

非破壊調査による既設PC橋の性能評価に関する検討

(一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○櫻井 義之
 (一社) プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 國富 康志
 (国研) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 山本 将
 (国研) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター 大島 義信

Abstract : There is a need to establish a performance evaluation method and repair and structural improvement technology for damaged PC bridges due to various deterioration factors. In this research, the inspection accuracy of non-destructive testing was verified by destructive testing for the dismantled PC girder. In addition, various uncertainties were quantified through the testing and partial safety factors for bearing capacity against bending moment were also estimated.

Key words : Non-destructive testing, Residual prestress, Prestressing steel fracture

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橋の性能評価は、健全な状態であれば建設時の耐力を保つものとし、設計図書をそのまま用いる方法や、復元設計を行う方法がある。一方、劣化が顕在化した状態では構造物の耐力が経時的に低下すると考え、材料劣化やプレストレス減少などを考慮した現況再現設計を行うこととなる(図-1)。ところが、劣化が顕在化した実構造物における材料劣化やプレストレス減少などを精度良く把握する非破壊調査技術は十分に確立されていない。しかも構造物の内部で進行する不均一な劣化状況をすべて詳細に把握することは難しい。こうした状況をふまえると、劣化が顕在化した既設PC橋の現有耐力は、大きな変動を考慮せざるを得ない。

そこで本研究では、劣化が顕在化した撤去PC桁を対象に非破壊調査の適用性について検証した(2章)。また、各種要因が既設PC橋の耐力に与える影響について考察した(3章)。

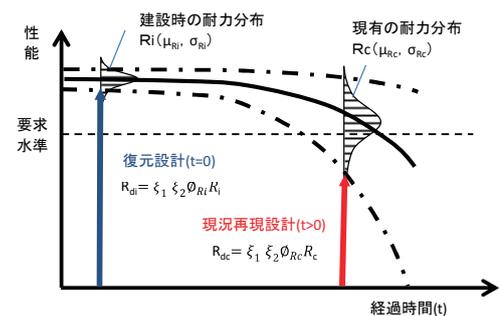


図-1 構造物の経時的な性能変化の模式

2. 劣化が顕在化したPC橋への非破壊調査の適用性

2. 1 調査概要

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(写真-1)。本橋は、1976年より塩害補修が着手され、その後既設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。

PC桁の耐力評価にもっとも重要な情報は、残存プレストレス、PC鋼材破断位置、そして、グラウトの有無(平面保持の有無)の3つである。各情報を知るための非破



写真-1 橋梁全景

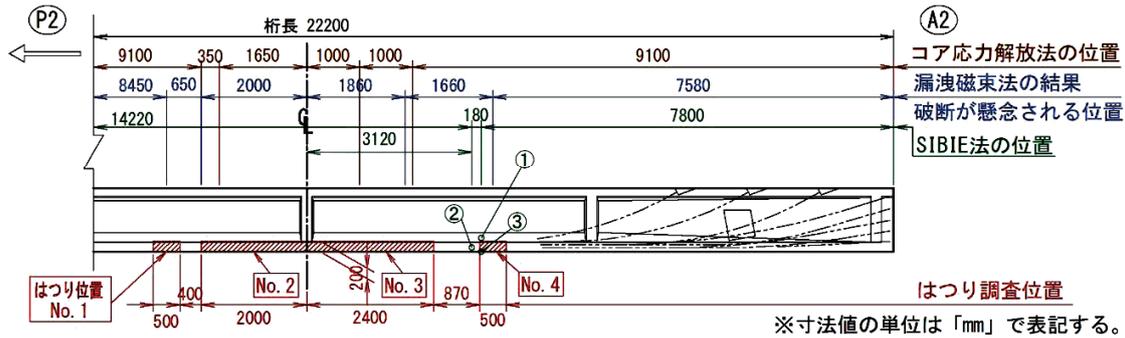


図-2 非破壊調査および破壊調査の実施箇所

壊調査手法は多数提案されているものの、本研究では劣化が顕在化した既設PC橋の曲げ耐力を評価することを目的に図-2に示す手法を適用した。各手法の詳細は次節以降に示すが、いずれの手法も表面被覆および断面修復による補修が実施されかつ再劣化によりひび割れや浮きが発生し内部鋼材12φ5の損傷が懸念された海側面かつ支間中央よりA2側の下フランジに適用した。

また、はつりなどの破壊調査および現況再現設計を実施して、非破壊調査の推定精度を検証した。破壊調査の結果を表-1に示す。

2.2 残存プレストレス (コア応力解放法)

図-3にコア応力解放法¹⁾の調査概要を示す。本手法は、コンクリート表面に応力方向(x方向)および直角方向(y方向)にひずみゲージを貼り、コア切込み前後のひずみをそれぞれ計測する。乾燥収縮の内外拘束などの影響をキャンセルする目的で、応力推定には2方向のひずみ差を利用する。また、乾燥収縮、クリープおよびこれらに起因する鋼材拘束ひずみといった時間依存ひずみを考慮した提案式から有効応力を算出する。

調査状況を写真-2、調査結果を表-2に示す。PC鋼材の破断・損傷本数は、素線の破断本数を考慮した「破断本数」と、素線の破断がある場合に1本と数える「損傷本数」に区別した。たとえば、12φ5の素線が6本破断していた場合、「破断本数」は0.5本、「損傷本数」は1本と表記している。

調査は断面修復部を避けた既設桁下面のP2側とA2側それぞれ2箇所ずつ測定し、その平均値を用いた。この結果より、コア応力解放法の計測結果はプレストレス残存量を概ね10%程度以内で推定できることが確認された。

表-1 破壊調査結果 (PC 鋼材破断本数)

破断位置	支間中央からの距離(mm) *1			
	-1600	-1100	+1000	+1225
素線の破断本数	4本	2本	12本	7本
はつり位置	No. 2		No. 3*2	

*1 P2側(-), A2側(+)として表記した。

*2 はつり No. 3 では上記以外に1本のPC鋼材が消失

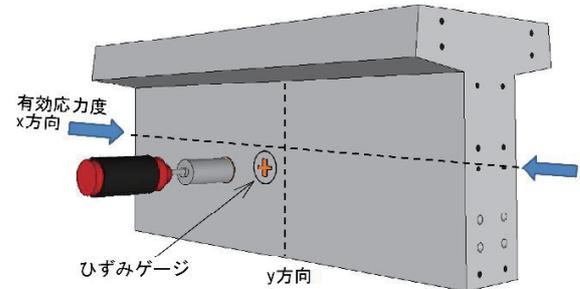


図-3 コア応力解放法の調査概要



写真-2 コア応力解放法の調査状況

表-2 残存プレストレスの調査結果

調査位置	破壊調査		非破壊調査	
	PC 鋼材 破断本数 (損傷本数)	設計値 (応力度) N/mm ²	計測値 (応力度) N/mm ²	設計値との 比較
No. 2	0.5本 (2本)	13.9 (11.3)	10.9	78 % (96 %)
No. 3	2.6本 (3本)	10.3 (9.6)	8.5	82 % (89 %)

※PC鋼材は12φ5の1束を1本「シース1本分」と示す。

※破断本数と損傷本数について

上段：破断本数：素線の破断数を考慮。

下段：損傷本数：素線の破断があれば1本と表記。()内。

※No.3は消失していたPC鋼材1本も含む本数。

2.3 PC鋼材の破断位置 (漏洩磁束法)

漏洩磁束法²⁾は、PC鋼材が強磁性体であることを利用し、コンクリート表面からPC鋼材を磁石により磁化し、磁化されたPC鋼材による残留磁束密度を測定することにより、鋼材破断の有無や破断位置を検知する(図-4)。

漏洩磁束法の調査状況を写真-3、PC鋼材破断位置の調査結果を表-3に示す。なお、本手法ではPC鋼材の破断状況を計測波形から判断するため、波形ピーク値の差が大きく変化するほど素線破断が多くなる傾向にあることは確認できるが、素線本数まで把握することは困難である。そのため、波形ピーク値が小さく素線破断であると判断される場合でもPC鋼材1本(12φ5の1束全て)の破断とし、表-2と同様に損傷本数として示した。表より、部材の耐荷力評価に重要となる支間中央付近(No.2およびNo.3)に注目すると、破壊調査と本手法は同様の結果が得られた。また、今回の計測結果においてピーク差に着目すると、No.1のピーク値の差が45μTでは、破壊調査によるPC鋼材の破断は確認されなかった。したがって、今回の計測ではピーク差120μT以上であれば、破断位置を概ね推定できる結果であった。

なお、主桁内部の中央2段目のPC鋼材と補修時に消失したPC鋼材の破断は、本手法で評価することはできなかった。

2.4 グラウトの有無 (SIBIE法)

SIBIE法³⁾は、インパクトエコーの原理を利用し、反射波の周波数スペクトルを算定する。周波数スペクトルからSIBIE解析により図化してグラウト充填状況を判定する(図-5)。なお、本調査は一般に充填不足が生じやすい上縁定着ケーブルの曲上げ部となるウェブ側面などに対して実施されるが、今回は曲げ耐力に影響する部位への適用を目的とするため、PC鋼材が密に配置され、かつコンクリート断面形状が複雑な下フランジに敢えて適用した。

SIBIE法の調査状況と結果を写真-4、表-4に示す。破壊調査ではグラウト充填が確認されたが、非破壊検査では異なる判定結果となった。原因は、センサの位置がPC鋼材直上に一致しなかったこと(事前調査でPC鋼材の正確な位置出しが困難だった)、弾性波を利用する手法では内部の浮きや空洞の影響を受けること、下フランジでは入射する衝撃波の入射面と反射面が平行でないことが挙げられる。

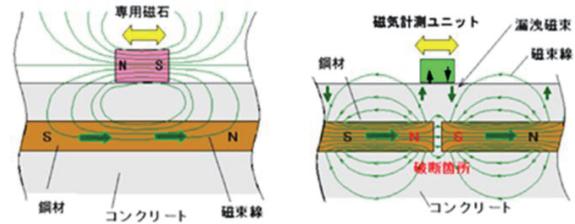


図-4 漏洩磁束法の調査概要



写真-3 漏洩磁束法の調査状況

表-3 PC鋼材破断位置の調査結果

調査位置	破壊調査	非破壊調査	
	損傷本数	推定破断本数	計測値 (ピーク値の差)
No.1	0本	1本	45 μT
No.2	2本	1本	120 μT
No.3	2本*	2本	255 μT (上段) 145 μT (中断)
No.4	0本	2本	110 μT (中段) 95 μT (下段)

※No.3で1本消失していたPC鋼材は、漏洩磁束法では消失を把握できないため、損傷本数に含んでいない。

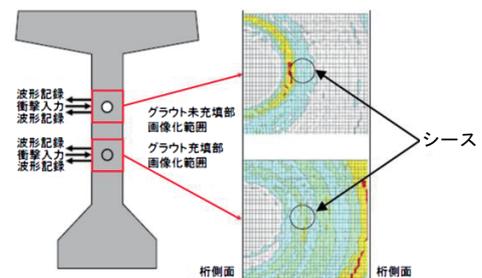


図-5 SIBIE法の調査概要



写真-4 SIBIE法の調査状況

表-4 SIBIE 法の調査結果

破壊調査	非破壊調査
PC 鋼材配置図 	①下フランジハンチ面 : 充填不良の可能性あり
	②下フランジ側面 : 未充填
	③下フランジ下面中央 : 判定困難

※調査位置：A2 側から 7800 (mm) 付近の断面

表-5 劣化 PC 橋への非破壊調査の適用性

項目	適用上の留意点	精度
残存プレストレス 例) コア応力解放法	断面修復部を避け PC 桁の支間中央 下面に適用する	残存プレ ストレス 10%程度
PC 鋼材破断位置 例) 漏洩磁束法	表面側の PC 鋼材 に適用する	PC 鋼材 1 本 の破断 (破 断率 12.5%)
グラウトの有無 例) SIBIE 法	PCT 桁の場合は ウェブに適用する	精度の判定 不可※

※形状が複雑な下フランジへ適用したため、本研究では精度が判定できるデータは得られなかった。

2.5 非破壊調査の適用性

表-5 は、今回実施した範囲において、非破壊調査の適用性を整理したものである。塩害により断面修復部のひび割れや浮きが発生し内部鋼材 12φ5 の損傷が懸念された PC 桁下フランジに各種非破壊調査を適用した結果、コア応力解放法は残存プレストレス、漏洩磁束法は PC 鋼材破断位置を精度良く捉えることがわかった。一方、SIBIE 法は PC 鋼材が密に配置されかつコンクリート断面形状が複雑な部位への適用については困難であった。グラウトの有無に関しては、SIBIE 法を含め弾性波を利用する方法では測定条件が整うことが適用の前提条件になると考えられる。つまり、現時点の技術では劣化損傷が少なく、版厚が一定であるウェブに適用し、間接的に支間中央の下フランジ部のグラウトの有無を判定するのがよいと考える。

表-6 PC 鋼材の状況の分類

分類	グラウト充填状況	備考
腐食度1	薄錆があるがブラシで磨くと地鉄がでる	健全
腐食度2	錆が全面にあり、点状の錆が目立つ	材料劣化あり
腐食度3	錆が全面にあり、ブラシで磨くと断面欠損が目立つ	
腐食度4	PC鋼材の径が小さくなっている	破断とみなす

※文献 4 に加筆修正。

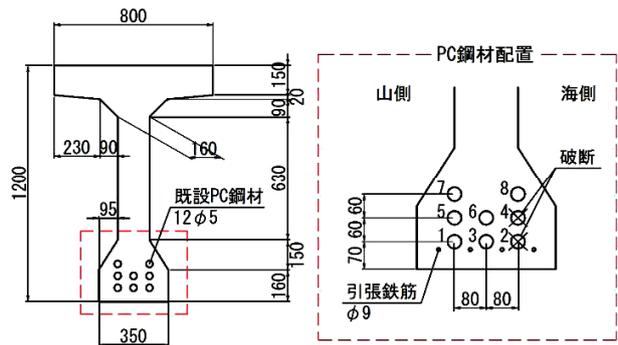


図-6 撤去PC桁の断面図 (支間中央)

3. 各種要因が既設PC橋の耐力に与える影響

3.1 各種要因の不確かさについて

撤去桁の断面形状、損傷状況および材料物性を把握するため解体調査を実施した。φ75mmのコアコンクリートをウェブおよび上フランジより10本ずつ、PC鋼材は表-6に示す分類ごとに5本以上を採取し、強度試験を実施した。

解体調査より復元した撤去桁断面を図-6に示す。PC鋼材12φ5mmが8本配置され、同一断面では最大2本(2番と4番)破断していた。材料試験結果を表-7に示す。コンクリートの圧縮強度、ヤング係数および腐食度1~2のPC鋼材の引張強度は、設計値と同等以上であった。一方、腐食度3~4のPC鋼材は破断付近から採取したものであり、その引張強度は設計値を下回り、変動係数も大きくなることが確認された。なお、腐食度2の引張強度が腐食度1より大きな値を示しているが、この原因は、腐食度の分類を目視で仕分けたため、引張強度において、ばらつきが生じたと考えられる。

表-7 材料試験結果

項目	設計値 (N/mm ²)	中央値 μ (N/mm ²)	変動係数 δ	
圧縮強度 f _c	40	60.7	9%	
ヤング係数 E _c	31000	33900	9%	
PC鋼材 引張強度 f _{pu}	1715	腐食度1	1740	2%
		腐食度2	1844	4%
		腐食度3	1620	7%
		腐食度4	1312	16%

※変動係数は正規分布を仮定して算出した。

グラウトは概ね充填されていたものの(写真-5), 非破壊調査による把握が困難であった。また, グラウト充填状況はPC橋の架設年代, PC鋼材の種類(容量)および定着位置の影響を受けるため⁵⁾, その不確かさを算出するには条件を一致させる必要がある。そこで, グラウト技術が未熟であった1990年以前の撤去PC桁に限定し, グラウト充填不足の割合を整理した(表-8)。その結果, 中央値で6.3%, 変動係数で5%と算出された。非超過確率5%に相当するグラウト充填不足の割合は13.4%であり, 今回の撤去桁(PC鋼材8本)では1本強(8本×13.4%)に相当する。



写真-5 グラウト充填状況(撤去PC桁)

3.2 各要因の影響評価

上記の情報をもとに, 各要因が撤去PC桁の曲げ破壊耐力に与える影響を試算した結果を図-7に示す。図中の曲げ耐力比100%は設計値を入力した場合であり, プロットは中央値 μ , 非超過確率5%を示した。ただし, 鋼材破断は0~2本, グラウトは未充填0~2本に変化させた。また, 曲げ耐力の算出にあたっては, 前者について破断本数分の断面積とプレストレスを低減し, 後者について断面剛性の算出時にグラウト未充填のPC鋼材を剛性に寄与しないものとし, さらに付着がない影響を考慮してその本数分の曲げ耐力を70%に低減した。なお, 70%の低減は道路橋示方書の付着がない場合の破壊抵抗曲げモーメントの算出方法を参考とした。

図-7のとおり, 圧縮強度, ヤング係数, PC鋼材引張強度の不確かさが既設PC橋の耐力に与える影響は曲げ耐力比で99~104%と算出された。一方, グラウト充填不足の曲げ耐力比は93%~100%となり, 鋼材破断は曲げ耐力比を大幅に低下させる結果になった。これは, PC桁の曲げ破壊耐力は同一の断面形状であればPC鋼材の容量(引張強度×本数)とグラウトによる付着一体性で概ね決定されるためである。

なお, PC鋼材の腐食に関しては顕著な箇所破断に至り, そうでない箇所では比較的健全であった。そのため, 今回の曲げ耐力の試算では腐食の影響は考慮しなかった。

3.3 設計に用いる部分係数の試算

平成29年道路橋示方書による部分係数の書式では, 曲げ耐力に対する係数として, 以下の3つの係数($\xi_1 \times \xi_2 \times \phi_R$)を想定している。

$$\sum S_i \leq \xi_1 \xi_2 \phi_R R \quad (1)$$

ここに, ξ_1 : 調査・解析係数(標準値0.90), ξ_2 : 部材・構造係数(曲げ耐力0.90),

ϕ_R : 抵抗係数(曲げ耐力0.80), R : 抵抗の特性値。

抵抗係数 ϕ_R : 既設部材の抵抗係数については, 新設と同様の耐力算出を行い, 新設の抵抗係数を用

表-8 グラウト充填不足の割合(撤去PC桁)

	建設年	調査箇所数	充填不足の箇所数	充填不足の割合
S橋	1965	342	20	5.8%
H橋	1972	145	9	6.2%
N橋	1967	185	1	0.5%
U橋	1961	45	7	15.6%
A1橋	1965	90	4	4.4%
A2橋	1988	41	4	9.8%
W橋	1978	312	18	5.8%
本橋	1962	41	1	2.4%

充填不足の割合: 中央値 $\mu = 6.3\%$, 変動係数 $\delta = 5\%$

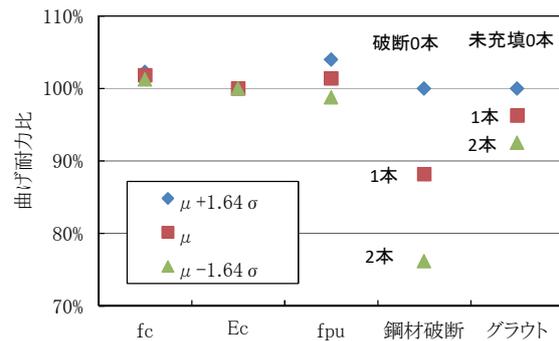


図-7 各要因が曲げ耐力に与える影響

いることが基本になる。ここでは、実際と想定との差異を表現する一つの方法として、それぞれの要因の差異をばらつきとして累積し抵抗係数として与えた場合について、簡単な試算を行う。各要因による曲げ耐力の変動係数 δ_i と、全ての要因を考慮した変動係数 δ_c との関係は式(2)で与えられる。

$$\delta_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2} \quad (2)$$

たとえば、今回の撤去桁について鋼材破断2本 ($\delta_i=24\%$) とグラウト充填不足2本 ($\delta_i=7\%$) のケースでは $\delta_c=25\%$ の耐力変動と見込まれ、抵抗係数は $\phi_R=1-1.64 \times 0.25=0.59$ と算出される。

調査・解析係数 ξ_1 ：調査・解析係数は、モデルと実物との相違に起因する不確実性を見込む係数であることから、基本的に設計と同じ $\xi_1=0.90$ を見込む必要がある。

部材・構造係数 ξ_2 ：今回の撤去桁については健全なPC桁と同様の曲げ挙動を示すことを別途載荷試験により確認している。しかし、PC鋼材の腐食が顕著になると、伸びが小さくなり、脆性的な破壊に至る可能性がある⁴⁾。また、定着部の破壊やPC鋼材に沿ったひび割れによりPC鋼材の付着低下が顕在化するなど構造計算の前提が成立しない場合は想定外の破壊形態となることも予想され^{たとえば6)}、 ξ_2 を適切に設定し直す必要がある。今後、上記についても非破壊調査が可能になることが望まれる。

4. まとめ

劣化が顕在化した撤去PC桁を対象に非破壊調査による既設PC橋の性能評価に関する検討を実施した結果、次の知見が得られた。

- (1) 塩害により断面修復部のひび割れや浮きが発生し内部鋼材12φ5の損傷が懸念されたPC桁下フランジに各種非破壊調査を適用した結果、コア応力解放法は残存プレストレス、漏洩磁束法はPC鋼材破断位置を精度良く捉えることがわかった。一方、SIBIE法はPC鋼材が密に配置されかつコンクリート断面形状が複雑な部位への適用が困難であった。
- (2) 圧縮強度、ヤング係数、PC鋼材引張強度の不確かさが既設PC橋の耐力に与える影響は曲げ耐力比で99~104%と算出された。一方、グラウト充填不足の曲げ耐力比は93%~100%となり、鋼材破断は曲げ耐力比を大幅に低下させる結果になった。
- (3) 現在ある非破壊調査手法を組み合わせることで既設橋の評価においても新設橋の設計と同様の書式に沿って部分係数を設定できる可能性があることを示した。

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。調査・試験を行うにあたり、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) 二井谷教治, 渡瀬博, 阪田憲次, 綾野克紀: コンクリート部材の有効応力の推定手法に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.2, pp.27-37, 2009.5
- 2) 廣瀬誠, 青木圭一, 宮川豊章: 漏洩磁束法によるポストテンション実橋におけるPC鋼材破断調査, 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.467-470, 2014.10
- 3) 山田雅彦, 大津政康, 友田祐一, 徳光卓: 改良SIBIE法を用いた新設橋梁におけるPCグラウト充填度の評価, 第24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.365-370, 2015.10
- 4) プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC構造物の補修の手引き[断面修復工法], 2009
- 5) 土木研究所, 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橋の診断技術高度化に関する共同研究報告書—既設PC橋のグラウト充填状況に着目した解体調査—, 2016.3
- 6) 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広: PC鋼より線の局所的な腐食がPCはりの耐荷性状に及ぼす影響, 第21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.297-302, 2012.10