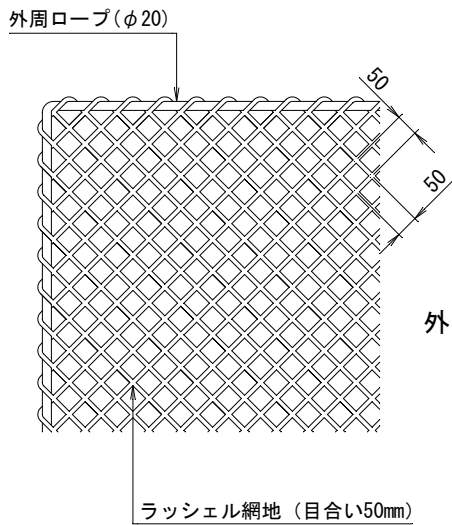


写真-4 N ネット外周ロープ

図-2 N ネット構造図

5. 実証実験

(1) 実験概要

ここでは改定便覧に準拠し実施した繊維製防護柵の性能評価実験について紹介する。図-1 に実験設備配置を示す。

a) 実験条件

改定便覧内容に準拠し以下の条件で実験を実施した

- ・ 実験方式：自由落下 落下高さ 32.0m 以上 25.0m/s (時速約 90.0km)
- ・ 重錘形状および材質：多面体 外枠鉄板・内容物 コンクリート
- ・ 実験スパンおよび実験延長：3 スパン (3×5.0m=15.0m)
- ・ 柵高さ：2.5m、3.0m (H=2.5m 50kJ、100kJ H=3.0m 150kJ 全5種類)
- ・ 衝突角度：阻止面に対し直角
- ・ 衝突位置：スパン中央

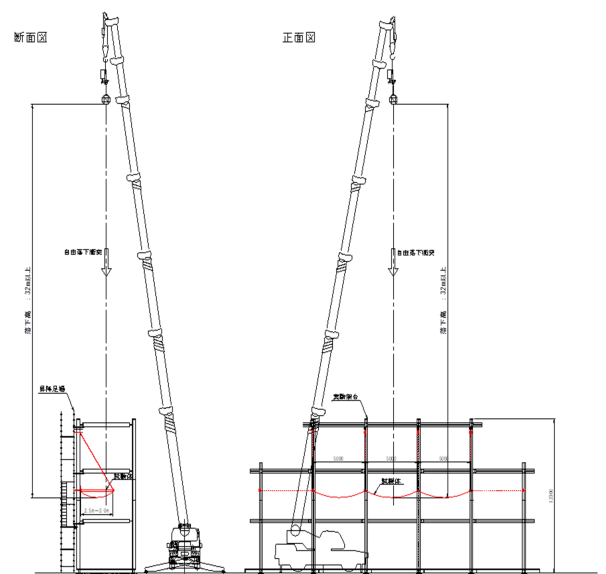


図-1 実験設備配置図



写真-5 実験設備（正面）



写真-6 実験設備（側面）

重錘形状は「落石対策便覧」で示される「実験による性能検証法」に準拠した多面体とし、材質も同じく「実験による性能検証法」に準拠し、密度は $2,300\sim 3,000\text{ kg/m}^3$ とした。（外周鉄板と中詰めコンクリート製）ただし、形状については多面体との規定のみであり詳細な形状については記載がなく

EOTA（European Organisation for Technical Approvals、欧州技術認証機構）が定めるガイドライン³⁾に示される形状とした。また製作した重錘は製作毎に重量の確認を行った。写真-7に形状を示す。E=200kJ 実験用として製作した重錘の重量測定時である。



写真-7 実験用重錘

表-4に実験ケースを示す。落石エネルギーは改定以前の実証法で適用されていた E=50kJ、100kJ、150kJ の3 ケースで評価した。速度を固定しているため各ケースの入力エネルギーとなる重錘を用意して実験を実施した。

柵高さは2.5m および3.0m とした。これは改定便覧における経験上の落石跳躍量を考慮した防護柵の必要柵高さを参考¹⁾に設定した。

表-4 実証実験条件一覧表

タイプ (kJ)	柵高さ (m)	スパン数・間隔	実験スパン	重錘質量 (t)	重錘落下高 (m)	重錘衝突速度(m/S)	衝突時エネルギー (kJ)
50	2.5	3@5.0m	中央	0.17	32 以上	25.0 以上	50 以上
	3.0						
100	2.5	3@5.0m	中央	0.48	32 以上	25.0 以上	100 以上
	3.0						
150	3.0	3@5.0m	中央	0.61	32 以上	25.0 以上	150 以上

50kJ の実験ではN ネットのみ、100kJ、150kJ の実験ではN ネット阻止面のダメージを軽減できるようにG ネットを阻止面に敷設し実施した。

b) 計測項目

表-5 に計測項目の一覧を示す。図-2 には計測機器設置個所を示す。加速度計からは重錘加速度を積分し衝突速度および変位を算出し重錘質量を積することでエネルギーを確認した。

表-5 実証実験条件一覧表

使用機器	目的
加速度計	衝突時の重錘加速度の計測
ひずみ計	衝突時に控え材に作用する荷重の計測
高速度カメラ	重錘変位の測定
光波測距儀	衝突時の速度を確保するため落下高さの計測

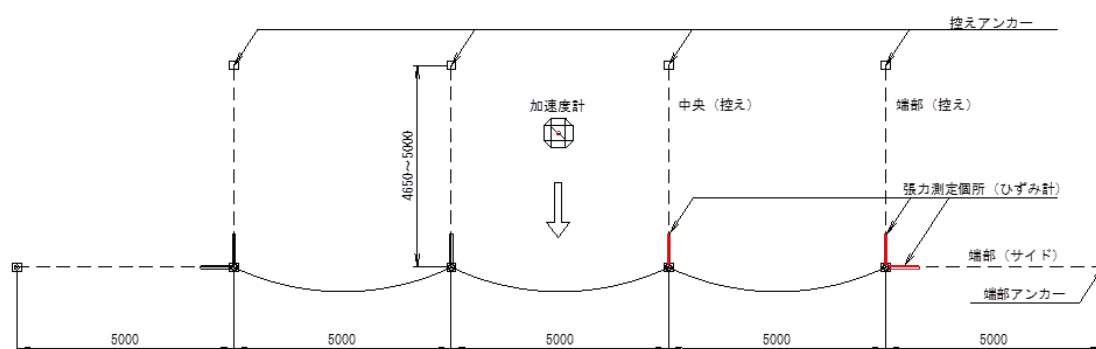


図-2 実験体正面図

(2) 実験結果

a) 捕捉エネルギー

表-6 に実験結果を示す。

表-6 実証実験結果一覧表

タイプ (kJ)	柵高さ (m)	実験スパン	重錘質量 (t)	重錘落下高 (m)	重錘衝突速度 (m/s)	吸収エネルギー (kJ)	結果
50	2.5	中央	0.17	32.0	25.0	53	補足
	3.0			32.0	25.0	53	補足
100	2.5	中央	0.48	32.0	25.0	150	補足
	3.0			32.0	25.0	150	補足
150	3.0	中央	0.61	33.5	25.6	200	補足

50kJ、100kJ、150kJ タイプで重錘が供試体を貫通するような大きな損傷は無く、各タイプを上回るエネルギーで重錘を捕捉することが確認できた。3 スパンという改定便覧で規定される設置最小スパンの実験において、中間スパン部衝突時には端末支柱への影響が微小であったことから、実設計現場においても3 スパン以上の連続した配置であれば、性能に問題がないことが確認できた。

b) 補足時変位量

高速度カメラにて撮影した映像より最大変位を求めた結果を表-7に示す。衝突エネルギーにより変位量が大きく異なる結果となった。柵高さに関わらず50kJタイプは4.0m程度、100kJタイプは5.0m、150kJタイプは6.0mとなり、実際の使用条件では防護対象から実験値以上の離隔を取る必要性を確認した。

表-7 実証実験結果一覧表

タイプ (kJ)	柵高さ (m)	衝突エネルギー (kJ)	最大変位量 (m)
50	2.5	50 以上	3.9
	3.0		4.1
100	2.5	150 以上	5.0
	3.0		5.0
150	3.0	200 以上	6.0

(最大変位量は支柱設置位置からの変位)



写真-8 50kJ H=2.5m



写真-9 50kJ H=3.0m



写真-10 100kJ H=2.5m



写真-11 100kJ H=3.0m



写真-12 150kJ H=3.0m

衝突時の控え材に作用する引張力を、控え材上端のターンバックルにひずみゲージを取り付け測定した結果を表-8に示す。作用する荷重は、中央（控え）部が最も大きく、続いて端部(サイド)部が大きい結果となり、50kJタイプは最大25.3kN、100・150kJタイプの実験では最大45.0kNの引張力が衝撃時に発生した。

表-8 実証実験結果一覧表

タイプ (kJ)	衝突エネルギー (kJ)	柵高さ (m)	実験スパン	中央(控え) ① (kN)	端部(控え) ②(kN)	端部 (サイド) ③(kN)
50	50 以上	2.5	中央	14.3	3.8	10.4
		3.0		25.3	2.3	10.3
100	150 以上	2.5	中央	45.0	10.2	16.8
		3.0		33.2	2.7	15.6
150	200 以上	3.0	中央	39.1	12.0	22.6

5. 実験検証

道路土工構造物技術基準による落石対策に必要なレベル2の概要について表-9に示す。

表-9 落石対策の要求性能

性能水準	阻止面（ネット）	支柱 上下支柱部材	斜体材 (ネイチャースリング)	アンカー	その他部材
性能2	容易に交換が可能である限界の状態 ※1	力学特性が弾性領域を超えない限界状態 容易に交換が可能である、または損傷の修復を容易に行いうる限界状態 ※2	容易に交換が可能である限界の状態	副次的な塑性化に留まる限界状態	容易に交換が可能である、または損傷の修復を容易に行いうる限界状態

※1 落石衝突時にはネットおよび周回ロープに塑性変形が生じ、一部破断が生じることはやむを得ないが、落石が抜けるなど落石防護柵全体系の崩壊につながらないこと。

※2 支柱または支柱部材に落石が直撃した時などを含め、損傷が生じることはやむを得ないが、支柱の損傷が落石防護柵全体系の崩壊につながらないと共に、比較的容易に修復が可能であること。また、有意な傾斜を生じないこと。

(1) 阻止面について

貫通はしないが、大変形を起こし当初形状を維持していないため落石撤去後はネットの交換が必要となる。交換は支柱上下にシャックルで吊っているロープ部を取り外して交換するため、容易に行える

(2) 支柱について

取り付け部材含め大きな変状は発生せず、交換の必要性がなかったため、実験時も繰り返し使用することができた。斜体材も切断および過剰な伸びを発生することなく健全性が確認できた。

(3) アンカーについて

アンカーは D25 の鋼材を使用しており、ターンバックルのひずみゲージから確認できた許容引張り力に収まっており十分な耐力を得ていること確認できた。

以上より道路構造への影響が最小限で防護柵の補修も一部容易な鋼管のみに収まることが確認でき道路土工構造物技術基準に求められるレベル2 をクリアすることが確認できた。

6. 今後の技術展開

今回実証実験を行ったネットは高強度ラッセル網地と高伸度周回ロープの作用で特殊部材を使用しなくても高いエネルギー吸収能力を持てることが確認できた。軽量・コンパクトな繊維資材で構成されるため、通常の道路災害に加え緊急性の高い災害復旧工事、低コストで施工が容易であるため斜面工事における仮設安全対策（労働災害防止）に用いやすい製品となる。また低コストで早期施工ができるため工事中の落下による公衆災害防止用などにも用途展開を図ることができると考える。写真-13~14 に適用事例を示して今後の技術展開例とする。

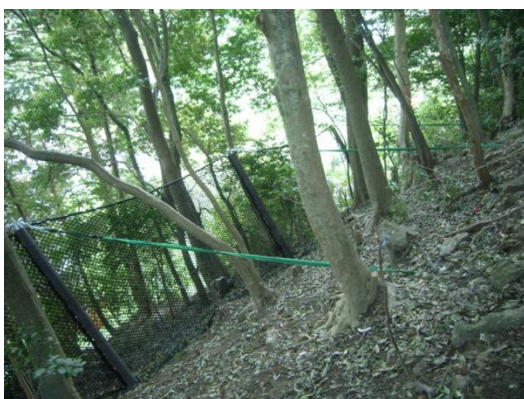


写真-13 道路防災工事



写真-14 工事中安全対策

7. 参考文献の引用とリスト

参考文献

- 1) 落石対策便覧 日本道路協会 平成 29 年 12 月
- 2) 道路土木構造物技術基準. 平成 27 年 3 月
- 3) ETAG27 (Guideline for European technical approval of falling rock protection Kit)