

# 非開削アンダーパス工法における施工技術

## — PCR ダブルエレメント置換推進工法 —

佐藤 祐輔\*1・丸山 芳之\*2

鉄道や高速道路などの既設路線を横断する工法として、アンダーパス工法がある。PCR工法は交差する上部路面を供用しながらプレキャストPC桁（以下、PCR桁）を並列推進し、下路桁形式やトンネル形式の構造物を構築する非開削工法の一つである。本稿では、従来工法に対して大幅な施工の合理化を図り、工期の短縮とコスト縮減を可能とした工法として、PCRダブルエレメント置換推進工法（箱形トンネル形式）について紹介する。

キーワード：アンダーパス、非開削、PCボックスカルバート、プレグラウトPC鋼材

### 1. はじめに

日本全国にはボトルネック踏切が1000カ所以上存在し、踏切部における交通渋滞の慢性化や地域分断、踏切事故の危険性、交通渋滞によるCO<sub>2</sub>排出量の削減など環境面からもその対策が急務となっている。その場合、市街地での交通規制実施が厳しく制約されるなかで行わなければならない、供用しながらの施工が可能である非開削工法が有効となる。また、各地の道路計画において鉄道や高速道路の横断が問題となる場合にも、有効な工法である。

本稿では、非開削工法のなかでも唯一プレキャストPC桁を用いた工法として、狭い用地での施工が可能であり、従来工法に対して更なる工期短縮とコスト縮減を可能とした、PCRダブルエレメント置換推進工法（箱形トンネル形式）について詳細な説明をする。

### 2. 開発の経緯

PCR工法（Prestressed Concrete Roof method）は、1977年に旧国鉄、オリエンタルコンクリート（株）（現オリエンタル白石（株））、日本ケーモー工事（株）の3社によって、鉄道下横断構造物構築の非開削工法として開発された工法であり、1980年東北本線の工事以来これまでに82件の実績がある。構造形式としては、下路桁形式と箱形トンネル形式

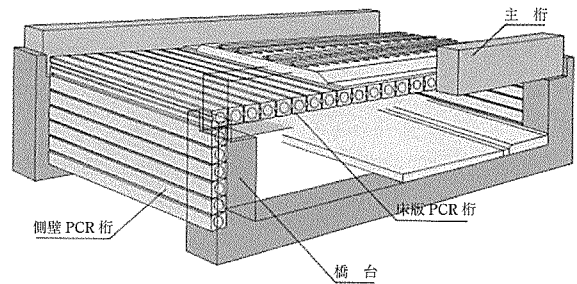


図 - 1 下路桁形式



写真 - 1 下路桁形式完成状況



\*1 Yusuke SATO

オリエンタル白石（株）  
施工・技術本部 技術部



\*2 Yoshiyuki MARUYAMA

日本ケーモー工事（株）  
技術営業部

の2タイプがある。また、箱形トンネル形式のダブルエレメント置換推進工法は、2010年に特許を取得している。

#### 2.1 下路桁形式

下路桁形式（図-1、写真-1）は、当初開発した構造形式であり、PCR桁を推進後、主桁とPCR桁を剛結合することで下路桁式PC橋梁を構築するものであり、上下部工分離方式で支承とストッパーを有している。横断構造物の幅員方向は、最大50m程度まで可能であるが、トンネル延長は最大20m程度が限界であり、主に鉄道下横断に用いられた。その後、ラーメン橋台形式（写真-2）も開発され、こちらの幅員方向は最大30m程度まで、トンネル延長は同様に最大20m程度である。

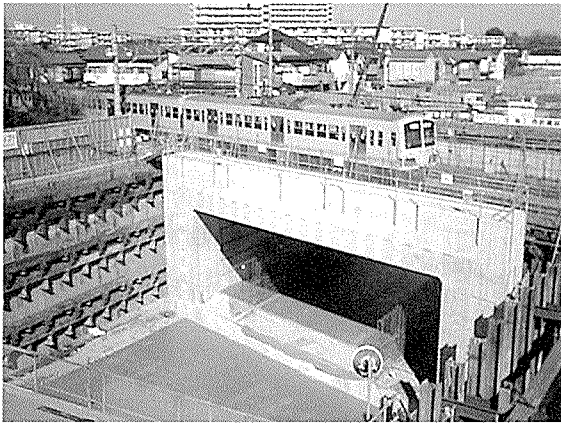


写真 - 2 下路桁ラーメン橋台形式完成状況

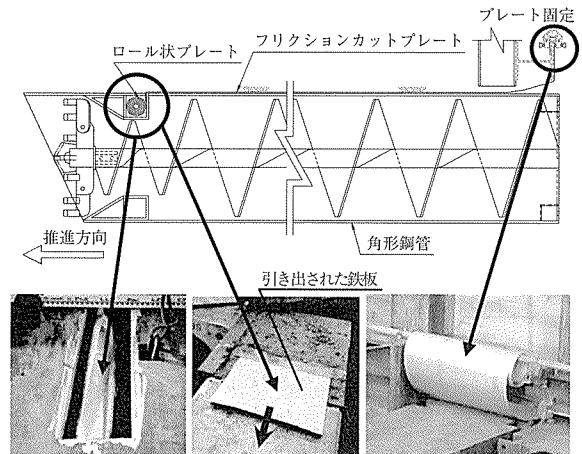


写真 - 4 フリクションカットプレート

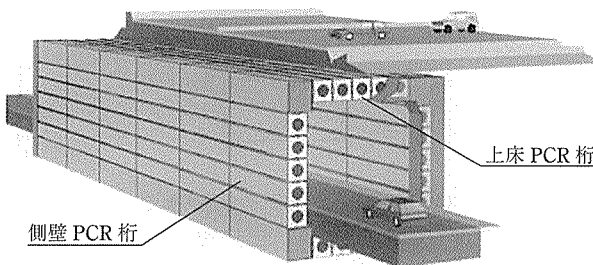


図 - 2 箱形トンネル形式



写真 - 3 箱形トンネル形式完成状況

## 2.2 箱形トンネル形式

箱形トンネル形式（図 - 2、写真 - 3）は、PCR 桁を軸方向に緊張しながら推進後、上・下床版および側壁のそれぞれ桁直角方向にプレストレスを導入し、一体化することで PC ボックスカルパートを構築する。プレストレス導入の作業空間として、隅角部に鋼製エレメントを配置し、そのなかで横締め PC 鋼材の挿入および緊張を行う。幅員の広い場合には中間壁で支間の調整が可能で、トンネル延長は最大 100 m 程度である。

## 2.3 PCR 工法の特長

PCR 工法全般における主な特長を以下に示す。

- ① 小エレメント推進であることに加え、上床部 PCR 桁施工時は、角形鋼管上面にロール状の薄鉄板（フリクションカットプレート、写真 - 4）を先端から引き出しながら、上部土砂との縁を切り推進することにより、上部路面の変状はほとんど生じない。
- ② 上部路面の変状が最小限であるため、土被りを小さく（鉄道では道床下 -0 m、道路では路面 -1.0 m）でき、アプローチを含めた全体工事費の低減と工期短縮が可能である。
- ③ 置換推進方法（中堀推進は角形鋼管で行い、後から PCR 桁に置き換える）を適用することにより、推進精度は PCR 桁を直接中堀推進するより更に向上し、害物に遭遇しても確実に対処することが可能である。
- ④ 推進した PCR 桁がそのまま本体構造物となるので、他工法より附帯工種が少なく合理的な工法である。
- ⑤ 高品質なプレキャスト製品を使用し、現地で桁軸方向および直角方向にもプレストレスを与えるため、高耐久である。コンクリート強度は 50 N/mm<sup>2</sup> である。
- ⑥ プレキャストの PCR 桁は分割が可能であるため、立坑の用地が狭い場合でも施工が可能である。

## 3. PCR ダブルエレメント置換推進工法

### 3.1 概要と特長

ダブルエレメント置換推進工法は、図 - 3 に示すように正方形の角形鋼管を 1 本ずつ中堀アースオーガを用いて、掘削推進を行い 2 列先行する。次に角形鋼管の後方に接続した PCR ダブルエレメント桁（長方形）で角形鋼管 2 本を同時に置換えるものである。従来、1 本ずつ正方形の角形鋼管と同形の PCR 桁を置換えていた手法に対し、置換え工程が半分になり、推進の工期が従来比 1/4 の短縮を可能とした。同時に目地の数も半分になることで、目地材料および目地の施工も半減することになる。

### 3.2 推進施工のサイクル

図 - 4 はダブルエレメント置換推進の推進施工サイクルを示したものである。

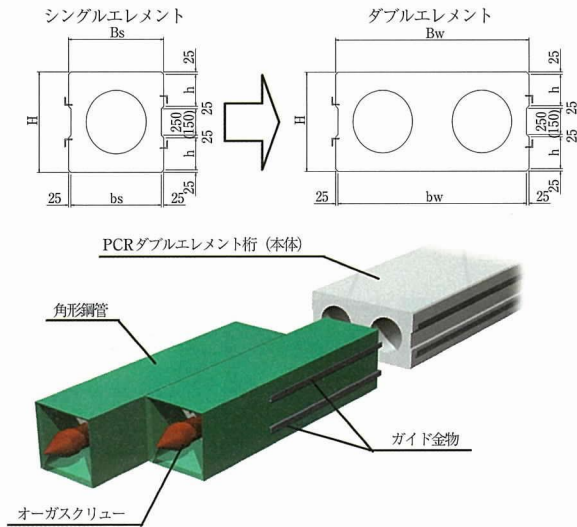


図 - 3 PCR ダブルエレメント桁の置換推進

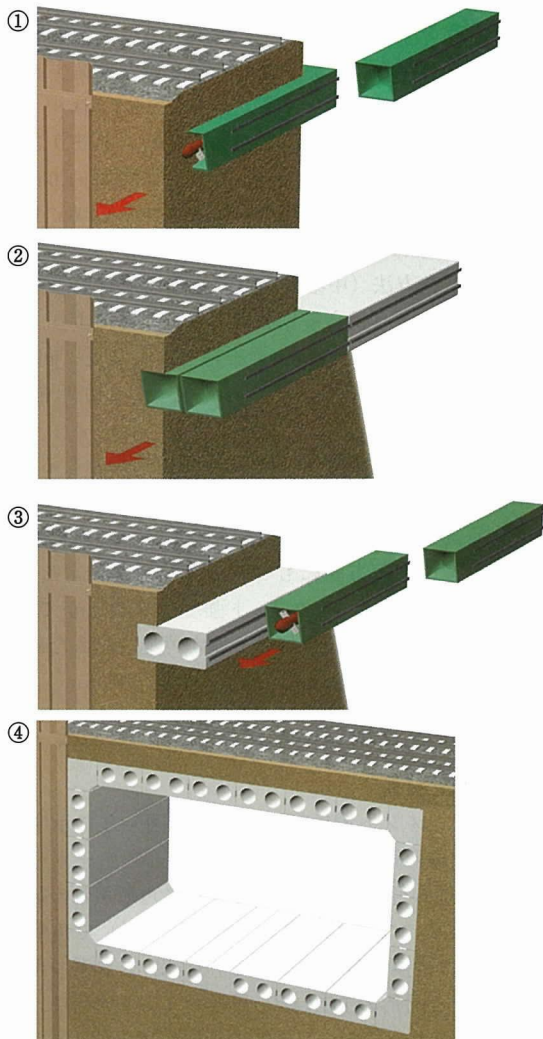
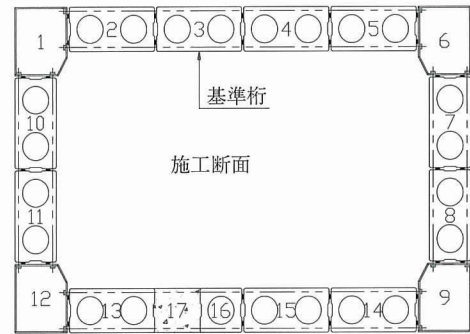
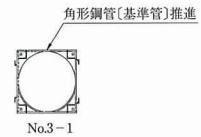


図 - 4 置換推進施工サイクル

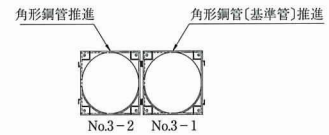
- ① 基準となる正方形角形鋼管を掘削推進し、到達側まで貫通させる。同様に2本目となる角形鋼管を並列



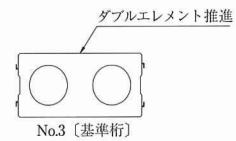
- ・角形鋼管No.3-1の推進



- ・角形鋼管No.3-2の推進

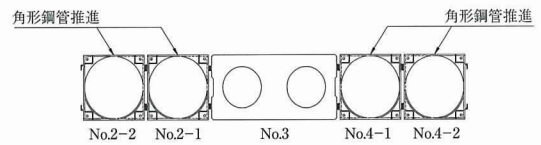


- ・ダブルエレメント桁No.3 (基準桁) の置換え推進



- ・角形鋼管 No.2-1, 2-2 の推進

- ・角形鋼管 No.4-1, 4-2 の推進



- ・ダブルエレメント桁 No.2 および No.4 の置換え推進

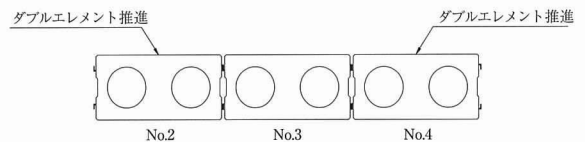


図 - 5 推進順序および置換推進順序 (上床部)

して掘削推進し到達側へ貫通させる。

- ② PCR ダブルエレメント桁 (長方形) を角形鋼管後方に接続し、圧入により角形鋼管2本分を同時に置換える。PCR 桁は通常4~7m程度のブロック桁であり、工場出荷時はRC構造、現地でPC鋼棒により緊張を行うポストテンション桁である。圧入時は順次、PC鋼棒のカップリング接続および緊張を行いながら、到達側へ貫通するまで圧入を行う。同時に、到達側では押し出された角形鋼管の回収作業を行う。

- ③ 置換えた PCR 桁に隣接する角形鋼管の掘削推進。
- ④ 以上の作業を繰り返し、上床部→側壁部→下床部の順に施工を行い、推進工は終了する。

実際の施工では、推進機2台を同時に稼働させて工期短縮を図っている。一般的な推進順序は図-5に示すように、基準桁を中心に左右同時に外側へ向かって順次推進を行う。基準桁は通常、上床版中央付近の桁としている。側壁部においても上下床版と同様に、左右に1台ずつ推進機を据えて同時に上床側から下床側へ向かって順次推進を行う。

なお、隅角部の鋼製エレメントは、一般的に標準形状のものではないため、直接推進（置き換えを行わず掘削しながら圧入）にて施工する。

#### 4. PCRダブルエレメント置換推進工法の施工事例

PCRダブルエレメント置換推進工法の施工事例は、2008年に竣工した成田高速線掘尻トンネルPCR（独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構）が最初の工事となり、その後1件の事例がある。また、現在3例目の施工を行っている最中である。そのなかで、2例目にあたる近鉄吉野線のアンダーパス工事について概要を報告する。

##### 4.1 工事概要

本工事は、奈良県の農免農道整備事業（大淀御所3期地

区）の一環として、近鉄吉野線薬水～福神間との交差部において、軌道交差部直下を非開削で道路用トンネルを構築する工事である。構造一般図を図-6に示す。

工事名：近鉄吉野線薬水・福神間 11k 520m 付近  
農免農道立体交差化工事

工事箇所：奈良県吉野郡大淀町大字薬水地内

発注者：奈良県南部農林振興事務所

事業主体：近畿日本鉄道株式会社

工期：平成20年1月～平成21年12月

構造形式：PCR箱形トンネル形式

施工延長：16.800m（PCR部分）

内空断面：幅9.000m×高さ5.500m

PCR桁：幅2250mm×高さ1100mm（ダブルエレメント）

幅1100mm×高さ1100mm（一部シングルエレメント）

##### 4.2 設計概要

###### (1) 鉄道基準による設計

PCR工法と交差する路線が鉄道の場合には、一般的なボックスカルバートと同様に、鉄道構造物設計標準・同解説（鉄道総合研究所）に準拠して設計を行う。部材に関する照査は、長期使用限界状態・使用限界状態・終局限界状態および地震時の照査を行い安全性を確認する。また、施工時におけるPCR桁の照査も行う。

本工事におけるPCR桁は、1ブロック長4.200mの4ブ

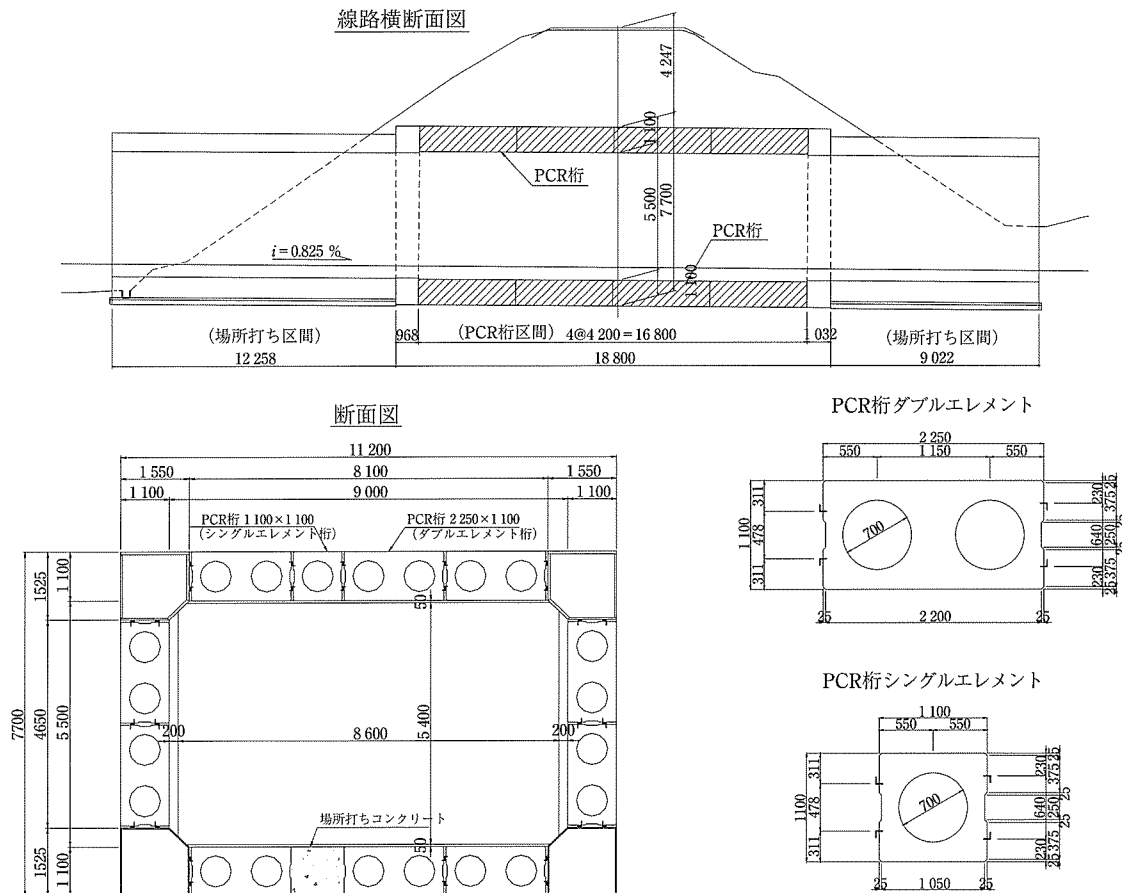


図-6 構造一般図

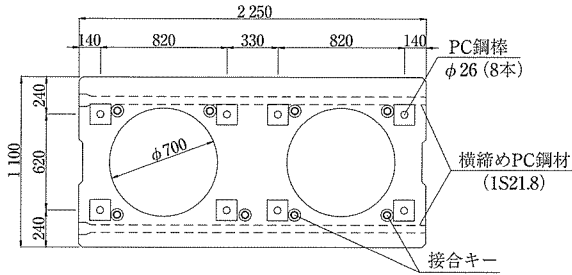


図 - 7 縦締め PC 鋼材の配置 (PCR 桁断面図)

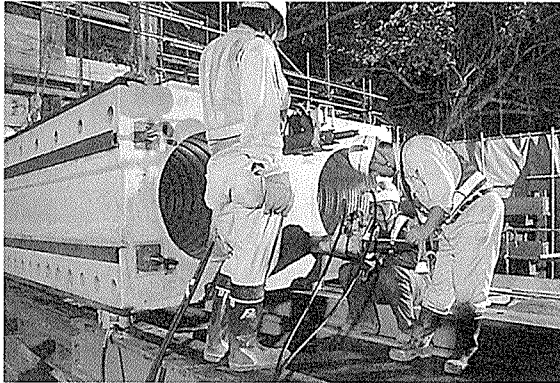


写真 - 5 PC 鋼棒の緊張

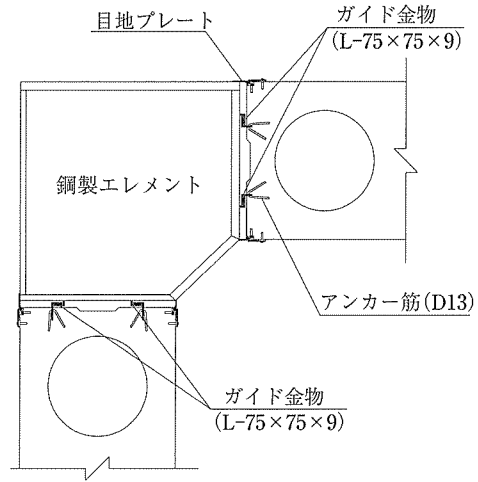


図 - 9 ガイド金物の配置

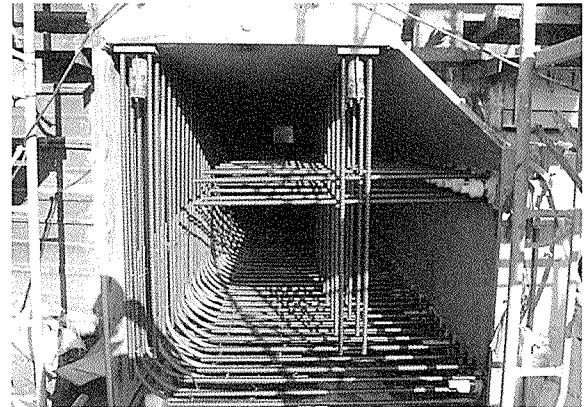


写真 - 7 隅角部の配筋状況

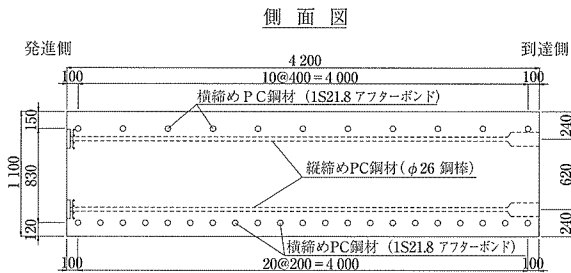


図 - 8 横締め PC 鋼材の配置 (PCR 桁側面図)

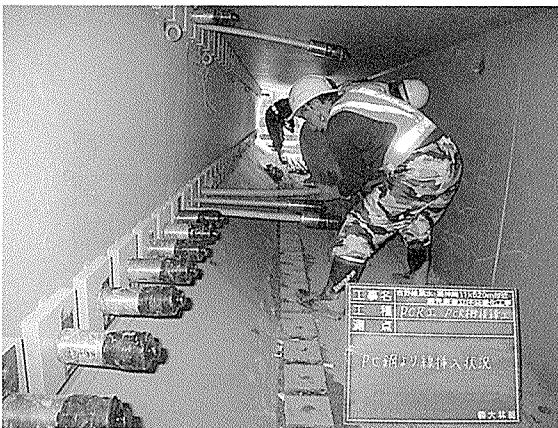


写真 - 6 横締め PC 鋼材挿入

ロックであり、工場製作された PCR 桁を現地へ搬入し、桁軸方向（トンネル方向）に PC 鋼棒（φ 26）8 本をカッ

プリングしながら連結し、緊張することによってポストテンションの PC 構造としている（図 - 7、写真 - 5）。

また、PCR 桁および鋼製エレメント推進終了後、鋼製エレメント内よりプレグラウト PC 鋼材 IS21.8（SWPR19L アフターボンド）をトンネル直角方向に各面（上下床版・側壁）それぞれ 2 段（ctc 200 ～ 400 mm）配置する。目地部およびシース内へ無収縮モルタルを注入し、所定の強度発現後、緊張一体化することで PC ボックスカルパート形式となる（図 - 8、写真 - 6）。

以下に、主な施工時検討および照査の内容を示す。

- ① ブロック桁は、RC 構造として運搬時の検討を行う。
- ② 縦締め緊張後の上床 PCR 桁については、施工時の検討として PCR 桁推進時および推進終了時について、地盤のパネを評価したモデルにて、列車荷重による安全性を照査する。
- ③ 隅角部の鋼製エレメントは、作業空間となるため上載荷重・側方土圧による安全性照査および側壁 PCR 桁推進時の吊下げ荷重（側壁 PCR 桁の自重が鋼製エレメントに吊下がる荷重）に対する検討を行う。同時に、推進時のガイドとなるガイド金物の検討も行う。ガイド金物の配置を図 - 9 に示す。

- ④ 本体構造の検討は、ボックスラーメン構造として下床版部分の地盤条件を考慮し、隅角部を支点とするモデルないし下床版全体をバネで支持するモデルにて断面力の算出を行い、PC構造としての安全性を照査する。
- ⑤ 隅角部は、鋼製エレメント内の配筋によるRC構造としての検討を行う。配筋はあらかじめ横締めPC鋼材のアンカープレートへねじを切っておき、ねじ切り鉄筋を用いて配筋を行う。配筋状況を写真-7に示す。
- ⑥ 耐震設計については、応答変位法により断面力を算出し、常時で決定した構造について性能照査を行う。表-1にPCR桁部の設計用値および制限値を示す。

表-1 設計用値および制限値

		(N/mm <sup>2</sup> )
設計基準強度		50
弾性係数		33 × 10 <sup>3</sup>
曲げ圧縮応力度	プレストレス導入時	20
	設計荷重作用時	20
曲げ引張応力度	プレストレス導入時	-0.5
	設計荷重作用時	0
斜引張応力度		1.2

(2) 耐震性能照査

鉄道構造物に用いる一般的な地下トンネルの耐震設計は、鉄道構造物設計標準・同解説（耐震設計）（以下、耐震標準という）に準拠することを基本としているが、PC構造物であるPCR工法に関する耐震性能照査については、明確な指針が示されていなかった。そこで、財団法人 鉄道総合技術研究所監修のもと、株式会社 ジェイアール総研エンジニアリングとURT協会にて、適用条件・耐震性能の設定・構造解析法等の検討を行い、「PCR工法の耐震設計手順」としてまとめた。

耐震性能の照査項目は、損傷レベルの判定および破壊形態であり、L1・L2地震動を対照に照査を行う。

部材の損傷レベルの定義は、

- ・ 損傷レベル1：無傷
- ・ 損傷レベル2：場合によっては補修が必要な損傷
- ・ 損傷レベル3：補修が必要な損傷
- ・ 損傷レベル4：部材の取替えが必要な損傷

以上より、PCR箱形トンネル形式の各部材の損傷レベルを表-2に示す。

表-2 各部材の損傷レベル

部 材	L1地震動	L2地震動
上・下床版（補修困難）	損傷レベル1	損傷レベル2
側 壁（補修困難）	損傷レベル1	損傷レベル2
中 間 壁（補修可能）	損傷レベル1	損傷レベル3

部材の損傷レベルの考え方は、静的非線形解析により計算した荷重と変位の関係から、プレストレス力が消失する

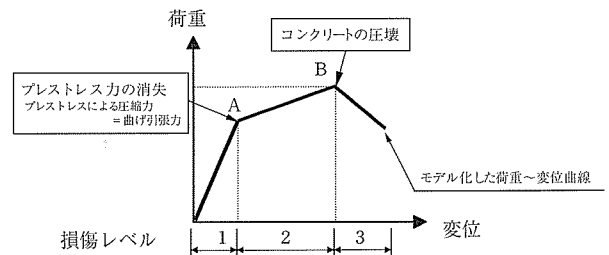


図-10 荷重～変位曲線と損傷レベルの関係

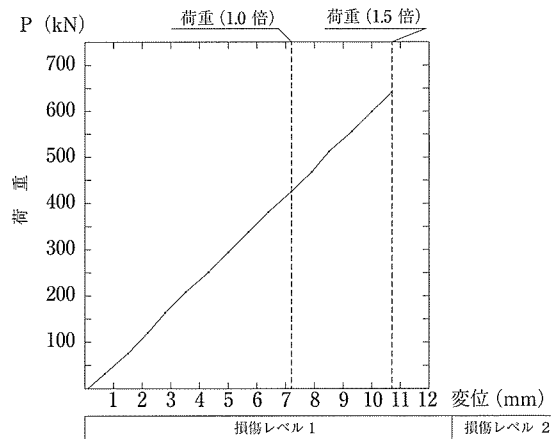


図-11 L2地震動の荷重～変位曲線

までが損傷レベル1、コンクリートが圧壊するまでが損傷レベル2となる。PCR桁部分は、それより上の損傷は補修が困難となるため、損傷レベル3は許容しない。図-10にPCR部材の荷重～変位曲線と損傷レベルの関係を示す。

図-11に本件のL2地震動における荷重～変位曲線を示す。すべての部材において損傷レベル1であり、耐震性能を満足している。PCR工法は、耐震設計によって断面形状は決まらない場合が通常である。

破壊形態の照査については、耐震標準による設計が構造物の変形性能に期待した設計方法であり、ぜい性破壊であるせん断破壊が先行する部材は好ましくないため、曲げ破壊先行型であることを確認する。

具体的には、静的非線形解析により地盤変位の最大1.5倍まで荷重を載荷し、材料修正係数(ρm)=1.2を考慮した解析を行い破壊形態を判定するが、すべての部材において曲げ破壊先行型であり、耐震性能を満足した。

4.3 施工概要

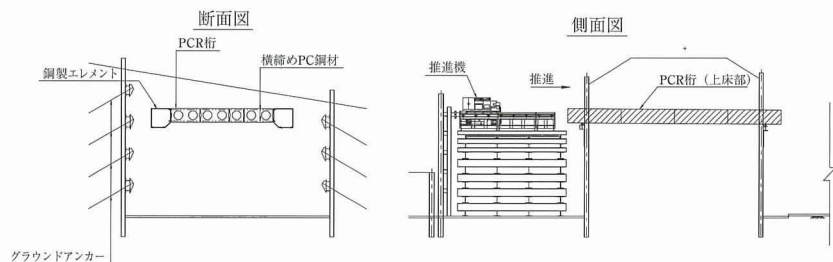
PCR工法の施工は通常、上床部→側壁部→下床部の順序にて行う(図-12, 写真-8)。

(1) 上床部

立坑・反力架台・推進架台の構築後、上床部分は線路直下であったため、夜間線路閉鎖時間内に推進施工を行った。また、施工時の線路および盛土変状の動態観測により軌道修正は適宜実施した。

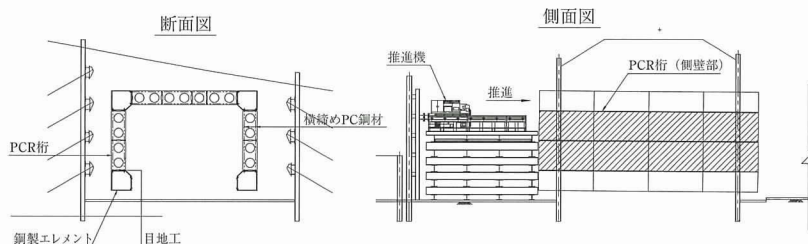
以下に上床部の施工手順を示す。

ステップ1 上床部の施工



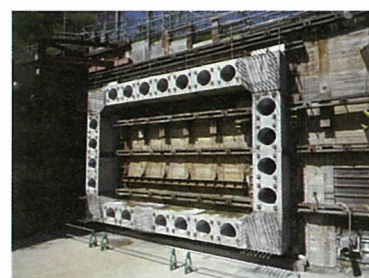
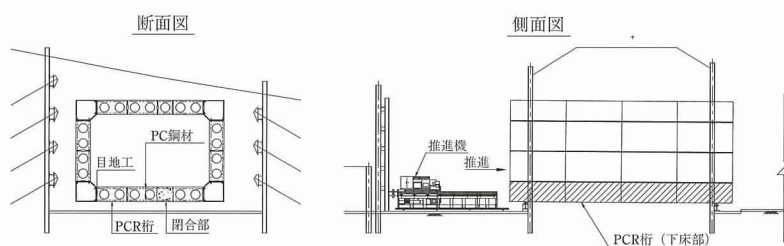
ステップ1 上床部施工完了

ステップ2 側壁部の施工



ステップ2 側壁部施工完了

ステップ3 下床部の施工



ステップ3 下床部施工完了

図 - 12 施工ステップ図

写真 - 8 施工ステップ

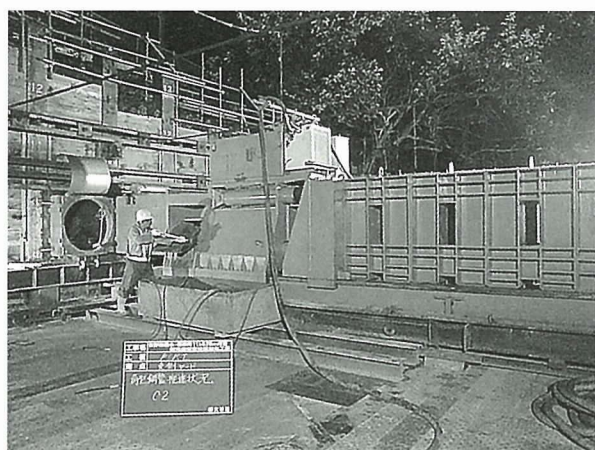


写真 - 9 角形鋼管の直接推進

① 角形鋼管 2本を直接推進 (写真 - 9)

この時、フリクションカットプレートを角形鋼管上面に配置し、上部路盤との縁切りを行うことで、路盤への影響を最小限に抑える。

- ② ブロックのPCRダブルエレメント桁をPC鋼棒にて緊張し、接続しながら角形鋼管に置き換え推進
- ③ 隅角部の鋼製エレメントを直接推進
- ④ 目地部を高圧洗浄にて土砂の排除 (写真 - 10)
- ⑤ 横締めPC鋼材 (1S21.8 プレグラウト) を鋼製エレメント内から挿入
- ⑥ 目地部および横締めシースへ無収縮モルタル注入 (写真 - 11)
- ⑦ 横締めPC鋼材の緊張

(2) 側壁部

上床部の横締め緊張完了後、側壁部の施工は推進機2台にて両側同時に上側から開始するが、上部路面の影響を考慮して1本目は夜間推進、2本目からは昼間の施工としている。側壁部の施工手順は、基本的の上床部と同様である (写真 - 12)。

(3) 下床部

下床部の施工は、PCRダブルエレメント桁の施工 (3本) について上床部と同様に置換推進にて行う。それ以降の施工は、閉合部の施工として、シングルエレメント1本分は



写真 - 10 目地部洗浄



写真 - 11 目地部モルタル注入



写真 - 12 PCR 桁の置換推進

施工誤差を吸収するために場所打ちで施工を行う。配筋およびシーす配置を行い、高流動コンクリートを打設する。写真 - 13 に配筋状況を示す。

また、目地部の高圧洗浄～横締め PC 鋼材の緊張施工は、上床や側壁と同様である。

下床部の施工後、鋼製エレメント内（4カ所）に配筋を行い、高流動コンクリートを打設して箱形断面の構築は終了する。最後に、内空断面の掘削を行い完成となる。掘削状況を写真 - 14 に示す。



写真 - 13 閉合部の配筋



写真 - 14 内空断面掘削状況

## 5. おわりに

PCR ダブルエレメント置換推進工法は、従来のシングルエレメント工法より工期は 10～15%短縮され、工費も 15～25%削減できたことから、かなりの省力化された工法であるといえる。本報告が今後の PC 地下構造物の施工における参考になれば幸いである。

最後に、近鉄吉野線薬水 PCR の施工も無事終了することができ、ご指導・ご協力いただいた関係者の皆様に感謝の意を表したいと思います。

### 参考文献

- 1) 鉄道総合研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，1999.
- 2) URT 協会：PCR 工法 箱形トンネル形式 設計の手引き，計画・施工の手引き，2005
- 3) 大信田秀治，木村礼夫，獅子目秀一，清原勝司：PC エレメントによる地下構造物の耐震施設，プレストレストコンクリート，Vol.48, No.3, pp.44～49, 2006年5月

【2010年9月17日受付】