

# 既設ポストテンション PC 橋の保全方法 — PC 鋼材の劣化に対する診断と対策 —

酒井 秀昭\*1

国内の橋梁は、高度経済成長期から急速に整備されており、現在は経年化による劣化が顕在化しつつある。過去に施工されたポストテンション方式による PC 橋では、荷重作用による変状や環境作用による劣化に加えて、PC グラウトの充填不良、使用材料および PC 鋼材の定着方法などに起因し、PC 鋼材の腐食や破断などの変状が発生している橋梁も少なくない。PC 鋼材の変状が発生した PC 橋の対策としては、外ケーブル工法や PC グラウトの再充填工法などが一部で実施されている。本研究は、PC グラウトの充填不良、使用材料および PC 鋼材の定着方法などに起因して変状が発生または発生するおそれがある既設のポストテンション方式の PC 橋の診断方法や対策方法について、既往の規準や変状事例をもとに検討を行ったものである。

キーワード：ポストテンション方式、PC 鋼材、PC グラウト充填不良、診断、対策

## 1. はじめに

ポストテンション方式のプレストレストコンクリート（以下、「PC」という。）橋は、コンクリート部材と付着させないアンボンド方式を除いて、PC 鋼材の緊張後に PC グラウトによりコンクリート部材と PC 鋼材とを一体化させて、PC 鋼材の防錆と平面保持の仮定を成立させている。PC グラウトについては、現在は充填性に関してさまざまな改良や研究により、耐久性にかかわる要求事項を満足する設計・施工が行われている。しかしながら、改良や研究が実施される以前に施工されたポストテンション方式の PC 橋については、PC グラウトの充填不良などに起因する PC 鋼材の腐食や破断などの変状が発生している<sup>1)</sup>。

PC グラウトの充填不良が生じている PC 橋の対策としては、外ケーブル工法や PC グラウトの再充填工法などが一部で実施されている。PC グラウトの充填不良の調査および補修・補強については、公益社団法人プレストレストコンクリート工学会（以下、「PC 工学会」という。）にお

いて、「既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針<sup>1)</sup>」が 2016 年に制定されている。また、ポストテンション方式の PC 橋の保全方法については、PC 工学会において 2018 年に制定された「コンクリート橋・複合橋保全マニュアル<sup>2)</sup>」の中に具体的な診断方法や標準的な対策方法が記載されている。

本研究は、前述の既往の規準や変状事例などを参考に、PC グラウトの充填不良などに起因して、PC 鋼材に変状が発生または発生するおそれがある既設のポストテンション方式の PC 橋の診断方法や対策方法について検討を行ったものである。

## 2. PC 鋼材の変状発生リスク

ポストテンション方式により施工された PC 橋では、図 - 1 に示す事例のような PC 鋼材の腐食や破断などの変状が発生している橋梁も少なくない。現在行われている PC グラウトと比較して、過去に施工された PC グラウトによって PC 鋼材に変状が生じる要因<sup>1)</sup>については以下に示す

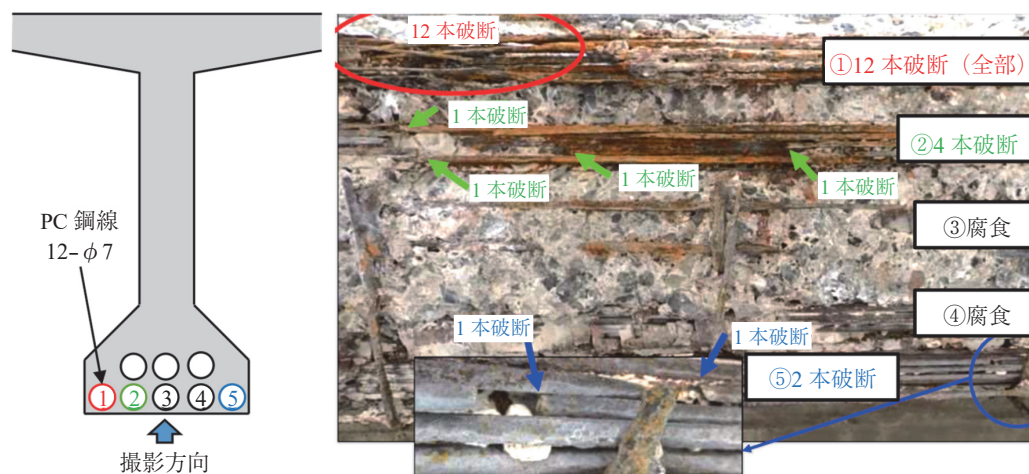


図 - 1 既設ポストテンション PC 橋の PC 鋼材の腐食および破断の例 (PC ポストテンションバルブ T 桁橋)

\*1 Hideaki SAKAI : 博士 (工学)

とおりである。

- 1) PC グラウトとして、ブリーディングが生じる材料に膨張剤を添加したものを使用していたため、ブリーディングによりシース内に空隙が発生する可能性が高い。現在は、ノンブリーディングタイプを使用している。
- 2) PC グラウトに塩化物イオン量の制限がなかったため、PC 鋼材が腐食する可能性がある。現在は、全塩化物イオン量を  $0.3 \text{ kg/m}^3$  以下に制限している。
- 3) PC グラウトの充填の有無や数量の管理方法として、排出口からの排出を目視確認していたため、充填忘れや充填不足の管理が困難であった。現在は、流量計を設置して品質管理を行っている。
- 4) PC グラウトの注入ポンプの能力が低く充填不良が発生するおそれがあった。現在は、充填性能が高い電動式スクイズポンプが標準的に使用されている。
- 5) 使用 PC 鋼材径に対してシース径が小さいため、PC グラウトの閉塞や充填圧が上昇し充填が困難となる場合があった。現在は、シース径を大きくして充填を容易にしている (図 - 2)。
- 6) プレキャスト T 桁橋などでは、PC 鋼材の半数程度を床版上縁で定着していたため、PC グラウトのブリーディングにより定着部付近に充填不良が発生するとともに、路面から水などの劣化因子が侵入し PC 鋼材および定着具に腐食が発生するおそれがあった。現在は、上縁定着は採用されていない (図 - 3)。

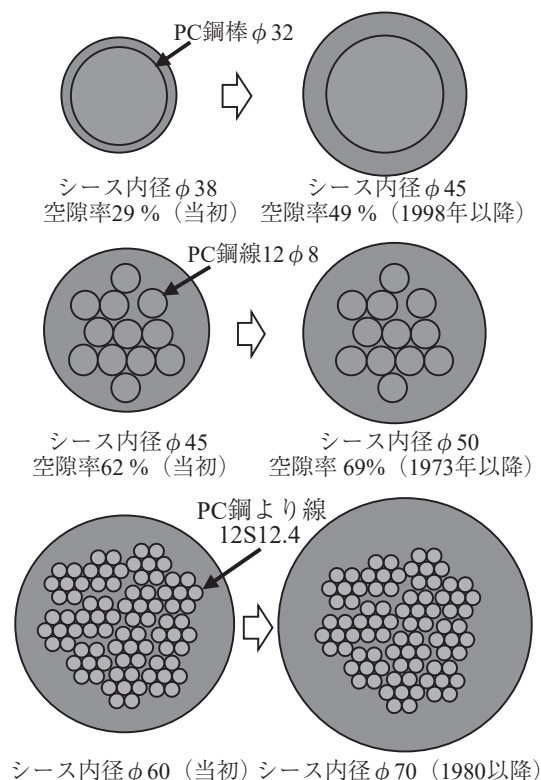


図 - 2 使用 PC 鋼材径とシース径の変遷

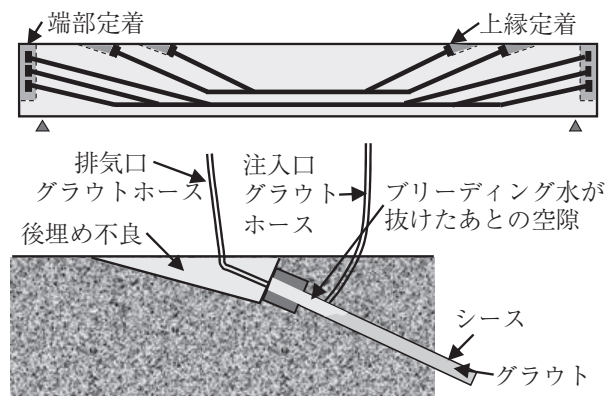


図 - 3 上縁定着部の変状の例

### 3. 診断方法

既設ポストテンション PC 橋の診断においては、PC 鋼材の腐食や破断などの変状発生リスクを考慮し、保全計画に基づいた点検と必要に応じて行われる詳細調査の結果から、劣化や損傷の確認、劣化機構の推定と予測、対象橋梁または部位・部材の性能の評価を行って、対策の要否の判定を行わなければならない。この診断の手順を図 - 4 に示す。以下に、診断において実施する項目の概要について述べる。

#### 3.1 点 検

点検では、定められた保全計画に基づき、供用中の橋梁の状態を可能なかぎり適切に把握することが必要であり、橋梁の状態に応じた方法で実施する必要がある。点検にあたっては、橋梁を構成する部位・部材を対象に近接目視点検を行うとともに、必要に応じて打音点検などを行うことを基本とするが、対象橋梁が「2. PC 鋼材の変状発生リスク」で述べた事項に該当する場合は、十分な点検を行う必要がある。とくに PC グラウトの充填不足が存在する箇所には、図 - 5 に示すような PC 鋼材に沿ったひび割れ、エフロレッセンス、水しみ、漏水などが確認できることがある。

#### 3.2 詳細調査

前述の点検結果から、PC 鋼材の腐食や破断が発生しているかまたはそのおそれがある場合は、それらの状況を把握するために以下に示す詳細調査を実施する。

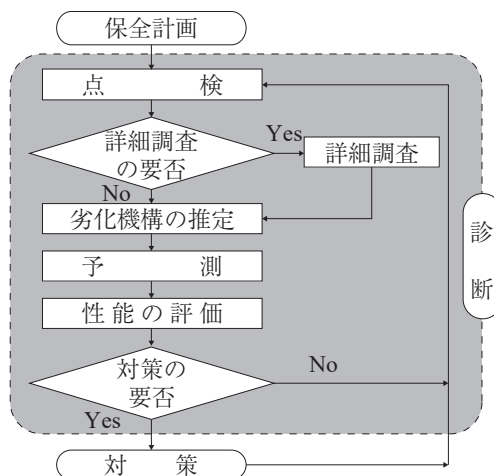


図 - 4 診断の手順

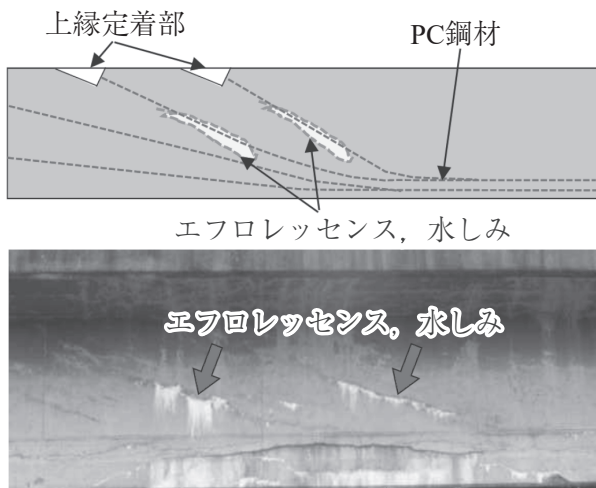


図 - 5 PC 鋼材に沿った変状の例

- 1) 水しみ, エフロレッセンス, ひび割れなどの発生状況から, PC 鋼材の配置との相関, 水の侵入経路などの「外観調査」を実施する。
- 2) PC グラウトのシース内および定着具周辺の充填状況を調査する目的で「PC グラウトの状態調査」を実施する。
- 3) PC 鋼材の破断または腐食の程度および PC 鋼材によるプレストレスの程度を調査する目的で, 「PC 鋼材およびプレストレスの状態調査」を実施する。

上記に示した「PC グラウトの状態調査」および「PC 鋼材およびプレストレスの状態調査」について以下に述べる。

(1) PC グラウトの状態調査

PC グラウトの状態調査は, 実験で確認されたか, または実績のある非破壊検査や微破壊検査を用いて行う。PC グラウトの状態調査としては, 放射線透過法, 打音振動法, 広帯域超音波法, インパクトエコー法および削孔調査などがある。これらの調査方法の適用条件や適用範囲について表 - 1 に示す。

表 - 1 PC グラウトの状態調査の適用条件<sup>1)</sup>

調査方法	適用条件	適用断面形状・部位 鋼材種別
放射線透過法	部材厚さ 500 mm 未満 (部材の両面に作業スペース必要)	T 桁, I 桁のウェブ 箱桁のウェブ
打音振動法	PC 鋼材が直線状に配置されている	床版横締めケーブル 横桁横締めケーブル
広帯域超音波法	シースかぶり厚さ 250 mm 以下	T 桁, I 桁などのウェブ 箱桁のウェブ・床版 床版横締めケーブル
インパクトエコー法	空隙の大きさ/空隙までの深さが 0.25 程度 (シース径の 4 倍程度まで)	T 桁, I 桁などのウェブ 箱桁のウェブ・床版
削孔調査	シースかぶり厚 300 mm 程度 (削孔が可能な深さ)	とくになし

(2) PC 鋼材およびプレストレスの状態調査

PC 鋼材およびプレストレスの状態調査は, 実験で確認

されたか, または実績のある非破壊検査や微破壊検査を用いて行う。PC 鋼材の状態調査としては, 放射線透過法, 漏洩磁束法および削孔調査などがあり, プレストレスの状態調査方法としては, 応力解放法がある。これらの調査方法の適用条件や適用範囲について表 - 2 に示す。

表 - 2 PC 鋼材・プレストレス状態調査の適用条件<sup>1)</sup>

調査方法	適用条件	適用断面形状・部位 鋼材種別
放射線透過法	部材厚さ 500 mm 未満 (部材の両面に作業スペース必要)	T 桁, I 桁のウェブ 箱桁のウェブ
漏洩磁束法	シースかぶり厚 160 mm 程度以下	床版, ウェブ 磁束密度測定が可能な形状で, 着磁距離が 2 m 以上確保できる
応力解放法	コンクリートを部分的に切削可能な箇所	主桁下面で, 縁応力度が比較的大きな箇所
削孔調査	シースかぶり厚 300 mm 程度 (削孔が可能な深さ)	特になし

応力解放法は, 対象となる部位・部材のコンクリートの応力状態を微破壊による調査により把握してプレストレスを推定するものであり, 建造物の補修・補強設計時の現有応力状態や性能の把握のために行われる。応力解放法としては, 以下の方法が行われている。

- 1) スリット応力解放法
- 2) コア応力解放法
- 3) スロットストレス法
- 4) 鉄筋切断法

3.3 劣化機構の推定および予測

点検および詳細調査の結果から, 変状の要因および劣化機構について推定する。変状発生の要因としては, PC グラウトの充填不良や塩害およびひび割れからの劣化因子の侵入などがある。点検または詳細調査により PC 鋼材の劣化が推定される場合は, 劣化による腐食や破断の程度を推定し, その時点または設計供用期間中に対象橋梁または部位・部材が安全性, 供用性, 耐久性などの性能を満足するか予測する。劣化機構の推定および性能の予測にあたっては, 図 - 6 に示すとおり種々のデータを考慮する。

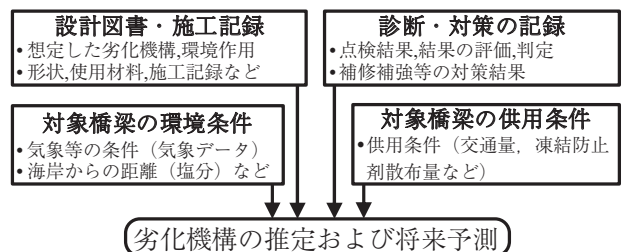


図 - 6 劣化機構の推定および将来予測

3.4 性能の評価および対策の要否判定

劣化機構の推定および予測結果から, 現時点および設計供用期間中の性能を評価し, 対象橋梁および部位・部材の対策の要否について判定する。図 - 7 に, 性能の評価結

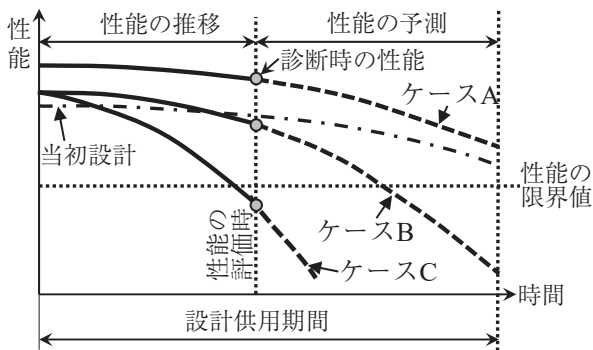


図 - 7 性能の評価結果による対策の要否判定の例

果にもとづく対策の要否判定の例を示す。図 - 7 に示したケースごとの対策の要否の判定方法については以下のとおりである。

- 1) ケース A は、診断時に性能が限界値を上回っており、設計供用期間中にも性能の限界値を上回ると予測されるので対策が必要とならない。
- 2) ケース B は、性能が限界値を上回っているが、設計供用期間中に限界値を下回ると予測されるので、計画的に対策が必要となる。
- 3) ケース C は、診断時に性能が性能の限界値を満足しないため、速やかに対策が必要となる。

## 4. 対策方法の検討

### 4.1 対策工法の選定

診断により対策が必要となった橋梁または部位・部材は、対策の実施により、設計供用期間内において供用目的に適した所要の機能を確保できる性能を有するように補修または補強する必要がある。対策工法の選定は、下記の方法で行う。また、その手順を図 - 8 に示す。

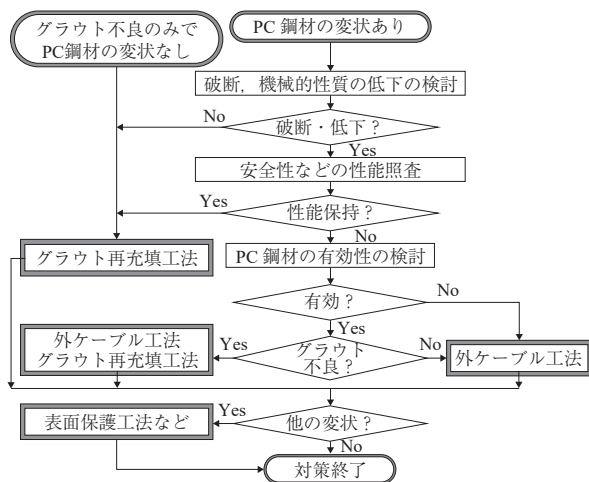


図 - 8 対策工法の選定の手順

- 1) 診断時に PC グラウトの未充填箇所が確認され、PC 鋼材の破断や腐食に伴う機械的性質の低下がない場合は、耐久性および安全性の確保のため「PC グラウトの再充填工法」を実施する。(未充填の場合は、PC 鋼材とコンクリートとの付着が確保されず、平面

保持の仮定が成立しないため、終局限界状態の限界値が低下する。)

- 2) 診断時に PC グラウトの未充填箇所や PC 鋼材の変状が確認され、PC 鋼材の破断や腐食に伴う機械的性質の低下がある場合は、安全性などの検討を行い、安全性などが確保できない場合は、「外ケーブル工法」を実施する。
- 3) 前記の検討において、PC グラウトの再充填により既存の PC 鋼材によるプレストレスの一部が有効に作用する場合は、「外ケーブル工法」に加えて「PC グラウトの再充填工法」も併せて実施する。
- 4) PC グラウトの未充填に起因する変状以外の変状については、「表面保護工法」、「電気化学的防食工法」および「ひび割れ補修工法」などを必要に応じて実施する。

### 4.2 PC 鋼材の破断、機械的性質の低下の検討

「PC 鋼材およびプレストレスの状態調査」の結果から、PC 鋼材の破断または最大試験力や伸びなどの機械的性質の低下を確認または推定する。

PC 鋼材の破断は、削孔調査による PC 鋼材の破断を直接確認する方法および応力解放法などによるプレストレスの状態から破断を推定する方法により実施する。

### 4.3 性能照査および既存 PC 鋼材の有効性の検討

PC 鋼材は、腐食の進行により最大試験力や伸びなどの機械的性質が低下するため、終局限界状態の照査においてはこれを考慮する必要がある。PC 鋼材の腐食の程度については、削孔調査により確認することを標準とする。PC 鋼材の腐食の程度による機械的性質の低下については、既往の調査結果などを参考に決定する。既往の文献<sup>3)</sup>によれば、海岸部で 34 年間供用された PC 橋から採取した PC 鋼線 (SWPRIA, 5 mm) の引張試験データをもとに、腐食の程度に応じて機械的性質を表 - 3 および表 - 4 のとおり評価している。

表 - 3 腐食状況の分類

分類	腐食状況	質量減少率
1	薄錆が全面にあるがブラシで磨くと鋼面がでる。	1% 程度未満
2	錆が全面にあり、点状の錆が目立つ。	1~2.5% 程度
3	錆が全面にあり、ブラシで磨くと欠損が目立つ。	10% 程度未満
4	径が小さくなっている。	10% 程度以上

表 - 4 腐食状況の分類による PC 鋼材の材料特性値

分類	断面積	引張強度	ヤング係数	終局ひずみ
1	$A_p$	$f_{pu}$	$E_p$	制限なし
2	$0.94 A_p$			0.015
3	$0.85 A_p$			$0.84 f_{pu} / E_p$
4	0 (PC 鋼材は破断しているものとみなす。)			

PC 鋼材の破断や腐食による機械的性質の低下があった場合は、有効プレストレスが低下するため、安全性、供用性、復旧性などの性能を照査する必要がある。性能の照査にあたっては、対象橋梁または部位・部材に想定される作

用を適正に評価して設計応答値を算定しなければならない。同様に、設計限界値も材料の特性を適正に評価して算定しなければならない。応答値の算定においては、各限界状態に応じて、対象橋梁または部位・部材をモデル化して応答値を算定しなければならない。モデル化にあたっては、過大な補強などの対策にならないように、FEMなどによる解析モデルを用いることが望ましい。

対象橋梁または部位・部材において、安全性、供用性、復旧性などの性能が保持できない場合は、既存のPC鋼材の代替として外ケーブル工法によりプレストレスを導入する必要がある。既存のPC鋼材の有効性の評価は、下記の方法によることを標準とする。

- 1) プレストレスを0とみなすPC鋼材
  - ・破断しているPC鋼材
  - ・腐食状況の分類を指標としてプレストレスを0とみなすPC鋼材
  - ・PC鋼材位置のPCグラウトの全塩化物イオン濃度が、鋼材腐食発生限界濃度を超過しているPC鋼材
- 2) プレストレスを低減するPC鋼材
  - ・腐食状況の分類を指標として、断面積および終局ひずみを減じるPC鋼材

プレストレスを0および減じるPC鋼材においても、想定を超えるプレストレスが現に作用している場合もあるの

で、性能の照査にあたってはこれを考慮して外ケーブルの規模およびプレストレス量を決定する必要がある。

### 5. 外ケーブル工法

外ケーブル工法は、コンクリート部材の外側に配置した緊張材(PC鋼材)により橋梁の部位・部材にプレストレスを作用させる工法であり、図-9に示す部位・部材により構成される。外ケーブル工法の設計方法について既往の文献<sup>4)</sup>を参考に以下に述べる。

#### 5.1 性能にかかわる要求事項

コンクリート構造技術規準<sup>5)</sup>においては、性能にかかわる要求事項(Performance requirements)について、「構造物の性能にかかわる要求事項は、供用性、安全性、耐久性、復旧性といった構造物が果たすべき機能に対して設定されるものと、経済性、環境性、維持管理性といった構造物に求められる制約条件に対して設定されるものとする。」と規定している。本研究では、既設橋に設置する外ケーブル工法の設計において、これらの性能のうち、コンクリート構造技術規準で規定されている供用性、安全性、耐久性および維持管理性について、その照査方法の検討を行った。

#### 5.2 性能照査

対象とする部位・部材の性能照査は、表-5に示す性能にかかわる要求事項を、設計供用期間中にわたって満足

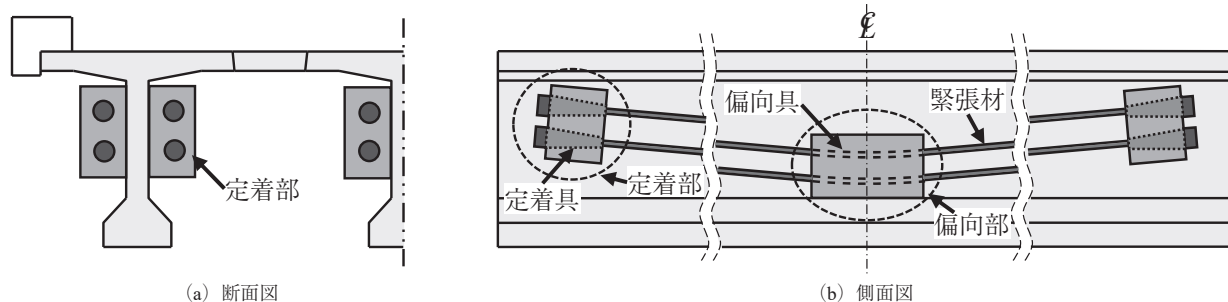


図-9 外ケーブル工法を構成する部位・部材(PCポストテンションバルブT桁橋の例)

表-5 外ケーブル工法の性能にかかわる要求事項

対象とする部位・部材	性能にかかわる要求事項				
	供用性	安全性	耐久性	維持管理性	
既設の橋梁および部位・部材	・外ケーブル工法実施時に、設定されている要求事項を満足すること。ただし、その時点において要求事項を変更する場合は、新たに設定する要求事項を満足すること。				
定着部	本体	・過度な変形や有害なひび割れを生じない。	・破壊しない。	・供用性、安全性を確保できる。	・容易に点検できる。
	定着具	・緊張材の定着を保持する。	・破壊しない。 ・緊張材の定着を保持する。	・供用性、安全性を確保できる。	・容易に点検、更新できる。 ・必要に応じて、緊張材の再緊張が可能である。
偏向部	本体	・過度な変形や有害なひび割れを生じない。	・破壊しない。	・供用性、安全性を確保できる。	・容易に点検できる。
	偏向具	・所定の形状に緊張材を偏向する。	・破壊しない。	・供用性、安全性を確保できる。	・容易に点検できる。
緊張材	緊張材	-	・所定の荷重まで破断しない。 ・疲労により破断しない。	・供用性、安全性を確保できる。	・容易に点検、更新できる。 ・必要に応じて、緊張材の再緊張が可能である。
	防錆処理	-	-	・緊張材を腐食させない。	・容易に点検できる。

することを確認することにより行う。以下に、対象とする部位・部材の性能照査について述べる。ただし、表 - 5 に示した項目以外にも性能照査が必要な要求事項がある場合は、適宜実施する必要がある。

### (1) 既設の橋梁および部位・部材

外ケーブル工法を適用した場合は、既設の橋梁および部位・部材に変形や応力度などの変化が生じる。とくに主桁に対しては、外ケーブル工法によるプレストレスが直接作用するため、コンクリートの応力度が大きく変化する。主桁の応力度の照査方法を以下に述べる。また、その手順を図 - 10 に示す。

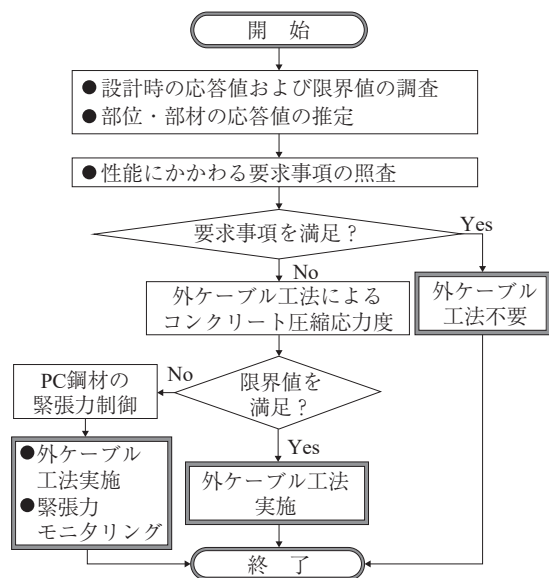


図 - 10 既設主桁の応力度の照査の手順

- 1) 設計図書および施工の記録から、設計時の応答値（応力度、たわみなど）や限界値を調査する。ただし、設計図書が確認できない場合は、復元設計を行う。
- 2) 1) の結果、診断時に実施した「外観調査」、 「PC グラウトの状態調査」 および 「PC 鋼材およびプレストレスの状態調査」の結果をもとに、部位・部材の応力度などの応答値を推定する。応答値の照査にあたっては、必要に応じて FEM などの解析方法を用いることが望ましい。
- 3) 2) の結果をもとに、供用性や安全性などの性能にかかわる要求事項を満足しているか照査する。
- 4) 既設の部位・部材の応答値が限界値を満足しない場合、または設計供用期間中に限界値を満足できなくなる場合は、外ケーブル工法による対策を実施する。
- 5) 対策時点のプレストレスによりコンクリートの圧縮応力度の限界値を超える場合は、外ケーブルによる緊張力を限界値よりも意図的に減少させ、主桁の応力度をモニタリングして、劣化の進展に応じて再緊張する方法も検討する。

### (2) 定着部本体

定着部本体の設計においては、既設橋の部位・部材と同様に、応答値が供用限界状態や終局限界状態の限界値を満

足するように設計する。耐久性に関しては、コンクリート構造の場合に環境作用に応じてひび割れの発生を制御したり、必要に応じてエポキシ樹脂塗装鉄筋やステンレス鉄筋などにより、鋼材の腐食防止を図る。鋼構造の場合は、環境作用に応じて、重防食塗装、金属溶射およびめっき処理などの防錆方法を検討する。定着部は、検査路などから、近接目視点検またはこれと同等な精度が確保できる点検方法により点検を可能とする必要がある。

### (3) 定着具

定着具の供用性および安全性にかかわる要求事項については、JSCE-E 503「PC 工法の定着具および接続具の性能試験方法」により照査を行う。定着具は、一般に鋼材が用いられているので、鋼などの腐食性材料を用いる場合は、十分な防錆処理により耐久性を確保する必要がある。また、定着具端部に設置されるカバーは、FRP などの鋼材以外の非腐食性材料の採用を検討する必要がある。

定着具は、定着部本体と同様に点検を可能とするとともに、定着具や緊張材に損傷や劣化が生じて更新が必要となった場合に、すみやかに更新できる構造が望ましい。新設橋の外ケーブル工法の定着具や緊張材については、この点を考慮して、更新が可能な構造を採用している事例が多い。したがって、既設橋に設置する定着具についても、緊張材とともに簡便に更新できる構造とする必要がある。

外ケーブル工法のプレストレスによりコンクリートの圧縮応力度の限界値を超える場合は、外ケーブルによる緊張力を限界値よりも意図的に減少させ、主桁の応力度をモニタリングして、既設 PC 鋼材の劣化の進展に応じて再緊張する方法を採用する場合がある。この場合は、再緊張が簡便に実施できる定着具を採用する必要がある。

### (4) 偏向部本体

偏向部本体は、主桁にコンクリート構造や鋼構造で直接固定される。設計においては、定着部本体と同様な方法で、供用性、耐久性および維持管理性にかかわる要求事項の照査を行う必要がある。偏向部においては、偏向することにより、緊張材相互や緊張材と偏向具の接触によりフレットイング (fretting) が生じて、緊張材の疲労破壊や緊張材の防錆処理 (亜鉛めっきやエポキシ樹脂被覆など) の損傷が生じる可能性がある。この詳細については、「(8) 緊張材の偏向によるフレットイング」において述べる。

### (5) 偏向具

偏向具は、緊張材を所定の角度に偏向させることを目的に設置する。偏向具は、緊張力に対し十分な偏向性能を有し、緊張材を損傷させない形状でなければならない<sup>6)</sup>。偏向具は、緊張材が偏向具の端部で角折れの生じることがないように曲面状に加工するか、緩衝材を設置するなどの対処が必要である<sup>6)</sup>。一般には、鋼管を曲面状に加工し亜鉛めっきしたディアボロ管や、両端をバルマウス加工し亜鉛めっきした曲げ鋼管が用いられている。また、偏向具は、偏向部本体と同様に点検を可能とする必要がある。

偏向具は、一般に亜鉛めっきした鋼管が用いられているため、塩害の影響を受ける場合など厳しい腐食性環境下においては、十分な防錆処理を行う必要がある。

(6) 緊張材 (使用材料)

緊張材としては、一般に以下に示す材料が使用できる。

- 1) JIS G 3536「PC 鋼線および PC 鋼より線」に規定されている PC 鋼材およびこれと同等な亜鉛めっき PC 鋼材、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼材
- 2) 「高強度 PC 鋼材を用いた PC 構造物の設計施工指針<sup>7)</sup>」に規定されている高強度 PC 鋼材およびこれと同等な高強度 PC 鋼材、亜鉛めっき高強度 PC 鋼材、エポキシ樹脂被覆高強度 PC 鋼材
- 3) 斜張橋などの斜ケーブルに使用されている高強度鋼線
- 4) 繊維強化ポリマーのうち緊張材として国内で実績のある AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymers) および CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) の緊張材

(7) 緊張材の疲労に対する安全性の照査

緊張材の疲労に対する安全性の照査のうち引張応力度の変動については、JIS G 3536 に規定されている PC 鋼材は照査を省略できる。高強度 PC 鋼材、高強度鋼線、AFRP および CFRP については、国内では参考とすべき規定がないため、ISO の規準<sup>8)</sup>を参考として試験を行いその安全性の照査を行う。この「ISO 6934-4 “Steel for the prestressing of concrete -- Part 4: Strand”」によれば、載荷上限引張応力度を引張強度の特性値  $f_{pk}$  の 70%、引張応力度範囲を 195 N/mm<sup>2</sup> として繰返し載荷試験を行い、繰返し回数 200 万回で破断しないこととしている。

定着具に定着された緊張材は、定着方法により表面が変形したり局所応力が発生したりするため、疲労強度が低下する。緊張材の定着具と組み合わせた場合の疲労に対する安全性の検討手法については、国内では参考とすべき規定がないため、FIP (現 fib) の報告書<sup>9)</sup>を参考として安全性の照査を行う。

(8) 緊張材の偏向によるフレットニング

偏向部においては、偏向することによりフレットニングが生じて、緊張材の疲労破壊や緊張材の防錆処理の損傷が生じる可能性がある。偏向部の緊張材を拘束しない緊張材を用いる場合は、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線を対象とした土木学会の規準<sup>10)</sup>において、その試験方法 JSCE-E 734「内部充填型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線試験方法 - フレットニング疲労試験 - (案)」が定められている。試験にあたっては、載荷上限引張応力度を緊張材の引張強度の特性値  $f_{pk}$  の 65%、引張応力度範囲を 50 N/mm<sup>2</sup> で繰返し載荷試験を行い、繰返し回数 200 万回で破断しないことにより疲労に対する安全性の照査を行う<sup>4)</sup>。

(9) 定着具と組み合わせた緊張材の偏向による疲労

緊張材を偏向した場合は、荷重作用や緊張材の振動により、定着具先端の緊張材が緊張材の長さ方向に対して直角方向に角折れ (曲げ疲労) して、疲労破壊を生じる可能性があるため、前項のフレットニング試験により、繰返し回数 200 万回で破断しないことにより定着具と組み合わせた緊張材の偏向による疲労に対する安全性の照査を行う。

(10) 緊張材の防錆および点検

緊張材に鋼材を用いる場合は、防錆を十分に実施しマル

チレイヤープロテクションとする必要がある。また、緊張材や防錆処理の変状の点検方法について、事前に保全計画を明らかにする必要がある。

6. PC グラウト再充填工法

PC グラウト再充填工法は、シース内の PC グラウト未充填箇所にて PC グラウトを再充填する工法であり、PC 鋼材を PC グラウトにより防錆すること、PC 鋼材とコンクリートとの付着を保持して平面保持の仮定を成立させること、腐食が生じている PC 鋼材の腐食の進行を抑止することを目的とする。

6.1 性能にかかわる要求事項

PC グラウト再充填工法において、未充填箇所にて再充填する PC グラウトは、表 - 6 に示す安全性および耐久性にかかわる要求事項を設計供用期間中において保持する必要がある。

表 - 6 PC グラウト再充填工法の性能要求事項

対象とする 部位・部材	性能にかかわる要求事項	
	安全性	耐久性
再充填 PC グラウト	・コンクリート部材と PC 鋼材との付着を確保して、平面保持の仮定を成立させる。	・PC 鋼材の腐食を防止する。 ・腐食した PC 鋼材の腐食の進行を抑止する。

6.2 性能照査

再充填する PC グラウトの性能照査は、表 - 6 に示した性能にかかわる要求事項を設計供用期間中にわたって満足することを確認することにより行う。以下に、再充填する PC グラウトの性能照査方法について述べる。また、対策の手順を図 - 11 に示す。

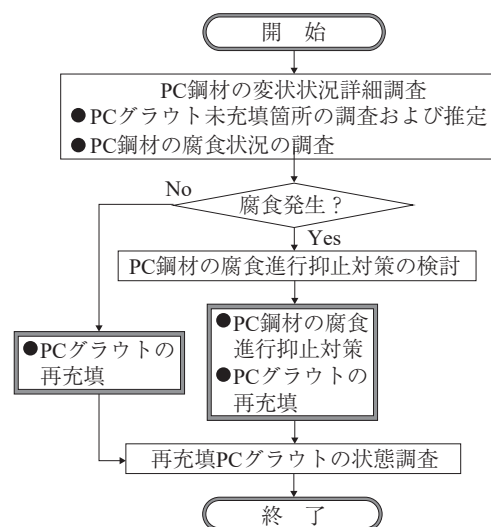


図 - 11 PC グラウト再充填工法の手順

(1) 安全性 (平面保持の仮定の成立)

PC グラウト未充填箇所は、平面保持の仮定が未成立となり、荷重の増加により PC 鋼材位置のコンクリートのひずみが増加しても PC 鋼材のひずみが増加しないため、PC グラウト充填箇所と比較して終局限界状態の断面耐力の限

界値が低下する。したがって、PC グラウト未充填箇所  
PC グラウトを確実に充填させ平面保持の仮定を成立させ  
る必要がある。このため、再充填する PC グラウトの圧縮  
強度は、新設時の PC グラウトと同等の性能を有するもの  
とし、再充填する PC グラウトの施工性能は、対象とする  
未充填箇所を模した実物大部分模型試験などにより事前に  
確認する必要がある。

(2) 耐久性 (PC 鋼材の腐食防止)

PC グラウト未充填箇所は、劣化因子 (酸素, 水, 塩化  
物イオンなど) の侵入により, PC 鋼材の腐食が発生する。  
これを防止するため, シース内に PC グラウトを再充填し  
劣化因子の侵入を抑制するとともに, PC グラウトのアル  
カリ雰囲気により, 鋼材表面に不働態皮膜を形成させて,  
PC 鋼材の腐食を防止する。このため, 再充填する PC グ  
ラウトの材料は, 新設時の PC グラウトと同等の腐食防止  
性能を有することを確認する必要がある。

(3) 耐久性 (腐食した PC 鋼材の腐食進行抑制)

性能照査は, 腐食が発生した PC 鋼材の実物大部分模型  
を用いて対象とする PC グラウトの再充填工法を実施し,  
PC 鋼材の腐食の進行を抑制可能か否かについて性能を確  
認する。PC 鋼材の腐食の進行の抑制方法としては, 図  
- 12 に示すように, 亜硝酸リチウム水溶液を事前に未充  
填個所に注入して, 鋼材表面に不働態皮膜を再形成させ  
る方法などがある。

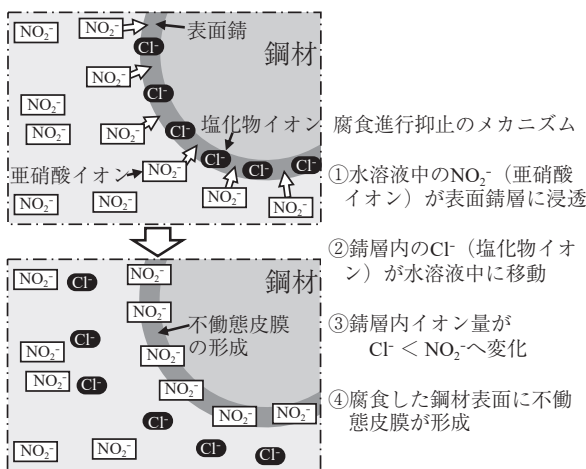


図 - 12 PC 鋼材の腐食の進行の抑制方法の例

6.3 再充填した PC グラウトの状態調査

再充填した PC グラウトについて, 必要に応じて充填不  
足の有無や程度を調査することを目的として実施する。調  
査は, 表 - 1 に示した実績のある非破壊検査や微破壊検  
査方法を用いて行う。

7. ま と め

本研究は, 前述の既往の規準や変状事例などを参考に,  
PC グラウトの充填不良などに起因して変状が発生または  
発生するおそれがある既設のポストテンション方式の PC  
橋の診断方法や対策方法について検討を行ったものであ  
る。本研究の検討結果は, 以下のとおりである。

- 1) 既設ポストテンション PC 橋の診断の手順を図 - 4  
に示した。また, 既往の文献などを参考に, 診断に  
おける詳細調査を「外観調査」, 「PC グラウトの状態  
調査」および「PC 鋼材およびプレストレスの状態調  
査」に分類して調査方法や適用条件などを示した。
- 2) 主な対策方法として「外ケーブル工法」および「PC  
グラウトの再充填工法」を示すとともに, 対策工法  
の選定の手順を図 - 8 に示した。
- 3) 「外ケーブル工法」および「PC グラウトの再充填工法」  
の供用性, 安全性, 耐久性および維持管理性にかか  
わる要求事項を表 - 5 および表 - 6 に示した。
- 4) 前述のおおのの性能にかかわる要求事項の照査方  
法について明らかにした。

8. おわりに

既設ポストテンション PC 橋においては, PC グラウト  
の充填不良により, PC 鋼材の腐食や破断などの変状が発  
生している橋梁も少なくない。この結果, 通行制限を余儀  
なくされている橋梁も散見される。この対策方法としては,  
外ケーブル工法による補強や PC グラウトの再充填工法な  
どがある。これらの対策を実施するためには, 既設ポスト  
テンション PC 橋の現状を適切に診断することがきわめて  
重要である。

一般に社会インフラとして整備されている PC 橋は, 性  
能にかかわる要求事項を満足する状態で, なるべく長期に  
わたって利用することがライフサイクルコストの削減とし  
て重要となる。このためには, 適切で効率的な診断を实施  
し, この結果に基づいた有効で効率的な補修・補強を推進  
することが重要である。本研究がその一助となれば幸いで  
ある。

参考文献

- 1) プレストレストコンクリート工学会: 既設ポストテンション橋  
の PC 鋼材調査および補修・補強指針, 2016.9
- 2) プレストレストコンクリート工学会: コンクリート橋・複合橋  
保全マニュアル, 2018.7
- 3) PC 橋の改造技術に関する共同研究委員会: 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], プレス  
トレスト・コンクリート建設業協会, pp.88-93, 2009.9
- 4) 酒井秀昭, 大熊 光, 黒輪亮介, 松原喜之: 外ケーブル工法に  
よる既設 PC 橋の補修・補強, Vol.62, No.3, pp.37-43, 2009.9
- 5) プレストレストコンクリート工学会: コンクリート構造技術規  
準-性能創造による設計・施工・保全-, 2019.10
- 6) プレストレストコンクリート技術協会: 外ケーブル構造・プレ  
キャストセグメント工法設計施工規準, 2005.6
- 7) プレストレストコンクリート技術協会: 高強度 PC 鋼材を用いた  
PC 構造物の設計施工指針, 2011.6.
- 8) ISO: ISO 6934-4 "Steel for the prestressing of concrete -- Part 4:  
Strand", 1991.
- 9) FIP: Recommendations for the acceptance of post-tensioning  
systems, International Federation for Prestressing, 1993.
- 10) 土木学会: エポキシ樹脂を用いた高性能 PC 鋼材を使用するプ  
レストレストコンクリート設計施工指針 (案), コンクリートラ  
イブラリー 133, 2010.8.

[2020年8月21日受付]