

作業坑からのトンネル掘削における施工効率化

黒見 正彦¹・石田 豪史²・小出 孝明³

¹非会員 三井住友建設株式会社 大阪支店土木部（〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号）
E-mail:MasahikoKuromi@smcon.co.jp

²非会員 三井住友建設株式会社 大阪支店土木部（〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号）
E-mail:TakeshiIshida@smcon.co.jp

³正会員 三井住友建設株式会社 大阪支店土木部（〒541-0041 大阪府大阪市中央区北浜四丁目7番28号）
E-mail:tkoide@smcon.co.jp

本工事では作業坑を掘削して進入路を確保し本坑を掘削した。作業坑からのトンネル掘削は標準的トンネル掘削と比べて作業条件や作業工程が複雑であり工事が遅延する要素が多い。加えて起点坑口は偏圧地形に位置し土被りが小さい区間が長く存在するが、切羽安定化対策は坑内からの施工に限定されるため掘削が一定期間停止する。いわゆる時間的なロスが多い工事であった。本稿は作業坑からのトンネル掘削における特殊性やそれを踏まえた施工効率化対策および結果を報告することで類似工事の参考に資することを目的とする。

Key Words : work drift , working efficiency, topography with asymmetric pressure, overburden

1. 工事の特徴

近畿自動車道紀勢線黒崎トンネル工事は延長2 841m、内空断面積70m²の2車線道路トンネルを建設するものである。事業目的の一つが南海、東南海地震による津波等の災害に強いライフラインの確保であることから、道路は高い位置に計画され黒崎トンネルの平均計画高も85mである。そのため、起終点坑口は共に山の中腹に位置し進入路が存在しない(写真-1)。したがって、起点側からの掘削では既存の農道から進入可能な場所に施工ヤードを設け、本坑に直交する延長473m、内空断面積34m²の作業坑を掘削し進入路とした。本坑に到達した後にはまず

起点側に貫通し隣接工事の進入路を確保する必要があり、その後に終点側へ掘削する計画であった(図-1)。また、終点側からの掘削においては坑口対面の山に約20 000m³の本線切土を施工したのち、延長150m、高さ40mの仮栈橋を構築して進入路を確保した。こうした複雑な施工条件により、工期を遵守するためには作業坑掘削から始まる起点側のトンネル掘削においては月平均100m前後の進捗を必要とした。しかしながら、既設構造物への影響対策、作業坑と本坑の接続部における拡幅掘削や切掛け掘削および起点側坑口部の偏圧地形における土被りが小さい区間への対策等の工事が遅延する要素が多く、問題の解決と施工効率化との両立を求められた。



写真-1 起点側坑口の状況



図-1 掘削順序図

2. 工事における問題点

工事における問題点を各施工段階でまとめる。

(1) 作業坑掘削

掘削方式は作業坑、本坑ともに発破掘削である。作業坑のサイズは標準部断面積が本坑の半以下分の 34m^2 であり、本坑掘削用機械では施工できない。また、工事車輛の離合を目的として延長 30m 、断面積 47m^2 の離合帯が 80m ごとに計5箇所設置されているが、その幅は 7.7m である。このためダンプトラック等の大型車輛は作業坑内で旋回できない。坑口から切羽までバックで進入することには安全性や走行速度低下の問題があった。加えてスペースの問題とは別に作業坑との離隔距離約 30m の位置に既設構造物が存在し発破振動による影響が懸念された。

(2) 作業坑と本坑の接続部における掘削

作業坑と本坑の接続部における掘削では作業坑に直交する本坑掘削への移行が必要となる。その流れは、まず作業坑掘削が接続部に到達した段階で拡幅掘削を行い本坑掘削が可能となる空間に拡大する。次に切詰め掘削を行い拡幅掘削で設置した仮設支保構造物を除去しながら本坑断面に仕上げる。拡幅方法や切詰め掘削への移行時期等の組合わせに多くの選択肢が存在するがいずれにしても段階的な施工となり多くの時間を要する。また、特殊で複雑な施工となるため難易度が高い。

(3) 偏圧地形における土被りの小さい区間の掘削

起点坑口部の地質は古第三紀四万十累層群牟婁層群三尾川累層に属している。三尾川累層は付加体として形成されたため地殻変動の影響から断層構造の発達や岩盤に亀裂が多いことに特徴がある。また地形は崖錐地形に位置しトンネル軸線が稜線に概ね並行となるため偏圧地形にあたる。そのため、図-2に示すように土被りが2D未満

となる区間が坑口から約 70m と比較的長い。事前地質調査では坑口から 50m の水平ボーリングが1本、坑口から 60m 地点の地表面から鉛直ボーリングが1本実施されている。これらによれば当該区間は主に崖錐堆積物や熱水変質を受けて脆弱化した亀裂の多い砂岩および比較的新鮮で硬質であるが亀裂の多い砂岩で構成される。また、弾性波速度も 0.4km/s と低く掘削時の地山安定性が懸念された。そのため事前地質調査に加えて追加地質調査を実施し、掘削範囲全体の地山状態を詳細に把握する必要がある。また、切羽安定化対策が必要な場合は坑内からの施工となり掘削停止による時間的ロスの問題も生じる。

(4) 偏圧地形における坑内からの坑口付け

起点坑口が山の中腹に位置するため地形的制約から押え盛土等は施工できず、偏圧への対策は図-3に示すような抱き擁壁による。抱き擁壁の支持地盤にある崖錐堆積物はコンクリートに置換えて支持力を確保する。これについて坑外から施工可能な場合は問題ないが、今回のように坑内から施工する場合は作業通路の確保に問題が生じる。一番低い位置にある置換コンクリートを施工しなければ支保工が設置できないため、作業通路掘削時は支保工がない状態となり地山の安定は自立性のみに委ねられる。主に崖錐堆積物で形成される地山表層部は脆弱であり、どの程度の大きさで作業通路が確保できるのかは予測できない。また、坑外全体が傾斜地で1割程度の勾配があり平らなスペースが存在しない。このような施工条件で切土や置換コンクリートおよび抱き擁壁を施工するため多大な時間的ロスが発生する。

このように作業坑からトンネルを掘削する工事では周辺環境や工事内容が複雑であることから各施工段階に問題点が存在する。そのため工事全体で累積する時間的ロスは多大であり、限られた工期の中で工事を完了することが最も困難な問題点となり施工効率化が課題となる。

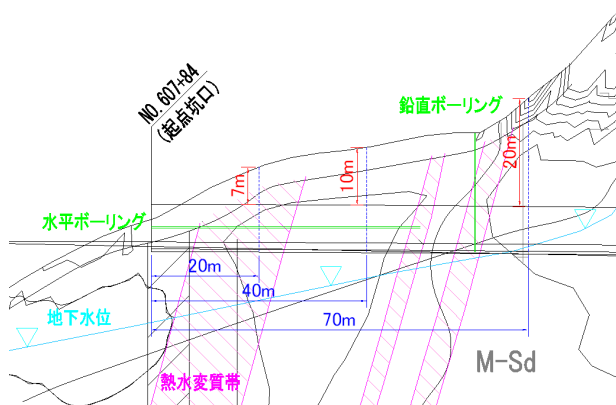


図-2 起点坑口部トンネル縦断図

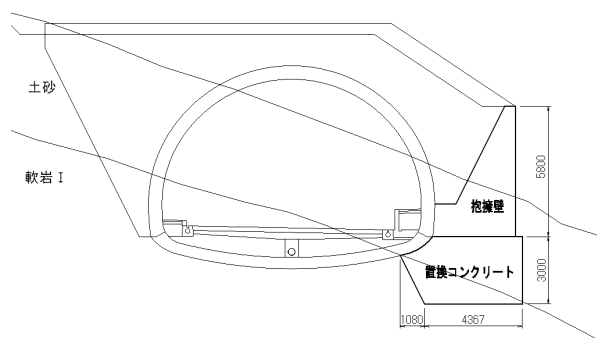


図-3 置換コンクリート位置図

3. 解決の方法

前章に記述した問題点について解決の方法を各施工段階でまとめる。

(1) 作業坑掘削

作業坑のサイズに合致する機械としてドリフタ190kg級2ブーム1バスケット油圧ホイールジャンボ、湿式ホイール型16~30m³/hコンクリート吹付け機、2.3m³級サイドダンプ式トラクターショベルおよび10tダンプトラックを選定し掘削した。また、大型車輛の旋回に関しては離合帯へのターンテーブルの設置と車輛旋回用の横坑設置(写真-2)を比較検討した。ターンテーブルの設置には盛替え作業の手間や掘削機械による損傷、故障等の不確実性があり施工効率低下リスクがあるため、車輛旋回用の横坑設置を選択した。掘削半径2.5m、高さ4.5m、奥行き3.0mの横坑を設けて安全性の向上と施工効率化を図った。

既設構造物について発破振動の影響に関する協議により、規制条件は振動速度2kine以下と定められた。そのため構造物に振動計を設置して試験施工を実施し、得られた結果より1段当たりの火薬使用量は最小離隔において1.8kg以下に制限する計画とした。掘削中は振動計により監視しながら振動速度を制御した。

(2) 作業坑と本坑の接続部における掘削

標準的トンネル掘削では施工条件から切羽1個所での進行に限られ、他工種で用いられる並行作業のような工期短縮策が実行できない。しかし、作業坑からのトンネル掘削においては作業坑掘削用機械と本坑掘削用機械が異なり、掘削機械が2セット用意される。また、作業坑と本坑の接続部は起終点への分岐点となる。この特殊な状況を利用して並行作業に近い施工効率化を検討した。拡幅掘削では写真-3に見られるように起点方向に直角に曲げながら本坑断面に摺り付けた時点で本坑掘削用機械

を導入し起点への本坑掘削を継続した。また、作業坑掘削用機械は待機させ、接続部にスペースが確保された段階で本坑掘削と切詰め掘削(写真-4)を並行作業することとした。これにより段階的施工を分担し、接続部で掘削が停滞する時間的ロス解消を図った。

(3) 偏圧地形における土被りの小さい区間の掘削

追加地質調査は坑口まで残り100mとなる地点で鏡面の天端および両側壁付近に計3本の水平ボーリングをワイヤーサンプリング工法により実施した。この工法は短時間で調査できることに優位性があるがロータリーパーカッションドリルにより削孔するため、打撃や削孔水の影響を受けたコアは完全な状態ではない。そのため不足する情報を補完する目的で三次元削孔検層システムによる切羽前方探査を併せて実施する調査方法とした。三次元削孔検層システムは削孔時に油圧削岩機から得られるデータを削孔エネルギーに換算し、これを定量的な指標として地山を評価する。今回は30m掘進するごとに3本を削孔した。調査結果からは山側の側壁付近には比較的新鮮で硬質な砂岩が分布すること、掘削断面の中央から谷側にかけては風化砂岩と強風化砂岩に占められている



写真-3 拡幅掘削(作業坑より臨む)



写真-2 車輛旋回用横坑



写真-4 切詰め掘削(本坑より臨む)

こと、および掘削断面内の鉛直方向に断層破碎帯が2mの幅で分布していることが判明した(図-4)。計算上は断層破碎帯の影響は考慮せず、地山全体が古第三紀層の風化砂岩で構成されるモデルとした。土被りが10mのケースでは想定すべり面において抵抗力を滑動力で除した値は必要安全率1.10に対して0.57となり不安定の判定となった。これに対して切羽安定化対策は坑内から施工可能な方法に限られ、まず先受工を検討した。想定されるすべり面が鏡面から4mの位置であるため長尺を必要とし、経済性を考慮すると専用機械を使用しない長尺鋼管フォアパイリングと小口径長尺鋼管フォアパイリングに絞られた。いずれの場合も先受工のみでは安定が確保できず、鏡面の補強を必要とした。比較検討の結果、対策は図-5に示すように対象区間45mにシフト長9mの小口径長尺鋼管フォアパイリング($\phi 76.3\text{mm}$, $N=27$ 本, シリカレジン)と小口径長尺鋼管鏡ボルト($\phi 76.3\text{mm}$, $N=18$ 本, 早強プレミックスモルタル)を計5シフト実施するものとした。

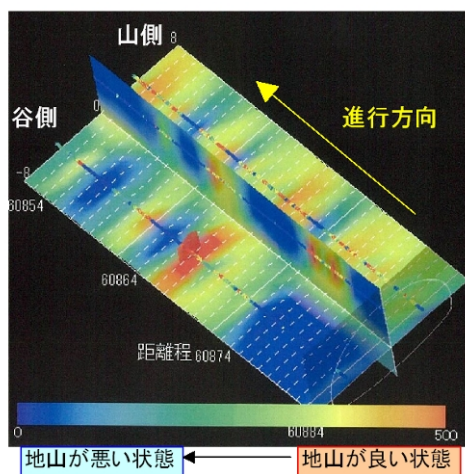


図4 削孔エネルギー分布図

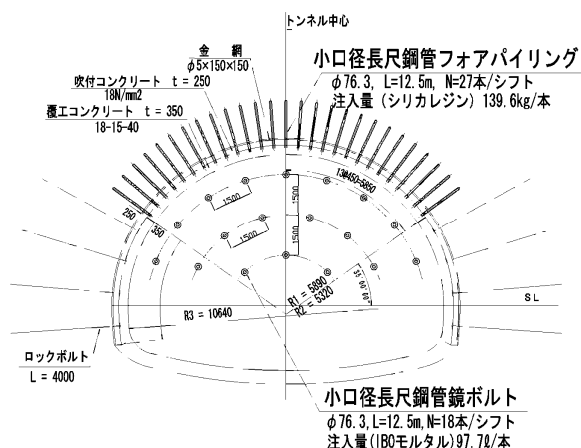


図5 切羽安定化対策工図

また、対策施工時は工事車輛の出入りが止まるため切詰め掘削を実施して時間的ロスの削減を図った。

(4) 偏圧地形における坑内からの坑口付け

作業通路の確保における地山の自立性については土被りの小さい区間に実施した切羽安定化対策の効果に期待した。切羽前方探索により既施工区間の地山状態と比較すると、貫通点付近は地表面から2m程度の表層部以外は地山改良効果で安定していることが確認された。そのため、貫通点の掘削は30m手前から上半先進掘削をし、支保工を設置できない5m区間では上半断面の3分の1程度の大きさで谷側に貫通し、厚さ10cmの吹付けコンクリートを施工して安定を保ち作業通路を確保する計画とした(写真-5)。作業通路を確保した後は伐採木の集積、搬出から掘削再開に至るまでに約1ヶ月間を要する。貫通点における掘削が停止する間、明かり工事は別班で施工し掘削班は接続部において切詰め掘削を実施し全体工程に対するロスを防止した。この段階になると切詰め掘削も完了し、接続部から終点に向かう本坑掘削を続けた。

4. 得られた結果、または得られた技術的知見

得られた結果、または得られた技術的知見を各施工段階でまとめる。

(1) 作業坑掘削

作業坑のサイズは施工効率に大きく影響を及ぼす要素であり、今回の結果を検証する。標準部断面積の 34m^2 は2ブーム1バスケット油圧ホイールジャンボの使用限界に近い合理的なサイズであった。これ以上縮小すれば1ブーム1バスケット油圧ホイールジャンボによる掘削となり施工効率が低下する。また、機械の可動範囲が狭くなり拡幅掘削において多段掘削の必要が生じる。さらには

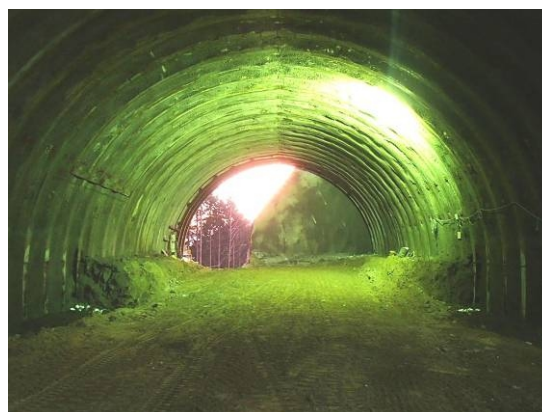


写真-5 坑口付け作業通路

今回実施した施工効率化のポイントである作業坑掘削用機械による切詰め掘削および本坑掘削は実行できない。また、離合帯に車輛旋回用の横坑を設けることで車輛の旋回が可能となり、安全で効率的な作業が確保された。結果として横坑を含めた作業坑のスペックは安全でスムーズな施工を実現する合理的な一例であるといえる。既設構造物への影響対策の実施により時間的ロスが生じ作業坑全体では月平均86mの進捗であったが、無対策区間では月平均120mの進捗が得られ効率的な掘削ができた。

(2) 作業坑と本坑の接続部における掘削

接続部には本坑掘削の工事車輛が通行するため、並行作業とした切詰め掘削では車両の通行を妨げないことが条件となる。そのため、切詰め掘削は本坑掘削の工事車輛が通行しない切羽前方調査時や切羽安定化対策施工時、坑口付け施工期間および週末等に断続的な作業を積み重ねた。その結果、起点側に向かう本坑掘削が完了するまでに切詰め掘削を完了し、さらに終点側に向かって本坑を約150m掘削した。この施工効率化策により当初から懸念されている遅延要素を全て消化した上で月平均98mの進捗を確保できた。また、今回は地山状態が良好であり掘削時に変状は発生しなかったが、接続部は構造上の弱点であるため観察を強化し、必要な場合には速やかな補強を実施することが重要である。

(3) 偏圧地形における土被りの小さい区間の掘削

ワイヤーサンプリング工法による水平ボーリングと三次元削孔検層システムを組み合わせた追加地質調査は短時間に地山全体の状態を把握できる有効な方法であった。ワイヤーサンプリング工法ではコアの観察や地下水の有無等の直接的な確認ができる。加えて三次元削孔検層システムは掘削機械の削孔によるため、簡易的であることに優位性がある。削孔数や方向をフレキシブルに変更でき、広い範囲を把握することに適しているため偏圧地形の調査に有効であった。山側の安定性の確認、谷側の表

層までの距離や層厚の確認等細かい情報を入手でき掘削時の判断材料が十分に得られた。

次に切羽安定化対策について、掘削時の切羽観察では亀裂等の間隙には鏡ボルトの注入材であるモルタルが入り込み、十分な地山改良効果が得られていた。そのため鏡面からは若干の肌落ちは発生するが、天端の抜け落ちや側壁部の崩壊等は発生しなかった。また、大きな変位も発生せず切羽は全体に安定し効率的な掘削を実行できた。

(4) 偏圧地形における坑内からの坑口付

切羽安定化対策の効果により作業通路掘削における地山の安定が得られ、予定通り3m程度の通路幅を確保して坑内からの坑口付け作業を行った。作業スペースを拡張する経済的な解決策は見出せず、ここでの時間的ロスは止むを得ないと判断した。そのため、この期間は接続部における本坑掘削を実施して全体工程を調整した。

5. 結論

作業坑からのトンネル掘削における施工効率化と題して、発生する問題の解決とそれに起因する時間的ロスに対する全体工程上のリスクマネジメントを報告した。切詰め掘削を後にまわすなど経済的ではない選択も含むが、工事全体のリスクを抽出し相互関連性を考慮した適切な施工計画ができた。これにより、発生する多くの問題点への対処に際して掘削が止まらない効率的な施工が実現された。また、接続部の掘削は非常に複雑な作業であった。今回は地山の自立性に助けられたが、地山が不安定な場合は十分な事前調査と検討により支保構造や施工方法を選定し安全を確保する必要がある。

最後になるが本稿が類似工事に携わる技術者の参考となれば幸いである。

(2015.8.7 受付)

WORKING EFFICIENCY RELATED TO THE EXCAVATION OF USING A WORK DRIFT

Masahiko KUROMI, Takeshi ISHIDA and Takaaki KOIDE

In this construction, we excavated the work drift for getting an approach to the tunnel. Compared with standard excavation, excavation of using the work drift had complicated work conditions and schedule, so many effects of delay the construction were present. The tunnel portal was situated in a topography with asymmetric pressure having small overburden. But face stabilization measures were limited in tunnel, so excavation was stopped a period of time. In other words, this construction held many wasted time. This article reports distinctive character of the excavation of using work drift and the results of countermeasure against working efficiency. This report is intended for any help to similar cases.