

大変形した多径間単純 PC 桁の外ケーブル方式による補強対策

横山 広^{*1}・中村 正人^{*2}・山田 達哉^{*3}

既存の社会資本は、要求される性能が満足されない状況になった場合、取り壊し・新設するか、補修・補強を行い性能を満足させる状態まで回復させなければならない。近年では、社会保障関係費の増加に伴う公共事業関係費抑制の観点から、後者により既存社会資本を延命化させる傾向にあることは既知のことである。そのような背景のなか、本稿では、ポストテンション単純桁に発生した下方のたわみ（逆キャンバー）に対し、既設 PC 鋼材の導入力を 2 通りの方法で計測し、両者を比較することで外ケーブル補強を行った橋梁について報告するものである。

キーワード：外ケーブル補強、残存プレストレス、コア切込み法

1. はじめに

本橋は、主桁 PC 鋼材に対するグラウト未充填と、主桁下方へのたわみ（逆キャンバー）が生じていることが確認されたため、早急な補強対策が必要であった。

主桁のたわみの原因は、主桁に導入されるプレストレスの不足であると予想し、不足分の補強を考えたが、既設 PC 橋が保有するプレストレスを計測する方法が現在確立されていない状況であり、補強量の決定に必要な残存プレストレス（現主桁に残っているプレストレス）を定量的に把握できない状態であった。

そこで、本業務では残存プレストレスを計測する方法を検証し、最適な補強方法を選定することを目的に実施した「静的載荷試験¹⁾」と「コア切込み応力開放法²⁾」による残存プレストレスの計測について比較し、補強に必要なプレストレスを決定した。

2. 橋梁概要

本橋は、一級河川安曇川を横過する PC 4 径間単純ポストテンション T 桁橋であり、主に地域の生活道路として利用されている。橋梁台帳より竣工年度は確認できたが、設計図書が無かったため、現地計測と竣工年度に対応する要

領より設計に必要な情報を得た。

以下に本橋の側面図（図 - 1）、主桁断面図（図 - 2）、橋梁諸元（表 - 1）を示す。

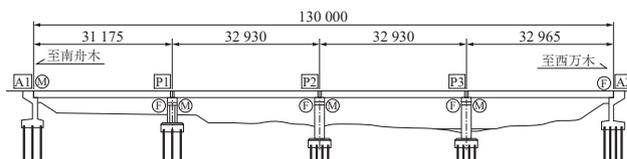


図 - 1 側面図

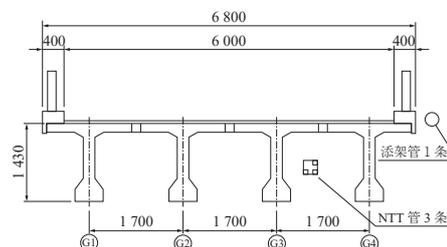


図 - 2 断面図



^{*1} Hiroshi YOKOYAMA

大日本コンサルタント(株)
インフラ技術研究所



^{*2} Masato NAKAMURA

大日本コンサルタント(株)
関東支社 構造保全技術部



^{*3} Tatsuya YAMADA

(株)日本構造橋梁研究所
設計部

表 - 1 橋梁諸元

橋長	130.000 m
桁長	31.175 m + 32.930 m + 32.930 m + 32.965 m
幅員	6.000 m
設計活荷重	TL - 14
上部工形式	PC 4 径間単純ポストテンション T 桁橋
下部工形式	橋台：逆 T 型橋台 / 橋脚：壁式橋脚
基礎工形式	杭基礎
舗装	アスファルト舗装
竣工年	1970 年（昭和 45 年）8 月

3. 残存プレストレスの算出

3.1 静的載荷試験による残存プレストレスの算出

(1) 調査概要

静的載荷試験による残存プレストレスの算出方法は、試験車（ラフテレーンクレーン 25t 級）を支点部から支間中央に向かい 1m 間隔で移動させ支間部の曲げモーメントを漸増させながら、支間部に取り付けたひずみゲージによりひずみ値を計測し、ひずみの変化によりひび割れが開口する地点での載荷位置を確認することで、残存プレストレスを推定する手法である（図 - 3）。

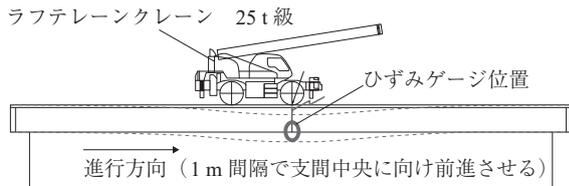


図 - 3 静的載荷試験概要

(2) 調査手法

主桁のひずみを計測するため、支間中央部の曲げひび割れ箇所にはひずみゲージを設置する。このとき、ひずみゲージはひび割れを跨ぐように設置するものと、ひび割れの横に設置する 2 種類を設置する（写真 - 1）。ひび割れを跨ぐように設置したゲージは、ひび割れが開口するまで一定にひずみが漸増する一次勾配と、ひび割れが開口後にひずみ勾配が急勾配となる二次勾配に分けられる。一方、ひび割れ横に設置したひずみゲージは、ひび割れが開口するま

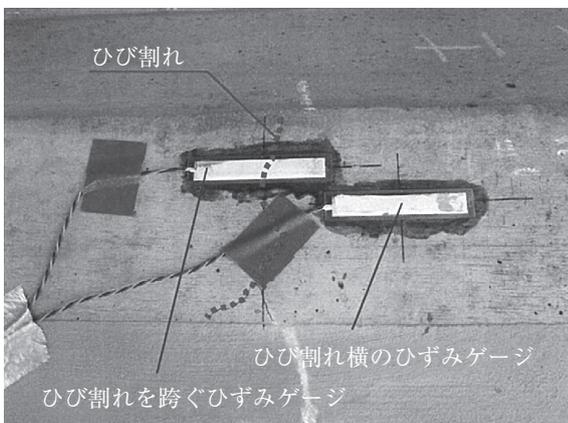
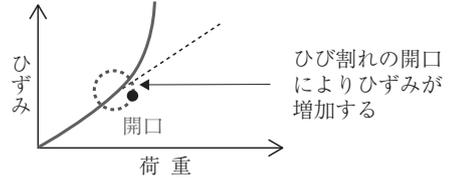


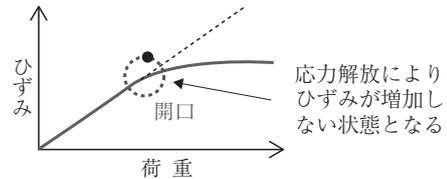
写真 - 1 ひずみゲージ設置状況

で一定にひずみが漸増する一次勾配と、ひび割れが開口するとひずみ勾配が緩くなる二次勾配に分けられる特徴がある（図 - 4）。

これらのひずみと荷重の関係から、ひび割れが開口を始めるクレーン載荷位置を確認する。



①：ひび割れを跨ぐひずみゲージ



②：ひび割れ横のひずみゲージ

図 - 4 ひずみゲージによる計測

連続載荷により得られたひずみと試験車 1m ごとの載荷位置の関係を図 - 5 に示す。

現地で行った静的載荷試験結果を基に再現設計した結果と比較し、たわみによる耐荷性能を評価した。

比較の結果、計測によるたわみは、計算によるたわみに対して 4～7 割程度となった。（表 - 2）

実橋試験の結果が、設計計算値よりもたわみが少なくなる原因は、設計に反映されない地覆・舗装・高欄などの剛性によると考えられ、既往の RC 橋の載荷実験でも実験時に得られるたわみが設計計算値よりも少なくなることが報告されている³⁻⁶⁾。

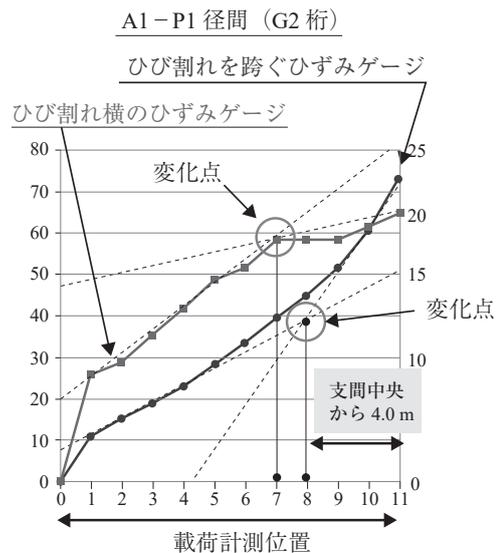


図 - 5 載荷試験によるひずみと載荷位置

表 - 2 A1 - P1 径間 (支間中央のたわみ) (mm)

着目桁	a : 静的 載荷試験	b : 再現設計	a/b
G1	6.55	13.48	0.49
G2	4.33	6.27	0.69
G3	4.13	6.20	0.67
G4	5.91	13.37	0.44

静的載荷試験より、ひび割れが開口し始める荷重位置での再現設計を行い、算出した曲げモーメントを表 - 3 に示す。なお、曲げモーメントの算出時に対象とする主桁は、ひび割れがもっとも少ない A1 - P1 径間と、ひび割れがもっとも多く発生している P2 - P3 径間の各桁に着目し、曲げモーメントを算出した。

表 - 3 ひび割れ開口時の再現設計結果

着目桁		支間中央曲げモーメント (kNm)
A1 - P1	G1	664.16
	G2	282.02
P2 - P3	G1	577.42
	G4	667.52

(3) 残存プレストレス算出結果

復元設計を基にひび割れ開口時に主桁下縁合成応力度が 0 N/mm² になると仮定し、残存プレストレスを推定した。具体的には以下の手法により推定を行った (表 - 4)。

- 静的載荷試験で算出した曲げモーメントを使用し、ひび割れ開口時のプレストレスによる応力度を推定する。このとき、主桁自重、場所打ちコンクリート荷重、橋面荷重、実載荷車両荷重による主桁下縁引張応力度を打ち消すプレストレスが発生していると仮定する。ここで死荷重時応力度 5.36 N/mm² から復元設計時のプレストレスによる応力度 19.39 N/mm² を差し引き、試験車載荷にて算出した応力度 -1.44 N/mm² を足しこむ。

$$5.36 - 19.39 - 1.44 = -15.47 \text{ N/mm}^2$$

上記より算出した -15.47 N/mm² を打ち消すプレストレスによる応力を算出する。

その結果、残存プレストレスを 598.2 N/mm² とした場合、プレストレスによる応力が 15.47 N/mm² となり、試験時応力度が 0 N/mm² となる。

- 上記で算出したひび割れ開口時のプレストレスによる応力度を復元設計計算にて算出した損傷が無い状態でのプレストレスによる応力度で割りプレストレスの比率を算出する。

$$749.6 \text{ N/mm}^2 - 598.2 \text{ N/mm}^2 = 151.4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{比率} : 598.2 / 749.6 = 0.80$$

上記結果より、現在の主桁には有効プレストレスが 151.4 N/mm² 不足 (2 割程度減少) している状態と仮定した。

- 復元設計時の有効プレストレスに上記 ② で計算した比率を掛けた値を残存プレストレスの値とする。

同様に、各桁に計算を実施した結果を表 - 5 にまとめる。

表 - 4 A1 - P1 径間 (G2 桁) 残存プレストレスの検討

復元設計	導入時プレストレス	(N/mm ²)	1 150.0	
	有効プレストレス	(N/mm ²)	749.6	
	応力度	曲げ M (kNm)	応力度 (N/mm ²)	
	プレストレスによる応力度	-	上縁	下縁
	死荷重時	-	5.53	5.36
静的載荷試験	残存プレストレス	(N/mm ²)	598.2	
	応力度	曲げ M (kNm)	応力度 (N/mm ²)	
	試験車荷重	282.02	0.94	-1.44
	推定プレストレスによる応力度	-	-2.81	15.47
	試験時応力度	-	7.18	0.00
プレストレス比率		載荷試験 / 復元設計	0.80	

表 - 5 静的載荷試験による残存プレストレス算定結果 (N/mm²)

着目桁	復元設計	載荷試験	不足 Pe'	比率	残存率 (10%丸め)	
A1 - P1	G1	744.6	655.5	89.1	0.88	80%
	G2	749.6	598.2	151.4	0.80	80%
P2 - P3	G1	739.0	635.1	103.9	0.86	80%
	G4	736.6	642.4	94.2	0.87	80%

静的載荷試験により、主桁内の有効プレストレスは 80% ~ 88% まで減少していることから、全桁での残存率を、残存率のもっとも小さい 80% に合わせることにした。

3.2 コア切込み法による残存プレストレスの算出

(1) 調査概要

コア切込み法による試験方法は、主桁にプレストレスにより圧縮ひずみが作用している場合、コアドリルによる切込みを入れることで切込み部表層の圧縮ひずみが解放され、この解放ひずみをひずみゲージで測定することで作用応力を推定する手法である (図 - 6)。解放ひずみには、プレストレスや自重以外のひずみ要因 (たとえば、乾燥収縮・クリープに伴う影響) が含まれている。これらを考慮した評価式を使用することで、プレストレスを精度よく推定することができる。

調査対象は 4 主桁 × 4 径間 = 16 か所を対象に実施し、この結果を基に本橋全体の補強量をした。なお、コア寸法は φ50 × 18 mm とした。

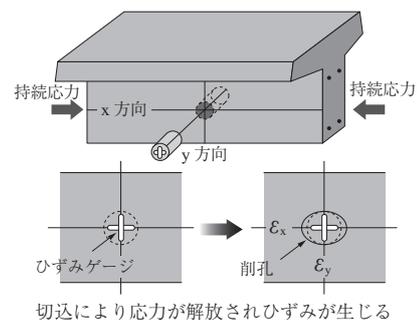


図 - 6 コア応力開放法概要

(2) 調査手法

測定にあたり、電磁波レーダー法および電磁誘導法によって内部探査を行い、ひずみ測定に適した位置を決定する。調査位置にゲージ長 30 mm のひずみゲージを貼り付け、コア切込み前（応力解放前）の状態を測定し初期値とする。その後、φ50 のコアドリルで 18 mm だけ浅く溝切りを入れ、切削後、ゲージを再度計測する。

調査位置は、支間中央付近の主桁下フランジ下面とするのが一般的である。しかし、本橋の調査位置では、下フランジ下面にひび割れが発生しており、応力調査結果に影響を及ぼすおそれがあるため、下フランジ側面を選定した。

以上の手順で計測した解放ひずみと採取コアのヤング係数測定値を基にプレストレスの評価式に代入し、残存応力について評価する（図 - 7）。

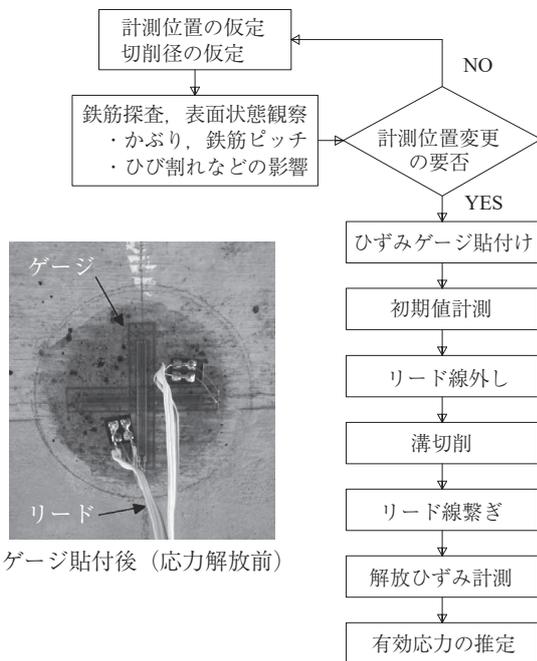


図 - 7 コア切込み法の調査手順

(3) 残存プレストレス算出結果

調査結果を基に、残存プレストレス推定式⁷⁾を使用し、有効応力を推定する。

コア切込み法による応力調査結果を表 - 6 に示す。

表 - 6 コア切込み法による応力調査結果（残存率）

		A1 - P1	P1 - P2	P2 - P3	P3 - A2
プレストレスの評価 (残存比率)	G1	0.74	0.75	0.76	0.76
	G2	0.82	0.69	0.63	0.73
	G3	0.77	0.82	0.73	0.71
	G4	1.03	0.74	0.76	0.68
採用残存比率		0.74	0.69	0.63	0.68
残存率（10%丸め）		70%	60%	60%	60%

調査試験により、主桁内の有効プレストレスは 63%～74%まで減少していることから、各桁での残存率を 10%

で丸め、残存率 60%、70%に合せることとした。

3.3 残存プレストレス算出結果の比較

前頁で紹介した「静的載荷試験」と「コア切込み応力解放法」の試験より得られた残存プレストレス調査結果を基に、残存プレストレス（残存率）を比較すると、静的載荷試験結果は残存率が 80%の減少量に比べ、コア切込み法による応力調査結果の残存率は 60～70%と、全体的にプレストレスが多く減少している結果となった。

試験方法により残存率の値に差が生じた要因として、実橋試験では、設計計算で見込まない剛性（地覆、舗装、高欄など）の影響や建設時のコンクリート強度のばらつきにより、このような差が発生したと考えられる。

同様の現象は、既往の RC 橋の載荷実験でも報告があり「実験時に得られる上部工剛性は、設計計算値よりも剛な挙動を示す」報告と一致する^{5,6)}。

また、RC 橋の部位によってコンクリートの圧縮強度が大きく異なるという事例⁴⁾も確認されている。

以上より、本業務で使用する補強量は、設計上安全側となる「コア切込み法による残存プレストレス」を用い、補足分のプレストレスを算出し、外ケーブルによる補強量を決定した。補強量は、今後プレストレスロスが進行することに対する冗長性をもたせるため、必要とされる外ケーブルよりも容量の大きいタイプを選定し、最大緊張力に対して 70～80%程度の緊張力とした。これにより、プレストレスが不足した際に再緊張可能な構造とした。

4. 外ケーブル定着部の照査項目

ここでは、補強用外ケーブルを既設主桁に定着させる定着突起部の設計において、新たに照査が必要と考えられる点について、本業務で取り上げた内容を紹介する。

外ケーブル定着突起と主桁は、横締め PC 鋼材により緊結され、既設コンクリート（主桁）と後打ちコンクリート（定着突起）界面での摩擦力により、定着突起がずれないように設計するものである。また、補強用外ケーブルにより定着部コンクリートと既設コンクリートの界面に発生する引張応力に対して、横締め PC 鋼材により圧縮応力を与えてコンクリートと主桁界面に浮上がりが生じないようにするものである。浮上がりが生じないためには、横締め PC 鋼材の配置は、図 - 9 に示すように定着部コンクリートの図心に対して上下左右対称に配置し、定着部コンクリート面に対して均一に圧縮応力度を作用させることが理想的となる。

横締め PC 鋼材配置を上下左右対称に配置することを前提としている設計マニュアル⁸⁾では、図 - 8 に示す A 部に作用する定着突起と主桁が浮き上がる際に発生する引張応力度の照査のみを対象としている（式(1)）。

$$\sigma_A = \sigma_1 + \sigma_{2m} + \sigma_{2u}$$

$$= \frac{P}{a \cdot b} - \frac{6 \cdot T \cdot \cos \theta}{a \cdot b^2} - \frac{6 \cdot T \cdot L \cdot \sin \theta}{a \cdot b^2} > 0 \text{ N/mm}^2$$

……………(1)

ここに、

- σ_A : もっとも引張応力度が卓越する位置 (A 点) の合成応力度 (N/mm²)
- σ_1 : 緊結用 PC 鋼材のプレストレス力による応力度 (N/mm²)
- σ_{2n} : 外ケーブルのプレストレス力における水平成分による応力度 (N/mm²)
(外ケーブル定着部側縁端の応力度)
- σ_{2u} : 外ケーブルのプレストレス力における鉛直成分による応力度 (N/mm²)
(定着装置上縁の応力度)
- P : 緊結用 PC 鋼材によるプレストレス力の合計 (N)
- T : 外ケーブルのプレストレス力 (mm)
- a : 定着装置の高さ (mm)
- b : 定着装置の長さ (mm)
- L : 外ケーブルの偏心量 (mm)
- θ : 外ケーブルの鉛直方向の傾角

しかし本橋では、鉄筋および主桁 PC 鋼材が図 - 10 に示すように不均衡かつ過密に配置されていたことから、横締め PC 鋼材の配置位置が制限され、定着コンクリートの上側へ多く配置せざるを得ない状況となった。これにより、横締め PC 鋼材偏心による B 部の浮上りが懸念されたため B 部の浮上り照査を追加した。

その結果、B 部での合成応力度の照査より、A 部と同様に定着突起と主桁に浮上りによる引張応力が発生することが確認され、横締め PC 鋼材配置の変更が必要となるケースがあった。

このように、施工時において既設コンクリート内の鉄筋、PC 鋼材配置などにより横締め PC 鋼材の位置が定着部コンクリートの図心に対して非対称となる場合は、マニュアル通りの照査では不足することもあり、現地条件により照査位置の追加の必要性が確認された。

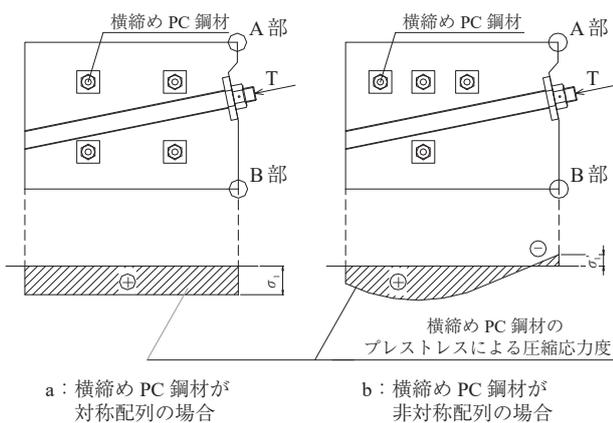


図 - 8 横締め PC 鋼材に対する圧縮応力度分布

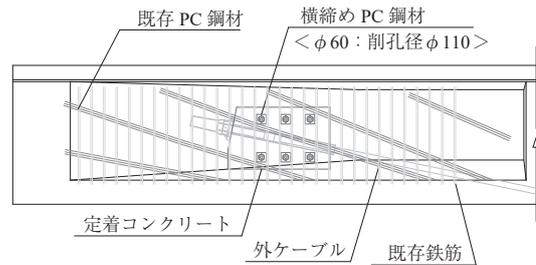


図 - 9 横締め PC 鋼材配置 (上下左右対称配置案)

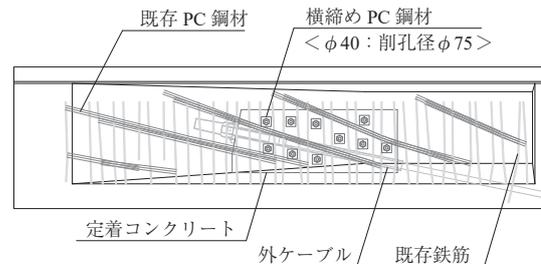


図 - 10 既存鋼材配置を考慮した横締め PC 鋼材配置

5. 補強結果

本橋で実施した外ケーブル方式による補強結果を以下に示す。なお、A1-P1 径間を例として補強断面図 (図 - 11, 写真 - 2) を記載する。

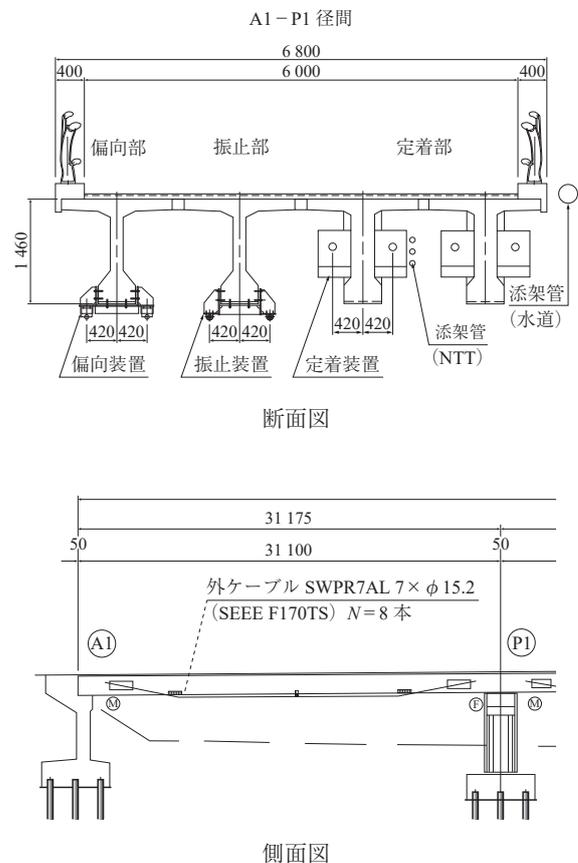


図 - 11 補強断面図



桁側面状況



桁下状況

写真 - 2 外ケーブルによる補強対策後

工法について比較をした。

今回比較した試験では、算出した残存プレストレスが 10～20%乖離する結果となり、コア切込み法を用いたほうが安全側の設計となることが確認された。

本橋の補強方針では、安全側の設計となるように有効プレストレスの減少量が多いコア切込み法の結果を採用し外ケーブルによる補強量を決定した。また、予防保全の観点より、今後プレストレスがさらに減少した場合でも外ケーブルの再緊張ができるように、必要なプレストレスに対して、余裕のある外ケーブルを配置した。

参考文献

- 1) 大日本コンサルタント株式会社：平成 26 年度 第 82-34 号南船木西万木線道路補修設計委託，2015.5
- 2) オリエンタル白石株式会社：平成 27 年度 第 B851-13 南船木西万木線補助道路修繕設計委託，2015.11
- 3) 権 明直，森川英典：現場試験に基づく塩害劣化 RC 橋の構造性能と安全性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No1，pp.1077-1082，2007.
- 4) 真崎洋三，吉田須直，浅利公博，上田 定：約 45 年供用されたコンクリート道路橋の残存機能に関する調査，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No1，pp.1479-1484，2002.
- 5) 玉田和也，小島善明，西嶋久勝：舞鶴市の橋梁を対象とした固有振動数による健全度評価の検討，土木学会第 64 回年次学術講演会，I -104，pp.207-208，2009.
- 6) 鈴木基行，岩城一郎，上原子昌久，内藤英樹，久田 真，鶴田浩章，佐々木暢智，千葉陽子：著しい塩害を受けた PC 橋の静的載荷試験，土木学会論文集 E，Vol.66，No3，pp.231-244，2010.
- 7) 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，第 20 巻第 2 号，pp.27-37，2009.
- 8) 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），p.29，2007.4

6. おわりに

本業務では、既設 PC 橋の残存プレストレスを把握するため、「静的載荷試験」と「コア切込み応力解放法」の 2

【2019 年 9 月 2 日受付】



刊行物案内

PC グラウトの設計施工指針 —改訂版—

平成 24 年 12 月

定 価 3,666 円 (税込) / 送料 300 円

会員特価 3,000 円 (税込) / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会