

# 強風化した脆弱地山における トンネル坑口の安定対策の検討

高岡 秀明<sup>1</sup>・川上 博史<sup>2</sup>・平野 宏幸<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 清水建設(株) 紀勢線海山トンネル作業所 (〒519-3405 三重県北牟婁郡紀北町海山区船津627-1)  
E-mail:takaoka@shimz.co.jp

<sup>2</sup>正会員 清水建設(株) 紀勢線海山トンネル作業所 (〒519-3405 三重県北牟婁郡紀北町海山区船津627-1)

<sup>3</sup>正会員 清水建設(株) 紀勢線海山トンネル作業所 (〒519-3405 三重県北牟婁郡紀北町海山区船津627-1)

不良地山におけるトンネル坑口部の施工において、坑口周辺に構造物や地すべり等が近接しトンネル掘削による緩みの拡大を確実に抑制する必要がある場合や、極度の小土被り (2~3m) で地表からの施工が容易な場合を除いて、切羽崩壊やトンネル変形に対してトンネル坑内からの補助工法で対応するのが一般的である。しかしながら、坑内からの補助工法では地山の急変に対応できず、切羽崩壊、トンネルの大変形、および、地表の陥没といった問題を引き起こした事例が多数報告されている。

そこで、著者らはトンネル坑口部の脆弱地山区間において、十分な地質調査を実施して地山状況ごとに区間分けすることで、坑内からの補助工法と地表からの事前地山補強を組合せた合理的な対策工を検討した。

**Key Words :** weak ground, tunnel portal, ground improvement, geological investigation

## 1. はじめに

近年、社会的要求から道路の線形を極力直線に保つことが重視され、トンネル坑口が地すべり地や断層といった地形、地質的に問題のある箇所へ施工せざるを得ないことがしばしばある。

不良地山におけるトンネル施工では、トンネル坑内から施工する補助工法や地表からの事前地山補強等に対応する。前者は、切羽状況に応じて適宜対応できるが、トンネル坑内からの施工となるため施工機械や作業スペース等の制約があるばかりか、地質の急変への対応が困難となる。後者は、事前に対象区間の地山を確実に補強できるが、地表の制約条件がある場合や土被りが大きい場合には、施工が困難もしくは工事費が高くなる。このため、後者は小土被りで地表からの施工が容易な場合、または、トンネル周辺に構造物や地すべり等が近接し、トンネル掘削による緩みの拡大を確実に抑制する必要がある場合に採用されることが多く、特殊な場合を除いて前者による対応が一般的である。

しかしながら、最近では特に坑口部において前者の方法で対応し、切羽の大崩壊、トンネルの大変形、および、地表の陥没等の問題を引き起こした事例<sup>1)4)</sup>が多数報告されている。このため、坑口部におけるトンネル掘削時

に発生する変状を正確に予測し、経済的なトンネル安定対策工を事前に検討することがトンネルの建設現場において課題となる。

そこで、著者らは、トンネル坑口部の脆弱地山区間において、十分な地質調査を実施して地山状況に応じてトンネルを区間分けすることにより、坑内からのトンネル補助工法と地表からの事前地山補強を組合せた合理的な対策工を検討した。

## 2. 工事概要

本検討を実施した現場は、紀勢線海山トンネルの終点側 (到達側) 坑口部である。以下に対象工事の内容および終点側坑口部の地形・地質について述べる。

### (1) 工事内容

紀勢線海山トンネルは、新直轄方式で建設される近畿自動車道紀勢線尾鷲北 I C ~ 紀伊長島 I C 間のうち、海山 I C の北側に位置する2車線トンネルである。(図-1) トンネル延長はL=1591m、掘削断面積約75m<sup>2</sup>であり、起点側 (尾鷲側) より発破掘削方式によるNATMで片押しにて掘削を行った。

工事名称：平成20年度紀勢線海山トンネル工事  
 発注者：国土交通省 中部地方整備局  
 工事場所：三重県北牟婁郡紀北町海山区船津～上里  
 工期：平成21年2月25日～平成24年3月30日  
 地質：中生代白亜紀の四万十累帯日高川帯の砂岩、  
 頁岩及び砂岩頁岩互層

## (2) 終点側坑口部の地形・地質

終点側坑口部の平面図を図-2に示す。終点側坑口部は、尾根侵入型であるが、地質は頁岩、砂岩頁岩互層主体で亀裂が発達しており、強風化した脆弱な岩盤である。さらに、トンネルは等高線の乱れが著しい小土被り区間に位置しており、土被り25m以下の区間が110mに及ぶ。

## 3. 終点側坑口部の問題点

終点側坑口部の設計段階に想定された地質縦断面図を図-3に示す。設計段階において、当該区間は強風化した頁岩で土砂化および軟化が著しく、トンネル掘削時には切羽の自立が困難となることが予想され、終点側の76m区間（図-3参照）においてはトンネル掘削時の天端崩壊、切羽安定、脚部沈下対策の検討が必要とされていたが、対策工は採用されていなかった。

トンネル安定対策は、トンネル掘削時の切羽観察およびトンネル坑内変位計測等により地山状況を確認しながら、坑内から地山状況に応じた補助工法を検討するのが一般的である。しかしながら、終点側坑口部のように強

風化した脆弱地山の場合、坑内からの対応では緩みが拡大して切羽崩壊が地表にまで達し、地表（民地）が陥没することが懸念される。この場合、地表から事前地山補強を行うことが有効となる。

このため、終点側坑口部では、事前地山補強が必要な区間、坑内からの補助工法で対応できる区間を区分することで合理的なトンネル安定対策を検討することが課題となる。

## 4. トンネル安定対策検討の基本方針

合理的なトンネル安定対策を検討するために、当該区間のトンネル安定対策を下記の手順で検討する。

### ①追加地質調査の実施

事前調査では把握されていない強風化した脆弱地山の強度特性、変形特性、および、詳細な分布を確認するために追加の地質調査を実施する。

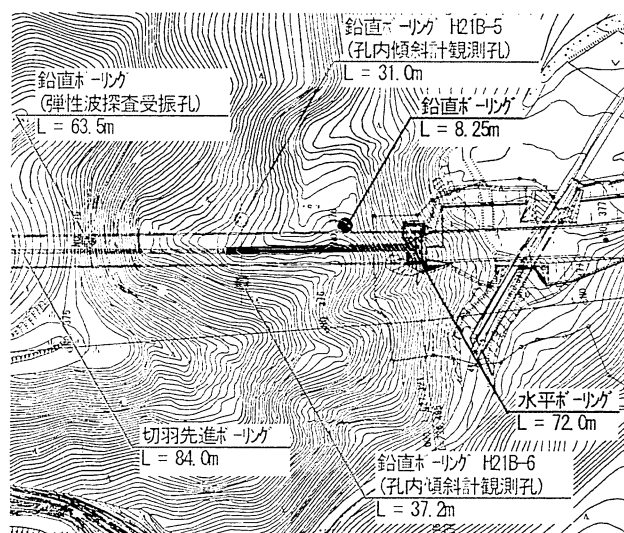


図-2 終点側坑口部平面図

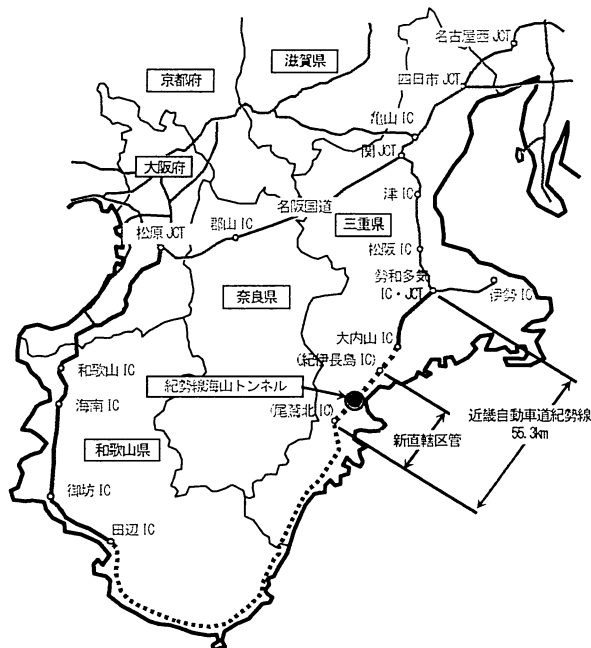


図-1 現場位置図

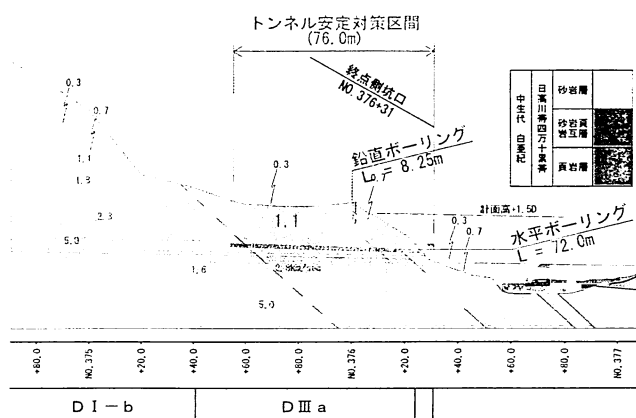


図-3 終点側坑口部地質縦断面図（当初設計）

## ②地質状況に応じた区間分け

地質調査結果から得られる岩級区分，風化の程度，強度特性，および，変形特性等を基に，トンネルの地山状況毎に区間分けを行う。

## ③トンネル安定対策検討

それぞれの区間の地山状況に応じた経済的なトンネル安定対策を検討する。ここで言うトンネル安定対策は，事前地山補強やトンネル補助工法だけでなく，計測等を強化して状況に応じて遅延なく対策工を施工できるような情報化施工法も含む。

# 5. 追加地質調査

## (1) 調査ボーリング

地質状況を3次元的に把握するため，鉛直の調査ボーリングをトンネル縦断方向に1箇所，横断方向に2箇所の計3箇所実施した（図-2および図-6参照）。図-4に調査ボーリングのコア写真の一例を示す。調査ボーリング結

表-1 鉛直調査ボーリング孔内载荷試験より得られた変形係数

| 岩級区分 | 変形係数              |
|------|-------------------|
| CM   | 683.2～3,118 (MPa) |
| CL   | 462.8 (MPa)       |
| D    | 24.47 (MPa)       |

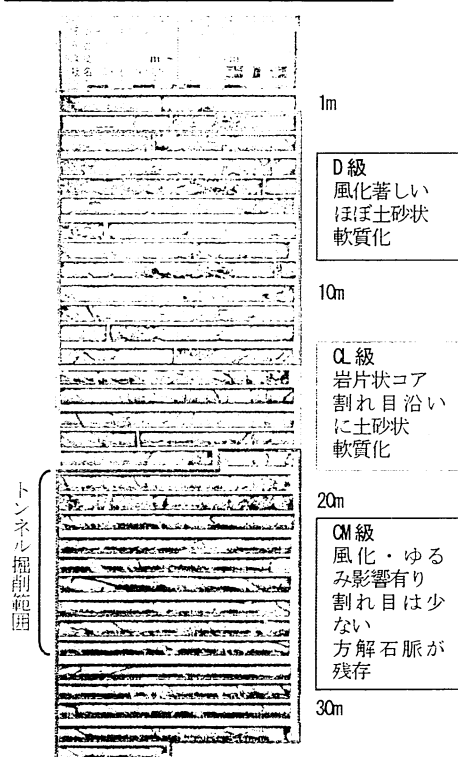


図-4 鉛直調査ボーリングコア写真一例 (H21B-5)

果から，坑口部周辺に，土砂状に強風化した頁岩が広範囲に分布することがわかった。

一方，トンネル掘削時の変状を予測するには地山の変形特性および強度特性を把握することが重要となる。そこで，調査ボーリング孔内において孔内载荷試験と地山試料試験を実施し，地山の変形係数（表-1）を確認した。

## (2) 切羽先進ボーリング

トンネル施工位置の地質状況を把握するため，坑内からワイヤーラインサンプリングを用いた先進ボーリング（図-2および図-6参照）を実施し，コア採取と湧水量測定を実施した。これにより，既存の水平ボーリングで確認されていないトンネル掘削部の地質状況が確認された。

## (3) 高精度弾性波探査

調査ボーリングを補完して，地質の分布を詳細に把握するために高精度弾性波探査を実施した。

高精度弾性波探査は，複雑な地質の弾性波速度分布を詳細に把握するため，トンネル切羽と鉛直調査ボーリング孔を用いた弾性波探査を実施し，トモグラフィー解析

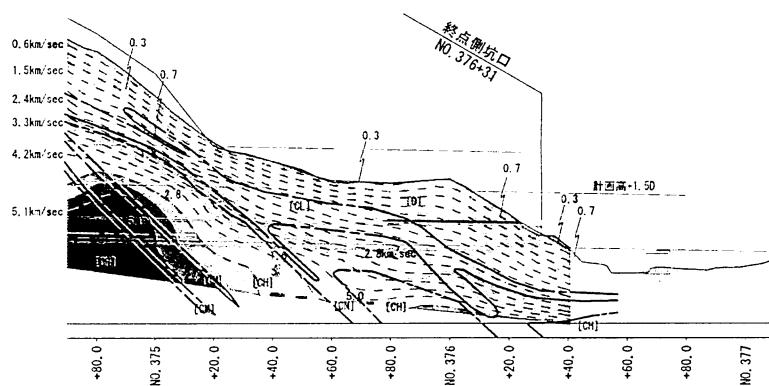


図-5 弾性波速度分布図

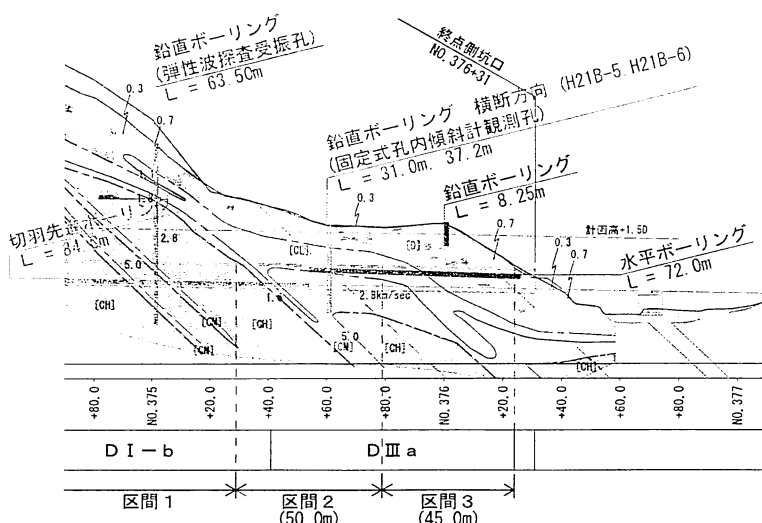


図-6 終点側坑口部地質縦断面図（総合解析結果）

を行うものである。トンネル切羽で起振し、鉛直調査ボーリング孔にて受振することで、通常行う地表からのみの弾性波探査に比べ、トンネル施工位置を通過する波を観測する事が可能となる。

高精度弾性波探査で得られた弾性波速度分布図を図-5に示す。

(4) 各調査結果の総合解析

それぞれの調査結果を総合的に解析し、終点側坑口部の地質の分布を岩級区分ごとにあらわした地質縦断面図を図-6に示す。同図より、設計段階の地質縦断面図（図-3参照）からさらに詳細な地質状況の把握が可能となったことがわかる。

6. トンネル安定対策検討

(1) 地質状況に応じた区間分け

前章に述べた追加地質調査の結果を基に当該区間を地質状況に応じて3つの区間に分けた（図-6参照）。区間1は弾性波速度が4.0km/s以上のCH級の硬岩が主体の区間である。区間2はトンネル掘削位置は弾性波速度が2.0～4.0km/sのCM、CL級の地質であり、トンネル上部に弾性波速度1.5km/s以下のD級地山が分布し、かつ土被り15～23mの区間。区間3はトンネル全体が弾性波速度2.0km/s以下のCL、D級の地質に位置し、土被りが15m以下の小土被り区間である。

(2) トンネル安定対策検討

地質状況に応じて3つに分けたそれぞれの区間について、トンネル掘削時の切羽安定やトンネル変形、地表面沈下等の問題を予測し、トンネル安定対策を検討した。

表-2 FEM解析に用いた地山物性値

| 地質                                   | D級    | CL級    | CM級    |
|--------------------------------------|-------|--------|--------|
| 単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ) | 19    | 21     | 22     |
| 変形係数 D (kN/m <sup>2</sup> )          | 24500 | 462800 | 683200 |
| ポアソン比 $\nu$                          | 0.42  | 0.35   | 0.35   |
| 粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )           | 1     | 200    | 400    |
| 内部摩擦角 $\phi$ (°)                     | 4.0   | 30     | 35     |
| 引張強度 $\sigma_t$ (kN/m <sup>2</sup> ) | 0     | 40     | 80     |

表-3 FEM解析に用いた支保部材の断面性能値

|                              |                |
|------------------------------|----------------|
| 鋼製支保工                        | H-200×200×8×12 |
| 吹付けコンクリート厚さ                  | t=25cm         |
| 合成ヤング係数 (kN/m <sup>2</sup> ) | 8.48E+06       |
| 断面積 (m <sup>2</sup> )        | 0.25           |
| 断面2次モーメント (m <sup>4</sup> )  | 1.15E-3        |

a) 区間1

区間1はボーリングコアの観察結果よりCH級の硬岩が主体の区間であり、切羽の安定やトンネル変形等のリスクは低いと考えられる。従って、トンネルの支保パターンは設計のDⅠ-b（図-7）とし、切羽観察や坑内変位計測による通常のトンネル掘削により施工可能と考えた。

b) 区間2

区間2は調査ボーリング結果より、亀裂が発達し亀裂面に沿って褐色に風化したCM、CL級の地質が分布し、切羽の崩落が懸念される。また、土被りが15～23mであり、トンネル上部にはD級地山が分布していることから、トンネル変形や地表面沈下の増大が懸念される。

そこで、FEM解析によるトンネル掘削時の坑内変位および地表面沈下の予測を行った。解析断面はNo.375+60.0とし、地層はCM、CL、D級の3層としてモデル化した（図-9(a)）。解析は二次元弾性非線形解析（電中研式）で行い、薄肉のトンネル支保構造部材は弾性体とし、吹付けコンクリートは棒要素で、鋼製支保工は梁要素でモデル化した。鉛直調査ボーリング孔内における孔内載荷試験およびボーリングコアの地山試料試験より決定した解析に用いる地山物性値を表-2に示す。解析断面の支保パターンは設計のDⅢa（図-8）である。この支保部材の断面性能値を表-3に示す。

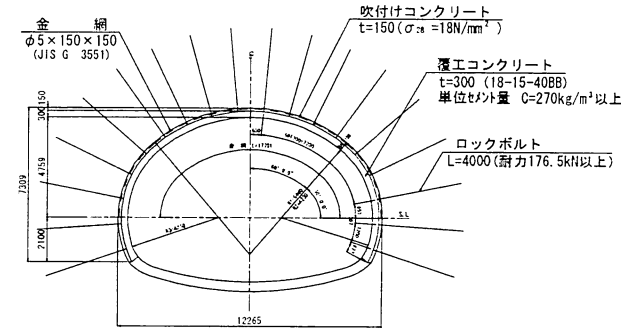


図-7 支保工図（DⅠ-bパターン）

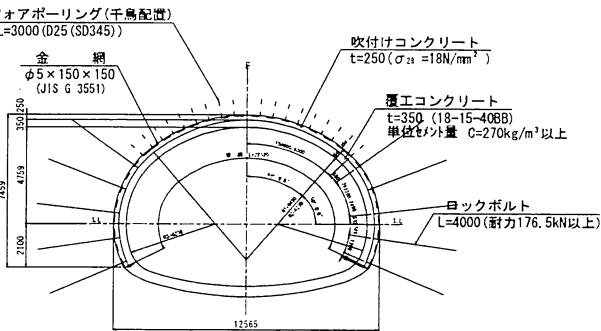


図-8 支保工図（DⅢaパターン）

解析結果のトンネル掘削完了時のトンネル変位量、トンネル周辺のゆるみ係数分布を図-9に示す。同図から、トンネル内空変位、地表面沈下共に10mm以下であり、地山のゆるみ範囲もトンネル近傍に限られている事が分かった。

したがって、トンネル変形や地表面沈下の問題に対して事前の対策工までは必要ないと考えるが、不測の事態にそなえ、次節に示す地表の動態観測を強化し、状況に応じてトンネル坑内から補助工法で対応する情報化施工を行うこととした。

### c) 区間3

区間3はボーリングコアの観察結果より土砂状に強風化したD級地山区間であり、トンネル掘削時の天端および切羽の安定対策が必要であると考えられる。また、土被り15m以下の小土被り区間であり、トンネル変形や地

表面沈下が懸念されることから、区間2と同様にFEM解析による予測検討を行った。解析断面はNo.376+10.0とし、地層はCL、D級の2層としてモデル化した(図-10(a))。

解析結果のトンネル掘削完了時のトンネル変位量、トンネル周辺のゆるみ係数分布を図-10に示す。同図より、トンネル内空変位、地表面沈下共に100mm以上発生し、トンネル掘削に伴う地山のゆるみは地表にまで達する事が分かった。

そのため、トンネル掘削時の天端安定対策および地山のゆるみの抑制による内空変位、地表面沈下の抑制対策として、坑外からトンネル掘削に先行して行う地山補強を検討した。表-4に事前地山補強の比較検討表を示す。超長尺鋼管先受け工、垂直縫地工、地表からの薬液注入工の3案より、最も経済的な超長尺鋼管先受け工を採用した。

超長尺鋼管先受け工は、鋼管の打設方向を計測するジ

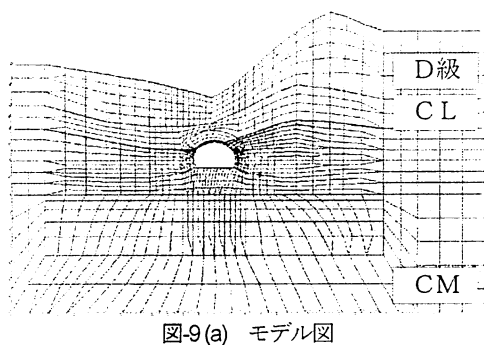


図-9(a) モデル図

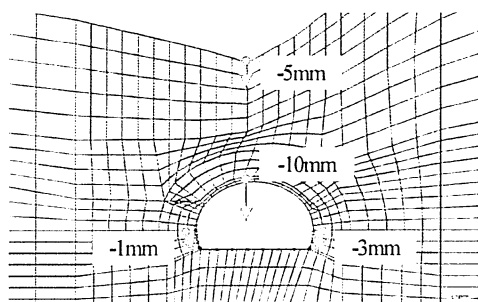


図-9(b) 変位図

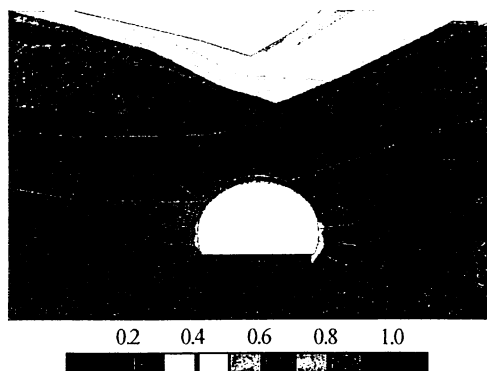


図-9(c) ゆるみ係数分布図

図-9 FEM解析結果 (区間2 - 断面No.375+60.0)

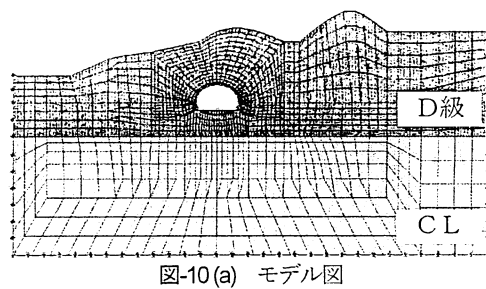


図-10(a) モデル図

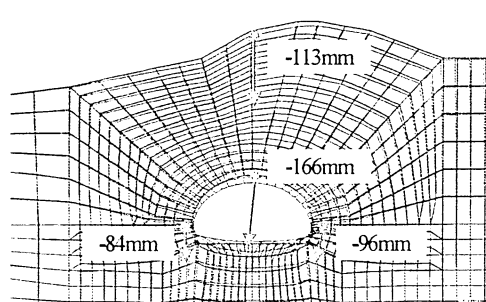


図-10(b) 変位図

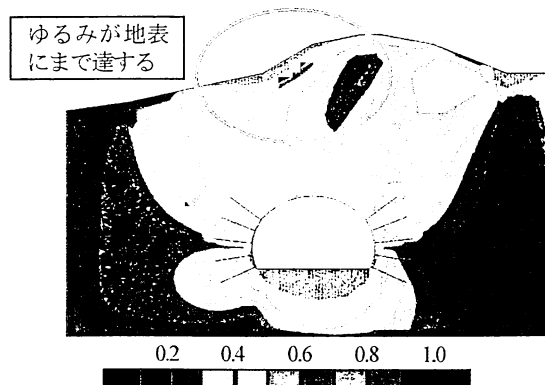
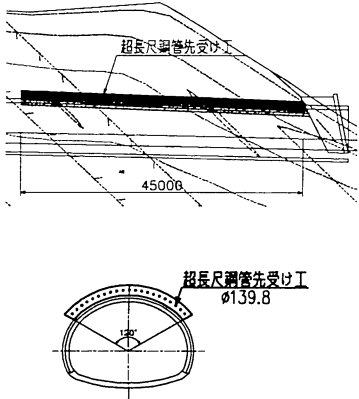
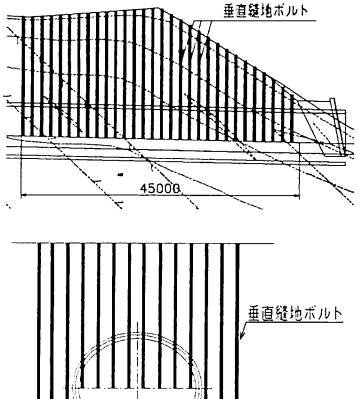
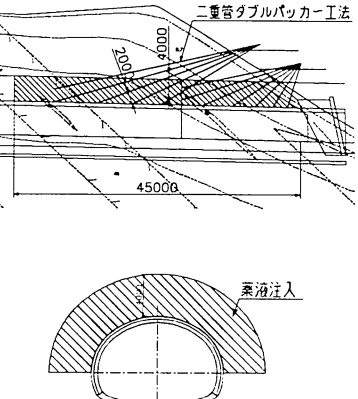


図-10(c) ゆるみ係数分布図

図-10 FEM解析結果 (区間3 - 断面No.376+10.0)

表-4 事前地山補強比較検討表

| 工法   | 超長尺鋼管先受け工                                                                         | 垂直縫地工                                                                              | 地表からの薬液注入工                                                                          |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 概要図  |  |  |  |
| 概要   | 鋼管の剛性により、掘削時の天端ゆるみを抑制する。                                                          | 縫地ボルトの引張、圧縮、せん断抵抗によりトンネル周辺地山のゆるみを抑制する。                                             | 浸透性のよい注入材をゆっくり注入することで均質な改良が可能となる。                                                   |
| 施工性  | 坑外から施工可能である。                                                                      | 地上が保安林となるため、施工が難しい。                                                                | 坑外から施工可能である。                                                                        |
| 経済性  | 安価                                                                                | 中位                                                                                 | 高価                                                                                  |
| 総合評価 | ○                                                                                 | △                                                                                  | △                                                                                   |

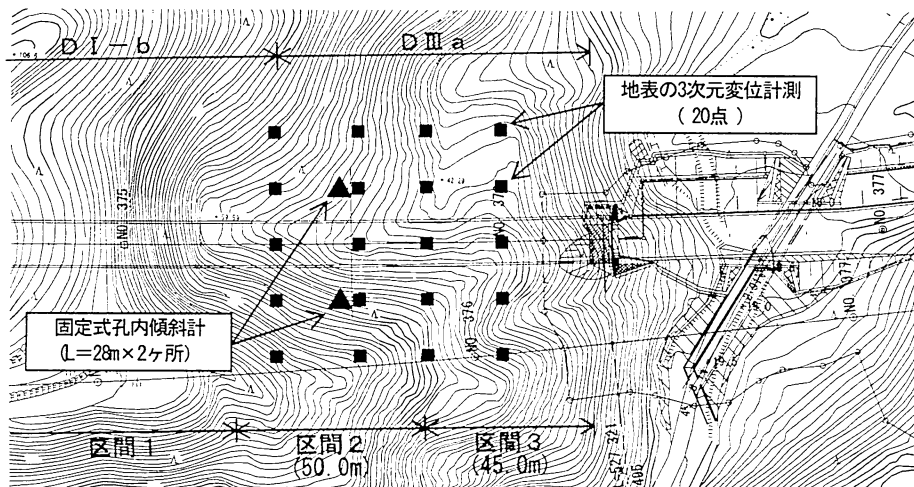


図-11 地表の動態観測計測器配置計画

ジャイロセンサーと、打設方向を制御する特殊ビットを使用することで、50mを超える長距離の先受けを高い精度で打設可能な工法である。削孔方法はダウンザホールハンマーによる二重管削孔で、注入方式は二重管ダブルパッカー方式によるステップアップ注入とし、注入材には懸濁型超微粒子スラグ注入材を使用する。

超長尺鋼管先受け工の施工により、天端の安定は確保され、地山のゆるみも抑制されと考えられるが、不測の事態にそなえ、次節に示す地山の動態観測を強化し状況に応じてトンネル補助工法で対応する情報化施工も行うこととした。

### (3) 情報化施工

区間2および区間3において、トンネル掘削時に実施する地表の動態観測を強化した情報化施工について述べる。動態観測は地表面3次元自動計測システムと鉛直調査ボーリング孔を利用した固定式傾斜計の自動計測システムにより、24時間リアルタイムで観測可能な体制とした。動態観測の計測器配置計画を図-11に示す。

#### a) 区間2

区間2における対策工の検討フローを図-12に示す。

天端および切羽の安定対策はトンネル掘削時の切羽観察により決定し、対策工は長尺GFRP先受け工、注入式フォアポーリング、長尺鏡補強ボルトを基本として崩壊

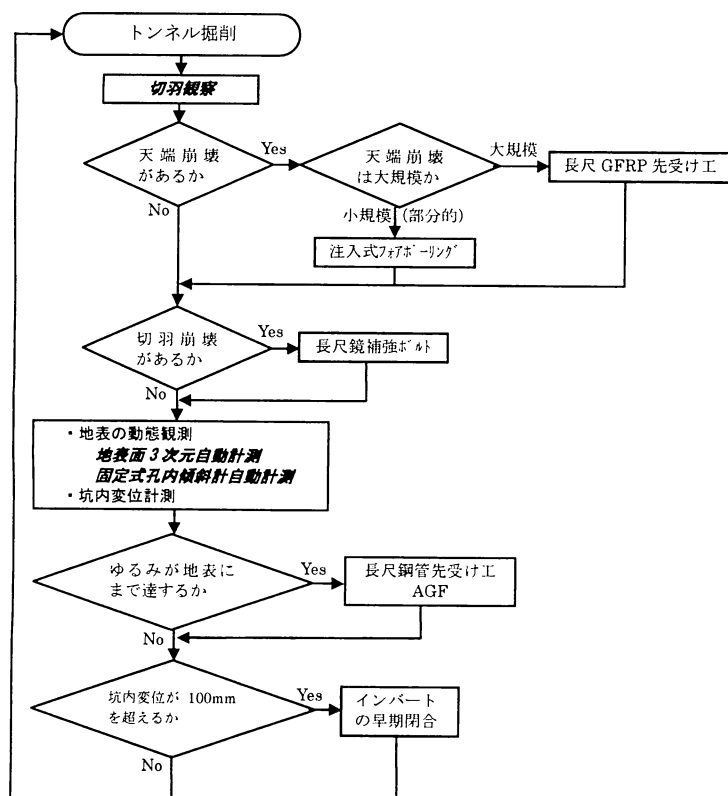
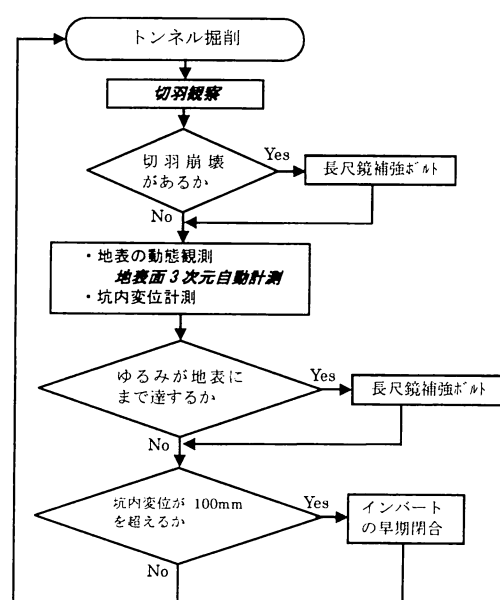


図-12 対策工選定フロー（区間2）



※超長尺鋼管先受け工を施工することから、天端の安定対策は除く。

図-13 対策工選定フロー（区間3）

の位置と規模に応じて選定する。

地表面沈下および坑内変位の変形対策については、地表の動態観測と坑内変位計測により決定し、対策工はゆるみが大きく地表にまで達する場合は長尺鋼管先受け工を、坑内変位が大きい場合はインバートの早期断面閉合を基本とする。

#### b) 区間3

区間3における対策工の検討フローを図-13に示す。トンネル天端の安定は超長尺鋼管先受け工により確保できると考え、切羽の安定対策のみを切羽観察により決定することとした。対策工は長尺鏡補強ボルトを基本とする。また、地表面沈下および坑内変位の変形対策については、インバートの早期閉合を基本として対策を行う。

## 7. まとめ

以下に、本報告のまとめを示す。

- ・調査ボーリングにて地山状況を確認し、高精度弾性波探査により調査ボーリングで確認される地層の分布を広域に把握することで、詳細なトンネルの地質縦断図が得られた。

- ・トンネルを地質状況に応じて区間分けすることで、トンネル掘削時に予測される変状ごとにトンネル安定対策を検討できるため、合理的な検討が可能であった。
- ・設計段階では、終点側坑口部の76m区間において、トンネル安定対策が必要とされていたが、本検討では、終点側坑口部45mのみトンネル安定対策を施工し、その他の区間は地表の動態観測を強化した情報化施工により対応する結果となった。これは、一次調査において不良地山が確認された場合、追加調査を行って詳細な地質状況を把握することで経済的なトンネル安定対策の検討が可能となることを示唆している。
- ・今回採用した超長尺鋼管先受け工は、50m級の鋼管先受けを高精度に施工できる新技術である。この工法は、従来のトンネル坑口部における地山補強工より廉価であり、トンネル坑内からの長尺先受け工と同等のコストである。

平成23年8月1日現在では、当該区間のトンネル施工は行っていないため、本報告はトンネル安定対策の検討結果について示したものである。したがって、当該区間のトンネル掘削時には、地質調査結果、トンネル安定対策工、および、情報化施工法が妥当であったかを検証する必要がある。これについては、今後、施工実績、計測結果等を取りまとめ報告する予定である。

## 参考文献

- 1) 山田浩幸, 大谷明彦, 斎藤泰信: 地すべり跡地形を呈する坑口部における軟弱地山対策の設計と施工, トンネル工学報告集, Vol.14, pp.115-122, 2004.
- 2) 金岡幹, 川村俊一, 島豊, 河田孝志: 大規模地すべりと交差するトンネルを2重支保構造で施工, 土木学会トンネル工学報告書, 第16巻, pp.179-185, 2006.
- 3) 千葉伸一, 三嶋昭二, 河嶋智, 飛田健二: トンネル坑口掘削中に発生した地すべりの観測施工の事例報告, 地すべり学会誌, Vol.46, No.4, pp.1-7, 2009.
- 4) 海瀬忍, 土屋将樹, 溝端拓哉, 津國正一: 大断面トンネルの偏圧傾斜坑口部の対策と繊維補強による覆工無筋化, トンネルと地下, 第41巻第6号, pp.17-26, 2010.

(2011.9.5 受付)

## STUDY ON COUNTERMEASURE FOR STABILIZATION OF TUNNEL PORTAL AT HIGHLY-WEATHERED WEAK GROUND AREA

Hideaki TAKAOKA, Hirohumi KAWAKAMI and Hiroyuki HIRANO

In the construction of the tunnel portal in the weak ground, countermeasures from inside tunnel are normally applied to handle the technical problems such as face collapse and deformation of tunnel, etc, except in the case that structures and/or landslides are located near the portal, or that the countermeasures are easy to be implemented from ground surface at small overburden area. However, A lot of cases of causing face collapse, large deformation and subsidence of surface ground have been reported due to the delay of taking action for a rapid change of the ground condition where only the countermeasures from the inside tunnel had been implemented.

Therefore, authors considered the reasonable countermeasure method to be applied for tunnel portal area with weak geological condition, It is the combination of countermeasures from inside tunnel and from ground surface such as the ground improvement by dividing the section based on the geological conditions obtained from sufficient number of geological investigation at portal area.