

名塩道路八幡トンネルにおける 無導坑方式の設計について

田中 孝・谷口 大樹

近畿地方整備局 大阪国道事務所 管理第二課 (〒536-0004大阪府大阪市城東区今福西2-12-35)

近畿地方整備局 兵庫国道事務所 工務第一課 (〒650-0142兵庫県神戸市中央区波止場町3-11)

名塩道路八幡トンネル (L=291.8m) は、全線にわたって低土被り (土被り約5m~22m) かつ上下線が近接するめがねトンネルである。本設計では、同種の施工事例を調査し、近年のめがねトンネルにおける設計、施工の動向や最新の知見を把握した上で、当初計画されていた導坑方式から無導坑方式へと変更し、数値解析と施工事例の両面から支保構造および覆工構造を決定した。また、めがねトンネル施工に伴う地山のゆるみ領域の拡大を抑制するため、補助ベンチ付全断面掘削工法による早期閉合を用いた施工計画を検討した。

キーワード 山岳トンネル, 無導坑方式めがねトンネル, 低土被り, 早期閉合

1. はじめに

国道176号は、京都府宮津市から阪神北部地域を経由して大阪市に至る延長約147kmの主要幹線道路である。このうち名塩道路は、西宮市山口町から宝塚市栄町の区間について、現道拡幅を主体として計画された延長10.6kmの道路である。当該区間の現道は、カーブが多く幅員が狭小な2車線道路に1日当たり約2万台を超える交通量があり、慢性的な交通渋滞が生じている。さらに一部区間では、異常気象時通行規制区間に指定されているとともに、ほとんどの区間に歩道が無い歩道がある場合も幅員が極めて狭いため、交通安全の確保が求められている。

本報告では、名塩道路内に計画される八幡トンネルにおいて、全線にわたる低土被りかつめがねトンネルという特殊条件下での設計及び施工計画について報告する。

2. 設計の背景

一般的な山岳トンネルは、相互の近接影響を回避するためトンネル中心間の離隔を約 3D (D: トンネル掘削幅、通常の2車線トンネルの場合 D=10m) 確保する。しかし、用地上の制約等からトンネル間の離隔が確保できず、2本のトンネルを近接させる場合に、その形状からめがね (超近接) トンネルと呼ばれる特殊なトンネル構造となる。2本のトンネルの最外面間の離隔は 0~1m 程度であることが多い。

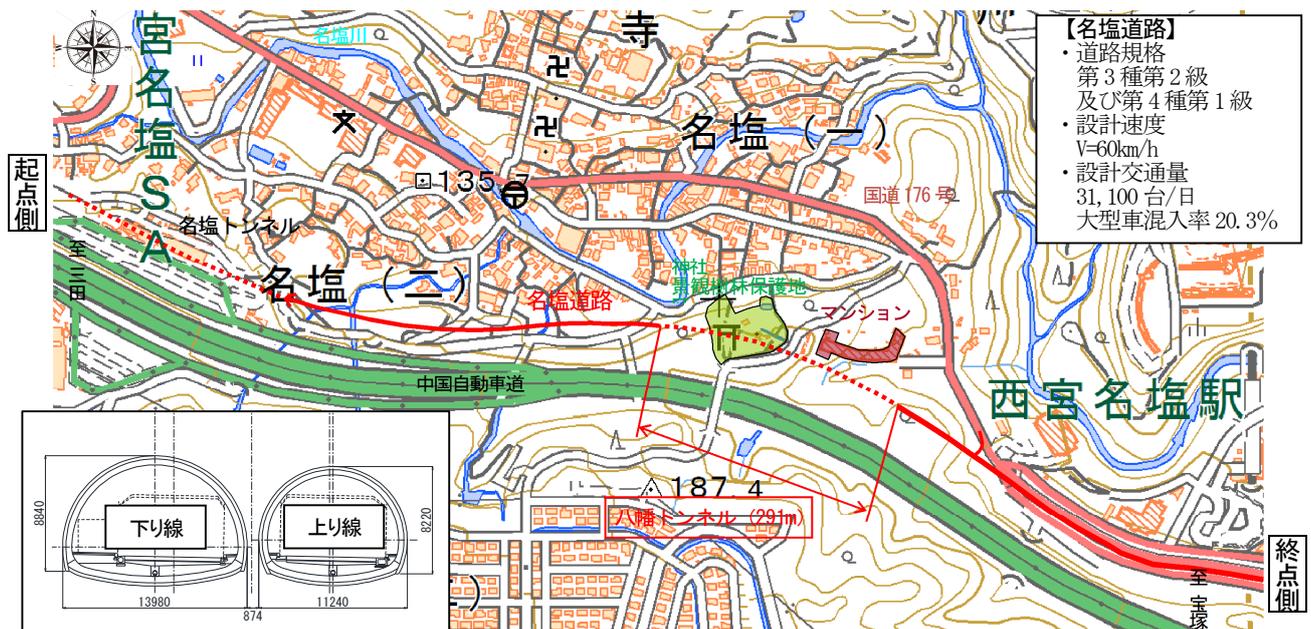


図-1 名塩八幡トンネル位置図及び断面 (DIII)

日本のめがねトンネルの歴史は、伊祖トンネル(1974.6-1975.5:沖縄県浦添市, L=90m, 矢板工法・機械掘削)に始まる。その後、めがねトンネルの施工は導坑方式(中央導坑+側壁導坑、中央導坑)が主体であった。近年の設計・施工技術の発達を受け、導坑方式の課題であった工期短縮やコスト削減を目指して下津トンネル(H13-16)、大門寺トンネル(H14-16)にてめがねトンネル掘削へ無導坑方式が採用された。以降も施工実績を積み重ね、めがねトンネルにおける無導坑方式での施工が確立されつつある¹⁾。この背景には、トンネル掘削に伴う緩み荷重(全土被り荷重)を担保した支保構造仕様の設定や中間地山の補強、掘削断面の早期閉合を行うことで、単独トンネル2本を超近接させて掘削する無導坑方式でのトンネル構造の成立性が実証されたことが大きな要因となっている。本設計においても、無導坑方式の優位性を確認した上で、前述したトンネル構造の成立性に配慮し、詳細設計及び施工計画を検討した。

3. めがねトンネル構造設計方針

八幡トンネルが計画される地山は、神戸層群の砂岩、レキ岩から構成され、トンネル全線にわたって低土被り(最大土被り約22m)となる。また、トンネル周辺には神社およびマンション・立体駐車場が存在し、トンネル掘削に伴う影響が懸念された。今回のような特殊なトンネル設計には、通常のトンネル設計手法の適用が困難であるため、以下の方針により支保構造及び覆工構造仕様を決定した。

- ①近年の同種トンネルの施工事例の分析を行い、暫定的に支保工・覆工構造仕様を設定
- ②数値解析(FEM解析)による支保構造仕様及び掘削方法等の検証
- ③②に加え、めがねトンネルの特性を考慮し、トンネル間の中間地山の全土被り荷重による支保構造仕様の照査を実施

4. 支保構造・覆工構造の検討

(1)同種トンネルの施工実績

無導坑方式めがねトンネルのトンネル構造は、後進坑の掘削に伴う近接影響(緩み荷重)を先進坑のどの構造部材が負担するかによって表-1のように分類される。

表-1 無導坑方式めがねトンネル構造

タイプ①:支保・覆工等厚タイプ 支保工+中間地山(改良)が荷重を負担
タイプ②:支保工増厚タイプ 支保工+支保工増厚分が荷重を負担
タイプ③:覆工増厚タイプ 支保工+覆工が荷重を負担

近年の施工事例からは、支保工及び中間地山によって後進坑掘削に伴う緩み荷重を負担するタイプ①が多く適用されている。当該地山は施工事例と比べ比較的良好であることや直上に構造物が無いことから、本設計においてもタイプ①:支保・覆工等厚タイプを適用した。

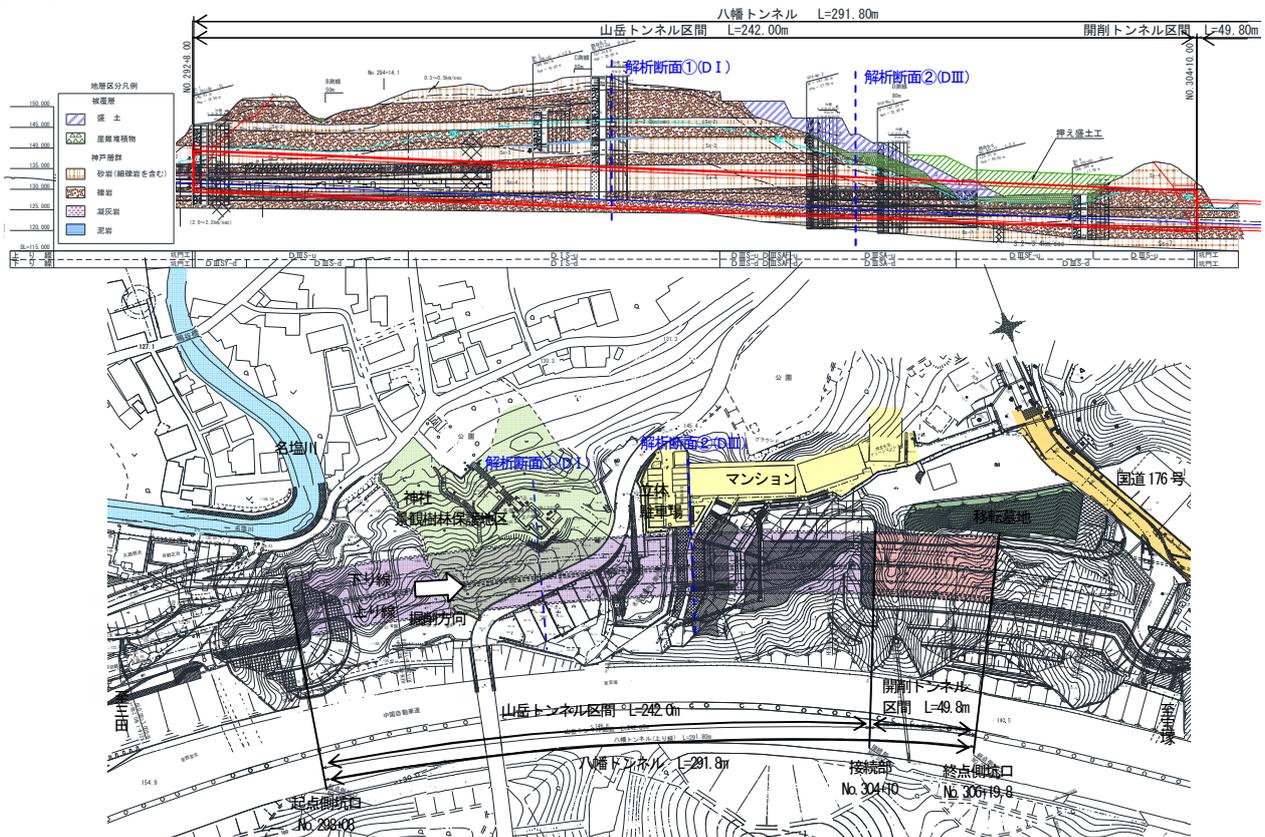


図-2 地質縦断面図及び平面図

支保構造及び覆工構造仕様については、以下のような傾向が見られた。これを参考とし、暫定的に支保構造及び覆工構造仕様を設定した。

- ・吹付けコンクリート：標準厚～+5cm（先進坑は高強度）
- ・鋼製支保工：標準仕様～1ランクアップ
- ・ロッドボルト：標準仕様（4m）
- ・覆工コンクリート：標準仕様+5～10cm（単鉄筋、複鉄筋）
- ・インバートコンクリート：標準仕様+10～15cm（単鉄筋、複鉄筋）
- ・中間地山補強：注入式ボルト（FRP）

(2) FEM解析

施工事例より暫定的に設定した支保構造仕様の検証としてFEM解析（二次元非線形弾性モデル）を実施した。解析断面は、解析断面①：神社近接断面（DI,最大土被り）及び解析断面②：マンション近接断面（DIII）の2断面とした（図-3,4）。解析に用いた地山物性値、支保工物性値、各種許容値は表-2～4に示す。また、櫻井ら

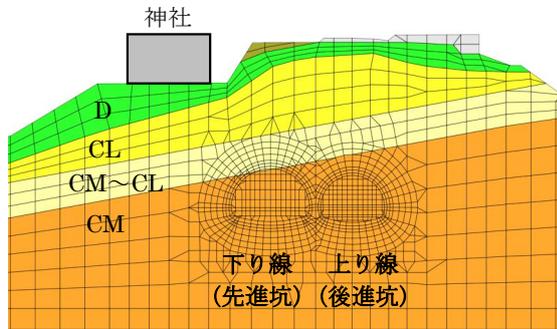


図-3 解析断面①：神社近接断面

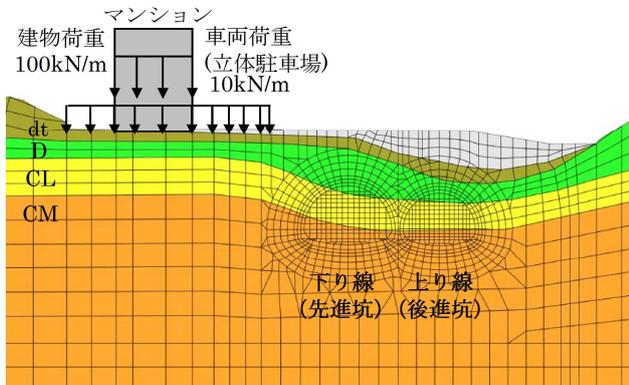


図-4 解析断面②：マンション近接断面

の提案する直接ひずみ法³⁾による切羽安定性の評価及び破壊近接度法による地山の安全性評価を実施し、実績と理論の両面から検証を行なった。

また、掘削順序についてもFEM解析を用いて比較を行なったが、どちらを先行掘削しても変位量に大きな差は見られなかった。ここでは、掘削断面積が大きく、近接構造物側を通過する下り線を先行して掘削し、トンネル構造を構築することで近接構造物への影響を極力抑制することとした。トンネル掘削工法は後述する補助ベンチ付き全断面掘削工法（早期閉合）として、解析ステップ～掘削順序を反映した。

表-2 地山物性値一覧

地質	単位体積重量 γ [kN/m ³]	変形係数 E[kN/m ²]	粘着力 C[kN/m ²]	内部摩擦角 ϕ [deg]
盛土	19.0	4,000	20	25.0※
dt	18.0	4,000	15	25.0※
D	20.0	63,000	50	30.0
CL	23.0	186,000	400	30.0
CM~CL	23.5	561,000	600	35.0
CM	24.0	1,514,000	1000	40.0

※初期応力解析において地盤に破壊領域が生じないように調整した値

表-3 支保工物性値及び許容応力度一覧

鋼製部材	仕様	弾性係数 E[kN/m ²]	許容応力度 [kN/mm ²]※
吹付けコンクリート	$\sigma_{ck}=18$ [N/mm ²]	4.0×10^6	6.75
高強度吹付けコンクリート	$\sigma_{ck}=36$ [N/mm ²]	6.0×10^6	13.5
鋼製支保工	H-125	2.0×10^8	210
	H-150	2.0×10^8	210
	H-200	2.0×10^8	210

※施工時耐力として許容応力度（長期）を50%増しとした値

表-4 近接構造物の許容値

構造物	許容沈下量[mm]	傾斜角[rad]
神社	15mm	0.3×10^{-3}
マンション	20mm	0.5×10^{-3}
立体駐車場	8mm	—

表-5 解析結果(1) (FEM解析：解放率 掘削時 30%、支保設置時 70%)

評価項目 解析ケース	支障物件への影響			一次支保工の耐力検証					
	最大沈下量 ※0は許容値 δ (mm)	最大傾斜角 ※0は許容値 Δ (rad)	判定	吹付けコンクリート			鋼アーチ支保工		
				発生応力 σ (N/mm ²)	許容応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	判定	発生応力 σ (N/mm ²)	許容応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	判定
解析断面① (DI) 八幡神社と近接 (吹付けコンクリート：t=15cm、鋼製支保工：H-125) : DIの標準パターン									
上り線(後行)	2.5	1.2×10^{-4}	OK	2.49	\leq 6.75	OK	3.75	\leq 210	OK
下り線(先行)	(≤ 15)	($\leq 0.3 \times 10^{-3}$)		12.70	$>$ 6.75 \leq [高] 13.50	NG OK	6.74	\leq 210	OK
解析断面② (DIII) マンションと近接 (吹付けコンクリート：t=25cm、鋼製支保工：H-200) : DIIIの標準パターン									
上り線(後行)	2.7	1.6×10^{-4}	OK	1.48	\leq 6.75	OK	85.0	\leq 210	OK
下り線(先行)	(≤ 20)	($\leq 0.5 \times 10^{-3}$)		3.22	\leq 6.75	OK	103.2	\leq 210	OK

まず、トンネル掘削に伴う地山の応力解放率を先進坑及び後進坑ともに掘削時30%、支保設置時70%²⁾にて解析を行い、施工実績より設定した支保構造仕様の妥当性を検証するとともに近接構造物への影響がないことを確認した。解析断面① (D I) においては、先進坑(下り線)に高強度吹付けコンクリート ($\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$) の採用が必要となった(表-5)。

(3) 全土被り荷重による支保工応力度照査

既往の研究よりめがねトンネルの特性として、トンネル掘削に伴う地山の緩みが重複することで緩み領域が拡大するため、トンネル中間地山の緩み荷重(緩み高さID:Dは両トンネルの掘削幅)が中間地山と一次支保工に作用する可能性が指摘されている⁴⁾。本トンネルにおいては、全線にわたり低土被り(ID以下)であるため、中間地山の全土被り荷重が作用することを想定し(図-5)、先進坑の支保応力度の照査を行った。具体的には、後進坑掘削において応力解放率を掘削時100%としたFEM解析結果を用い、先進坑の一次支保工と中間地山自身による荷重の分担率を算出し、中間地山の全土被り荷重(P)に対する分担荷重の軸力を用いて、先進坑の一次支保耐力を照査した。照査の結果、解析断面① (D I) においては、鋼製支保工H-150及び高強度吹付けコンクリート厚20cmへとランクアップすることが必要となった。解析断面② (D III) においては、高強度吹付けコンクリ

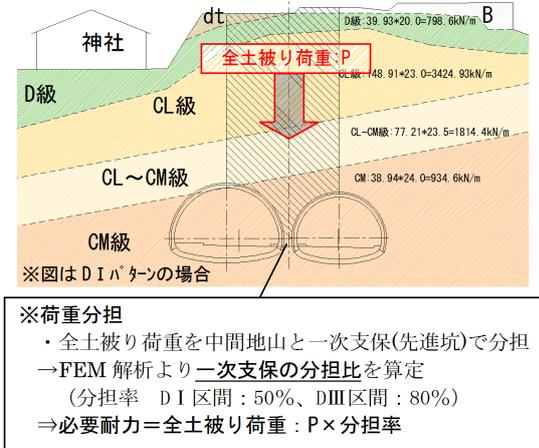


図-5 全土被り荷重の算定

ートの採用が必要となった(表-6)。

後進坑の支保構造については、先進坑以上の応力が作用しないことがFEM解析より判明しているが、安全側を考慮し、鋼製支保工及び吹付けコンクリート厚さは先進坑と同等とし、施工事例より吹付けコンクリートの強度は通常仕様 ($\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$) を採用した(図-6)。

(4) 覆工構造の設定

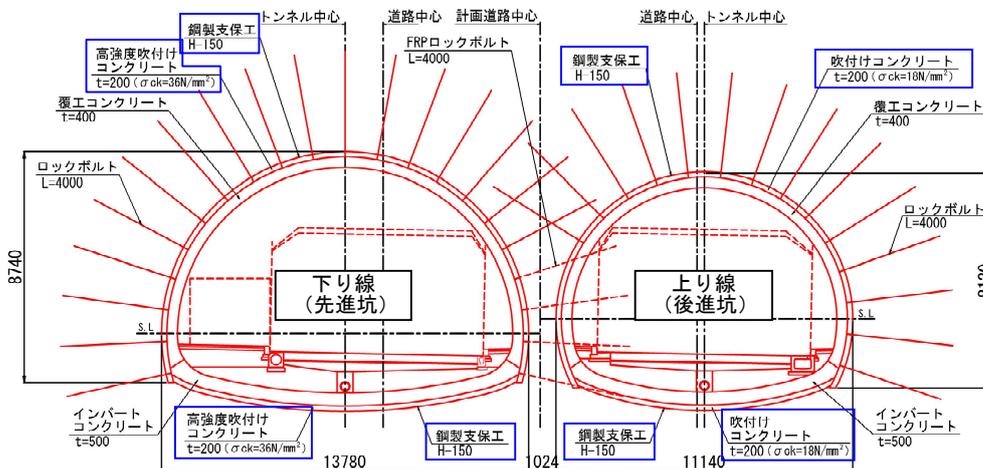
トンネル掘削に伴う荷重は支保工のみで負担し、変位が収束した後に覆工を打設するため、基本的に覆工へ地山からの荷重が作用しないと考えられる。しかし、めがねトンネルのメカニズムやその特殊性より未だ不明な点多く、覆工にどの程度の補強を行うかについては、統一的な考え方が定められていない状況である。そのため、施工実績を参考とし、以下のように設定した。

- D I (上下線) : 覆工厚40cm【無筋】
- D III (上り線) : 覆工厚40cm【複鉄筋, D22】
- D III (下り線) : 覆工厚45cm【複鉄筋, D22】

表-6 解析結果(2) (全土被り荷重照査)

項目	先進坑 支保耐力の検証		
	許容耐力 [短期 ^{※2)} (kN)	必要耐力 力 (kN)	判定
支保の仕様			
D I 区間			
1) D I パターンの高強度仕様 ^{※1)}			
・吹付けコンクリート: t=15 cm【高】	2025		NG
・鋼製支保工 : H-125	630		
・合計	2655	< 3486	
2) D I S パターン ^{※1)}			
・吹付けコンクリート: t=20 cm【高】	2700		OK (採用)
・鋼製支保工 : H-150	833		
・合計	3533	≥ 3486	
D III 区間			
1) D III パターンの標準仕様			
・吹付けコンクリート: t=25 cm	1688		NG
・鋼製支保工 : H-200	1334		
・合計	3022	< 3610	
2) D III パターンの高強度仕様 ^{※1)}			
・吹付けコンクリート: t=25 cm【高】	3375		OK (採用)
・鋼製支保工 : H-200	1334		
・合計	4709	≥ 3610	

※1) 吹付けコンクリートは高強度コンクリート(36N/mm²)、※2) 許容応力度×1.5倍



□ : 支保構造の検討により標準仕様からランクアップしたもの

図-6 八幡トンネル構造 (D I S)

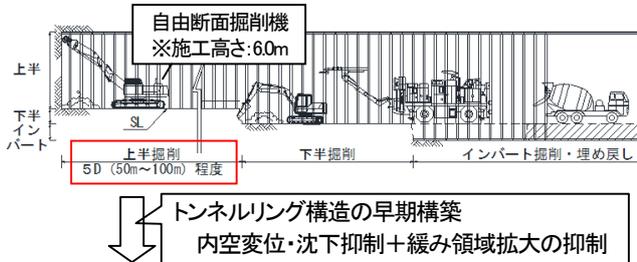
5. 施工計画の検討

(1) 掘削工法の設定

めがねトンネルでは、トンネル掘削に伴う地山ゆるみ領域が相互に干渉し、通常のトンネルよりも広範囲にわたるため、天端沈下・内空変位の拡大が懸念される。本設計ではトンネル構造の成立性を考慮し、掘削切羽の近傍で早期にトンネルのリング構造を構築することで、変位の抑制し、ゆるみ領域拡大の抑制が期待できる補助ベンチ付全断面掘削工法による早期閉合での掘削を計画した(図-7)。

補助ベンチ付全断面掘削工法による早期閉合を行う場合には、下半盤の位置から天端高さまでの掘削能力が必要となる。しかし、国交省で標準的に用いられる自由断面掘削機では施工高さが足りないため、早期閉合において適用事例が多く、汎用機械であるツインヘッドを適用することとした。

○上半先進掘削工法:機械掘削における一般的な掘削工法
⇒掘削切羽から約100m以上離れてトンネルリング構造が完成



○補助ベンチ付全断面掘削工法(早期閉合)
⇒掘削切羽から2~3m程度の離れでトンネルリング構造が完成

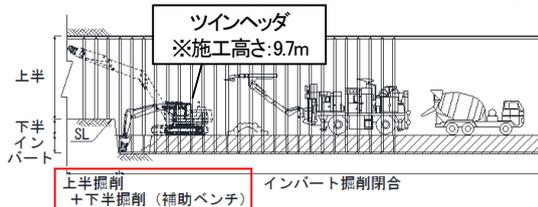


図-7 補助ベンチ付全断面工法による早期閉合

(2) 縦断方向上下線間離隔の設定

名塩道路事業の全体工程上の制約からトンネル供用までの期間が限られており、上下線を同時期に掘削する計画とすることで工期短縮を図った。これに伴い、縦断方向の掘削影響を考慮した両トンネル切羽の離隔設定が課題となった。同種トンネル施工事例の内、識名トンネル⁵⁾においては、上下線トンネルの縦断方向の掘削影響は、離隔約50mより徐々に先進坑支保への応力の増加が確認され、約20mとなると顕著に応力の増加が見られることが報告されている。これより、今回は識名トンネルの実

績による50mの離隔に加え、後進坑の切羽到達時に同地点で先進坑の吹付けコンクリート強度が発現していること(材齢28日)を考慮することとした。その結果、1ヶ月の掘進長は約50mとなることから縦断方向の上下線間の離隔を約100mと設定した。

6. まとめ

全線にわたる低土被りかつめがね構造となる特殊な条件下でのトンネルに対し、近年のめがねトンネル設計、施工の動向及び考え方を整理の上、以下の設計、施工計画を検討した。

- ①無導坑方式めがねトンネル構造の採用
- ②FEM解析及び全土被り荷重照査によるトンネル支保構造の決定
- ③補助ベンチ付全断面掘削工法による早期閉合の適用
- ④近接施工影響を考慮した縦断方向の離隔設定

7. おわりに

西宮市との協議の結果、トンネル名称は「名塩八幡トンネル」に決定し、着々と施工が進められている。施工により得られた計測データより、設計時の考え方や手法の妥当性を検証するとともに、得られた知見が今後の同種設計へフィードバックされ、技術発展に寄与することが望まれる。

謝辞

最後に本設計にあたり、国土交通省国土技術政策総合研究所真下道路構造物研究部長には非常に貴重な助言を頂いた。また、本論文作成あたりご協力いただいた関係者の皆様に感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 臨床トンネル工学研究所：無導坑めがねトンネル小委員会報告書
- 2) 真下英人・水川雅之・日下敦：トンネル早期閉合効果に関する解析的検討，トンネル工学報告集 第17巻 p35-41, 2007.11
- 3) 櫻井春輔：都市トンネルの実際，鹿島出版会，1998.3
- 4) 石川靖治・上村正人・米田裕樹・中川浩二：斬新な設計・施工のめがねトンネルで市街地に挑む，トンネルと地下 第34巻5号 p35-44, 2003.5
- 5) 新城実・玉城守克・津中重彦・島田智浩：小土かぶりの住宅直下を全断面早期閉合により施工，トンネルと地下 第40巻7号 p17-25, 2009.7