

(技術資料)

橋梁補修補強用 RE-SET ケーブル[®] システム

有路亮平*¹・堀井智紀*²・荒木 茂*¹

RE-SET Cable[®] System for Repairing and Reinforcing Bridges

Ryohei ARIJI・Tomonori HORII・Shigeru ARAKI

要旨

橋梁の老朽化や設計荷重の増加により、補強対策が必要な橋梁が増加している。そのような中、橋梁補修補強方法の一種である外ケーブル補強工法についても需要が増加しており、新たに指針が整備され、高性能かつ高耐久な外ケーブル工法が求められている。今回、耐久性および施工性に優れた新たな外ケーブルを開発したことから、その防せい性能や疲労性能を確認した試験結果について報告する。また、実橋梁でのケーブルやその周辺部材の取り扱い、緊張方法などの施工状況についても報告する。

Abstract

The number of bridges that require reinforcement measures is increasing due to the aging of the structures and the increase of design loads. In view of this situation, there is also a growing demand for the external cable reinforcement method, a type of bridge repair and reinforcement method, and new guidelines calling for high-performance and high-durability external cable construction methods have been established. In connection with this, a new external cable has been developed, which excels in both durability and construction. This paper reports on test results that confirm its effectiveness in preventing rust and enhancing fatigue performance. The paper also reports on the construction situation, including the handling of cables and their surrounding materials in an actual bridge, and the tensioning method.

検索用キーワード

橋梁, 補修補強, 老朽化対策, 外ケーブル補強工法, 高耐久, 施工性

ま え が き = 日本国内におけるプレストレストコンクリート（以下、PC）橋は1950年代より建設が開始され、1960年代から急激に増加し、1990年代をピークにこれまで数多く建設されてきた。近年、PC橋の劣化が顕在化しており、PCグラウトの充填不足、雨水や塩化物イオンを起因としたPC鋼材の腐食や破断などが確認されている。いっぽう、1993年の道路構造令の改正により通行車両の大型化対策として橋梁、高架道路の設計自動車荷重が引き上げられており、旧基準で建設された橋梁については耐荷力不足が問題となっている。このような状況下において、外ケーブルによる補修・補強のニーズが高まっているが、補強用外ケーブルに関する基準類は新設で用いられる外ケーブルに比べ充実していないという問題があった。これらの問題に対し、補修・補強に関する具体的な性能照査方法や仕様に関する技術指針として2022年にプレストレストコンクリート工学会より「既設PCポストテンション橋保全技術指針」が刊行された。

このような背景から、新たな指針に則した耐久性および施工性に優れた外ケーブル補強工法向けのPCケーブルおよび定着システムを開発した。本稿では、開発したケーブルと定着システムの概要、各種性能確認試験の内容および施工について報告する。

1. 開発品の概要

1.1 開発コンセプト

外ケーブル補強工法は、一般に桁外などの厳しい環境下で使用されるため、施工から供用にかけて荷重や衝撃に対して所要の強度や十分な防せい性能を有し、さらに経年劣化が少なく耐久性・耐疲労特性に優れる必要がある。また、外ケーブル補強工法は、初期緊張力を低く設定して状況に応じた追加緊張、災害などにより損傷したケーブルシステムの交換、橋梁解体時の撤去など様々な場面に対応できるように、再緊張や緊張力開放といった機能を有していることが望ましい。

以上から、設計コンセプトを高疲労特性（疲労特性に優れたくさび式）、高耐食性（被覆ケーブル、金具表面処理、内部完全充填）、再緊張・取替更新（張力調整可能なねじ式定着具）が可能な仕様とした。以下に詳細な構成について示す。

1.2 構成

1.2.1 ケーブル

ケーブル外観を図1、ケーブル断面を図2に示す。ケーブルは、多重防せい（マルチレイヤプロテクション）の考え方を採用した。ケーブルの緊張材は「亜鉛めっきPC鋼より線（以下、GPS）」と「内部充てん型エポキシ

*¹ 神鋼鋼線工業(株) 生産本部 加工品技術部 *² 神鋼鋼線工業(株) 新事業企画開発部

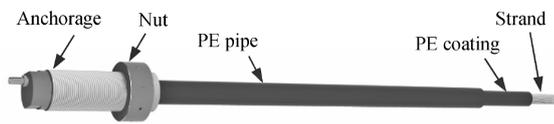


図1 RE-SETケーブル®
Fig.1 RE-SET cable

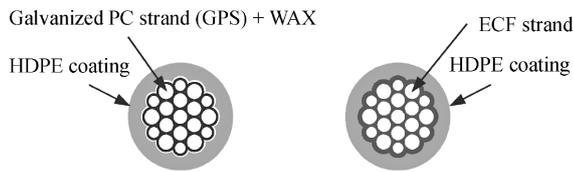


図2 ケーブル断面
Fig.2 Cross section of tendon

樹脂被覆PC鋼より線（以下、ECFストランド）」の2種類があり、外周被覆材（以下、PE被覆）は耐候性や耐薬品性に優れた高密度ポリエチレンを使用した。防せい層の数は、GPSが「亜鉛めっき・防せいワックス・高密度ポリエチレン」による三重防せい、ECFストランドが「エポキシ樹脂・高密度ポリエチレン」による二重防せいになっている。

1.2.2 定着具

定着具の概要を図3に示す。定着具は、くさび方式を採用し、亜鉛めっきやエポキシ樹脂の上から定着する方法とした（PE被覆は除去した状態）。くさび方式はテーパ形状の受けを持った金具（スリーブ）と、内側に歯を設けたくさびによりPC鋼材を固定（定着）する。PC鋼材が引っ張られること（緊張）によりくさびがスリーブに入り込み、PC鋼材を挟み込むようになっている。定着具の先端にはブッシュを配置しており、桁のたわみに伴うくさび部の繰り返し曲げ応力に対する耐久性を向上させている。機能面では、外周ねじ加工のスリーブとリングナットで構成することで再緊張や緊張力開放が可能な定着具とした。防せい面では、定着具に複合皮膜処理を採用するとともに、最も重要な箇所である「くさび周辺の空間」をポリブタジエンゴムで充填する完全密閉構造にすることで、供用中の腐食因子の侵入を防止する仕様とした。なお、くさび方式は、配線時のケーブル端部に定着金具がなく軽量、貫通孔の径が小さくできる、長さ管理が緊張後の余長切断で調整できるといった利点がある。

1.2.3 緊張システム

PC鋼材はプレストレスを導入するため、ジャッキを使用して緊張を行う。くさび式の定着具のため、緊張・定着時にはセット量を考慮する必要がある。セット量とは、定着時にPC鋼より線がくさびと一体となって内方へ引き込まれる量であり、PC鋼材がセット量分内方へ引き込まれると、場合によってはその分ジャッキで導入した張力がロスする。再度緊張してリングナットなどで張力を調整するが、このような作業を簡易に実施するために、緊張ジャッキに特殊ノーズを採用している。特殊ノーズは、切り替えリングを回すことによりジャッキの支圧位置を定着具から支圧板へ切り替えることができる

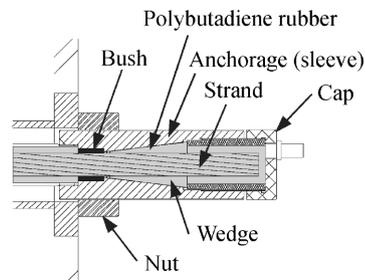


図3 定着具の概要
Fig.3 Overview of anchorage

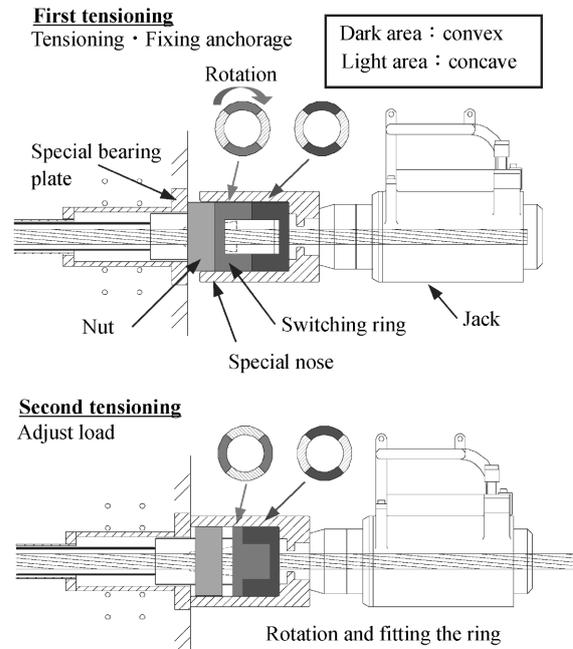


図4 特殊ノーズによる緊張方法の概要
Fig.4 Overview of tensioning methods with special nose

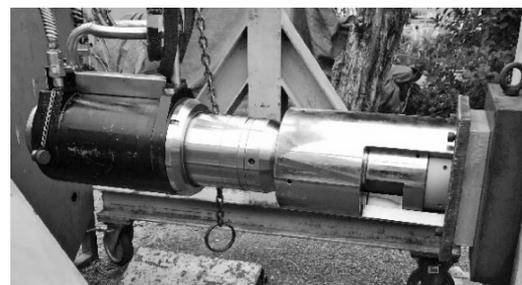


図5 緊張ジャッキ
Fig.5 Jack with special noses

ものとした。これにより、一般的にセット量補正作業で必要となるラムチェア設置やジャッキの取り外し工程を省略できる（図4、図5）。

2. 性能確認試験

2.1 定着具の防せい性能

PC鋼材の定着具は高強度材かつ高応力下で使用されるため、酸洗いを伴う溶融亜鉛めっきで防せいすると水素脆化などのリスクがある。また、最外周部がネジ部となるため、ネジかん合の観点から一般的な塗装は事前に行うことができない。そこで水素脆化のリスク低減およびネジかん合が可能となる防せい方法として、酸洗いや

電解工程なしで処理する複合皮膜処理（亜鉛アルミを含有するベースコートとアルミと有機系樹脂を主成分とするトップコートの2層で形成される被膜）を採用している。定着具における本被膜処理の防せい性能を評価すべく中性塩水噴霧試験（5%NaCl噴霧・1,000時間）を実施した。なお、比較のため溶融亜鉛めっき処理品（HDZT77）も同時に実施した。

試験結果を図6に示す。溶融亜鉛めっき品は306時間後に全面に赤さびが発生したが、複合皮膜処理品は1,000時間後でも表面およびねじ部に塗膜の膨れ、さび、断面欠損は確認されなかった。

2.2 フレッシング疲労試験

GPS, ECFストランドの各タイプの最大サイズについてフレッシング疲労試験を実施した。本稿ではGPSの試験結果を報告する。

試験概要図を図7に示す。フレッシング疲労試験は実際の橋梁における偏向部を模擬し、ケーブルに所定の緊張力を与えた後に、ケーブル中央部をアクチュエータによって上下させる試験である。両端部は型枠に支圧板、補強筋を配してコンクリートを流し込み、固めたコンクリートブロック定着体、ケーブル中央部にはデビエータを模擬したコンクリート製の荷重ブロックを設置する。荷重ブロックには所定の曲げ半径となるように偏向管を使用し、荷重ブロック上面にアクチュエータが接続される。ケーブルの荷重はロードセルを用いて計測した。

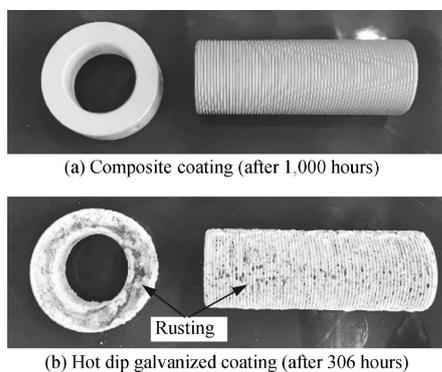


図6 塩水噴霧試験結果

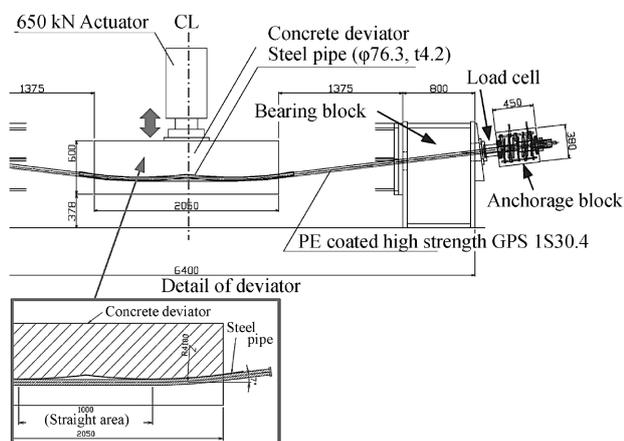


図7 フレッシング疲労試験概要

試験条件は指針¹⁾に倣い、ケーブルの荷重を上限荷重-最大試験力の65%、変動応力 -50 N/mm^2 とした。支間長約100 m規模の橋梁の外ケーブルの応力変動幅は支間中央部の設計活荷重最大時で約 20 N/mm^2 程度と算出されている。試験条件はそれよりも安全側の評価となるように設定した。繰り返し回数200万回、試験速度1.95 Hzでアクチュエータ制御により载荷した。判定は試験後に試験材の素線に破断がないこととした。

試験後のケーブルを確認したところ、素線破断はなかった（図8(a)）。また、定着具には、破損や定着具内での素線破断もなく（図8(b)）、十分な耐曲げ疲労性能を有することが確認できた。なお、試験後の定着具のブッシュには、図8(c)のようにブッシュ内径部に緊張材の圧痕が確認されており、ブッシュによりくさび部近傍の曲げモーメント発生箇所が半固定となり、くさび部に生じる曲げ応力が緩和したと推察される。定着部のブッシュが疲労特性に有効的に機能したと考えられる。

2.3 定着部荷重伝達試験

本システムは取替え可能なシステムとするため、伸びを開放できるようにする必要がある。定着スリーブがアンカープレート内に納まるように設定した（図9）。具体的には、支圧板の穴径を大きくすることとしたが、その場合、支圧面積が小さくなり、支圧板と支承コンクリートを大きくする必要があった。限られたスペースで定着部を大きくすることを避けるため、緊張力開放に必要な

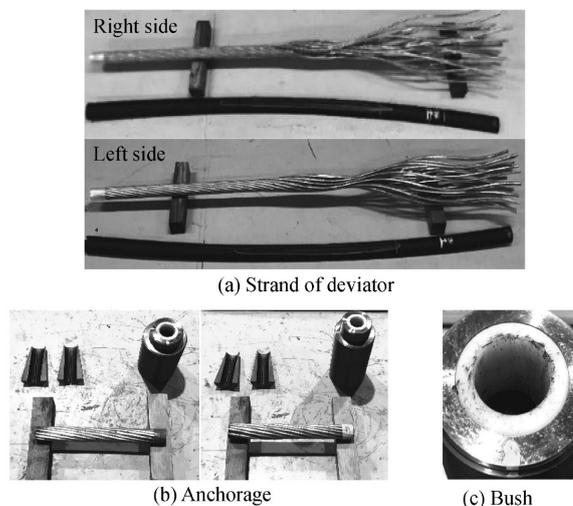


図8 試験後の詳細調査

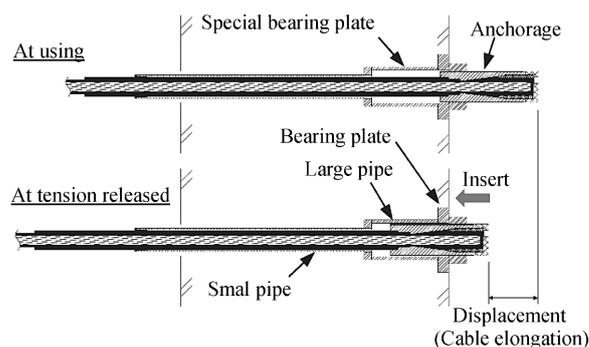


図9 張力解放時の定着部

な区間のみ太径鋼管，それ以外は細径鋼管とし，その段差部に支圧面を設けて支圧面積を確保する二段式アンカープレートで小型の定着部とした（図10）。

この二段式アンカープレートによる定着部の耐荷性能を確認するために，載荷試験を実施した。試験は二段式アンカープレートと所定の鉄筋を設置したコンクリートブロックを製作し，圧縮試験機でアンカープレート支圧面を圧縮することで，ケーブルの荷重を模擬した。プレストレスによる有害なひび割れがないことを確認するため，各荷重段階の定着部コンクリートの状態を確認した（試験時コンクリート強度は $30 \pm 3 \text{ N/mm}^2$ ）（図11）。

試験結果を表1に示す。全サイズで判定基準「規格最大試験力に達する前に破壊しないこと」を満足した。また，使用荷重下 $0.85 P_y$ では $\phi 28.6$ のみマイクロクラックが発生したが，ほかのサイズはクラックがなく，必要な耐荷性能を有することが確認できた。規格最大試験力 P_u でのひび割れ幅も最大 0.15 mm と小さかった。ケーブル自体の終局状態においても定着部（コンクリート部）は有害な変形や破壊することはなく，必要な耐荷性能を有することを確認した。

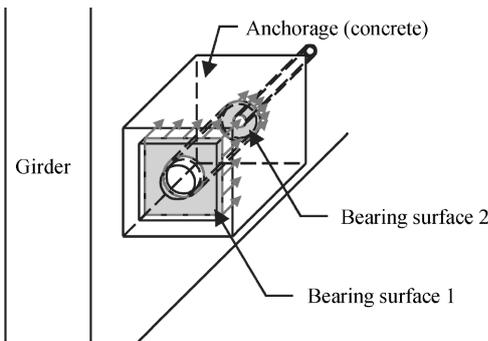


図10 二段式アンカープレート
Fig.10 Special bearing plate



図11 定着部荷重伝達試験試験状況
Fig.11 Condition of load transfer test

表1 定着部荷重伝達試験結果
Table 1 Result of load transfer test (crack width) (mm)

Load step	PC strand size					
	15.2	17.8	19.3	21.8	28.6	30.4
0.85Py	-	-	-	-	≤0.05	-
1.1×0.85Py	-	-	-	≤0.05	≤0.05	≤0.05
Py	-	-	-	0.05	0.05	0.05
Pu	-	-	-	0.05	0.10	0.15

Note) Py : Minimum 0.2% proof load,
Pu : Minimum breaking load

3. 施工報告

3.1 偏向具の構築について

外ケーブル補強ではプレストレスによる補強効果を得るため，ケーブルは屈曲して配置されることから，偏向装置が用いられる。偏向装置はケーブルの緊張力を桁へ伝達しており，既設橋に設置されるため，桁中間部に新たに構築する必要がある（図12 (a)）。偏向装置は主に偏向具，スライドプレート，偏向具受け台で構成され，偏向具は橋梁の条件などで様々な形式，形状，材質があるが，ケーブルとのしゅう動性や加工性，実績などから主に樹脂製が多く用いられている。スライドプレート（鋼製）は，緊張力導入時にケーブルの移動をより円滑にするため，偏向具とケーブルとの間に用いられる。偏向具受け台は，偏向具と桁をつなぐ機能を有する（図12 (b)）。

本稿では，偏向装置の一例としてケーブル2本（1縦桁）に対して1つの偏向具受け台とすることで，既設主桁に直接設置でき偏向部のコンクリート構築を不要とした事例を紹介する。

偏向具受け台は主桁下面に受けるようにコの字形状とし，そこから張り出したプレートでケーブルおよび偏向具を受ける形状とした（図12 (c)）。偏向具受け台と桁との間には間詰材としてモルタルを充填し，さらにアン

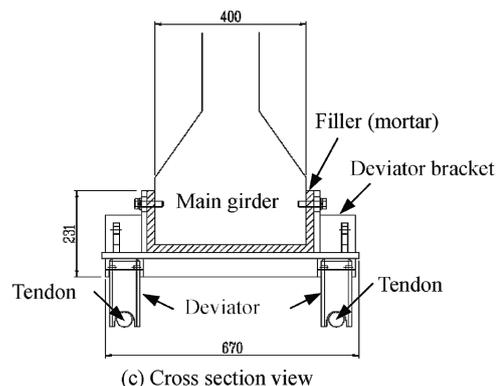
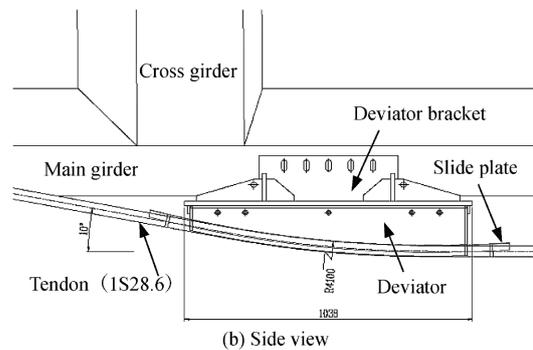
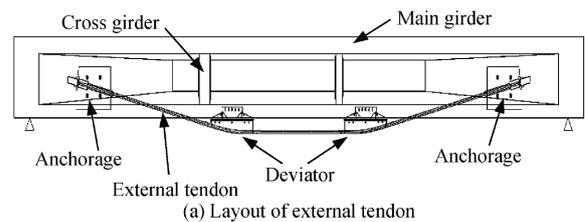


図12 偏向装置詳細図
Fig.12 Detail of deviator

カーボルトで桁と偏向具受け台を接続した（図13）。

3.2 配線・施工手順

外ケーブル補強用RE-SETケーブル[®]が実際に採用された事例を基に、ケーブルの配線・施工状況を図14、図15に示す。ケーブルは橋梁現場へコイル状に巻かれた状態で搬入される。ターンテーブルと呼ばれる配線機材にケーブルを入れて1本ずつ引出し、架設現場の状況にもよるが、ケーブルを一度足場などに展開する。定着部コンクリートに設置されている鋼管に鋼管用パッキンとPE管を通し、定着具を支圧面にセットしたあとに人力によってケーブルを所定箇所に配線する。ケーブル端部は最外層のポリエチレン被覆をあらかじめ工場で除去しているため、基本的には架設現場で被覆を除去する必要がない。

ケーブルを定着具に通し、所定位置となるように調整し、サグを低減した状態でウェッジを取付けて仮止めする。偏向具をセット後、ジャッキをセットして緊張作業を行う。緊張作業は図4に示すように、まず一次緊張し定着する。その後、かん合リングをはめ合わせ二次緊張



図13 偏向装置設置状況
Fig.13 Deviator at construction site

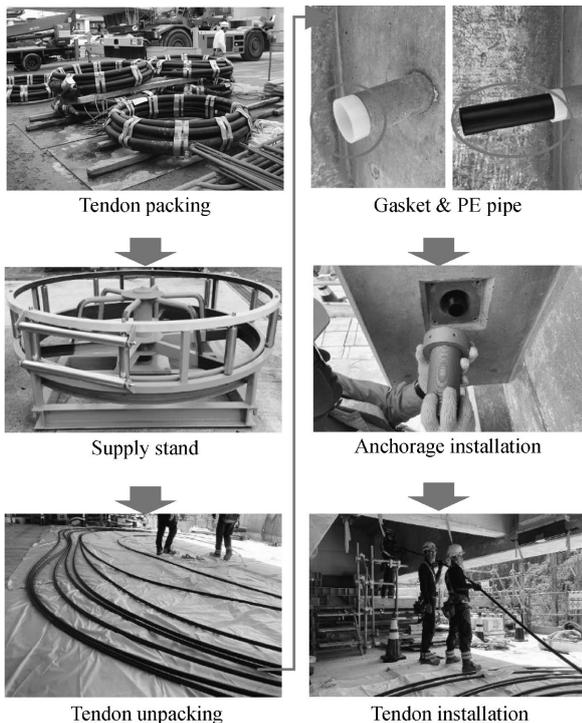


図14 施工状況1
Fig.14 Conditions of construction 1

を行い、リングナットが支圧面から浮いた分の隙間（セット量）がなくなるようにリングナットを回し、セット量を補正する。緊張完了後に専用治具（切断保護カバー）を用いてケーブル余長部を切断、ウェッジ押え、キャップを取り付ける。

3.3 ポリブタジエンゴムの注入

前述のように、定着具を含むケーブル全体に高い防食性能が求められる。RE-SETケーブル[®]は最外層にPE被覆を有しているが、端部は定着や緊張を可能にするためPE被覆を除去している。緊張後、PE被覆除去部は保護のためPE管を配置している。さらに内部空隙に充填材としてポリブタジエンゴムを注入し、定着部と同様に完全に内部を充填した仕様となっている（図16）。多くの場合は定着部が上部になることから、PE管に注入口、

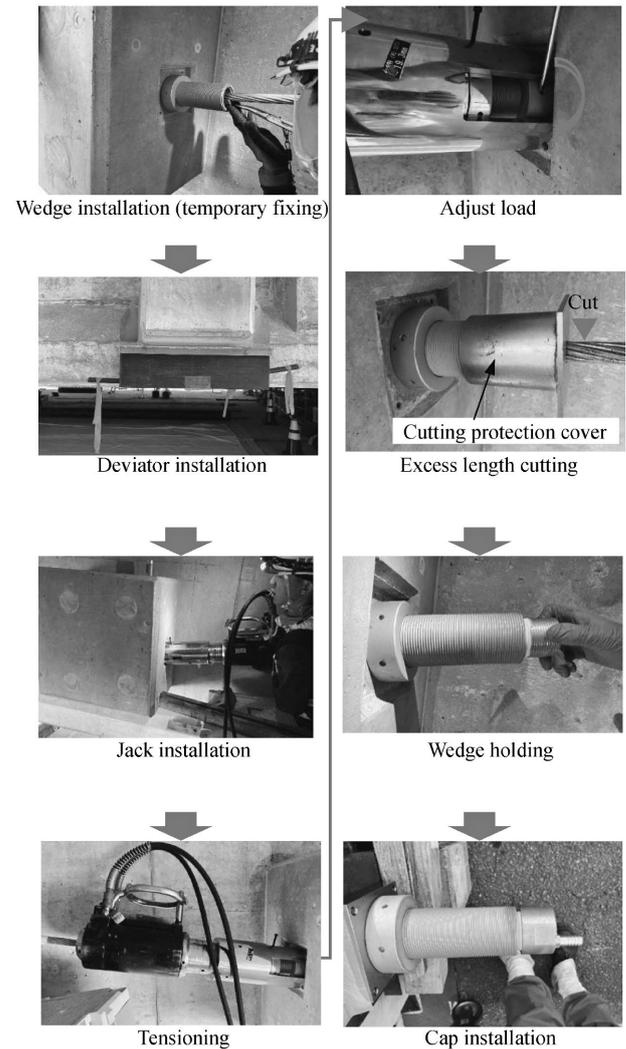


図15 施工状況2
Fig.15 Conditions of construction 2

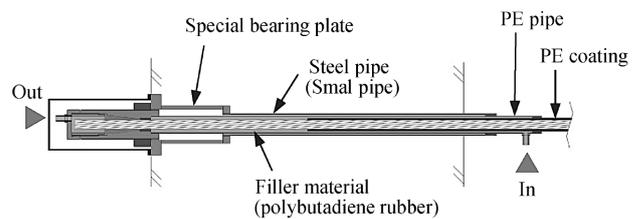


図16 充填材充填範囲
Fig.16 Filler area

キャップ側に排出口を設け、排出口からオーバーフローするまで注入を実施する。PE管や定着部内部などの狭い空間に注入する必要があることから、注入試験を実施した。注入作業は電動ポンプなどを使用せず、人力によるハンドポンプを用いて注入を行った。試験では注入口から注入した充填材は排出口よりオーバーフローすることを確認し、硬化後の試験体をカットしてケーブル部および定着部の充填状況を調べた結果、いずれも充填されていた（図17）。

実際の施工現場においても注入作業を実施したが、注入試験結果と同様に充填できていることが分かった（図18）。

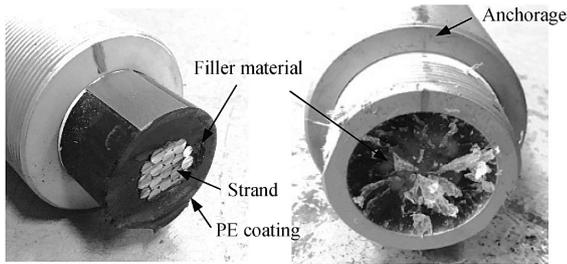


図17 注入試験状況
Fig.17 Result of injection test



図18 施工現場での作業状況
Fig.18 Condition at construction site

むすび = 道路橋は建設後50年以上経過した橋梁の割合が2030年には50%を超える状況であり、橋梁の補強需要が本格化するといわれている。外ケーブル補強が採用される既設橋梁は橋梁ごとに条件が変わるため、新設橋梁に比べ様々な制約条件も多く、技術的、施工的なハードルも高くなる傾向がある。今後も多様化するニーズに対応し、インフラ構造物の長寿命化、施工性の向上などによる工事期間の短縮などに寄与し、社会やサステナビリティへ貢献できる製品開発を推進していく。

参考文献

- 1) 公共社団法人プレストレストコンクリート工学会, 既設PCボストテンション橋保全技術指針, 令和4年1月