

ポストテンション方式の 炭素繊維複合材ケーブル用定着具の開発

岡田 稔*1・渡辺 孝司*2・榎本 剛*3・古瀬 徳明*4

近年、経年したPC構造物のストックの増大による維持管理費用の増加が問題となっている。一方、新設のPC構造物においては高耐久化が熱望されている。PC構造物の高耐久化の実現のために、緊張材を腐食から保護するために開発された被覆PC鋼材は、その高い防食性能から積極的に採用されている。その一方で、まったく腐食する要因をもたない緊張材として炭素繊維複合材ケーブルも開発されたが、ポストテンション方式の緊張材としての採用例はわずかであり、一般的に普及していないのが現状である。普及しない要因としてポストテンション用の定着システムが一般的なクサビ式でなく設計や施工方法が限定させるものが多かったことあげられる。そこで、炭素繊維複合材ケーブルをPC構造の要である緊張材に適用し、PC構造物の耐久性を飛躍的に向上させることを目的として、新型定着システムの開発を行った。本稿では炭素繊維複合材ケーブルを普及させるための課題とその解決に向けて開発した新型定着システムの概要や性能報告などを記す。

キーワード：炭素繊維複合材ケーブル、くさび式定着具、耐久性向上

1. はじめに

近年、経年したPC構造物のストック増大による維持管理費用の増加が問題となっている。これを受け、新たに建設するPC構造物に対しては、建設時の段階で耐久性を向上させる技術を組み合わせて使用し、ミニマムメンテナンスを考慮した設計・施工が図られている。

炭素繊維複合材ケーブルは、炭素繊維とエポキシ樹脂によって構成された錆びる要因をもたない緊張材であり、ポストテンション用の緊張材としてPC構造物へ用いることができれば、PC構造物の耐久性が飛躍的に向上すると考えられる。しかし、開発から25年以上が経過しているにもかかわらず、ポストテンション方式の緊張材として採用された例は少なく、残念ながら普及するまでに至っていない。この理由として、炭素繊維複合材ケーブルの定着具がネジ式であるということが考えられる。一般に、ネジ式定着具は、あらかじめ工場でのネジ加工する必要があるため、ケーブルの伸びやたるみなど事前の検討が必要となる。さらに、定着具の構造もケーブルの径に対して大きくなるため、構造形式や施工方法によっては適用が困難な場合も少なくなかった。

一方、ポストテンション方式の定着システムとしては、これらの問題を有さないくさび方式の定着具が圧倒的に多い。よって、炭素繊維複合材ケーブルに対してもくさび式定着具が適用できれば、設計・施工の幅が広がり、PC構造物の耐久性向上に大きく寄与できるものと思われる。ただし、炭素繊維複合材ケーブルに対して、くさび方式の定着具を適用すると、応力集中により低荷重で破断してしま

い、緊張材としての性能を十分に発揮することができないことが知られている¹⁾。

本稿では、さまざまな改良と試験の繰返しにより開発した炭素繊維複合材ケーブル用のくさび方式定着具の概要とその性能試験の結果を報告する。

2. 炭素繊維複合材ケーブル

炭素繊維複合材ケーブル(写真-1)は、炭素繊維とエポキシ樹脂で構成されたより線であり、錆びる要因の無い高耐久緊張材である。表-1に示すように、PC鋼より線に比べて単位長さあたりの質量が1/5と超軽量であるが、同径のPC鋼より線と同等の引張強度を有するという特徴を有している。また、リラクセーション値が小さいことから構造物へより有効に緊張力を導入できる利点も有している。

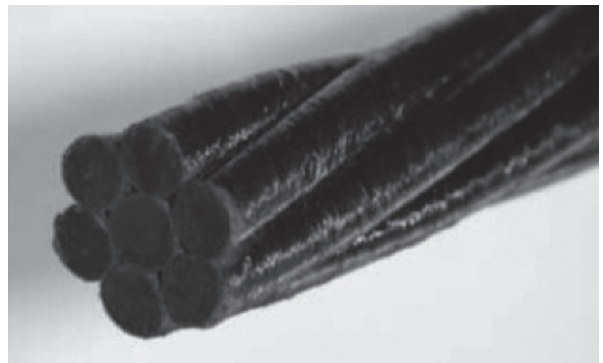


写真 - 1 炭素繊維複合材ケーブル

*1 Minoru OKADA：極東鋼弦コンクリート振興(株) 技術部

*2 Koji WATANABE：極東鋼弦コンクリート振興(株) 技術部

*3 Tsuyoshi ENOMOTO：東京製綱(株) TCT推進本部

*4 Noriaki KOSE：東京製綱(株) TCT推進本部

表 - 1 炭素繊維複合材ケーブルと PC 鋼より線の比較

線種	線径 (mm)	構成	引張破断荷重 (kN)	質量 g/mm	リラクゼーション (1000 時間) (%)
炭素繊維複合材ケーブル	12.5	7本より	184 (保証破断荷重)	145	1.3
PC 鋼より線	12.7	7本より	183 以上 (最大試験力)	774	2.5

3. 従来の定着システムの概要と課題

3.1 従来の定着システム

従来の炭素繊維複合材ケーブルの定着システムは、写真 - 2 に示す HEM 定着具²⁾ と呼ばれるソケット内にセメント系の定着用膨張材 HEM (Highly Expansive Material) にて複数本の炭素繊維複合材ケーブルを固定した定着具を用いており、そのソケットの外周に設けたネジにて緊張定着を行うことができる構造であった。

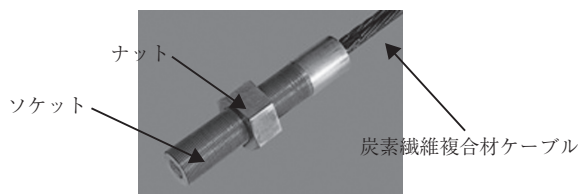


写真 - 2 HEM 定着具

3.2 従来の定着システムの課題

従来の定着システムは、特殊なセメント系の定着用膨張材 HEM の膨張圧力により炭素繊維複合材ケーブルを固定する方式であった。しかし、この定着用膨張材は、所定の膨張圧を得るために一定の養生条件を確保しなければならず、現場で定着具を取り付けることが困難であることから、あらかじめ工場でケーブルの両端にこれを取り付ける必要があった。さらに、ケーブルを製作する段階で、ケーブル長のみならず、緊張時の伸びやシース内でのたるみなどを考慮してソケットへネジ加工を施す必要があり、事前の検討が煩雑であった。

また、内ケーブルとして用いる場合には、ケーブル挿入時に、図 - 1 に示すように HEM 定着具をシース内に通さなければならず、PC 鋼より線を用いる場合に比べて非常に大きなシースを用いる必要があった。図 - 2 に示すような単純桁の支間中央部のようにシースが一部に過密に配置される箇所では、PC 鋼材用の一般的な定着システムを用いる場合のようにシースが配置できず、シースの配置を

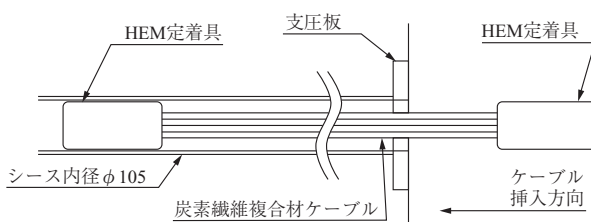


図 - 1 ケーブル挿入の模式図 (7S12.7 相当)

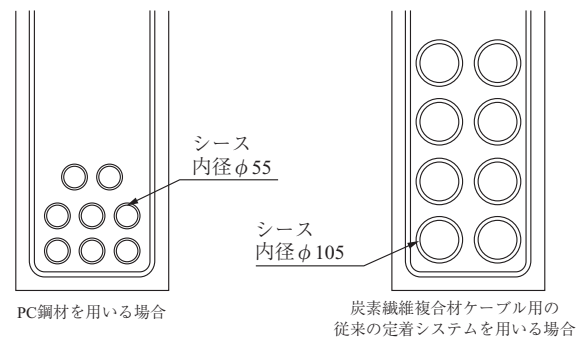


図 - 2 桁断面のシース配置例 (7S12.7 相当)

ずらす必要があった。この場合、ケーブルの偏心量が小さくなりケーブル本数の増加に繋がり、不経済となるケースがあった。したがって、ケーブル挿入時の到達側にあと付けの可能なくさび式定着具を適用できれば、以上のような問題は軽減されると考えられた。

4. 新型定着システム

開発した新型定着システムは、固定側定着具と緊張側定着具の異なる定着具から構成される内ケーブルを対象としたシステムである。

4.1 固定側定着具

固定側定着具として、従来より PC 鋼より線用として広く使用されている 1 組のオスコーンとメスコーンで複数本の緊張材を定着できる定着具を開発した (図 - 3)。前述のように炭素繊維複合材ケーブルはくさび定着を行うとくさび作用の把持力によって生じた圧縮応力により低荷重で破断して緊張材としての性能を十分に発揮できなかったが、定着具のオスコーンとメスコーンを PC 鋼材用のものに比べて長くすることにより、定着時に把持力によって緊張材に与える圧縮応力を緩和させ、定着できるように改良を施している³⁾。

固定側定着具はオスコーン・メスコーンで緊張材を定着して、その荷重を支圧板を介してコンクリートへ伝達する構造となっている。

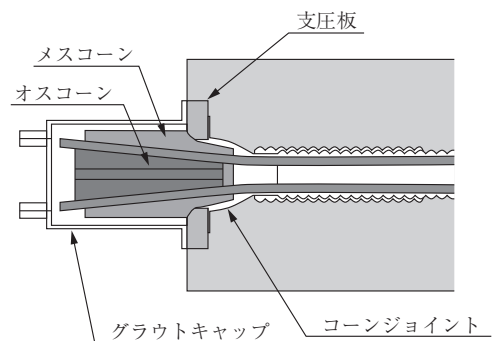


図 - 3 固定側定着具の概要

4.2 緊張側定着具

緊張側定着具は従来より使用されている定着具である前述の HEM 定着具を使用する。今回、この定着具の汎用性

を高めるため、従来よりもソケットの外径を小さくすることにより、定着具全体としてPC鋼より線用定着システムと同サイズまで小型化し、実際の橋梁の定着部においても配置の制約を少なくなるように改良した。また、一般部のシース径が小さくなったことから、図-4に示すように定着具付近のみ大口径のトランペットを用いるが、定着部付近は、ケーブルの配置間隔が大きいので配置が困難になることは少ないと考えられる。

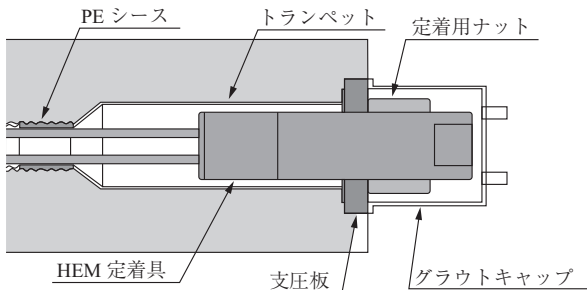
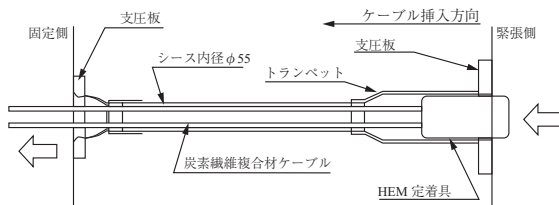


図-4 緊張側定着具の概要

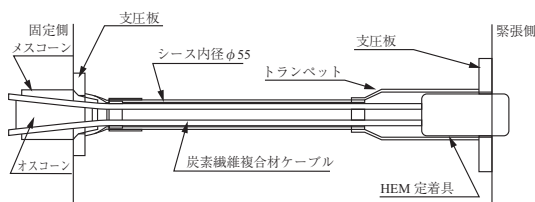
4.3 新型定着システムの特徴

固定側定着具は、オスコーンとメスコーンによるくさび式定着具であることから現場でケーブル挿入後に取り付けることができる(図-5)。そのため、シース径を通常のPC鋼より線用の定着システムと同等の大きさまで小さくすることが可能となり、PC鋼材を用いる設計から変更しても、ケーブルの配置が困難になることがなくなった。

① ケーブル挿入



② 固定定着具取付け



③ 緊張定着

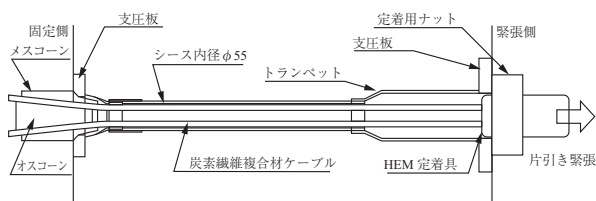


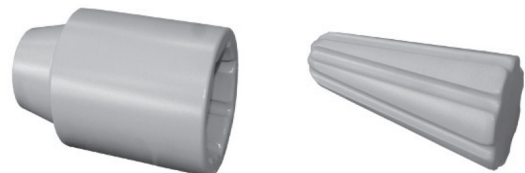
図-5 新型定着システムの施工手順

4.4 新型定着システムの防食仕様

炭素繊維複合材ケーブルは、錆びる要因をもたないという性質から塩害地域などのとくに高い耐久性を要求される構造物へ適用することにより、真価を発揮できるものと考えられる。そのため、定着具に関しても通常のPC鋼材の定着具に比べて高い防食性能を有する必要があると考えた。そこで、銅製材料からなる新型定着システムの固定定着具にはすべてエポキシ樹脂静電粉体塗装を施し、防食性能を高めることとした。

一般的な定着具では、緊張材をオスコーンの歯形によって固定する構造であったため定着具のオスコーンとメスコーンに相当する部品は塗装することができなかったが、新型定着システムの固定定着具は、くさび効果による腹圧力と摩擦力によりケーブルを固定することから、歯形を有していないため塗装を施すことが可能であった(写真-3)。

エポキシ樹脂静電粉体塗装を実施するにあたり、防食性能を確保するために必要な塗膜厚さの検討を行った。塩害地域などのとくに高い耐久性を要求される構造物に用いられているエポキシ樹脂塗装鉄筋は、土木学会コンクリートライブラリー112エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針⁴⁾のなかで、塗膜厚さが $220\mu\text{m} \pm 40\mu\text{m}$ と規定されている。鉄筋の場合には、塗膜厚さが多ければ多いほど防食性能は向上するが、その分コンクリートとの付着力が減少するため、これらを勘案して十分な防食性能と付着力をもつように定められている。定着具は、桁端部の定着部などでは、鉄筋と同様なかぶりとなる場合があることから鉄筋と同様な防食性能を確保する必要があると考え、最小塗膜厚さを $180\mu\text{m}$ とすることとした。しかし、新型定着システムのオスコーンとメスコーンは、緊張材をオスコーンとメスコーンのかさび効果による腹圧力と摩擦力によって把持する構造であり、その腹圧力が大きいことから、緊張材と接触している面に生じる圧縮応力による塗膜の潰れが生じ、前述の最小塗膜厚さである $180\mu\text{m}$ を確保できなくなるおそれがあった。そのため、塗装時の塗膜厚さを定着時の潰れを考慮して $400\mu\text{m} \sim 600\mu\text{m}$ とすることによって定着後の防食性能を確保できるように考えた。



メスコーン オスコーン
写真-3 防錆塗装を施した定着具

5. 新型定着システムの性能試験

5.1 性能試験の概要

本システムの性能を確認するために定着具と緊張材を組み合わせた性能試験、疲労試験、定着具とコンクリートを組み合わせた性能試験の3項目の試験を実施した。試験にはオ

スコーン・メスコーンにエポキシ樹脂静電粉体塗装を施した固定定着具を使用し、疲労試験と定着具と緊張材を組み合わせた性能試験が済んだ後に残留塗膜厚の調査を実施した。

5.2 緊張材

試験に使用した緊張材は写真 - 1 に示す炭素繊維複合材ケーブル「CFCC 1×7 12.5φ」である。このケーブルを7本使用したマルチストランド「CFCC 7-12.5φ」として本定着システムには使用する。これらの機械的性質を表 - 2 に示す。

表 - 2 炭素繊維複合材ケーブルの機械的性質

項目	CFCC 1×7 12.5φ	CFCC 7-12.5φ
保証破断荷重 Pu	184 kN	1 288 kN
有効断面積	76.0 mm ²	532 mm ²

5.3 定着具と緊張材を組み合わせた性能試験

定着具と緊張材を組み合わせた性能を確認するために引張試験を実施した。試験方法は、土木学会規準の連続繊維補強材を用いた PC 工法定着具および接続具の性能試験方法 (JSCE-E537-1999)⁵⁾ に従った。また、土木学会コンクリートライブラリー 88 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針 (案)⁶⁾ では、定着具が連続繊維補強材の引張強度をすべて発揮させていないのが現状であることから、それぞれの連続繊維補強材と定着具の組合せごとに合否判定の基準を設けることと定められており、本試験の明確な合否判定の基準が存在しなかった。そこで、本試験においては、土木学会コンクリート標準示方書【施工編】⁷⁾ に示される PC 鋼材用の定着具と同様に炭素繊維複合材ケーブルの保証破断荷重の 95% 以上を合否判定の基準とした。

試験は、図 - 6 に示す 10MN 試験装置を使用して行い、緊張材の片端に固定側定着具を取り付け、もう一端 (HEM 定着具側) から緊張ジャッキにより緊張载荷する方法とした。载荷方法は、緊張ジャッキの圧力管理により保証破断荷重の 95% (1 224 kN) まで段階的に行った。

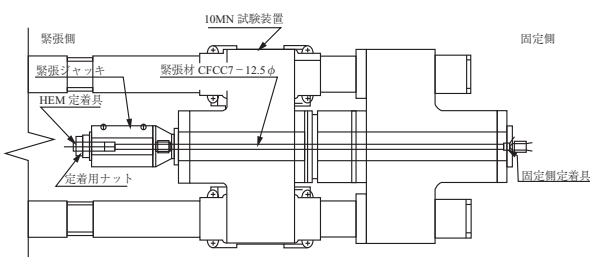


図 - 6 定着具と緊張材を組み合わせた性能試験概要

試験結果一覧を表 - 3 に示す。土木学会コンクリート標準示方書【施工編】で定められている保証破断荷重の 95% 载荷時において、緊張材に破断やスリップは認められず、荷重を安全に保持することができた (写真 - 4)。

5.4 疲労試験

定着具と緊張材を組み合わせて疲労試験を実施した。一

表 - 3 試験結果

No.	載荷荷重 (kN)	試験結果
1	1 224	緊張材の破断・スリップ無し
2	1 224	緊張材の破断・スリップ無し
3	1 224	緊張材の破断・スリップ無し

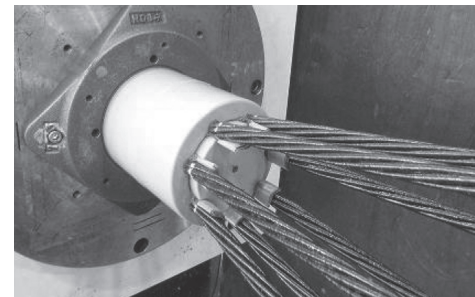


写真 - 4 試験後の固定定着具の状況

一般的に内ケーブル方式では定着具と緊張材はグラウトが充填されるため疲労試験性能は求められないが、本システムの外ケーブルでの使用も視野に入れて疲労試験を実施した。定着具付近の緊張材の疲労強度は、緊張材自身の疲労強度よりも小さくなる傾向にあり、また、外ケーブルで使用する定着具は変動荷重が直接定着具に作用することになるため、定着具と緊張材を組み合わせた疲労試験を行って、この性能を確認する必要がある。疲労試験については、国内 (土木学会コンクリートライブラリー 133 エポキシ樹脂を用いた高機能 PC 鋼材を使用するプレレストコンクリート設計施工指針 (案)⁸⁾) や、海外 (CIP⁹⁾, AASHTO¹⁰⁾, FIP recommendation¹²⁾) などの基準類を参考にもっとも厳しい条件にて試験を行うこととした。

試験は図 - 7 に示すように横型 200 tf パルセータの固定側に固定側定着具を取り付け、もう一端から軸引張疲労荷重を与える方法とした。疲労試験の条件は、下限荷重を保証破断荷重の 65% (0.65 Pu)、応力振幅を 100 N/mm² とし、200 万回の繰返し载荷を実施した。

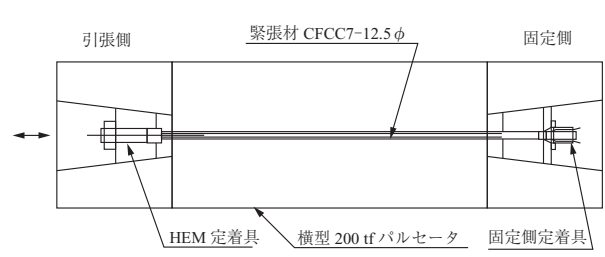


図 - 7 定着具の疲労試験の概要

試験結果を表 - 4 に示す。所定の繰返し载荷に対し緊張材の破断は見られず、今回開発した定着システムは十分な疲労性能を有していることを確認した。また、疲労試験後に試験済みの定着具と緊張材を用いて定着具と緊張材を組み合わせた性能試験により定着効率を確認した。定着効率は緊張材の保証破断荷重の 95% 以上を満足する結果であ

表 - 4 疲労試験の条件と試験結果

下限荷重	上限荷重	応力振幅	試験結果
837.2 kN (0.65 Pu)	890.4 kN	100 N/mm ²	200 万回未破断

ったことから、疲労試験による定着効率の低下は見られなかった。

5.5 定着具とコンクリートを組み合わせた性能試験

定着具とコンクリートを組み合わせた性能試験は、土木学会規準の連続繊維補強材を用いた PC 工法定着具および接続具の性能試験方法 (JSCE-E537-1999) および、土木学会コンクリート標準示方書の規準編および施工編に従い実施した。

試験は、定着具の構成部品の中で緊張時にコンクリートに埋め込まれている部材を埋め込んで作製したコンクリート試験体を 8 MN 耐圧試験機で圧縮荷重する方法とした。試験に使用した支圧板やコーンジョイントなどは、7S12.7 用の PC 定着具と同じもので、試験体の寸法と補強筋の配置は、実際に使用される状況を勘案して、同等の荷重の PC 定着具 (7S12.7) と同じとした。定着具と鉄筋には塩害地域などのとくに高い耐久性を求められる構造物への使用を考慮してエポキシ鉄筋を施した。試験の結果、土木学会に規定される Pu (=1 288 kN) までの荷重に対し、安全に荷重が保持されることを確認した (写真 - 5)。

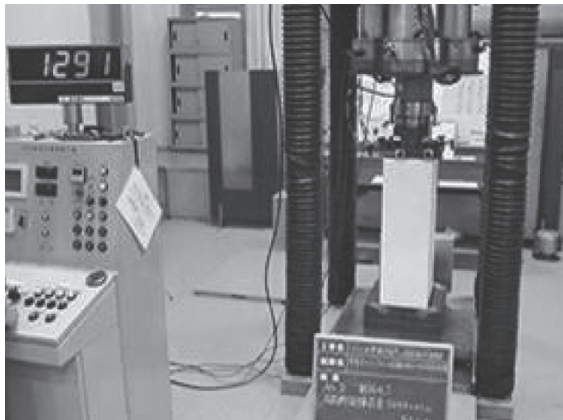


写真 - 5 試験状況

5.6 塗膜の健全性調査

試験済み定着具のエポキシ樹脂静電粉体塗装の塗膜の調査を実施した。調査した定着具は、疲労試験の後に定着効率試験を実施したものとした。

塗膜の剥がれの有無は目視にて実施し、試験後の塗膜に剥がれや有害な潰れなどが無いことを確認した (写真 - 6, 7)。また、オスコーンとメスコーンの緊張材を把持する溝部の塗装膜厚を測定した。測定は、写真 - 6 と写真 - 7 に示す ① ~ ③ に個所において実施した。塗膜厚の測定結果を表 - 5 に示す。オスコーンとメスコーンに 430 ~ 550 μm の塗装を施した場合、試験後の残存膜厚は 330 ~ 400 μm であり、塗膜の潰れ量は最大で約 180 μm 程度であった。塗装時に 400 μm 以上の塗膜厚を設けるこ

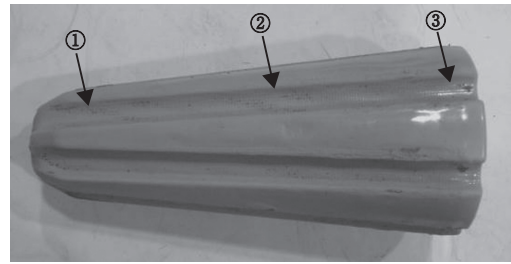


写真 - 6 試験後オスコーン

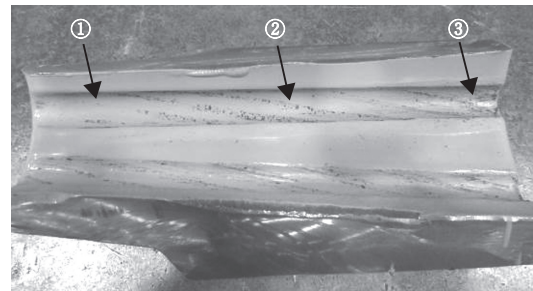


写真 - 7 試験後メスコーン内面 (1/3 カット)

表 - 5 膜厚調査結果

分類		塗膜厚測定値 (μm)		
		①	②	③
オスコーン	試験前	458	480	550
	試験後	392	397	375
メスコーン	試験前	427	465	520
	試験後	350	329	343

とにより、疲労試験による繰返し荷重の後、保証破断荷重の 95 % の荷重を与えても、防食性能を満足する塗膜厚として設定した 180 μm を確保できることがわかった。また、実際に構造物で使用する際には、緊張後から供用時の長期間にわたり、塗膜に圧縮応力が作用することになると考えられる。現状では塗膜厚さが 330 μm 以上残存していることから、長期荷重におけるクリープ変形による塗膜厚さの減少を担保できると考えられる。その一方で、経年によるエポキシ樹脂の劣化に対しては解明されていないため、この場合の塗膜の健全性は長期荷重試験などを実施してどのようなメカニズムで経年劣化していくのかを解明する必要がある。しかし、促進試験が不可能な項目であり、試験に 50 ~ 100 年の時間が掛ってしまい現実的では無いと考えられる。なお、一般的に内ケーブルの場合、ダクト内にはグラウトを注入し、桁との一体化を図ることから、緊張材は、グラウトとの付着力により保持され、定着具への応力の伝達は微小である。そのため、緊張後にグラウトを注入することによりこの劣化に対して担保できると考えた。

6. おわりに

炭素繊維複合材ケーブルをポストテンション方式の PC 橋梁へ適用すべく開発した定着システムの概要とその性能

試験結果を記した。今後の課題として定着具の塗膜のエポキシ樹脂の長期耐久性の検証を行い、クリープ変形や経年劣化について検証を行う。また、炭素繊維複合材ケーブルが高価であることから、PC鋼材を用いる場合に比べて建設時のコストが高くなるといわれているが、これは供用中の維持管理・メンテナンス費用を考慮すると有利になる場合が今後多くなるとの報告¹³⁾もあることから解決できるケースも増えてくると考えている。

本稿が構造物の耐久性向上のための炭素繊維複合材ケーブルの普及、ひいては各種連続繊維補強材の普及やLCCの低減といった課題解決への一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 魚本健人:コンクリート用FRP緊張材の特性と耐久性, 生研〔東京大学生産技術研究所〕公開講演, 1997年10月
- 2) 中村・木村・榎本・原田:HEMを用いたCFRPケーブルの大容量(2500kN級)定着具の開発, 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.315-320, 2000年10月
- 3) 岡田・渡辺・榎本・古瀬:ポストテンション方式の炭素繊維複合材ケーブル用定着具, 第23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.21-24, 2014年10月
- 4) 土木学会:コンクリートライブラリー 112 エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針, 2003年11月
- 5) 土木学会:コンクリート標準示方書【規準編】土木学会規準および関連規準 2013年11月
- 6) 土木学会:コンクリートライブラリー 88 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案), pp.64-65, 1996年9月
- 7) 土木学会:コンクリート標準示方書【施工編】 2013年11月
- 8) 土木学会:コンクリートライブラリー 133 エポキシ樹脂を用いた高機能PC鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針, 2010年8月
- 9) Cable stays Recommendation of French interministerial commission on Prestressing, June, 2002
- 10) AASHTO:LRFD BRIDGE CONSTRUCTION SPECIFICATIONS 3rd EDITION, 2010
- 11) AASHTO:LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS 4th EDITION, 2007
- 12) FIP Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems, 1993
- 13) 渡部・中村・安藤・中井:FRP補強材のコンクリート構造物への適用 - LCCのケーススタディー -, プレストレストコンクリート Vol.52, No.2, pp.98-103, 2010年3月

【2014年11月17日受付】



刊行物案内

PC グラウトの設計施工指針 —改訂版—

平成 24 年 12 月

定 価 3,600 円/送料 300 円

会員特価 3,000 円/送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会