

カラーケーブルの開発

Development of Color Cable for Suspension Structures

北 條 哲 男^{*(1)} 土 田 勇^{*(2)} 矢 野 守 俊^{*(3)} 江 口 立 也^{*(3)}
Tetsuo HOJO Isamu TSUCHIDA Moritoshi YANO Tatsuya EGUCHI
 高 見 伸 一^{*(4)}
Shinichi TAKAMI

抄 録

橋梁構造物には周辺環境への調和を考慮した景観設計が重視されるようになり、橋梁用ケーブルにも力学的特性と共に美的機能への要求が高まってきた。新日本製鐵は高い強度、優れた防食性を持つ橋梁用ケーブル NEW-PWS に抜群の耐候性を持つフッ素樹脂を被覆したカラーケーブルを開発した。フッ素樹脂をケーブルの被覆層に適用するにあたって材料特性を分析し、カラーケーブルとして最も重要である耐候性について耐候劣化、色調変化、光沢変化等が少ないことを曝露試験により確認した。更に、ケーブルとしての被覆層の性状や施工性に関する特性についての各種試験結果を述べた。

Abstract

In recent years, increasingly great importance has been attached to aesthetic design of bridges with due consideration to harmony with the surrounding environment. For suspension bridge cables, therefore, requirements for aesthetic function in addition to structural characteristics have become increased. To meet such requirements, Nippon Steel Corporation has developed a color cable by coating NEW-PWS, a new type of cable featuring high strength and excellent corrosion resistance, with fluoropolymer having superior weathering durability. For the application of fluoropolymer to the coating of the color cable, the material characteristics were fully analyzed. It was confirmed through exposure test that this color cable maintains its weathering durability over a long time with little changes in color tone and gloss. The results of various tests conducted to examine the properties and applicability of this coating cable are also described.

1. 緒 言

わが国の橋梁分野では、吊橋、斜張橋の長大化がめざましく、機能性、耐久性に優れたケーブルが要望されてきた。長大斜張橋のケーブルには、高い力学強度、優れた防食性、容易な施工性が要求され、又、長大吊橋のハンガーには優れた力学特性と共に長期間の使用に耐えるメンテナンスフリーが望まれる。新日本製鐵はこのニーズを満たすため、平行線ケーブルを工場防食加工したケーブル (NEW-PWS) を開発し、これまでに横浜ベイブリッジ、生口橋等の長大斜張橋をはじめ多数の橋梁に使用してきた。

最近、橋梁の周辺環境への調和を考慮した景観設計上の視点から、力学的特性だけではなく美的機能への要求も高まってきた。しかし、ケーブルの防食層にポリエチレンを用いる場合、長期耐候性を確保するために表面は黒色に限定される。そこで、このような動向をふまえ、これまで黒色であったケーブルを着色するために、耐候性が抜群に優れたフッ素樹脂を用いた完全プレファブタイプのカラーケーブルの開発に取り組んだ。本稿は、このカラーケーブルの

材料特性、耐候性、構造特性等について報告するものである。

2. カラーケーブルの構造とその特徴

ケーブル表面の防食層に用いるポリエチレン樹脂には、紫外線による劣化を防止するためにカーボンブラックを添加しており、このためにポリエチレン被覆ケーブルは黒色となる。ポリエチレン樹脂を黒色以外に着色することは可能であるが、この場合には耐候性が確保できず、屋外では短期間に劣化する¹⁾のでケーブルの着色には適さない。

黒色ケーブルに着色する方法としては、着色テープを巻き付けたり、金属類のカバーで覆う方法が考えられるが、テープ接着部の耐久性、カバー接合部の汚染性に問題があり、美観上も好ましくなく、いずれもケーブル架設後の作業となるため現場での施工設備や施工期間を要する。又、塗装による着色法では均一な品質を確保するために特殊施工機器等を要し、架設後も長期にわたる維持管理が必要となる。

そこで、新日本製鐵はメンテナンスフリーを指向した着色方法

*⁽¹⁾ 鉄溝海洋事業部 橋梁構造部 部長代理

*⁽²⁾ 鉄溝海洋事業部 技術開発部 掛長

*⁽³⁾ 鉄溝海洋事業部 橋梁構造部 掛長

*⁽⁴⁾ 鉄溝海洋事業部 橋梁構造部

について検討した結果、工場内で着色可能な方式として、ポリエチレン被覆の外周に耐候性に優れた着色ふっ素樹脂を被覆する方法を開発し、実用化を図った(図1, 写真1参照)。

カラーケーブルの主な特徴は次の通りである。

- (1)ポリエチレン被覆ケーブル(黒色)と同等以上の耐候性があり、耐久性に優れている。
- (2)完全なプレファブ製品であるため現地での架設後の作業が一切不要である。
- (3)標準色として変退色の少ない15色を設定しており、あらゆる環境に適用できる。
- (4)耐熱特性にも優れており、又、排気ガスや塩害などの厳しい汚染環境にも耐えられる。
- (5)万一、外傷等による損傷を受けても補修が可能である。

3. カラーケーブルの材料特性

3.1 ふっ素樹脂について

カラーケーブルは、従来のポリエチレン被覆の外周に着色ふっ素樹脂を被覆したものであり、材料は以下の点を考慮して選定した。

- (1)耐候性、耐久性に優れていること
- (2)機械的強度が高いこと
- (3)押し出し被覆成形による製作が可能であること

このような性質を満足する高分子材料として、各種材料の中からふっ素樹脂を選定した^{2,3)}(表1参照)。

最近では、各種産業分野において材料の高耐久性、高機能化が要望され、耐候性、耐熱性、耐薬品性、非粘着性等を有する高分子材料としてふっ素樹脂が用いられている。これらの諸特性の中でふっ素樹脂は耐候性には特に優れており、この点に着目して橋梁ケーブルへの適用を図ったものである。

3.2 ふっ素樹脂の物性

現在各分野で用いられているふっ素樹脂は8種類あり²⁾、これらの

中で機械的強度に優れ、押し出し成形に適したふっ化ビニリデン樹脂(PVDF)を以下の点を考慮してカラーケーブルの材料に選定した。

ふっ素樹脂をケーブルの被覆材料に用いるにあたって、ふっ素樹脂の基本的な機械的性質を調査した。その結果を図2に示す。カラーケーブルに用いるふっ素樹脂は、引張破断強度は高密度ポリエチレン樹脂よりやや高いが、材料の温度依存性は高密度ポリエチレン樹脂とほぼ同様の傾向を示すことを把握した。

ふっ素樹脂は建設分野で使用されてから日が浅いこともあり、材料規格が定められるには至っていない。そこで、JIS K 6896 四ふっ化エチレン樹脂(PTFE)成形粉等の規定を参考にし、カラーケーブルに用いるふっ素樹脂の物性は表2に示すように、ポリエチレン樹脂と同程度の機械的性質が満足されるよう定めた。

カラーケーブルのふっ素樹脂は、ポリエチレン被覆と同様の工程により熔融したふっ素樹脂を押し出し被覆するため、被覆後のふっ素樹脂には残留応力が生じている。又、ケーブル構造として張力導入による伸びや温度変化等により応力が付加される。高分子材料の中には、この様に応力が作用した状態で、経時変化に伴い急激に亀裂が発生、進展して脆性破壊に至る場合があるため、ふっ素樹脂についても耐環境応力亀裂性を調査した。

表1 ふっ素樹脂の特性比較

	ふっ素樹脂	ナイロン6	ポリプロピレン	ポリ塩化ビニル
比重	1.7~2.2	1.13	0.90	1.35~1.45
引張強度(kgf/cm ²)	140~460	720~820	200~400	350~620
伸び(%)	100~400	25~320	600~800	2~40
耐候性	○	×	×	×
耐熱性(°C)	150~260	80~120	100~120	60
耐薬品性	○	×	△	△
非粘着性	○	×	○	×
成形性	○	○	○	○

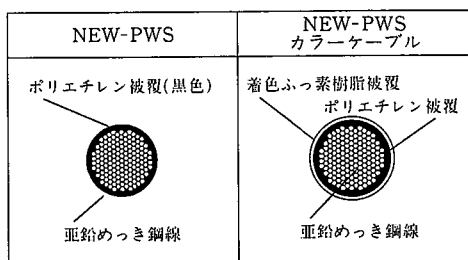


図1 カラーケーブル断面

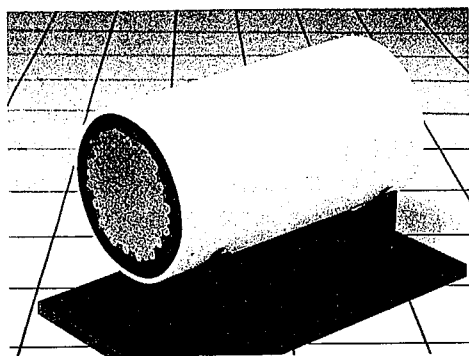


写真1 カラーケーブル

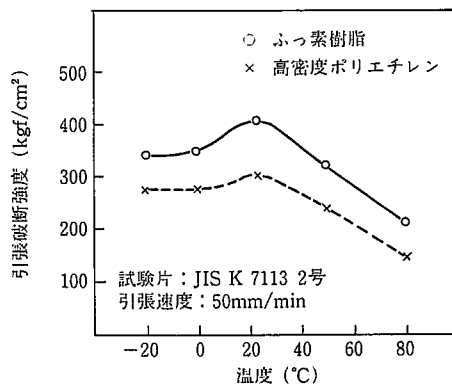


図2 ふっ素樹脂の引張破断強度特性

表2 ふっ素樹脂の物性

項目	NEW-PWS ふっ素樹脂	NEW-PWS ポリエチレン (JIS K 6748 3種1級)
密度(g/cm ³)	1.7 以上	0.942 以上
引張強度(kgf/cm ²)	300 以上	200 以上
伸び(%)	200 以上	300 以上

ふっ素樹脂の試験は、JIS K 6760に規定されている定ひずみ環境応力亀裂試験(ESCR)を準用して実施した。試験の結果、1000時間経過後も全く亀裂は発生せず、ふっ素樹脂は耐環境応力亀裂性についてもポリエチレン樹脂と同様に全く問題のないことを確認した。

4. カラーケーブルの耐候性

4.1 耐候性試験方法

耐候性試験は屋外の光(特に紫外線)、熱、雨等をはじめとする気象条件に対する材料や外観の耐久性を評価するもので、屋外自然曝露試験と促進曝露試験がある(図3参照)。自然曝露試験は試験片を自然環境下で曝露する方法で確実なデータが得られるが、多大な期間を要する。通常の促進試験は室内において、各種の人工光源を用いて自然環境を再現する試験方法であり、簡便である。屋外における促進曝露試験(EMMAQUA 試験)⁹⁾は、鏡によって太陽光を集光して促進性を持たせたもので、短期間に耐候性の評価が可能であるため、新規材料の評価試験に用いられることが多い。

そこで、ふっ素樹脂について、耐候性の評価においては最も信頼性高い自然曝露試験結果を調査した。更に、カラーケーブルに用いる着色ふっ素樹脂について、既往の自然曝露試験とほぼ同程度の評価期間となるよう屋外促進曝露試験を約2年間実施した。又、室内促進試験についても最新の方法を用いて耐候性について検討を行った。これらの結果を以下に示す。

4.2 自然曝露試験

ふっ素樹脂に関する自然曝露試験結果は文献^{9,10)}に示されており、いずれも米国において実施されたものである。試験材料として、試験片厚0.2mm, 0.13mmのふっ化ビニリデン樹脂(PVDF)、四ふっ化エチレン樹脂(PTFE)等を用い、試験は各々17年間、20年間継続されたが、特に強度の変化は見られない。これは太陽光線、雨、ガス等の自然環境下において、少なくとも17~20年間耐候劣化はしないことが実証されたことを意味する。本試験は自然曝露であるため、実質的な材料の耐候性評価と言え、屋外での寿命と同等であると考えられる。試験終了時にも引張強さには特に劣化の傾向は認められないことから、被覆厚が1mm以上あれば半永久的に耐候劣化はしないものと推定できる⁷⁾。このようにふっ素樹脂が耐候性に優れる最も大きな要因としては、材料自身の分子間結合エネルギーが極めて高いことが挙げられる。

4.3 屋外促進曝露試験

屋外促進曝露試験は、10枚の平面鏡で構成した反射式集光装置を使用して太陽光を集光するもので、太陽光線の紫外線分光バランスを保った促進試験が可能である(写真2、図4参照)。試験装置は、米国でも自然環境の厳しいアリゾナ州の砂漠地域に設置されており、

本試験法を利用して、着色ふっ素樹脂の耐候性試験を実施した。尚、試験方法はASTMに規定されており、本試験はG90、D4364に基づいて実施した。

図5に促進曝露後の引張強度、伸び測定結果を示す。両者とも紫外線量2500MJ/m²の時点では劣化の微候は見られない。これは米国アリゾナ地域で約7.5年に相当する。日本の場合、紫外線量は各地域で異なり、文献⁹⁾によれば年間180~240MJ/m²である(但し、測定波長300nm~400nm)。紫外線量を平均的な地域の210MJ/m²とした場合、屋外促進曝露試験結果は日本国内の約12年に相当する。更に米国と日本での紫外線測定領域の相違を既往データを参考にして補正すると、本試験結果は少なくとも日本国内の14~15年に相当すると推定できる。

耐候劣化の状況は機械的強度の変化だけではなく、組織の変質か



写真2 屋外促進曝露試験(EMMAQUA)

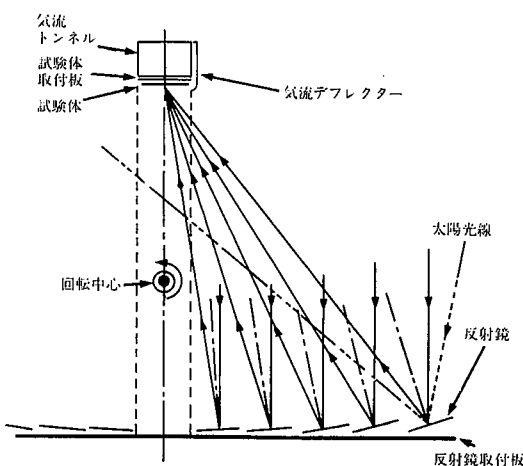


図4 EMMAQUA試験機の反射集光装置

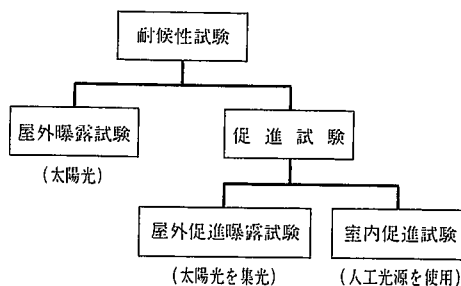


図3 耐候性試験方法

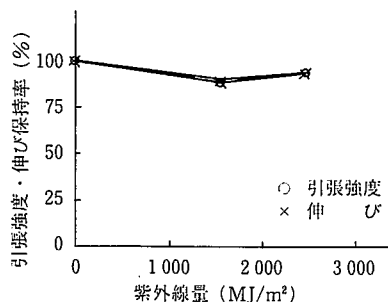


図5 ふっ素樹脂の屋外促進曝露試験結果

らも判断できる。そこで屋外促進曝露試験前後の白色ふっ素樹脂を電子顕微鏡により観察した結果、化学的にもほとんど劣化のないことを確認した。

本試験は既往自然曝露試験の無着色、薄肉厚でのデータに対し、白色ふっ素樹脂材、試験片厚1mmと実構造物の使用状況に近い試験条件で実施したものであり、実用上ふっ素樹脂は十数年間以上は耐候劣化のないことを確信することができた。

4.4 室内促進試験

ふっ素樹脂の耐候性を調査するためサンシャインカーボンアーク式の促進試験を実施し、比較材として塩化ビニル樹脂(PVC)を用いた。

図6に促進試験後の伸び保持率測定結果を示す。PVCが短期間に劣化するのに比べ、ふっ素樹脂は5000時間経過後も大きな変化は見られず、ポリエチレン樹脂と同様に優れた耐候性を示すことが確認できた。

更に、最近、高強度紫外線を利用した促進性の非常に高い試験機QUV(デュパネル光コントロールウェザーメーター)が開発されており、これはサンシャインカーボンアーク式のおよそ10倍以上の促進効果を持つとされている⁹⁾。本試験機を用いて更にふっ素樹脂の促進試験を実施し、表面の変化状況の観察を行った。比較材とした塩化ビニル樹脂(PVC)は約200時間で表面組織の破壊が発生するのに比べ、ふっ素樹脂は1万時間後も特に劣化は認められなかった。

室内促進試験については現状でできる範囲で試験を行ったが、劣化の様子は見られず、上述の曝露試験結果と同様にふっ素樹脂は耐候性の良いことを確認することができた。

以上の各種の曝露試験結果より、カラーケーブルの耐候性は少なくとも約20年以上となり、ポリエチレンと同等以上の耐候性を有していることが把握できた。

5. カラーケーブルの変退色特性

5.1 変退色の測定方法

ふっ素樹脂を着色層として用いる場合には、樹脂材料そのものの耐候性に加え、更に材料の外観の変化、即ち変退色性や耐汚染性も構造物の耐久性を左右する大きな要因となる。変退色による外観変化については通常色調変化及び光沢変化により判断するが多い。しかし、いずれも視覚的な要素を数値化して表したものである。必ずしも定量的な評価が妥当とは限らないが、曝露による変退色特性及び大気中における汚染性についての測定結果を示すことにする。尚、変退色特性の測定については屋外促進曝露試験(EMMAQUA)を用いた。

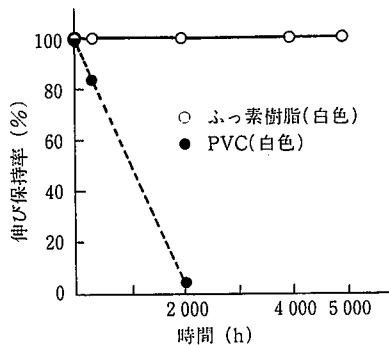


図6 ふっ素樹脂の室内促進試験結果

5.2 変退色特性

5.2.1 色調変化

図7に色調変化の測定結果を示す。色調変化は試験前後の色調の相異を色差計により測定し、JIS Z 8730色差表示方法 Lab系に基づいた色差 ΔE で表示した。色調変化はふっ素樹脂中に添加した着色顔料の耐候性によってほぼ定まり、一般に無機系顔料が変退色しにくい。本試験では赤、青、緑の他に灰色、茶、黄、白の各色について測定を行った。この中では赤色のみが有機系着色顔料を用いている。

図7より、まず赤色は紫外線量2000MJ/m²程度から急激に変色し、すべての色の中で最も色差が大きい。これは有機系着色顔料を使用したためと考えられ、一般的な傾向と同様の結果となった。他の各色は、紫外線量2500MJ/m²で色差 ΔE は5以下と非常に少なく、安定性の良いことを示している。従って、この結果を踏まえて顔料設計を行い、安定した色調を用いれば長期間にわたり変退色を少なくすることは可能であろう。

5.2.2 光沢変化

図8に光沢変化の測定結果を示す。光沢変化は試験前後の光沢(60°鏡面反射率)の違いを光沢計により測定するもので、JIS Z 8741光沢度測定法により求めた。試験体は色調変化測定に用いたものと同じである。

図8より、着色ふっ素樹脂の場合には紫外線量2500MJ/m²照射後も色による光沢変化の差はほとんどなく、光沢保持率はすべて95%

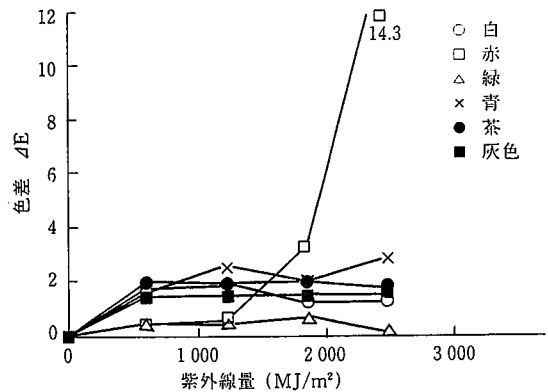


図7 ふっ素樹脂の変退色特性

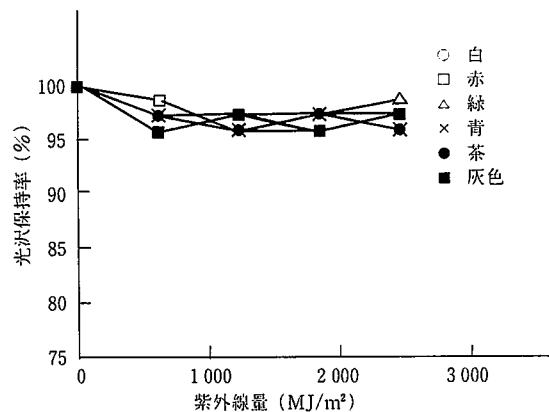


図8 ふっ素樹脂の光沢変化

以上と非常に安定していることがわかる。色調変化の最も激しい赤色も他の色と同程度である。これは光沢変化は主に材料特性により定まるものであり、ふっ素樹脂は材料そのものの耐候性が優れていることが光沢変化の少ないことから推察できる。

光沢変化も劣化を示す一つの尺度であるが、相対的な比較となる場合が多い。材料によっては光沢保持率が10%以下に低下するものがあるが、着色ふっ素樹脂の場合は光沢変化による外観の変化は極めて少ないと推定できる。

5.3 耐汚染性

外観劣化のもう一つの要因として、大気中の汚染物の付着による見掛けの変退色があげられる。汚染性は環境条件によって大きく異なり、一律に評価することは難しいこともあり、これまでに検討された例も少ない。ここでは汚染度の高い環境として東京都内の工業地域を試験場所として自然曝露試験を実施し、色調変化を測定した。

ほとんどの色は曝露3か月で汚染が飽和状態になり、以後はあまり変化しない。色調変化率は色による差異があり、見かけの色差 ΔE は3~12程度の範囲となった。茶系濃色については比較的变化率は低い。これらは工業地域での測定の一例であるが、海浜・山間地域についてはこれらの結果を上回ることはないと思定される。

又、汚染部をクリーニングした後は色調変化はほとんど見られず、 ΔE は1程度になり、初期の色付近に戻った。ふっ素樹脂は非粘着性、耐薬品性に優れているため、汚染物はクリーニング等により簡単に除去することができ、汚染は表面のみであり、内部への浸透は非常に少ないことを示している。従って着色ふっ素樹脂の場合、環境汚染による外観変化は洗浄等の対策を講じれば比較的容易に原点に戻り、塗装等の他の着色方法に比べて長期的な維持管理面でも極めて有利であると考えられる。

6. カラーケーブルの構造特性

6.1 曲げ特性

カラーケーブルの被覆層は、内層をポリエチレン樹脂、外層をふっ素樹脂で構成する二層構造となる。ふっ素樹脂の着色機能のための被覆厚は1mm程度で十分であるが、更に製作・施工上の曲げ特性や耐外傷性を考慮して検討することが必要である。

着色層の曲げ特性を把握するため、3種類のカラーケーブルを用いて曲げ試験を実施した(写真3、表3参照)。各ケーブルにはD/d(ケーブルの曲げ直径/ケーブル外径)が10倍程度までの曲げを与えたが、座屈等の異常な変形は全く見られず、又、除荷後も再びもとの状態にもどり、有害な変形も残らなかった。従って、ふっ素樹脂

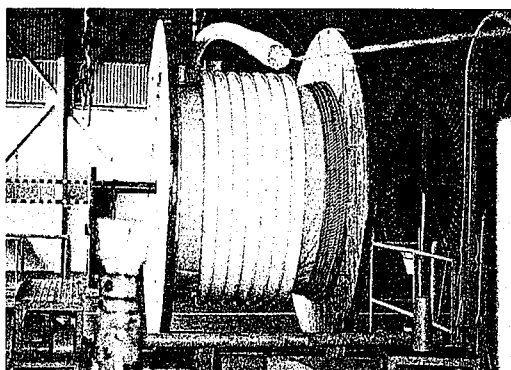


写真3 ケーブル曲げ試験

表3 カラーケーブルの曲げ試験

ケーブルサイズ	7mmφ×31本	7mmφ×55本	7mmφ×139本
項目			
ストランド径(mm)	44	58	92
ポリエチレン厚(mm)	7	7	9
ケーブル外径 d(mm)	58	72	110
ふっ素樹脂厚(mm)	1.1	1.1	1.3
最大曲げ径 D(mm)	440	580	1070

脂厚が2mm程度あれば、製作・施工上で考えられる曲げ(D/d=18程度)に対して支障はないものと考えられる。

6.2 締め付け特性

ケーブルは架設時あるいは架設後の制振対策等のためにクランプ治具で締め付けることがある。この場合、クランプの設計上、カラーケーブルとクランプとの摩擦係数を把握することが必要となる。

カラーケーブルに締め付け面圧を変化させてクランプ治具を取り付け、ケーブル軸方向の滑り試験を行った(写真4参照)。最大滑り荷重から摩擦係数を算出すると、面圧が約30~100kgf/cm²の場合、摩擦係数は0.16~0.25とポリエチレン被覆ケーブルとほぼ同程度¹⁰⁾となった(表4参照)。尚、クランプとふっ素樹脂被覆面間には摩擦係数の確保及び表面の保護のため、ゴム類の挿入が効果的と考えられる。

6.3 耐外傷性

カラーケーブルの耐外傷性を把握するため、JIS C 3005-30(衝撃)に基づき重錘の落下試験を実施した(図9参照)。使用ケーブルは7mm径×55本で、ポリエチレン被覆厚7mm、ふっ素樹脂被覆厚2mm、外径76mmである。試験の結果、重錘20kg、落下高さ2mでふっ素樹脂の破損はなかった。

又、架設時に何らかの外傷を受けた場合を想定して外傷の進行度の有無を評価した。ケーブル長300mmのふっ素樹脂被覆部に深さ1

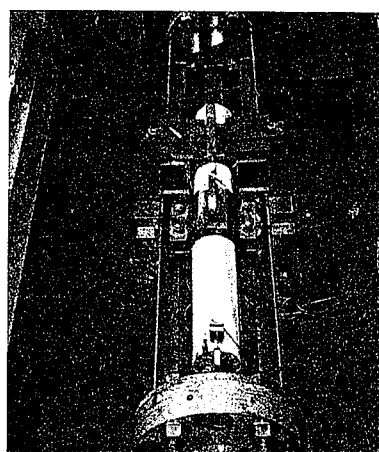


写真4 摩擦係数測定試験

表4 カラーケーブルの摩擦係数

試験体	面圧 (kgf/cm ²)	最大荷重 (tf)	摩擦係数 μ	備考 (ゴム挿入)
No.1	32.9	10.8	0.25	有
No.2	50.2	15.5	0.23	有
No.3	94.3	20.2	0.16	有

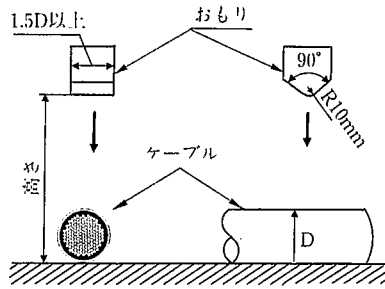


図 9 重錘落下試験

mm (被覆厚の 1/2) 及び 2 mm (貫通), 長さ 50mm (軸方向及び周方向) ノッチを入れたものを試験体とし, $-20^{\circ}\text{C}\sim+80^{\circ}\text{C}$ の冷熱サイクル試験を行った。試験は 100 サイクル (1 サイクル 8 時間) 実施したが, 外傷の進行, 割れはなく, 耐外傷進行性についても問題のないことを確認した。

6.4 補修性

カラーケーブルは出荷時に保護用の梱包を施しているが, 引出し, 展開等の架設中に外傷を受けることも考えられるため, その補修性についても検討を行った。

ふっ素樹脂の場合, ポリエチレンに比べて融点はやや高いが, カラーケーブルと同じ材質のふっ素樹脂を用い, 熱風機の加熱により溶接することができる。従って, 万一損傷を受けても比較的容易な補修が可能である。

補修部の品質を確認するために, 全面補修, 部分補修を施したものを試験体とし, 冷熱サイクル試験を実施した。 $-20^{\circ}\text{C}\sim+80^{\circ}\text{C}$ を 100 サイクル (1 サイクル 8 時間) 与えたが, 補修部には変化は見られず, 本補修法の有効性を確認することができた。

7. 結 言

橋梁構造物は, その規模, 形状から環境に対するインパクトが大きく, 周辺環境への調和が重視される時代となった現在, より美しい橋づくりのためにケーブルにも豊かな色彩が必要となってきた。特に斜張橋はその機能美から建設が盛んになり, このカラーケーブルも多数適用されている (表 5, 132 ページ参照)。

カラーケーブルは, ふっ素樹脂の耐候性に優れた特性を利用してケーブルの着色被覆層に用いたもので, 美的機能を付与するという

表 5 カラーケーブル製作実績

橋名	型式	橋長 (m)	施 主	ケーブル仕様
美浜歩道橋	斜張橋	62	浦安市	NEW-PWS 31 グレー
あすなろ跨線橋	斜張橋	79	JR 東日本	NEW-PWS 73 ベージュ
中島川橋	ニールセン橋	157	阪神公団	NEW-PWS 187 ベージュ
YLISTON 橋	斜張橋	192	フィンランド	NEW-PWS 31 ホワイト
ときめき橋	斜張橋	200	日本道路公団	NEW-PWS 199 ホワイト
とよみ大橋	斜張橋	300	沖縄開発庁	NEW-PWS 283 ホワイト
蒲郡競艇場	吊構造	30	蒲 郡 市	NEW-PWS 73 ホワイト, 他
しらこぼと橋	斜張橋	145	越 谷 市	NEW-PWS 73 ホワイト
親 橋	斜張橋	23	北 九 州 市	NEW-PWS 109 ホワイト

景観対策のみならず, 長寿命化にも有効である。特に長大橋のような土木構造物は, その耐用年数が 50~100 年間にもなり, 高機能・高耐久性が要求され, このような場合カラーケーブルは最適であると考えられる。今後, 景観設計のニーズはますます高まることが予想され, 橋梁をはじめ吊構造物等にも広く応用できるよう更に技術開発を進める所存である。

参 照 文 献

- 1) 電気学会: 高分子材料の劣化, コロナ社
- 2) 日本弗素樹脂工業会: ふっ素樹脂, 1970-6
- 3) 根岸: フッ素の化学, 丸善, 1988
- 4) Zerlaut, G.A. et al.: Accelerated Outdoor Exposure Testing of Coating by the EMMAQUA Test Method. ECCA Annual Congress, 1984-11
- 5) 阿部: フッ化ビニリデン樹脂 (KYNAR) の物性と応用, プラスチックエージ, 1984-1
- 6) 三井・デュポンフロケミカル: テフロン実用ハンドブック
- 7) 北條 ほか: ふっ素樹脂の耐候性に関する研究, 土木学会論文集投稿中
- 8) 楡木 ほか: わが国の紫外域日射量マップの提案, 日本建築学会構造系論文集, (381), 17(1987)
- 9) 木嶋: プラスチック材料の超促進耐候試験, プラスチックエージ, 33(11), 143(1987)
- 10) 俵矢 ほか: 斜張橋ケーブルの開発とその実用化, 製鉄研究, (332), 13(1989)