

内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線技術の現状

三浦 尚*1・角 昌隆*2

1. はじめに

近年 PC 構造物の多様化、耐久性に対する高度な要求等によって、その構成材料である PC 鋼材に対する要求性能も大きく変わりつつある。一般の環境においては適切に施工されたセメントグラウトとコンクリートかぶり厚さが PC 鋼材に十分な耐久性を付与することは過去の大多数の実績が示すところである。しかしながら、海洋環境等のように厳しい腐食性環境にさらされる場合、あるいは一般の環境であっても施工が不十分な場合等には PC 鋼材が腐食し、コンクリート構造物に耐力低下をもたらすことがあることも、過去に多くの事例が示している。その結果として、工場出荷時にあらかじめ十分な防食機能が付与された各種の防食 PC 鋼材を使用する事例がみられるようになってきている。

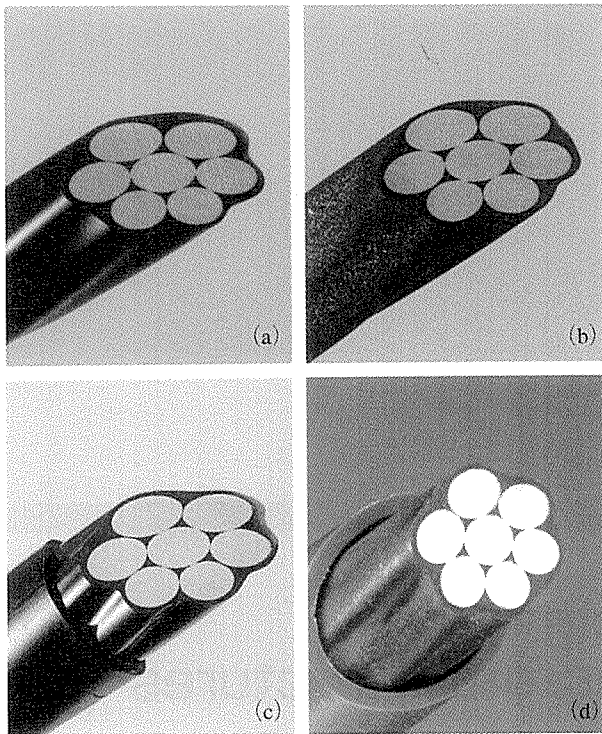


写真-1 各種エポキシストランド
 (a) 標準的なエポキシストランド
 (b) ケイ砂埋設型エポキシストランド
 (c) PE 被覆エポキシストランド
 (d) シーストエポキシストランド

その中の一つとして内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線（以下ここではエポキシストランドと略称する）があげられる。しかしながら、エポキシストランドの諸機能に関しては、過去に十分な報告がなされていない。

本稿では、エポキシストランド発展の歴史、国内で製造されているエポキシストランド（写真-1）の諸性能および品質管理システムの現状について解説する。

2. エポキシストランドの歴史

2.1 米国におけるエポキシストランドの開発と実用化

エポキシストランドの歴史は、1980 年代初頭の米国に始まる。米国でのエポキシストランドの開発については文献 1) に詳しく述べられている。背景となったのは、FHWA (Federal Highway Administration) が 1981 年に出した特定のプロジェクトに対しての「防食処理を施していない通常の PC 鋼より線の使用を制限する」通達である。なお同年には、エポキシ樹脂塗装鉄筋の ASTM 規格 (Standard Specification for Deformed and Plain Billet-Epoxy Steel Bar for Concrete Reinforcement) が制定されている。これら一連の動きは、1970 年代に米国で生じたコンクリート橋の損傷事例が引き金になっていると推察される。

当初のエポキシストランドは、写真-2 に示すようにストランドを構成する中芯線部分や外層線の内側部分には樹脂が充填されていないもので、新しく開発された厚膜塗装技術によって 0.64 mm (25/1 000 inch) 以上の塗膜があり、

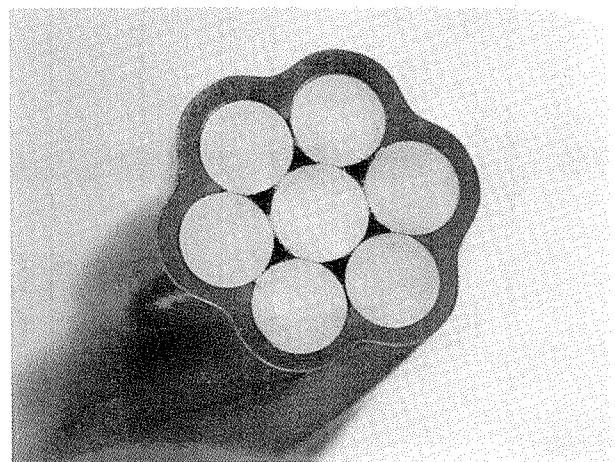


写真-2 米国で開発された当初の外周部のみエポキシを被覆したエポキシストランド

*1 Takashi MIURA : 東北大学大学院 教授

*2 Masataka SUMI : 日本道路公団 技術部構造技術課 課長

ストランドの端面を完全にシールして使用することを前提にした製品であった。また、これと同時に開発されたのが専用の定着ウェッジ（くさび）である。これは、エポキシ塗膜を貫通することなく強靱なエポキシ塗膜のみを掴むという、ある意味で画期的な定着システムであった。

このエポキシストランドが試験的に初めて実構造物に適用されたのが、バージニア州ポーツマスの浮き栈橋（1983年）である。その後、このPC鋼材はコンクリートスラブやポールにも試験的に採用されている。当時FHWAはこのエポキシストランドをPCストランドの防食対策の切り札と考え、各種試験室レベルの試験を行って良好な結果を得ている。これにより1985年にはオレゴン州のHubbard Creek Bridge、同年イリノイ州のQuincy Bridge（鋼・PC複合斜張橋用斜張ケーブル）などで、このPC鋼材が使用されている。さらにその後1986年には、エポキシストランドのASTM規格が制定されるに至っている（ASTM A882 Standard Specification for Epoxy Coated Seven-Wire Prestressing Strand）。その後いくつかの実施工を経て、画期的とされた「エポキシを貫通しないウェッジ」よりも「エポキシを貫通して鋼材に噛み込むウェッジ（バイトスルーウェッジ）」の方がより信頼性の高い定着性能が得られることが明らかとなった。Quincy Bridgeの斜張ケーブルには、バイトスルーウェッジが使用されており、以後、エポキシストランドの定着にはバイトスルーウェッジが一般的になった。一方、内部に樹脂が充填されていない当初のエポキシストランドは、鋼材端部の不完全なシール部分からストランド内部にセメントグラウト時の余剰水が侵入し、トラブルを起こした事例もあった²⁾。

2.2 国内における内部充填型エポキシストランドの誕生

1980年代の日本でも、構造物の耐久性向上を目的とした諸技術が広く論じられる中で、日本のPC鋼材メーカーが米国で普及し始めたエポキシストランドに着目し、1989年には米国からの技術導入を決定している。なおその際に、単純な技術導入ではなく、過去に生じた米国でのトラブルの対策として米国製の製品仕様、生産技術、品質管理システム、定着システム技術等に幅広く独自の見直しを加えられた。たとえばエポキシの塗膜厚さについては、以下の検討が加えられた。

- (1) 防食（とくにピンホールが生じない）の観点から必要とされる最小膜厚
- (2) 施工時に生じる塗膜厚さ減少の評価
- (3) 生産技術面の制約からの塗膜厚のばらつきを考慮した必要膜厚レベル
- (4) 定着性能面の制約から考えた膜厚レベル
- (5) バレー部（図-1参照）塗膜の連続性の確保
- (6) 内部充填型の製造方法の検討

このようなさまざまな観点から検討が加えられた結果、より高品質を確保するためにASTMの規格とは異なるメーカー自主規格が定められている。

このうち、生産技術面の制約とは、ストランドのような長尺物を連続で塗装する場合、ストランドを回転させながら塗装することができないために、ゲル化した樹脂が重力

によって垂れ、ストランド下部側塗膜が厚くなるのが不可避であること、また、平均的膜厚レベルが厚くなればなるほどその傾向が助長されるという制約である。定着性能面の制約とは、一定深さであるウェッジの歯がストランド外周鋼材にできるかぎり均一に達するよう意図することから生じる制約のことである。これらの制約から決定される膜厚の上限、防食に必要な下限レベルから適正な膜厚範囲を定めることができる。一方で、施工現場において端部シールが不確実であった場合やそれに伴う毛細管現象によるストランド内部への水分の侵入、湿気の滞留等の潜在的な危険性を考慮してより線の内部にもエポキシを充填した断面構造へと全面的に転換されている（図-1）。

このように決定された製品仕様を作り込む生産技術、全長にわたる膜厚計測を可能にするインライン膜厚計測器（写真-3）、エポキシストランドのメーカー自主規格に適合した専用ウェッジ、緊張・定着システムが開発され、エポキシストランドのポストテンション工法用鋼材としての使用環境が国内で整えられた。

1991年、内部充填型エポキシストランドはちふり湖橋の吊床版橋メインケーブルとして使用され、1993年には西湘バイパス小田原ブルーウェイブリッジの斜張ケーブル、首都高速湾岸線BY433工区高架橋の桁内外ケーブルに使用されるなど、大型橋梁への適用が始まった。その後、製造

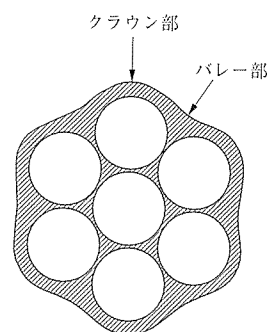


図-1 内部充填型エポキシストランドの構造

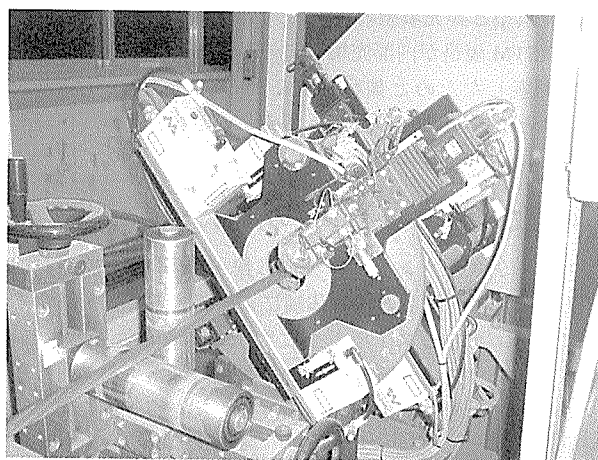
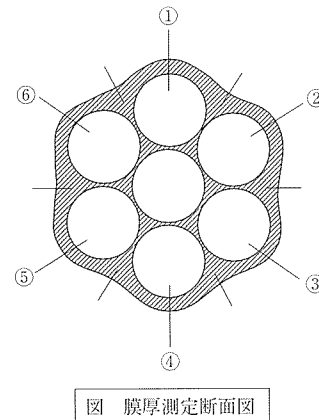


写真-3 インライン膜厚計測器

表 - 1 エポキシストランドの規格と主な規定内容

項目	規格	ASTM (A 882-2002)	ISO (14655-1999)
膜厚	規格範囲	クラウン部膜厚 < Fill タイプ > 0.38 ~ 1.14 mm	クラウン部膜厚 < Non-fill タイプ > 0.65 ~ 1.15 mm < Fill タイプ > 0.40 ~ 0.90 mm
	測定方法	・電磁式膜厚計を使用 ・製品 600 m またはそれ以下ごとに 1 箇所を測定ポイントとする ・各測定ポイントごとに、製品クラウン部 (図の①~⑥) の膜厚を測定	・電磁式膜厚計を使用 ・製品 1 条をほぼ均等に 5 等分し、その 5 箇所を測定ポイントとする ・各測定ポイントごとに、製品クラウン部 (図の①~⑥) の膜厚を測定し、その 6 データを平均した値を測定値とする
ピンホール	規格範囲	製品 30 m あたり 2 個以下	製品 30 m あたり 2 個以下
	測定方法	・湿式または乾式型ピンホールテスターを使用 ・製品全長を検査 ・規格範囲 2 個以下のピンホール部は補修。それ以上の場合は廃却。	・湿式型ピンホールテスターを 67.5 V、80 000 Ω の条件で使用 (上記と同様のテスターも使用可能) ・製品全長を検査 ・規格範囲 2 個以下のピンホール部は補修。それ以上の場合は廃却。



者も複数社となり、世界初の鋼・コンクリート複合エクストラード橋揖斐川橋・木曾川橋の外ケーブルへ適用されるなど、大型橋梁への適用が本格化した。なお、5年経過後の首都高速湾岸線の桁内外ケーブルの追跡調査では、ケーブルに異状は認められていない。

3. エポキシストランドの規格

現在エポキシストランドの規格としては、米国規格 ASTM と国際規格 ISO がある。ASTM 規格は当初 1986 年に制定され、1993 年版で内部充填型エポキシストランドが同規格内に Supplement として明文化されている。2002 年版では内部充填型エポキシストランドのみが正式規格となり、非充填型は需要家の要請に応じてのみ製造するように変更された³⁾。またこの時点で、クラウン部最小膜厚が 0.64 mm から 0.38 mm (15/1 000 inch) に引き下げられている。

ISO では、1994 年にエポキシストランド規格化の審議がスタートし、1999 年に規格制定に至っている。ISO 規格は内部充填型と非充填型の併記方式をとっているが、これは当時 ASTM 規格が内部充填型に一本化されていなかったことに配慮したためと推察される⁴⁾。すでに規格化された ASTM と ISO 規格との主たるポイントの比較を表 - 1 に示す。

4. エポキシストランドの性能

エポキシストランドの諸性能は使用するエポキシ樹脂、製造工程、さらに品質管理体制によって大きく異なる。ここでは、エポキシストランドに要求される特性とともに、図 - 2 に示す工程で静電粉体塗装されるエポキシストランドについて、各種試験によって検証された諸性能を以下に示す。

4.1 エポキシストランドに要求される性能

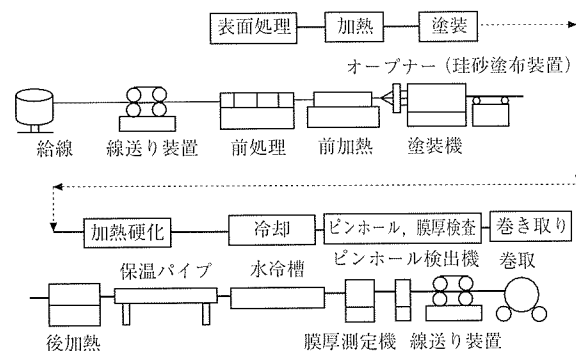


図 - 2 エポキシストランドの製造工程

エポキシストランドには通常、

- (1) JIS G 3536 PC 鋼より線に規定された機械的性能
 - (2) 鋼材の曲げに追従する塗膜の変形性能と鋼材との密着性
 - (3) 鋼材の曲げ配置部で生じる腹圧力に耐える塗膜強度、靱性および長期の変形特性
 - (4) 緊張力導入下での長期の耐食性
 - (5) 各種規準類に示される疲労性能
 - (6) 各種規準類に示される定着性能
- さらに、用途や特殊な使用条件によって
- (7) コンクリートとの付着性
 - (8) 低温下での塗膜性状および定着性状

などの性能が求められる。以下に、これらの試験方法および結果を示す。

4.2 塗膜の基本物性

エポキシストランドの塗膜には、施工時のハンドリングやケーブル曲げ配置部での腹圧力に耐えうる強度が必要である。一方、製造や施工の制約によりドラムに巻き取られたり、緊張されたりするために鋼材の変形や伸びに追従しうることが要求される。この強度と伸びの両立は、エポキ

シストランド用樹脂に要求される重要項目である。その特性を表 - 2 に示す。

4.3 エポキシストランドの機械的性能

(1) 基本性能

エポキシストランドの機械的性能の基本的特性を表 - 3 に示す。引張荷重, 0.2 % 永久伸びに対する荷重, 伸びは JIS G 3536 に規定される裸ストランドと同等で, エポキシ被覆による変化は認められない。エポキシストランドにさらにポリエチレン (以下 PE と略称する) 樹脂を被覆する場合も同様である。一方, リラクセーションは裸ストランドの低リラクセーション仕様と比べて大きくなる。これは, 塗装前の加熱処理によって鋼中で原子の再配列が進行するためであるが, 合金成分の添加によって低リラクセーション仕様とすることも可能であるとされている。

(2) エポキシ塗膜の諸特性

エポキシ塗膜と鋼とは, 引張試験で破断させた後でも剥離が起きないほどに強い密着性が得られている。(写真 - 4)。この強い密着力が, 重錘の落下による衝撃試験 (ASTM G14 - 72) によっても, 直下の局所的損傷のみにとどまる性状を生んでいる (写真 - 5)。また, 鋼材径の 32 倍の直径 (ASTM 規準) で曲げた際にも塗膜にクラック等の変状は生じないことが確認されている (写真 - 6)。

(3) 腹圧力による塗膜の変形状

表 - 2 エポキシストランドに使用されるエポキシ樹脂の特性

評価項目	エポキシ樹脂
引張強さ (N/mm ²)	58
引張伸び (%)	60
硬さ (鉛筆硬度)	H

本鋼材が外ケーブルに用いられる場合を対象に, もっとも大きな腹圧力が作用する偏向部 (R = 3 m) での塗膜の挙動が実物大試験で評価されている。試験要領を図 - 3 に示

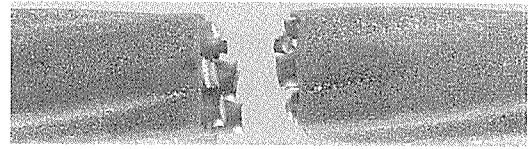


写真 - 4 エポキシ塗膜の追随性



写真 - 5 塗膜の耐衝撃性

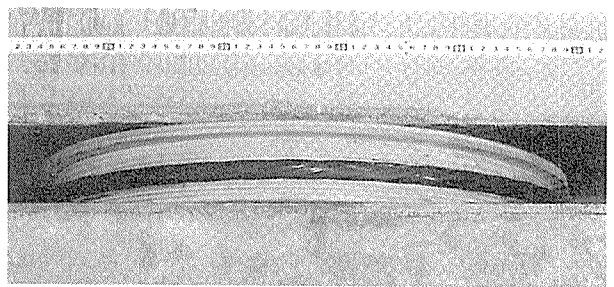


写真 - 6 塗膜の耐曲げ性

表 - 3 エポキシストランドの機械的性能

	エポキシストランド	エポキシ+PE被覆ストランド	裸ストランド	JISG3536の規格
0.2 耐力(kN)※	243	245	246	≥ 222 kN
引張荷重(kN)※	276	276	274	≥ 261 kN
伸び(%)※	6.7	6.6	6.8	≥ 3.5 %
リラクセーション(%) ※※	4.3	4.2	1.1	≤ 2.5 % (低リラクセーション規格) ≤ 8.0 % (通常リラクセーション規格)

※) データは供試体数 10 の平均値 ※※) データは供試体数 3 の平均値

表 - 4 PE 被覆の特性値

評価項目	PE 被覆
引張強さ (N/mm ²)	40
引張伸び (%)	650
硬さ (鉛筆硬度)	HB

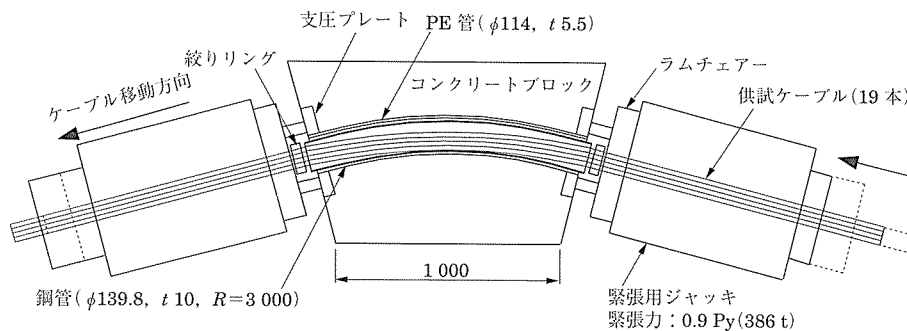


図 - 3 偏向部潰れ試験要領図

す。0.9 Py の緊張荷重を負荷して 200 mm の鋼材移動量を与えた後に除荷し、応力負担が大きい箇所での塗膜状況が観察されている (図 - 4)。比較のために供試材としてエポキシストランドに PE を被覆した PE エポキシストランドについても同様の評価が行われている。

エポキシストランドでは、塗膜に塑性変形が生じているものの、塗膜厚は約 60 % 残存している (写真 - 7)。PE 被覆エポキシストランドでは、外層の PE 被覆は潰れて膜厚を喪失しているものの、エポキシ塗膜は試験前の膜厚を保持している (写真 - 8)。用いた PE 樹脂の特性値を表 - 4 に示す。

4.4 耐食性

耐食性は、供試材が無負荷の状態と緊張状態の両方で評

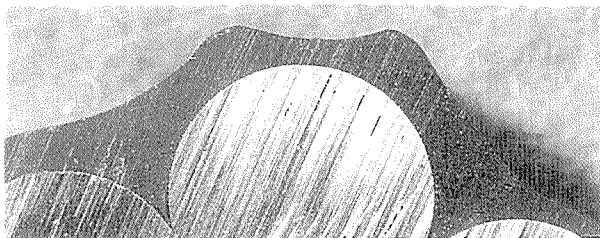


写真 - 7 腹圧力によるエポキシ塗膜の変形例 (エポキシストランド)



写真 - 8 腹圧力によるエポキシ塗膜と PE 被覆の変形例 (PE 被覆エポキシストランド)

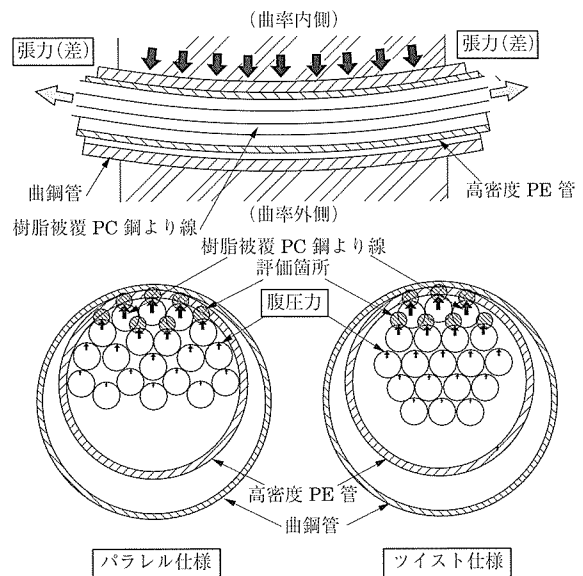


図 - 4 偏向部の状況と樹脂塗膜の評価箇所

価が実施されている。

(1) 無緊張力下での耐食性試験

無負荷状態では、塩水噴霧試験と耐水性、ならびに耐薬品性試験が実施されている。また、腐食の進展を観察するためエポキシストランドの表面にあらかじめφ6 mm の人工孔をあけた供試材、比較として裸ストランド、亜鉛めっきストランド (亜鉛付着量 310 g/m²) も同様に評価されている。試験結果を表 - 5、写真 - 9.1 ~ 5 に示す。耐水性、耐薬品性および塩水噴霧試験において、エポキシストランドの塗膜に異常は認められなかった。また、エポキシ表面に人工孔をあけた供試材では NaOH を除き孔部分での腐食が認められるものの、孔周辺への進展はない (写真 - 10)。

(2) 緊張力下での耐食性試験

本試験は鋼製フレームに破断荷重の 70% の緊張力を負荷したエポキシストランドを定着金具で固定し、定着部に防食措置を施した後 3 000 時間の塩水噴霧試験で評価されている (写真 - 11)。試験終了後のストランドの外観および内部の解体調査のいずれにおいても、発錆は認められていない (写真 - 12)。

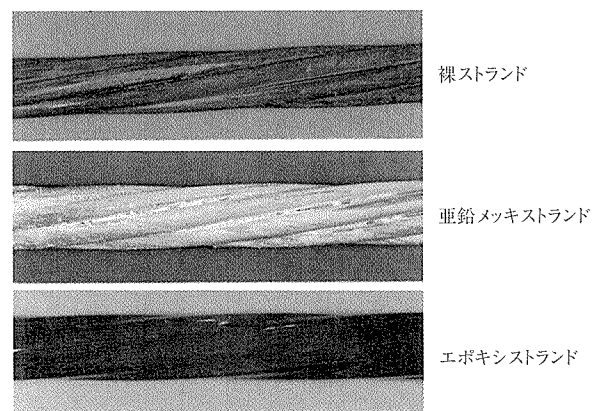


写真 - 9.1 無負荷での耐食性試験結果 (蒸留水)

表 - 5 エポキシストランドの耐食性試験結果

耐水性	試験方法 ASTM G20-77 に準ずる 試験液：蒸留水	試験結果			
		試験液	エポキシ	裸ストランド	亜鉛めっき
		蒸留水	異常なし	発錆	発錆 (白錆)
耐薬品性	3 mol CaCl ₂ 3 mol NaOH 飽和 Ca(OH) ₂ 試験温度 20℃ 試験時間 1 090 Hr (45 日間)	3 mol CaCl ₂	異常なし	発錆	発錆 (白錆)
		3 mol NaOH	異常なし	異常なし	発錆 (亜鉛溶解)
		飽和 Ca(OH) ₂	異常なし	変色	発錆 (白錆)
塩水噴霧試験 (無緊張力下)	ASTM B117-73 に準ずる 試験温度 50℃ 試験時間 1000 時間	塩水噴霧	異常なし	発錆	発錆 (白錆)
塩水噴霧試験 (緊張力下)	引張荷重の 70% の荷重を負荷した状態での 3 000 時間試験		異常なし		

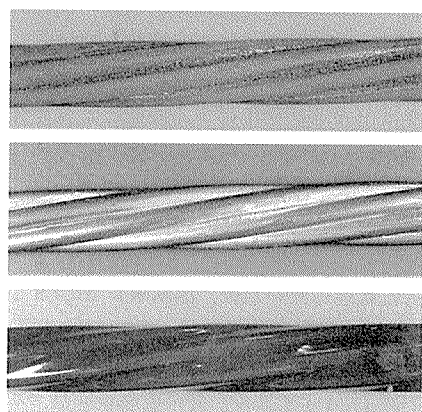


写真 - 9.2 無負荷での耐食性試験結果 (CaCl₂)



裸ストランド



亜鉛メッキストランド



エポキシストランド

写真 - 9.5 無負荷での耐食性試験結果 (塩水噴霧)

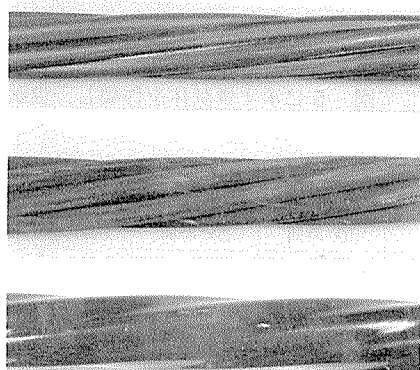
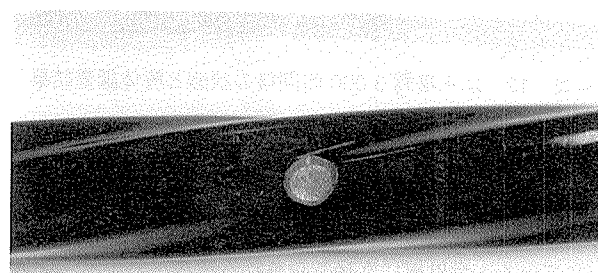


写真 - 9.3 無負荷での耐食性試験結果 (NaOH)



ストランドに φ 6 mm の孔を設けて腐食試験したところ (CaCl₂ 溶液)

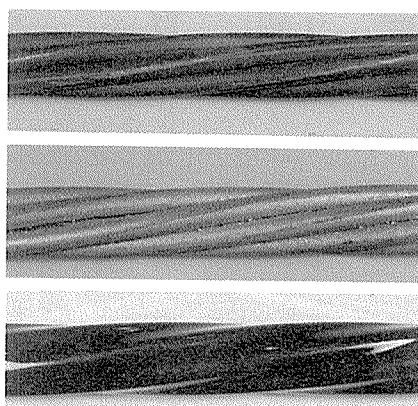
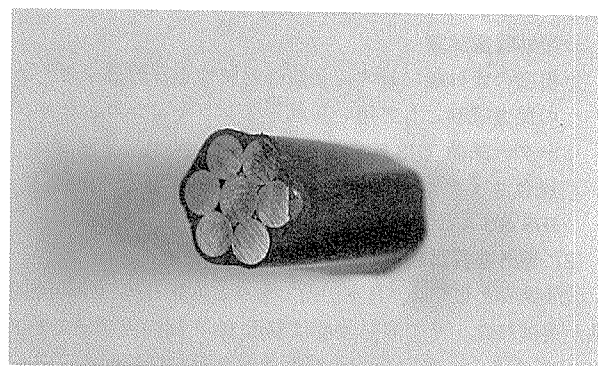


写真 - 9.4 無負荷での耐食性試験結果 (飽和 Ca(OH)₂)



ストランド孔の部分ストランド断面側から観察したところ
写真 - 10 無負荷での耐食性試験 人工孔試験片での結果 (CaCl₂)

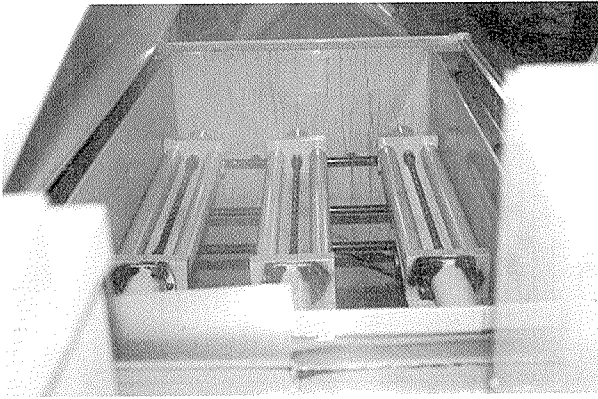


写真 - 11 緊張力導入後の塩水噴霧試験片セットの状況



写真 - 12 塩水噴霧 3 000 時間後の状態と解体調査結果

4.5 耐紫外線劣化特性

(1) 概 要

一般にエポキシ樹脂は紫外線により光劣化することが知られている。紫外線に直接さらされる環境下でエポキシストランドを恒久的に使用することは適切ではない。エポキシストランドが桁内のような光量が少ない環境下で長期に使用された場合に、どの程度初期の性能を維持できるかを確認するため、3種類の実験が実施されている。

- ① 屋外曝露試験
- ② 樹脂の紫外線に対する長期の耐候性を、評価するための促進試験として用いられるサンシャインウエザオメーター試験 (JIS K 5400)
- ③ 複合サイクル試験 (鋼橋用塗料の日本道路公団規格; JHS 403 A 法)

(2) 屋外曝露試験

試験場所としては、日本国内でもっとも紫外線の強い沖縄県が選ばれた。その照射強度は最近 10 年間の実測値で約 8 W/m² である。一方、桁内の照射強度を蛍光灯程度と仮定した場合、その強度は約 0.015 W/m² で、沖縄での屋外曝露は桁内の約 500 倍の強度を有することになる。したがって、

沖縄での曝露試験 1 ヶ月間は桁内での約 40 年間に相当すると考えられる。沖縄県嘉手納町にある曝露試験場でエポキシストランドを 6 ヶ月間 (1994 年 10 月～1995 年 4 月) 曝露した後 (写真 - 13)、ASTM A 882 の曲げ試験を実施した。その結果では、塗膜のクラック等の異常は認められなかった。エポキシストランドは、桁内の紫外線程度では長期にわたってその性能が維持できると考えられる。

(3) サンシャインウエザオメーター試験

エポキシストランドと同じ塗料を鋼板に塗装した供試材を用い、サンシャインウエザオメーターによる 300 時間の促進試験が実施された。照射強度は 80 W/m² であり、桁内の約 5 000 倍となるため、300 時間の促進試験は桁内の約 180 年に相当すると考えられる。

促進試験後、塗膜の膜厚、表面光沢および鋼板の曲げ試験を実施した結果を表 - 6 に示す。膜厚は変化しているものの、試験前の膜厚バラツキの範囲での変化と考えられる。光沢は塗膜表面にチョーキング発生による時間とともに減少したと考えられるが、曲げ試験の結果に変化が認められないことから、塗膜性能は維持されていると考えられる。

(4) 複合サイクル試験

複合サイクル試験の方法は、96 時間の紫外線照射によってエポキシ塗膜を劣化状態に置いた後、塩水噴霧 (0.5 h : 30 ℃) → 湿潤 (1.5 h : 30 ℃) → 熱風乾燥 (2.0 h : 50 ℃) → 温風乾燥 (2.0 h : 30 ℃) を 1 日に 4 サイクル繰り返すものである。180 日間 (720 サイクル) 後の塗膜状態は、写真 - 14 に示すとおりで、塗膜に発錆、ふくれ、はがれ等の異常はない。

4.6 コンクリートとの付着特性

付着特性の評価は、日本コンクリート工学協会の鉄筋の引抜き試験法に準じて図 - 5 に示す供試体を作製し、供試

表 - 6 サンシャインウエザオメータ試験によるエポキシ塗膜の耐紫外線劣化性試験

	試験前	100 時間	200 時間	300 時間
膜厚	602 μm	572 μm	583 μm	625 μm
光沢	93.4 %	64.1 %	25.1 %	15.9 %
曲げ試験	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし

※供試体数 3 の平均値

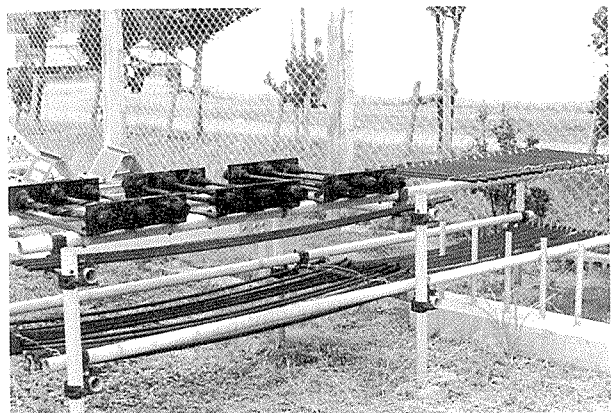


写真 - 13 沖縄曝露試験の状況

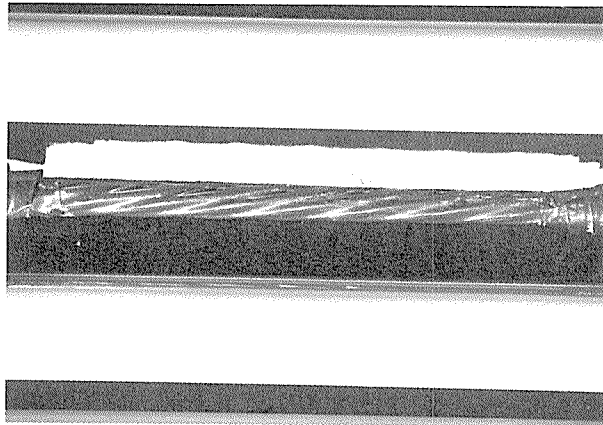


写真 - 14 複合サイクル試験 180 日後の状況

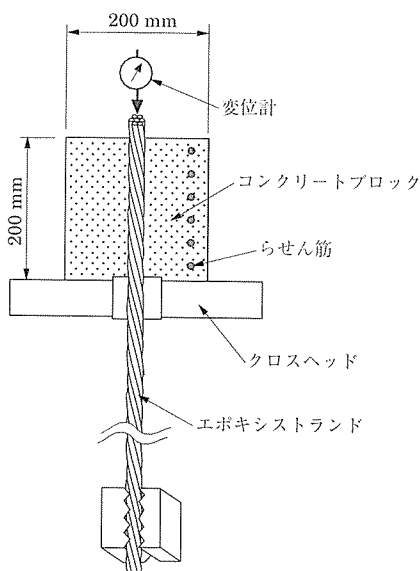


図 - 5 引抜き試験要領図

表 - 7 引抜き試験によるコンクリートとの付着性能評価試験

	標準型 エポキシストランド	ケイ砂埋設型 エポキシストランド	裸ストランド
初滑応力	70 N/cm ²	176 N/cm ²	160 N/cm ²
最大応力	354 N/cm ²	426 N/cm ²	410 N/cm ²

※供試体数3の平均値
コンクリート強度 27.6 MPa
周長はいずれも $4/3 \cdot \pi D$ (D : ストランドの直径) で算出

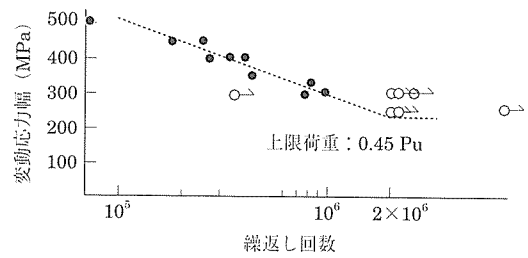
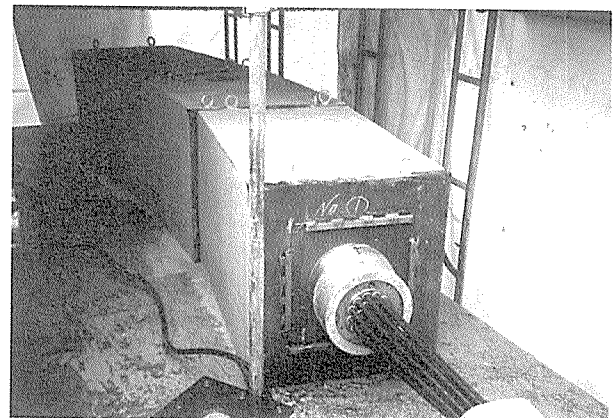
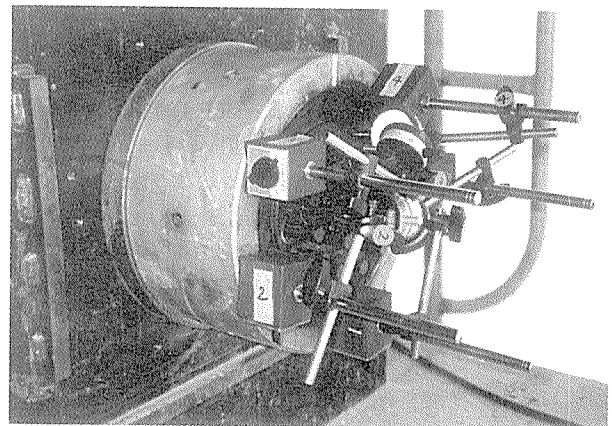


図 - 6 ウェッジ定着したエポキシストランドの疲労試験結果



積雪を避けるためテント内に設置した偏向部を有するコンクリートブロック



固定端の変位計取付け状況

写真 - 15 寒冷地におけるウェッジ定着の長期安定性試験

材が 0.025 mm 滑った時の初滑荷重および最大荷重の計測によって実施されている。塗膜表面にケイ砂を埋設させたタイプと標準型のエポキシストランドを供試材とし、比較

表 - 8 国内で実施したエポキシストランドを用いたマルチケーブルの疲労試験結果

供試体番号	ケーブル構成	基本荷重	グアウト	変動応力幅 (MPa)	ストランドの最大偏向角	試験結果	摘要
1	4S15.2	下限 0.6 Pu	なし	100.0	7.65°	200 万回で未破断	外ケーブル偏向部を対象としたモデル試験, R=1.75 m 外ケーブル偏向部を対象にエポキシ塗膜のフレッチング防止効果の確認試験, R=3.0 m
2	2S15.2	下限 0.6 Pu	なし	50.0	2.5°	200 万回で未破断	
3	9S15.2	上限 0.45 Pu	なし	160.0	3.8°	200 万回で未破断	大容量斜張ケーブルを対象とした軸疲労モデル試験 大容量斜張ケーブルを対象とした軸疲労モデル試験
4	9S15.2	上限 0.45 Pu	あり	160.0	3.8°	200 万回で未破断	
5	9S15.2	上限 0.45 Pu	あり	200.0	3.8°	200 万回で未破断	大容量斜張ケーブルを対象とした軸疲労モデル試験 実橋の外ケーブルを対象とした軸疲労試験
6	12S15.2	下限 0.6 Pu	あり	100.0	3.6°	200 万回で未破断	
7	19S15.2	下限 0.6 Pu	あり	67.0	3.0°	200 万回で未破断	実橋の斜張ケーブルを対象とした曲げ疲労試験 外ケーブルを対象とした偏向部を含む実大モデル試験, R=3.0 m
8-1	19S15.2	下限 0.6 Pu	なし	50.0	14.0°	300 万回で未破断	
8-2	19S15.2	下限 0.6 Pu	なし	50.0	14.0°	300 万回で未破断	外ケーブルを対象とした偏向部を含む実大モデル試験, R=3.0 m 実橋の斜張ケーブルを対象とした軸疲労試験
9	48S15.2	下限 0.6 Pu	あり	80.0	2.5°	200 万回で未破断	

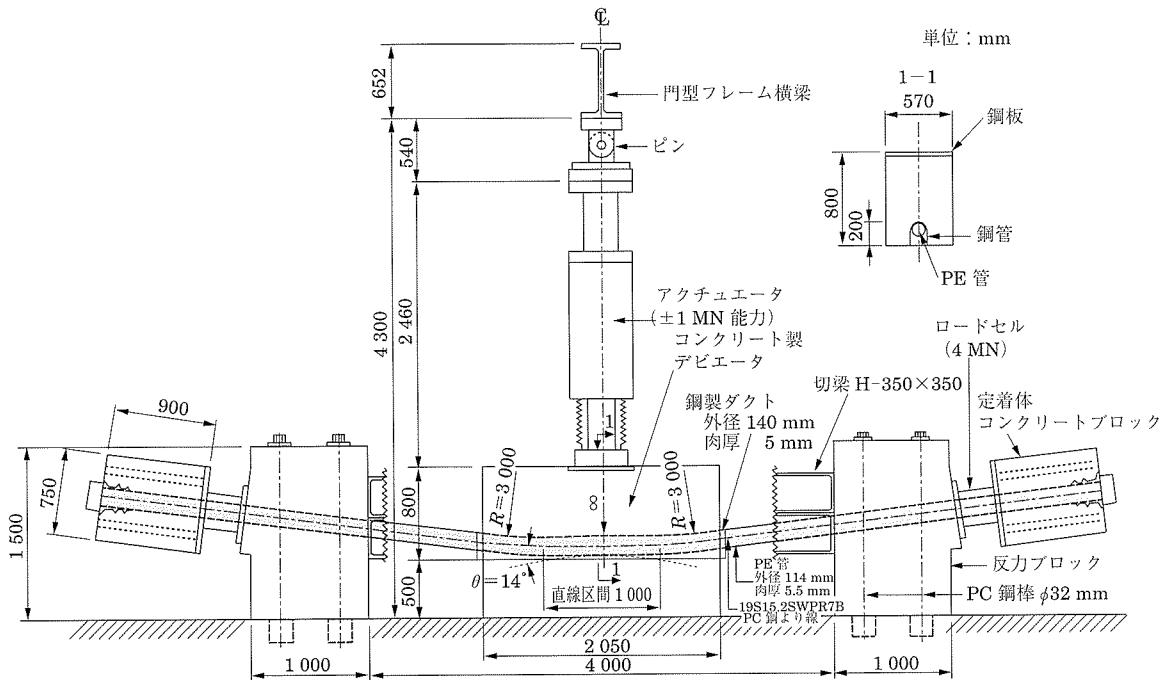


図 - 7 偏向部を含む外ケーブルの実物大疲労試験の試験装置図

のため裸ストランドも加えられている。引抜き試験結果を表 - 7 に示す。ケイ砂埋設型は、初滑荷重、最大荷重ともに裸ストランドと同等の水準にあるといえる。

4.7 その他の特性

(1) 疲労特性

エポキシストランド 1 本を上限荷重 0.45 Pu (Pu : 規格引張荷重) としてウェッジ定着した供試材の疲労試験結果を図 - 6 に示す。200 万回の繰返しにおける疲労強度は約 250 MPa 以上であり、米国 PTI (Post Tensioning Institute) の “Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation” が同荷重条件で、斜張ケーブルの構成要素システムについて規定する 228 MPa を満足するものである。これは、エポキシ樹脂がストランドを構成する素線同士の微少な相対移動を拘束するとともに、定着具とストランド境界領域への酸素の供給を断ち、フレッチング (微動摩擦腐食) を防止することによる効果と考えられる。エポキシ樹脂被覆による疲労特性の向上については文献 5), 6) にその記述がある。エポキシ塗膜は、ケーブルが曲げ配置される部位や定着領域などストランド同士が重なり合っ高い腹圧力を生じる位置でも残存することから、鋼材同士の直接接触を回避するクッション材として機能し、フレッチングを防止して疲労性能を高める。

表 - 8 に国内で実施したエポキシストランドを用いたマルチケーブルの疲労試験結果を示す。一般に、外ケーブルに要求される疲労性能は下限荷重を 0.6 Pu として高々 20 MPa 程度と考えられる。文献 6) によれば、裸ストランドとセメントグラウト、プラスチック製保護管からなる外ケーブルは、0.6 Pu を下限荷重とした変動応力幅 20 MPa の疲労試験で 1 000 万回の繰返し後も未破断であるものの、50 MPa の変動応力幅では約 116 万回で初破断、約 203 万回で

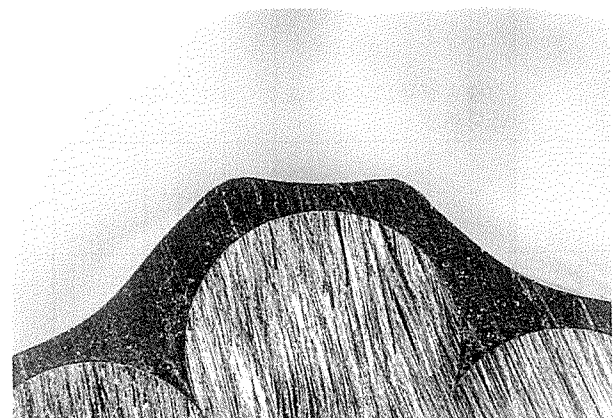
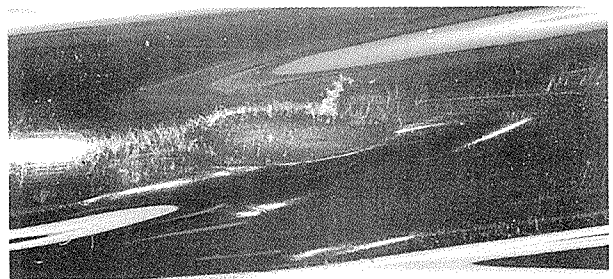


写真 - 16 寒冷地における偏向部腹圧力試験後のエポキシ塗膜状況

素線の 5% 破断を生じている。一方、エポキシストランドは、同一の試験装置、荷重条件、グラウトなしの状態でも 300 万回の繰返し載荷で未破断であり⁷⁾、内部充填型エポキシストランドの疲労性能向上効果が認められる。その試験装置図を図 - 7 に示す。

(2) 低温特性

エポキシ樹脂には低温になるほど強度は向上する反面伸びは低下する性質がある。塗膜にもっとも過酷な条件を与える低温下での偏向部の状況確認のために、偏向部を含む曝露試験が北海道旭川市で実施されている（写真 - 15）。本試験では緊張力負荷状態で約 15 ヶ月間曝露された供試体の偏向部（ $R = 3 \text{ m}$ ）でのエポキシ塗膜の状況、定着領域での状態が観察された。その結果は写真 - 16 に示すとおり、残存したエポキシ塗膜に、割れや剥離の異常は認められていない。

5. 品質管理システム

エポキシストランドの塗装工程では、リアルタイムでの膜厚測定とピンホール検査による全長管理に加え、端末サンプルの光学顕微鏡による膜厚計測が実施されている。

(1) 膜厚測定

エポキシストランドは、もっとも損傷を受けやすいクラウン部での膜厚が計測されている。この膜厚をリアルタイムで管理するためには、電磁式膜厚計を応用したインライン膜厚測定機が実用化されている。その原理は、図 - 8 に示すように電磁式膜厚計により膜厚計先端から裸ストランド内部までの距離 g を測定し、同時に膜厚計に対し垂直に配置されたレーザー外径測定機により膜厚計先端からエポキシ塗膜表面までの距離 h を測定し、膜厚 $t = g - h$ を算出するというものである。この方法でエポキシストランドの膜厚を 4 方向から測定している。測定チャートの例を図 - 9 に示す。

一方、クラウン部以外の膜厚はドラムに巻き取られたストランド端末からサンプルを採取している。精密カッターで切断した断面を光学式顕微鏡で拡大して、断面内の最小膜厚が計測・管理されている。

(2) ピンホール検査

ピンホールは、乾式型検出器によりエポキシストランドとの電圧を 3kV として実施されている（写真 - 17）。この電圧は、健全な塗膜を損傷させず、かつ、塩水噴霧で腐食を生じるレベルを微小な人工欠陥によって検証することで設定されたものである。ピンホールが検出されることは稀少であるが、検出されたピンホールはすべて次工程におい

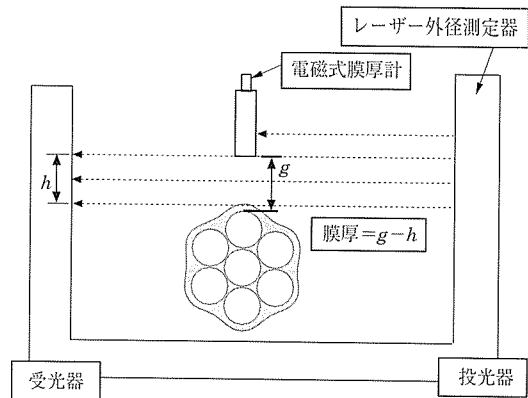


図 - 8 インライン膜厚測定原理

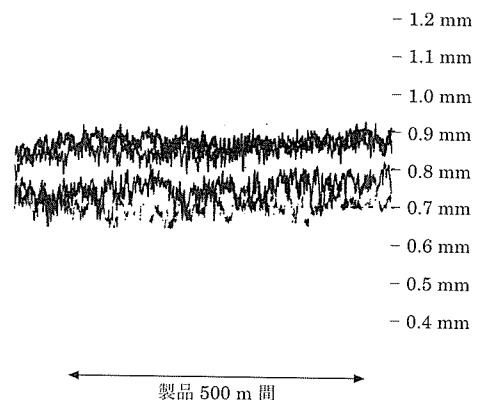


図 - 9 インライン膜厚測定による出力結果

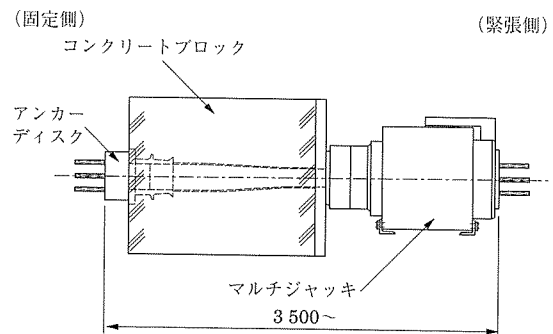


図 - 10 静的定着性能試験要領図

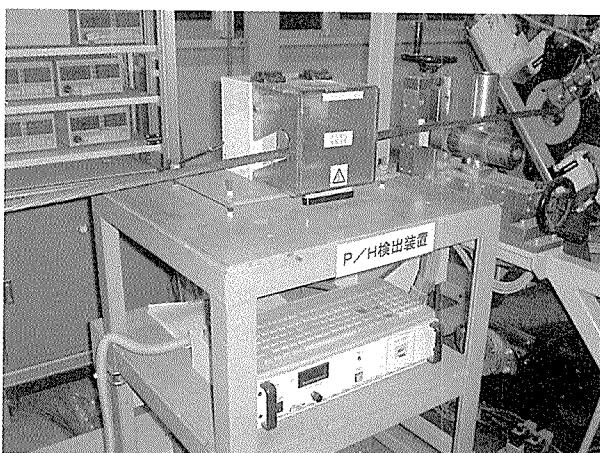


写真 - 17 ピンホール検出器

て専用の補修塗料を用いて補修される。

6. エポキシストランドの定着性能

エポキシストランドの定着には、鋼材地肌到達する専用ウェッジが用いられる。その静的定着性能は図 - 10 に示す方法で表 - 9 に示す結果が得られている。また、動的な定着性能についても、図 - 6 や表 - 8 に示す良好な結果が得られている。さらに、長期的観点からも定着後に滑り等の変状が生じないことが、先の寒冷地での長期曝露試験から図 - 11 に示すように得られている。緊張作業時に生じるセット量については、図 - 12 に示す装置での計測結果から 9 mm との結果が得られている。さらに、長尺ケーブルの際に不可避な緊張中の盛換え作業に伴う安全性についても検

表 - 9 エポキシストランドを使ったマルチケーブルの静的引張試験の例

ケーブルの種類	12S12.7	12S15.2	19S15.2	27S15.2	48S15.2
規格引張荷重 (kN)	2 196.0	3 132.0	4 959.0	7 047.0	12 528.0
破断荷重 (kN)	2 255.0	3 060.0	5 073.0	(6 939.0) ^{※2}	(11 901.6) ^{※2}
定着効率 ^{※1} (%)	102.7	97.7	102.3	≥98.5 ^{※2}	≥95.0 ^{※2}
試験方法	土木学会「プレストレストコンクリート工法の定着具および接続具の試験方法」				
評価基準	定着効率 ≥ 95 % 以上				

※1：定着効率 (%) = ケーブルの破断荷重 / ケーブルの規格引張荷重 × 100
 ※2：定着効率 95 % 以上を確認して除荷。破断に至っていない。

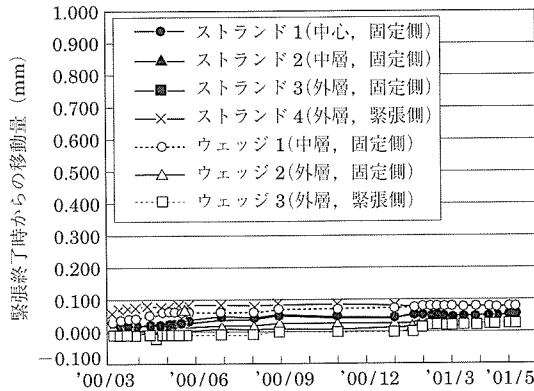


図 - 11 寒冷地におけるウェッジ定着の長期安定性試験

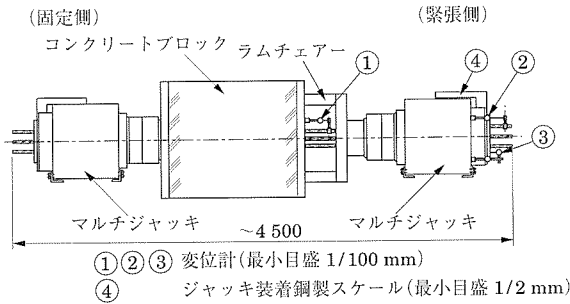


図 - 12 セット量測定試験要領図

証されている。これは、緊張・定着の繰返しによって、エポキシストランド表面のエポキシ微粒子が擦り落とされたり、その微粒子がウェッジの歯面部に堆積して定着性能に悪影響を及ぼしたりしないかという懸念に対する検証である。200 m 長の 19S15.2 ケーブルについての、片引きで 5 回の間中定着を実施した後のウェッジ歯面部観察 (写真 - 18) から、盛換え緊張による定着への悪影響はないことがわかる。また、エポキシストランドの定着には、セットロスのばらつきを抑え、定着の確実性を高めるためにウェッジ定着 (押し込み) 装置を装着したものを使用する必要がある。

プレテンション部材への適用を対象に、ケイ砂埋設型エポキシストランドと裸ストランドの付着伝達長を FIP 規定の方法⁸⁾で測定した結果によれば、図 - 13 に示すとおり付着伝達長は裸ストランドとほぼ同等である。ただし、エポキシは高温域で軟化するため、プレテンション用鋼材として使用する際には緊張力解放時温度を 65 °C 以下にすること

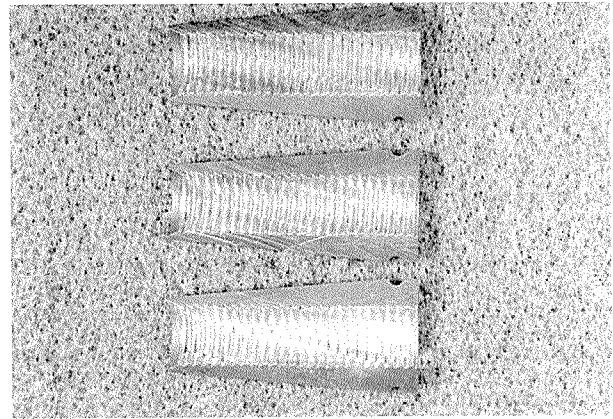
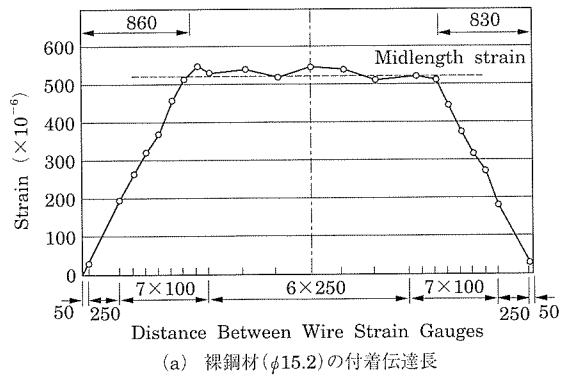
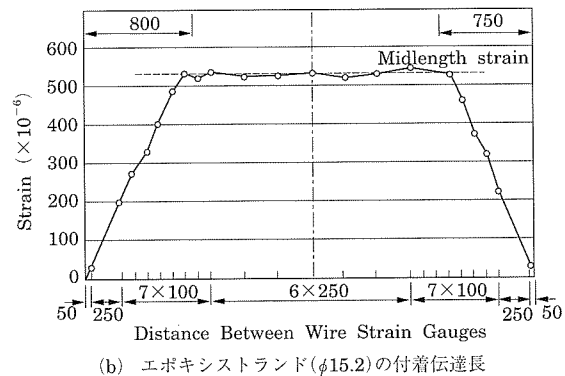


図 - 18 5 回の間中定着を実施した後のウェッジ歯面の一例



(a) 裸鋼材 (φ15.2) の付着伝達長



(b) エポキシストランド (φ15.2) の付着伝達長

図 - 13 付着伝達長試験結果

が重要である。マッシュな部材や蒸気養生の際にはとくに注意が必要である。

7. エポキシストランドの摩擦係数

エポキシストランドが内ケーブルに用いられる場合には、配置や緊張時の塗膜損傷を回避するために高密度 PE シースとともに用いられている。これまでの橋梁での使用例によれば、緊張管理時に計測されたみかけの摩擦係数 μ は表 - 10 に示すとおりである。これより、設計時の摩擦係数は、裸ストランド + メタルシースの場合と同様の値をとってよいと考えられる。

8. エポキシストランドの使用実績

国内で、エポキシストランドは外ケーブル (写真 - 19)、

表 - 10 エポキシストランドを使用した内ケーブルの摩擦係数 μ のデータ例

物件	ケーブル容量 (ポリエチレンシース内径)	ケーブル長 (m)	角変化合計 (度)	摩擦係数 μ	備考
A 橋	12S12.7Ep (70 mm)	36.5 (支間ケーブル, 3 ケーブル)	8	平均 = 0.16 (0.13 ~ 0.19)	試験緊張 ケーブル配置曲げ半径 R=10 m
B 橋	12S12.7Ep (70 mm)	62 ~ 68 (2 径間分の支間ケーブル, 16 ケーブル)	58 ~ 65	平均 = 0.216 (0.19 ~ 0.27)	ケーブル配置曲げ半径 R=20 m 主桁曲げ半径 R=50 m
C 橋	12S12.7Ep (75 mm)	84 ~ 112 (3 径間分の支間ケーブル, 32 ケーブル)	45 ~ 64	平均 = 0.18 (0.10 ~ 0.26)	ケーブル配置曲げ半径 R=10 m

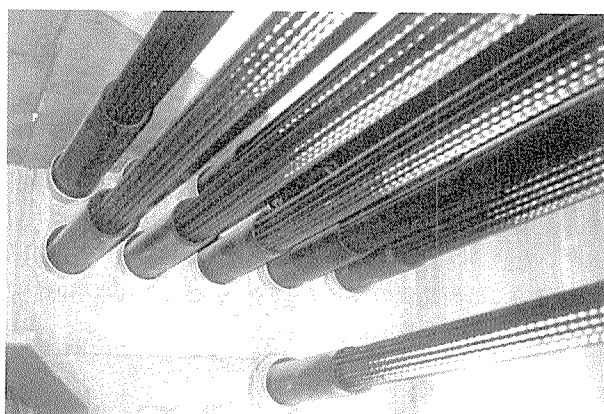


写真 - 19 桁内に架設されたエポキシストランドを用いた外ケーブル

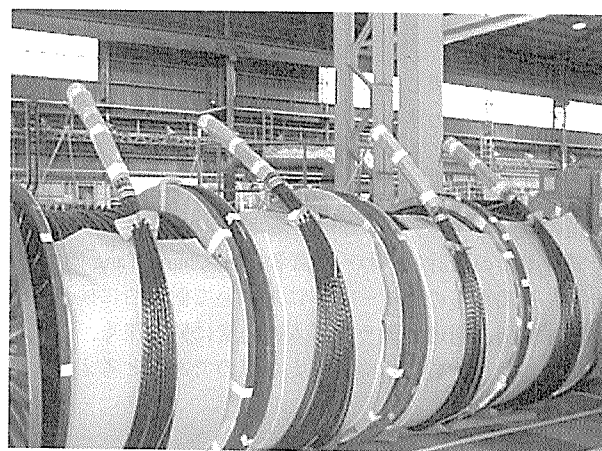


写真 - 20 外ケーブル用ケーブル加工品の出荷荷姿

エクストラードズド橋の斜張ケーブル、プレテンション桁等、多様な構造物に使用されている。海外では米国を除いて供給者が少ないこともあり、その使用例は大規模な斜張ケーブルなどに限られているようである。

エポキシ樹脂は耐紫外線特性には優れないため、直接日射にさらされる場合には必ず PE 被覆などと共に用いることが重要である。

9. 終わりに

以上エポキシストランドについて、その歴史、規格、諸性能を概観した。日本の施工現場では、エポキシ塗膜の損傷をなくすために、その荷姿、挿入・配置方法等についてさまざまな工夫がなされている。たとえば、写真 - 20 に示す、1 本の外ケーブルを構成する 19 本のエポキシストランドを定尺に切断したものを、クッション材で養生した鉄ドラムに平行状態に巻取り加工したものや、挿入・配置時の通過位置全長を PE で養生することなどがその一例である。このような配慮によって、塗膜の損傷なく施工が可能であることは実績の示すところである。一方では、不慮の事態によって傷ついた塗膜を見落とし、補修されることなく供用される事態を想定して、エポキシ塗膜損傷の許容範囲を押さえておくことは将来の課題といえる。今後、人工欠陥を設けた鋼材を緊張状態で評価することなどによって、このような点を明らかにすることも必要であろう。

またその他の問題としては、複合サイクル試験や一部の疲労試験を除いて、現在の確認試験のほとんどが経年劣化のない健全なエポキシ塗膜を有するストランドを対象にし

たものであることから、一定のエポキシの劣化下での耐久性評価も重要といえよう。さらに、詳細な取り扱いマニュアルの整備などで、エポキシストランドががねに適切に使用される環境を整えることも重要である。

本報告が、エポキシストランドの使用に対する現状の理解、またあわせて今後のより耐久的な PC 構造発展の一助となれば、著者らの大きな喜びである。なお、本稿作成にあたり各技術委員会および製造メーカー各社から貴重な資料提供を受けた。ここに記して謝意を表したい。

参考文献

- 1) V.Dorsten,F.F.Hunt,H.K.Prenston : "Epoxy Coated Seven-Wire Strand For Prestressed Concrete". PCI Journal, Vol.29, No.4, July-August 1984
- 2) 例えば Corrosion protection of prestressing steels : FIP Recommendations, 1996
- 3) ASTM Standard A-882 2002"Standard Specification for Filled Epoxy-Coated Seven-Wire Prestressing Steel Strand"
- 4) ISO Standard 14655-1999 "Epoxy-coated strand for the prestressing of concrete"
- 5) D.Jungwirth, A.Windisch : "Coating of Tendons "FIP-X II th Congress Washington, 1994
- 6) 新井英雄, 藤田学, 梅津健司, 鮎子多浩一, 上田多門: 大容量 PC 鋼より線の曲げ配置部におけるフレッチング疲労特性, 土木学会論文集 No.627/V-44, 205-222, 1999.8
- 7) Y.Hoshino,M.Yamada,M.Nishino : "External Cable using Epoxy-Coated Strands" fib 1st Congress Osaka, 2002
- 8) Report on Prestressing Steel: 7. Test for the determination of tendon transmission length under static conditions, FIP, January 1982

【2003年3月7日受付】