

被膜に損傷を受けたエポキシ樹脂全塗装P C鋼より線の防錆性能に関する研究

○黒沢建設 (株)	技術部	正会員	平井 圭
同 上	工事部		今村 国男
(株) ケーティービー苦小牧工場			藤川 孝次
同 上			浅川 幸次

1. はじめに

P C構造物の耐久性を向上する目的で、エポキシ樹脂にて防錆被膜を形成したP C鋼より線が使用される頻度が多くなってきた。エポキシ樹脂塗装の方法は、外周面を覆うように塗装する方法と素線単独に塗装する方法がある。このうち、素線単独に塗装を行う方法およびこの方法によって製造された全素線エポキシ樹脂静電粉体塗装P C鋼より線（以下、全塗装P C鋼より線という）の被膜の密着性や防錆性能に関する基本的性能は確認されており、報告¹⁾²⁾³⁾もなされている。図-1 に全塗装P C鋼より線の断面を示す。しかしながら、既往の報告の中では、施工時にハンドリングや緊張・挿入といった作業上に発生する被膜を損傷させる要因に関する定性的な検証はなされているものの、定量的な検証はなされておらず、損傷の程度および被膜の防錆性能に与える影響は必ずしも把握されてはいない。そのため、設計や施工時の検討項目としての指標を示すことができていないのが現状である。

本研究では、①施工時にエポキシ樹脂被膜に損傷を与える要因と損傷程度の定量的な把握、②損傷を受けたエポキシ樹脂被膜の性能保持限界被膜厚さの推定、③被膜に損傷を受けた場合の腐食伝播といった項目に関して定量的な評価を行い、全塗装P C鋼より線の被膜性能を照査した。

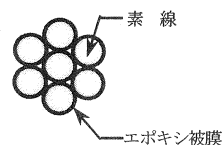


図-1 全塗装P C鋼より線断面

2. 被膜の損傷程度の確認

全塗装P C鋼より線のエポキシ樹脂被膜に損傷を与える要因として、荷役時や施工時に人為的要因で発生するものとケーブル挿入や緊張による物理的要因で発生するものに大別される。前者は取り扱う者がエポキシ樹脂被膜に関して理解し、さらに定められた取扱い方法に従って作業を行うことによって防ぐことができる。しかしながら、後者は施工過程で必然的に発生する要因であるために、完全に防ぐことはできない。したがって、ケーブル挿入や緊張によるエポキシ樹脂被膜の損傷程度を定量的に把握し、損傷により被膜の防錆性能が低下するかを把握する必要もある。そこで、ケーブル挿入試験および緊張試験を実施して、全塗装P C鋼より線の被膜損傷程度を確認することとした。

2. 1 ケーブル挿入時の被膜損傷程度確認

(1) 試験概要および供試体概要

試験には、P C桁内ケーブルを想定してケーブル挿入試験用には約3mのプレキャストコンクリートセグメントを7セット連結した全長約20mのコンクリートブロック断面内に外径φ84mm、内径φ70mmのポリエチレンシースを配置し、曲げ半径8mを4回、曲げ半径10mを2回通過する配線形状を有する模擬P C桁を使用した。図-2 にコンクリートブロックの形状を、図-3 にポリエチレンシースの形状を示す。また、試験に使用した全塗装P C鋼より線は、ピンホールの発生しない下限被膜厚さが120μmであり、300μmを超えるとくさび定着が困難になることから、被膜厚さを200μm±80μmで製造管理を行ったものとした。試験を実施したケーブルタイプは、内ケーブルで採用される頻度が高い12S12.7とし、全長22mを3ケーブルとした。全塗装P C鋼より線の被膜厚さは予め300mmごとに側線を電磁式膜厚計にて測定を行った。図-4 に被膜厚さの測定結果を示す。

ケーブルの挿入は、12S12.7をケーブルとして組み立てた後に人力にて挿入する方法を2ケーブルと

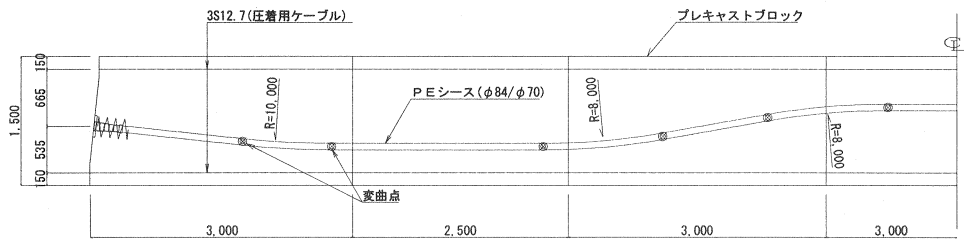


図-2 コンクリートブロックの形状

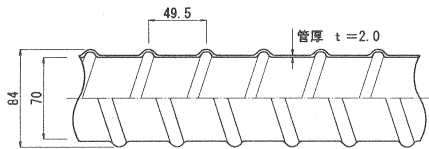


図-3 PEシースの形状

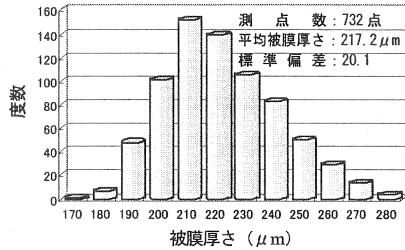


図-4 エポキシ樹脂被膜厚さ分布

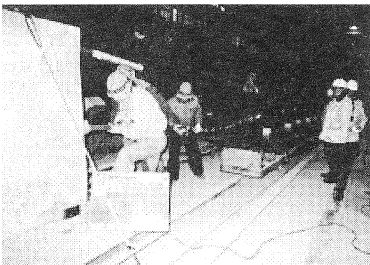


写真-1 人力による挿入状況

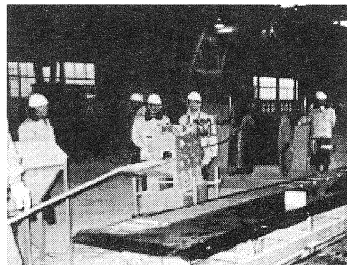


写真-2 プッシングマシンによる挿入状況

12S12.7のストランドごとに樹脂製のパイロットキャップを取り付けて、プッシングマシンにて1本ずつ12本挿入する方法を1ケーブルとした。写真-1に人力による挿入状況を、写真-2にプッシングマシンによる挿入状況を示す。各供試体ケーブルとも模擬PC桁に全長挿入完了後に挿入側に再度引き出して、エポキシ樹脂被膜の損傷程度を目視にて確認し、損傷程度が大きい箇所に関して被膜厚さの減少量を電磁式被膜厚計にて測定することとした。

(2) 試験結果

ケーブルの挿入試験後の全塗装PC鋼より線の被膜状態を写真-3に示す。人力による挿入方法、プッシングマシンによる挿入方法のいずれに対しても、被膜の表面が白くなる程度の擦過傷は部分的には発生するものの、エポキシ樹脂被膜に母材に到達するような損傷や被膜厚さの減少に繋がる損傷は発生しなかった。したがって、ポリエチレンシースを使用して、全塗装PC鋼より線ケーブルを挿入した場合には、被膜に損傷は発生しないことが確認された。

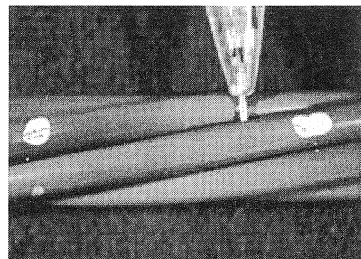


写真-3 挿入後の被膜状態

2. 2 腹圧による被膜損傷程度確認

(1) 試験概要および供試体概要

曲げ半径 5m の曲線配線形状を有する長さ 3m のコンクリート反力架台に外ケーブルを想定した19S15.2の全塗装PC鋼より線ケーブルを挿入し、0.2%永久伸びに対する荷重の90%まで容量4,000kNセンターホールジャッキにて緊張を行い、腹圧による被膜厚さの減少量の測定を行った。

反力コンクリートは、PEシースが配置されたものである。反力コンクリートの形状を図-5に示す。また、試験に使用した全塗装PC鋼より線は、エポキシ樹脂被膜厚さを $200\mu\text{m} \pm 80\mu\text{m}$ で製造管理を行ったものとした。本試験では、ケーブルを緊張した際に発生する腹圧の影響のみを調査する目的であり、その他の被膜損傷要因を排除するために、ケーブル挿入時には図-6に示す緊張機器に合致したPC鋼より線の配列とした。さらにPC鋼より線には1番から19番までの番号をつけ、17番から19番の行がケーブル最下段になるようにし、緊張後の被膜損傷箇所が番号により判別可能になるようにした。ケーブル緊張状況を写真-4に示す。供試体数は3ケーブルとして、全塗装PC鋼より線は同一線から採取した。

(2) 試験結果

ケーブル緊張後に張力を解放して、シース内より引き出したケーブルに対する被膜損傷の状況を写真-5に示す。損傷は、隣接するPC鋼より線のクラウン部同士が腹圧により押しつけられ、大きさが幅約1mm、長さ約2mmの楕円形状で被膜が潰された様相を呈していた。また、潰れはケーブル中央部すなわち配線形状の最大曲率部分で多く発生しており、その他の緊張端側には潰れは確認されなかった。

塗膜の潰れ量を定量的に評価するために、図-7に示すように潰れ箇所とその近傍の健全な被膜の厚さを電磁式膜厚計にて測定した。被膜潰れ量の測定結果を表-1に示す。測定結果によれば、被膜の潰れが発生するのはケーブルの比較的下側に配置された全塗装PC鋼より線であり、上側に配置された全塗装PC鋼より線では潰れの発生が少なかった。しかしながら、5番や7番といった上側に配置されているが、潰れが発生しているものが存在している。これは、ケーブルを緊張することにより、配列が崩れて、上側に配置されていて外周側に配置されたものは腹圧による影響を受けていることを示している。

被膜潰れ量が最も多かったのは、No.1ケーブルの18番線であり、 $155.9\mu\text{m}$ であった。また潰れ箇所の被膜が最も薄くなったのも同線であり、 $68.1\mu\text{m}$ であった。また、表-1の測定結果より、健全部の平均被膜厚は $211\mu\text{m}$ 、被膜の平均潰れ量は $124.1\mu\text{m}$ 、潰れた後の平均被膜厚さは $110\mu\text{m}$ であった。

被膜厚さ測定終了後に、被膜の防錆性能が保持されているか確認するために、潰れ程度が大きい部分を採取して、塩水噴霧試験を1,000時間行ったが、発錆等は認められず、被膜の防錆性能は保持されていた。したがって、本試験により被膜厚さが $200\mu\text{m}$ 程度であれば、腹圧を受けた場合に、被膜に潰れは発生するが、防錆性能は失っていないことが確認された。

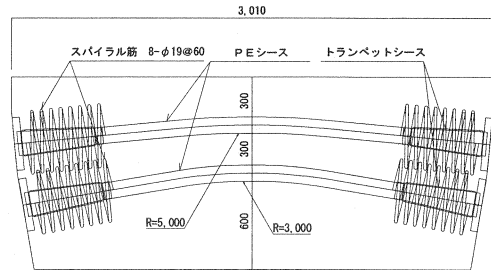


図-5 反力コンクリートの形状

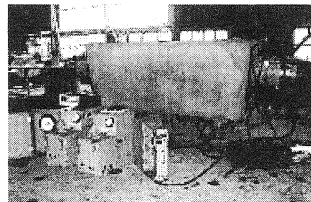


写真-4 ケーブル緊張状況

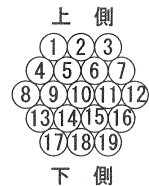


図-6 配列



写真-5 被膜損傷状況

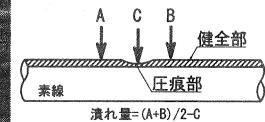


図-7 潰れ量測定方法

表-1 被膜潰れ量測定結果

ケーブル番号	鋼線番号	被膜厚さ (μm)						
		5	8	9	13	15	17	18
No.1	健全部	219	203	209	220	260	174	212
	圧痕部	77.1	86.4	113	78.5	114	74.8	68.1
	潰れ量	132.9	109.6	115.5	126.5	126	106.7	155.9
No.2	鋼線番号	8	10	13	14	17	-	-
	健全部	219	203	209	220	260	-	-
	圧痕部	103	154	146	133	217	-	-
No.3	潰れ量	132.9	109.6	115.5	126.5	126	-	-
	鋼線番号	7	10	12	15	17	18	19
	健全部	231.5	250	201.5	188	257	228	248.5
	圧痕部	114	103	87.7	74.7	147	105	98.2
	潰れ量	117.5	147	113.8	113.3	110	123	150.3

3. 被膜の潰れ量から評価した性能保持限界被膜厚さの推定

2.2 において、被膜厚さが約 $200\mu\text{m}$ で塗装された全塗装PC鋼より線の被膜潰れ程度と防錆性能保持の関係は明らかになったが、本全塗装PC鋼より線は製造時の被膜厚さ管理範囲が $200\mu\text{m} \pm 80\mu\text{m}$ となっており、最低被膜厚さは $120\mu\text{m}$ という場合も存在する可能性がある。そこで、基準被膜厚さを $120\mu\text{m}$ と $200\mu\text{m}$ の二種類で製造した全塗装PC鋼より線を用いて、腹圧により発生する被膜潰れと同様の潰れを人工的に発生させ、潰れ部の被膜厚さを $10\mu\text{m}$ 程度から増加方向に変化させた。その供試体に対して塩水噴霧試験を実施し、発錆の有無を確認することにより防錆性能が保持できる限界被膜厚さの推定を行った。

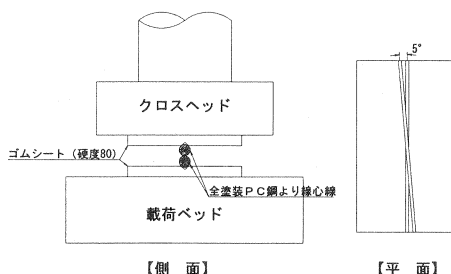


図-8 潰れ再現方法

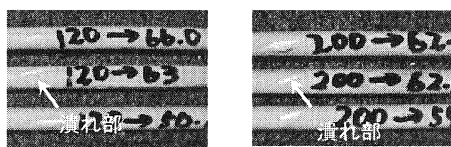


写真-6 潰れ発生状態

3. 1 試験概要および供試体概要

試験は、基準被膜厚さが $120\mu\text{m}$ 程度および $200\mu\text{m}$ で製造された全塗装PC鋼より線のみを使用して、心線の被膜に人工的に潰れを発生させる。人工的な潰れを発生させる方法を図-8に示す。人工的な潰れを発生させるための加圧にはアムスラー型万能試験機を使用し、試験機クロスヘッド間に硬度80程度程度のゴムシートを設置し、そのゴムシートには載荷の際に心線が動かないよう溝加工を施した。PC鋼より線のよりの角度が約5度であったことから、二本の心線は互いに5度の角度で接触させ、潰れ形状が腹圧により発生したものと同様になる方法とした。載荷は、被膜の潰れ量により制御を行い、載荷重は一切無視し、潰れ量は電磁式膜厚計を用いて測定を行った。潰れを発生させた状態を写真-6に示す。所定の潰れが再現された供試体は、切断端部をシリコン系防錆材にて防錆処理して塩水噴霧試験1,000時間を実施して試験後の発錆状況を目視にて確認した。

表-2に基準被膜厚さが $120\mu\text{m}$ および $200\mu\text{m}$ に対して潰れを発生させた後の被膜厚さ範囲を示す。基準被膜厚さが $120\mu\text{m}$ の場合は、潰れ部の被膜厚さの最低値が $8.5\mu\text{m}$ であり、それから約 $5\mu\text{m}$ ピッチで被膜厚さを増加させた。基準被膜厚さが $200\mu\text{m}$ の場合は、潰れ部の最低被膜厚さが $28.8\mu\text{m}$ であり、それから約 $5\mu\text{m}$ ごとに被膜厚さを変化させた。ただし、 $100\mu\text{m}$ 以上の性能については2.2で確認されているため、本試験では $100\mu\text{m}$ 以下を評価対象とした。

表-2 潰れ発生後の被膜厚さ

基準被膜厚さ(μm)	潰れ部の膜厚さ(μm)																	
120	8.5	14.3	22.3	26.4	30	35	37	38.4	41.3	41.8	50.1	63	66	77	79	82.4	85	100
200	28.8	31.8	32.6	33.3	35.1	43.3	44.2	59.3	62.5	70.1	70.3	71.3	82.6	86.5	94.2	101	107	151

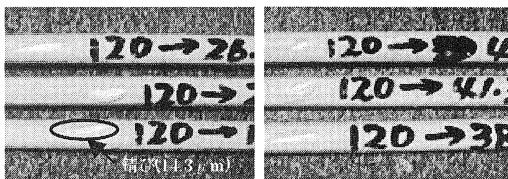
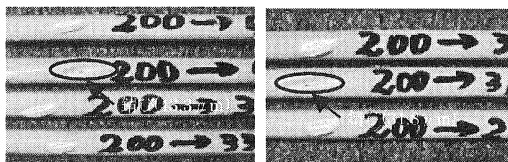
3. 2 試験結果

塩水噴霧試験1,000時間終了後の基準被膜厚さ $120\mu\text{m}$ である供試体の状況を写真-7に、基準被膜厚さ $200\mu\text{m}$ である供試体の状況を写真-8に示す。写真-7に示す基準被膜厚さが $120\mu\text{m}$ の状況によれば、被膜の潰れ部はどの供試体においても白色に変色しており、潰れ発生時にエポキシ樹脂の構造が破壊されていることがわかる。また、潰れ部の被膜厚さが $14.3\mu\text{m}$ の供試体では、微少ながら点錆びが確認された。写真-8に示す基準被膜厚さが $200\mu\text{m}$ の状況によれば、被膜の潰れ部の外観は基準被膜厚さが $120\mu\text{m}$ と差はないが、潰れ部の被膜厚さが $43.3\mu\text{m}$ と $31.8\mu\text{m}$ の供試体において点錆びが確認された。

基準被膜厚さ $120\mu\text{m}$ の試験結果を表-3に、基準被膜厚さ $200\mu\text{m}$ の試験結果を表-4に示す。表中の○印は発錆なしを、×印は発錆ありを表す。試験結果によれば、基準被膜厚さ $120\mu\text{m}$ で潰れ部被膜厚さ

が $14.3\mu\text{m}$ 以下の供試体では、試験開始後40hrで発錆を確認したが、その他の供試体においては1,000hr後も発錆は確認されなかった。また、基準被膜厚さが $200\mu\text{m}$ で潰れ部の被膜厚さが $43.3\mu\text{m}$ と $31.8\mu\text{m}$ で発錆を確認したが、その他の供試体では発錆は確認されなかった。潰れ部の被膜厚さが $33\mu\text{m}$ 程度および $28\mu\text{m}$ 程度では発錆がなかったが、被膜の潰れ方のばらつきによるものと推測され、 $43.3\mu\text{m}$ 以下では発錆すると判断するのが妥当である。

これらの結果より、基準となる被膜厚さによって多少異なるものの、エポキシ樹脂被膜は元の被膜厚さに対して約20%程度の被膜厚さまで潰されると防錆性能が失われることが確認された。ただし、この結果は使用するエポキシ樹脂の伸び等の性能に大きく影響されるため、残存被膜厚さの絶対値で評価することは困難と思われる。

写真-7 塩水噴霧試験後外観 (基準被膜厚さ $120\mu\text{m}$)写真-8 塩水噴霧試験後外観 (基準被膜厚さ $200\mu\text{m}$)表-3 潰れ程度を変化させた供試体の塩水噴霧試験結果 (基準被膜厚さ $120\mu\text{m}$)

時間	潰れ部の被膜厚さ(μm)と発錆の有無																	
	8.5	14.3	22.3	26.4	30	35	37	38.4	41.3	41.8	50.1	63	66	77	79	82.4	85	100
40Hr	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
500Hr	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1000Hr	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表-4 潰れ程度を変化させた供試体の塩水噴霧試験結果 (基準被膜厚さ $200\mu\text{m}$)

時間	潰れ部の被膜厚さ(μm)と発錆の有無																	
	28.8	31.8	32.6	33.3	35.1	43.3	44.2	59.3	62.5	70.1	70.3	71.3	82.6	86.5	94.2	101	107	151
40Hr	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
500Hr	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
1000Hr	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

4. 損傷を受けたエポキシ樹脂被膜部の腐食伝播

これまで述べた結果によれば、全塗装PC鋼より線を用いたケーブル挿入やケーブル緊張時に発生したエポキシ樹脂被膜の損傷は、母材に到達せず防錆性能を失う程度のものではないことが確認された。しかしながら、その他の事態により母材に到達する損傷を被膜に与えた場合には、母材の腐食が発生することは予想できるが、その腐食伝播は明確にはされていない。そこで、全塗装PC鋼より線の被膜に人工傷を設け、傷の大きさと腐食伝播の関係を定量的に把握することとした。

4. 1 試験概要および供試体概要

試験は、基準被膜厚さが $120\mu\text{m}$ と $200\mu\text{m}$ で製造された全塗装PC鋼より線の心線のエポキシ樹脂被膜に、長さが一定で幅を変化させた人工傷を設け、1,000時間の塩水噴霧試験を実施した。その後、傷部を精密切断機で切断し、精密万能投影機反射測定方法(測定倍率100倍)にて傷部からの腐食深さを測定した。

表-5に供試体の種類を示す。供試体は、 $\phi 12.7\text{mm}$ の全塗装PC鋼より線の心線とし、エポキシ樹脂被膜に長さ20mm、幅を0.05mmから1.0mmまで4段階に変化させた人工傷を設けた。

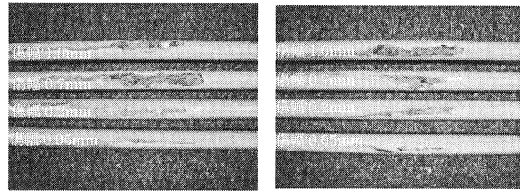
表-5 供試体種類

供試体番号	被膜厚さ(μm)	傷幅(mm)	傷長さ(mm)	供試体数(本)
1-1	120	0.05	20	1
1-2		0.2		1
1-3		0.7		1
1-4		1.0		1
2-1	200	0.05		1
2-2		0.2		1
2-3		0.7		1
2-4		1.0		1

4. 2 試験結果

塩水噴霧試験後の供試体外観を写真-9 に示す。被膜厚さが $120\mu\text{m}$ と $200\mu\text{m}$ の供試体では、外観上の差は認められなかった。

塩水噴霧 1,000 時間経過後の供試体について、傷部中央を精密切断機にて切断し、精密万能投影機反射測定方法により腐食深さを測定した結果を表-6 および図-9 に示す。図-9 によれば、傷の幅が



a) 1,000hr ($120\mu\text{m}$) b) 1,000hr ($200\mu\text{m}$)

写真-9 1,000 時間後の供試体外観

0.05mm の場合を除き、被膜厚さ $120\mu\text{m}$ の供試体が $200\mu\text{m}$ の供試体よりも腐食深さは深くなる傾向を示している。また、いずれの供試体においても、傷幅が広くなれば腐食深さは深くなる傾向を示している。これは、傷幅が広い場合では被膜傷部に形成された酸化被膜が失われる時間が早いと考えられ、傷幅が極端に狭い場合には腐食深さは被膜厚さの影響を受けないと考えられる。また、被膜厚さと腐食深さの関係では、被膜厚さが厚くなると腐食深さは浅くなる傾向を示すことが確認された。

表-6 傷幅と腐食深さ

供試体番号	被膜厚さ (μm)	傷幅 (mm)	試験前線径 (mm)	試験後線径 (mm)	腐食深さ (mm)	線径減少率 (%)
1-1	120	0.05	4.376	4.347	0.029	0.66
1-2		0.20		4.255	0.121	2.77
1-3		0.70		4.221	0.155	3.54
1-4		1.00		4.180	0.196	4.48
2-1	200	0.05		4.294	0.082	1.87
2-2		0.20		4.318	0.058	1.33
2-3		0.70		4.253	0.123	2.81
2-4		1.00		4.234	0.142	3.24

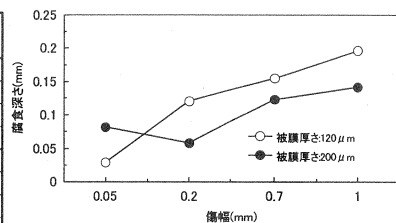


図-9 傷幅と腐食深さの関係

5. おわりに

エポキシ樹脂全塗装 PC 鋼より線のエポキシ樹脂被膜に関して、緊張や挿入といった現場作業の中で、被膜の性能を低下させる要因を調査し、その程度を定量的に評価した結果、以下のことが確認された。

- (1) ポリエチレンシースを使用してケーブルを挿入した場合には、被膜の損傷はなかった。
- (2) 腹圧を受けたケーブルの被膜は、約 $200\mu\text{m}$ から約 $68\mu\text{m}$ にまで潰れたが、塩水噴霧試験の結果によると、防錆性能は失っていないかった。
- (3) 人工的に被膜の潰れ量を変化させて、被膜が防錆性能を保持する限界被膜厚さは、元の被膜厚さから約 20% に潰された程度である。
- (4) エポキシ樹脂被膜に損傷を受けた場合の腐食伝播は、傷幅が広いほど腐食深さが深くなるが、被膜の下には腐食は発生しなかった。また、被膜厚さが厚い方が腐食深さは深くなる傾向を示した。

今後は、動的な載荷重に対する被膜性能の確認、また被膜の損傷程度が腐食量に与える影響をさらに定量的に把握するために、被膜の密着性と腐食の関係を調査する予定である。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたって、東日本旅客鉄道株式会社構造技術センター各位には適切なご指導を賜りましたことをここに記して深謝いたします。

7. 参考文献

- 1) 平井, 蓮井, 田邊, 浅野: PC 鋼より線の防食と疲労性能に関する研究, 第 10 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.759~762, 2000,10.
- 2) Hirai, et al.: Introduction of high performance cable system composed of epoxy resin coated PC strand, The first fib Congress 2002, Session7, pp.243~248, 2002,10.
- 3) 財団法人土木研究センター: SCS スランド技術審査証明報告書, 平成 12 年 3 月.