

アラミド FRP ロッドを用いた耐震補強の実用化 — 開橋改築工事（下部工補強工） —

佐藤 伸夫*¹・渡辺 修三*²・桑野 昌晴*³・安藤 直文*⁴

本工事は、昭和 32 年に建設された開橋において、段落とし部を有する壁式 RC 橋脚の耐震補強を行ったものである。施工条件より河川内作業を伴わず、橋脚天端から施工可能なアラミド FRP ロッドを用いた耐震補強工法が選定された。本工法は、橋脚天端と上部工に挟まれた狭隘な作業空間で、削孔や緊張などの作業を行うため、施工機械と既設構造物との干渉などが懸念された。そのため、事前に削孔位置や施工方法について机上での検討や施工性確認試験を行った。本稿では、開橋のアラミド FRP ロッドによる橋脚耐震補強工事の概要と課題解決方法について報告する。

キーワード：アラミド FRP ロッド、耐震補強、RC 橋脚

1. はじめに

本工事は、昭和 32 年に建設された開橋において、河川内作業が困難な条件下で、段落とし部を有する壁式 RC 橋脚の耐震補強を行ったものである。耐震補強工法の選定にあたっては、河川内締切作業を必要とせず橋脚天端から補強が可能であることから、アラミド FRP ロッドを用いた耐震補強工法が採用された。

本稿は、実施工で初めて適用された開橋のアラミド FRP ロッドによる既設 RC 橋脚の耐震補強について報告する。

表 - 1 アラミド FRP ロッドの材料諸元¹⁾

	ヤング係数* (kN/mm ²)	有効断面積 (mm ²)	単位質量 (g/m)	保証耐力 Pu (kN)
φ 7.4 mm	53.0	42.4	62.0	81.4

※有効断面積の場合

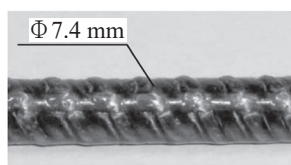


写真 - 1 アラミド FRP ロッド形状

2. アラミド FRP ロッドによる耐震補強工法の概要

本工法は、アラミド FRP ロッドによりプレストレスを導入し、橋脚に軸力を付加することで、曲げ性能を向上させるものである。

アラミド FRP ロッドは、軽量、高強度で柔軟性に優れており、非導電体・非磁性体・非腐食体という特徴がある。アラミド FRP ロッドの表面には、付着定着性能を高めるため突起が設けられている。アラミド FRP ロッドの形状を写真 - 1 に材料諸元を表 - 1 に示す。

図 - 1 に、アラミド FRP ロッドによる耐震補強工法の

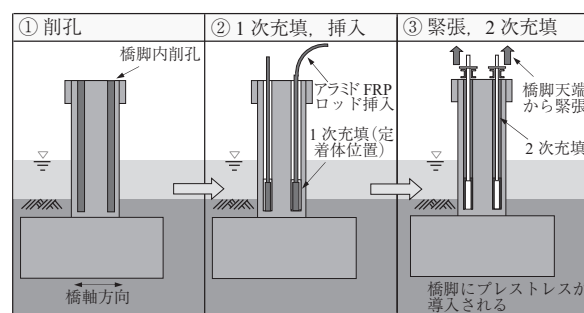


図 - 1 施工手順



*¹ Nobuo SATO

三井住友建設 (株)
中部支店 土木部



*² Osami WATANABE

三井住友建設 (株)
中部支店 土木部



*³ Masaharu KUWANO

三井住友建設 (株)
中部支店 土木部



*⁴ Naofumi ANDO

三井住友建設 (株)
土木本部 土木技術部

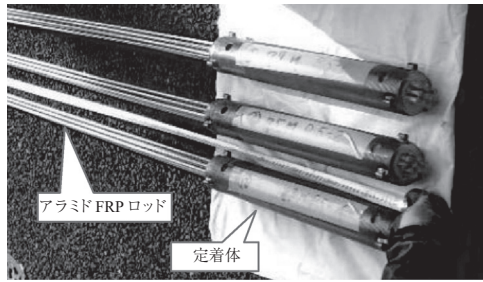


写真 - 2 アラミド FRP ロッドと定着体（開橋）

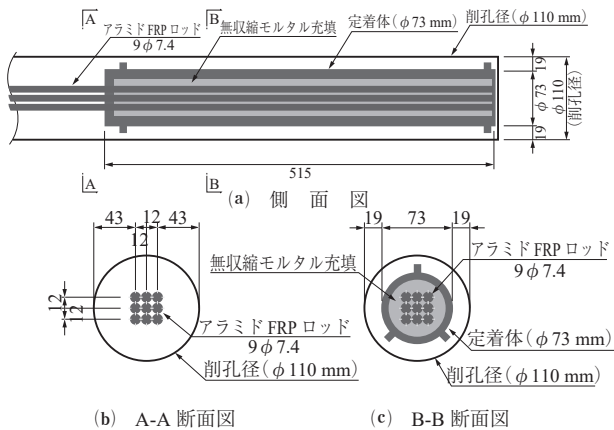


図 - 2 定着体形状（開橋）

施工手順を示す。

最初に、主鉄筋の段落とし位置や削孔箇所の鉄筋配置を調査したのち、橋脚天端からコンクリートコアを削孔する。充填ホースにて無収縮モルタルを定着体位置に 1 次充填し、アラミド FRP ロッドの端部に図 - 2 に示す定着体を設けた状態で挿入する（写真 - 2）。その後、1 次充填材の強度が発現するまで養生を行い、アラミド FRP ロッドを緊張し、緊張後は 2 次充填を行う。2 次充填材の硬化後は、橋脚天端面でアラミド FRP ロッドを切断して付着定着を行い、表面仕上げを実施する。

3. アラミド FRP ロッドによる耐震補強工法の補強効果の確認²⁾

アラミド FRP ロッドによる補強効果は、図 - 3 に示すように本工法で補強した柱試験体を用いて、正負水平交番載荷試験を行い確認した（写真 - 3）。試験結果より確認された項目内容は、以下の 3 点である。

- 1) 試験体の損傷状況：曲げびび割れ耐力より降伏曲げ耐力の方が小さい低配筋の橋脚にアラミド FRP ロッドで補強した試験体において、損傷は基部に集中し、軸方向鉄筋の破断により最大荷重が低下した。また、変形性能の向上も確認された。
- 2) 補強前後の耐力：補強後の試験体の耐力は、無補強時の計算値と比較すると、曲げ耐力（ P_m ）が 4.3 倍に向上しており、補強効果があることが確認された。
- 3) 補強後耐力の計算値と実験値：補強後の試験体の耐力（実験値）は、平面保持を仮定した RC 断面として算出した計算値と比較すると、降伏曲げ耐力（ P_y ）は計算値の

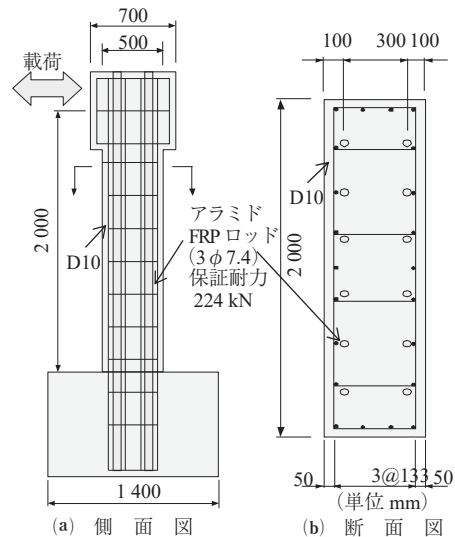


図 - 3 柱試験体図

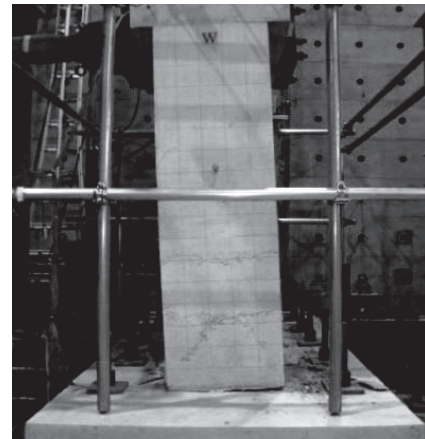


写真 - 3 正負水平交番載荷試験状況

0.97 倍、曲げ耐力（ P_m ）は計算値の 0.93 倍となり、おおむね RC 計算で評価できる。

4. 工事概要

開橋の工事概要を表 - 2 に示す。また、全体一般図を図 - 4、P5 橋脚図面を図 - 5 に示す。上部工形式は 6 径間鋼単純鋼床版鈑桁橋、橋脚形式は壁式 RC 橋脚である。本工事は、上部工主桁が架替え済みの状況下で行われた。

耐震補強の目的は、段落とし部の先行破壊の防止であり、段落とし部の耐力が柱基部の耐力を上回るように、橋脚ごとに必要軸力を算定し、アラミド FRP ロッドの配置本数を決定した。

耐震補強の対象は、7 橋脚（上流側 P1 ～ P5、下流側 P3、P4）であり、そのうち 2 橋脚（上流側 P1、P5）を工事 1 で、残りの橋脚を工事 2 にて補強を行った。

コア採取による圧縮強度試験より既設橋脚のコンクリート圧縮強度は 21 N/mm² 以上であることを確認した。また建設年時より鉄筋の規格は SR235 であると推定した。アラミド FRP ロッドは 1 か所あたり 9φ7.4 mm を使用し、保証耐力 P_u は 647 kN/本¹⁾ である。

表 - 2 開橋 工事概要

発注者	名古屋市 緑政土木局
【工事 1】	都計 3・2・42 大津町線開橋改築工事 (下部工補強工)
工事内容	下部工補強工 2 橋脚 アラミド FRP ロッド (9 φ 7.4) 19 本
【工事 2】	都計 3・2・42 大津町線開橋改築工事 (下部工補強工) (その 2)
工事内容	下部工補強工 5 橋脚 アラミド FRP ロッド (9 φ 7.4) 61 本

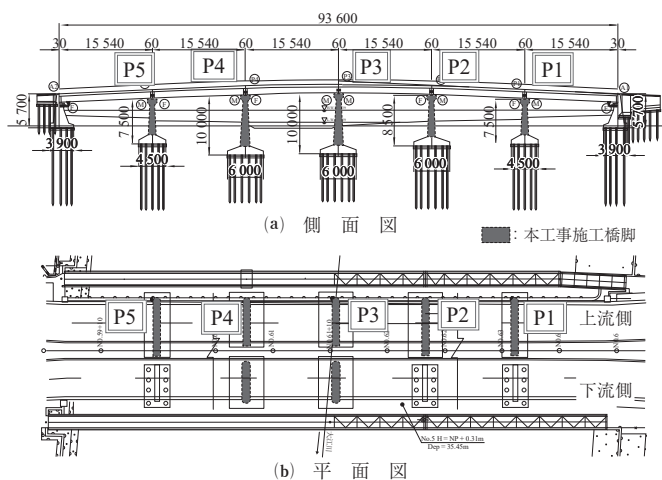


図 - 4 全体一般図

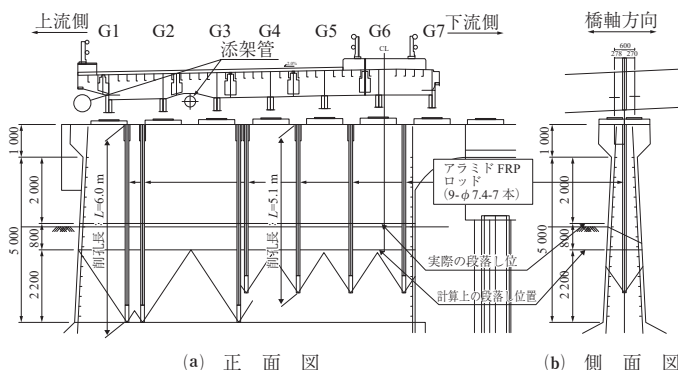


図 - 5 P5 橋脚断面

5. 工事における課題と解決策

5.1 事前検討における課題と対策検討

(1) 削 孔

本工法は橋脚天端より削孔を行うため、狭隘な空間での作業となる。したがって、橋軸直角方向の削孔位置は、削孔機と横桁や支承台座、添架管との干渉について検討を行い、お互いの干渉がなく、台座のはつり範囲が最小限となるように調整を行った。

(2) 挿 入

5.1 (1) の削孔と同様に、アラミド FRP ロッドの挿入も同様に狭隘な空間での作業となる。このため、既設構造物による作業制約を考慮して、もっとも厳しい条件となる作

業 (G1-G2 間) を想定して施工検討を行った。

アラミド FRP ロッドは、定着体形状やアラミド FRP ロッドの最小曲げ半径から、もっとも狭隘な作業条件下では、本削孔 φ 110 mm の単孔でのアラミド FRP ロッド挿入は難しいと判断された。そのため、実際の施工状況を模擬した挿入検討を行い、挿入方向は橋軸方向からとし、本削孔に加え拡張削孔を行うこととした (写真 - 4)。検討の結果、拡張削孔の形状は、挿入側手前に 300 mm (φ 150 の 3 連孔)、深さ 600 mm の計画とした。拡張削孔により切断した既設鉄筋については、炭素繊維シートにて対策を行うこととした。また、挿入時にアラミド FRP ロッドが、既設構造物に接触する箇所や挿入経路を確認し保護養生を行うこととした。

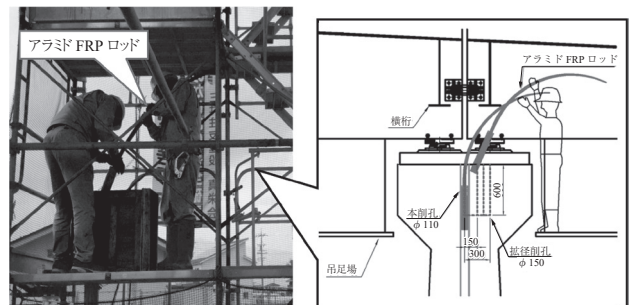


写真 - 4 挿入検討状況

(3) 充 填

充填時には、以下の 2 つの理由から定着部の品質・充填不良が懸念された。

- 1) 本橋は河川内橋脚であり、建設年次が古いことから、橋脚内を削孔した際にひび割れなどを通じて孔内に滞水し、充填材の乱れによる材料分離が発生すること。
- 2) アラミド FRP ロッド挿入後の 1 次充填では、不可視環境下で、孔壁と定着体の狭い隙間に充填不良個所が発生する可能性があること。

そこで、滞水環境下において、充填材の乱れがなく確実な充填が行うことができるよう、充填性確認試験を実施して施工方法について検討した。試験設備を、写真 - 5 に示す。

試験体は、充填状況を確認するために、定着部に透明な

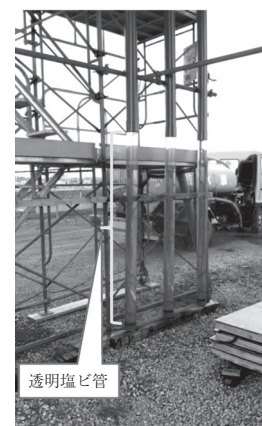


写真 - 5 充填性確認試験設備

塩ビ管を使用し、充填材は無収縮モルタルと水中不分離モルタルを用いた。また、孔内の水が充填ホース内に逆流しないよう、挿入側先端に逆止弁を設置した。

試験の手順は、充填ホース内を空にした状態で、挿入側先端に写真 - 6 に示す逆止弁を設置し、充填ホースを孔内へ挿入、モルタル充填を行った。

逆止弁を用いた試験結果では、無収縮モルタルを充填する場合、水中での充填材の乱れもほとんどなく充填を行うことができた。しかし、水中不分離モルタルを充填する場合は、モルタル内の骨材が大きく、逆止弁内において詰まりが生じた。この結果を受けて、水中不分離モルタルを充填する場合の対応策として、充填ホースの挿入側先端に発泡スチロール素材の栓を設置し、先端が着底後に注入圧を加え栓を外す方法により、水中での乱れもほとんどなく充填を行うことができた。また、充填後にアラミド FRP ロッドを挿入し、充填材の乱れが無いことを確認した。養生後、定着体を挿入していないモルタルを試験体から取り出し、良質部と脆弱部の割合から充填量の検討を行った。取り出した試験体の状況を写真 - 7 に示す。

以上より、滞水環境下における定着部の充填は、充填の確実性から逆止弁を用いることが望ましいが骨材の大きさの関係から、充填材が無収縮モルタルの場合は逆止弁、水中不分離モルタルの場合は発泡スチロール素材の栓を使用する方針とした。また、1次充填後にアラミドFRP ロッドを挿入することで、充填材の乱れがほとんどなく充填を行えることを確認した。充填量は、モルタルの良質部が定着体天端以上となるように設定することとした。

(4) 定 着

本工法は、その特性上から1次定着の確実性が重要であ



写真 - 6 逆止弁

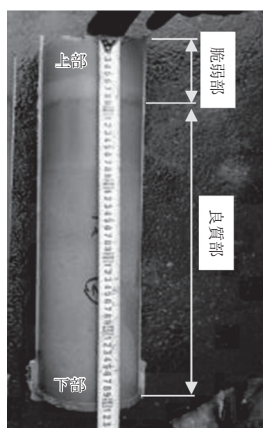


写真 - 7 試験体から取り出した定着部王ルタル

る。しかし、孔内の滞水により定着性能が低下することが懸念された、そのため、滞水状況下においても、確実な定着が可能であることを確認するために、引張試験を行った。

引張試験では、滞水環境下においての充填材の種類（無収縮モルタルと水中不分離モルタル）、ウォータージェットによる1次定着部の目荒しの有無をパラメータにして引張耐力を確認した。写真-8に目荒しの状況を示す。

試験の手順は、5.1 (3) で確認した施工方法にてモルタル充填を行い、先端に定着体を設けたアラミド FRP ロッド (9 ϕ 7.4) を図 - 6 に示すコンクリートブロックへ挿入し養生を行った。充填位置は、既往試験²⁾ では定着体天端から 250 mm 上の位置に設定していたが、本試験では安全側に定着体天端位置に設定した。載荷図を図 - 7 に示す。載荷方法は、施工時最大緊張力 0.6 Pu (388 kN) の荷重載荷と除荷を 3 回繰り返し、その後、引張耐力 1.0 Pu (647 kN) まで載荷した。

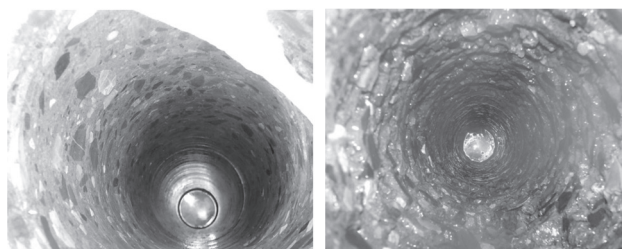
写真 - 9 に引張試験状況、表 - 3 に試験結果を示す。引張耐力の 1.0 Pu まで載荷した場合でも、4 ケースすべてにおいて、定着体が試験体から抜出しがないことを確認した。

以上より、充填材は無収縮モルタルで、目荒しはしなくても、滞水環境下での確実な定着が可能であることを確認した。なお、実施工では施工上の誤差要因を考慮して、既往試験²⁾と同様に、定着体天端から 250 mm 上まで無収縮モルタルを充填することとした。

5.2 実施工における工夫

(1) 各施工段階での工夫

各施工段階において工夫した点を、以下に示す。



(a) 目荒し無し (b) 目荒し有り

写真 - 8 定着部目荒し状況

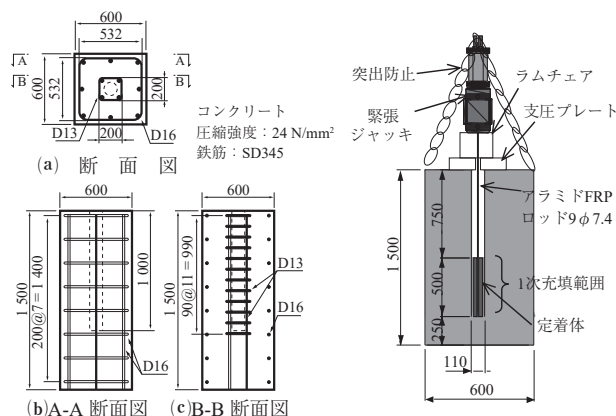


図 - 6 コンクリートブロック

圖 - 7 載 荷 圖



写真 - 9 引張試験状況

表 - 3 試験結果

No.	1 次充填材の種類	目荒しの有無	試験結果 1.0Pu
1	水中不分離モルタル	あり	異常なし
2	〃	なし	〃
3	無収縮モルタル	あり	〃
4	〃	なし	〃

※ 1 次充填直前の孔内の状態は、満滞水状態とした。

- 1) 足場組立て：アラミド FRP ロッド挿入時に、アラミド FRP ロッドを写真 - 10 に示すように全展開して施工性の向上と損傷防止を目的に、足場延長を拡張した。
- 2) 削孔：写真 - 11 に削孔状況を示す。事前検討時の懸念事項であった孔内の滞水は、管内カメラにて全孔で無いことを確認した。削孔後は孔内注水を行い、バキュームポンプによって吸い上げることで孔内の切削粉などを除去した。
- 3) 1 次充填：写真 - 12 に 1 次充填状況を示す。孔内での滞水は確認されなかった。モルタル充填には手押しポンプ（吐出圧力 0.3 MPa）を使用し、充填用ホースは孔底まで延伸した。充填量は流量および水位計により管理した。
- 4) アラミド FRP ロッド挿入：写真 - 13 に挿入状況を示す。横桁や孔の角部をサクシオンホースで養生するとともに、展開したアラミド FRP ロッドを複数人で持ち上げて挿入するなど、アラミド FRP ロッドの損傷防止に留意して作業した。また、事前検討より、1 次充填後に充填材を乱さないようにアラミド FRP ロッドを挿入した。アラミド FRP ロッド挿入後には再度水位計での計測を行い、所定高さまで充填されていることを確認した。
- 5) 緊張：写真 - 14, 15 に緊張状況を示す。緊張架台は 3 段構成とした。下段がアラミド FRP ロッド切断作業用、中上段は定着作業用とし、狭隘な作業空間での施



写真 - 10 全展開したアラミド FRP ロッド



写真 - 11 削 孔



写真 - 12 1 次 充 填



写真 - 13 アラミド FRP ロッド挿入

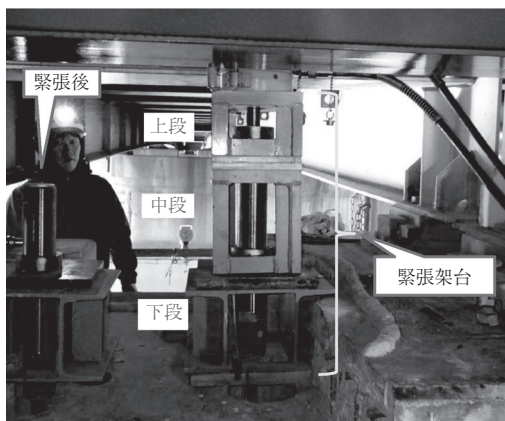


写真 - 14 緊張 ①

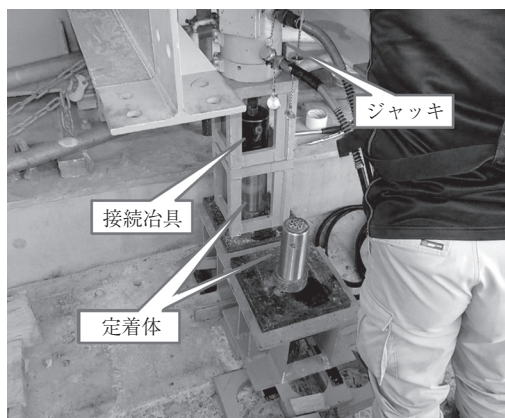


写真 - 15 緊張 ②

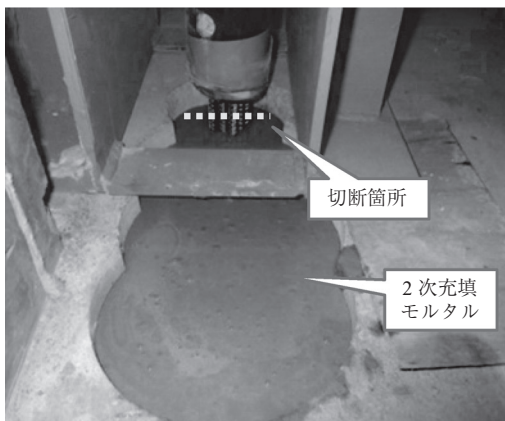


写真 - 16 アラミド FRP の切断箇所

工性を考慮した小型分割構造とした。緊張は、定着体に接続した専用治具を介して、センターホールジャッキ（最大出力 700 kN）を用いて行った。緊張力は、構造計算による必要な有効緊張力 $0.5 P_u$ (323 kN/本) にリラクセーション（100 年：道路橋示方書，設計供用期間）を考慮し，緊張時は伸び・圧力の管理を行った。また，緊張直後からアラミド FRP ロッド切断直前までの緊張材の拔出しなどについて，不具合がないことを確認するために，緊張直後に緊張材の削孔天端から 50 mm 程度上の位置にマーキングを行い，アラミド FRP ロッド切

断直前にマーキング位置の高さに変化がないことを確認した。

6) アラミド FRP ロッド切断：2 次充填・養生後のアラミド FRP ロッドの切断位置は写真 - 16 に示すように，耐候性を考慮して，橋脚天端から 10 mm 下で設定し無収縮モルタルで表面仕上げを行った。

また，切断直後に緊張材の引込みがないことを確認した。

(2) 今後の維持管理性への配慮

今後の維持管理性を考慮して，導入した緊張力が維持されていることを目視確認できるように，1 箇所のみ橋脚天端からアラミド FRP ロッドを 20 mm 突出させた。これにより引込みなどの定着不良が見える化し，間接的に導入した緊張力が維持されていることを確認することとした。これは，アラミド FRP ロッドが非腐食性材料であること，付着定着性能を有していることから可能となる維持管理手法である。本工事では，施工から約 1 年経過後でも突出長に変化がないことを確認している。

6. おわりに

本工事は，さまざまな制約条件のもと，無事に工事 1 が平成 31 年 4 月，工事 2 が令和 2 年 3 月に竣工することができた。施工完了後の状況を写真 - 17 に示す。本報告が今後同様の補強工事における参考となれば幸いである。



写真 - 17 補強完了全景

最後に，本工法を実施工で初めて適用するにあたり，ご指導，ご助言をいただいた関係者各位に，この場を借りて深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：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），1996.9
- 2) 安藤ほか：アラミド FRP ロッドによる RC 橋脚の耐震補強効果に関する実験的検討，第 24 回 PC シンポジウム論文集，pp.83-88，2015.10

【2020 年 9 月 18 日受付】