

PC 鋼材を用いたエネルギー吸収ケーブルについて

増田 悠樹*¹・森下 健一*²・松田 仁*³・鈴木 実*⁴

近年、自然現象による大規模な災害、落下事故など人命に関わる深刻な被害が増加している。さまざまな対策が講じられるなか、人的被害を回避するためには、エネルギー吸収機構を付加し、作用荷重を低減することが効果的である。今回、エネルギー吸収量の調整が可能かつ吸収量が多いことを特徴とし、簡易な機構で構成された、エネルギー吸収ケーブルを開発した。開発品は落下実験によりその効果を確認している。さまざまな対象物に容易に取付けが可能であることから、災害対策やフェイルセーフなどへの利用が期待される。本稿では、開発したエネルギー吸収ケーブルの概要と実験結果、および同機構を備えたユニットについて紹介する。

キーワード：エネルギー吸収、摩擦、災害対策、フェイルセーフ

1. はじめに

近年、大規模な地震や大型の台風、大雪、集中豪雨などの自然現象により、突発的に起こる大規模な自然災害が増加している。また、地震、腐食や経年劣化による落下事故などの災害も多い。これらは人命に関わる災害であり、人的な被害に至らないよう、種々の対策が考えられている。衝突や落下など、瞬間的に大きなエネルギーが発生する災害に対して、強固な構造で抵抗する場合、作用荷重が非常に大きくなる。その構造そのものが破損し、二次災害、人的被害に至るリスクも高まる。そのためこれらの対策は、発生する大きなエネルギーを吸収する機構によって作用荷重を低減し、災害に至るリスクを低減していることが多い。

ここでエネルギーを吸収する機構に着目すると、部材の塑性変形や、部材の破断によるもの、粘弾性体や摩擦を利用するなど、さまざまな手法がある。この中で、塑性変形を利用する手法は比較的容易に、大きなエネルギー吸収能力を得やすいが、安定した変形をさせにくく、エネルギー吸収量がばらつき易い。また摩擦を利用する手法は、摩擦力を発生させる荷重を調整することで、エネルギー吸収量は安定するが、大きなエネルギー吸収能力を得るためには、摩擦力を発生させる大きな荷重を必要とする。

以上を踏まえ、衝突や落下などの衝撃を受けるさまざまな対象物に取付けてエネルギー吸収能力を付加し、その作用荷重を低減させて、災害のリスクを低減させるエネルギー吸収ケーブルを開発した。開発品は、簡易な機構で取付けられ、エネルギー吸収量の調整を容易にでき、大きなエネルギーの吸収能力を得られるものである。本稿では、開発したエネルギー吸収ケーブルについて概要を紹介する。

2. エネルギー吸収ケーブル

2.1 仕組み

エネルギー吸収ケーブルは図 - 1 に示すように、両端に金具を取付けた‘心材’と、心材に圧着加工した‘摩擦スリーブ’で構成している。心材はPC 鋼より線（棒鋼などでも可）を用いている。エネルギーの吸収は摩擦スリーブが任意の荷重で滑ることで行われる機構になっている。

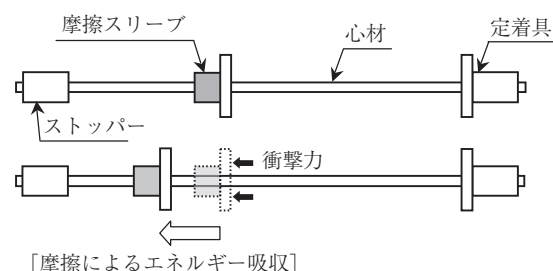


図 - 1 エネルギー吸収ケーブル

図 - 2 に摩擦スリーブに生じる荷重と、摩擦スリーブの移動距離について模式図を示す。摩擦スリーブが滑る前は、摩擦スリーブに生じる荷重に応じた心材の弾性ひずみが生じる。その後、任意の滑り荷重で摩擦スリーブが滑り出し、ある撓動荷重を保持しながら、摩擦スリーブが移動する。ここで摩擦スリーブの滑り出す荷重を‘滑り荷重’、摩擦スリーブが滑っているときの平均荷重を‘撓動荷重’、摩擦スリーブの滑った移動距離を‘滑り距離’^{しゅうどう}と定義する。このとき、撓動荷重と滑り距離の積が、摩擦スリーブによる発生エネルギー（以下、‘摩擦エネルギー’と称す）になる。

*¹ Yuki MASUDA：神鋼鋼線工業(株) 開発部 加工品開発室

*² Kenichi MORISHITA：神鋼鋼線工業(株) 技術部 エンジニアリング技術室

*³ Hitoshi MATSUDA：神鋼鋼線工業(株) 技術部 エンジニアリング技術室

*⁴ Minoru SUZUKI：神鋼鋼線工業(株) 開発部 加工品開発室

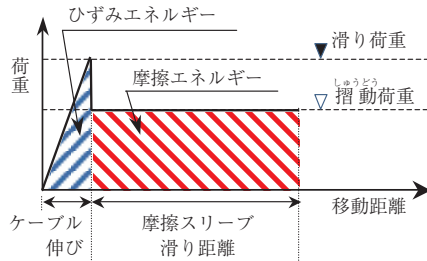


図-2 模式図

2.2 特徴

一般に、PC 鋼より線は、ほかの部材との定着のために、端部に定着用のくさびや圧着加工した金具を取付ける必要がある。これらの金具は PC 鋼より線の破断荷重まで保持できる構造である。

一方、開発品に設ける摩擦スリーブは、通常用いる圧着加工する金具の形状を変更することで、所定の荷重まで保持し、所定の荷重を超えると滑る機構になっている。形状の変更により、心材の破断荷重までの範囲内で、滑り荷重を任意に設定できる。静的、動的どちらの荷重においても、滑り荷重にばらつきは少なく安定した性状を示す。

エネルギー吸収ケーブルは、摩擦スリーブの設計で滑り荷重・摺動荷重を調整し、摩擦スリーブの滑り距離によってエネルギー吸収量を調整できることが特徴である。

3. エネルギー吸収機能に対する実験

エネルギー吸収ケーブルのエネルギー吸収機能の確認のため行った落下実験について、以下に示す。

3.1 実験概要

図-3 に落下実験の概要、図-4 に使用したエネルギー吸収ケーブルの試験体を示す。試験体に対して錘を自由落下させ、心材（ケーブル）の発生荷重を動的データロガーを用い 50 kHz の間隔で計測した。摩擦スリーブ（以下、'FS' と称す）の滑り距離は実験前後の試験体の FS の位置で計測した。なお、試験はおおのこの条件で 3 本（ $N=3$ ）行い、その平均値で実験結果を整理した。

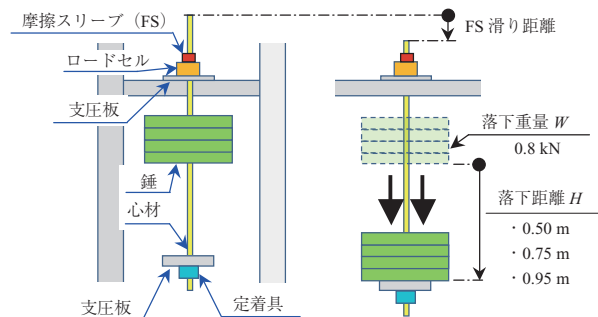


図-3 落下実験概要

3.2 実験結果

(1) 落下による衝撃の吸収について

錘が落下し、支圧板に衝突する前後の錘の状況を図-5 に示す。FS なしは支圧板に衝突後、ケーブルの弾性伸び、

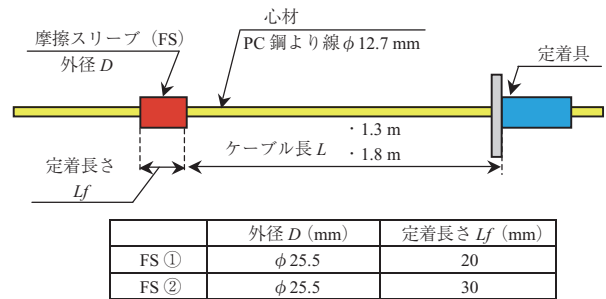


図-4 試験体

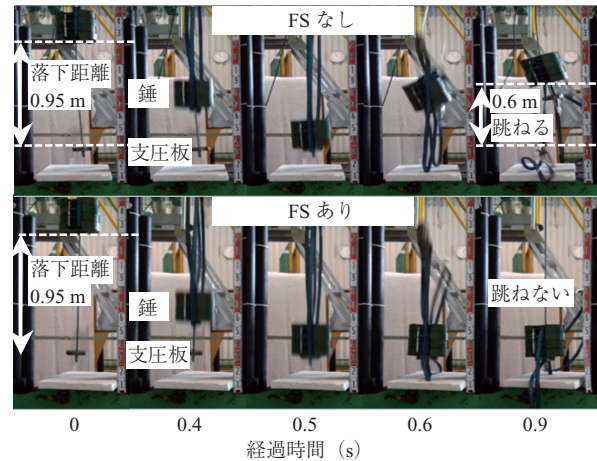


図-5 支圧板に衝突する前後の錘の状況

その後の伸びの復帰により、0.6 m まで跳ね上がるのに対して、FS ありでは、錘は跳ね上がっていない。FS を設けることで落下の衝撃を吸収することを確認した。

(2) FS の定着長さについて

実験におけるケーブルの発生荷重の経時変化を図-6 に示す。ケーブルの発生荷重の最大値は FS なしが 83.4 kN、FS ① が 31.7 kN、FS ② が 45.6 kN であった。FS なしに対して、FS ① が 38 %、FS ② が 55 % に減少している。FS ①、FS ② は、この最大値（滑り荷重）のとき、FS が滑り出している。次に FS ①、FS ② について、FS が滑り出した後の発生荷重は増減を繰り返し、FS なしより長い時間、荷重が発生している。荷重が発生している時間は、FS なしは発生荷重が最大値となって、荷重が 0 になるま

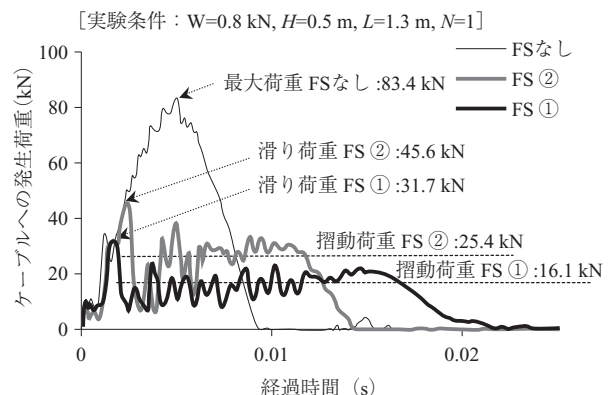


図-6 ケーブルの発生荷重の経時変化

で約 0.009 sec に対して、FS ① は約 0.021 sec、FS ② は約 0.014 sec であった。荷重が発生している時間が FS なしに比べ長くなった分、FS が滑り、衝撃を吸収している。なお、この荷重の増減を繰り返している間の平均荷重、すなわち摺動荷重は、FS ① が 16.1 kN、FS ② が 25.4 kN であった。

以上の結果と滑り距離について、 $N = 3$ の平均値を図 - 7 に示す。FS の定着長さが短い FS ①の方が FS ②に比べ、滑り荷重、摺動荷重は減少し、滑り距離が増加している。

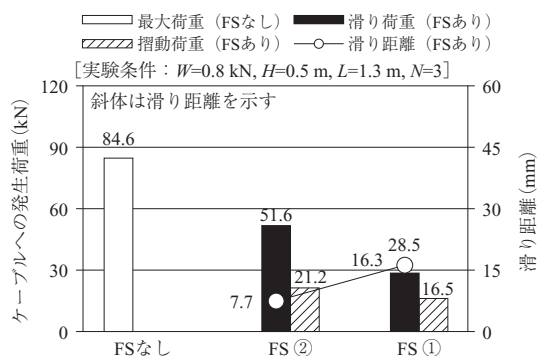


図 - 7 FS による発生荷重、滑り距離への影響

次に、図 - 7 の結果をもとに発生エネルギーに換算した結果を図 - 8 に示す。ここで、エネルギーの換算に用いた錘の衝突時の速度は、錘の落下高さを基準にした計算値を用いている。FS なしは錘の位置エネルギーはケーブルの弾性伸びによるひずみエネルギーとして蓄積される。FS ありは滑り荷重に至るまでは錘の位置エネルギーの一部はひずみエネルギーとして蓄積され、FS が滑り出してから摺動荷重と滑り距離の積で得られる摩擦エネルギーで吸収する。ひずみエネルギーと摩擦エネルギーの和は、FS の有無、FS の定着長さに関わらずおおむね一致しており、計算による錘の位置エネルギーとも一致している。摩擦エネルギーは、FS ① が 0.31 kJ、FS ② が 0.15 kJ であった。

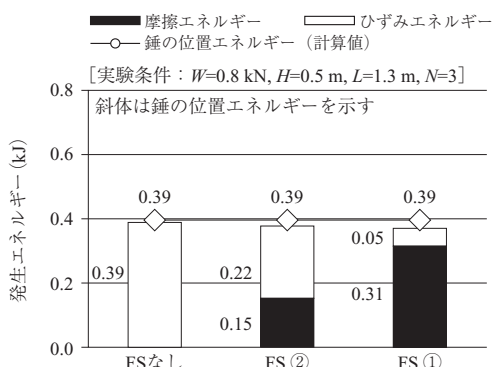


図 - 8 FS による発生エネルギーへの影響

これらの結果より、同じ位置エネルギーに対して、FS の定着長さを調整することで、摩擦エネルギーの吸収量を

調整できることを確認した。

(3) 対象物の異なるエネルギー量について

FS なしおよび FS ①を用いて、錘の落下距離を変化させたときの最大荷重、滑り荷重、摺動荷重および滑り距離の関係を図 - 9 に示す。FS なしでは、落下距離を増加させるに伴い、最大荷重が比例的に増加する。一方、FS ①では、落下距離の増加に対して、滑り荷重は 27.1 ~ 36.7 kN であり FS なしに比べ大きな変化は無く、摺動荷重は 15.6 ~ 16.8 kN でありほぼ一定値を示した。滑り距離は 20 ~ 43 mm であり比例的に増加している。

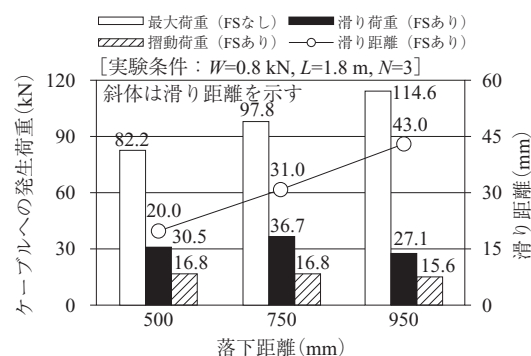


図 - 9 落下距離による発生荷重、滑り距離への影響

次に、図 - 9 の結果をもとに発生エネルギーに換算した結果を図 - 10 に示す。落下距離の増加に伴い、位置エネルギーは増加するが、ひずみエネルギーは 0.05 ~ 0.07 kJ であり大きな変化はなかった。一方、摩擦エネルギーは 0.38 ~ 0.68 kJ であり比例的に増加している。また、ひずみエネルギーと摩擦エネルギーの和は、計算による錘の位置エネルギーとおおむね一致している。

したがって同じ FS を用いた場合、異なるエネルギー量に対して、ひずみエネルギーの量は変化せず、滑り距離を調整することで摩擦エネルギーを調整できることを確認した。

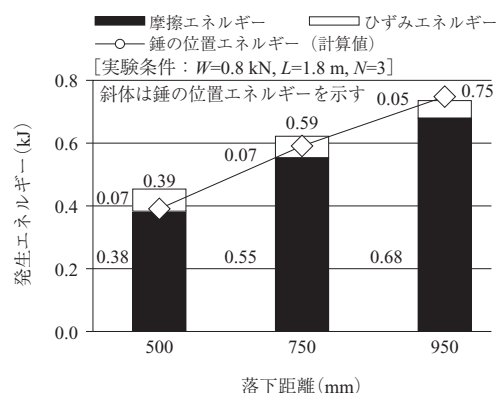


図 - 10 落下距離による発生エネルギーへの影響

3.3 ま と め

以上の結果から、エネルギー吸収ケーブルが想定したエネルギーの吸収機能を有していることを確認した。FS の形状によって、滑り荷重および摺動荷重の調整が可能であ

り、対象とする衝撃的なエネルギーの大小に関わらず、エネルギー吸収量を調整できることを確認した。

4. 実施例

4.1 エネルギー吸収ユニット

開発したエネルギー吸収ケーブルを効果的に使用するために、図 - 11 に示すユニット化したものを想定している。図 - 1 とは異なり、心材の片側の端部を接続部として、あらゆるものに取付けられる。ユニット化することで以下の利点があげられる。

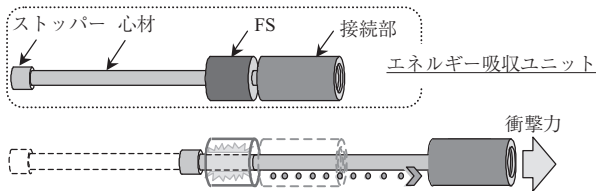


図 - 11 エネルギー吸収ユニット

(1) 定着部への負担低減

ユニット化したエネルギー吸収装置（以下、エネルギー吸収ユニット）が対象とする衝撃エネルギーを吸収することによって衝撃力に対して定着部の負担を大幅に低減する。

(2) コンパクトなユニット

エネルギー吸収ユニットは、FS、心材と接続部からなるコンパクトなユニットである。小さな設置スペースで大きなエネルギー吸収能力を付加できる。

(3) 簡易に取付け可能

FSや接続部は、定着部や接続部に組み合わせる部材との取合いに応じて変更でき、さまざまなものにエネルギー吸収ユニットを取付け可能である。

図 - 12 にエネルギー吸収ユニットの取付け例を示す。たとえば落下防止ケーブルに取付けると、落下防止ケーブルの柔軟性を確保したまま、ケーブルの端部にエネルギー吸収能力を付加させることができる。

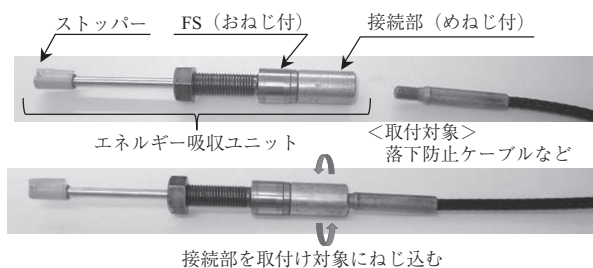


図 - 12 エネルギー吸収ユニットの取付け

4.2 設計例

図 - 13 に落下防止ケーブルにエネルギー吸収ユニットを取付けた設計例を示す。設計条件として、落下防止ケーブル長さ 1.5 m、落下重量 3 kN、落下距離 0.1 m に対して、

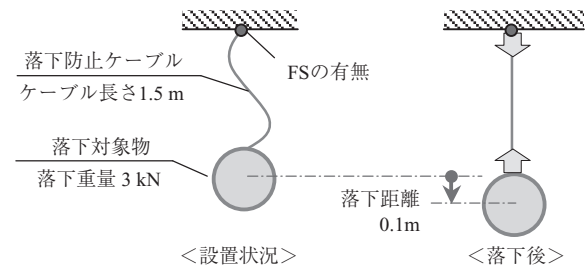


図 - 13 設計例

ケーブル張力の安全率が 2 倍以上を満たすケーブル径を算出するものとする。FS ありの設計例に用いたエネルギー吸収ユニットを図 - 14 に示す。また表 - 1 にエネルギー吸収ユニットが無いものと比較して、その効果を示す。

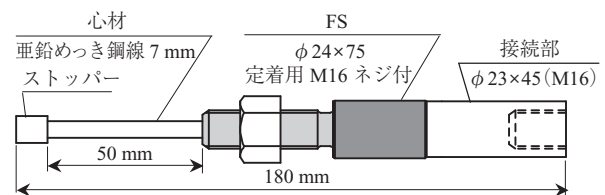


図 - 14 エネルギー吸収ユニット（0.5 kJ 仕様）

表 - 1 FS による効果

FS の有無	なし	あり
位置エネルギー	0.3 kJ	0.3 kJ
ケーブルに作用する最大荷重	97.5 kN	20 kN
FS 滑り距離	—	30 mm
適用ケーブル	7×19 φ18 mm	6×19 φ10 mm
アンカーボルト	M 20 × 4 本	M 10 × 4 本

→ケーブルの小径化、定着部の小型化が可能。

結果より、エネルギー吸収ユニットを取付けた落下防止ケーブルは、エネルギー吸収ユニットが無いものに比べて、ケーブルに作用する最大荷重が約 20 % に低減されている。また適用するケーブルの小径化、および定着部の小型化が可能となっている。

適用するエネルギー吸収ユニットの性能により、最大荷重は異なるが、取付け対象の発生荷重の低減、および定着部の小型化が図れることを示した。

5. おわりに

本稿では開発したエネルギー吸収ケーブルについて報告した。実施例で示すように、ユニット化することでエネルギー吸収機構を必要とするさまざまなところで使用できると考えられる。また心材に対して圧縮力が生じる条件下でも機能は発揮できる。

自然災害への対策や、落下物などへのフェイルセーフなど、人命に関わる災害対策にエネルギー吸収機構は不可欠である。これらの対策の一手法としてエネルギー吸収ケーブルを検討いただければ幸いである。

【2015 年 3 月 16 日受付】