

断層による影響を受けた不良地山における 補助工法の評価に関する研究

Study on effect and evaluation of auxiliary methods for mountain tunneling in weak ground

磯崎弘治¹⁾・寺尾賢治²⁾・河村靖男³⁾・西村誠一³⁾・塩川裕之⁴⁾

Kouji ISOZAKI, Kenji TERAOKA, Yasuo KAWAMURA, Seiichi NISHIMURA and Hiroyuki SHIOKAWA

The Minoh toll road mountain tunneling project (southern lot) includes construction of a main tunnel (2000 meters long), an evacuation tunnel (2009 meters long), a working tunnel (354 meters long) and crosscuts. The south entrance of the main tunnel, which connects with the on-off ramps, has an extremely large section exceeding 300 square meters at maximum. Since the geology is complex, the face was extremely unstable during excavation of the working tunnel with a significant volume of water inflow in many places. Various auxiliary methods were applied for the construction of a working tunnel to verify the suitable method for the main tunnel. This paper evaluates various auxiliary methods used in the working tunnel construction, focusing upon the effect of new injected long face reinforcement, and presents the design principle of the main tunnel.

Key Words: tunnel, 3D-analysis, auxiliary method, FIT

1. はじめに

箕面有料道路トンネルは、国道423号のバイパス道路として、大阪市の中心部から北へ伸びる新御堂筋線をさらに北へ延伸するもので、将来的には第二名神高速道路とも接続し、広域ネットワークの一環を形成するものであり、箕面市北部の標高200～600mの北摂山地を貫く、延長約5.6kmの道路トンネルである。このうち南工区は箕面市坊島地内より北に向かって延長2000mのトンネルを施工する。南工区の坑口部では、流出入のランプと接続するために、最大300m²を越える超大断面トンネルを砂、粘土を主体とする未固結地山に構築する計画である。本坑施工に先立ち本坑に平行に作業坑(延長347m)を掘進し、ここで地山条件の悪い箇所種々の補助工法を適用した。現在、作業坑の掘削を完了し、本坑は北側へ約850m、南側へ約180mの掘削を完了している。

本報文は、作業坑で実施した断層の影響を受けた不良地山における長尺先受け工法や長尺鏡補強工法の効果について検証するとともに、本坑南側坑口部での補助工法への適用について評価したものである。

1) 正会員 大阪府道路公社 箕面有料道路建設事務所

2) 大阪府道路公社 箕面有料道路建設事務所

3) 熊谷・間・竹中・大豊・森本共同企業体 箕面トンネル南工区JV

4) 正会員 熊谷・間・竹中・大豊・森本共同企業体 箕面トンネル南工区JV

2. 工事概要

工事名：箕面有料道路山岳トンネル築造工事（南工区）

施工場所：大阪府箕面市坊島地内

本坑：断面積 $313.0 \sim 80\text{m}^2$ 延長 2000m

避難坑：断面積 16m^2 延長 2009m

作業坑：断面積 $40 \sim 44\text{m}^2$ 延長 347m

箕面トンネル南工区の平面図を図2-1に示す。

作業順序は、347mの作業坑を掘削し、本坑基地部、避難坑基地部を掘削後、本坑を南北にそれぞれ掘進する。少し遅れて、避難坑も同様に南北に掘り進む。本坑の北行きは基本的に、補助ベンチ付き全断面工法で、本坑の南行きは、断面の大きさにより掘削工法が異なり、断面が小さい順に、補助ベンチ付き全断面工法、ショートベンチカット工法、サイロット工法で施工する計画である。本坑、作業坑の標準断面、およびランプ部の拡大断面を図2-2に示す。

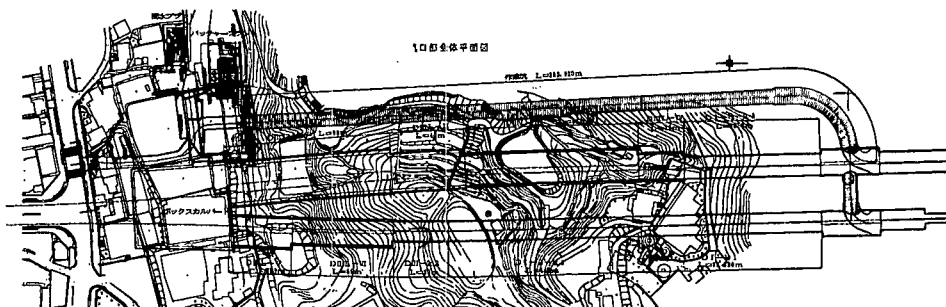


図2-1 箕面トンネル南工区平面図

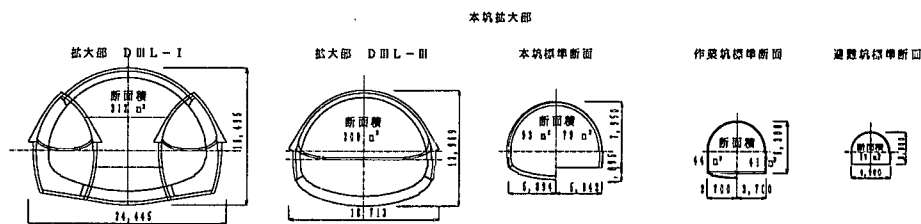


図2-2 本坑・作業坑標準断面およびランプ部拡大断面図

3. 地形・地質

箕面トンネル南工区は、有馬・高槻構造線の活動により形成された典型的な逆断層地形で、東西方向の断層が発達しており、隆起した山地と沈降した低地に挟まれた丘陵地の境界に地溝帯を形成している。

地質は、中～古生層の丹波帯（頁岩、砂岩、チャート、緑色岩等）が分布しており、その被覆層である大阪層群（砂礫、砂、粘土が主体）、さらにそれを不整合に覆う段丘堆積層から成っている。南坑口からは、大阪層群、神戸層群相当層、頁岩主体の丹波帯の順に遭遇する。

4. 施工上の課題

南工区の施工上の課題として、①大阪層群の未固結層および丹波帯の破碎質岩の大断面トンネルの切羽の安定性、②地下水の突発湧水、③地表面の構造物への影響、④双設トンネルの影響、⑤環境問題（騒音・振動、空気汚染、渇水・水質汚濁等）が挙げられた。

本報文では、本坑掘削に先行して作業坑を掘削したので、その時の計測、観測結果を基に、トンネル切羽の安定性の維持やトンネル周辺環境への影響抑制対策、特に地表面沈下対策を主眼に言及する。

5. 作業坑の施工実績

5-1. 施工実績

1998年5月17日より作業坑の掘削を開始した。坑口から約100m間は、砂礫層、砂層、粘土層を主体とする大阪層群で、その先100mは天端に神戸層群相当層が出現し、その以奥は、黒色頁岩、珪質頁岩、砂岩が分布する丹波帯が出現した。大阪層群では、特に砂層に水がある場合には、切羽の安定性が著しく低下し、切羽の崩落が発生した。切羽の補助工法としては、フォアボーリングや著しく地山が悪い場合には長尺先受け工法を採用して対応した。神戸層群相当層に入ると小崩落が頻繁に発生しはじめ、坑口から約300m付近の丹波帯まで続いた。特に坑口より220m付近では頁岩の細片化されたものが湧水とともに流失し、比較的大規模な崩壊が発生した。この区間でも、フォアボーリングや長尺先受け工法あるいは鏡補強ボルトを採用していたが、この崩落でこれまでの対策工では切羽の安定性の維持が困難であると判断し、長尺先受け工法と長尺鏡補強工（F I T工法）の併用で掘進した。実施した長尺先受け工法と長尺鏡補強工（F I T工法）のパターン図を図5-1に示す。この結果、以下の計測結果に示すように、切羽前方地山を十分拘束するこ

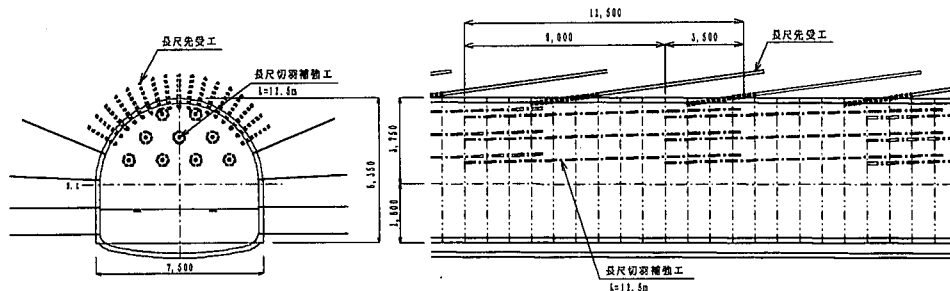


図5-1 長尺先受け工法・長尺鏡補強工（F I T工法）パターン図

とができ、切羽の安定性の向上とトンネルの変位を小さく抑える事が出来た。地質条件が種々変化し、軟弱で湧水による切羽の安定性の悪化という条件下で、いろいろな補助工法を試行しながらの掘進であったが、2000年4月に本坑交点に到達した。

5-2. 計測結果

計測はトンネルのA計測、地表面沈下測定、B計測（地表面からの地中沈下測定、鋼アーチ支保工応力、吹付けコンクリート応力、ロックボルト軸力、トンネル内からの地中変位測定等）を実施した。作業坑全長のトンネル内空変位と地表面沈下量の結果を図5-2に示す。これによれば大阪層群および坑口から250m以奥の丹波帯は内空変位量、地表面沈

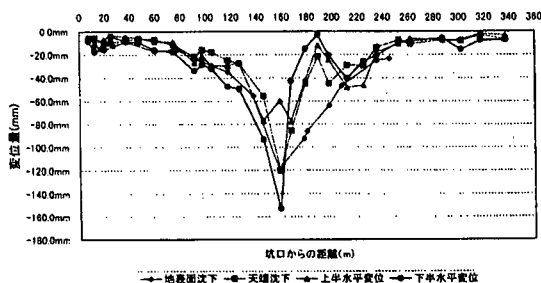


図5-2 内空変位・地表面沈下量結果

下量とも小さな値で収束している。大阪層群では砂に水が付いた場合、切羽の安定性が悪くなりフォアボーリング、長尺先受け工法を適用して対処したが、変位はさほど大きくなかった。作業坑の中央部に存在している神戸層群相当層の内空変位、地表面沈下量ともに 120mm と大きな値を示しており、その影響で前方の地表面が引っ張られるような挙動を示している。最大変位が発生した区間を過ぎた所で、長尺先受け工法や鏡補強を採用したが、地表面沈下量を小さく抑える事が出来なかった。図 5—3 に坑口より 236m の地点 (No3+26) に設置した地中変位計の経時変化図を示す。この位置は、5—1 で述べた比較的大規模な崩壊が発生した箇所前方 12m の地点である。計測点の前方 45m の地点に作業坑の切羽が到達した時点から地中内変位が発生しはじめ、切羽が 12m 前方に達したときに切羽の崩壊が発生した。その地点で長尺先受け工法および長尺鏡補強工 (FIT 工法) を適用し、トンネル切羽を進めたところ、ほとんど地中変位は生じず、切羽が計測点を通じた後に、変位が急増した。このことは、丹波帯の碎片化された頁岩が湧水で流失するような悪条件下で、長尺先受け工法と長尺鏡補強工法の併用が非常に有効であった事を示している。

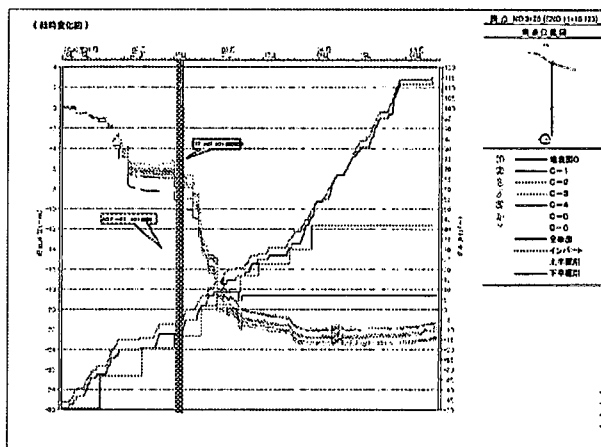


図 5—3 地中変位計経時変化図

6. 補助工法の評価

作業坑で採用した種々の補助工法のうち、長尺先受け工法と長尺鏡補強工の効果を確認するために、3次元の有限差分法 (3DFLAC) を用いた逆解析を実施した。モデル図を図 6—1 に、に示す。解析のフローを図 6—2 に示す。解析結果のうち、図 6—3 に補助工法がある場合とない場合のトンネル天端の沈下量を示す。図 6—4、図 6—5 に補助工法の有り、無しの最大せん断ひずみの分布図および変位ベクトル図を示す。図 6—3 の変位分布図 (補強工有りの場合) は計測結果と同等な結果となり、逆解析の有効性を示している。また同様の逆解析による変位ベクトル図や最大せん断ひずみ分布図の結果、補助工法 (長尺先受け工法、長尺鏡補強工) が変位拘束を行い、トンネル掘削の影響を抑制していることが窺える。切羽前方地山を補強する長尺先受け工法や長尺鏡補強工法の効果を評価するには、3次元的な評価を実施する必要があり今後本坑の計画にあたって 3次元の数値解析を用いて評価していく。

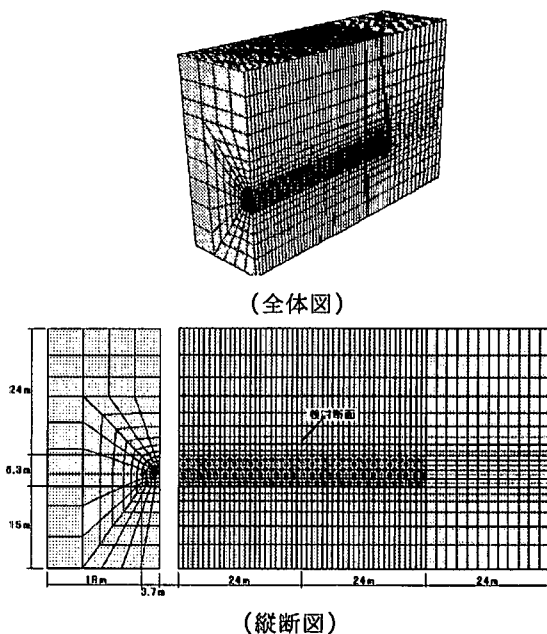


図 6—1 モデル図

表 6—1 入力物性値

単位体積重量 (γ) KN/m ³ t/m ³	弾性係数 (E) Mpa (kgf/cm ²)	ポアソン比 (ν)	粘着力 (C) Mpa (t/m ²)	内部摩擦角 (ϕ) °
22 (2.2)	100 (1,000)	自重解析 0.45 掘削解析 0.35	0.008 (8)	29

項目	構造要素	単位体積重量 (γ) KN/m ³ t/m ³	弾性係数 (E) Mpa (kgf/cm ²)	断面積 m ²	厚さ m	断面二次 モーメン ト m ⁴
吹付コンクリート + 鋼製支保工	Shell	23.8 (2.38)	6,600 (66,000)	0.15	0.15	—
GFRP チューブ (FIT)	Beam	17.5 (1.75)	20,000 (200,000)	1.71E-3	—	1.00E-6

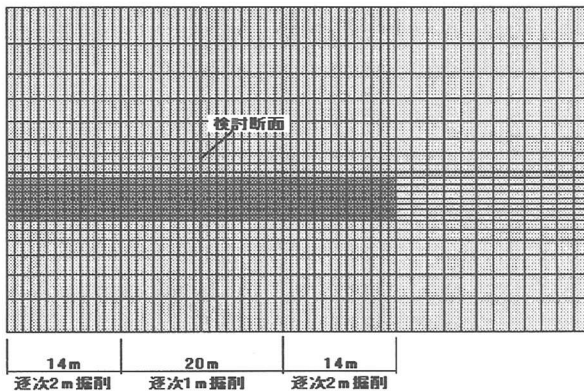


図 6—2 解析のフロー

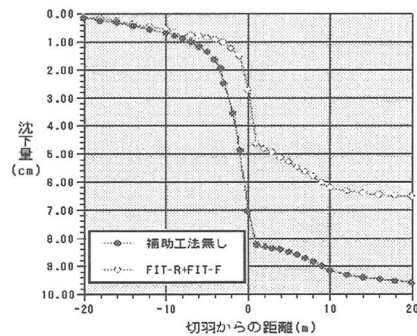
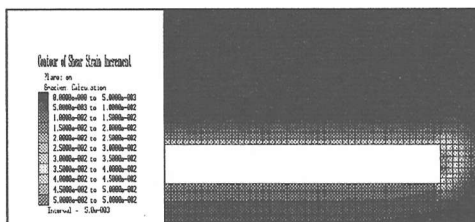
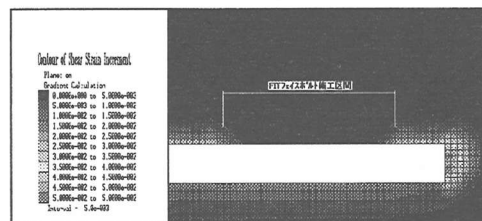


図 6—3 トンネル天端の沈下量

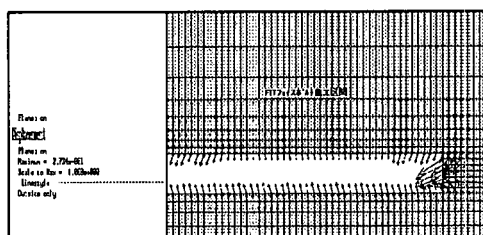


FITフェイスボルト無し

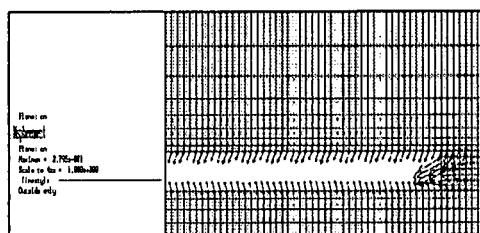


FITフェイスボルト有り

図 6—4 最大せん断ひずみの分布図



F I Tフェイスボルト無し



F I Tフェイスボルト有り

図 6-5 変位ベクトル図

7. 本坑へのフィードバック

作業坑において種々の補助工法の適用した結果、長尺先受け工法と長尺鏡補強工（F I T工法）が丹波帯の破碎質頁岩に対して前方ゆるみの発生防止や切羽の安定性向上に非常に有効であることが実証された。この結果に基づき、トンネル直上 40mにある老人ホームへの影響抑制や切羽の安定性が著しく悪く、大きな変形の発生する可能性が高い神戸層群相当層の基本的施工方法は早期閉合に加え長尺先受け工法と長尺鏡補強工（F I T工法）の補助工法を主体に計画した。トンネル掘削の影響を極力抑制する必要がある老人ホーム付近のトンネル支保パターンを図 7-1 に示す。現在、この支保パターンを基本に南側本坑の施工を行っている。

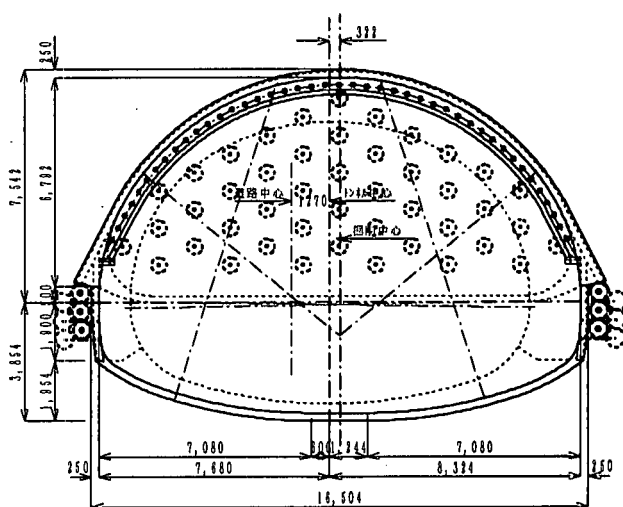


図 7-1 老人ホーム付近の支保パターン図

8. おわりに

未固結土砂地山に掘削断面積が 300m^2 を越える超大断面トンネルを構築するというわが国では例を見ないプロジェクトの実施に当たっては、作業坑の施工に始まり、本坑の比較的断面の小さな部分から徐々に断面が大きくなっていく部分へと移行していく中で、前の段階の施工結果をフィードバックしていくことで、より安全で合理的なトンネル施工を目指して進んでいる。作業坑の実績は、今後の設計・施工に大いに寄与するものであった。この地質条件での有効な補助工法の効果が把握された。特に厳しい沈下抑制を要求された老人ホーム直下では、管理基準値内の施工が完了し、補助工法の有効性が実証された。老人ホーム直下の施工および超大断面の施工については、別の機会に報告する予定である。