

土被りの薄い沢部斜面における垂直縫地工法の設計と効果

Study for planing and effects of vertical forepoling bolt method on the slope with thin overburden

尾寄師成¹⁾・山田浩幸²⁾・川北真嗣³⁾・真柄鎮⁴⁾・小林康範⁵⁾

Moronari OZAKI, Hiroyuki YAMADA, Masatsugu KAWAKITA, Mamoru MAGARA, Yasumori KOBAYASHI

This paper shows the decision making and the planing of the vertical forepoling bolt method in auxiliary methods for tunneling under thin overburden with unsymmetrical earth pressure. Auxiliary methods are applied to avoid the ground settlement, collapse at the cutting face and landslide. It is important to decide proper supporting at the site with imperfect arch action or low bedrock strength such as tunnel portal or shallow overburden. As a guide to control those problems, the vertical forepoling mechanism is evaluated through the monitoring system for slope stability by using back analysis with field measurement data in this paper.

Key Words: vertical forepiling bolt method, thin overburden, auxiliary method, field measurement, back analysis

1. はじめに

NATMによる山岳トンネルの施工においては、支保メンバーである地山の挙動を現場計測等で把握し、適切な支保部材を選定するとともに地山状況に応じて変化するゆるみ量、発生応力に対して多様な補助工法を駆使することでトンネルを安全にかつ合理的に掘削する事が重要となる。

とりわけ、坑口部や土被りの薄い箇所においては、地山の強度も低くアーチアクションの形成が不十分のため、地表面沈下、切羽崩壊、地すべりといった不測の事態を生じることのないよう対策工として補助工法が採用される事例が多くなっている。今回、偏圧地形の上、強度が低く、土被りの薄い沢部といった厳しい施工条件の下で、斜面安定対策を兼ねた切羽安定対策として採用した垂直縫地工法に関して、施工時の現場計測の分析ならびに計測値に基づき実施した逆解析により地山の挙動および縫地ボルトの補強メカニズムに関する知見を得た。

本論文は、補助工法としての垂直縫地工法の選定過程および設計方針を示し、トンネル施工時に実施した現場計測と計測値に基づく逆解析手法を用いた斜面安定管理を通して垂直縫地工法の補強効果に関して評価し、今後、同様の施工条件における垂直縫地工法の検討及び設計に関する提案を行うものである。

1) 正会員 (株) 鴻池組 名古屋支店 荘川道路工事事務所

2) 正会員 (株) 鴻池組 技術部

3) 日本道路公団 名古屋建設局 建設第二部

4) 日本道路公団 名古屋建設局 清見工事事務所

5) 日本道路公団 名古屋建設局 清見工事事務所

これらの各工法について、本トンネルにおいては、切羽安定と斜面安定の両面から有効と考えられる工法を選定するという必要性から、①ウレタン注入地盤改良（岩盤固結工法）②薬液注入工法③垂直縫地工法を二次選定し、これらの3工法に関して、表-1に示すとおり、施工条件にも配慮して対策効果の信頼性、施工性、経済性といった観点から比較検討を行い、斜面安定にも効果があり切羽進行に影響を与えない垂直縫地工法が最適と考え対策工として採用した。

3. 垂直縫地工法の設計

垂直縫地工法の設計については、これまでの設計事例を調査したところ、確立された手法はないものの、以下の方法で設計が行われている。

- ・過去の類似地山の実績による設計

ボルト径 $\phi 25 \sim 32\text{mm}$

削孔径 $\phi 100 \sim 120\text{mm}$

打設間隔 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m} \sim 2.0\text{m} \times 2.0\text{m}$

- ・すべり面に対して鉄筋をせん断杭として設計
- ・地山のせん断強度の改良効果をFEM解析により評価して設計

本トンネルにおいては、最も土被りの薄い沢部においてトンネル掘削時のすべりに対する安定計算を行い、鉄筋のせん断抵抗力により必要鉄筋量を算定し、過去の施工事例も参考にして下記に示す設計方針により仕様を決定した。

- ① ボルト径については、これまで最も実績の多いD32を採用し、必要ボルト本数は前述のとおり鉄筋のせん断抵抗力から決定し、トンネル横断方向1断面あたり12本とした。
 - ② ボルトの配置に関しては、用地等の制約条件に配慮し、横断方向の配置は、トンネルセンターから極力分散させる目的でピッチを2m間隔とし、公団用地内の山側、川側へそれぞれ6本ずつ配置した。なお、縦断方向に関しては、トンネル掘削ピッチを考慮してピッチを縮め、1.5m間隔に配置した。
 - ③ 削孔径については、経済性に配慮し、二重管式の最小径とされる $\phi 90\text{mm}$ を採用した。根入れ長については、想定すべり面から2m根入れするものとし、最深のものでSLまでとした。
- なお、トンネル掘削断面内に関しては、施工においては核残しにより切羽の安定を図る事を前提に、トンネル掘削断面内に2m根入れした。図-3に垂直縫地工のボルト配置図を示した。

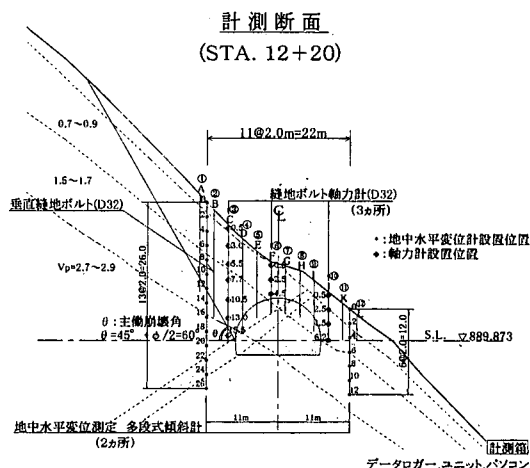


図-3 垂直縫地ボルトおよび計測工配置図

4. 挙動計測

(1) 計測項目

NATMにおいては地山自身を支保メンバーとしてとらまえているため、トンネル掘削時の地山挙動を的確に把握する必要がある。その結果に基づいてリアルタイムに対応することが施工時の安全性確保の面では重要となる。本トンネルの計測項目の選定にあたっては、トンネル掘削時の斜面の挙動および対策工としての縫地ボルトの効果を把握する目的から通常のA計測に加えて坑外計測項目として

- ・地中水平変位測定（多段式傾斜計）
- ・縫地ボルト軸力測定

といった項目を選定した。なお、通常斜面挙動計測として実施する地表面沈下計測に関しては、施工時期が冬季にあたり積雪が多い（年平均6m）という事情から実施できなかった。また、坑外計測システムについては、積雪が多く斜面勾配が急（約40度）なことに加え、トンネル掘削時にリアルタイムかつ連続的にデータを得る必要性から、パソコンを用いてデータを自動的に蓄積する自動計測システムを採用した。

(2) 計測結果の分析

本トンネルで実施した各計測項目の結果から得られた知見を以下に示す。

1) トンネル坑内計測 (A計測)

図-4にA計測結果(内空変位, 天端沈下)を示す。変位モードとしては、内空変位に比べて天端沈下が卓越するという、土被りの薄い部分でよく見られる変位の傾向を示した。

また、地形的な特徴を反映し、川側(E)が縮み山側(D)が伸びるという偏圧作用が確認できた。

経時変化としては、天端沈下については、

計測開始直後から下半通過後に至るまで大

きく増大し、下半切羽通過後 49.2mm で収束した。上半水平変位(F)については、上半切羽通過時は 2mm程度と小さな変位量であったが、下半切羽通過時にも変位が増大し、最終的に 11.7mm で収束した。

2) 縫地ボルト軸力測定

図-5に示したとおり、山側(測線C)、天端(測線F)、川側(測線J)の3箇所において縫地ボルト軸力計を設置し、ボルトに発生する鉄筋応力測定を行った。以下にデータ分析結果について述べる。

① トンネルセンター(測線F)

測線Fに関しては地表面に近いF-0.5の位置では上半通過時に引張応力 25MPa が働き、その後、下半掘削時にはさほど影響もなく収束した。F-2.5では上下半切羽通過直前に一旦急激に圧縮力が働き、切羽到達と同時に引張側へ移行し、その後、圧縮応力が増大した。これらの挙動については、切羽に近いF-2.5において垂直縫地工法の特長といわれる下支え効果(吊下げ効果)が発揮されていたと考えられる。

② トンネル山側(測線C)

測線Cでは、ほとんどの測点が上下半通過前にわずかに圧縮側へ動き、切羽通過とともに引張応力が発生していた。これはトンネル掘削のゆるみの影響と考えられた。

本測線の中でC-10.5とC-15.5の測点において他と異なるデータが得られた。C-10.5では、上半切羽が近づく前から引張応力が作用しており、一部存在の確認された弱層の影響であると考えられた。また、C-15.5では、切羽到達前より山側で圧縮、川側で引張応力が発生し、ボルトの曲げ挙動が観察された。上半切羽通過直後にそれぞれ一旦応力が小さく

なったが、その後一気に大きくなり、(山側 -331MPa, 川側 174MPa) 下半切羽通過時には再び値は小さくなり最終的には収束した。これについてはC-15.5付近がちょうど弾性速度の層境にあたり、上半切羽通過時には上部の層がすべりの兆候を示していたものと考えられる。

③ トンネル川側(測線J)

測線Jの上半側壁部位置にあたるJ-4.5では上、下半切羽通過時に圧縮応力が作用しており、A計測からも観察された偏圧の影響によるもの、上半基盤部分が比較的良好であった事によるものと考えられた。

また、J-2.5においては他の測点と異なり、山側に引張、川側に圧縮応力が発生しており、この挙動から、基盤部分に根入れされた縫地ボルトが偏圧の作用に対して抑止的な挙動していることが確認された。

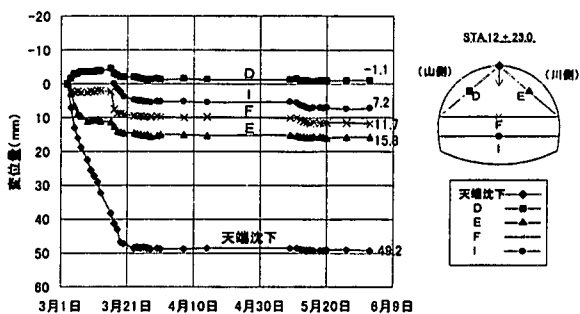


図-4 A計測経時変化図

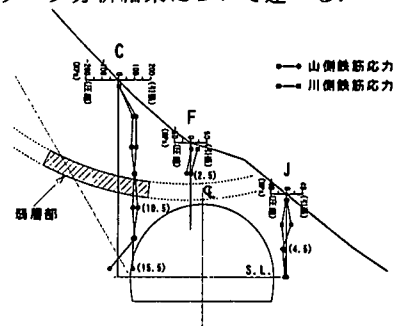


図-5 縫地ボルト軸力測定結果

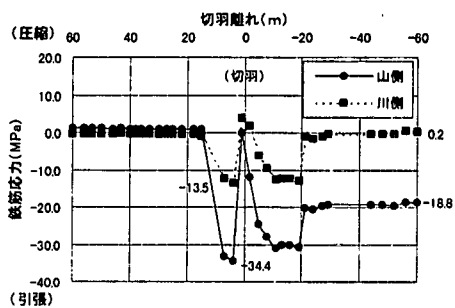


図-6 ボルト軸力経時変化図(測線F)

3) 地中水平変位測定

① 山側 (測線A)

地形的な特徴からX方向 (トンネル横断方向) の変位がY方向 (トンネル縦断方向) の変位に比べ卓越していた。X方向の深さ方向の変位分布を見ると図-7に示すとおり、X-10で山側へ、X-12~16で大きくトンネル側 (川側) へ変位していた。これはトンネル掘削の影響 (応力開放) によるものと考えられた。なお、X-0~8に関しては上方に行くにつれて川側への変位が大きくなっており、上部層の地山の沈下と斜面方向へのすべりの兆候が確認された。

また、切羽の進行方向 (Y方向) の変位状況に着目すれば、切羽が計測断面の直前に近づくまでさほど変位を生じておらず、垂直縫地工法による先行変位抑制効果が図られていたものと判断できた。

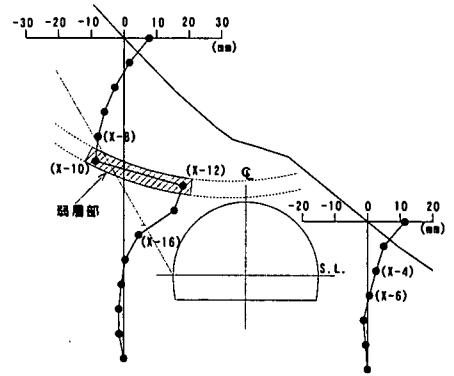


図-7 地中水平変位分布図

② 川側 (測線K)

トンネル横断方向では上半切羽通過時より変位を生じた。水平変位はX-0~4で現れており、特に上方では10mm程度川側へ変位していた。しかしながら、X-6以深ではほとんど変位は見られず、X-6以深がトンネル上半盤より下方に位置し、基盤部が良好であったため、トンネル掘削による影響が小さかったものと考えられる。

5. 逆解析に基づく斜面安定管理

厳しい施工条件の下で積雪により二次的な対策が困難であるという事もあり、掘削時にリアルタイムな挙動把握と対策の検討が必要であるといった観点から、本トンネルにおいて実施したA計測および地中水平変位を用いて逆解析を実施することでトンネルを含めた周辺地山全体のひずみ状態を各施工段階毎に把握し、安全性に対する評価を行うとともに追加対策の有無について検討を行った。

(1) 逆解析手法の概要

逆解析手法には従来から①トンネルを対象として地山の初期応力と弾性係数を未知数として計測された変位を再現できるようこれらの未知数を逆算するものと②斜面掘削を対象として降雨等地山強度の劣化に伴い生じる変形を考慮できるよう、地山自身の自重を外力として地山の弾性係数およびせん断剛性の低減率 (m:異方性パラメータ) を未知数として逆算するものがある。

トンネル掘削に伴う斜面の不安定化は①および②の両方より発生するものであるため今回は①と②をカップリングした逆解析手法によりトンネル掘削を考慮した斜面全体の安全性を評価した。

図-8に逆解析を用いた安定管理フロー図を示すが、計測変位をもとに逆解析を行い、逆算された弾性係数を用いてFEM解析を行う事でトンネル周辺および斜面全体の地山最大せん断ひずみ分布を求める。このひずみ分布と地山条件より定まる限界ひずみ (管理基準値) を比較することにより施工時の安全性について評価を加えた。なお、本トンネルでは調査ボーリングのデータを参考に管理基準値を一般部1.0%、弱層部1.3%と設定した。

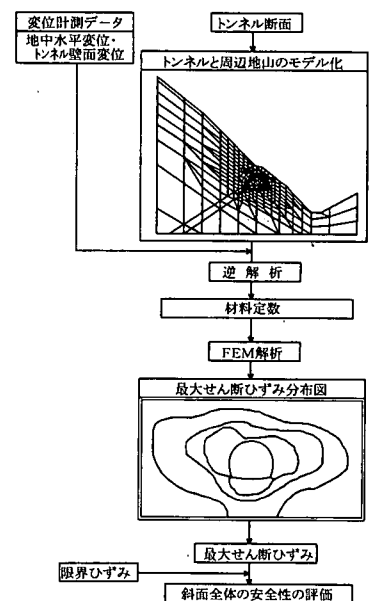


図-8 安定管理フロー図

(2) 解析結果の評価と対策

図-9の解析結果に示すとおり、逆解析により実測変位の性状がほぼ表現できている。今回のモデル化では、計測変位の特徴を表現するため、斜面方向のせん断抵抗の低減を図り、調査ボーリングや垂直縫地施工時のスライム等を参考にモデル化を行い、弱層部の設定、垂直縫地施工範囲の設定等の工夫を行った。

一例として図-10に上半掘削後の地山最大せん断ひずみ分布を示す。トンネル山側側壁部と川側脚部において限界ひずみ1.0%を越える箇所が見られるが、山側側壁部でひずみ値の最大が1.1%でその領域も壁面のごく一部であることからトンネル全体の安定には影響はないと判断した。また、川側脚部では限界ひずみ1.0%を越え最大2.4%のひずみが発生し、その領域も広範囲であったことから、斜面への影響を考慮して脚部補強工（脚部ボルト）を追加対策した。

なお、弱層部では最大で1.0%の最大せん断ひずみが生じたが、限界ひずみの1.3%を越えるものではなかった。

6. 掘削状況

垂直縫地工法を施工した区間におけるトンネルの施工に関しては、支保パターンDⅢ（707ボ-リング L=3.0m@60cm、鋼製支保工 H-200）により上半先進ベンチカット工法にて実施した。

掘削時の地山状況は、概ね事前調査で予想された通りであったが、沢部（STA12+20）付近の天端より両肩にかけて土砂層が存在し、鏡面にも多数粘土が介在し、掘削時には肌落ちが頻繁に見られる状況であった。しかしながら、このような地山状況の中で垂直縫地工法を採用した効果で大規模な追加対策をする事もなく、核残し、吹付コンクリート、鏡吹付け、脚部補強工といった軽微な対策により対処できた。施工状況からは、横断面のボルト配置を2.0m間隔としたため所々ボルト間の中抜け現象が生じており、ボルトピッチについては2m程度が限界であると考えられた。

7. まとめ

今回、採用した垂直縫地工法は、坑口部の補助工法として事例が増えているが、定量的な評価が難しく、設計手法が確立していない状況にある。本トンネルにおいて、鉄筋をせん断杭として設計し、挙動計測の結果分析から、その効果（吊下げ効果、すべり抑止効果）を定量的に把握でき、設計手法の妥当性について確認できた。また、掘削においても地山補強効果で切羽安定が図られ、施工時に逆解析による斜面安定管理を適用する事で掘削時に軽微な追加対策（吹付け、鏡吹き、脚部補強工）で厳しい条件下の施工を完了できたことは有意義であったと考えられ、今回の施工実績が同種施工条件における工事に参考となれば幸いである。

最後に、垂直縫地工法の検討および採用にあたり、日本道路公団名古屋建設局および清見工事事務所の関係各位の御協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) トンネルライブラリー 第5号 山岳トンネルの補助工法 平成6年3月 土木学会
4章 補助工法の施工 (4.2.3 垂直縫地工法) pp98~102

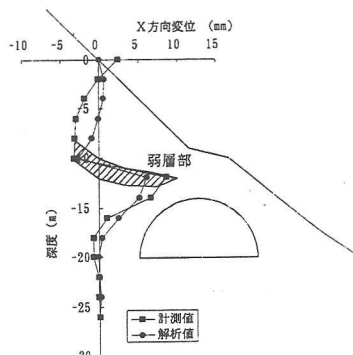


図-9 解析結果と計測値の比較

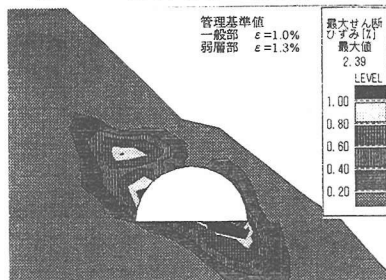


図-10 最大せん断ひずみ分布図

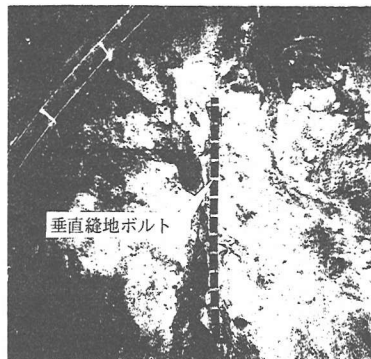


写真-1 施工状況