

損傷を有するPC桁の外ケーブル補強効果に関する研究

八千代エンジニアリング(株)(前:(国研)土木研究所)
 (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員
 (国研)土木研究所構造物メンテナンス研究センター
 (国研)土木研究所構造物メンテナンス研究センター

○渡辺 遼
 清水 宏一郎
 山本 将
 石田 雅博

Abstract : External cable method is a general method to reinforce damaged PC bridges. However, the reinforcing effect of External cable is confirmed by loading tests using non-damaged girder. The reinforcing effect for PC girder which is damaged in real situation is not confirmed. It is required to evaluate the performance of such PC girders and to establish repair reinforcement technology. Therefore, in this research, loading test was carried out with PC girder reinforced with external cable. As result of the test, load capacity and mechanical behaviors are restored to the initial level of construction due to external cable reinforcement.

Key words : PC bridges , External cable , Reinforcing effect , Loading test

1. はじめに

高度経済成長期に集中的に整備された橋梁が一斉に高齢化を迎える中、さまざまな劣化要因による損傷事例が報告され、そうした既設PC橋の性能評価法および補修補強技術の確立が求められている。既設PC橋の補強工法のなかで外ケーブル工法は補強効果が力学的に明確で、事例も多く、確立した工法の一つとして評価されている¹⁾。本研究では、既設PC橋から外ケーブル補強された撤去PC桁を入手し、外ケーブル補強効果を定量的に把握することを目的に載荷試験を実施した。また、既往研究を含め外ケーブル工法の補強効果が確実に発揮可能な限界について考察した。

2. 実験概要

2. 1 撤去PC桁の概要

対象橋梁は1962年に海岸から約70mの河口上に建設された3連のPC単純T桁橋である。本橋は、1976年より塩害補修が着手され、そののち、既設PC鋼材の破断が点検で確認され、1996年に外ケーブル補強が行われた。2017年には新橋建設に伴い撤去されることになり、外ケーブル補強された第3径間G4桁を譲り受けた(写真-1, 2)。

2. 2 載荷試験方法

載荷概要図を図-1に示す。試験は支間20.5m、載荷点距離1.5mの2点曲げ載荷とした。載荷パターンを図-2に示す。本研究では外ケーブル補強効果を確認するため、無補強時と補強時に分けて試験を行った。無補強時は外ケーブルを緊張しない状態でひび割れ発生まで載荷し(荷重①)、一度除荷し、ひび割れに π ゲージを取り付けたのち、ひび割れが再度開口するまで載荷を行った(荷重②)。再度除荷し、外ケーブルを用



写真-1 橋梁全景



写真-2 外ケーブル設置状況

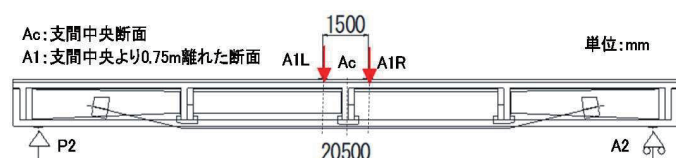


図-1 載荷概要図

いて所要の緊張力 (203kN) を導入した状態を補強時とし、この状態でひび割れが再度開口するまで載荷した (荷重③)。この荷重③から荷重②を差引いた値がひび割れ開口に対する外ケーブルの補強効果となる。そのうち、既設PC鋼材の降伏 (荷重④)、設計上の耐力 (荷重⑤) に十分に達した時点で除荷し最後は破壊 (荷重⑥) まで載荷した。

試験中は、荷重、変位、外ケーブル張力、コンクリートおよび鋼材ひずみ、ひび割れ幅を測定した。測定の原点は無補強時の載荷前とした。

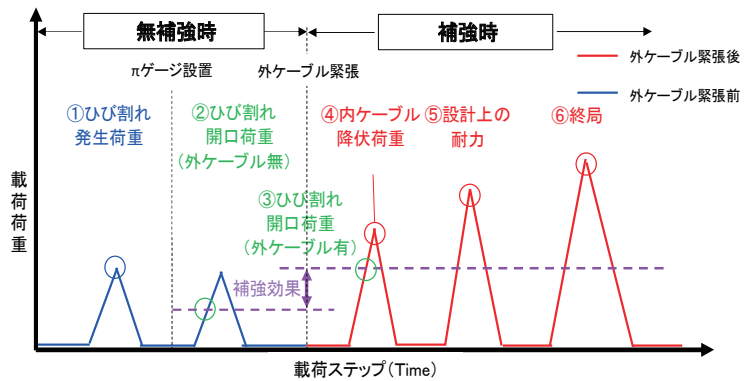


図-2 載荷パターン

2. 3 解体調査

設計図書が存在しなかったため、載荷試験後に解体調査を実施し、撤去PC桁の損傷状況や断面形状、材料物性を把握した。なお、既設PC鋼材は腐食状況に応じ、腐食が確認されない場合若しくは薄錆が全面にあるがブラシで磨くと地鉄がでるものを「健全」、PC鋼材の径が小さくなっているものを「劣化」と評価した²⁾。

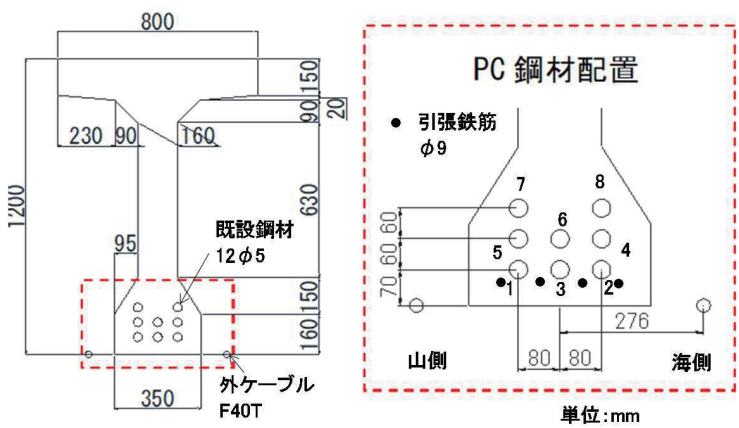


図-3 撤去PC桁の断面図 (支間中央)

3. 実験結果と補強効果に関する考察

3. 1 解体調査結果

解体調査より復元した撤去PC桁の断面図を図-3に示す。既設PC鋼材12φ5mmが8本配置され、1996年の補強前には4番と8番の既設PC鋼材2本 (25%) が破断していたとの記録があった。なお、上フランジ幅は運搬上の制約よ

表-1 PC鋼材の諸元

種類	断面積 (mm ²)	PC鋼材の状況	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏点強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
既設PC鋼材 12φ5	235.5	健全	209	1490	1740	2.6
		劣化	202	-	1312	0.7
		設計値	200	1470	1710	-
外ケーブル F40T	208.4	健全	191	1862	1953	6.0
		設計値	190	1580	1850	-

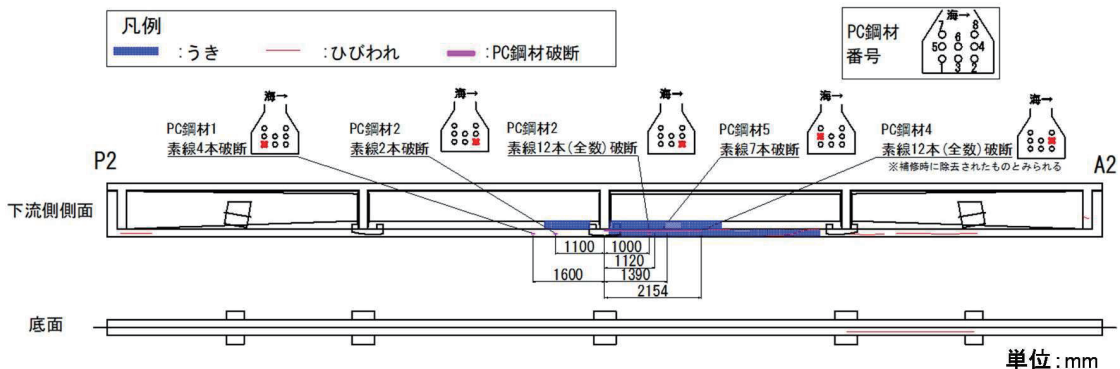


図-4 撤去PC桁の損傷状況

表-2 現状再現設計の結果

状況	PC鋼材 破断率 (%)	下縁応力度 (N/mm ²)			
		自重	既設 鋼材	外ケ ブル	合計
建設時	0	-5.3	14.8	—	9.5
無補強時	25	-5.3	11.3	—	6.0
補強時	25	-5.3	11.3	4.3	10.3

り当初1200mmから800mmに縮めた。

撤去PC桁より採取した既設PC鋼材12φ5および外ケーブルF40Tの引張試験結果を表-1に示す。健全なPC鋼材は設計値を上回る強度を有するのに対し、劣化が確認されたPC鋼材は降伏に至る前に破断し、設計値に対し引張強度が77%に低下することが確認された。なお、本橋は場所打ちPC桁であり、コアの圧縮強度の平均が60.7N/mm²であったためコンクリートの設計強度は40N/mm²と推定した。

撤去PC桁の損傷状況を図-4に示す。外観上、下流側（海側）の桁側面にコンクリートのうきやひび割れが広範囲に見られた。実際に解体調査を行った所、支間中央からA2側に1.0m離れた位置で既設PC鋼材が最大2本破断していた。

上記の調査結果に基づき試験時の現況再現設計を行った結果を表-2に示す。既設PC鋼材の有効プレストレスは806N/mm²（1996年の補強設計による）とし、既設PC鋼材2本が破断した場合でも建設時の耐力を有するように外ケーブルF40Tを2本配置し、初期緊張力973N/mm²（203kN）を導入した。

3. 2 ひび割れ開口荷重と曲げ破壊荷重

荷重変位関係の低荷重域を図-5に示す。無補強時の1回目の載荷では、載荷荷重240kN付近で屈曲し、初期ひび割れ発生により桁剛性が低下したと推察される。2回目の載荷は、1回目より屈曲時の荷重が低下し、ひび割れ幅（図-6）と合わせ、無補強時のひび割れ開口荷重を121kNと判断した。

終局までの荷重変位関係を図-7に示す。ひび割れ幅が最初に屈曲した載荷荷重203kNをひび割れ開口荷重と判断した。そのうち、350kN（a点）において変位が急増し、545kN（b点）付近で荷重が増加しなくなり、変位210mmに達した時点（c点）で載荷点間の上縁コンクリートに圧壊が生じ、荷重が降下して曲げ破壊に至ったと判断した。

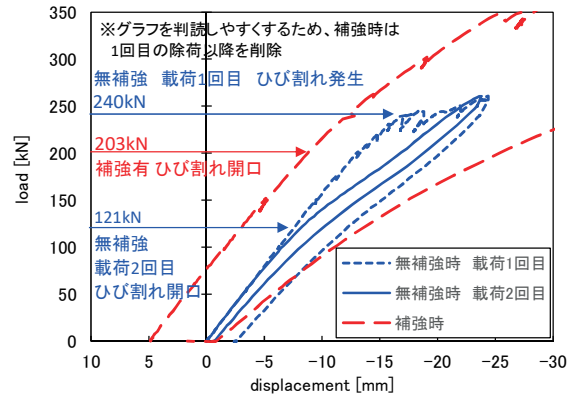


図-5 荷重-支間中央変位（低荷重時）

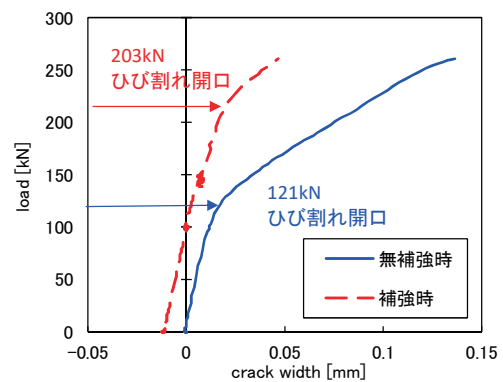


図-6 荷重-ひび割れ幅（Ac断面）

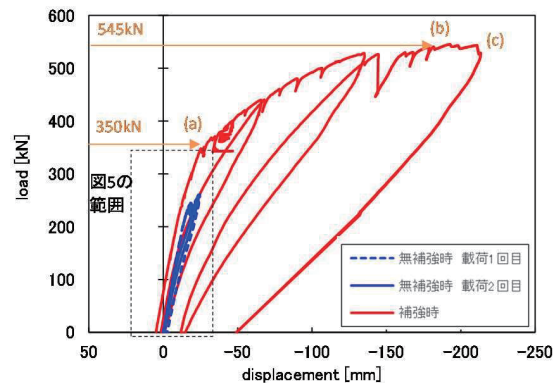


図-7 荷重-支間中央変位（補強時）

表-3 ひび割れ開口および曲げ破壊荷重

	建設時	無補強時	補強時
PC鋼材破断率 (%)	0%	25%	25%
ひび割れ開口 (kN)	実験値	—	121
	設計値	183	193
	実/設	—	1.06
曲げ破壊 (kN)	実験値	—	546
	設計値	553	540
	実/設	—	1.01

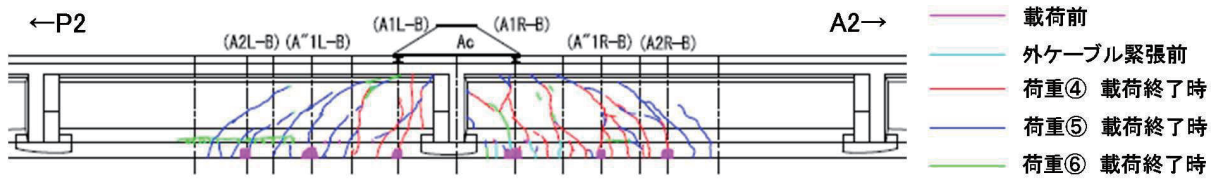


図-8 ひび割れ発生状況

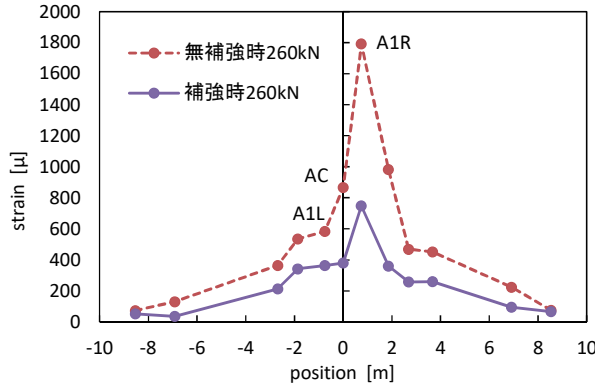


図-9 引張鉄筋のひずみ分布

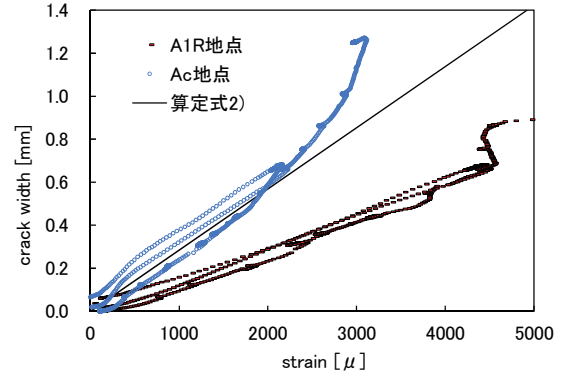


図-10 引張鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

3. 3 外ケーブル補強効果について

ひび割れ開口および曲げ破壊荷重の実験値と、文献1)に基づき算出した設計値を表-3に示す。表より、今回試験を行った撤去PC桁のひび割れ開口耐力および曲げ破壊耐力を外ケーブル補強により増加させ、建設時と同等の耐力まで補強できることが確認された。

3. 4 ひび割れ性状

載荷試験中のひび割れ発生状況を図-8に示す。ひび割れの発生は、無補強時260kNおよび補強時の既設PC鋼材の降伏時440kNまでA1R地点（既設PC鋼材が2本破断している付近）を中心にA2側に偏在した。しかし、既設PC鋼材の降伏以降に関しては載荷点を中心に概ね均等にひび割れが発生した。

無補強時および補強時の260kN載荷時の引張鉄筋ひずみ分布を図-9に示す。A1R地点で引張鉄筋ひずみが突出することがわかる。なお、補強時の引張鉄筋ひずみは無補強に比べて突出の程度が低減した。

A1R地点およびAc地点の引張鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係を図-10に示す。図には式(1)より求まる曲げひび割れ幅の算定値³⁾を併記した。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (1)$$

ここに、 k_1, k_2, k_3 : 各係数、 c : かぶり (=45.5mm)、 c_s : 鋼材の中心間隔 (=70mm)、 ϕ : 鋼材の径 (=9mm)、 σ_{se} : 鋼材位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)、 E_s : 鉄筋の弾性係数 (N/mm²)、 ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等を考慮するための数値 (=0)。

ひび割れ幅0.6mm程度までは両地点とも引張鉄筋ひずみと概ね線形関係にあり、Ac地点では引張鉄筋ひずみが2000 μ 程度（丸鋼の降伏ひずみ以上）まで既往の曲げひび割れ算定式に近似した。ひび割れ幅はひび割れ間の平均ひずみに比例するため、PC鋼材の破断により局部的に引張鉄筋ひずみが卓越したAc地点では算定式がひび割れ幅を過大に見積もったものと推察される。

以上より、今回試験を行った撤去PC桁では引張鉄筋の応力が局部的に卓越し、初期ひび割れが偏在したが、外ケーブル補強後はひび割れが分散し、引張鉄筋が降伏するまで既往の算定式により曲げひび割れ幅を評価できることが確認された。

3. 5 PC鋼材ひずみ

支間中央の既設PC鋼材ひずみを図-11に示す。既設PC鋼材ひずみは載荷荷重350kN付近のa点で屈曲し、この時点で降伏したと推測される。しかし、a点のひずみは約5000 μ であり、健全なPC鋼材の第一降伏点ひずみや劣化したPC鋼材の破断ひずみよりも小さい。つまり、a点は他の部位(前述のA1R地点)で既設PC鋼材が第一降伏を超過したと推察される。また、載荷荷重545kNとなる図中のb点ではひずみが10000 μ を超えることから、PC鋼材の第二降伏に至り、荷重が頭打ちになったと推察される。

外ケーブルの荷重-ひずみ関係を図-12に示す。外ケーブルひずみは最大荷重時でも約7000 μ であり、第一降伏ひずみ(8600 μ)に至っていない。なお、実験における外ケーブルの張力増加量 $\Delta\sigma_p$ は490N/mm²であり、式(2)より算定される外ケーブルの張力増加量³⁾の429N/mm²以上であった。

$$\Delta\sigma_p = k \cdot dp/L < \Delta\sigma_{pmax} \quad (2)$$

ここに、 L : 外ケーブルの定着間距離(=16770mm)、 dp : 外ケーブルの有効高さ(=1200mm)、 k : 単純桁の場合、6000(N/mm²)、 $\Delta\sigma_{pmax}$: 構造別、ケーブル種別毎に設定される限界値で単純桁の場合は、 $\sigma_{py} - \sigma_{pe}$ (N/mm²)。

以上より、今回試験した撤去PC桁を外ケーブル補強した場合は、既設PC鋼材が降伏するまでに破壊に至らないこと、補強後の曲げ耐力は既往の算定式により算出した外ケーブルの張力増加量を用いて評価できることが確認された。

4. 外ケーブル工法の補強効果が確実に発揮可能な限界に関する考察

載荷試験にて得られた引張鉄筋ひずみから実応力を算定した結果を図-13に示す。図には既設PC鋼材が2本破断した際のRC計算と全断面有効として計算したコンクリート引張応力(σ_c)をすべて引張鉄筋に受け持たせた場合の計算値(PC計算)を合わせて示した。A1R地点の引張鉄筋は補強前に降伏応力を受けたものの、補強後の荷重応力関係はRC計算と概ね一致し、PC計算は安全側の設計値を与えることが確認された。

表-4は本研究および既往研究^{4)~6)}を含め、外

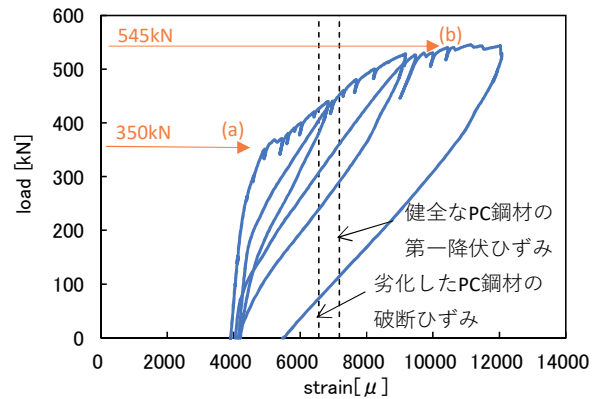


図-11 荷重-既設鋼材ひずみ (支間中央)

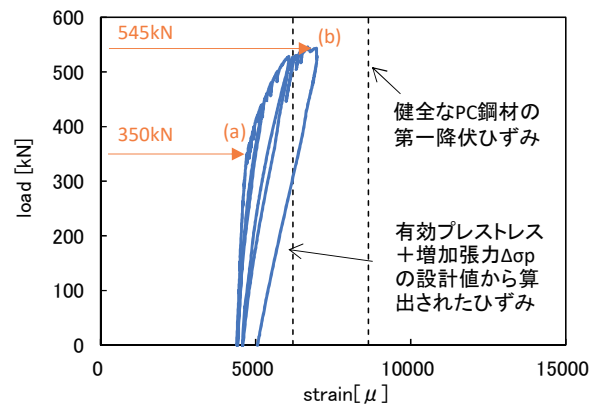


図-12 荷重-外ケーブルひずみ (支間中央)

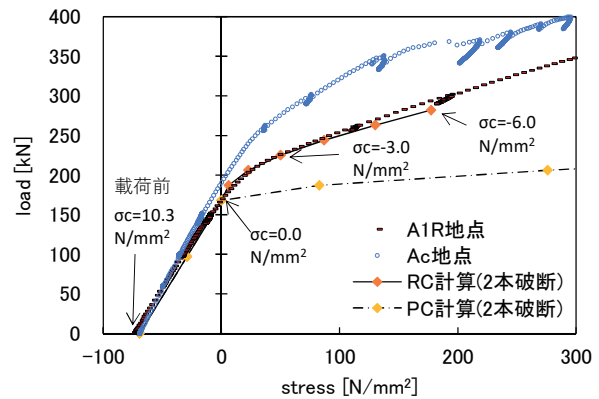


図-13 荷重-引張鉄筋応力 (補強時)

表-4 外ケーブル工法による曲げ耐力回復度

	PC鋼材 破断率 (%)	(A) 載荷試 験の最大 荷重 (kN)	(B) 建設時 曲げ破壊 荷重 (kN)	曲げ耐 力比 A/B
本研究	25	546	552	1.01
文献4	25	919	962	0.96
文献5	29	430	385	1.12
文献6	65	492	1450	0.34

ケーブル工法による曲げ耐力回復度を整理した結果である。本研究を含めPC鋼材破断率が25～29%の範囲であれば建設時と同等の耐力まで補強可能であることが確認された。

なお、外ケーブル工法の補強効果が確実に発揮可能な限界は、PC鋼材の破断だけでなく、これに伴う主桁コンクリートの損傷にも影響を受ける。具体的には、PC鋼材の破断本数の増加に応じて主桁コンクリートのうきや剥離といった損傷範囲が拡大し、この損傷部分はPC部材として有効断面でなくなるため、断面修復と追加プレストレスが必要になるが、一般的なPC桁の場合、修復可能な範囲はオーバープレストレスを回避する観点よりPC鋼材2段分のかぶり程度までとされる²⁾。たとえば、今回の撤去PC桁で言えば既設PC鋼材2段目は桁下縁より130mmであり、桁高1200mmの約1割の桁下断面が著しく損傷した場合には健全時と同じ主桁断面に修復したとしても健全時と同レベルの荷重に抵抗させることが困難になる可能性がある。

5. まとめ

本研究を通じ、次の知見が得られた。

- (1) 今回試験を行った撤去PC桁の外ケーブル工法による補強効果に関し、ひび割れ開口耐力および曲げ破壊耐力を増加させること、ひび割れを分散させ引張鉄筋が降伏するまで既往の算定式により曲げひび割れ幅を評価できること、既設PC鋼材が降伏するまでに破壊に至らず補強後の曲げ耐力が既往の算定式により算出した外ケーブルの張力増加量を用いて評価できることを確認した。
- (2) 外ケーブル工法の補強効果が確実に発揮可能な限界に関し、引張鉄筋が補強前に受ける応力履歴が降伏応力までであれば補強後の荷重応力関係はRC計算と概ね一致し、かつ、全断面有効のPC計算は安全側の設計値を与えること、PC鋼材破断率が25～29%の範囲であれば建設時と同等の耐力まで補強可能であることを確認した。

謝辞：本研究は、土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究の一環として行われた。また、試験を行うにあたり、多くの方のご協力を頂いた。ご協力を頂いた関係各位に対し、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 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（〔改訂版〕，2007.4）
- 2) プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き（案）〔断面修復工法〕，2009.9
- 3) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書設計編，pp. 231-234，2018.3
- 4) 蒲和也，増井隆，秋元泰輔：44年供用したPC桁の載荷試験報告（その2），第22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. 239-242，2014.10
- 5) 中村定明，濱田譲，谷口秀明，中村雅之：PC橋の改造技術に関する研究—その3：PC部材のはつりの適切性に関する研究—，プレストレストコンクリート，Vol. 50，No. 1，pp. 54-60，2008.1
- 6) 土木研究所：塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究，土木研究所資料第3816号，2001.3