

新形式ワイヤロープの疲労等に関する研究（第2報）

- 合成繊維心ロープにおける樹脂被覆の影響と特性比較 -

交通システム研究領域
自動車安全研究領域
檜山工業株式会社

千島美智男 佐藤久雄
細川成之
吉村靖

1. はじめに

近年、海外においてワイヤロープの心材に、樹脂被覆した合成繊維心を使用した製品が開発され、使用されている。一方、我が国においては、「索道施設の審査及び維持管理要領」の中で、索条の心材に用いる素材を、「支えい索、えい索、平衡索及び緊張索は、可とう性のものであって繊維心を有するものであること。」と規定している¹⁾。したがって、現状では樹脂被覆をした合成繊維心（以下「樹脂被覆合成繊維心」という）のワイヤロープを索道の動索として使用することは原則として認められていないのが実状である。

樹脂被覆合成繊維心のワイヤロープは、樹脂被覆をしていない合成繊維心（以下「合成繊維心」という）に比較して伸びが少なく、また、ストランド間に配置されたサポートストランドにより、ストランド間の摩擦も低減されることからメンテナンス性が良いとされており、国内の索道施設への導入が検討されている。しかしながら、樹脂被覆合成繊維心は、油分を含んだ合成繊維心が樹脂被覆されており、ストランドへの潤滑に必要な油分が供給されない。このため、繰り返し曲げを受けた場合の素線の疲労のほか、ストランドの油分の低下による素線の摩擦等が問題となることが考えられる。また、サポートストランドが繰り返し曲げを受けた場合にその機能を保持できるかどうか等についても確認する必要があるが、樹脂被覆合成繊維心のワイヤロープについての試験例は極めて少なくその特性が十分に明らかとはなっていない。

そこで、樹脂被覆合成繊維心を使用したワイヤロープが繊維心のワイヤロープに比較してどのような特性であるかを確認するため各種試験を実施したのでその結果について報告する。

2. 供試ワイヤロープ

供試ワイヤロープは、索道で多く使用されているウォーリントンシール形とし、ロープ径は「索道施設の審査及び維持管理要領」で規定されている滑車径とロープ径の比（ D/d ）が最も厳しい80となる公称径37.5mmとした。

また、ロングスプライス法によりエンドレスに加工した。差し込まれる金心部分には、ストランドとの接触による摩擦の低減等を図るため、通常用いられている細い合成繊維（クレモナ）のロープが巻き付けられている。

なお、本ロープは、合成繊維心に樹脂被覆をしており、ストランドの潤滑に必要な油分が心材から供給されないため、サポートストランドと呼ぶ合成繊維の細いロープをストランド間に配置することでストランド同士の接触による摩擦の低減を図っている。供試ワイヤロープの主な仕様を表1に、断面を図1に示す。

3. 比較検討項目及び確認項目

索道で使用するワイヤロープは、ストランド相互の摩擦の低減、可とう性の確保という観点から、油分を含ませた合成繊維心を使用している。

一方、樹脂被覆合成繊維心のワイヤロープは、油分を含ませた合成繊維心を樹脂被覆しており、心材からストランドへの油分の供給がない。このため、ストランド相互の干渉による素線の摩擦を低減するためにサポートストランドがストランド間に配置されているが、このサポートストランドが繰り返し曲げを負荷した場合、劣化することがないのか、また、その機能を保持できるかどうかといったこと等が問題になると考えられる。

そこで、合成繊維心のワイヤロープとの比較・検討を行う上で重要となるこれらを含む事項を比較検

表1 ロープの仕様

ロープの構造	6×WS{1+5+(5+5)+10}
公称径	37.5 mm
上層素線径	2.80 mm
素線の引張強さ	1670 N/mm ²
計算断面積	572 mm ²
単位質量	5.09 kg/m
破断荷重	832 kN

討事項とし、ロープ径の減少、ロープの伸び、破断荷重、素線断線数、含油率、可とう度、心材及びサポートストランドの劣化等の項目について試験等を行った。

また、心材及びサポートストランド以外は合成繊維心のロープとほぼ同じ仕様であることから、確認事項として、素線径、素線の破断荷重、素線のねじり回数、素線の巻解及び亜鉛付着量の項目について試験等を行った。比較検討項目及び確認項目を表2に示す。

4. 試験方法

比較検討項目及び確認項目における試験方法は、以下のとおりである。

(1) ロープ試験及び素線試験は、JIS G 3525に基づき実施した。

(2) 曲げ疲労試験は、供試ロープに所定の緊張力及び繰り返し曲げを負荷し、一定回数毎にロープの径、ロープの伸び及び素線の有無及び断線数を測定した。また、曲げ回数は 3×10^5 回を上限とし、滑車を1回通過した時を曲げ回数1とカウントした。なお、伸びについては、正常部の17.5mの両端に印を付け一定回数毎にその長さを測定した。曲げ疲労試験装置を図2に、試験時の仕様を表3に示す。

(3) 含油率は心材、ストランド及びサポートストランドの油分を除いた質量に対するそれぞれに含まれている油分の質量比であり、油分の質量は、ソックスレー法を用いて求めた。なお心材の含油率については、樹脂被覆を取り除いて測定を行った。

ソックスレー法は、ストランドに含まれる油分を溶剤と一緒に濾紙を通して塵埃等を除去しながら抽出した後、溶剤を揮発させて油分と溶剤の分離を行う方法である。

(4) 可とう度は、ロープの曲げやすさを示す1つの指標であり、ロープ径と同一径の丸鋼棒の曲げ剛性度とロープの曲げ剛性度との比である²⁾。丸鋼棒の可とう度は1であり、値が大きいほどロープが曲がりやすいことを表している。

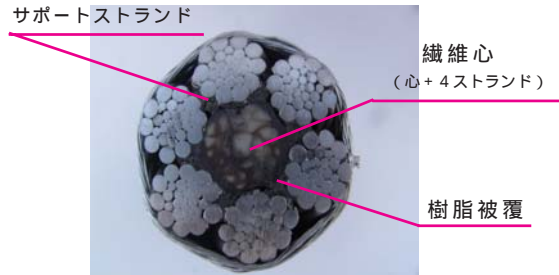


図1 ワイヤロープの断面

表2 比較検討項目及び確認項目

比較検討事項	ロープ径
	ロープの伸び
	破断荷重
	素線断線数
	含油率 (心、ストランド、サポートストランド)
	可とう度
確認事項	心材及びサポートストランドの劣化
	素線径
	素線の破断荷重
	素線のねじり回数
	素線の巻解
	亜鉛付着量

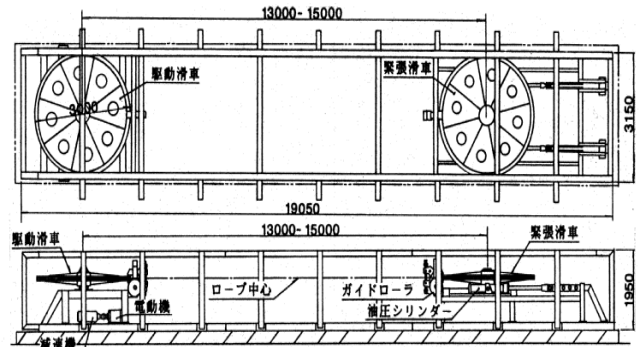


表3 試験時の装置の仕様

実験用ロープ径	37.5 mm	
全長	35.9 m (ロングプライス)	
滑車径	3000 mm (ゴムライニング)	
滑車間中心間距離	13.2 m	
ロープ曲げ速度	2 m/s	
緊張装置	種類	油圧緊張
	緊張力	134 kN

可とう度の測定は、長さ1mのロープの中央に1~10kgまで荷重を負荷し、各荷重負荷時の中央の垂下量を測定し、得られたグラフの一次回帰式の傾きを求め、次式により算定した。

$$F = \frac{E \cdot I}{E f \cdot I r}$$

(E : 丸鋼棒の曲げ剛性弾性係数、 I : 丸鋼の断面二次モーメント、 E f : ロープの曲げ剛性弾性係数、 I r : 丸鋼棒径と同一径のロープの断面二次モーメント)

なお、試験用に切り取ったロープは直線状ではなく湾曲しているため、下に凸の場合と上に凸の場合の2方向について測定を実施した。可とう度測定時のロープの状態を図3に示す。

5. 曲げ疲労試験における試験条件

曲げ疲労試験における試験条件は以下のとおりである。

(1) 滑車径とロープ径の比 (D / d)

滑車径とロープ径の比を表す D / d は、「索道施設の審査及び維持管理要領」で定められている中で最も厳し曲げ条件である 8.0 とした。

(2) 設定張力

索道の動索の安全係数の算出に用いられている次式を満たすように最大張力を 134kN に設定した。張力算定に用いた各要素を表3に示す。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_t + \sigma_{b2}} > 4 \quad \text{この場合} \quad \frac{\sigma_t}{\sigma_t} > 5$$

(3) スプライスの継ぎ合わせ長さ

樹脂被覆合成繊維心のロープは伸びが少ないことが特徴の一つとされている。このことから、繊維心のロープとの伸びを比較するためには正常部をできるだけ長くとる必要がある。そこで、今回の試験に際しては、正常部の長さをロープの全長の半分程度を確保するために、金心の長さをロープ公称径の40倍(1.5m)にとり、隣り合う金心部分が隣接するようにスプライスさせることで継ぎ合わせ長さを 18m (ロープ公称径の480倍)となるようにした。これにより、正常部分をロープ全長の約半分に当たる 17.5 m を確保した。

6. 試験結果及び考察

6.1. 比較検討事項

(1) ロープ径

樹脂被覆合成繊維心のロープの試験開始時におけるロープ径は 39.3mm であり、公称径の+

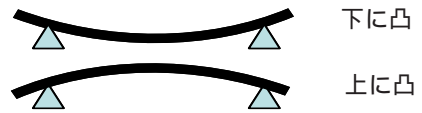


図3 測定時のロープの状態

表4 張力算定に用いた要素

素線の平均引張強さ (σ)	1670 N/mm ²
最大引張強さ (σ _t =T/A)	234.3 N/mm ²
最大曲げ応力 (σ _{b2} =E・δ/D)	182.9 N/mm ²
最大引張力 (T)	134 kN
素線の有効断面積 (A)	572 mm ²
素線弾性係数 (E)	1.96 × 10 ⁵ N/mm ²
上層素線の径 (δ)	2.80 mm
滑車の直径 (D)	3000 mm
曲げを考慮した安全係数 σ / (σ _t + σ _{b2})	4.0
引張応力の安全係数 (σ / σ _t)	7.1

4.8%であった。また、曲げ回数 3 × 10⁵ 回でのロープ径は 38.5mm で、試験開始時のロープ径 39.3mm から約 2% 減少した。

新品時のロープ径を 100% とした時の樹脂被覆合成繊維心と合成繊維心のロープ径の推移を図4に示す。これを見ると、ロープ径は、いずれのロープも曲げ負荷回数の増加とともに減少する傾向にあるが、樹脂被覆合成繊維心のロープは、合成繊維心のワイヤロープの径の減少割合の約 6 割程度となっている。これは、樹脂被覆合成繊維心が合成繊維心に比較して変形が小さく、ストランド間に配されたサポートストランドが隣り合うストランド同士の接触を低減したため、内部の摩耗等による径の減少が合成繊維心のロープに比較して小さくなったものと考えられる。

(2) ロープの伸び

樹脂被覆合成繊維心のロープの正常部における試験開始時から曲げ回数 3 × 10⁵ までの伸びは、103mm であり、試験開始時の正常部の 17.5 m に対し 0.59% の伸びであった。

新品時の正常部に対する樹脂被覆合成繊維心及び合成繊維心のロープの伸び率を図5に示す。これによれば、樹脂被覆合成繊維心の伸び率は合成繊維心に比較して小さくなっている。

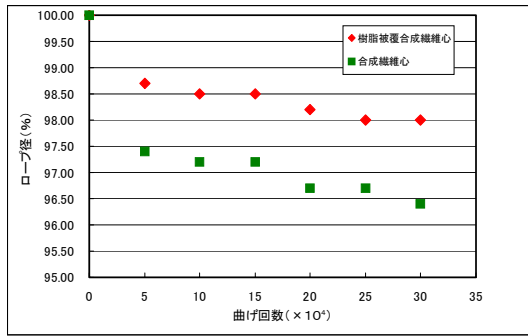


図4 ロープ径の推移

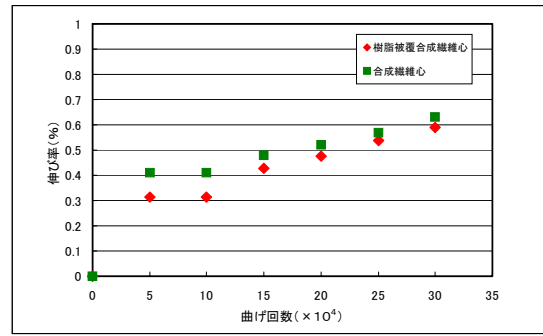


図5 ロープの伸び率

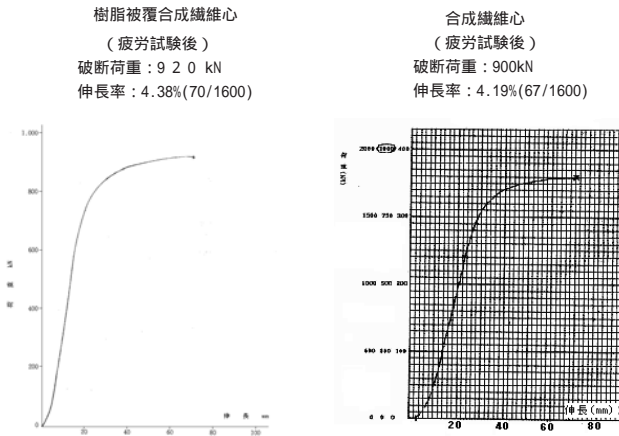


図6 破断試験時の測定波形例

表5 破断試験結果

これは、樹脂被覆合成繊維心は、合成繊維心に樹脂被覆を施したものであり、伸びの特性は合成繊維心に近いが、樹脂被覆の効果として、張力等による心材の変形が合成繊維心に比較して小さいためと考えられる。

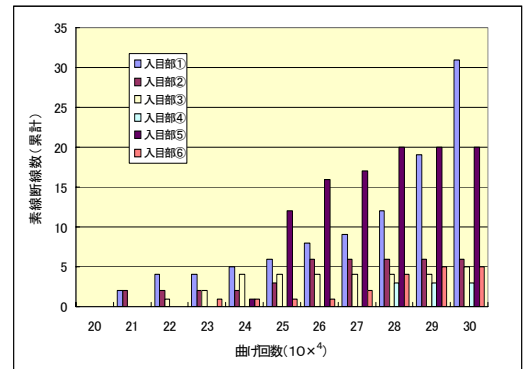
(3) 破断荷重

樹脂被覆合成繊維心のロープの破断荷重は、新品時が912kN、曲げ疲労試験後の破断荷重が920kNであり、合成繊維心のワイヤロープと同様に破断荷重の低下は認められなかった。破断試験の結果を表5に、測定波形例を図6に示す。

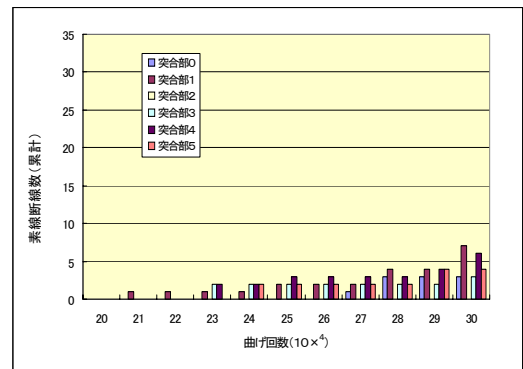
(4) 素線断線数

樹脂被覆合成繊維心のロープの正常部における素線断線については、今回試験を行った 3×10^5 回曲げでは合成繊維心のロープと同様に断線は発生しなかった。

樹脂被覆合成繊維心のロープの接続部の入れ目部における素線断線については、 2×10^5 回曲げ以内では素線断線は発生しなかったが、 2.4×10^5 回



(入れ目部)



(突き合わせ部)

図7 素線断線数の推移

曲げまでに2カ所の入れ目部でそれぞれ2本の素線断線が発生し、試験終了時の 3×10^5 回曲げまでに6カ所全ての入れ目部で素線断線が発生した。最も断線の多い入れ目部では31本の素線断線が発生した。

また、突き合わせ部については、入れ目部と同様に 2×10^5 回曲げ以内では素線断線は発生しなかったが、 2.4×10^5 回曲げまでに1カ所の金心と金心との突き合わせ部で1本の素線断線が発生し、試験終了時の 3×10^5 回曲げまでに5カ所の金心同士の突き合わせ部で素線断線が発生し、最も断線の多い突き合わせ部で7本の断線が発生するとともに、心材と金心との突き合わせ部でも3本の断線が発生し

た。樹脂被覆合成繊維心のロープの素線断線数の推移を図7に示す。

今回の供試ロープについては、合成繊維心(入れ目部で素線断線1本)に比較して、入れ目部及び突き合わせ部で多くの素線断線が発生している。これは、試験開始時においてすでによりの戻り等による、入れ目部及び突き合わせ部の形くずれが発生しており、このことが大きく影響しているものと考えられる。なお、本供試ロープでは、 9×10^4 万回曲げ程度で大きな型くずれが発生したため、突き合わせ部分の枕を交換する等の修正を行っている。

(5) 含油率

樹脂被覆合成繊維心のロープの心材の含油率は、新品時の0.88%に対し、曲げ疲労試験後は0.56%となっており、心材の含油率が合成繊維心に比較して大きく減少している。この原因としては、心材の含油率を測定する際には、樹脂被覆を取り除いて測定しているが、この部分に心材の油分が付着していたために、その割合が新品時と曲げ疲労試験後で大きく異なったものと考えられる。

ストランドについては、新品時の0.21%に対し、曲げ疲労試験後は0.22%であり、油分の低下は認められなかった。これは、試験を行った合成繊維心のロープに比較して、製造段階におけるストランド内への塗油量が少ないため、緊張力等や曲げがストランドに作用しても油分が内部から外部へほとんど漏れていないためと考えられる。また、サポートストランドの含油率は、新品時が3.2%であり、曲げ疲労試験後は4.9%となっており油分の低下は認められなかった。

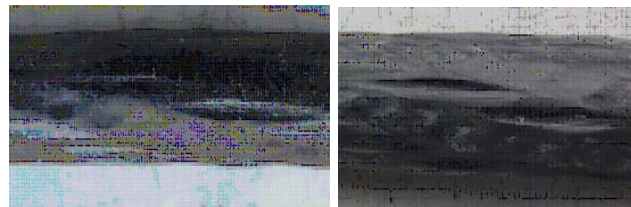
ストランドの含油率については、樹脂被覆合成繊維心では合成繊維心に比較して油分の量は少ないが、曲げ疲労試験後も新品時に対してほとんど変化がないことから、潤滑に必要な油分を保持しているものと考えられる。また、サポートストランドについても同様に新品時と曲げ疲労試験後において油分の変化がないことから、潤滑に必要な油分を保持しているものと考えられる。含油率の測定結果を表6に示す。

(6) 可とう度

樹脂被覆合成繊維心のロープの可とう度は、新品時の下に凸が392、上に凸が361であり、曲げ疲労試験後は下に凸が318、上に凸が347であった。いずれの場合も新品時に比較して曲げ疲労試験後は値

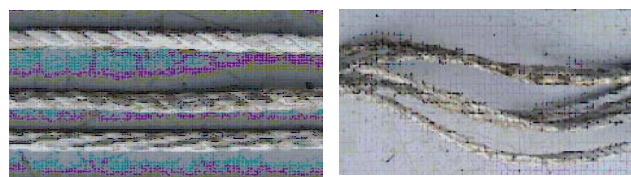
表6 含油率測定結果

心材の含油率 (%)	樹脂被覆合成繊維心		合成繊維心	
	新品時	曲げ疲労試験後	新品時	曲げ疲労試験後
	0.88	0.56	7.9	8.5
ロープストランドの含油率 (%)	樹脂被覆合成繊維心		合成繊維心(参考)	
	新品時	曲げ疲労試験後	新品時	曲げ疲労試験後
	0.21	0.22	0.72	0.42~0.46
サポートストランドの含油率 (%)	新品時	曲げ疲労試験後	-	-
	3.2	4.9	-	-



(試験前) (試験後)

樹脂被覆合成繊維心



(試験前) (試験後)

サポートストランド

図8 心材及びサポートストランドの状態



図9 サポートストランドの巻き付き状況

が小さく、曲げにくくなっている。この傾向は、合成繊維心のロープも同様であるが、これはロープが締まることにより素線間の摩擦が増加したためと考えられる。

(7) 心材及びサポートストランドの劣化

樹脂被覆合成繊維心については、 3×10^5 回曲げ後も、割れ、摩耗等は無く、今回の曲げ回数においては、劣化は認められなかった。

一方、サポートストランドについては、新品時に比較して扁平等の変形及び毛羽立ちが認められるが、断線等はなく大きな劣化は認められなかった。

また、サポートストランドについては、ストランドの間からはみ出す現象が3カ所の入目部で認められ、いずれもロープに巻き付いており、はみ出し量は最大で1.5mであった。

今回の試験では特に支障となるなことがなかった

ため、試験終了時までにはみ出し部分の切断や補修は特に行っていない。このため、入れ目部からはみ出たサポートストランドがロープの自転によって徐々にロープへ巻き付いたものと考えられる。

なお、サポートストランドの欠落によってその部分に素線断線が発生しているわけではない。

樹脂被覆合成繊維心及びサポートストランドの試験前と試験後の状態を図8に示す。また、サポートストランドのロープへの巻き付き状況を図9に示す。

6.2. 確認事項

(1) 素線試験

素線径

素線径については、合成繊維心のロープと同様に新品時と曲げ疲労試験後の差はほとんどなかった。

破断試験

素線の破断荷重については、合成繊維心のロープと同様に、新品時に比較して曲げ疲労試験後の値が僅かに減少しているが、ほとんど強度の低下はないものと考えられる。

ねじり試験

ねじり回数については、合成繊維心のロープと同様に、新品時に比較して、曲げ疲労後の値が僅かに減少しているが靱性の低下はないものと考えられる。

巻解試験

巻解試験の結果は、合成繊維心のロープと同様に、曲げ疲労試験後の結果は「良好」であった。

(2) 亜鉛付着量

亜鉛付着量は、最外層素線で新品時 176 ~ 207 (g/m²) に対し、曲げ疲労試験後は 137 ~ 217 (g/m²) の範囲にあった。一部の素線で疲労試験後の亜鉛付着量の減少が若干大きいのが、それを除けば、合成繊維心の疲労試験後の付着量 174 ~ 186 (g/m²) に比較してもほとんど遜色はなかった。

7. まとめ

樹脂被覆合成繊維心のワイヤロープの特性を把握するため、各種の試験を実施した。今回得られた試験の結果のまとめは以下のとおりである。

(1) 曲げ疲労試験後のロープ径の減少は、合成繊維心のロープの1/2程度であり、新品時に比較し約2%減少した。

(2) 曲げ疲労試験後のロープの伸びは、合成繊維

心のロープと同程度であり、基準とした17.5mの長さに対し0.59% (103mm) であった。

(3) ロープの破断荷重は、新品時が912kN、曲げ疲労試験後が920kNであり、合成繊維心のロープと同様に強度の低下は認められなかった。

(4) 素線断線については、樹脂被覆合成繊維心及び合成繊維心のロープともに正常部では発生しなかった。しかしながら、樹脂被覆合成繊維心のロープでは、入れ目部で 2×10^5 回曲げ以降から素線断線が発生し、試験終了時の 3×10^5 回曲げまでに6カ所の入れ目部全体で70本の断線が発生した。また、突き合わせ部全体で20本の断線が発生したほか、心材と金心との突き合わせ部でも3本の断線が発生した。入れ目部及び突き合わせ部に発生した多くの素線断線の発生状況は、今回のロープ特有のものであり、当該部位に発生した形くずれが大きく影響しているものと考えられる。

(5) 心材の含油率については、新品時が0.88%、曲げ疲労試験後が0.56%であり、ストランドの含油率は、新品時が0.21%、曲げ疲労試験後が0.22%であった。また、サポートストランドの含油率については新品時が3.2%、曲げ疲労試験後は4.9%であった。

(6) 可とう度は、樹脂被覆合成繊維及び合成繊維心のロープともに新品時と曲げ疲労試験後の差は殆どなかった。

(7) 心材の劣化については、曲げ疲労試験後においても、割れ、摩耗等は認められなかった。また、サポートストランドについては、新品時に比較して扁平等の変形及び毛羽立ちが認められるが、断線はなく目視による劣化は認められなかった。

(8) 素線及び亜鉛付着量については、いずれのロープの新品時とほとんど変わらなかった。

以上、樹脂被覆合成繊維心のワイヤロープの試験結果を述べたが、今回行った試験の範囲では、樹脂被覆合成繊維心のロープの正常部については、合成繊維心と同程度の特性を有しているものと考えられる。

<参考文献>

1) 索道施設設計標準・管理標準及び同解説2000: 運輸省鉄道局監修、日本鋼索交通協会編

2) ワイヤロープハンドブック: ワイヤロープハンドブック編集委員会編、日刊工業新聞社発行