

活用事例③：ひび割れが生じた橋梁上部工（PC 桁）の評価事例

1. 概要

1.1 対象構造物の概要

構造形式：単純 PCT 桁橋，逆 T 式橋台

橋 長：27.8m， 支間長：27.0m

供用開始：1980 年（昭和 55 年）

設計基準：昭和 53 年道路橋示方書

環境条件：積雪寒冷地に架橋された国道橋

使用材料：AE 早強ポルトランドセメント（上部工）

交差条件：河川（桁下空間の利用なし）

1.2 維持管理計画

設計耐用期間：100 年

維持管理区分：構造物や路線の重要度，残存供用期間等を考慮して事後維持管理と設定

1.3 全体的な流れ

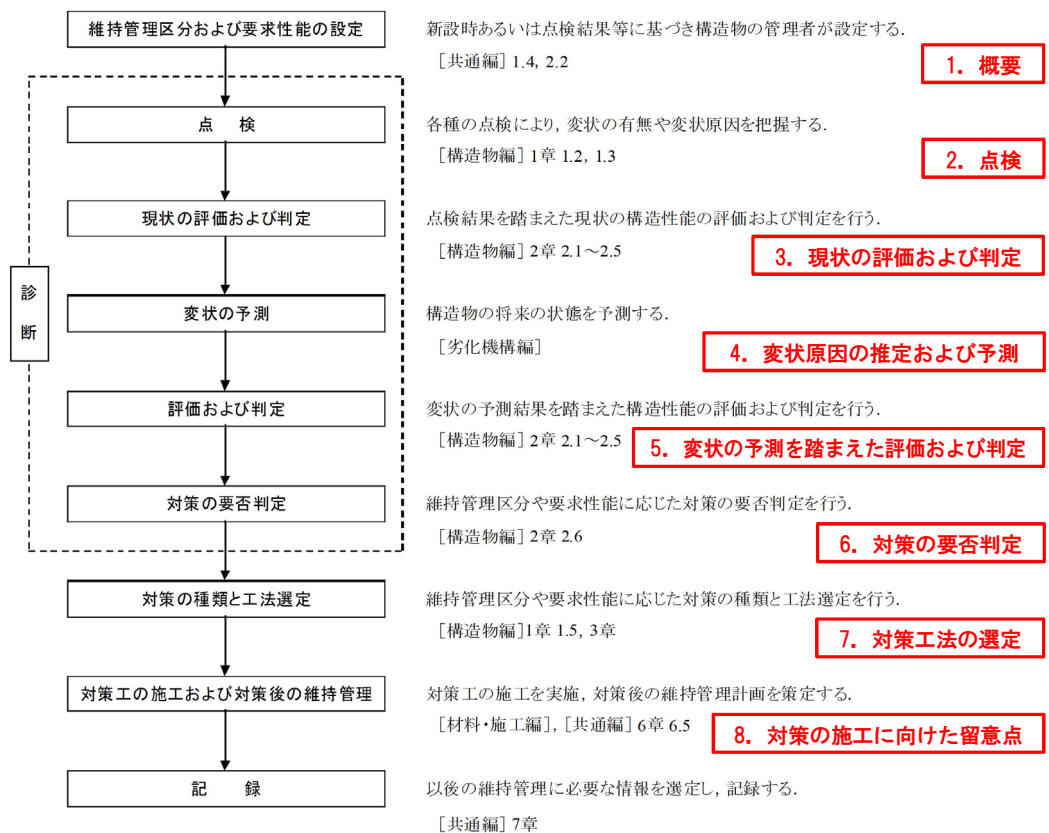


図 1.1 対策に至るまでの全体的な流れ^{※1}

※1 本指針 [構造物編] p.1. 図－1.1.1

2. 点検

2.1 点検概要

近接目視点検を実施して、外観変状を調査した。ここで、点検を実施するにあたっては、本指針〔構造物編〕の重点点検箇所留意して行った。

2.2 点検結果（PC 桁下縁の支間中央付近および桁端部の PC 鋼材に沿ったひび割れ）

PC 桁下縁の支間中央付近においてコンクリートに $w=0.1\text{mm}$ 程度の曲げひび割れが確認されたが、コンクリート片が剥落するような状態には至っていない。

また、桁端部には PC 鋼材のシースに沿った同じく $w=0.1\text{mm}$ 程度のひび割れが確認された（図 2.1 参照）。

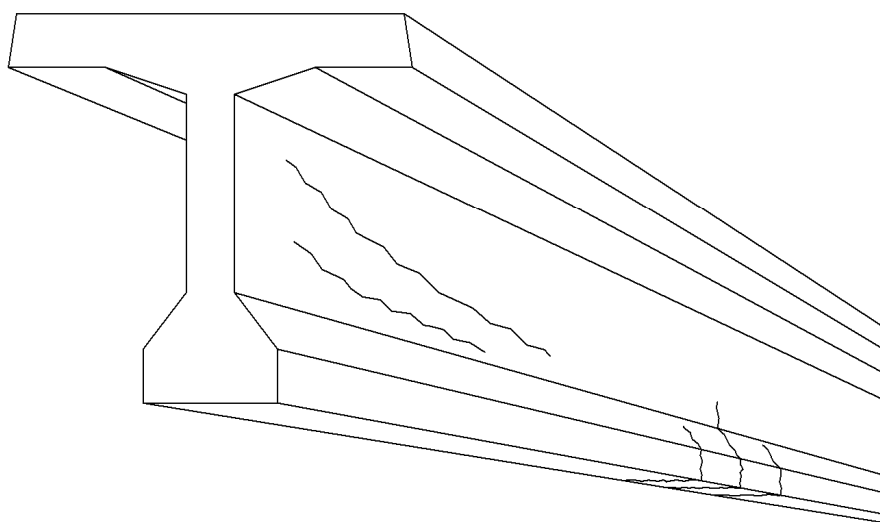


図 2.1 PC 桁で確認された外観変状

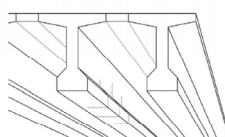
3. 現状の評価および判定

3.1 評価および判定の概要

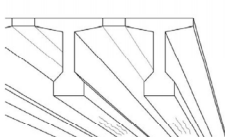
近接目視点検の結果に基づいて、本指針[構造物編]の「2.5 構造性能の評価および判定」に示した構造性能評価判定表により行う(表 3.1 および表 3.2 参照)。

表 3.1 構造性能評価判定表[PCT 桁]※2

構造性能評価判定		PCT桁		想定される変状原因	外観変状の程度	現状の構造性能に対する評価										構造性能レベル (レベル1～4)		
構造物	部位	変状 パターン	変状内容			安全性					使用性					安全性	使用性	
						部材破壊			機能安全		快適性			機能性				
						破壊	疲労	安定	走行 限界	第三者 影響度 限界	走行性 歩行性	外観	騒音振動		水密性 気密性 遮断性 など			
PCT桁	支間中央部	b-1	主桁下縁付近 (橋軸直角方向ひび割れ)	曲げ耐力不足、過荷重、主 方向PC鋼材の破断など	$0.0\text{mm} \leq w < 0.2\text{mm}$	×	—	—	—	●	—	●	—	—	—	3	1	
					$0.2\text{mm} \leq w < 0.3\text{mm}$	×	—	—	—	●	—	●	—	—	—	3	1	
					$0.3\text{mm} \leq w < 0.4\text{mm}$	×	—	—	—	▲	—	▲	—	—	—	3	2	
					$0.4\text{mm} \leq w$	×	—	—	—	▲	—	▲	—	—	—	3	2	
		b-2	応力集中、シーす内クラウ ト不良による凍害、アルカリ シリカ反応など	$0.0\text{mm} \leq w < 0.2\text{mm}$	●	—	—	—	●	—	●	—	—	—	1	1		
				$0.2\text{mm} \leq w < 0.3\text{mm}$	●	—	—	—	●	—	●	—	—	—	1	1		
				$0.3\text{mm} \leq w < 0.4\text{mm}$	▲	—	—	—	▲	—	▲	—	—	—	3	2		
				漏水、遊離石灰析出	▲	—	—	—	▲	—	×	—	—	—	3	2		



図b-1 主桁下縁付近の橋軸直角方向のひび割れ



図b-2 主桁下縁付近の橋軸方向のひび割れ

要求性能に対する評価(構造性能への影響度)

● : 影響なし(要求性能を満足している)
▲ : 影響あり(性能が低下している)
× : 性能不足(性能が不足しているか、その可能性がある)

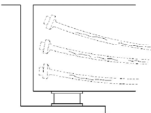
構造性能レベル

レベル1 : 性能に影響はないが、外観変状が認められる
レベル2 : 性能は低下しているが、補修で性能回復が可能
レベル3 : 性能は低下しているが、大規模補修や補強で性能回復が可能
レベル4 : 性能が低下し、性能不足となっている

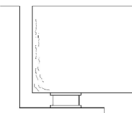
※2 本指針 [構造物編] p.113. 図一解 2.5.3(9)構造性能評価判定表 (PCT 桁)

表 3.2 構造性能評価判定表[PCT 桁]※3

構造性能評価判定 PCT桁																	
構造物	部位	変状 パターン	変状内容	想定される変状原因	外観変状の程度	現状の構造性能に対する評価										構造性能 レベル (レベル1~4)	
						安全性					使用性						
						部材破壊			機能安全		快適性			機能性		安全性	使用性
破壊	疲労	安定	走行 限界	第三者 影響度 限界	走行性 歩行性	外観	騒音振動	水密性 気密性 遮音性 など									
PCT桁	桁端部	a-1	桁端部の主方向PC鋼材 定着部付近のひび割れ・ PC鋼材に沿った変状	応力集中、上縁定着箇所 からの水の浸入、シーラ ント不良による凍害・ 塩害など	0.0mm≦w<0.2mm	●	—	—	—	—	—	●	—	—	1	1	
					0.2mm≦w<0.3mm	●	—	—	—	—	—	●	—	—	1	1	
					0.3mm≦w	●	—	—	—	—	—	▲	—	—	1	2	
					漏水、遊離石灰析出	▲	—	—	—	—	×	—	—	2	2		
		a-2	主桁縦筋のPC鋼材定着 部後端のコンクリート部付 近に発生する変状	応力集中、定着部後端のコン クリートの施工不良、凍 害・塩害など	0.0mm≦w<0.2mm	●	—	—	—	—	—	●	—	—	1	1	
					0.2mm≦w<0.3mm	●	—	—	—	—	—	●	—	—	1	1	
					0.3mm≦w	●	—	—	—	—	—	▲	—	—	1	2	
					後端のコンクリートの剥離	●	—	—	—	—	×	—	—	1	2		
		a-2	桁端部付近の不規則なひ び割れ	凍害など	外観変状なし (表面ひび割れ発生するが外観確認不能) スケーリング、ひび割れ、ポツアウト、 砂利化の発生	●	—	—	—	—	—	●	—	—	1	1	
					骨材の露出、骨材の剥離	▲	—	—	—	—	—	▲	—	—	1	2	
					鋼材露出、鋼材腐食	▲	—	—	—	—	—	×	—	—	1	2	



図a-1 桁端部のPC鋼材付近のPC鋼材に沿ったひび割れ



図a-2 PC鋼材定着部後端のコンクリート付近のひび割れ
または、桁端部付近の不規則なひび割れ

要求性能に対する評価(構造性能への影響度)

●: 影響なし(要求性能を満足している)
▲: 影響あり(性能が低下している)
×: 性能不足(性能が不足しているか、その可能性がある)

構造性能レベル

レベル1 : 性能に影響はないが、外観変状が認められる
レベル2 : 性能は低下しているが、補修で性能回復が可能
レベル3 : 性能は低下しているが、大規模補修や補強で性能回復が可能
レベル4 : 性能が低下し、性能不足となっている

※3 本指針 [構造物編] p.111. 図一解 2.5.3(7)構造性能評価判定表 (PCT 桁)

3.2 評価および判定結果

この評価をもとに構造性能のレベルを判定すると、安全性に対してはレベル3、使用性に対してはレベル1となる。

表 3.3 現時点における構造性能判定

	安全性		使用性	
	要求性能に対する評価	構造性能レベル	要求性能に対する評価	構造性能レベル
現時点	×	3	●	1
	(性能不足)		(影響なし)	

4. 変状原因の推定および予測

4.1 変状原因の推定

曲げひび割れは、PC グラウト充填不足や PC 鋼材定着部の後埋め部施工不良等に起因する PC 鋼材の損傷でプレストレス不足による変状であると推定される。また、グラウト充填不足や定着部の後埋め部施工不良によりシースに橋面から水が侵入し、シースに沿ったひび割れが発生したものと推定される。そのためシース内部の詳細調査が必要であると判断した。

本橋では、PC 鋼材の定着は上縁定着方式が採用されている。この上縁定着 PC 鋼材のシース内の詳細調査を行ったところ、グラウトの未充填区間の存在および PC 鋼材の多くに破断が確認された。

グラウト未充填区間の確認方法については、X 線透過撮影法等の非破壊検査やはつり調査でシース内部を直接確認することによって空洞の有無が確認できる。また、PC 鋼材の腐食や破断の有無の確認方法については、ボアホールカメラを利用した目視確認等が挙げられる。ここでは、それらの調査方法については詳述しないため、各種の専門書籍を参照されたい。

(1) 構造的な要因

PC 鋼材の上縁定着方式は、旧建設省標準設計・ポストテンション方式標準 T 桁橋において、端部定着方式が採用された 1994 年（平成 6 年）改訂前まで使用されている定着方式である（図 4.1 参照）。また本橋は橋面上への防水層についても未設置であったため、橋面上に滞留した水分等が上縁定着部の後埋めコンクリート部を劣化させて、シース内に水分が浸入したものと推定する（図 4.2 参照）。

グラウト未充填区間が生じた原因としては、本橋が建設された昭和 60 年当時は、グラウト材料として現在使用されているノンブリーディングタイプではなく、ブリーディングタイプが使用されていた（表 4.1 参照）。このタイプは、材料の一部であるアルミニウム粉末を膨張させ、この効果によりブリーディング水を排出させることを標準していたが、完全に排出させることができなかったと推定する。

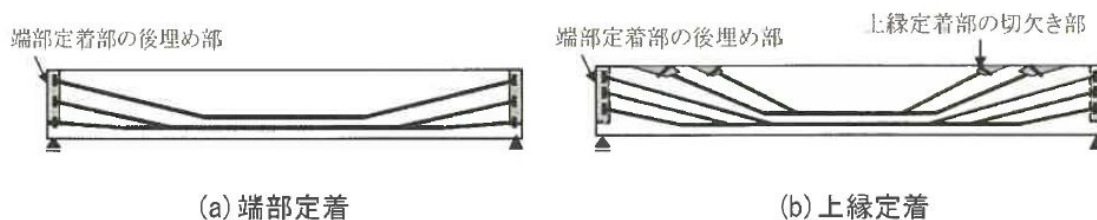
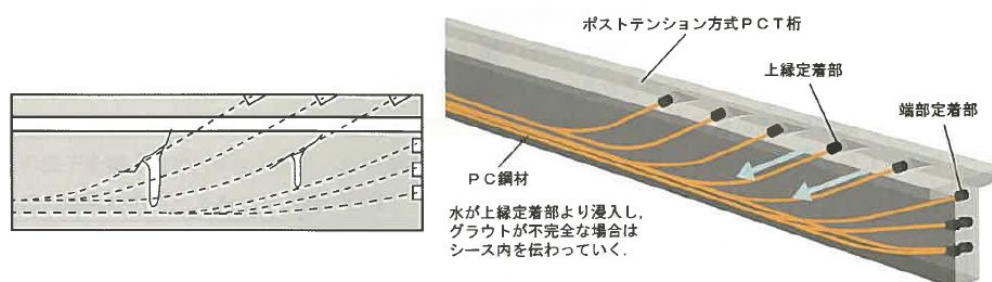


図 4.1 PC 鋼材の定着位置¹⁾

図 4.2 上縁定着部からの水の浸入経路¹⁾表 4.1 PC グラウト材料の主な変遷¹⁾

	1950 年代	1960 年代	1970 年代	1980 年代	1990 年代	2000 年代
材料		セメント分散剤とアルミニウム粉末	減水剤とアルミニウム粉末を混合した混和剤	ノンブリーディング型の登場	ノンブリーディング型標準	
ブリーディング率		0~5%以下	3%以下	2%以下	3%以下	0%以下
膨張率		0~5%以下を標準	10%以下	5~10%	-0.5~0%	
塩化物量					0.3kg/m ³ 以下	

(2) 環境的な要因

架橋位置は積雪寒冷地であり、冬期には塩分を含んだ凍結防止剤が大量に散布される場所である。よって、上縁定着部のグラウト未充填区間が生じたことで、雨水や凍結防止剤を含む水分等がグラウト未充填のシース内部に浸入し、長期間にわたって塩分が供給され続けたことによってPC鋼材の一部が破断に至ったものと推定する。

ポストテンション桁においては、主方向鉄筋として構造細目で規定される最小鋼材量程度の鉄筋しか配置されていないため、曲げ耐力への寄与度が少なく、PC鋼材の一部破断によりプレストレス量が減少し、曲げ耐力が大きく低下したことで、支間中央部に曲げひび割れが発生したものと考えられる。

(3) 曲げひび割れ発生コンクリート応力度の算定およびPC鋼材の破断本数の推定

PC鋼材破断と曲げひび割れとの因果関係を明確にすることを目的として、曲げひび割れは死荷重作用時の状態にて発生しているものと推測し、以下の検討を行なった。

① 死荷重作用時の主桁下縁にひび割れが発生する引張応力度

コンクリート標準示方書²⁾より、コンクリートの曲げひび割れ強度を定めた。その結果、曲げひび割れ強度は $f_{bck} = -1.431 \text{ N/mm}^2$ と算出された。

②死荷重作用時の下縁に引張応力度が生じる PC 鋼材の減本数の試設計

当時の設計図書を参照して復元設計を実施した。竣工年、橋長および幅員等の条件から、昭和 54 年の旧建設省標準設計を元に復元を行った。

その結果、前項の曲げひび割れ発生応力度を超え、曲げひび割れが発生すると考えられる状態は、約半数の PC 鋼材が破断している状態であると試算された。この時の引張応力度は曲げひび割れ強度 $f_{\text{bck}} = -1.431 \text{ N/mm}^2$ に対して -1.75 N/mm^2 であった。

したがって、死荷重作用時にひび割れが生じると仮定した場合、PC 鋼材の破断本数は約半数であると推定される。

③残存プレストレスの計測および算定

②の試設計の結果と実際のプレストレス量を比較する。

残存プレストレス量の調査は、コンクリートの応力状態を把握するものであり、現有応力状態や健全度把握のために行なわれる。その方法は、応力解放法を応用したスリット応力解放法、コア応力解放法、スロットストレス解放法、鉄筋切断法などが挙げられる。

ここでは、既設構造物への影響を最小限に抑え、精度が他工法に比較して優れるコア応力解放法を用いた。

◆コア応力解放法

コア応力解放法は、応力調査の対象箇所に 2 方向のひずみゲージを貼り付け、コアを切り込むことによって解放されるひずみを測定する方法である。2 方向のひずみ差と算定式により乾燥収縮およびクリープひずみの影響を消去することにより、知りたい有効応力を取り出すことができる。コア応力解放法の測定原理を図 4.3 に示す。

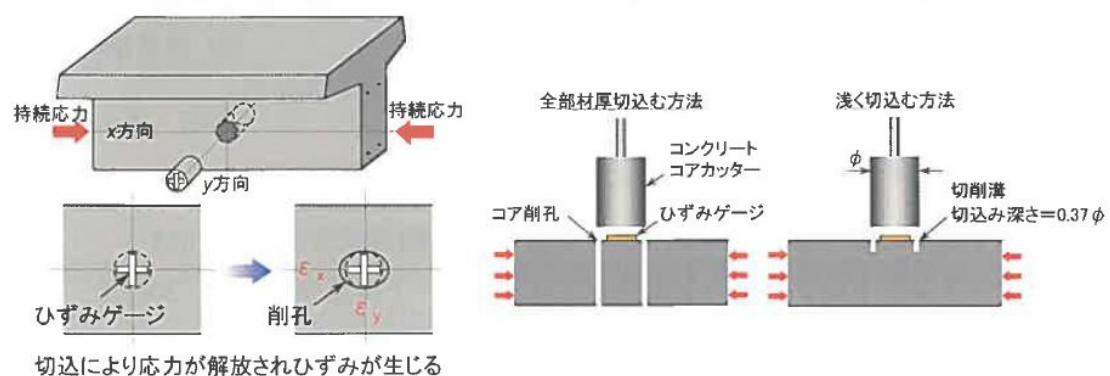


図 4.3 コア切込法の測定原理¹⁾

復元設計および計測結果における有効プレストレス量を比較した。

その結果、PC 鋼材の約半数が破断している場合の復元設計理論値と計測結果がほぼ一致する結果が得られた。

4.2 変状の予測

今後、上縁定着部付近からの塩分を含んだ水分等の供給により、PC 鋼材の破断がケーブルの一部ではなく、ケーブル全域にわたって広がっていく可能性がある。その場合、既に発生している曲げひび割れの進展や新たなひび割れの発生や、せん断耐力の低下によるせん断ひび割れの発生も懸念される。

なお、環境作用による変状予測と異なり、PC 鋼材の破断を定量的に予測することは困難である。また、3.2 項より現時点での構造性能評価はレベル 3（安全性）である。そのため、ここでは以降の変状予測は行わず、現時点の構造性能に対して対策工を検討することとした。

5. 変状の予測を踏まえた評価および判定

前述 4.2 項で記載したとおり、変状予測は行わない。現時点における構造性能に対して以降で対策工を検討する。

6. 対策の要否判定

以上より、現時点で構造性能レベルが 3 である。

耐用期間内に構造性能レベルが 3 となり大規模補修が必要である。安全性（断面破壊）に対する性能の回復を目的とした対策を講じるものとする（表 6.1 参照）。

表 6.1 維持管理区分と構造性能レベルに応じた対策工の関係※4

		維持管理区分		
		維持管理区分 A (予防維持管理)	維持管理区分 B (事後維持管理)	維持管理区分 C (観察維持管理)
構造性能 のレベル	レベル 1	予防維持管理の場合 には、補修時期や効果 を検討した後に、 予算等の制約条件を 考慮した上で最適な 対策工を選択する。	①	①
	レベル 2		②	①
	レベル 3		③	①, ④ 調査時点(竣工後 38 年)
	レベル 4		④	④

ここに、

1) 構造性能レベル

レベル 1：性能に影響はないが、外観変状が認められるレベル。

レベル 2：性能は低下しているが、補修で性能回復が可能なレベル。

レベル 3：性能は低下しているが、大規模補修や補強で性能回復が可能なレベル。

レベル 4：性能が低下し、性能不足となっているレベル。

2) 対策の種類

①：経過観察（無処置）・点検強化

②：補修（軽微）

③：補修（大規模）

④：供用制限・解体撤去（または更新）

※4 本指針「構造物編」p.10. 表一解 1.5.1

7. 対策工法の選定

7.1 対策の種類

構造性能レベルに応じた対策の種類は、維持管理区分を「事後維持管理」とした場合にはレベル3では補修（大規模）となる。

力学的な性能の回復を目的とした補修工法は図 7.1 のように分類されるが、プレストレス不足に対する対策としては、プレストレス導入工法の適用が考えられる。

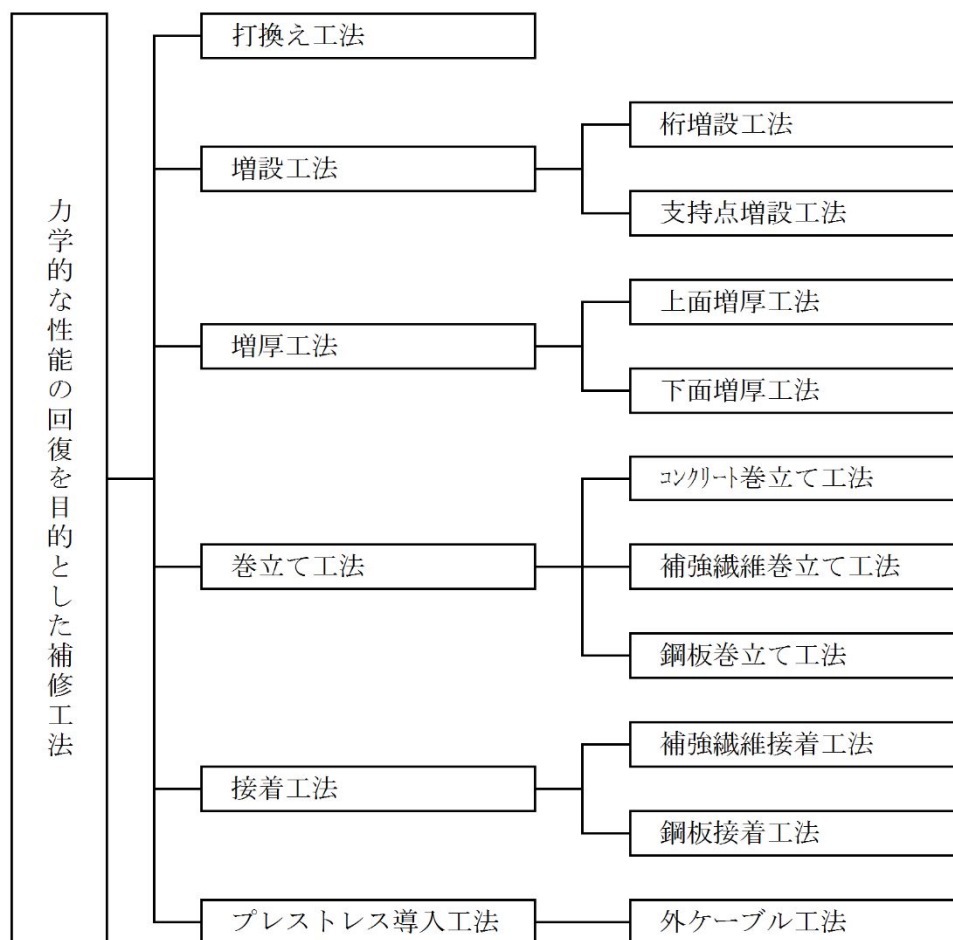


図 7.1 力学的な性能回復を目的とした補修工法の分類※5

※5 本指針〔構造物編〕p.157. 図－解 3.1.1

7.2 補修工法の選定

プレストレス導入工法は、構造物の部材にプレストレスを与えることで耐荷性を向上させる工法であり、一般には外ケーブル工法および成型板緊張・接着工法に分類されるが、本例のようにプレストレスの不足量が大きい場合は、外ケーブル工法の適用が妥当である。

7.3 補強設計の手順

外ケーブル工法による補強設計の手順を図 7.2 に示す。

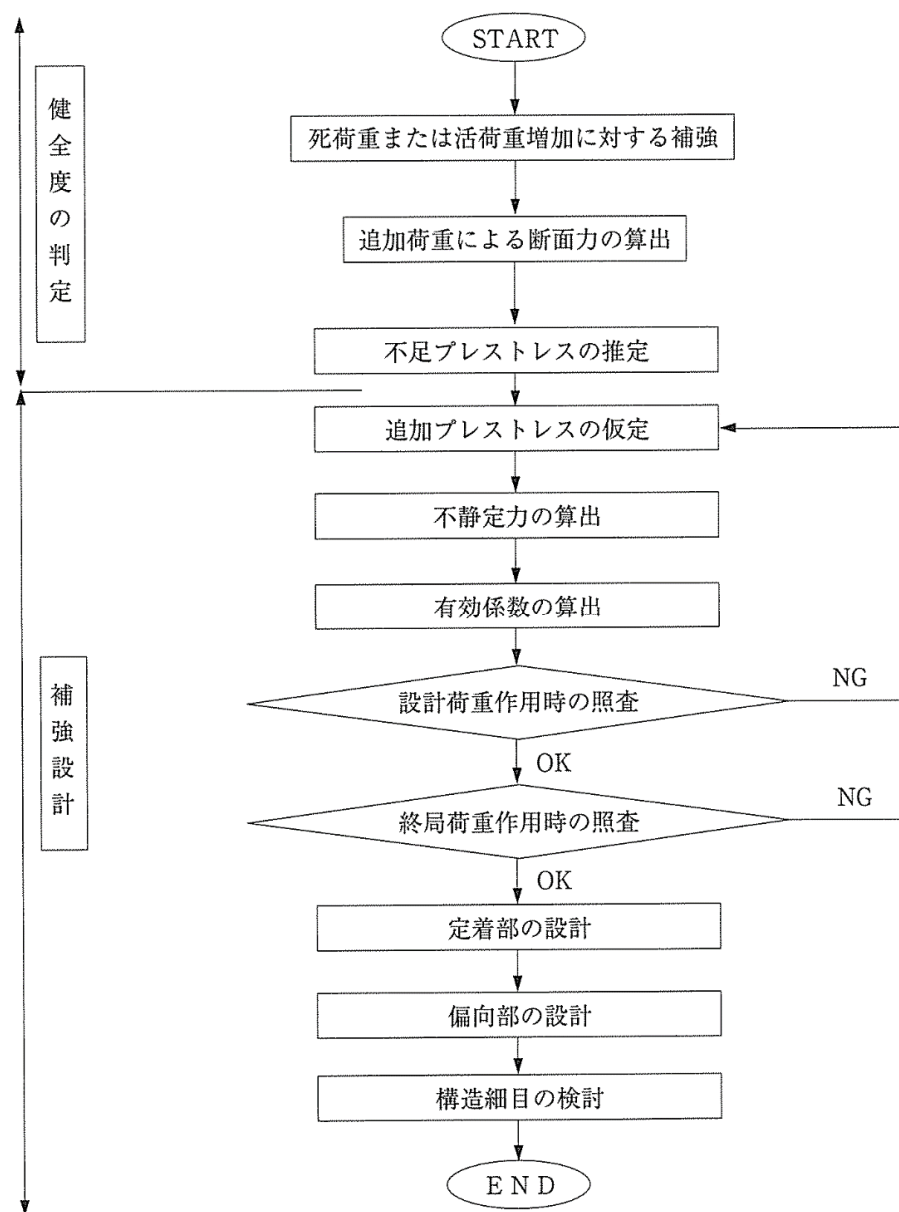


図 7.2 外ケーブル工法の補強設計手順³⁾

7.4 外ケーブルタイプの選定

不足しているプレストレス量より外ケーブルの荷重タイプを算出・選定するが、既設主桁 1 本に設置できる外ケーブル本数は、主桁の両側に 1 本（合計 2 本）程度と想定されることを予め考慮することが必要である。

なお、これ以降の補強計算方法については、参考文献 3) に詳しく整理されているので参考にするとよい。

7.5 その他の併用すべき対策工

前述にて、不足するプレストレス量に対して外ケーブル補強工を行うことにより、安全性（断面破壊）に対する対策について論じた。

一方、今後残存している PC 鋼材の破断を防ぐための対策工も併用すべきである。上縁定着箇所から橋面水の浸透を防ぐため、橋面防水工の併用を行うことが望ましい。また、シース内のグラウト未充填部の空隙に対しては、グラウト再注工法も併用することが望ましい。なお、ここでは橋面防水工とグラウト再注工法についての詳述は割愛する。

橋面防水工については参考文献 4) や道路管理者が定める基準類を参考にすると良い。グラウト再注工法については参考文献 5), 6) などに紹介されているので参考にされたい。

以上より、本橋に対する対策工は以下となる。

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ・ 外ケーブル工法 ・ 橋面防水工 ・ グラウト再注工法 |
|--|

8. 対策の施工に向けた留意点

外ケーブル工法には多くの留意点があるため、既往の文献^{3),5)}などを参考にするのがよい。ここでは代表的な留意点について抜粋して述べる。

8.1 補修材料の選定に対する留意点

外ケーブルは、耐久性の観点からあらかじめ防錆材で被覆された PC 鋼材を使用することが望ましい。また、最近では新しい緊張材として炭素繊維やアラミド繊維などをプラスチックで成形した FRP などの緊張材が用いられることがあるが、採用に当たっては各種試験による品質確認のほか、施工性、維持管理性などを総合的に判断することが望ましい。

鋼製の定着装置および偏向装置と既設桁とのすき間を充填するために用いる間詰材には、セメント系注入材料またはエポキシ樹脂を用いることが一般的であり、所要の品質を有するものを使用しなければならない。また、施工時や養生期間中の外気温が品質に与える影響が大きいため、低温環境下で施工する場合には、低温環境下における性能が明らかな間詰材を選定しなければならない。

PC グラウトを用いる場合は、ノンブリージングタイプを用いることを原則とする。

保護管は、施工中および完成後において、荷重や衝撃に対して所要の強度を持ち、外気・温度変化・乾湿繰返しなどの環境条件に対して耐久性のあるものを使用しなければならない。

防錆材は、PC 鋼材および鋼製の定着装置・偏向装置の防錆、保護を目的として、科学的暗転性に優れ、経年変化による劣化が少なく耐久性に優れたものでなければならない。

8.2 施工方法に対する留意点

既設桁の寸法は施工誤差などにより設計図書と異なる場合があるため、事前に既設構造物寸法や既設鉄筋やPC鋼材位置を調査する必要がある。特に削孔を行う場合には、既設鉄筋およびPC鋼材位置を調査した上で、それらを傷つけないように施工しなければならない。図面通りの削孔位置が確保できない場合には、設計計算書において安全が確保できる削孔範囲を確認する必要がある。なお、アンカー削孔に関する留意事項は、本指針[耐震補強編]の「4.7 施工時の留意事項」にも記載があるので参考にされたい。

また、外ケーブルの取り付け作業は、被覆材に損傷を与えないように慎重に行わなければならない。緊張作業時は、桁断面および構造全体に対して対称となるよう桁の左右を同時に緊張することを原則とする。

【参考文献】

- 1) 公益社団法人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，平成28年9月
- 2) 公益社団法人土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】
平成30年3月
- 3) 社団法人プレストレスト・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），平成19年4月
- 4) 公益社団法人日本道路協会：道路橋床版防水便覧，平成19年4月
- 5) 公益社団法人土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】
平成30年10月
- 6) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2013-，平成25年

以上（技術指針の活用事例③）