

# PC 桁大規模修繕工事における 外ケーブル補強設計方針の確立と施工

阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全工事課	西原 知彦
阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全工事課	野崎 悟
阪神高速道路(株)大阪管理局保全部保全設計課	橋爪 大輔
阪神高速道路(株)建設・更新事業本部神戸建設部プロジェクト第一課	佐藤 彰紀

## 要 旨

昭和 60 年の阪神高速設計基準が適用される以前に製作されたポストテンション PC 桁は、PC ケーブルの一部が桁上面側に定着され、防水工が未整備な状態の舗装直下に定着部があることに加えて、シース内のグラウト充填不良等が要因となり、後埋め部から雨水が浸透し、シース内に滞水、ケーブル腐食に至る事例がみられた。

阪神高速が進める大規模修繕事業では、ケーブル損傷の疑いがある PC 桁の耐荷性能を現行基準レベルまで向上させ、併せて建設時同一工区内の PC 桁に対する適切な補修と予防保全を実施している。本報告では、パイロット工事と位置付けして先行発注した工事において、詳細調査結果に基づき既設ケーブルの損傷度合いに応じた外ケーブル補強の設計方針を確立したため、施工内容とあわせて報告する。

**キーワード:** PC 桁, 大規模修繕工事, 外ケーブル, 用心ケーブル, 補強設計, 予防保全

## はじめに

昭和 60 年の阪神高速設計基準が適用される以前に製作されたポストテンション式プレストレストコンクリート桁(以下「ポステン PC 桁」という)は、内部に配置された PC ケーブルの一部が桁上面側に定着され、PC ケーブル緊張後に後埋めの処置が施されている。上面定着部は舗装直下であり、建設時は防水工が未整備であったことや、PC ケーブルと桁を一体化させ PC ケーブルを保護するシース内のグラウトが十分に充填されていないこと等が要因となり、後埋め部から雨水が浸透し、シース内に滞水、ケーブル腐食に至る事例がみられた(図-1、図-2、写真-1 参照)<sup>1)</sup>。

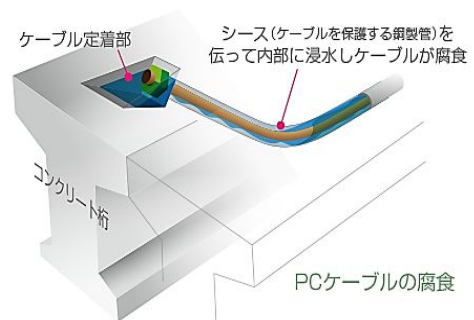


図-1 PC 桁内ケーブルの腐食イメージ

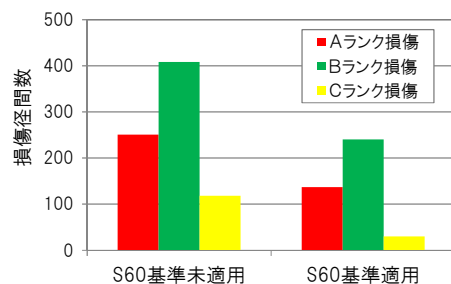


図-2 PC 桁の損傷径間

このような事例の発生に対し、平成 27 年度から着手した大規模修繕事業として PC 桁大規模修繕工事では外面的な損傷だけでなく、PC ケーブルの腐食等による内在する機能低下が懸念されている桁を対象として、補強・予防保全等の対策を行うこととした。

## 1. PC 桁大規模修繕工事の状況

平成27年度に4件発注したPC桁等大規模修繕工事の概要を表-1に示す。これらの工事は13号東大阪線および11号池田線において、上縁定着ケーブルを有し、かつ過去の点検で損傷を有するPC桁の建設時工区を対象としたものである。

この4件の工事は阪神高速では初のPC桁大規模修繕工事であるためパイロット工事と位置付け、工事で実施する詳細調査結果に基づき課題を整理しつつ設計を進め補強方法を決定し、補強補修の実施工までを行っている。また、検討の結果採用した外ケーブルによる補強工事以外にも、PC桁の間詰め床版部の補強として鋼板接着工、既設PCケーブルのグラウト充填不良確認箇所におけるグラウト再注入工、コンクリート表面保護工などの補修工事も実施している。

パイロット工事ということもあり詳細調査、補強方針の決定、補強設計、施工の各ステップにおいて課題が顕在し検討に時間を要したため、全工区で大幅な工期延期を行いながらも着実に工事を進捗し、対象径間数が多い13号東大阪線を対象とした1工区を除いて竣工したところである。



写真-1 PC 桁の損傷状況

## 2. 詳細調査の内容と結果

詳細調査の実施フローを図-3 に示す。詳細調査では外観変状詳細調査、グラウト充填状況調査、PC ケーブル腐食度調査、コンクリート物性調査等を行った。これらの詳細調査結果を踏まえ、健全性評価、耐荷性能照査を行い、外ケーブル補強の設計方針を確立した。以下、各詳細調査の概要と結果を報告する。

### 2-1 外観変状調査

外観の変状調査は主桁、横桁に加え壁高欄や支承部も含めた PC 桁全体の近接目視および打音検査を実施した。PC ケーブルに沿った 0.2mm 以上のひび割れや遊離石灰、錆汁などケーブル損傷の疑いがある損傷が確認された場合は、次項の非破壊調査を経由せず微破壊調査を実施する予定であったが、ケーブル損傷の疑いは確認されなかった。

表-1 PC 桁大規模修繕工事の概要

工事名	PC桁等大規模修繕工事			
	(27-1-東)	(27-2-池)	(27-3-池)	(27-4-池)
対象路線	13号東大阪線		11号池田線	
工期	平成28年1月～平成31年10月(予定)	平成28年4月～平成31年1月	平成28年4月～平成30年11月	平成28年4月～平成30年11月
工期(当初予定)	～平成30年2月	～平成29年12月	～平成29年10月	～平成29年10月
対象径間数	47	26	35	18
工事内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・調査工</li> <li>・詳細設計</li> <li>・PC桁補強工(補強設計による外ケーブル工, 予防保全設計による用心ケーブル工)</li> <li>・PC桁床版部鋼板補強工, PCグラウト再注入工, コンクリート表面保護工, 塗装塗替工 等</li> </ul>			

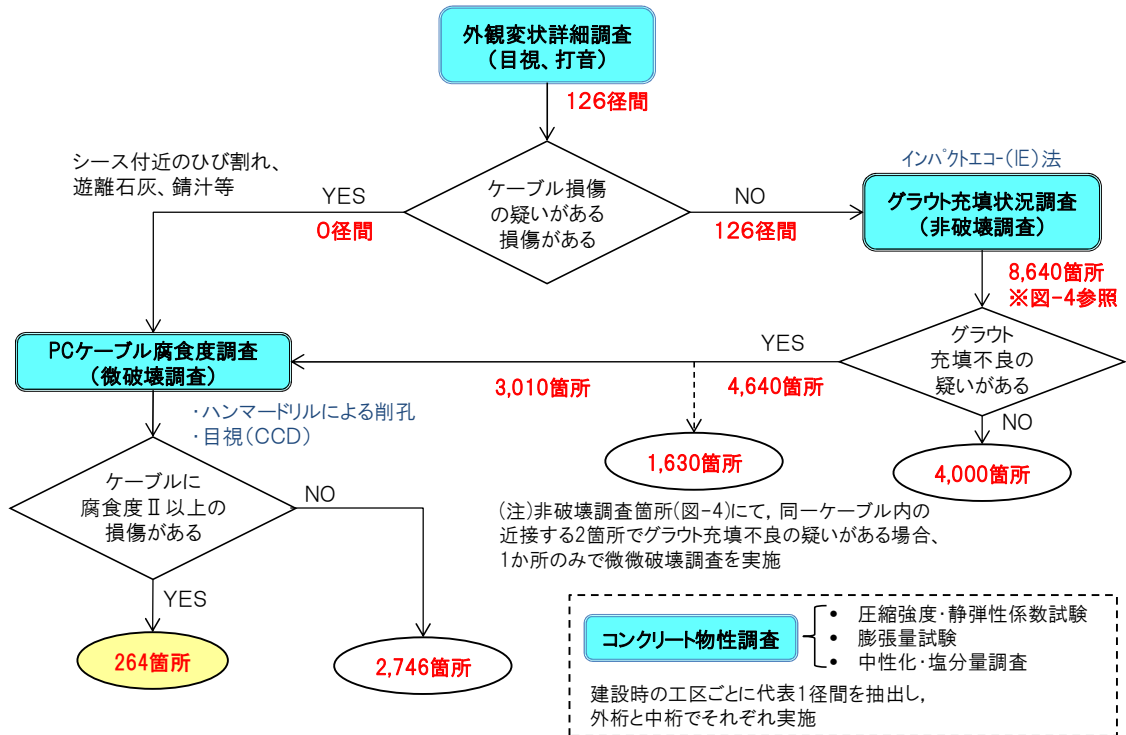


図-3 詳細調査実施フロー

### 2-2 グラウト充填状況調査(非破壊調査)

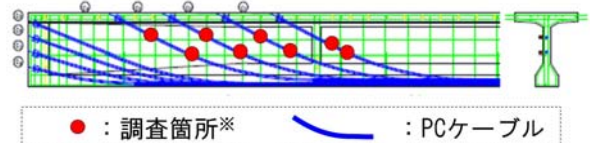
前項の外観調査でケーブル損傷の疑いが確認されなかった径間では、主桁を削孔せずにグラウト充填不良の疑いがある箇所を抽出可能な衝撃弾性波法(インパクトエコー法)による非破壊調査を実施した。調査対象は全径間全主桁の上縁定着PCケーブルとし、1ケーブルあたり両端曲げ上げ部の2箇所ずつとした(図-4参照)。

調査より、全調査箇所(8,640箇所)の内、50%以上(4,640箇所)においてグラウト充填不良の疑いがあることが判明した。グラウト充填不良が疑われるPCケーブルについてはシース内の浸水によるケーブル腐食が疑われるため微破壊調査による目視確認(PCケーブル腐食度調査)を行うこととした。

### 2-3 PCケーブル腐食度調査(微破壊調査)

微破壊調査では、ハンマードリルによる桁の削孔を行い、シース内部の目視観察およびCCDカメラによる撮影を実施し内部のグラウト充填状況を確認し、PCケーブルの腐食状況を調査した。また、グラウト充填不良が確認された箇所では、第6章で示すグラウト再注入工を実施した。

PCケーブル腐食調査の結果を表-2に示す。なお、



※上縁定着ケーブル1本につき、両端曲げ上げ部4箇所(起終点の上フランジ側・下フランジ側)

図-4 非破壊調査箇所

表-2 ケーブル腐食度調査結果

鋼材の腐食度	腐食状況		断面考慮面積Ap	箇所数(割合)
	質量減少率相当	事例		
健全	-		1.0	4,606(※) (65.7%)
I	1%未満		1.0	2140 (30.5%)
II	1~2.5%程度未満		0.94	229 (3.3%)
III	10%程度未満		0.85	32 (0.5%)
IV	10%程度以上		0	3 (0.0%)

※非破壊検査により、健全と判定された4,000箇所を含む

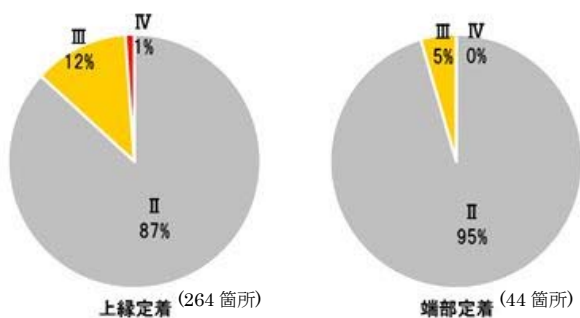


図-5 定着位置による腐食度Ⅱ以上の比較

腐食度の判定は参考文献<sup>2)</sup>に準じて行った。調査の結果、腐食度調査を実施した箇所の約4割で腐食度Ⅰ以上を確認した。その内、ケーブル腐食による断面減少を補強設計時に考慮する必要があるとされる腐食度Ⅱ以上の損傷は、全体調査箇所の約4%で確認した。

今回、端部定着ケーブルにおいても腐食度調査を一部実施したため、腐食度Ⅱ以上が確認された箇所数を定着位置で比較した(図-5)。図より上縁定着ケーブルにおいて腐食度Ⅲ以上の損傷が発生するリスクは、端部定着ケーブルの約3倍有することが確認された。これまでの大規模修繕事業の方針どおり、上縁定着構造を採用しているPC桁の修繕を優先的に進める必要がある。

#### 2-4 コンクリート物性調査

コンクリート物性調査として、圧縮強度・静弾性係数試験、膨張量試験、中性化・塩分量調査を実施している。調査は建設時の工区ごとに代表1径間を抽出し、外桁と中桁でそれぞれ実施した。物性調査結果を表-3に示す。コンクリートの圧縮強度は、設計基準強度(40N/mm<sup>2</sup>)を満足しているものの、静弾性係数は、設計値(35kN/mm<sup>2</sup>)の約8割となっている。塩分量は、一部を除き発錆限界値(1.2kg/m<sup>3</sup>)<sup>3)</sup>以下となっている。また、膨張量はASRと判定される判定値(0.1%)以下であることを確認している。以上より、コンクリートの劣化は静弾性係数を除いてさほど進展していない事が分かった。

表-3 コンクリート物性調査結果

	外桁(平均値)	内桁(平均値)	基準値
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	47.9	48.2	40
静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )	28.7	28.8	35
中性化深さ(mm)	10.7	9.8	—
塩分量(kg/m <sup>3</sup> )	0.8	0.6	1.2
膨張量(%)	0.015	0.015	0.1

### 3. 外ケーブル補強における設計方針

#### 3-1 補強対策・予防保全対策の判定

本工事では点検視認性や再緊張工の観点から補強工法として外ケーブル工を採用した。また、今回実施した詳細調査の結果から補強対策として外ケーブル補強工を実施するケース、予防保全対策として外ケーブル(用心ケーブル)を設置するケースの2種類に判定している。この判定フローを図-6に示す。どちらのケースで外ケーブルを設置する場合でも、径間内に上縁定着構造のPCケーブルを有していることが前提である。

補強対策として外ケーブル工を実施するケースは、①微破壊調査において腐食度Ⅱ以上のPCケーブル損傷が確認された径間において、②現況耐荷力照査を満足せず補強が必要と判定された場合である。

一方、補強が不要と判定されたケースにおいても、前章の詳細調査結果を考慮し、上縁定着構造を有する径間には予防保全対策として外ケーブル(用心ケーブル)が必要と判断した。予防保全対策として用心ケーブルを設置するケースは、①補強対策は不要(腐食度Ⅰ以下)であるがグラウト充填不良の疑いがある場合、あるいは②主桁部にひび割れ、漏水等の損傷が見られる場合である。用心ケーブルの設置については、予防保全対策として将来損傷発生リスクに備え外ケーブルを予め設置するものであるため、本工事ではケーブルが緩まない程度の緊張(5MPa)を行った。

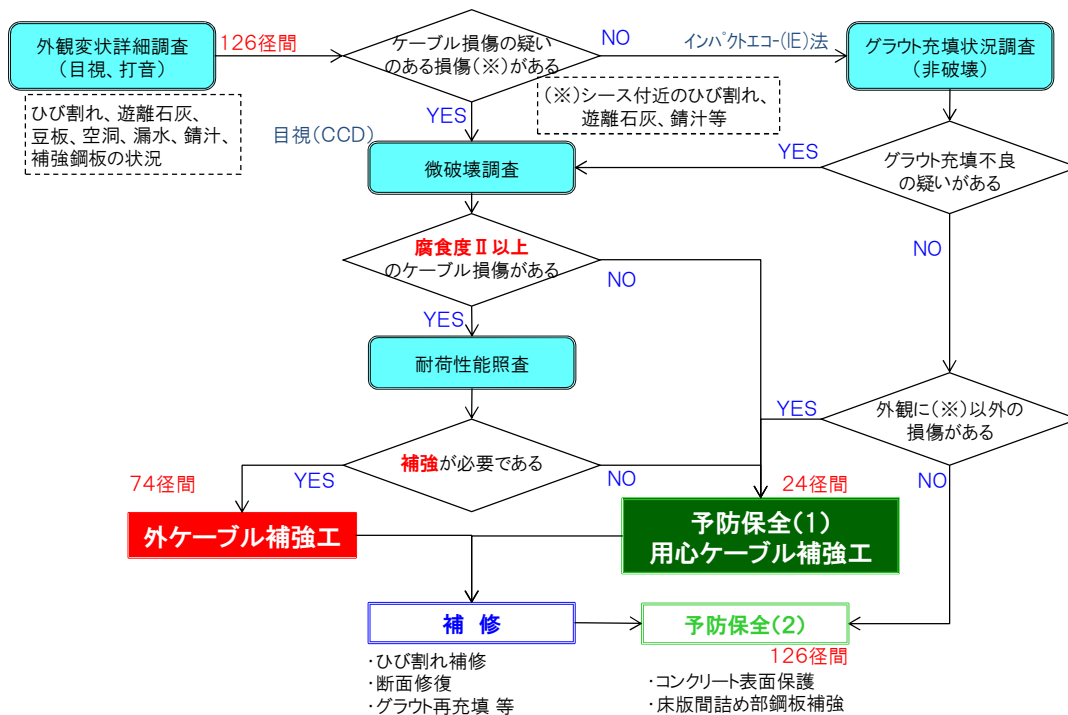


図-6 外ケーブル補強の判定フロー

表-4 外ケーブル補強設計方針

	補強設計	予防保全設計
対策内容	補強対策(外ケーブル)	予防保全対策(用心ケーブル)
設計に考慮するケーブル損傷	ケーブルの腐食割合を考慮	最も影響が大きいケーブルの1本破断を想定
補強量の決定方針	フルプレストレスによる応力照査(径間全体の応力分配を考慮)	主桁単体での性能回復
共通項	<ul style="list-style-type: none"> <li>平成24年道路橋示方書に準拠(クリープ係数, 乾燥収縮度等)</li> <li>コンクリート物性について調査値を考慮</li> </ul>	

### 3-2 設計方針

外ケーブル工における補強・予防保全対策の設計方針について表-4に示す。

補強設計時の荷重条件は、活荷重をB活荷重とし、死荷重は建設時から追加で設置された遮音壁、ケーブルラック等の附属物荷重と間詰め床版部の補強鋼板の荷重を見込んでいる。また、コンクリートの設計荷重時の許容曲げ引張応力度は長期的な構造物の健全性を担保するためフルプレストレスとした。また、ケーブルの腐食割合を考慮した耐荷性能照査により必要プレストレス量を決定した。

用心ケーブルの設計では、将来損傷発生リスクとして1主桁内の上縁定着ケーブルが1本破断することを想定し、破断に伴う応力低下を建設設計時に設定したレベルまでに回復し、早急に橋梁全体

の健全性を確保することを想定している。また、破断を想定した上縁定着ケーブルは支間中央部にて、主桁下縁の応力低下に最も影響のある上縁定着ケーブル(最下段)とした。また、補強設計とは異なり径間全体の応力分配を考慮せず、主桁単体での性能回復が可能な補強量を算出している。

材料強度、許容応力度および設計定数は、平成24年道路橋示方書<sup>4)</sup>に準拠し、設計に考慮するコンクリート物性は、調査値が設計基準強度を下回る場合には調査値を、調査値が設計基準強度を上回る場合には基準値を採用することとした。

#### 4. 外ケーブル補強設計結果

前章の設計方針に基づいた外ケーブルの補強設計・予防保全設計の結果を表-5に示す。

本工事の対象である全126径間の内、補強対策は74径間、対して予防保全対策は約1/3の24径間に外ケーブル設置した。また、工区毎に設置径間数を比較すると、(27-2-池)では補強対策が11径間、予防保全対策が1径間と10倍以上の開きがあるが、(27-4-池)では両者が9径間と同数であり、工区により傾向が異なることが明らかとなった。これは補強・予防保全対策の判定における大きな要因であるPCケーブルの腐食度について、建設時あるいは供用後の環境の違いが影響した結果と考えられる。今回確立した外ケーブルの設計方針では、PCケーブルの腐食度を考慮することで、個々のPC桁の損傷度合いに応じた合理的な補強設計が可能となった。

今回、補強対策・予防保全対策のどちらにも該当しない28径間については、外ケーブルを施工していない。これは、①径間内のケーブル定着構造が全て端部定着である場合、もしくは②グラウト充填不良の疑いが無く、主桁外観に損傷が無いケースである。なお、これらの外ケーブルを施工しない径間においても、図-6に示す通り補修・予防保全(コンクリート表面保護・床版部補強工)を実施している。

#### 5. 外ケーブル工の施工

外ケーブル施工後の写真を写真-2に、外ケーブルを定着する鋼製ブラケットの側面図および断面図を図-7に示す。今回のPC桁大規模修繕工事の対象橋梁はいずれもポステンT桁橋であり、外ケーブル補強は径間内の全ての主桁下フランジ下面にて実施することとした。また外ケーブルは直線配置とし、主桁下フランジの起点側および終点側2箇所鋼製ブラケットを設置する補強構造とした。ブラケットの主桁に対する固定は貫通アンカーで行うため、主桁ウェブ部の穿孔を実施している。穿孔については、桁内の既設ケーブルや鉄筋との干渉を避けるため、非破壊調査を行った。具体的には電磁波レーダー法を用いて鉄筋及び配力筋から30mm以上かつシース管から50mm以上の離隔を確保することとし、これにより難い場合はX線透過法を用いて干渉物を把握し、アンカー位置またはブラケットの位置あるいはその両方を変更する事で干渉を回避した。

主桁とブラケットの隙間には無収縮モルタルを打設し一体化させている。打設前に付着性能の向上に期待し、主桁面はチッピングによる目荒らしと接着剤を塗布し、鋼製ブラケット面にも同様に接着剤を塗布している。なお、緊張は片引きで行い緊張管理は外ケーブル1本毎の管理とした。

表-5 外ケーブル補強設計結果

(単位: 径間数)

	PC桁等大規模修繕工事				
	27-1-東	27-2-池	27-3-池	27-4-池	合計
工事対象	47	26	35	18	126
外ケーブル設置	41	12	35	18	106
補強対策	34	11	20	9	74
予防保全対策	7	1	15	9	32



写真-2 外ケーブル設置状況

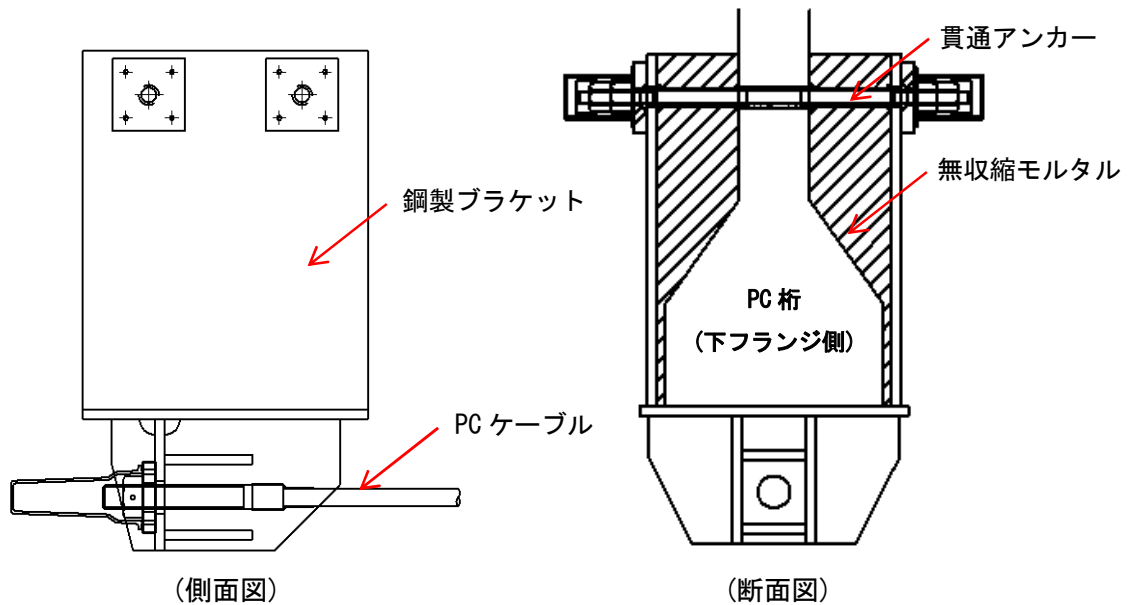


図-7 鋼製ブラケット

表-6 グラウト再注入施工箇所数

(単位:箇所数)

	PC桁等大規模修繕工事				
	27-1-東	27-2-池	27-3-池	27-4-池	合計
グラウト再注入	980	479	422	506	2387
通常タイプ	761	407	371	486	2025
防錆タイプ	219	72	51	20	362

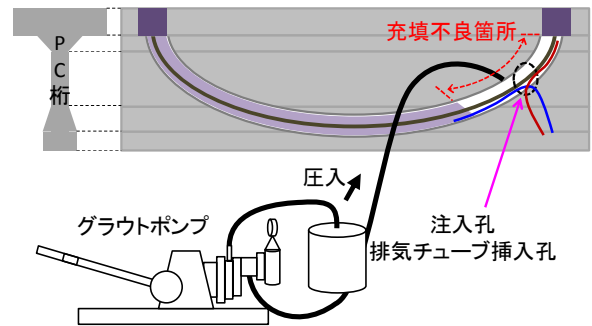


図-8 チューブ法のモデル図

## 6. 既設 PC ケーブルグラウト再注入工

第2章、2-3節 PC ケーブル腐食度調査(微破壊調査)において、既設 PC ケーブルのグラウト充填不良が確認された場合には、グラウト再注入工を実施している。グラウト再注入施工箇所数を表-6に示す。また、微破壊調査時においてシース内から出水が確認され、その塩化物イオン濃度が200ppm 以上の場合、あるいは PC ケーブルの腐食判定がⅡ以上であり、ケーブル表面から塩化物イオンが確認された箇所に対しては、マクロセル腐食対策として亜硝酸リチウムを含有した防錆グラウト材を使用した。

再注入工法としては、阪神高速補修要領<sup>5)</sup>による方法、排気チューブを未充填区間の上下端まで挿入し充填確認が可能なチューブ法、真空ポンプにより未充填区間を真空化し空気のこりを防ぐ真空法の3タイプを比較検討した結果、排気チュー

ブの挿入長を測定し充填範囲を把握することで品質管理面において優位であるチューブ法を標準工法として採用することとした<sup>6)</sup>(図-8)。

## 7. まとめ

今回、PC桁の大規模修繕事業を推進するにあたり4件のパイロット工事において、上縁定着ケーブルを有する径間を対象に、詳細調査の内容及びその結果に基づく外ケーブルの補強設計方針について検討した。その結果を下記に示す。

- ・PCケーブルが腐食度Ⅱ以上の損傷を有する径間では耐荷力照査を実施し補強対策として外ケーブル補強を実施した。
- ・グラウト充填不良や腐食度Ⅰ以下の場合などは予防保全対策として将来損傷発生リスクとして1主桁内の上縁定着ケーブルが1本破断するこ

とを想定した外ケーブル(用心ケーブル)を設置した。

上記の通り、外ケーブルの補強方針は確立され、現在パイロット工事として先行発注した東大阪線、池田線のPC桁等大規模修繕工事について工事の竣工をほぼ迎えることができた。引き続き発注予定である他路線のPC桁大規模修繕工事に向けて、設計・施工の検討経緯から結果まで確実に引き継ぐことが重要と考えマニュアルの策定に向けて動いている最中である。

**謝辞:**本設計・補修方針の提案に際し、阪神高速道路株式会社技術審議会構造技術委員会コンクリート構造分科会（主査：井上晋大阪工業大学教授）

の委員各位に貴重なご意見を頂きました。関係各位に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 阪神高速の大規模修繕PC桁：ケーブル腐食  
<https://www.hanshin-exp.co.jp/company/torikumi/renewal/syuzen/syuzen01.html>
- 2) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：プレストレストコンクリート構造物の補修の手引き(案)，2009)
- 3) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書，2007.3
- 4) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書，2012.3
- 5) 阪神高速道路株式会社：道路構造物の補修要領，2005
- 6) 山田洋太，中山栄作，佐藤彰紀：PC 桁等大規模修繕工事における PC グラウト再注入工法の選定について，阪神高速道路第 50 回技術研究発表会論文集，Ⅲ-54，pp. 279-284，2018.

## DESIGN PRINCIPLES AND CONSTRUCTION FOR STRENGTHENING EXTERNAL TENDONS IN LARGE-SCALE REPAIR TO PC GIRDERS

Tomohiko NISHIHARA, Satoru NOZAKI, Daisuke HASHIZUME and Akinori SATO

The post-tensioned prestressed concrete (PC) girders built before the application of the design standards of the Hanshin Expressway of 1985 have some prestressing tendons anchored to the upper part of the girder. The absence of waterproofing around the anchorage, combined with incomplete grouting of the sheaths, often results in penetration of rainwater from the anchorage and corrosion of the tendons due to stagnant water. In a large-scale repair project conducted by Hanshin Expressway, load carrying performance of a PC girder with potential damage to the tendons was improved to the current standard level. Furthermore, proper repair and preventive maintenance are being carried out on the other existing PC girders within the same construction section. For a pilot construction project, design principles have been established to strengthen the external tendons according to the degree of damage determined by detailed inspections. This paper provides information about the design principles together with the details of the construction.

西原 知彦



阪神高速道路株式会社  
大阪管理局 保全部  
保全工事課

Tomohiko Nishihara

野崎 悟



阪神高速道路株式会社  
大阪管理局 保全部  
保全工事課

Satoru Nozaki

橋爪 大輔



阪神高速道路株式会社  
大阪管理局 保全部  
保全設計課

Daisuke Hashizume

佐藤 彰紀



阪神高速道路株式会社  
建設・更新事業本部  
神戸建設部  
プロジェクト第一課  
Akinori Sato