

未固結地山における超大断面トンネルの施工

The construction of ultra-large section tunnel through unconsolidated ground

西村誠一¹・武友憲重²・北川伸治²・小西克典³・塩川裕之⁴

Seiichi Nishimura, Kenjyu Taketomo, Shinji Kitagawa,
Katsunori Konishi and Hiroyuki Shiokawa

¹正会員 農修 株式会社熊谷組 宇佐山トンネル作業所 (〒520-0000 滋賀県大津市南滋賀町字丸山987-17)

E-mail: senishim@ku.kumagaigumi.co.jp

²正会員 大阪府道路公社箕面有料道路建設事務所 (〒565-0826 大阪府吹田市千里万博公園1-1)

³正会員 工修 熊谷・間・竹中土木・大豊・森本JV箕面トンネル南工区 (〒562-0027 大阪府箕面市石丸2-10)

⁴正会員 工修 株式会社熊谷組 土木事業本部 トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)

The Minoh toll road tunnel is a mountain tunnel about 5.6 km long that goes through the Hokusetsu Mountains in the northern part of Osaka Prefecture. The southern sector of this tunnel discussed in this paper is approximately 2.2 km long. The geology around the southern entrance is unconsolidated ground characterized by gravel, sand and clay of the Osaka Group. The maximum cross section area of tunnel in unconsolidated ground is about 313 m². The side drift method was applied to ultra-large section. A pipe roof method (812.8 mm-diameter) was adopted for auxiliary methods to stabilize a face. This paper deals with the construction of the ultra-large section tunnel in the adverse geological conditions.

Key Words : ultra-large section tunnel, unconsolidated ground, side drift method

1. はじめに

箕面有料道路は、大阪中心部と北大阪地域および京都府亀岡市を結ぶ国道423号のバイパスとして新御堂筋をさらに北へ延伸する約7.3kmの自動車専用道路である。このうち大阪府北部の北摂山地を貫く約5.6kmの区間は、暫定対面2車線で供用する北行線（本坑）と当面は避難坑として運用する南行線の2本のトンネル構造となる（図-1）。

箕面有料道路山岳トンネル築造工事（南工区）は、トンネル延長約5.6kmのうち南側約2.2kmを施工するものである。最大の特徴は、その南側坑口部において最大掘削面積が313m²にも及び、未固結地山では、わが国最大級の超大断面トンネルとなることである。

施工は本坑の掘削に先立ち、これと平行する作業坑（掘削断面積41m²、延長347m）に着手したが、丹波帯強破碎頁岩層では切羽面が自立せず、鏡面の押し出しや崩壊、大変形といった事態に見舞われ、施工

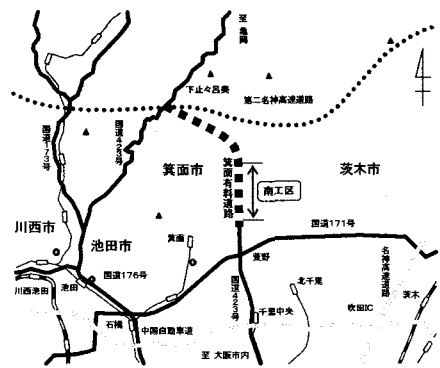


図-1 全体位置図

に難渋した経緯がある。本坑はこの作業坑を利用して坑奥から坑口側に向けて順次断面を拡大しながら行われた。

これら作業坑や本坑既掘削区間の計測結果と施工実績をもとに、未掘削区間の設計・施工法の再検討を行いながら、超大断面区間の施工に臨んだ。

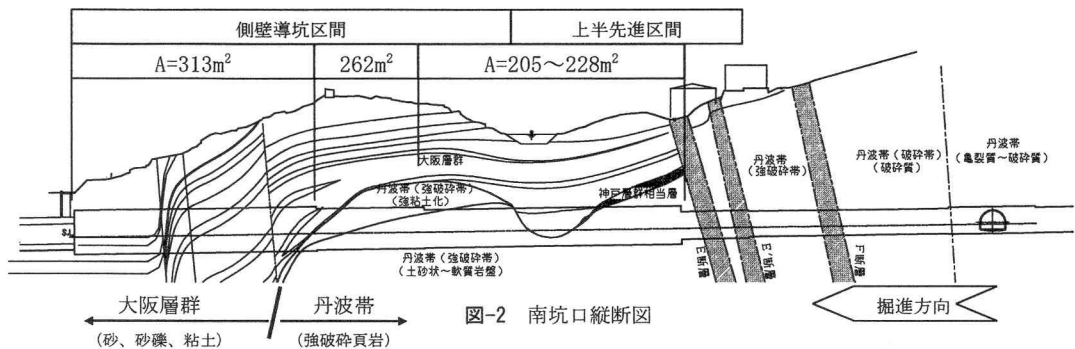


図-2 南坑口縦断面

2. 地質概要

南坑口部の地質は図-2に示す様に北摂山地を構成する中・古生層の丹波帯（頁岩主体）が分布し、その上に大阪層群（砂、礫、粘土）が被覆している。

当区間では、有馬高槻構造線の派生層が幾重にも分布し頁岩は強く破碎され、粘土化が著しい脆弱な地山である。

南坑口部での地山変形係数は、各種地質調査や試験、および施工中のトンネル計測をフィードバックした再現解析より大阪層群でおおむね80～100MPa、丹波帯（破碎頁岩）で55～70MPaであった。

3. 超大断面部の施工

(1) 支保パターン

超大断面部の支保構造、断面諸元は図-3および表-1に示すとおりであり、特殊な仕様のものは用いておらず、標準的な支保部材の組合せである。

表-1 支保構造および断面諸元

名 称	加背区分		備 考
	導坑部	本体部	
吹付けコンクリート	t=250	t=350	$\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$
鋼アーチ支保工	H-200	H-250	SS400
ロックボルト	L=6m	なし	地山側 n=7本
	L=4m		内空側 n=6本
掘削断面積(設計)	全掘削断面 (m2)		313
	導坑掘削 (m2)		74 (片側)

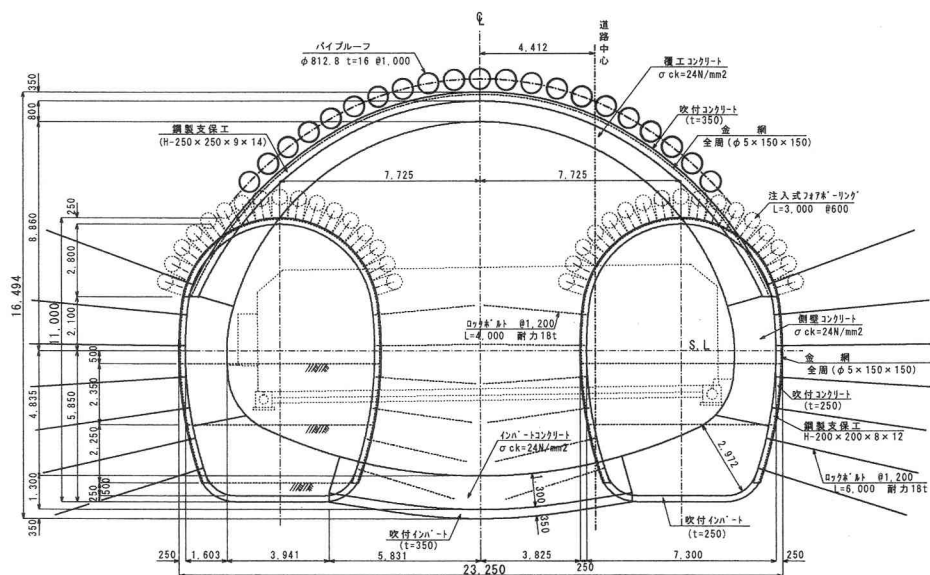


図-3 支保パターン図

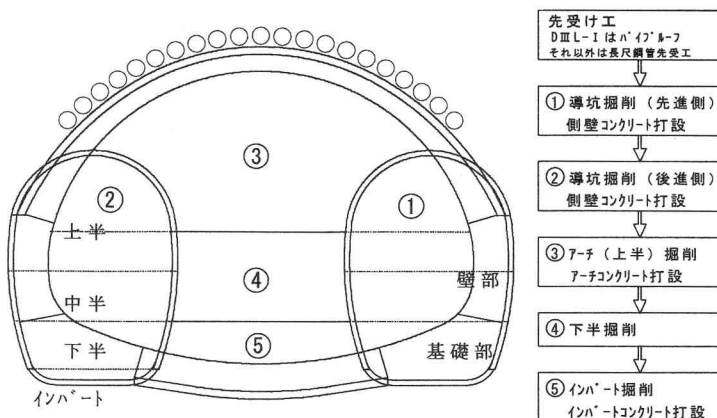


図-4 施工フロー図

(2) 施工手順

超大断面部の施工フロー図を図-4に示す。

最初に、左右の導坑を掘削し、側壁コンクリートを打設する。その後、アーチ掘削に着手した。

側壁導坑先進工法の特徴は、本体アーチ掘削時の荷重を側壁コンクリートで支持するため、上半先進工法で掘削した区間の弱点であった脚部沈下の抑制が期待できることである。

最後にインバート閉合により恒久的な安定を確保した。

(3) 施工概要

a) 導坑掘削工

側壁導坑は掘削断面積 74m^2 、掘削高さ 11m の縦長形状であるため、加背割は上半・中半・下半・インバートの4分割とした。

施工は、上半・中半と下半・インバートを交互併進し、吹付けインバートにより早期閉合を行った。

補助工法としては、注入式フォアボーリングをパターン化して採用した。また、切羽の自立が困難な砂層（均等係数 $U_c=4.5$ ）の出現箇所には、注入式二重管削孔長尺鏡補強工を必要箇所により限定して採

用した。

湧水対策としては、事前に予想した帯水砂層に対して導坑切羽より長尺水抜きボーリングを行った。

これら水抜きと補助工法により、砂層を掘削することができた（写真-1）。

b) 側壁コンクリート工

掘削完了後、側壁コンクリートの施工に着手した。側壁の高さは 7.7m になり、狭隘な導坑内での作業となることから、基礎部と壁部に分割して施工した。

配筋仕様は内面主筋が $D35@125$ の2段配置となり、さらには、コーナー補強鉄筋、スターラップが高密度に配置されているため、①主筋・配力筋のユニット化、②ウエッジ圧入式継手の採用によるスターラップ組み立て作業の簡便化、③本体アーチ部およびインバート部との接合箇所、ネジ・スクイズ式鉄筋継手工法（機械式継手）を採用する等、施工の合理化を図った（写真-2）。

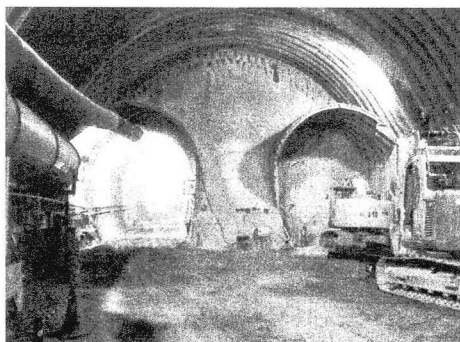


写真-1 導坑坑口

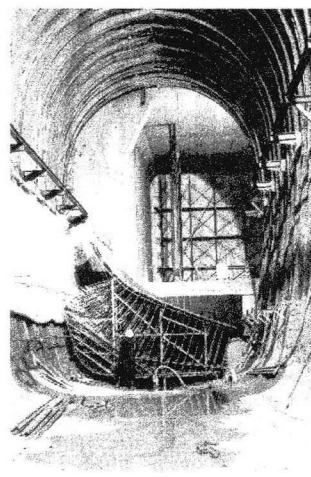


写真-2 導坑配筋状況（基礎部）

c) 本体アーチ掘削工

側壁コンクリート打設完了後、上半盤へのアプローチ盛土を行い、アーチ掘削を開始した。

掘削機械は大型ブレイカー(ロングリーチ仕様)を用い、バックホウを並べて効率的な掘削を行った(写真-3)。

鋼アーチ支保工は片側で14mもの長さとなるため、導坑天端付近で分割された4ピースの支保工を仮置場で接合し左右2本とし、専用エレクターで建て込んだ。

補助工法は、大阪層群未固結地山であり、最大断面となる区間(A=313m²)は、パイプルーフ工法(φ812.8, L=90m)を採用した。

また、丹波帯強破碎岩盤地山の最大断面に準じる区間(A=262m²)では、無拡幅鋼管先受け工法を用いた。

なお、導坑と同様に、自立困難な砂層に限定して、注入式二重管削孔長尺鏡補強工を用いた。

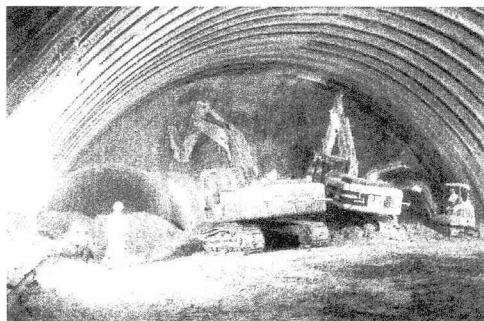


写真-3 本体アーチ掘削状況

d) パイプルーフ工

パイプルーフの工法選定にあたっては、①長距離掘進(約90m)であること、②自立性に乏しい砂層や硬質粘土層などの土質変化が激しい地盤であること、③地下水の湧出が懸念されたこと、④作業スペースに制約を受けること⑤推進反力を既設構造物で受けなければならないこと、⑥到達側での先導体(掘進機)の回収ができないこと、⑦高精度の推進

が不可欠なこと、などの施工条件から掘進機の管内回収が可能な、泥土圧式推進工法を採用した(写真-4)。

施工はトンネル坑口側に立坑を構築し、そこを発進基地として坑奥側に向けて推進した。施工精度は高く(約1/2000)、トンネル掘削時にはきれいに並んで出現した。

なお、今回のパイプルーフはノンセクション方式を採用したが、パイプ間の抜け落ちもなく良好な先受け効果が発揮されていた。

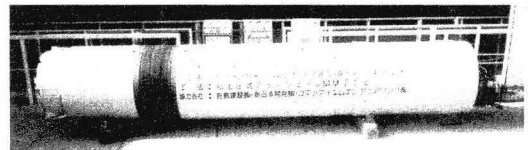


写真-4 パイプルーフ掘進機

e) アーチ覆工コンクリート工

当該区間のアーチ覆工においては、次のような問題点と課題が予想された。

- ① 高密度配筋部のジャンカの発生、材料分離、充填不良箇所の発生
- ② アーチ天端部での充填不足(複鉄筋構造+大巻き厚[最大125cm])
- ③ 大スパン、大巻き厚に伴う温度ひび割れ、乾燥収縮に伴うひび割れの発生

これらの課題に対して高流動コンクリートは、最近その適用事例が増加しているものの、以下のデメリットも考えられた。

- ① 側圧増加に伴うセントルの強度不足
- ② 棲型枠からのコンクリートの流出
- ③ コンクリート単価の高額化

よって、高流動コンクリートの採用は不相当と判断し、新たなコンクリートを開発することとした。

開発にあたっては、ワーカビリティ等のフレッシュコンクリートの性状改善と、ひび割れ抑制等の硬化コンクリートの性状改善、の2つの観点から

表-2 準高流動コンクリート(膨張材添加)配合表

Gmax (mm)	セメント 種別	W/C (%)	s/a (%)	σ _{ck} (N/mm ²)	スランプ [*] (cm)	単位量(kg/m ³)						
						C	W	S	G	P	E	AD
20	N	57	48	24	23	287	175	796	890	100	20	5.29 1.3%

P:石灰石微粉末 E:水和熱抑制型膨張材(エトリンガイト・石灰複合系) AD:高性能AE減水剤

※ スランプフローは管理参考値として42cmを採用

種々の検討、配合設計、試験練りをくり返した。最後に、実際に用いるセントル型枠の一部を使用してモデル施工を行い、実施工への適応性を検証した。

ひび割れに関しては、3次元有限要素法を用いた温度応力解析より、天端部での最小ひび割れ指数0.7が、膨張材の添加により1.3程度に改善される結果となり、その採用を決定した。

開発されたコンクリートの性状、配合は表-2に示すとおりであり、施工結果も良好であった。

なお、覆工コンクリートの施工スパン長は1回の打設数量が200m³以下となるよう、6mを基本した。

f) 下半・インバートの施工

下半は導坑を取り壊しながらまとめて掘削を行い、インバートは掘削、吹付けを逐次行い早期の断面閉合を図った。

最後に鉄筋の組立てを行い、インバートコンクリートを打設した。

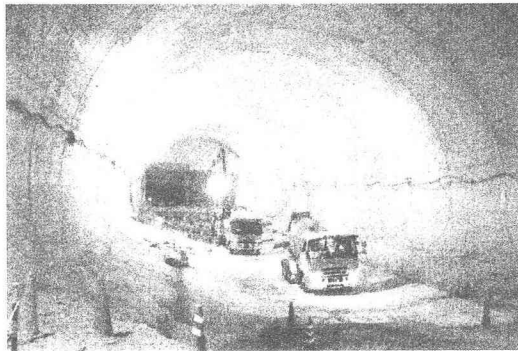


写真-4 インバートコンクリート打設状況

4. 計測結果

(1) 坑内A計測

図-5に示すA計測の結果、以下の結果を得た。

- ① 天端沈下量は、上半先進区間では切羽の進行に伴い増加し最大で100mmを超えた。しかし側壁導坑先進区間の本体アーチ天端沈下は30mm程度以下であり、大きな変化は見られない。
- ② 側壁導坑先進区間における本体アーチ天端沈下の収束距離は35～40m程度であった。これはトンネル直径の1.5～2.0倍に相当する。
- ③ 上半先進区間では、脚部沈下は天端沈下と連動し、土かぶりとも相関性がみられた。一方、側壁導坑区間における本体アーチの脚部沈下は天端沈下に対して平均で55%の比率で収まっていおり、また土かぶりとの相関性は認められない。

(2) 坑外計測

図-6にトンネル天端上方2.5m位置の地中沈下計の経時変化図を示す。これによれば、導坑掘削後の収束変位は52.9mm、本体アーチ掘削後の収束変位は大背掘削を含み101.7mmとなっており、導坑掘削により約50%の変位が生じていることが分かる。また、上半アーチ掘削前を初期値とした上半アーチ掘削単独の先行変位率は約27%という結果であった。

図-7に坑外計測に関する総括図を示す。作業坑では、トンネル天端部から地表面まで一様に沈下を起こす「共下がり」が見られた。しかし、本坑では、トンネル直上の地中沈下に対する地表面沈下の比率は60%程度と低減され、「共下がり」現象は現れていない。これは、側壁導坑による脚部沈下の抑制効果であったと考えられる。

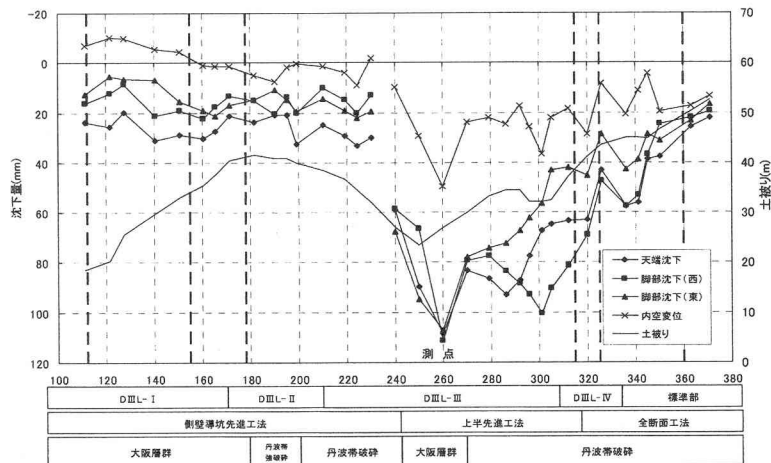


図-5 A計測結果縦断分布（導坑区間は上半アーチ部掘削時の計測結果）

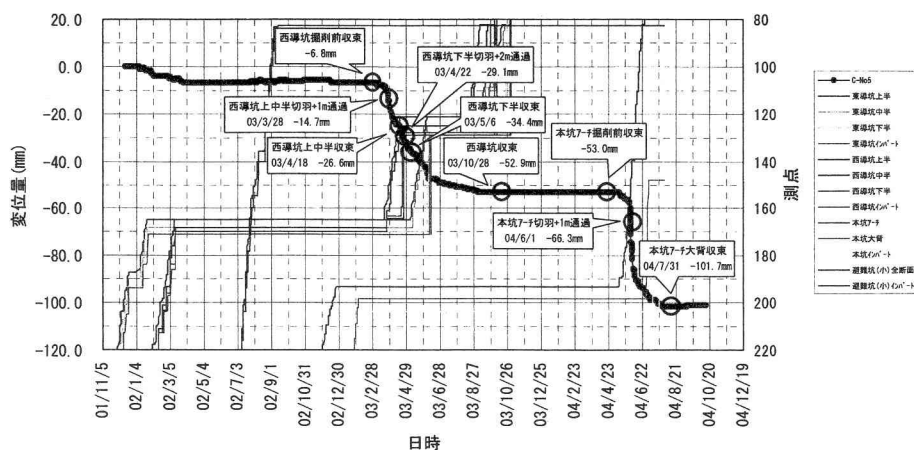


図-6 地中沈下経時変化図（絶対沈下量）

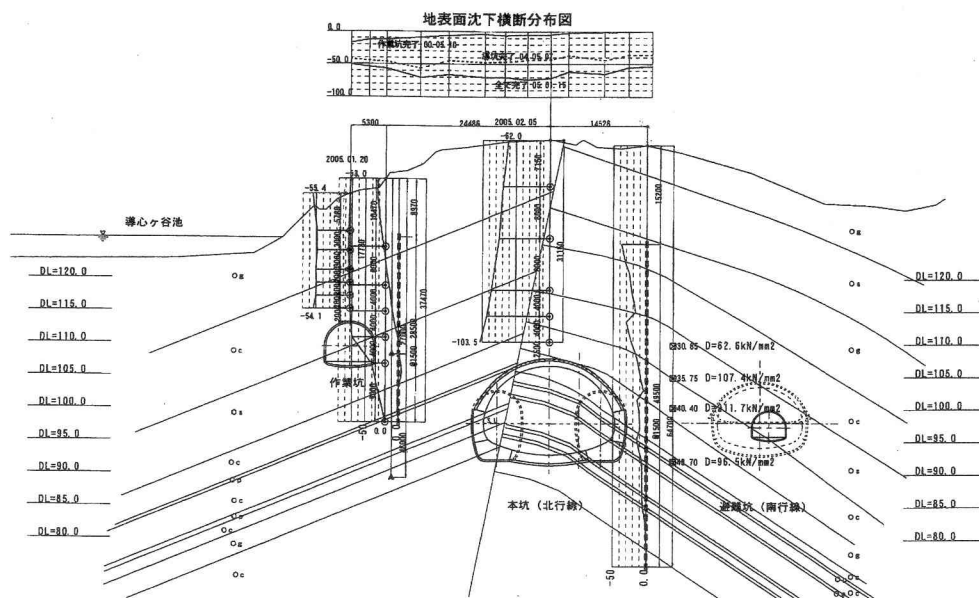


図-7 坑外計測総括図

5. おわりに

本工事は平成11年5月に作業坑掘削に着手し、平成17年2月に超大断面部のインバート閉合を完了した。この間多くの課題に遭遇したが、都度解決策を模索し、次工程の施工へ反映させてきた。施工を終え、得られた知見、感想を以下に示す。

- 掘削幅23mにも及ぶアーチ掘削時の切羽安定対策が課題であったが、長尺鏡補強工等により積極的に切羽前方を補強すれば、掘削は可能となる。
- 側壁導坑による大スパンアーチの脚部沈下抑制策は有効に機能した。これにより共下がりの防止や、緩みの抑制に寄与したものと考える。
- 壁面ひずみ(1.2%)による管理基準値を設定した

が、各種計測結果や再現解析結果よりこれを下回る安定した掘削ができたといえる。

最大掘削断面積が313m²にもおよぶ超大断面トンネルを未固結地山において完成させることができた。

これは、情報化施工による計測結果の設計・施工へのフィードバックや、それによる適切な補助工法・掘削工法の選択等による成果であったと考える。

謝辞：本工事の施工にあたり、箕面有料道路トンネル技術研究会の大阪大学名誉教授 松井保委員長をはじめとする委員の方々にご指導を頂きました。この場をお借りしまして心より御礼申し上げます。