

外ケーブル補強効果の経年変化に関する検討

北野 勇一*1・小野塚 豊昭*2・村井 弘恭*3・藤原 保久*4

外ケーブル補強後 21 年が経過した既設 PC 橋を対象に、外ケーブルの残存張力、外ケーブル緊張材の残存性能、および外ケーブル定着部の現有耐荷性能を把握するために各種調査を実施した。また、既往研究を含め、外ケーブル補強効果の経年変化について考察した。その結果、今回の検討範囲において、外ケーブルの残存張力はおおむね設計値を満足すること、外ケーブル緊張材の残存強度はいずれも規格値を上回り、明確な経年変化は認められないことが確認された。さらに、外ケーブル補強後 21 年が経過した外ケーブル定着部は、現行の基準に照らしても十分な耐荷性能を有することが確認された。

キーワード：既設 PC 橋、外ケーブル補強、張力、緊張材、定着部

1. はじめに

PC 構造物は高強度コンクリートを使用し、PC 鋼材によってプレストレスを導入してひび割れを抑制するため、耐久性に優れた構造物である。しかし、厳しい塩害環境や想定外の水分浸入などによって、PC 鋼材が腐食・破断すると耐荷性能が低下して重大な事象に至ることもある。したがって、既設 PC 構造物の維持保全においては、PC 鋼材の腐食に至る前に対策を実施する予防保全が重要である¹⁾。

一方、内部の PC 鋼材が破断するなどにより耐荷性能が低下した既設 PC 構造物では、構造物ごとに設定された要求水準に応じ耐荷性能の回復を目的とした補強を講じることになる。PC 構造物に用いられる補強工法のうち、外ケーブル方式による補強工法は桁外部に定着装置、偏向装置を設けて外ケーブル（外ケーブル緊張材とも呼ぶ）を設置、緊張し、内ケーブル破断などによって失われたプレストレスを再導入するものであり、補強効果が明確で、かつ、施工実績も比較的多い²⁾。

しかしながら、補強後、年数が経過した場合の外ケーブル補強効果の経時的変化については未だ不明確なところも多い。そこで著者らは、外ケーブル補強後 21 年が経過し撤去されることになった既設 PC 橋を対象に、外ケーブルの残存張力、外ケーブル緊張材の残存性能、および外ケーブル定着部の現有耐荷性能を把握するために各種調査を実施した。また、既往研究を含め、外ケーブル補強効果の経年変化に関する検討を行った。本稿では、これら検討の結果について報告する。

2. 対象橋梁の概要

対象橋梁は 1962 年に海岸から約 70 m の河口上に建設された 3 連の PC 単純 T 桁橋である（写真 - 1）。本橋は、1976 年より塩害補修が着手され、その後、PC 桁下フラン

ジ内部の PC 鋼材の破断が確認されたことから、1996 年に外ケーブル補強が行われた。

外ケーブル補強状況を写真 - 2 に示す。外ケーブル緊張材はねじ式定着のプレファブケーブル（PC 鋼材をポリエチレンで被覆したもの）が用いられ、目視したかぎりでは健全な状態であった。また、定着装置および偏向装置はコンクリート製であり鋼製の埋設型枠の腐食が確認されたものの、目視したかぎりでは定着機能および偏向機能が損なわれている状況にはなかった。

なお、対象橋梁は、外ケーブル補強後 21 年目（供用 55 年目）の 2017 年に新橋建設に伴い撤去されることになった。



写真 - 1 対象橋梁の全景（2016 年撮影）



写真 - 2 外ケーブル補強状況（2016 年撮影）

*1 Yuichi KITANO：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会（川田建設 株）

*2 Toyooki ONOZUKA：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会（日本高圧コンクリート 株）

*3 Hiroyasu MURAI：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会（ドービー建設工業 株）

*4 Yasuhisa FUJIWARA：（一社）プレストレスト・コンクリート建設業協会（三井住友建設 株）

3. 外ケーブルの残存張力に関する検討

3.1 検討概要

対象橋梁の供用停止後、図 - 1 に示す外ケーブルについて振動計測を実施することにより外ケーブル張力の確認を行った。調査箇所は第1径間 G4桁 (C1, C2), G5桁 (C5, C6) および第3径間 G4桁 (C3, C4) に設置された外ケーブル6本とした。C1～C4は引張荷重300kN相当 (F30T), C5とC6は700kN相当 (F70T) の外ケーブルである。振動計測は図 - 2 に示すように、ケーブル支持間隔の中央付近にサーボ型加速度計を設置し、常時微動をサンプリング周波数1kHzで取得し、デジタル変換後、FFT解析を行った。解析より得られた1次振動数を式(1)に代入し、外ケーブル張力を算出し、統計処理を行った。また、振動測定による外ケーブル張力の推定精度を検証するとともに、補強21年後の外ケーブル張力の安全係数を算出した。さらに、既往研究を含め、外ケーブル張力の経年変化に関する考察を行った。

$$T_{exp} = 4wl^2/g \cdot f_1^2 \quad (1)$$

ここに、 T_{exp} ：外ケーブル張力の推定値、 l ：弦長 (実測値)、 w ：単位重量 (F30T：1.85 kg/m, F70T：3.65 kg/m)、 g ：重力加速度 (9.80665 m/s²)、 f_1 ：1次振動数 (3回の測定平均)

3.2 振動計測結果および各種検討の結果

(1) 外ケーブル張力の推定結果

振動計測による外ケーブル張力の推定結果を図 - 3 に示す。図には外ケーブル補強時の設計図書に基づき、外ケーブル張力の設計値を併記した。図より、各ケーブルとも定着部寄りの計測箇所AとDの張力が高く、偏向部間である計測箇所BとCの張力が低い。前者より外ケーブルの緊張は両引きで実施されたと推定される。後者については、当時の計算書によると偏向部におけるPC鋼材の角変化1ラジアンあたりの摩擦係数 $\mu = 0.30$ 、長さ1mあたりの摩擦係数 $\lambda = 0.200$ (内ケーブルの設計値は通常0.004) として計算され、定着部に対し偏向部間の計算張力は0.83～0.86となる。外ケーブル補強に関する当時の技術資料²⁾には摩擦低減に配慮した偏向部を念頭に $\mu = 0.30$ 、 $\lambda = 0.0$ とするのに比べ、摩擦損失が数倍大きい。これは、本橋の偏向部が半割鋼管に外ケーブルが直に接触する構造である

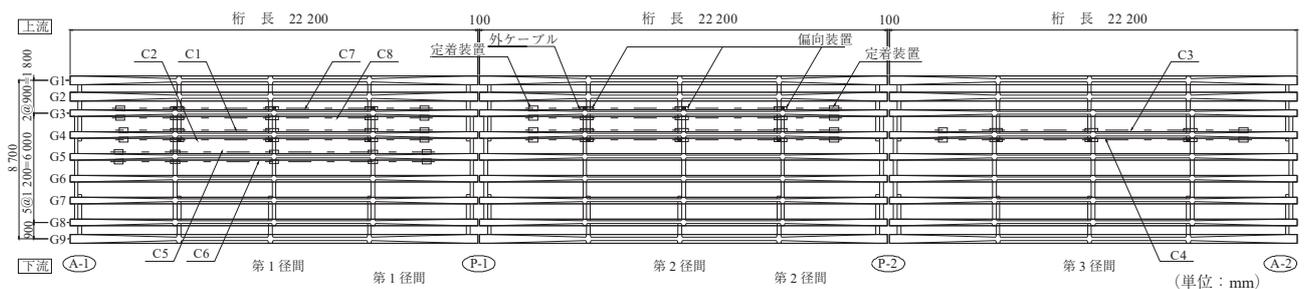


図 - 1 外ケーブル緊張材の平面配置

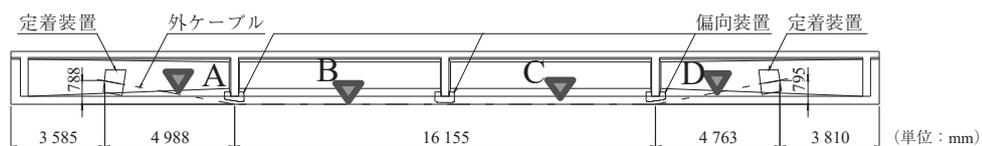


図 - 2 振動計測箇所 (C6 ケーブルの例)

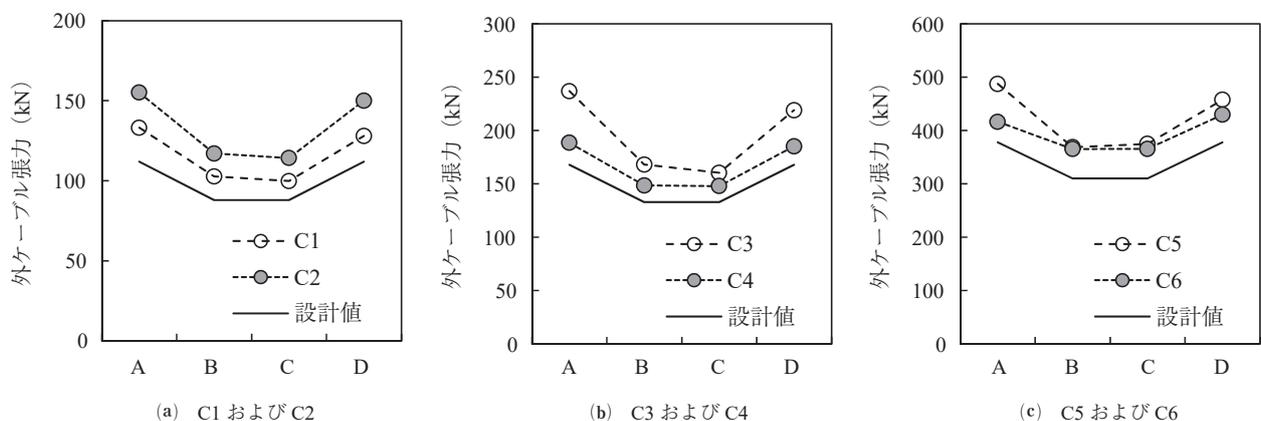


図 - 3 振動計測による外ケーブル張力の推定結果

ことを想定したものと考えられる（写真 - 2）。

なお、3回の測定値のバラツキ（変動係数）は振動計測を実施した全箇所の中で平均で0.97%であった。

(2) 統計処理の結果

計算張力に対する実測張力の割合を求め、ケーブル種類の違い、導入張力の違い、補強部位の違いについてt検定を行った。その結果を表 - 1 に示す。ケーブル種類の違いや導入張力の違いに関してはp値が有意水準10%よりも大きいため、有意差がないと判断した。したがって、ケーブル種類や導入張力が異なっても、設計上の外ケーブル張力に対し一定の比率で経年的に漸近する傾向が確認された。

一方、補強部位の違いに関するp値は0.015と有意差が認められた。図 - 4 は補強部位を場合分けしたときの外ケーブル張力推定値の分布を正規確率紙に示したものである。図から、定着部および偏向部間の張力はそれぞれ正規分布に従うことがわかった。また、計算張力に対し、定着部の実測張力は平均23.3%（変動係数8.5%）、偏向部間の張力は平均13.7%（変動係数5.4%）を上回ると推定された。定着部と偏向部間の違いは、旧タイプの偏向装置が用いられていたことや、弦の曲げ剛性を無視した弦理論に基づいた式(1)は弦長が短い場合に推定誤差を生むこと³⁾が原因であると推察され、経年的に違いが表れたものではないと考える。

(3) 振動計測の推定精度に関する検証

前述のとおり、振動計測による外ケーブル張力の推定値には誤差が含まれる。そこで、外ケーブル補強された第3径間G4桁を譲り受け、この撤去桁を搬入した試験場にて新調した外ケーブルを設置し、緊張作業中にロードセルによる端部張力の測定と、振動計測を実施した（写真 - 3）。その結果、振動計測による推定張力は211kNであるのに対し、端部張力は203kN（96%）であることが確認された。

(4) 外ケーブル張力の安全係数の算出

本橋における外ケーブル補強は、PC鋼材が破断した偏向部間が対象である。補強の対象断面である偏向部間に関し、式(2)より外ケーブル補強21年時点の安全係数を算出すると、プレストレス不足側 $\gamma_{fu} = 1.00$ 、プレストレス超過側 $\gamma_{fo} = 1.18$ と算定された。

なお、外ケーブル張力の中央値は、振動計測の推定精度を考慮した場合、 $\alpha \cdot T_{exp}/T_{cal} = 1.09$ となる。

$$\gamma_f = (1 - k\delta) \cdot \alpha \cdot T_{exp}/T_{cal} \quad (2)$$

ここに、 γ_f : 安全係数、 k : T_{cal} を下回る（上回る）確率を5%以下とする場合1.64（-1.64）、 δ : 変動係数=0.054、 α 、振動計測の推定精度に関する係数=0.96、 T_{exp} : 外ケーブル張力の推定値、 T_{cal} : 外ケーブル張力の設計値

3.3 外ケーブルの残存張力に関する考察

表 - 2 は、既往研究を含めて経年使用された外ケーブルの残存張力を統計的に整理した結果である。PC箱桁橋⁴⁾は1968年に供用が開始されたPC2径間Tラーメン橋で、プレキャスト桁を連結する現場打継部においてひび割れの発生が確認されたことから、損傷部の応力を改善する方法

表 - 1 実測張力 T_{exp} / 計算張力 T_{cal} の t 検定結果

検定項目	有意水準 5% の確率 p		結果
	定着部	偏向部間	
ケーブル種類の違い	0.516	0.815	有意差なし
導入張力の違い	0.765	0.415	有意差なし
補強部位の違い	0.015		有意差あり

注) ケーブル種類の違いは F30T (C1~C4) と F70T (C5~C6)、導入張力の違いは F30T を用いた C1~C2 と C3~C4、補強部位の違いは定着部 (A, D) と偏向部間 (B, C) とする。結果は、 $0.1 < p$: 有意差なし、 $0.05 < p \leq 0.1$: 有意傾向あり、 $p \leq 0.05$: 有意差あり、とする。

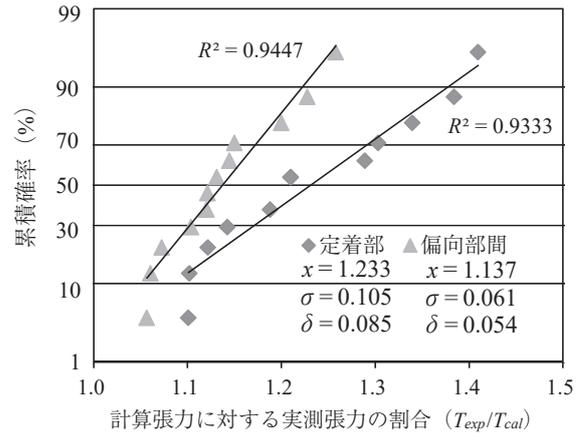


図 - 4 外ケーブル張力推定値の分布



写真 - 3 新調ケーブルの緊張状況

表 - 2 経年使用された外ケーブルの残存張力

	供用年数(年)	中央値 T_{exp}/T_{cal}	変動係数	安全係数	
				γ_{fu}	γ_{fo}
PC箱桁橋 ⁴⁾	22	1.09	3.4%	1.03	1.15
RC箱桁橋 ⁵⁾	10	1.09	3.6%	1.03	1.15
本研究	21	1.09	5.4%	1.00	1.18

γ_{fu} : プレストレス不足側の安全係数。

γ_{fo} : プレストレス超過側の安全係数。

として外ケーブル（引張荷重700kN相当、有効緊張力294kN）により追加プレストレスを導入する補強工事が供用約10年後に実施された。補強後約22年（2001年）の時点で経時的な補強効果を確認するために張力測定を含む詳細な点検が実施された。その結果、いずれも有効緊張力以上であり、実測値が設計値を平均で約9%上回っていることが確認された。

また、RC 箱桁橋⁵⁾は1968年に建設されたRC 2 径間連続箱桁であり、重交通下で20年余り供用した頃より、ひび割れなどの変状の進行が著しいことが点検の結果などより明らかとなり、既設部材の耐荷性能や車両の大型化などを考慮し、主桁および床版に対して補強が実施された。桁の補強には外ケーブル（引張荷重2000kN相当、有効緊張力980kN）が選定され、一連の補強工事が1994年に完了している。本橋の場合は補強工事の段階より緊張力調査が実施されており、補強後10年を経過しても外ケーブル緊張力は有効緊張力を確保することが確認された。

以上より、本研究を含め3橋の事例にとどまるものの、いずれの事例も外ケーブル張力は設計上想定していた有効緊張力を確保していることが確認された。

4. 外ケーブル緊張材の残存性能に関する検討

4.1 検討概要

前出図 - 1 に示す C1 ~ C8 の既設外ケーブル（F30T を 6 本と F70T を 2 本）を譲り受け、調査に供した。

表 - 3 に調査を実施した外ケーブル緊張材の規格を示す。外ケーブルはいずれも PC 鋼より線が用いられ、F30T はシングルストランド 1φ 17.8 mm、F70T はマルチストランド 7φ 9.5 mm で構成される。これらの諸元は 1996 年当時の旧規格であり、比較として新調外ケーブル F40T（引張荷重 400 kN 相当）も調査に供した。

図 - 5 に外ケーブル緊張材の調査フローを示す。既設外ケーブルは被覆材の損傷状況を目視にて調査したのち、被覆材の損傷が顕著な外ケーブル（C8）について被覆材を剥ぎ取り、PC 鋼材の発錆状況を目視観察した。発錆が顕著な C8 の一部は除錆して減肉量を調査し、残りの部分はほかの外ケーブルを含めて偏向部分（前出図 - 2 の AB 間および CD 間）と直線部分（前出図 - 2 の BC 間）に切り分け、引張試験を実施した。また、新調の外ケーブル F40T は撤去 PC 桁（第 3 径間 G4）を用いて緊張作業を実施し、外ケーブル補強された PC 桁の載荷試験を実施することにより、設計計算上の破壊荷重に達するまでの張力変動を与えた⁶⁾。その後、既設外ケーブルと同様の引張試験を実施した。さらに、上記の調査結果ならびに既往研究の成果を含め、外ケーブル緊張材の経年変化に関する考察を行った。

なお、本検討の内容は、既報告⁷⁾に追加調査の結果を加えたものである。

4.2 調査結果

(1) 被覆材損傷調査

写真 - 4 に外ケーブル被覆材の損傷状況を示す。外ケーブル表面から被覆材の厚み方向（外ケーブルの直径方向）の損傷の深さを指標にすると、損傷の形態としては深さ 0.1 mm 未満で長手方向に断続的に生じた「擦れ傷」、深さ 0.1 ~ 1.5 mm で長手方向に連続的に生じた「削れ傷」、深さ 0.7 ~ 4.0 mm で楕円状に切られた「えぐれ傷」が確認された。いずれの損傷も発生原因は外力によると考えられ、経年的な材料劣化に起因する変色やひび割れといった損傷は確認されなかった。

表 - 4 は深さ 0.1 mm 以上の損傷を集計した結果である。

表 - 3 外ケーブル緊張材の規格

種類	構成	断面積 (mm ²)	重量 (kg/m)	引張強度 (kN)	外径 (mm)
F30T	1φ 17.8	191.1	1.85	330	25.8
F40T	1φ 17.8	208.4	1.95	387	25.8
F70T	7φ 9.5	383.9	3.64	686	38.5

* 重量はポリエチレン被覆を含む PC 鋼材の 1 m あたりの重量。
F40T は新調ケーブル。

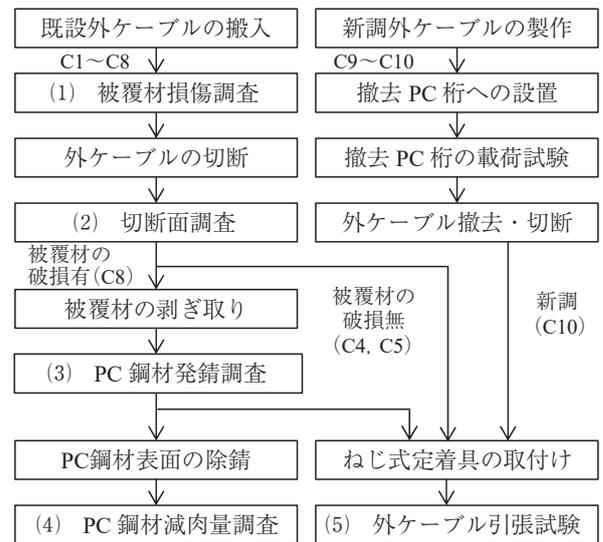


図 - 5 外ケーブル緊張材の調査フロー

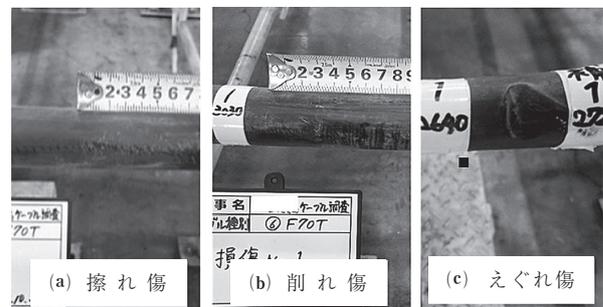


写真 - 4 外ケーブル被覆材の損傷状況

表 - 4 外ケーブル被覆材の損傷集計

	直線部 (削れ傷)		定着部および偏向部近傍 (えぐれ傷)	
	箇所数	深さ(mm)	箇所数	深さ(mm)
C1	0	-	1	1.5
C2	1	0.1	0	-
C3	3	最大 0.9	2	最大 1.4
C4	0	-	2	最大 0.8
C5	2	最大 0.1	0	-
C6	2	最大 1.5	1	0.7
C7	0	-	2	最大 1.9
C8	0	-	3	最大 4.0

注) 深さ 0.1 mm 以上の損傷を集計した。

○ 研究報告 ○

この表に集計されていない損傷である擦れ傷は、C1～C8すべての既設外ケーブルの全長にわたり多数確認された。また、削れ傷は主に外ケーブルの両端を除く直線部で確認された。これらの損傷状況から、擦れ傷と削れ傷は、外ケーブルの配線作業時に生じたものと推定される。一方、えぐれ傷は定着部および偏向部の近傍のみに発生し、C8ケーブルでは被覆材の内部にあるPC鋼材の素線1本が軸方向に長さ25mmほど露出する損傷が確認された（写真-5）。

えぐれ傷の発生原因を追究するため、対象橋梁から撤去された桁に対し、新調ケーブルを用いて緊張作業を実施した。その状況を写真-6に示す。緊張により外ケーブルが伸長する際に、偏向部の出口側（緊張側）で偏向部の半割鋼管に外ケーブルが過度に接触し、被覆材が深くえぐり取られることが確認された。つまり、えぐれ傷は外ケーブル緊張時に生じたものと推定される。

なお、現在の偏向部の設計方法は外ケーブルの角当り対策としてR形状の長さに余裕をもたせ、緩衝材を用いることが標準化されている²⁾。

(2) 切断面調査

既設外ケーブル緊張材の切断面の様子を写真-7に示す。外ケーブルの外径寸法は規格値を上回り、被覆材はPC鋼材の外周部を充填していた。ただし、素線と素線の間にはわずかな隙間があった。

(3) PC鋼材発錆調査

C8ケーブルのPC鋼材発錆状況を写真-8に示す。被覆材に損傷がない箇所ではPC鋼材には発錆が認められず、きわめて健全な状態であった。一方、PC鋼材の露出が確認された定着部近傍の損傷No.1と偏向部近傍の損傷No.3の箇所では、素線4本が70mmほどの範囲で錆が広がっ

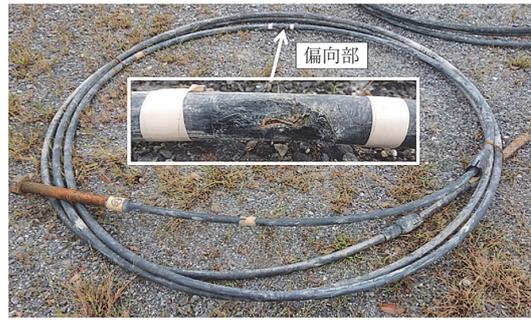


写真-5 C8ケーブル被覆材の損傷



写真-6 新調ケーブル緊張による被覆材損傷の再現

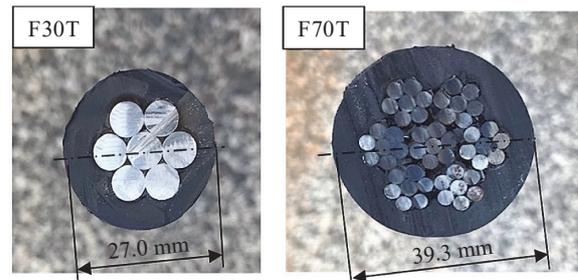


写真-7 外ケーブル緊張材の切断面の様子

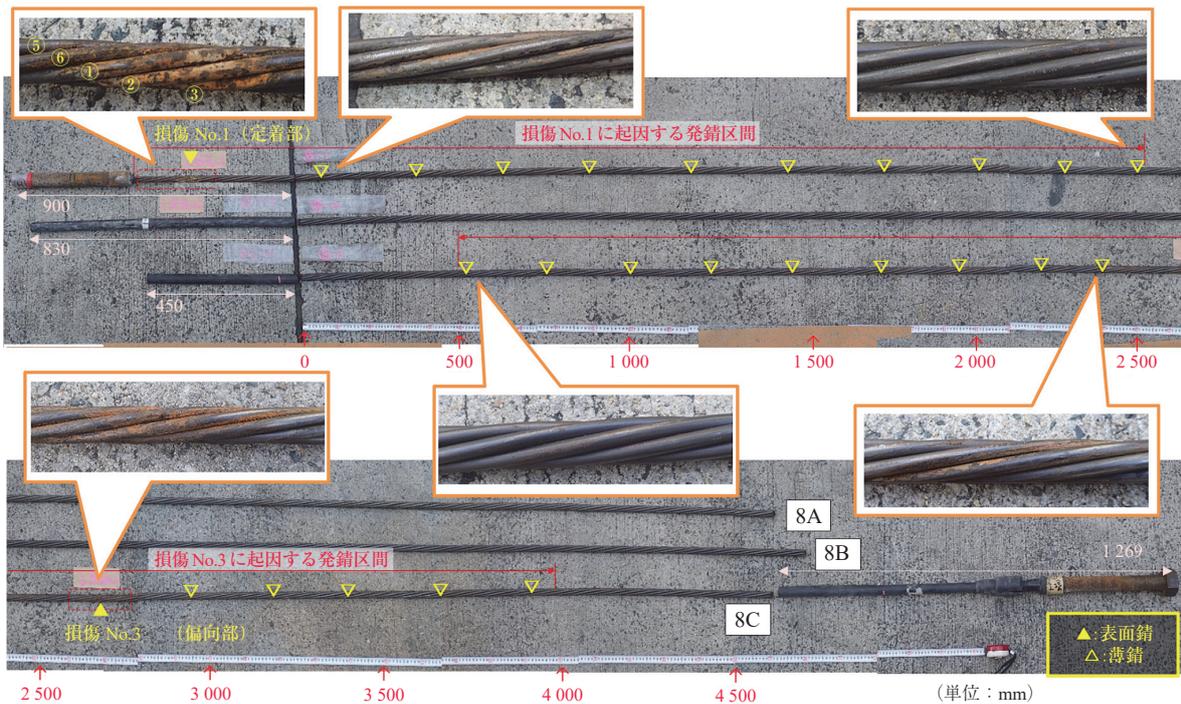


写真-8 PC鋼材発錆状況 (C8ケーブル)

ていた。また、これよりも軽微ではあるが、PC 鋼材が露出した箇所を起点に、素線のよりに沿って 2 m 程度にわたり薄錆が認められた。この薄錆は、塩化物イオンや酸素を含む水が被覆材の破損部から浸入し、素線と素線の隙間を PC 鋼材のよりに沿って毛細管現象で伝わったためと推察された。

(4) PC 鋼材減肉量調査

C8 ケーブルの損傷 No.1 付近を除錆し、素線の最小直径を測定した結果を写真 - 9 に示す。本調査のなかでもっとも腐食していた箇所での PC 鋼材の減肉量は最大 0.12 mm (健全であった素線 ④ と ⑤ の 5.60 mm に対し、素線 ② は 5.48 mm) であった。減肉量は決して大きくないが、素線 ①～③ には孔食が認められたことから、水素吸蔵による遅れ破壊が生じるおそれもあったといえる⁸⁾。

(5) 外ケーブル引張試験

外ケーブル引張試験の結果を表 - 5 に示す。強度比は規格値に対する最大荷重の比率である。また試験は、部位(偏向部と直線部)、定着の既新(既:既設具をそのまま利用、新:定着具を新設)および PC 鋼材の腐食有無を変化させた試験体について試験を行った。その結果、いずれの試験体も規格値を上回り、新調ケーブルである C10 とおむね同程度の耐力を有することが確認された。

なお、引張試験を終えた外ケーブルを目視確認し、被覆材のひび割れなどの変状は認められなかった。

4.3 外ケーブル緊張材の残存性能に関する考察

21 年使用された外ケーブル緊張材の解体調査を実施した結果、被覆材の一部が破損し、PC 鋼材の腐食が確認された。しかしながら、外ケーブル引張試験の結果から、部位、定着の既新、および PC 鋼材の腐食の有無の影響は認められず、補強後 21 年時点においては新調ケーブルと同程度の引張強度を有することが確認された。なお、引張試験において最大荷重まで破断せずにストロークの上限より試験を終了した C8 の BC 間についてピンホール試験(電圧 20 kV 以上)を実施した結果、試験体全長にわたり PE 被覆のピンホールは確認されなかった。

表 - 6 は、既往研究を含めて経年使用された外ケーブルの残存強度を整理した結果である。外ケーブルの残存強度はいずれも規格値を上回り、明確な経年変化は認められなかった。

5. 外ケーブル定着部の現有耐荷力に関する検討

5.1 検討方法

対象橋梁から外ケーブル補強された第 3 径間 G4 桁を譲り受け、この撤去桁から外ケーブル定着装置を含む長さ 1 900 mm の部材を切り出して試験に用いた。定着部の載荷試験状況を写真 - 10 に示す。試験体は、既設部材にあと打ちコンクリートで反力壁を一体化させ、外ケーブルの代わりに PC 鋼棒 φ 40 (C 種 1 号) を配置した。この PC 鋼棒をジャッキにより左右同時に緊張して載荷試験を行った。試験中は載荷荷重と定着装置の変位を計測した。また、実験後には定着装置を撤去し、既設桁との接合部の状況を観察した。さらに、既往の供試体実験の結果と比較し、外

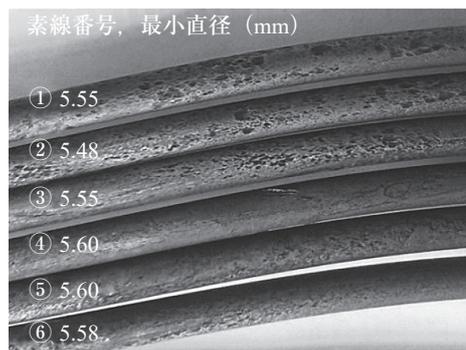


写真 - 9 C8 損傷 No.1 付近の除錆後

表 - 5 外ケーブル引張試験の結果

	部位	定着既新	腐食有無	最大荷重(kN)	強度比(%)	破断伸び(%)
C4	AB 間	既 - 新	なし	347	105	4.5
	CD 間	新 - 既		340	103	4.8
C5	AB 間	新 - 新	なし	718	105	-
	BC 間			714	104	-
	CD 間	新 - 既		733	107	4.0
C8	AB 間	新 - 新	有	354	107	5.3
	BC 間			>346	>105	>5.3
	CD 間	新 - 既	なし	342	104	5.1
C10	AB 間	新 - 新	なし	409	106	5.5
	BC 間	新 - 新		424	110	5.1

注) 強度比は規格値に対する最大荷重の比率。「-」は伸び測定部の被覆材の除去長さが不十分で測定できず。「>」は最大荷重まで破断せずにストロークの上限より試験を終了した。

表 - 6 経年使用された外ケーブル緊張材の残存強度

	供用年数(年)	種類	強度比の中央値	強度比の変動係数
PC 箱桁橋 ⁴⁾	22	F70T	1.06	-
PCT 橋 ⁹⁾	11	F100T	1.09	0.6%
本研究	21	F30T, F70T	1.05	1.3%

注) 強度比は規格値に対する最大荷重の比率。- : 定着具を新設した 2 試験体の結果であるため非表示とした。

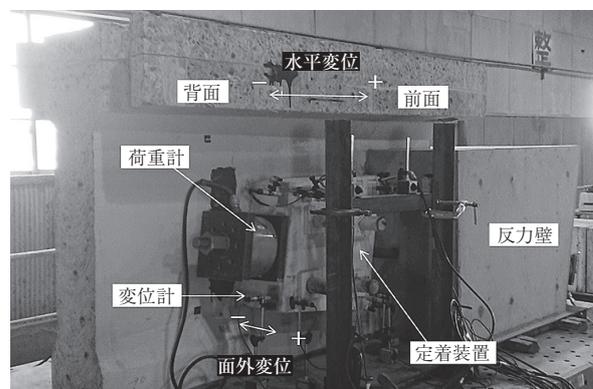


写真 - 10 定着部の載荷試験状況

ケーブル定着耐力の経年変化について考察した。

なお、本検討は既報告¹⁰⁾をもとに加筆したものである。

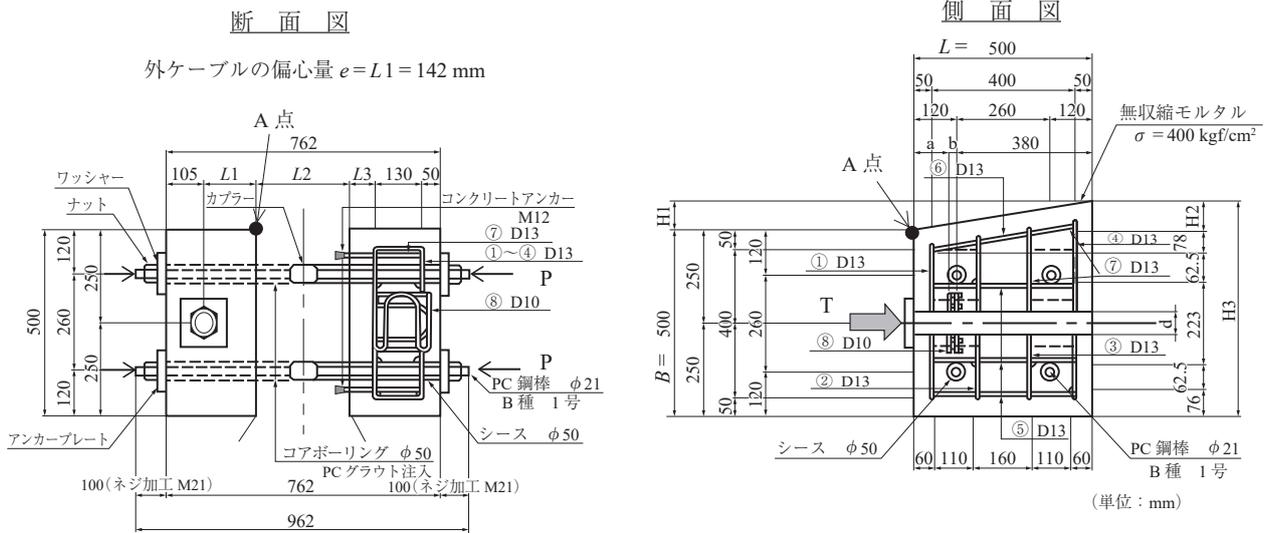


図 - 6 外ケーブル定着部の詳細

5.2 定着部の設計

実験に先立ち、図 - 6 に示す補強図面をもとに定着部の設計を行った。定着部の設計は、既往の技術資料¹¹⁾を参考に、弾性限界荷重とせん断伝達耐力を算出した。ここで、弾性限界荷重は、外ケーブル張力による曲げモーメントに対し浮上りが生じない限界の荷重であり、引張応力度が卓越する A 点において式 (3) を満足するものとした。

$$\sigma_A = \frac{P}{B \cdot L} - \frac{6 \cdot T \cdot e \cdot \cos \theta}{B \cdot L^2} - \frac{6 \cdot T \cdot e \cdot \sin \theta}{B^2 \cdot L} > 0 \quad (3)$$

ここに、 σ_A : A 点の応力度 (N/mm²)、 P : 緊結用 PC 鋼材によるプレストレス力の合計 (= 788 × 10³N)、 T : 外ケーブル張力 (N)、 B : 定着装置の幅 (= 500 mm)、 L : 定着装置の長さ (= 500 mm)、 e : 外ケーブルの偏心量 (= 142 mm)、 θ : 外ケーブルの傾角 (= 0°)。

なお、参考にした技術資料には式の 2 項目の e に該当する部分が脱落していることに注意を要する。

5.3 外ケーブル定着部の荷重試験結果

(1) 定着装置の変形挙動

荷重荷重と定着装置の水平変位の測定結果の一例を図 - 7 に示す。荷重荷重 720 kN までの水平変位はおおむね線形挙動を示し、その後変位が漸増し、最大荷重 1 199 kN で荷重が頭打ちとなった。

(2) 設計値と実験値の比較

定着装置の設計値と実験値を比較した結果を表 - 7 に示す。今回の実験結果は、弾性限界荷重およびせん断伝達耐力とも設計値の 1.5 倍以上であることが確認された。

(3) 定着装置と既設桁の接合部の状況

定着装置と既設桁の接合部の状況を写真 - 11 に示す。これより、チップング処理された界面は滑動がないこと、グラウトはおおむね充填されていること、緊結 PC 鋼棒およびあと施工アンカーに引抜けがないことが確認された。

5.4 外ケーブル定着部の現有耐荷力に関する考察

弾性限界荷重は、定着装置と既設コンクリートの接合面の付着を無視して設計される。一方、実験結果より付着強

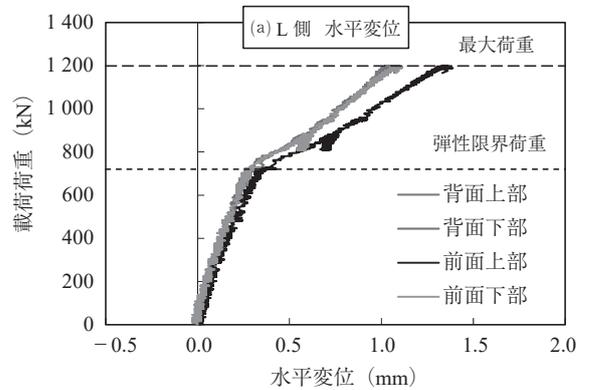


図 - 7 定着装置の水平変位の測定結果

表 - 7 定着部の設計値と実験値の比較

	実験値 (kN)	設計値 (kN)	実験値 / 設計値
弾性限界荷重	720	463	1.55
せん断伝達耐力	1 199	783	1.53



写真 - 11 定着装置と既設桁の接合部の状況

度を逆算すると 1.75 N/mm^2 と推定される。つまり、既設 PC 桁とあとから設置された定着装置との界面は、21 年経過後であっても付着強度が残存していたと推察される。

今回得られたせん断伝達耐力と過去に実施された供試体実験の結果¹²⁾を比較した結果を図 - 8 に示す。供試体実験では定着装置と既設部材の接合面の処理方法を変化させ、サンドブラスト (2S0U) とチップング (2T0U) は設計値を上回るのに対し、無処理 (2N0U) では設計値を下回る結果が得られている。今回、21 年間使用された外ケーブル定着装置においても、供試体実験のチップングと同等以上のせん断伝達耐力を有することが確認された。

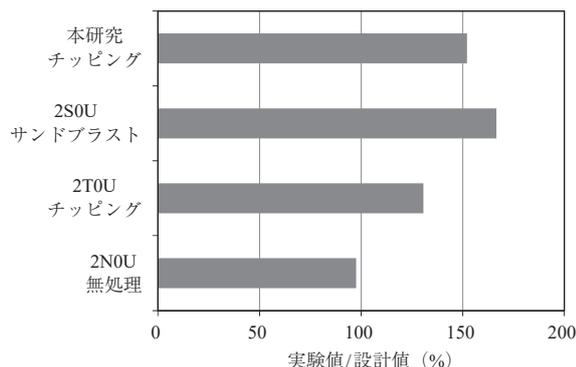


図 - 8 経年供用された外ケーブル定着部の残存せん断伝達耐力

6. ま と め

外ケーブル補強後 21 年が経過した既設 PC 橋を対象に外ケーブル補強効果の経年変化に関する検討を行った結果、今回の検討範囲において、次のことが明らかになった。

- (1) 撤去前に実測した外ケーブル張力を統計処理した結果、ケーブル種類や導入張力が異なっても、設計上の外ケーブル張力に対し一定の比率で経年的に漸近する傾向が確認された。また、既往研究を含め、外ケーブル張力はおおむね設計値を満足することが確認された。
- (2) 撤去された外ケーブル緊張材の解体調査を実施した結果、被覆材の一部が破損し、PC 鋼材の腐食が確認された。しかしながら、既往研究を含め、外ケーブル緊張材の残存強度はいずれも規格値を上回り、明確な経年変化は認められなかった。
- (3) 外ケーブル補強後 21 年が経過した外ケーブル定着部の耐荷性能を検証した結果、現行の基準に照らしても十分な耐荷性能を有することが確認された。

謝 辞

本研究は、国立研究開発法人土木研究所構造物メンテナンス研究センターと一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会「撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の補修補強技術の高度化に関する共同研究」ならびに一般社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会保全補修部会「既設橋、補修・補強後の PC 橋耐久性検討ワーキング」の成果の一部である。本研究に際して貴重なご意見ならびにご協力をいただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤原保久, 徳光 卓, 北野勇一, 毛利忠弘: PC 構造物の維持保全について - PC 橋の更なる予防保全に向けて -, プレストレストコンクリート, Vol.60, No.6, pp.54-59, 2018.12
- 2) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会: 外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル (案), 1998.6
- 3) 新家 徹, 広中邦汎, 頭井 洋, 西村春久: 振動法によるケーブル張力の実用算定式について, 土木学会論文集, 第 294 号, pp.25-32, 1980.2
- 4) 滝澤一郎, 和田 新, 田口絢子, 真継章夫: 大師 PC 橋の耐力点検報告, 第 12 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.157-160, 2003.10
- 5) 野島昭二, 會澤信一, 佐藤正明, 吉田光秀: 外ケーブル補強に関する補強効果の経時的検証, 第 13 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.461-466, 2004.10
- 6) 渡辺 遼, 清水宏一郎, 山本 将, 石田雅博: 損傷を有する PC 桁の外ケーブル補強効果に関する研究, 第 28 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.605-610, 2019.11
- 7) 北野勇一, 三本竜彦, 山本 将, 石田雅博: 既設 PC 橋の補強材として 21 年使用された外ケーブルの解体調査, 第 28 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.579-582, 2019.11
- 8) 上田隆雄, 溝口 茂, 芦田公伸, 宮川豊章: 塩水を噴霧した PC 鋼材の応力腐食挙動, コンクリート工学年次論文集 Vol.22, No.1, pp.109-114, 2000
- 9) 株式会社エスイー: 11 年使用後の外ケーブル (F100T) の調査報告書, 1999.12
- 10) 小野塚豊昭, 北野勇一, 藤原保久, 村井弘恭: 撤去 PC 桁を用いた外ケーブル補強工法定着部の載荷試験, 第 28 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.611-614, 2019.11
- 11) プレストレスト・コンクリート建設業協会: 外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル (案) [改訂版], 2007.4
- 12) 浅井 洋, 長田光司, 野島昭二, 藤原保久, 池田尚治: 外ケーブル補強工法定着部に関する検討, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.2, pp.223-234, 2007.4

[2020 年 2 月 13 日受付]