

採石場跡地の不均質盛土におけるトンネル掘削の補助工法について

谷尻薫¹・廣中洋輔¹

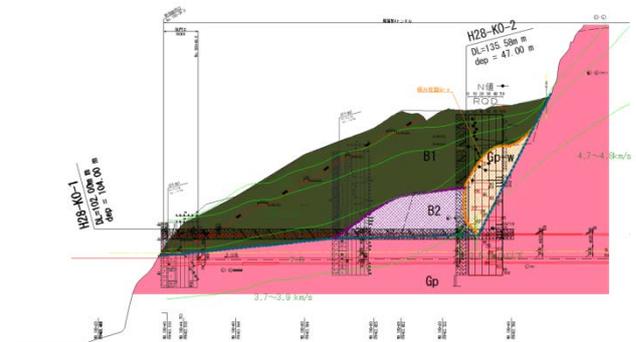
¹紀勢国道事務所 工務課（〒515-0005 松阪市鎌田町144-6）

国道42号熊野尾鷲道路（Ⅱ期）は平成25年度に開通した紀勢自動車道・国道42号熊野尾鷲道路と一体として高規格幹線道路ネットワークを構成する自動車専用道路である（尾鷲南IC～尾鷲北IC間：約5.4km）。南海トラフ巨大地震による津波浸水区域を回避する緊急輸送路として、防災道路としての機能も期待される。熊野尾鷲道路（Ⅱ期）には、4箇所のトンネルを計画しており、現在、3箇所で施工中である。施工中のトンネルのうち、尾鷲第4トンネルの不均質盛土におけるトンネル掘削の補助工法の施工事例について報告する。

キーワード：トンネル，不均質盛土，薬液注入，逸走防止壁

1. はじめに

現在、紀勢国道事務所では国道42号熊野尾鷲道路（Ⅱ期）の尾鷲第4トンネル（全長2,471m）を両側掘削にて工事を進めており、尾鷲第4トンネルの松阪側からのトンネル掘削はすでに完了している。現在は、新宮側からの掘削を行っている。新宮側坑口部は、採石場跡地であり、閉山時に不均質な堆積土砂により盛土されていた。それは、脆弱な土砂に巨礫が混在するとともに空隙も多い状態の不均質な状態で、土粒子のかみ合いが見込めず、アーチアクションが形成されない。このため、安全で確実な掘削をするためには、トンネル掘削時に不均質な盛土を改良する必要があった。本稿ではこれらの施工実績について報告する。



地質時代	地層名	記号	層相
現世	盛土層1	B1	球石土砂主体の盛土。土質は玉石混り砂礫～粘土混り砂礫より成る。コア長し=40cm程度までの玉石および転石を混入する。孔壁の安定性(自立性)が非常に悪い。
	盛土層2	B2	採石土砂主体の盛土。土質は玉石混り砂礫～粘土混り砂礫より成る。玉石および転石の混入量が多く、一部でコア長し=160cm程度の転石を含む。孔壁の安定性(自立性)がB1層に比べるとやや良い。
新生代 新第三紀 中新世	花崗斑岩(礫み領域)	Gp-w	風化した亀裂を伴い基盤岩とみられるが、発破の切り残り部分で非常に脆い状態にある岩盤。空洞状の開口亀裂があり、亀裂間の隙みが大い状態と考えられる。
	花崗斑岩	Gp	調査地域の基盤岩。亀裂間で風化を帯び伴うが、深部に近い風化程度は弱くなる。計画トンネルの掘削部では概ねGM～CH級岩盤となり、亀裂も概ね密着状にある。

図-1：地質断面図（尾鷲第4トンネル南側坑口付近）

2. 地質概要

図-1に本トンネルの地質概要図を示す。本トンネルの坑口部は採石場跡地であり、岩盤が露出している箇所と土砂が盛土されている箇所がある。盛土されている箇所については特に締め固め等はされておらず、ただ置かれただけの非常にルーズな状態である。

3. 当初改良計画について

本トンネルの不均質盛土区間（坑口より82.0m間）では、自立性の乏しい堆積土内を掘削することにより、安全で確実な掘削を行うため、トンネル上部の外周5m範囲をゾーン注入で改良する事とした（図-2）。

ゾーン注入はアーチ状に薬液注入をすることによって未固結地山を改良し、切羽の崩落を防止することを目的

としている。

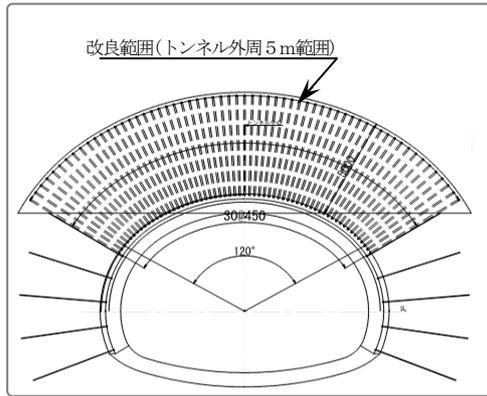


図-2 改良範囲の概要図

当初の計画では、改良は地表面からの薬液注入によるものと途中土被りの大きい区間は長尺鋼管フォアパイリングによる坑内からの改良とした。薬液注入については二重管ダブルパッカー工法で行うこととした。

1次注入は、注入管の周りがある間隔が大きな亀裂に対し、粒径の大きなセメントベントナイトを先行注入し、粗い粒子で亀裂を間詰めるための事前注入である。これは、2次注入を行う際に粒径が小さな注入材を使用するため、大きな亀裂があると、そちらに注入材が流動・逸走してしまう。これを避けるため、粒径の大きな材料で事前粗詰を行い、間隔の大きな亀裂を無くすことを目的としている。

2次注入は、間隔の大きな亀裂がなくなった状態で、粒子の間隙または小さな亀裂・水みちに浸透・割裂して注入材を流し込み、改良固化体を作るための注入である。微細な隙間を改良できるよう、超微粒子系または水ガラス系注入材を用いる。1次注入により、大きな亀裂からの逸走が防がれるとともに、注入材にはゲル（ゼリー状態）タイムを持たせることで、地中内での流動（固化）時間を短くすることができ、周辺への逸走を更に防ぐことができ、注入管の周り1~2m程度を対象に範囲を限定した注入を実施する計画とした。

しかし、本現場にて試験施工をしたところ、1次注入材の注入時に注入材の逸走が確認され、注入効果が得られていないことが判明したため、薬液注入について中断し、トンネル坑口部分の補助工法について再度検討を行った。

4. 改良計画の見直しについて

前述より、1次注入材が逸走するほど大きな空隙があることから、1次注入材自体を逸走させないようにする対策が必要である。また、トンネル断面について薬液注入区間の未改良部に対する坑内からの掘削補助工法につ

いても必要である。

上記対策のため、以下の4つの方法により改良（ゾーン注入）を実施することとした。（図-3）

- (1) 薬液注入工の逸走防止対策：試験注入の結果、空隙部を通じて注入材が逸走した事から、逸走防止が必要となる。そのため、薬液注入範囲の外周へ懸濁型特殊シリカ系注入材による防止壁の構築を採用した。防止壁についても壁がしっかりと形成されるよう、削孔位置を千鳥配置にして間を埋める形で注入を行い、防止壁を構築した。
- (2) 坑口上部からのゾーン注入（薬液注入工）：逸走防止壁を構築後、坑口~40m区間では、地表面からの薬液注入工（0次・1次注入材：セメントベントナイト、2次注入材：水ガラス系注入材）によるゾーン注入方法を採用。1次注入においては逸走防止効果を高めるため、ベントナイトの比率を高め粘性を上げた配合の無加圧充填（0次注入）と標準的な配合を用いた加圧ステップ注入（1次注入）の2段階施工で大きな空隙を埋めた。
- (3) 薬液注入工区間における天端・切羽の崩落防止対策：上記の補完対策として、長尺鋼管フォアパイリング（@9.0m, 27本, 4シフト）を採用。
- (4) 坑内からのゾーン注入（小口径長尺鋼管フォアパイリング）：坑口より40m以深の区間では、坑内からの小口径長尺鋼管フォアパイリング（@2.0m, 30.5本, 23シフト）によるゾーン注入を採用。これは注入削孔長が短い起点側については地表からの薬液注入工が有利となるが、掘り進んでいくと改良長に対して注入削孔長が過大となってしまう、経済性に劣るため、経済比較の結果、坑口より40m以深の区間は坑内からの改良計画とした。

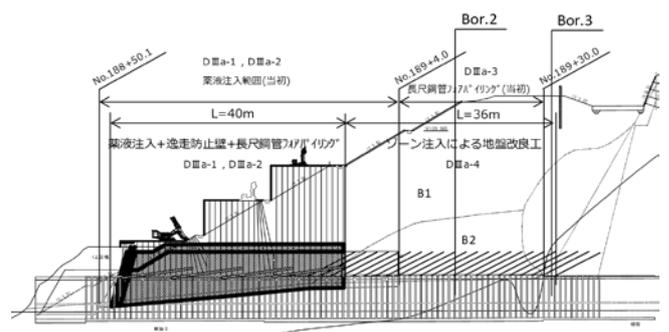


図-3 対策工の実施概要図

5. 改良効果の確認とその結果

前述の対策工により、トンネル上部の外周5m範囲を確実に改良するため、以下方法により注入効果の確認を行い、その都度施工方法や仕様を選定しながらの施工を行った（写真-1, 2）。



写真-1 坑口部遠景と注入実施状況



写真-2 坑内ゾーン注入実施状況

a. 薬液注入工における注入効果の確認方法

- ・試験施工ヤードにおける試験施工の実施：本施工箇所とは別に設けた試験施工ヤードで2回の試験施工を行った。1回目で注入材の逸走度合いを確認し、逸走防止壁の設置と1次注入の分割施工の実施を、2回目で注入材の種類と各注入の注入率・注入仕様（注入速度や規定注入圧等）を決定した。
- ・本施工時における強度確認の実施：試験施工結果より定めた施工法及び仕様で実施した本施工で、鉛直ボーリングやラムサウンディング試験により改良完了後の地盤強度を測定し、注入仕様（注入速度や規定注入圧等）の再設定を繰り返しながら施工を行った。
- ・注入材の逸走有無の確認実施：注入材の逸走有無を確認するため、逸走防止壁部での透水試験や充填検知センサーによる全注入箇所での注入材水位の確認を実施しながら施工を行った。

b. 小口径長尺鋼管フォアパイリングによる改良効果の確認

- ・FEM解析による内空変位の予測と計測管理値の再設定の実施：該当区間の施工に先立ちFEM解析を実施し、発生する内空変位の予測と計測管理値の再設定を行い、改良効果の判断指標を策定した。
- ・高頻度及び高精度の計測管理の実施：内空変位計測の実施頻度を2m毎に実施するとともに、3Dレーザースキャナーを利用した連続した面的な変位計測による監視を常時行った。（図-4、5）

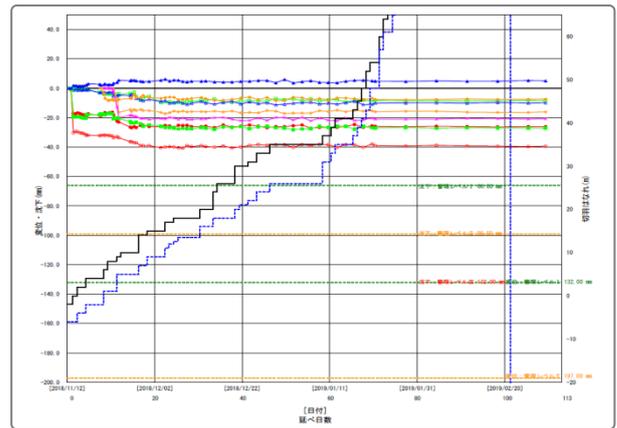


図-4 内空変位グラフ（代表地点）

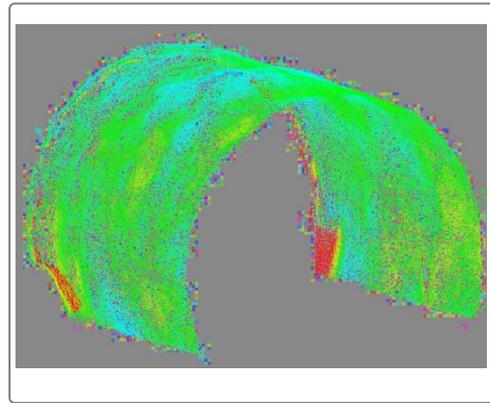


図-5 3Dレーザースキャナー測定図

これらの対策と管理の実施により、地表面沈下及びトンネル内部の天端沈下において、最大5cm程度の変位（FEM解析により予測した変位量とほぼ同等値）が発生したが、掘削初期における一時的変位の発生のみで、大きく継続的な変位の発生や天端・切羽の崩落につながるような変位の発生は無かった。

6. 掘削方法について

該当区間では、これまで記載した通りに多くの対策工の実施が必要であった一方で、切羽肩部より下方が非常に硬質な花崗斑岩に覆われていた（写真-3）。そこで、発破振動値の管理値（表-1）をあらかじめ設定し、その管理値を満足するように導火管付雷管（14段、コネクター2種類）を使用した多段制御発破、加えて削孔装薬前に堆積土部分の先行機械掘削を行った。これにより、改良区間の発破振動の伝播による破壊・劣化の発生を抑制できた。



写真-3 当該区間 (0~80m) における切羽状況

表-1 岩盤に対する損傷影響の目安 (現場技術者のための制御発破工法の実例【ジオフロンテ協会】)

最大変位速度 (cm/sec換算)	岩盤に対する影響
25.4cm/sec以下	いかなる損傷もなし
25.4~63.5cm/sec	小さな引張剥離が発生
63.5~254.0cm/sec	強い引張剥離と、 いくらかの放射状亀裂発生
254.0cm/sec 以上	完全に破壊される

7. 山はね現象について

前述にもあったように、本工事の坑口周辺は未固結地山である一方でそれを抜けると本来の堅固な地山が続く。そのため、現場では掘削を進めていくと山はねが発生した(写真-4)。



写真-4 山はねによって発生した吹付けコンクリートの剥落

山はねは、トンネル掘削時において、掘削面周辺の岩盤の一部が大きな音響を伴って内空に突然飛び出す現象である。この現象は、岩盤中に蓄えられた弾性ひずみエネルギーが掘削により解放されることに起因して発生すると考えられており、土被りが大きく地殻応力が高い場合で、かつ岩盤が均質で節理等の少ない地山で起こりやすい。当現場では、土被りがさほど大きくない区間で発生

している。これについては分布する花崗斑岩の密度が高く、土被り等の影響ではなく、岩組成時の地殻変動等により岩盤中に弾性ひずみエネルギーが蓄えられた状態で存在していたために発生したものである。山はねは予測することも難しく、突然発生する現象である。トンネル切羽付近で作業する作業員の安全を確保するため、以下の2つの方法により対策を実施することとした。

(1) 切羽面における岩塊の剥落についての対策

- ・鏡吹付けコンクリートの実施
- ・吹付けコンクリートの高強度化

(2) 設置した支保区間における剥落についての対策

- ・吹付けコンクリートの高強度化

上記対策により山はねの発生について抑制することができ、作業員に対しても安全にトンネル掘削を進めることができています。

8. おわりに

不均質盛土部においては、平成29年12月の試験施工開始より延長82mを約13か月の期間を経て平成31年01月無事掘削を完了することができた。また、山はねについても前述で述べた対策によって発生を抑制し、作業員の安全を確保しながら掘削を行っている。この施工事例が今後の類似工事を進めるうえで一助となれば幸いです。

謝辞：論文の執筆にあたり、ご協力いただいた関係各位に深く感謝申し上げます。