

既設 PC 橋の性能評価法に関する共同研究 — 既設 PC 橋の補修補強技術の高度化に関する研究 —

山本 将*¹・石田 雅博*²・北野 勇一*³・櫻井 義之*⁴

劣化が顕在化した既設 PC 橋の維持管理にあたっては、構造物の安全性を工学的に検証するため、PC 鋼材破断やプレストレスの減少などの劣化・損傷状態を調査により把握し、耐荷性能を評価することが望まれる。本研究では、既設 PC 橋の撤去桁を用いて非破壊・微破壊調査の適用性を検証した結果、残存プレストレスと PC 鋼材破断位置を精度良く推定できることを明らかにした。また、非破壊・微破壊調査により取得した情報を活用できるような既設 PC 橋の耐荷性能評価法について整理した。

キーワード：既設 PC 橋、耐荷性能評価、非破壊調査、微破壊調査

1. はじめに

プレストレストコンクリート（以下、PC）構造物は、緻密な高強度コンクリートを使用し、かつ、プレストレスを導入しひび割れを制御しているため、外部からの劣化因子侵入に対して高い抵抗性を有する。しかし、厳しい塩害環境や想定外の水分浸入などによる PC 鋼材の腐食・破断などの劣化・損傷が生じると耐荷性能が低下して重大な事象に至ることもある。

このように一部の構造物において安全性が損なわれた構造物群を適切に維持管理するためには、供用中である既設 PC 橋の劣化・損傷状態などを精度良く把握できる非破壊・微破壊調査技術を確立することが望まれる。また、非破壊・微破壊調査などで取得した情報を用い、既設 PC 橋の耐荷性能を工学的な信頼性を有し、かつ効率的に評価する方法も整理し、一般化することが望まれる。

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は、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の一環として、劣化・損傷を有する既設 PC 橋を対象に非破壊・微破壊調査の適用性を検証してきた。また、非破壊・微破壊調査などで取得した情報を活用できるような、既設 PC 橋の耐荷性能評価法について

整理した。

2. 非破壊・微破壊調査の適用性に関する検討

2.1 概要

調査対象橋梁（以下、本橋）は 1962 年に海岸から約 70 m の河口上に建設された 3 連のポストテンション方式 PC 単純 T 桁橋である。本橋においては、1976 年から塩害補修が実施されてきたが、のちに点検で PC 鋼材破断が確認されたため、1996 年に外ケーブル補強が行われた。2017 年の新橋建設に伴う撤去に合せて、外ケーブル補強された第 3 径間 G4 桁（以下、撤去桁）を受領した（写真 - 1、図 - 1）。



写真 - 1 調査対象橋梁全景（撤去前）



*¹ Susumu YAMAMOTO

(国研)土木研究所構造物
メンテナンス研究センター
主任研究員



*² Masahiro ISHIDA

(国研)土木研究所構造物
メンテナンス研究センター
上席研究員



*³ 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))



*⁴ Yoshiyuki SAKURAI

(一社)プレストレスト・
コンクリート建設業協会
(昭和コンクリート工業(株))

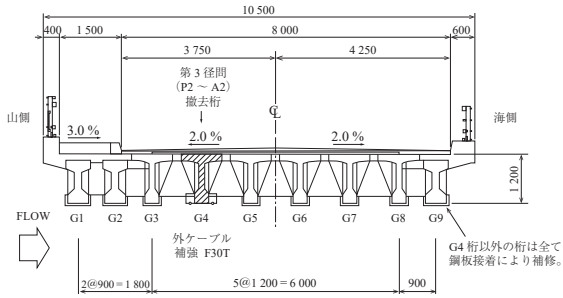


図 - 1 調査対象橋梁断面図

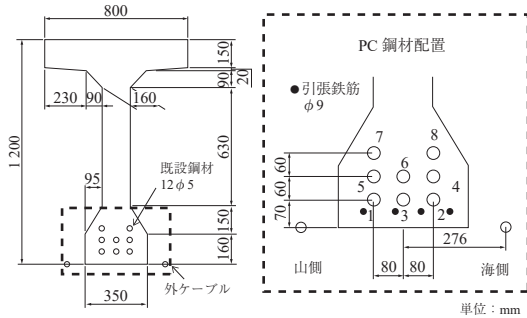
既設 PC 橋の耐荷性能評価に重要な情報として、PC の特徴から残存プレストレス、PC 鋼材破断位置、およびグラウトの有無（平面保持の仮定の是非）の 3 項目があげられる。各情報を取得するための非破壊・微破壊調査は多数提案されている。本研究では、劣化が顕在化した既設 PC 橋の曲げ耐荷性能評価に用いる情報取得を目的として、撤去桁を用いて以下に示す 3 種類の調査手法の適用性を検証した。

残存プレストレス：コア応力解放法¹⁾

PC 鋼材の破断位置：漏洩磁束法²⁾

グラウトの有無：SIBIE 法³⁾

検証に際して、撤去桁の解体調査を実施して復元図を作成し、非破壊・微破壊調査と照合して推定精度を整理した。復元図を図 - 2、非破壊・微破壊調査と解体調査位置を図 - 3、解体調査結果を表 - 1 に示す。解体調査により、調査位置 No.2 および No.3 にて素線の破断が確認された。なお、本章の内容は、共同研究での既報告⁴⁾をもとに再整理したものである。



(a) 断面全体 (b) 下フランジ部拡大

図 - 2 撤去桁復元図（支間中央断面）

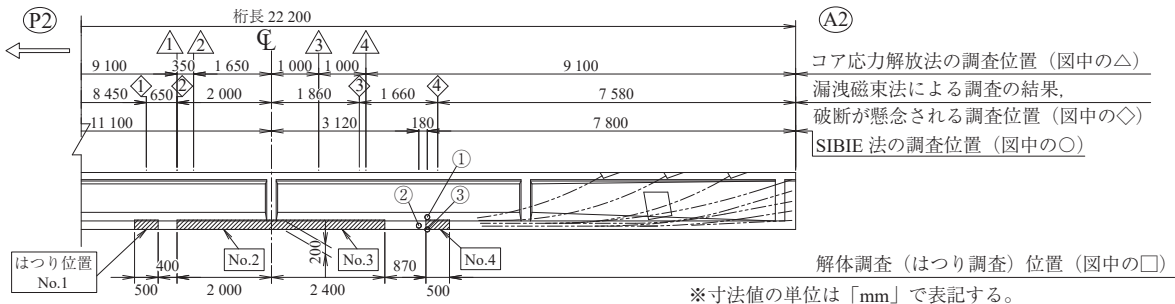


図 - 3 非破壊・微破壊調査と解体調査の調査位置

表 - 1 解体調査結果

項目	解体調査位置			
	支間中央からの距離 (mm) ^{※1}			
	-1 600	-1 100	+1 000	+1 225
PC 鋼材 12φ5 における素線φ5 の破断本数	4 本	2 本	12 本	7 本
解体調査位置	No.2		No.3 ^{※2}	

※1 P2 側を (-), A2 側を (+) として表記した。

※2 解体調査位置 No.3 では上記以外に 1 本の PC 鋼材が消失。

2.2 残存プレストレスの調査

図 - 4 にコア応力解放法の概要図を示す。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付け、コア切込み前と後のひずみを計測する手法である。乾燥収縮による内外拘束などの影響を打ち消す目的で、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などの時間依存ひずみを考慮した提案式からプレストレスによる応力を算出する。

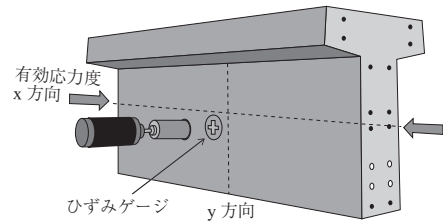


図 - 4 コア応力解放法の概要図¹⁾

調査状況を写真 - 2、結果を表 - 2 に示す。PC 鋼材の破断本数・損傷本数は、素線の破断本数の割合を考慮した「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 本とした。また、表 - 2 における応力度とは、コンクリートに生じる有効プレストレスによる応力を指す。



写真 - 2 コア応力解放法の調査状況

表 - 2 コア応力解放法による調査結果

位置 番号	解体調査		コア応力解放法による調査	
	PC 鋼材 破断本数*1. *2 (損傷本数)	設計値 (応力度) σ_{c1} N/mm ²	計測値 (応力度) σ_{c2} N/mm ²	設計値 との比較 $\sigma_{c2} / \sigma_{c1}$
1, 2	0.5 本 (2 本)	13.9 (11.3)	10.9	78 % (96 %)
3, 4 *3	2.6 本 (3 本)	10.3 (9.6)	8.5	82 % (89 %)

- ※1 PC 鋼材は 12φ5 の 1 束を 1 本「シース 1 本分」とした。
- ※2 破断本数と損傷本数については以下の定義とした。
上段：破断本数：素線の破断数を考慮。
下段（ ）内：損傷本数：素線の破断があれば、1 本と表記。
- ※3 解体調査位置 No.3 において消失していた PC 鋼材 1 本も含む本数とした。

調査は断面修復部以外の既設桁下フランジ下面 P2 側と A2 側でそれぞれ 2 箇所ずつ計測し、その平均値を計測値とした。コア応力解放法による残存プレストレス計測値は、設計値の 10% 程度以内で推定できることが確認された。

2.3 PC 鋼材の破断調査

漏洩磁束法は、PC 鋼材が磁性体であることを利用し、コンクリート表面から PC 鋼材を専用磁石により磁化し(図 - 5(a))、磁化された PC 鋼材による残留磁束密度を測定(図 - 5(b)) することにより、PC 鋼材の破断の有無およびその位置を検知する手法である。

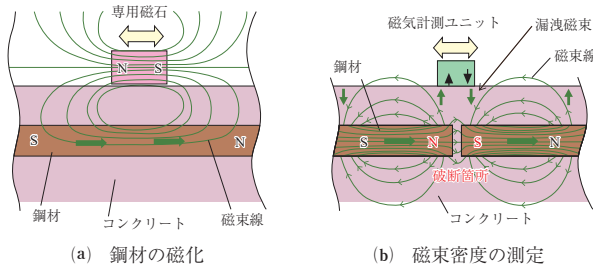


図 - 5 漏洩磁束法の概要図²⁾

漏洩磁束法の調査状況と結果を写真 - 3、表 - 3 に示す。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、波形ピーク値の差の大小により素線破断数の大小は推測できるが、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) の破断とし、表 - 2 と同様に損傷本数とした。



(a) 鋼材の磁化 (b) 磁束密度の測定

写真 - 3 漏洩磁束法の調査状況

表 - 3 漏洩磁束法による調査結果

位置 番号	解体調査	漏洩磁束法による調査	
	損傷本数	推定損傷 本数	計測値 (ピーク値の差)
1	0 本	1 本	45 μ T
2	2 本	1 本	120 μ T
3	2 本*	2 本	255 μ T (上段) 145 μ T (中段)
4	0 本	2 本	110 μ T (中段) 95 μ T (下段)

※解体調査位置 No.3 において 1 本消失していた PC 鋼材については、漏洩磁束法では消失は把握できないため、損傷本数に含んでいない。

調査結果より、支間中央付近 (位置番号 2 および 3) では、解体調査と本手法による PC 鋼材破断位置は同様の位置であることが確認された。ただし、位置番号 2 については、表 - 2 の位置番号 1 および 2 での PC 鋼材破断本数で示したとおり、素線の破断本数が少ない PC 鋼材が存在したことから、明確なピーク値の差が表れなかったと推測される。一方、計測結果におけるピーク値の差に着目すると、位置番号 1 の 45 μ T では解体調査による PC 鋼材の破断が確認されなかった。したがって、今回の計測では 120 μ T 以上のピーク差を破断とみなすことで、破断位置をおおむね推定できる結果となった。

2.4 グラウト充填調査

SIBIE 法は、インパクトエコー法の原理を利用して反射波の周波数スペクトルを算定し、SIBIE 解析により図化してグラウト充填状況を判定する手法である (図 - 6)。

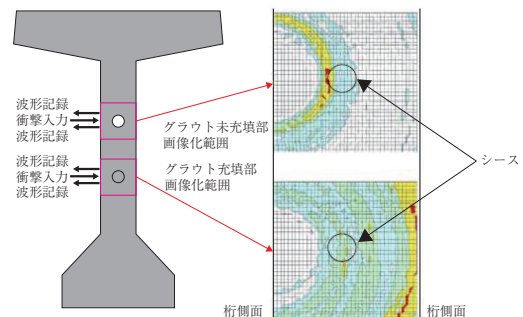


図 - 6 SIBIE 法の概要図³⁾

なお、本手法は充填不足が生じやすい上縁定着された PC 鋼材の曲げ上げ部となるウェブ側面などに適用されることが一般的であるが、今回の調査では曲げ耐荷性能への影響が大きい支間中央部への適用を目的として、PC 鋼材が密に配置されており、かつ断面形状が複雑である撤去桁下フランジ部を調査対象とした。

SIBIE 法の調査状況と結果を写真 - 4、表 - 4 に示す。解体調査ではグラウト充填が確認されたが、非破壊調査では異なる判定結果となった。要因としては、センサーの位置が PC 鋼材直上に一致しなかったこと、衝撃弾性波は内部の浮きや空洞の影響を受けること、下フランジでは衝撃弾性波の入射面と反射面が平行でないこと、およびシースが密に配置されていることがあげられる。



写真 - 4 SIBIE 法の調査状況

表 - 4 SIBIE 法による調査結果

解体調査	SIBIE 法による調査
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
グラウト充填状況: 全て充填	

※ SIBIE 法による調査位置は、A2 側から 7800 mm 付近の断面。

2.5 非破壊・微破壊調査の適用性

本研究における非破壊・微破壊調査の精度について解体調査と照合し整理した (表 - 5)。

表 - 5 非破壊・微破壊調査の精度

調査項目	調査手法	適用上の留意点	精度
残存プレストレス	コア応力解放法	断面修復部を避け、支間中央下面に適用する	10% 程度の誤差
PC 鋼材破断位置	漏洩磁束法	表面側の PC 鋼材に適用する	破断 1 本 (全数の 12.5%)
グラウト充填不足	SIBIE 法	T 桁下フランジには適用困難	-

残存プレストレスと PC 鋼材破断位置に関しては、10% 程度の誤差に収まるものの、グラウト充填不足については、PC 鋼材が密に配置され、かつ断面形状が複雑な PC 桁下フランジへの適用は困難であることが確認された。下フランジ部のグラウト充填状況を確認するには、ウェブ部のグラウト充填不足を確認して間接的に推測する方法や、削孔により直接目視するなど、ほかの手法を併用した調査が必要となる。

3. 既設 PC 橋の耐荷性能評価法の整理

3.1 概要

2 章では非破壊・微破壊調査が一定の条件のもとで有効であることを検証したが、調査から得られた情報を有効に活用してはじめて適切な維持管理を実施することができる。そのためには、取得した情報を橋の耐荷性能評価に取り入れる手順も合わせて整理する必要がある。このことを踏まえ、ポストテンション方式の既設 PC 桁を対象として、

補強設計 (要求性能に対し不足する耐荷性能を補強するための設計) を実施するために必要となる、当初の耐荷性能評価および現況の耐荷性能評価について整理する (各耐荷性能評価の定義については後述)。既設 PC 橋の耐荷性能評価フロー例を図 - 7 に示す。

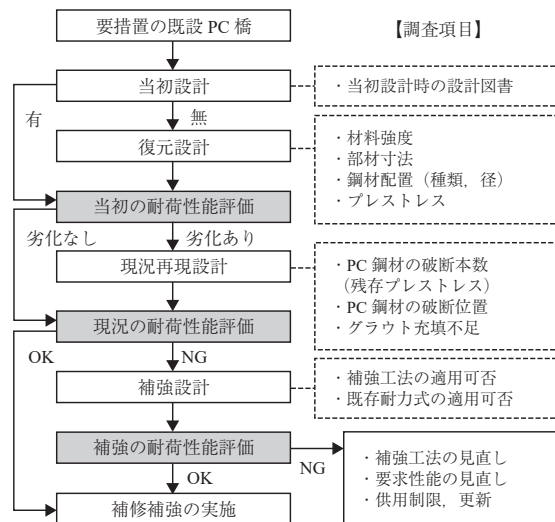


図 - 7 既設 PC 橋の耐荷性能評価フロー例

図 - 7 の各耐荷性能評価については以下の定義とする。

当初の耐荷性能評価: 当初設計 (建設当時に行われた設計) 図書が無い場合は、机上調査および現地調査によって得られた情報に基づき設計条件の整理および復元図の作成を行い、復元設計 (当初設計を後から復元した設計) を実施して当初の要求性能に対し照査を行う。

現況の耐荷性能評価: 劣化が顕在化した既設 PC 橋に対し、非破壊・微破壊調査などにより得られた情報に基づき現況再現設計 (経年影響がある現況を再現するための設計) を実施して、不足耐荷性能の推定を行う。なお、図 - 7 のフロー例では、現況の耐荷性能を満足している場合でも、劣化の発生または進行に伴う耐荷性能低下を抑制するため補修補強を実施することが望ましいものとした。

補強の耐荷性能評価: 現況の耐荷性能評価にて推定した不足する耐荷性能に対し、有効な補強方法の選定および補強量の仮定を行い、これに基づき補強設計を実施して目標とする要求性能に対し照査を行う。

なお、本章の内容は、共同研究での既報告^{4,5)}をもとに再整理および追加整理したものである。

3.2 当初の耐荷性能評価

当初の耐荷性能評価において、当初設計図書が無い場合は、維持管理記録資料、対象橋梁の竣工年に近い過去の技術基準、標準設計および過年度調査記録などを机上調査にて確認し、材料強度、部材寸法、鋼材配置、プレストレスなどを推定することになる。しかし、机上調査のみで推定できない場合は、非破壊・微破壊・その他調査方法を活用した現地調査を実施する必要がある。実施手順例を表 - 6 に、現地調査の一例を表 - 7 に示す。

表 - 6 当初の耐荷性能評価の実施手順例

手順	項目	設計内容	調査により得られた情報の活用事例
1	断面寸法・鋼材配置の設定	復元図により設定する	・桁高 ・PC 鋼材種別・本数
2	断面諸定数の計算	手順1の設定値を用いて断面諸定数を算出する	・断面積 ・断面2次モーメント ・断面係数
3	断面力の計算 (曲げモーメント等)	手順1および手順2に基づき格子解析モデルを構築し、荷重を載荷させ断面力を算出する	・格子解析モデル：支間長、主桁および横桁配置 ・荷重：TL-20 など
4	プレストレスの計算	プレストレスを設定し、プレストレスの計算を実施	・プレストレス (緊張力)：曲げモーメントによる PC 部材断面応力度の算出に使用
5	耐荷性能の照査 (耐荷性能評価)	当初の要求性能に応じた基準を用いた耐荷性能評価を実施	・コンクリート圧縮強度 ・PC 鋼材の引張強度および断面積 ・有効高

表 - 7 現地調査の一例

調査項目	調査手法	得られる情報	耐荷性能評価への活用方法
コンクリートの材料強度	構造形式や建設年代による推定	設計基準強度の推定	設計基準強度の設定
	コア強度測定	コンクリート強度	設計基準強度の設定または実強度の設定
PC 鋼材の種別・材料強度	構造形式や建設年代による推定	PC 鋼材の種類	PC 鋼材の断面積・引張強度等の設定
部材寸法	スケールや測量による測定	外形寸法	断面寸法の設定
	弾性波法	部材厚	
鋼材配置	電磁波レーダ法はつり調査	鋼材の位置、本数	鋼材配置の設定
プレストレス	復元設計の実施	プレストレスの推定値	プレストレスの設定

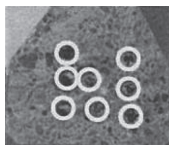
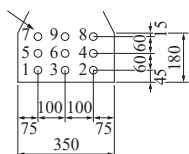
注) 現地調査を実施したうえ、推定する方法も含む。

また、現地調査の必要性を検証するため、本橋にて机上調査のみで復元図を作成し、図面と解体調査結果を比較した。併せて、当初設計図面のある別橋についても同様に図面と解体調査結果を比較した (表 - 8, 図 - 8)。

表 - 8 図面と解体調査結果との比較

項目	本橋	別橋 (比較)	
PC 鋼材の種類	図面	12φ5mm ^{*1}	12φ7mm
	解体調査	同上	同上
配置本数	図面	9本 ^{*1}	10本
	解体調査	8本	同上
鋼材位置 (最下段)	図面	45mm ^{*1}	80mm
	解体調査 ^{*2}	70mm ± 15.0%	81mm ± 6.1%

^{*1} 机上調査から鋼材配置等を推定した復元図より引用。
^{*2} 最下段の鋼材図心の実測は平均値 ± 変動係数で表示した。



(a) 復元図 (机上調査のみで作成) (b) 切断面状況 (PC 鋼材に○を記入)

図 - 8 PC 鋼材配置 (本橋下フランジ支間中央)

比較の結果、本橋では PC 鋼材配置本数に差異が生じた。机上調査での情報が不十分と考えられる場合には、現地調査が必要であることが再認識された。なお、電磁波レーダ法を用いて非破壊調査を行う場合、下フランジ支間中央部のように鋼材の配置が密な場合には内部に電磁波が届かず、測定精度が低下する⁶⁾ことに注意しなければならない。

当初の耐荷力評価を適切に実施するためには、たとえば支間 1/4 から支点ウェブにおける曲げ上げ状況も非破壊・微破壊調査対象とするなど、調査範囲を広げてより多くの情報を取得し復元図の精度を向上させることが必要となる。

3.3 現況の耐荷性能評価

現況の耐荷性能評価では、復元図や非破壊・微破壊調査結果などを用い耐荷性能の照査を行う。実施手順例を表 - 9 に、評価に必要となる非破壊・微破壊調査 (調査の詳細は 2 章参照) の一例について表 - 10 に示す。表 - 10 は塩害による劣化を想定した一例であり、耐荷性能への影響が大きい調査項目として、残存プレストレス、PC 鋼材破断位置、グラウト充填不足を取り上げている。

表 - 9 現況の耐荷性能評価の実施手順例

手順	項目	設計内容	調査により得られた情報の活用事例
1	断面寸法・鋼材配置の設定	(復元図利用)	-
2	断面諸定数の計算	(復元図利用)	-
3	断面力の計算	(復元図利用、必要に応じて要求性能を変更)	-
4	プレストレスの計算	プレストレスを設定し、プレストレスの計算を実施	・残存プレストレスが復元設計より低下する設計断面では、プレストレスを低減し、プレストレスの計算を実施
5	耐荷性能の照査 (耐荷性能評価)	補修補強時の要求性能に応じた基準を用いた耐荷性能評価を実施	・PC 鋼材破断が影響する設計断面では、PC 鋼材本数を低減して曲げ耐荷性能を評価 ・グラウト充填不足が影響する設計断面では、曲げ耐荷性能を低減

表 - 10 非破壊・微破壊調査の一例 (塩害劣化想定)

調査項目	調査手法	得られる情報	耐荷性能評価への活用方法
残存プレストレス	コア応力解放法	残存プレストレス	プレストレスの低減
PC 鋼材破断位置	漏洩磁束法	破断位置、本数	PC 鋼材本数・緊張力の低減
グラウト充填不足	SIBIE 法	充填不足箇所、本数	曲げ耐力の低減とその本数

また、耐荷性能への影響が大きい要因を検証するため、本橋の解体調査にて確認された材料強度のばらつきおよび、PC 鋼材などの損傷程度を変動要因として、それらが撤去桁の破壊抵抗曲げモーメント (以下、曲げ耐力) に与える影響を試算した (表 - 11, 12)。撤去桁の曲げ耐力は、平成 29 年道路橋示方書 III 5.8.1⁷⁾をもとに算出した。曲げ耐力比は、表 - 11 の設計値を入力して計算した曲げ耐力 (= 3 071 kN・m) に対する、各変動要因の変動領域の値

を入力し計算した曲げ耐力の比率 (%) として求めた。

表 - 11 材料強度のばらつきが曲げ耐力に与える影響

変動要因	強度 (N/mm ²)		標準偏差 ※2	曲げ耐力比 (%) [曲げ耐力 (kN・m)]		
	設計値	平均値※1		非超過 確率 5 % -側	平均値	非超過 確率 5 % +側
コンクリート 圧縮強度	40.0	60.7	5.21	101 % [3 110]	102 % [3 128]	102 % [3 142]
PC鋼材(健全なも の)引張強度	1 715	1 740	27.2	99 % [3 038]	101 % [3 114]	104 % [3 190]

※1 本橋解体調査時に実施した材料試験値の平均値。

※2 材料試験値の標準偏差。

表 - 12 損傷の程度が曲げ耐力に与える影響

変動要因	曲げ耐力比 (%) [曲げ耐力 (kN・m)]		
	0本	1本	2本
PC鋼材の破断本数	100 % [3 071]	88 % [2 711]	76 % [2 319]
グラウト充填不足の本数	100 % [3 071]	96 % [2 956]	93 %* [2 841]

※ 本橋での解体調査結果では、PC鋼材破断本数は最大2本、グラウト充填不足本数は最大1本相当であったが、参考として記載。

本橋での解体調査においては、曲げ耐力に最も影響を与える変動要因はPC鋼材破断(約24%減少)であった。

現況の耐荷力評価を適切に実施するためには、影響の大きいPC鋼材破断に関係する、残存プレストレス、PC鋼材破断位置、グラウト充填不足の調査が重要となる。調査の際は、2章で検証した非破壊・微破壊調査の適用性に留意することが重要である。

さらに、残存プレストレス、PC鋼材破断位置、およびグラウト充填不足の劣化事象をより精緻に評価する方法の事例を以下に示す。

残存プレストレス：復元設計を100とした場合の低減量とその範囲を把握し、その調査範囲が設計断面に影響している場合は、その設計断面のプレストレスを低減する。

PC鋼材破断：グラウト充填されている場合はPC鋼材破断位置の緊張力をゼロとし、PC鋼材破断位置から一定の距離まで緊張力の低減が影響すると考える(プレテンション部材におけるPC鋼材の定着長の考え方⁸⁾を準用)。

グラウト充填不足：グラウト充填不足区間にわたり耐荷性能に影響すると考える。影響の考え方として、グラウト充填不足区間の耐荷性能は、グラウトによる付着がないことを考慮して、その本数分の曲げ耐荷性能を低減する(PC鋼材とコンクリートとの付着がない場合の考え方⁹⁾を準用)。

なお、これらの評価方法に関しては、さまざまな研究¹⁰⁾がなされている。合理的な耐荷性能評価を実施するためには、各種調査により把握した劣化事象を適切に耐荷性能評価へと反映させることが課題となる。

4. おわりに

既設PC橋の性能評価法に関する検証および整理を実施した結果、次のことが確認された。

- (1) 本研究で検証した非破壊・微破壊調査手法の適用性について、残存プレストレスとPC鋼材破断位置は10%程度の誤差に収まったが、下フランジ部のグラウト充填状況を確認するにはほかの手法を併用した調査が必要となる。
- (2) 当初の耐荷性能評価について、机上調査のみで作成した復元図と解体調査結果を比較したところ、PC鋼材配置本数に差異が生じた。当初の耐荷力評価を適切に実施するためには、調査範囲を広げてより多くの情報を取得し、復元図の精度を向上させることが必要となる。
- (3) 現況の耐荷力評価について、曲げ耐力に最も影響を与える変動要因はPC鋼材破断(約24%減少)であった。現況の耐荷力評価を適切に実施するためには、影響の大きいPC鋼材破断に関係する、残存プレストレス、PC鋼材破断位置、グラウト充填不足の調査が重要であることを明らかにした。なお、合理的な耐荷性能評価を実施するためには、各種調査により把握した劣化事象を適切に耐荷性能評価へと反映させることが課題となる。

謝 辞

本研究は土木研究所とプレストレス・コンクリート建設業協会との共同研究の成果の一部である。本研究に際してご協力をいただいた関係各位に感謝の意を表します。

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) 櫻井義之, 國富康志, 山本 将, 大島義信: 非破壊調査による既設PC橋の性能評価に関する検討, 第28回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.393-398, 2019.11
- 5) 北野勇一, 國富康志, 山本 将, 大島義信: 既設PC橋の耐荷力評価に必要な調査方法に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.445-450, 2020.7
- 6) 土木学会: 2018年制定コンクリート標準示方書維持管理編, p.58, 2018.10
- 7) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編, pp.152-156, 2017.11
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編, pp.100-102, 2017.11
- 9) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編, p.151, 2017.11
- 10) たとえば, 横田敏広, Isuru WIJAYAWARDANE, 睦好宏史: 腐食したPC鋼材を有するPC梁の耐荷力特性と解析的性能評価手法の検討, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, pp.218-233, 2018.

【2020年9月18日受付】