



ために、支柱の剛性を上げると、支柱が塑性変形をしないため可能吸収エネルギーはトータルで小さくなってしまふことが図-1から理解できる。

### 3. 高エネルギー吸収落石防護柵

#### 3.1 設計目的および構造概要

高エネルギー吸収落石防護柵は、既存の落石防護柵の支柱およびワイヤーロープの弱点を補うために考えたものである。支柱にはアンボンドP C鋼材を埋め込んだコンクリート充填鋼管柱を用いて靱性を高めて支柱の曲げによるエネルギー吸収量を増大させる。ワイヤーロープは、一定の張力に達すると滑りだす定着具を用いることにより、ロープの張力を制御してワイヤーロープの切断や定着金具の破壊を防止するとともに、ワイヤーロープのエネルギー吸収量を飛躍的に増大させる。

図-2に概要図を示す。支柱はコンクリート充填鋼管柱であり、横方向ワイヤーロープ（以後横ロープと言う）用の定着具1を取り付けてある。頭部には、控えワイヤーロープ（以後控えロープと言う）用の定着具2を取り付ける。定着具1は2本ロープ用、定着具2は1本ロープ用である。定着具の両脇には、滑り量を調整するストッパーを設けている。1か所あたりの所定滑り量を越えた場合、ストッパーが噛み合うようになっている。

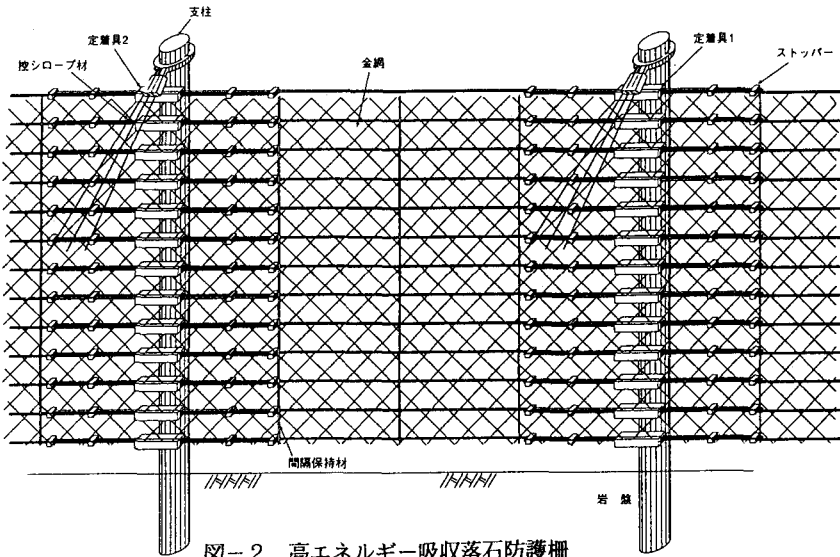


図-2 高エネルギー吸収落石防護柵

#### 3.2 設計概要

##### (A) 落石が支柱間に衝突する場合

衝突エネルギーが過大でない場合は、横ロープの弾性変形によってエネルギーは吸収される。定着具の設定張力以内では、支柱は弾性変形し、また、控えロープは滑らない。

過大な衝撃エネルギーが作用し、横ロープに設定以上の張力が作用すると、横ロープは定着具内で滑りだし、そのときに横ロープと定着具の間で発生する摩擦により、設定張力と滑り量の積からなるエネルギーを吸収する。なお、このときに、横ロープの弾性変形によるエネルギー吸収は考慮しない。

落石が防護柵の上部に衝突した場合、横ロープは1か所限りなく滑る事がないように横ロープ間にとりつけたストッパーの作用により、滑りは一時停止させられる。この時、横ロープの滑りにより衝突エネルギーが吸収しきれない場合には、横ロープは再び張力が増大し、支柱に作用する反力は増し、支柱は下端で降伏し変形が増大する。これにともない、控えロープに滑りが発生する。この時点では、支柱の塑性変形によるエネルギー吸収と控えロープの滑りによるエネルギー吸収も合わせて期待できる。

すなわち、落石が防護柵の上部に衝突した場合には、まず、水平に張られた横ロープの滑りによるエネ

ギー吸収が発生し、ついで支柱の曲げ変形および控えロープの滑りによるエネルギー吸収が発生する。

この場合の衝突落石の変位は、横ロープの弾性変形および滑りによる変位、支柱の変形に伴う変位の和となる。

落石が防護柵の下部に衝突した場合には、横ロープ反力の作用位置が支柱の下部であるため、支柱には曲げ変形がほとんど発生せず、支柱の曲げによるエネルギー吸収が期待できなくなる。したがって、水平に張られた横ロープのみでエネルギー吸収をしなければならない。

まず、落石が衝突した横ロープは弾性変形した後に、定着具内で滑りが発生する。所定の滑り量に達するとストッパーにより横ロープの張力は増大する。この時点で、衝突エネルギーを吸収しきれない場合には、さらに横ロープの張力は増大し、隣接する支柱に取り付けられた定着具内で滑りが発生する。すなわち、落石が衝突した両側の支柱にとり付けた定着具内とさらに外側の支柱にとり付けた定着具内で滑りが発生することになる。この時、横ロープの張力は、定着具の設定張力の2倍に達する。

この場合、支柱の変形がほとんどない分、横ロープの大きな変形は許容される。

### (B) 落石が支柱に衝突する場合

落石が支柱に衝突する場合は、支柱下端に大きい曲げモーメントが発生し、支柱は塑性変形を開始する。同時に、控えロープおよび水平に張られた横ロープにも張力が発生し、いずれも設定張力以上になると滑りを開始する。

衝突エネルギーは、支柱の塑性変形と控えロープおよび水平に張られた横ロープの滑りによって吸収される。

この場合と、支柱間に衝突した場合の相違は、支柱が最初に塑性変形するか、横ロープが滑りを開始した後に支柱が塑性変形するかである。

## 3. 3 支柱

鋼管内にアンボンドPC鋼材を配置し、コンクリートを充填して硬化させ、両端の定着板にPC鋼材を定着する。このように製作されたコンクリート充填鋼管柱は、極めて大きい曲げ耐力と曲げ変形能力を有することが明らかとなっている。コンクリート充填鋼管柱の構造概要を図-3に示す。

コンクリート充填鋼管柱の曲げ耐力は、鋼管とコンクリートは完全に一体化して挙動すると考えて求める。このようにして得られた外径267.4mm、厚さ7mmのコンクリート充填鋼管柱の曲げモーメント-局率関係を図-4に示す。

これより、このコンクリート充填鋼管柱の曲げ耐力は、40tf-mと考えることとした。また、最大曲げ耐力を保持できる変形能力は、たわみ角で15°とした。

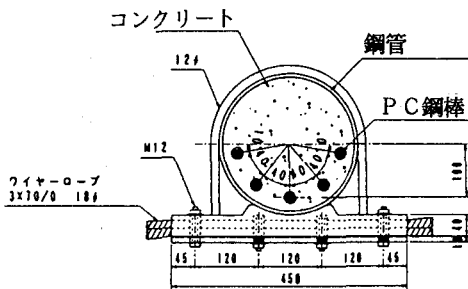


図-3 支柱構造

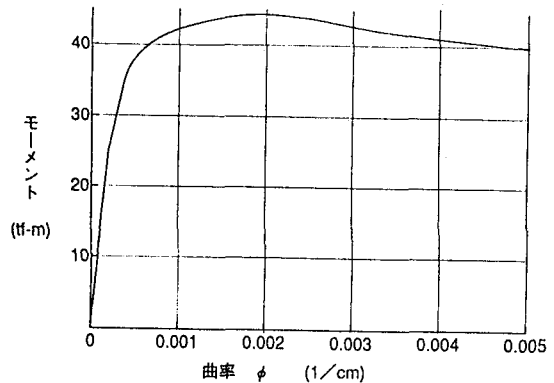


図-4 コンクリート充填鋼管の曲げモーメント-曲率関係

## 3. 4 定着具

支柱にとりつけられた定着具1は、支柱両端の横ロープを重ねて締め付けることにより、横ロープにある

一定以上の張力が作用すると滑りが発生する機構を有するものである。同様に支柱頭部に取り付けられた定着具2も、控えロープを定着するもので、ある一定以上の張力になると滑り出し、共に一定の張力を保ったまま滑りが持続する機能を有するものである。

ワイヤーロープの張力が8.0tf達すると定着具内を滑り出すと設定した。それは、ワイヤーロープ(φ18)を用いると、その切断保証荷重は、16.0tfであり、前記したように、支柱間の下部に落石が衝突した場合のワイヤーロープの張力と定着具の設定張力の関係から、定着具の設定張力は、ワイヤーロープの張力の1/2となるためである。この設定荷重は、定着具を締め付けるトルク量で管理可能である。

設計では、弾性変形によるエネルギー吸収を考慮しないで、安全性を考慮して、図-5の理想化した荷重-滑り量関係を用いることとする。なお、この定着具は滑り時に荷重の変動が少なくなるように工夫している。

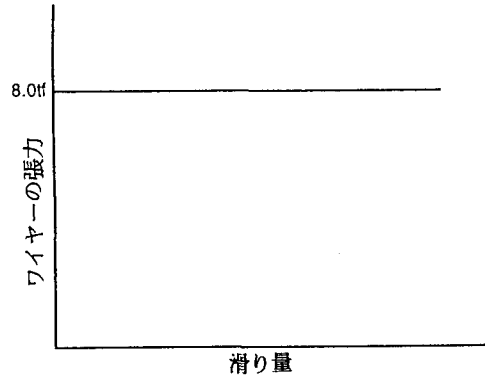


図-5 モデル化した荷重-滑り変形量関係

### 3.5 ストッパー

横ロープの両端にはストッパーを設け、一定着具当たりの滑り量を制御し、衝突荷重が大きい時には隣接する横ロープと結合して一体となる構造としている。ストッパーは、ワイヤーロープの破断強度、および定着具強度の2倍程度を目安として、16tf以上の強度を持たせる事にした。

## 4. 高エネルギー吸収落石防護柵の試し設計

### 4.1 設計条件

落石エネルギー	$E_0 = 50 \text{ tf-m}$	形状寸法	図-6
落石径	$\phi = 1.0 \text{ m}$	支柱の降伏曲げモーメント	$M_0 = 40 \text{ tf-m}$
支柱高さ	$H = 4.0 \text{ m}$	定着具内ワイヤーの滑り荷重	$P_0 = 8 \text{ tf}$
支柱間隔	$L = 5.0 \text{ m}$	定着具内ワイヤーの滑り量	$\Delta L = 50 \text{ cm}$

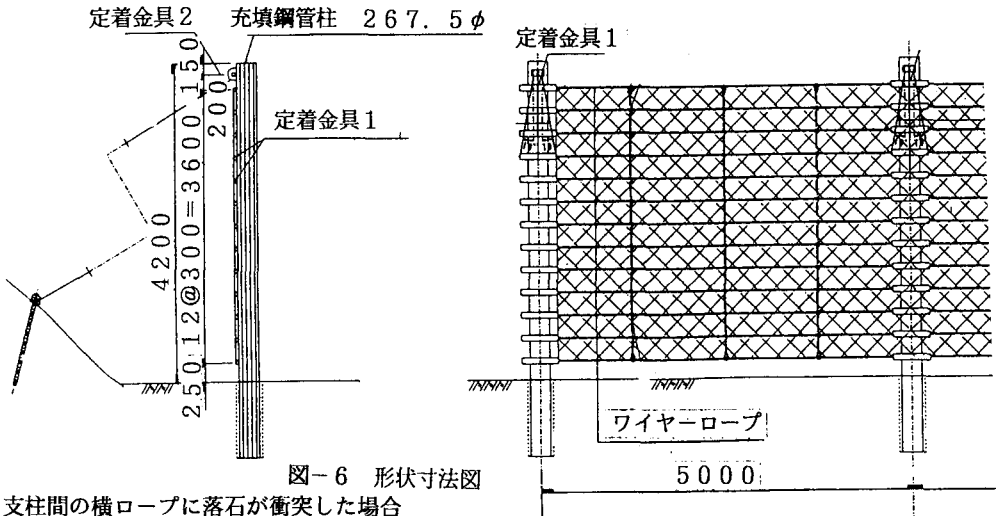


図-6 形状寸法図

### 4.2 支柱間の横ロープに落石が衝突した場合

落石は防護柵に直角に、支柱間の最上段の横ロープから下側に衝突し、落石径(φ)が1.0mなので30cm間隔にはられた横ロープ3本(n)で落石を受け持つものとする。

(A) 支柱間の横ロープの吸収エネルギー (図-7)

定着具1か所の滑り量が50cmに達した時の吸収エネルギー (E1) は、

$$E1 = n \times P_0 \times \Delta L = 3 \times 8.0 \times 0.5 \\ = 12.0 \text{ tf-m}$$

横ロープの防護柵直角方向への移動量 ( $\delta$ ) は、

$$\delta = \sqrt{(L/2 + \Delta L)^2 - (L/2)^2} = \sqrt{(5/2 + 0.5)^2 - (5/2)^2} = 1.658 \text{ m}$$

横ロープの折れ角 ( $\theta$ ) は、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\delta}{L/2} = \tan^{-1} \frac{1.658}{(5.0/2)} = 33.55^\circ$$

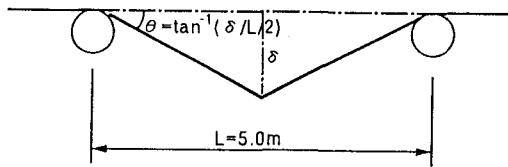


図-7 横ロープの変形

(B) 支柱の吸収エネルギー (図-8)

横ロープ1本が支柱に作用する反力 ( $R_i$ ) は、

$$R_i = 2 \times P_0 \times \sin(\theta/2) = 2 \times 8.0 \times \sin(33.55/2) = 4.618 \text{ tf}$$

支柱下端の曲げモーメント

$$M = \Sigma R_i \times h_i - T \times \cos \phi \times \cos(\theta/2) \times H = 24.08 \text{ tf-m} < M_u = 40 \text{ tf-m}$$

ここに、Tは控えロープの張力、 $\phi$ は控えロープ角を示す。

(A) で計算した横ロープの吸収エネルギー ( $2 \times E1$ ) では、 $E_0 = 50 \text{ tf-m}$ の落石エネルギーは吸収できないので、横ロープの張力 $P_0$ は、8.0tfから徐々に大きくなる。

支柱が塑性化する横ロープの張力(P)は、次式より求める。

$$R_i = (M_u + T \times \cos \phi \times \cos(\theta/2) \times H) / \Sigma h_i$$

$$P = R_i / (2 \times \sin(\theta/2)) = 10.589 \text{ tf} < 16 \text{ tf (ワイヤーの破断強度)}$$

ワイヤーの張力(P)が、10.589tfに達すると支柱は塑性変形を始める。

支柱の塑性変形に伴う回転は、曲げ耐力 $M_u = 40 \text{ tf-m}$ を保持したまま回転角( $\phi_u$ ) $15^\circ$ まで可能であるから、 $15^\circ$ 回転した場合の支柱の吸収エネルギー( $E2$ )は、

$$E2 = M_u \times \phi_u = 40 \times 15 \times \pi / 180 = 10.471 \text{ tf-m}$$

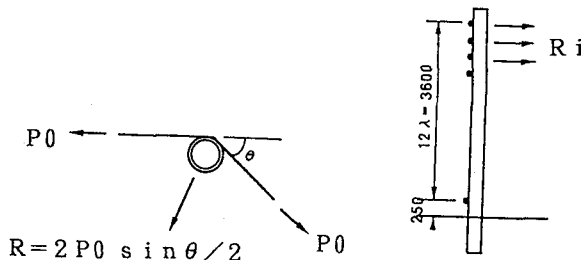


図-8 支柱の作用荷重

(C) 控えロープによる吸収エネルギー (図-9)

横ロープが0.5m滑ったときの折れ角( $\theta$ )は33.55°である。支柱頭部の変形方向は、当初のワイヤー面から90° -  $\theta/2$ となる。支柱が15°変形したときの控えロープの滑り量( $\Delta l$ )は、

$$\Delta l = \delta l \times \cos(\theta/2) \times \cos\phi \text{ で与えられる。}$$

ここに、 $\delta l$ は支柱頭部の移動量で、 $\delta l = H \times \tan 15^\circ = 1.072 \text{ m}$

$$\Delta l = 1.072 \times \cos(33.55/2) \times \cos 35 = 0.841 \text{ m}$$

したがって、控えロープによる吸収エネルギー量は、

$$E_3 = \Delta l \times T = 0.841 \times 8.0 = 6.728 \text{ tf-m}$$

となる。

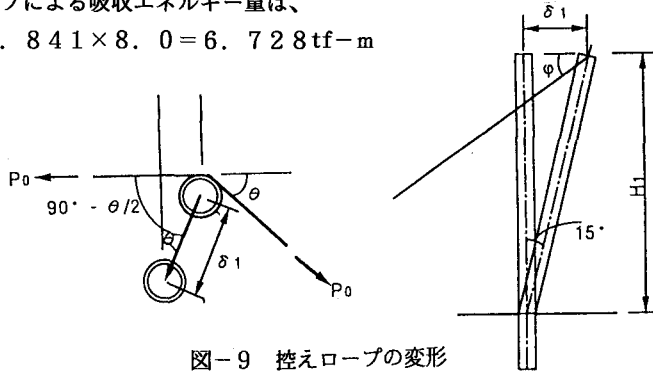


図-9 控えロープの変形

(D) 全吸収エネルギー

防護柵全体の吸収エネルギー量は、

$$E = 2 \times E_1 + 2 \times E_2 + 2 \times E_3 = 2 \times 12.0 + 2 \times 10.471 + 2 \times 6.728 = 58.398 \text{ tf-m} > E_0 = 50 \text{ tf-m}$$

となり、十分安全である。

衝突エネルギーがより大きい場合は、支柱は15°以上変形し、隣接した支柱の定着具が滑り出すので、横ロープのエネルギー吸収量は、さらに24.0tf-m (2×E1)増加し、82tf-m程度までのエネルギー吸収は可能である。なお、その時には、横ロープの張力は16tfにまで増大する。

落石が支柱間の下部の横ロープに衝突した場合は、支柱が塑性化しないので、まず、衝突した支間の両脇の定着具が、50cm滑ってストッパーが噛み合う、次に、噛み合ったストッパーが、定着具まで滑ると同時に、隣接する支柱の定着具も滑ってエネルギーを吸収する。

したがって可能最大吸収エネルギーは、

$$E = 2 \times (E_1 + E_1 + E_1) = 6 \times 12.0 = 72.0 \text{ tf-m} > E_0 = 50 \text{ tf-m}$$

となり、十分安全である。

4.3 支柱に落石が衝突した場合

支柱の回転角( $\phi$ )は15°まで塑性抵抗モーメントを保持して回転するが、それ以上の回転角に対しては、抵抗モーメントを持たない。

(A) 支柱の吸収エネルギー (E2)

支柱の塑性変形に伴う回転角( $\phi_u$ )は、曲げ耐力(Mu)40tf-mを保持したまま15°まで可能であるから。15°回転した場合の支柱の吸収エネルギーは、

$$E_2 = Mu \times \phi_u = 40 \times 15 \times \pi / 180 = 10.471 \text{ tf-m}$$

支柱の吸収エネルギーでは、落石エネルギーを全て吸収できないので、横ロープおよび控えロープにより落石エネルギーは吸収される。

(B) 支柱間の横ロープの吸収エネルギー (E1)

横ロープは、支柱が倒れることによって、張力が増加する。支柱間の横ロープの滑り量は、支柱の回転角に比例して求められる。

各段の横ロープの防護柵直角方向への移動量 ( $\delta i$ )、横ロープの滑り量 ( $\Delta L i$ )、横ロープのエネルギー吸収量 ( $E 1$ ) について、支柱の回転角ごとに横ロープの吸収エネルギー量を算出すると表-1となる。

表-1 横ロープの吸収エネルギー

$\phi$	(度)	15	20	25	26	27	28	29	30
$\delta i_{max}$	(m)	1.032	1.401	1.795	1.878	1.962	2.047	2.134	2.223
$\Delta L i_{max}$	(m)	0.105	0.193	0.313	0.341	0.371	0.403	0.436	0.472
E 1	(tf-m)	4.051	7.433	12.108	13.222	14.403	15.652	16.975	18.374

(C) 控えロープによる吸収エネルギー ( $E 3$ )

控えロープの滑り量も、支柱の回転角により与えられる。支柱頭部の変形量 ( $\delta$ )、控えロープのエネルギー吸収量 ( $E 3$ ) について、支柱の回転角ごとに控えロープの吸収エネルギー量を算出すると表-2となる。

表-2 控えロープの吸収エネルギー

$\phi$	(度)	15	20	25	26	27	28	29	30
$\delta$	(m)	1.072	1.456	1.865	1.951	2.038	2.127	2.217	2.309
E 3	(tf-m)	7.024	9.541	12.223	12.785	13.356	13.938	14.530	15.134

(D) 全吸収エネルギー

防護柵全体の吸収エネルギー量は、支柱の回転角により決まる。回転角ごとに全吸収エネルギー量を算出すると表-3となる。

表-3 全吸収エネルギー

支柱回転角 $\phi$	(度)	15	20	25	26	27	28	29	30
支柱 E 2	(tf-m)	10.471	10.471	10.471	10.471	10.471	10.471	10.471	10.471
横ロープ $2 \times E 1$	(tf-m)	8.102	14.866	24.216	26.444	28.806	31.304	33.950	37.348
控えロープ E 3	(tf-m)	7.024	9.541	12.223	12.785	13.356	13.938	14.530	15.134
合計 $\Sigma E$	(tf-m)	25.597	34.878	46.910	49.700	52.633	55.713	58.951	62.953

衝突エネルギーが50tf-mの場合は支柱の回転角が27°となる事によって、落石の衝突エネルギーは吸収される。

$$\Sigma E = 2E 1 + E 2 + E 3 = 52.633 \text{ tf-m} > E_0 = 50 \text{ tf-m}$$

支柱は塑性抵抗範囲を越え、防護柵直角方向へ支柱頭部では約2.1m移動し、横ロープは最大37cm滑る。このときの、横ロープの折れ角は約23°で、隣接する支柱は塑性化しない。

なお、横ロープは、衝突した支柱の定着具と、隣接する支柱の定着具の両方が有効に働いたため、滑り可能量は最大1.0mとなる。支柱の回転角が40°に達すると、横ロープの滑り量は95cm、防護柵直角方向移動量は3.4mとなり、そのときの全吸収エネルギーは、108tf-mである。この程度が支柱に落石が衝突した場合の設計上の限界である。

5. あとがき

本報告は、既存の落石防護柵とロックシェッドの間の領域の落石に対する防護工を開発するために、エネルギー吸収の方法をまったく新しく考え、試し設計を試みたものである。本報告に示した定着具やストッパーの試作、実験を進め、今後、本構造を用いた高エネルギー吸収落石防護柵の利用が広まることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会；落石対策便覧、昭和58年7月
- 2) 建設省土木研究所；落石防災対策に関する調査報告書（その2）、平成元年2月