

プレキャスト部材を用いたシールドトンネル立坑の構造検討

足立 幸郎¹・岩里 泰幸²・中岡 和伸³・田崎 賢治⁴・具志 一也⁵

¹正会員 工博 阪神高速道路株式会社 京都建設部（〒604-8152 京都市中京区烏丸通錦小路上ル）

²正会員 阪神高速道路株式会社 京都建設部（〒604-8152 京都市中京区烏丸通錦小路上ル）

³正会員 大日本コンサルタント株式会社 東京支社構造技術部（〒343-0851 埼玉県越谷市七左町5-1）

⁴正会員 工博 大日本コンサルタント株式会社 大阪支社構造技術部（〒550-0014 大阪市西区北堀江1-22-19）

⁵工修 大日本コンサルタント株式会社 大阪技術センター（〒550-0014 大阪市西区北堀江1-22-19）

1. はじめに

阪神高速8号線のうち山科～鴨川東間のトンネル工事では、多々の原因により工程が遅延していることから、全ての工種において工程の短縮が求められた。しかしながら、仮設状態である当発進及び到達立坑の復旧は、地元と合意した施工条件より昼間のみの施工となっていることから、構造的な対応による工期短縮が求められていた。

そこで、上床版等の立坑の後施工部に関して、復旧に3ヶ月以上要する場所打ちRC構造から、プレキャスト部材の採用と構造形式の簡略化により可能な限り（1ヶ月以上）工程を短縮できる方策を検討した。

本稿では、本立坑で採用した工期短縮構造形式とそれを可能とした対策および検討結果について報告する。

2. 構造物諸元

対象構造物は、内空幅 15.0 m×24.1 m、内空高 12.9 mのコンクリート構造物で、シールドマシン発進・到達立坑であるとともに、完成時には上床版と中壁とで2径間のボックスカルバートとなり、トンネル本体として道路構造物の一部として供用されるものである。場所打ちRC構造の立坑構造図を図-1に示す。

現在、先行して底版および側壁部が施工済みの状態である。

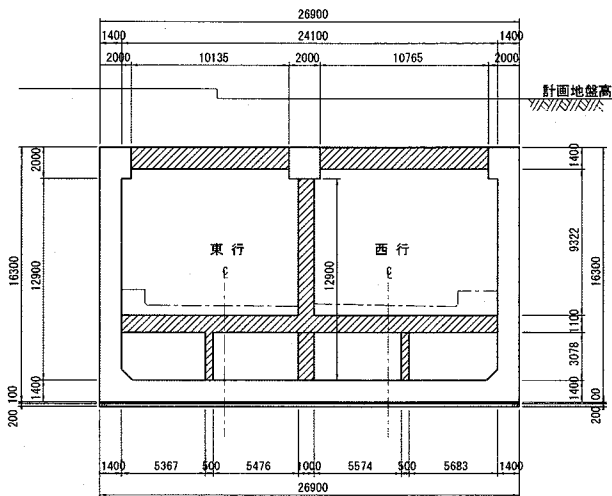
3. 工期短縮構造形式の抽出

（1）上床版

上床版に要求される性能は、側壁に作用する土圧による水平力を伝達することが主である。当初の場所打ちRC構造に対して工期短縮を図る場合、内空高が高いことから、場所打ちコンクリート施工のための支保工および型枠設置・配筋作業が大きく影響する。よって、本検討においては上床版にプレキャスト部材（工場製品）を採用することとした。

プレキャスト部材の選定においては、「鋼桁」「RC桁」「PC桁」等について検討を行った結果、本立坑の上床版桁として要求される以下の項目を全て満足する「鉄骨鉄筋コンクリート桁（SRC 桁）」を採用した。図-2にSRC桁断面を示す。

- ① 水平力（軸力）を確実に伝達できる構造であること。
- ② 既設部材との接合部構造に影響を与えない構造であること。



※) 斜線部が後施工部を示す。

図-1 立坑構造図（場所打ちRC構造）

③ 完成時は土中構造物となり、かつトンネル本体の天井部となるため、長期にわたり耐久性が確保されること。

④ 周辺条件による施工制約から、設置可能となるクレーン吊り能力内の重量とすること。

なお、PC桁は経済的で合理的な部材であるが、上床版に用いる場合両端を固定とする必要があるのに対し、プレストレスによるクリープ変形のため接合部に耐久性的に懸念されるひび割れ等の発生が懸念されたため、要求性能を満足しない結果となった。

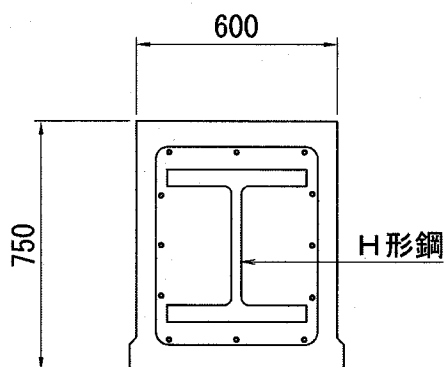


図-2 SRC桁断面

(2) 中床版

中床版は完成時にトンネルの車道部となる部分である。中床版に対する工期短縮形式として、上床版桁と同様にプレキャスト部材の採用を検討したが、中床版下はコンクリートで充填される構造とすることから、工程に大きく影響する支保工・型枠設置の必要がなくなったことから、当初計画どおりの場所打ちRC構造でも工程に大差がないことが判明した。

(3) 中壁

中壁は上床版桁の支点部であり、かつ完成時の分離壁となる。要求される性能は、上床版からの反力（軸力）を確実に底版へ伝達すること、車両の衝突に対して健全性を損なわないことである。当初の場所打ちRC構造に対する工期短縮形式として、上床版桁と同様にプレキャスト部材を採用することとし

た。部材の選定においては、立坑内の狭小なスペースでの施工となることを考慮し、軽量でハンドリング性に優れた角形鋼管を採用し、角形鋼管を隣接配置させて中壁を形成させる構造とした。また、中壁は軸力部材であることから角形鋼管内にコンクリートを充填させる構造とした。

4. 既設部材との接合部構造

(1) 接合条件の変更

プレキャスト構造においては、既設部材との接合方法が課題となる。場所打ちRC構造では全剛結合であったが、前述した工期短縮形式に対して接合部を剛結合とする場合、既設鉄筋との接合において施工が煩雑となり、大幅な工期短縮効果が期待できない。そこで、本検討においては更なる施工性の向上を目的に、既設部材との接合部構造を変更した。

施工性の向上が図られる接合部条件としては、「ピン構造」が考えられる。そこで、後施工部材と既設部材の接合部を全ピン構造とし、2次元フレームモデルによる構造検討を実施した。その結果、接合条件の変更によって、当然ではあるが全剛結合であった場所打ちRC構造と比べ、発生断面力が大きくなることが判明した。これは、構造系変化による応力再配分による底版の曲げ変形が大きくなった影響であり、特に施工済み部材である側壁下端および底版端部では、鉄筋応力度が許容値を満足しない結果となった。

そこで、底版の曲げ変形抑制対策による発生断面力の低減を確認するため、中床版の接合条件および中床版下の支持状態に着目した検討を実施した。

(2) 検討ケース

検討ケースを表-1に示す。CASE-1は場所打ちRC構造で計画された当初構造である。CASE-2は中床版下の支持部材（隔壁）を増加したものである。CASE-3は、トンネル本線道路面より下を全てコン

表-1 検討ケース

	当初設計	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
解析モデル					
上床版 接合条件	剛結合	ピン接合	ピン接合	ピン接合	ピン接合
中床版 接合条件	剛結合	ピン接合	ピン接合	—	剛結合
中床版下 支持条件	隔壁1枚支持	隔壁1枚支持	隔壁2枚支持	充填コンクリート	充填コンクリート

○；ピン接合、■；剛結合

クリートで充填し、充填コンクリート上面を路面とするものである。CASE-4 は、底版曲げ変形抑止効果をさらに高めることを目的に、中床版のみを剛結合として充填コンクリートを拘束し、底版の曲げ変形を抑えるものである。検討は常時、地震時について実施した。解析上のモデル化において、充填コンクリートは既設部材と一体化させないと考えているため、圧縮側のみに抵抗するように考慮した。また、ピン結合による断面力の変動を確認するため、CASE-1, 2 について上床版桁・中壁・中床版を全剛結合としたモデルについても検討を行った。

(3) 検討結果

表-2 に照査結果として、各ケースにおける許容値に対する発生応力度超過率と発生部位を示す。

常時解析では、CASE-1〔上床版・中床版ーピン接合〕で両側壁基部の曲げが許容値を満足しないが、CASE-2〔上床版・中床版ーピン接合〕では右側壁基部のみとなり、中床版下の支持部材（隔壁）増加による底版の曲げ変形抑制によって、応力度が低減されることが確認できる。隔壁数の増加では、許容値を満足することができるまでの効果は得られなかったが、さらに底版曲げ変形抑制効果が得られる中床版下コンクリート充填ケースでは、常時の許容値を満足する結果となった。

地震時解析では、CASE-1〔上床版・中床版ーピン接合〕において底版端部のせん断が許容値を満足しない結果となる。CASE-3 においても、許容値超過率は低減するものの、同部位で許容値を満足しない結果となったが、中床版を剛結合した充填コンクリートの CASE-4 では許容値を満足する結果となった。

以上より、中床版下にコンクリートを充填し、中床版のみ剛結合とすることで、施工済み部材への応力再配分を極力低減させ、上床版・中壁接合部をピン構造で成立することが確認された。

また、中床版下へのコンクリート充填は、中床版施工時の支保工、型枠の設置・撤去を省略することができるので、工期短縮にも寄与することとなる。図-3 に工期短縮対応後の立坑構造図を示す。

(4) 接合部構造

a) 上床版桁

上床版桁と既設側壁・中間梁接合部は、既設側壁天端に上床版桁を架設し、図-4 に示すようにアンカーバー固定によるピン構造¹⁾とした。上床版桁は側壁からの水平力を伝達させる必要があるため、アンカーバーの設計においては、地震時に作用する水

表-2 照査結果（許容値超過率と発生部位）

	接合条件		常時		地震時	
	上床版	中床版	曲げ	せん断	曲げ	せん断
CASE-1	ピン	ピン	両側壁基部 (1.09)	OK	OK	底版端部 (1.19)
	剛結	剛結	OK	OK	OK	OK
CASE-2	ピン	ピン	右側壁基部 (1.07)	OK	OK	底版端部 (1.12)
	剛結	剛結	OK	OK	OK	OK
CASE-3	ピン	—	OK	OK	OK	底版端部 (1.07)
CASE-4	ピン	剛結	OK	OK	OK	OK

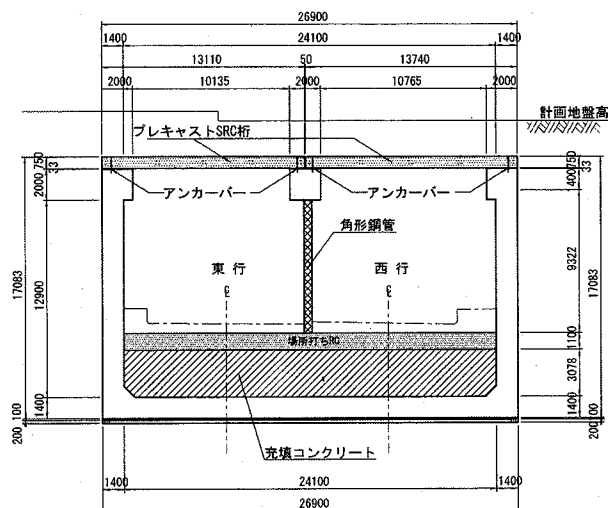


図-3 立坑構造図（プレキャスト構造）

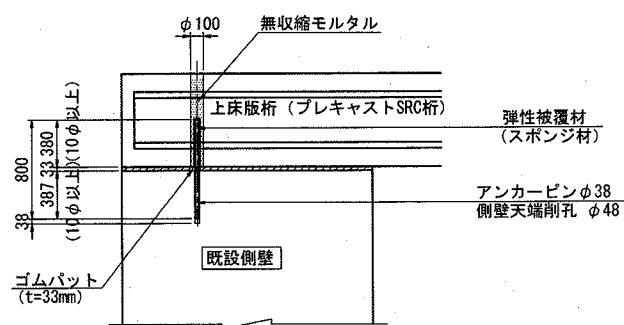


図-4 上床版桁接合部（側壁部）

平力に対して設計を行い、アンカーバーに作用するせん断と、上床版桁と既設側壁間のすき間、アンカーバー径を考慮した曲げに対する設計²⁾を行い、所要の安全性を確保している。

b) 中床版

中床版と既設部材の接合部は、接合条件の検討結果より剛結合とする必要があるため、鉄筋接続による剛結合とした。

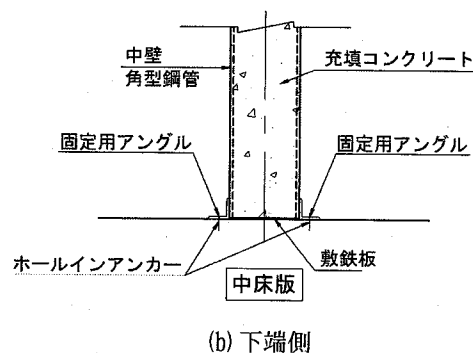
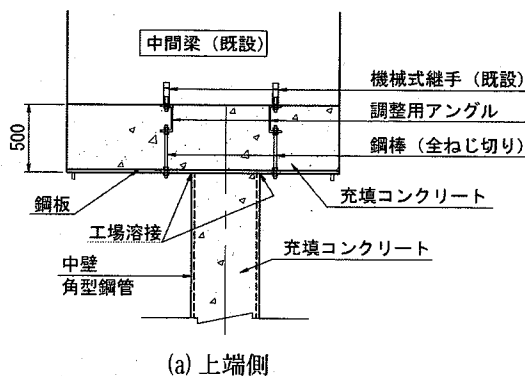


図-5 中壁（角形鋼管）接合部

c) 中壁

中壁角形鋼管と既設部材の接合部は、図-5 に示すように上端側は鉄筋接続とし、下端側はブラケットで角形鋼管を挟みこむ構造にてピン構造とした。

5. 構造形式変更に対する構造安全性の確認

(1) 常時

本立坑は、シールドトンネル施工時の仮設状態とトンネル本体として供用される完成状態とでは構造系が異なるため、設計においては「仮設時」、「完成時」の両方について照査を実施している。一般的な設計方法では、完成時の照査で仮設時の残留応力を考慮しない方法（完全分離解析）によって行われており、当初設計では中壁、中床版がない仮設状態（許容値は施工時割増）で側壁および底版の部材は決定されている。一方、完成時は中壁・中床版により各部材の支間が短くなり、発生断面力が低減されるため、仮設時で決定した部材断面で、常時の許容応力度に対して余裕がある結果となっている。

本検討において、場所打ちRC構造の剛結構造からピン構造へ変更したことを考慮し、本検討ではより正確な応力状態を把握するため、仮設時の残留応力を考慮した逐次分離解析により照査を実施した。

2次元フレームモデルによる完全分離解析と逐次分離解析結果を表-3 に示す。これより、仮設時の残留応力を考慮しない完全分離解析では、許容値を満足するが、逐次分離解析では、側壁および底版で許容値を超過する結果となった。そこで、立坑部材の版としての挙動や部材同士の拘束効果（3次元効果）に着目し、2次元フレームモデルによる仮設時断面力との対比を行い、その影響を把握することを目的に、仮設時について3次元シェル要素によるFEM解析を実施した。

表-3 完全分離解析と逐次分離解析による発生応力度

完全分離解析

・解析モデル

※ 荷重は上記解析モデルに全荷重を同時載荷。

発生応力度 (完成時)

	鉄筋 σ_s (N/mm ²)	コンクリート σ_c (N/mm ²)
側壁中央	92 (160)	5.2 (10.0)
側壁下端	71 (160)	3.0 (10.0)
底版端部	103 (160)	4.4 (10.0)

※) () の値は常時の許容応力度を示す。

・解析モデル (仮設時)

※ 上記解析モデルに仮設状態で作用する荷重を載荷。

発生応力度 (仮設時)

	鉄筋 σ_s (N/mm ²)	コンクリート σ_c (N/mm ²)
側壁中央	172 (250)	4.9 (12.5)
側壁下端	180 (250)	7.8 (12.5)
底版端部	210 (250)	10.3 (12.5)

※) () の値は施工時の許容応力度を示す。

逐次分離解析

・解析モデル (完成時) ・

※ 上記解析モデルに仮設時から完成時の増分荷重を載荷。仮設時の発生応力度と重ね合わせを行う。

発生応力度 (完成時；仮設時残留応力考慮)

	鉄筋 σ_s (N/mm ²)	コンクリート σ_c (N/mm ²)
側壁中央	211 (160)	7.1 (10.0)
側壁下端	192 (160)	8.9 (10.0)
底版端部	232 (160)	11.6 (10.0)

※) () の値は常時の許容応力度を示す。

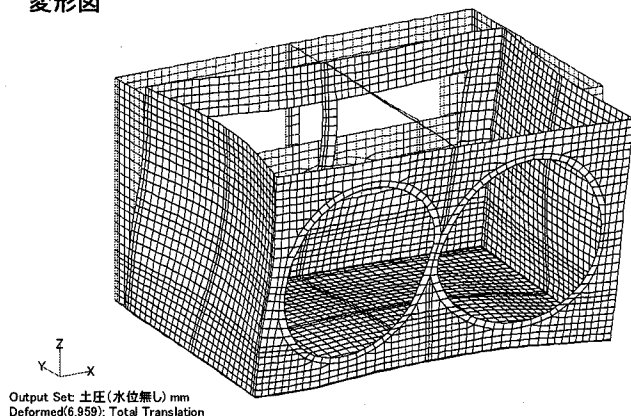
着色部は許容応力度超過を示す。

表-4 FEM 解析諸元

解析コード	MSC NASTRAN
解析手法	静的荷重による線形弾性解析
使用要素	4 節点シェル要素
材料物性値	$E_c = 28000$ [N/mm ²] $\nu_c = 0.167$ $G_c = E/2 (1 + \nu_c)$ [N/mm ²] $\gamma_c = 2.45 \times 10^{-5}$ [N/mm ²]

表-4 に FEM 解析諸元を、図-6 に 3 次元 FEM 解析結果より得られた、変形図および左側壁の主応力分布図を示す。

変形図



左側壁の主応力分布

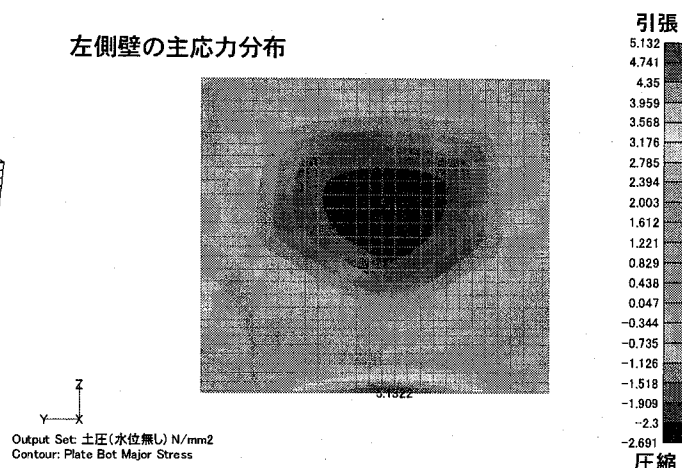


図-6 変形図・左側壁主応力分布図

表-5 に3次元FEM解析による仮設時の各部材応力度と2次元フレーム解析結果に対する比率を示す。表より、側壁中央部での鉄筋およびコンクリート応力度が35%程度低減されていることがわかり、版としての3次元効果が確認された。

表-6 に3次元FEM解析の仮設時応力度と2次元フレームモデルの完成時結果を足し合わせた逐次分離解析結果を示す。表より、各部材とも許容応力度を満足することが確認された。

以上より、常時において施工段階を考慮した逐次分離解析による照査を実施した場合においても、立坑全体の構造安全性が確保されることを確認した。

(2) 地震時

地震時の構造完全性の確認は、本検討での変更箇所を反映させ、レベル2地震に対して応答変位法により行った。

曲げに対する照査は、部材の降伏を許容し、以下の式にて照査を行った。

$$\mu_{\phi R} \leq \mu_{\phi 0} \quad (1)$$

ここに、

$$\mu_{\phi 0} : \text{許容塑性率} \quad \left(= 1 + \frac{\phi_u - \phi_y}{\alpha \phi_y}\right)$$

ϕ_y : 鉄筋降伏時の曲率 (1/m)

ϕ_u : 断面終局時の曲率 (1/m)

α : 安全率 (=1.5 とする)

一方、せん断に対する照査は、発生せん断力がせん断耐力以下となることを確認した。

表-7 に地震時応答変位法による照査結果を示す。表より、曲げ・せん断とも、常時で決定される断面で十分に耐力を有することが確認され、地震時にお

表-5 3次元FEM解析での仮設時応力度

	鉄筋 σ_s (N/mm ²)	コンクリート σ_c (N/mm ²)
側壁中央	106 [0.62]	3.3 [0.67]
側壁下端	52 [0.29]	3.0 [0.38]
底板端部	63 [0.30]	3.8 [0.37]

※) 【 】 の値は2次元フレーム解析との比率を示す。

表-6 FEM仮設時+2次元フレーム完成時の逐次結果

	鉄筋 σ_s (N/mm ²)	コンクリート σ_c (N/mm ²)
側壁中央	145 (160)	5.5 (10.0)
側壁下端	64 (160)	4.1 (10.0)
底板端部	85 (160)	5.1 (10.0)

※) 3次元FEM仮設時+2次元フレーム完成時

※) () の値は常時の許容応力度を示す。

表-7 地震時照査結果

	曲げ照査		
	応答塑性率 $\mu_{\phi R}$	許容塑性率 $\mu_{\phi 0}$	比率 ($\mu_{\phi R} / \mu_{\phi 0}$)
上床版桁	0.375	2.829	0.133
側壁	3.606	8.709	0.414
中床版	3.843	9.954	0.386
底板	0.595	6.568	0.091
	せん断照査		
	発生せん断力 S (kN)	せん断耐力 Ps (kN)	比率 (S/Ps)
上床版桁	529	960	0.551
側壁	1371	1439	0.953
中床版	573	1100	0.521
底板	1291	1408	0.917

いても所要の耐震安全性が確保されることを確認した。

6. おわりに

シールドトンネル発進・到着立坑の後施工部について工期短縮を目的に構造検討を実施した。

本検討で実施した対策、検討結果を以下にまとめる。

- 1) 当初計画では場所打ちRC構造部材であった上床版、中壁について、工期短縮のためプレキャスト部材（工場製品）を用いた。
- 2) 当初計画では剛結合であった既設部材と後施工部材の接合部をピン結合とし、施工性向上による工期短縮を図った。
- 3) 接合部構造の変更に伴う既設部材への影響は、中床版下にコンクリートを充填することによって、所要の安全性を確保し、ピン構造で成り立つことを確認した。

4) 既設部材（側壁、底版）の版としての効果を適切に評価するため、3次元FEMモデルによる解析を行い、仮設時の応力状態を考慮した逐次解析においても立坑全体の構造安全性を確保できることを示した。

5) 本検討により、目標としていた場所打ちRC構造の標準工期3ヶ月程度に対し1ヶ月以上の工期短縮を可能とした。

参考文献

- 1) (社)PC 建協 関西支部 PC 構造物検討委員会：平成 16 年度 PC 構造物の設計に関する調査研究業務 業務 1 PC 構造物の適用の拡大に関する検討
- 2) 安松 敏雄・石田 博・田中 克則・村山 八州雄：変位制限構造用アンカーバーの耐震性能，土木学会論文集 No. 633/I-49，81-92，1999. 10