

V — 1 地滑り抑止を考慮したトンネル坑口付近の施工について

日本鉄道建設公団札幌支社 正会員 鶴田五八男

日本鉄道建設公団札幌支社 武藤好一

1. まえがき

鉄道や道路の路線選定に当って、最も重視される事柄の一つに地形、地質条件がある。特にトンネル施工の難易は、これら二つの条件に左右されることが多い。従ってそのルートを決めるには慎重さを要するものである。トンネルはなるべく山の斜面に直角に入り、直角に出て行く方が施工上都合がよい。

しかしながら、我国は国土が狭く限られた地域に集落が密着して来た為、その両地点と結ぶには線形に制約を受けやすい事、地質年代が比較的新しく変化が多い事、地形が複雑な事など諸々の条件が絡み合つて、地形・地質学的弱点も十分カバーして路線を選ぶ事がなかなか難しい事もまた事実である。

線形については、鉄道は道路より更に条件が厳しく、まして始終点が決まっている短区間の中でのルート計画は選定の自由度において著しく制限を受けるものである。

ここで紹介する新茂辺地トンネルは、全長1,209^mの単線トンネルである。津軽海峡線の建設に伴う在来江差線改良工事の一貫として、在来線から分岐して再度在来線に接続するルートの中に新設されたものである。その為前述のルート選定に制約を受け、坑口付近において地滑り地帯を通らざるを得ず、そこで実施した地滑り抑止工法を併用したトンネルの施工について報告するものである。

2. 地形、地質

トンネル地表部は、標高50^m～60^mの平坦面が広く分布した段丘面を形成しており、所々に海や河川本流から短い沢が入り込んでいる。在来江差線は函館から木古内方面へ向つてほぼ海岸線に沿ったルートをとっており明り区間でこれらの沢部を横断あるいは並行したりしている。

本トンネルにおいても始点側(函館方)坑口は、沢を横切り地山斜面との交差角度はそれ程厳しくないものの、終点側坑口(以降出口という)は、茂辺地川本流から直角に支流をなす沢部に斜角をもって顔を出している。

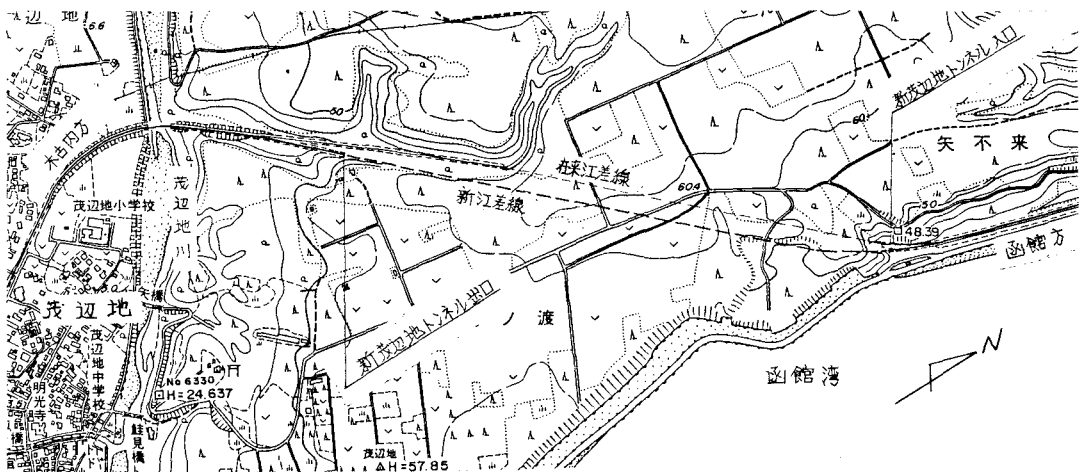


図2-1 地形図

この付近の基盤は、新第三紀中新世茂辺地川層の極細粒砂岩～細粒砂岩で一軸圧縮強度40MPa前後、亀裂の少ない比較的安定した地層を呈しているが、トンネル出口側に近づくにつれ土被りも薄くなり、横断方向では地形が右下りに傾斜したいわゆる偏荷重がかかる状態になっている。さらにこの基盤上には1m～2.5m程度の崩積土が堆積し、トンネル断面の一部がこの崩積土を貫く形となっている。

崩積土は空隙率が極めて高いがサササの状態、粘着性もそれほど期待できるものではなく、この状態でトンネルの掘削を行えば斜面の安定を崩し地滑りを誘発させる事が明らかで、更にすぐ隣りに営業線があり一度地滑りを起したら重大事故につながる事がわかない事から、施工には十分な検討を要求された。

3. 工法の検討

地滑り地帯を貫いてトンネルを安全に掘削するには、その工法として種々考えられるが、基本的には地滑り部分を完全に撤去した後掘削する方法、地滑り部分を改良してから掘削する方法、地滑り部分にカウンターウエイトを載せ安定を計る方法であろう。これらのうち撤去案はその範囲があまりに広大となり当現場の条件を勘案すれば非現実的である事、改良案は注入等によって固結させる事になるが地形や地質によってはその量が無制限となり、その割には効果が低い事など問題があるので前2案を除外しカウンターウエイト方式について更に次の2案を検討した。

A案 押え盛土 + パイプルーフ

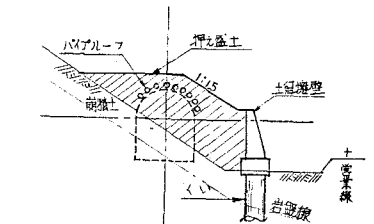
B案 モルタルによる人工地山 + 縫地ボルト

A案は最も一般的に用いられる押え盛土であり、斜面の安定はもちろん、トンネル掘削時はアーチアクションを形成し、長期的には偏圧を受けないよう地表面の形状を変えるもので、これに天端崩落防止のためのパイプルーフを補助的に組合わせたものである。

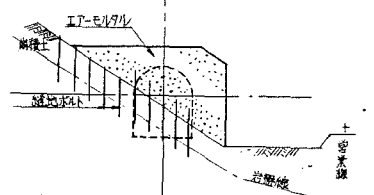
B案は崩積土上に気泡の多いモルタル（以降エアモルタルという）で人工地山を形成するとともに、地表から基盤までのボーリングを行い鉄筋と強度の高いモルタルでくいを造るもの（以降縫地ボルトという）である。縫地ボルトは斜面の滑動に対し抑止くいの役目を果し、ボアホール部分の注入によりモルタルが空隙を浸透し、いくらかの地山改良をも合わせてわらったものである。

問題点としてA案は押え盛土に附随する構造物として土留擁壁などが必要となってくる。本工事の施工箇所が営業線と急峻な地形に挟まれ、そこに通じる道路もない状況から、擁壁や盛土を施工するための機械、材料搬入が極めて難しく、仮にその為の設備を造って搬入したとしても経済的に不利なものとなる。

これに対しB案の使用する機械は比較的軽量であり、足場用資材、型枠等も同様で搬入については問題が少なく、エアモルタルは押え盛土の場合の土に比べて均一性が高く、亀裂のない軟岩程度の地山に近いものとなることからトンネル掘削時の施工性も有利と考えB案を採用することとした。



(A案)



(B案)

図3-1 工法比較概略図

4. 縫地ボルトの設計

斜面に縫地ボルトを施し、表土の滑落を抑止しようとするとき、その設計法はまだ確立されていないが、ここでは次のような考え方に基づいて行つた。

縫地ボルトがしっかりしていれば、斜面方向のピッチは極端に広げなければさほど問題はない。要は斜

面直角方向のピッチを離し過ぎるとその間の土塊がすり抜け、全体が滑動することになる。従ってボルトとボルトの間にアーチアクション(図4-1)が発生しやすいようにし、その反力をボルトで受けるような間隔を想定すればよい。これは滑動層の厚さにも関係する。また縫地ボルトの計算上の直径はボーリング径とするが実際はモルタルがボーリング径以上に浸透しているので計算より大きなくいができているものと思われる。しかしこれはプラスアルファの安全料とみなし無視する。

以降に具体的な計算例を示す。

1) 前定条件

(1) 崩積上下の基盤は泥岩であり、縫地ボルトをこの層まで打設し滑りに対する抵抗力をとらせる。

(2) 基盤の勾配は約35°で傾斜している。現在崩積土は基盤岩との間にある程度の摩擦力和粘着力をもって安定しているはずであるが、それらの定量的な数値は評価できないので安全率1でバランスしているものとする。

(3) 崩積土の厚さは2.5mとする。(4) 縫地ボルトのボーリング径は現地の状況と作業性を考慮して86mmとする。(5) ボルトに使用する鉄筋及びモルタルの強度は他工事の実績を参考にして、異形鉄筋32mm、圧縮強度40.0MPaとする。(6) 基盤岩の変形係数 $E_0 = 5.4 \times 10^4 \text{ MPa}$ (7) 縫地ボルトの曲げ剛性 $EI = 9.4 \times 10^7 \text{ kgf-cm}^2$ (8) 崩積土の単位体積重量 $\gamma = 1.6 \text{ t/m}^3$

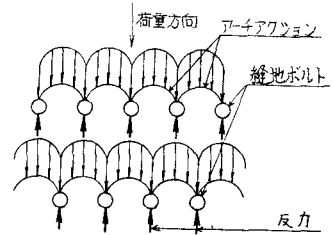


図4-2 アーチアクション/想定図

2) 滑動力の計算

縫地ボルト1本で支える土塊の形状を図4-3のように考え、斜面直角方向の間隔1.0m、斜面方向の間隔 l をいくつか変化させて計算すると表4-1のようになる。

ここで W_a は土塊重量、 P_a は斜面に平行な滑動力、 R_h は P_a の水平分力である。

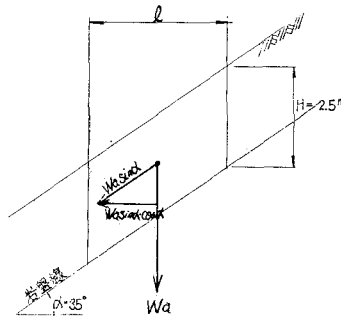


図4-3

$P_{(l)}$ (cm)	1.0	2.0	2.5
W_a	4.0	8.0	10.0
$P_a = W_a \sin \alpha$	2.3	4.6	5.8
$P_h = W_a \sin \alpha \cos \alpha$	1.9	3.8	4.7

表4-1

3) 抵抗力 P_R

縫地ボルトを泥岩中に打込んだ突出ぐいと考え、Chanの式より第1不動点の深さを求め、岩盤表面から第1不動点までの周辺地盤で抵抗するものとする。

以上から

第1不動点の深さ $l_y = 45 \text{ cm}$

$$\begin{aligned} \text{岩盤の抵抗力 } P_R &= l_y \cdot \gamma_u \cdot D \\ &= 45 \text{ cm} \times 38.8 \text{ t/m}^3 \times 8.6 \text{ cm} \times \frac{1}{2} \\ &= 7508 \text{ kgf} \end{aligned}$$

鉄筋の許容せん断力 $S_a = A_s \cdot \tau_a = 6354 \text{ kgf}$

$$l_y = \frac{1}{\beta} \cdot \tan^{-1} \frac{1 + \beta h}{\beta h}$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K D}{4 E I}}$$

$$K = 0.2 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{\frac{3}{4}}$$

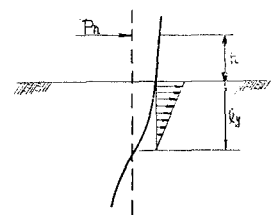


図4-4

以上の計算から、滑動力に対してある程度の安全率を考慮し表4-1と対比して斜面方向のボルト間隔は2.0mが妥当なものとした。

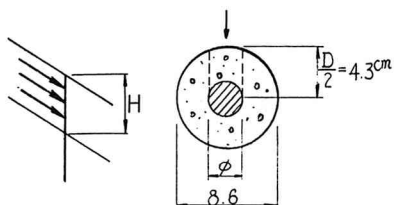


図4-5 セン断力の考え方

$$\text{岩盤抵抗力の安全率 } F_s = \frac{7.5 \text{ t/s}}{3.8 \text{ t/s}} \approx 2.0$$

縫地ボルト本体のコンクリートせん断応力度は、

$$\tau_c = \frac{P_a}{\frac{\pi}{2} \cdot H \cdot 2} = 2.1 \text{ kg/cm}^2$$

4) 縫地ボルトの配置

これまでの検討から基本的な配置の考え方は、(1)

) 滑動方向へのアーチアクションの発生を期待する

工法であるので、斜面直角方向のピッチはできるだけ

狭いほうがよいが計算の結果1.0m、斜面方向のピッ

チを2.0mの千鳥配置とする。(2) 基盤への定着長は基盤上面の凹凸、基盤が傾斜していることによる水平抵抗力の低減、計算に用いた土質定数のバラツキ等を考慮して1m以上とする。

5 施工

施工地点は狭い谷地形に位置し、使用機械器具及び資材はトラッククレーンで搬入した。

縫地ボルトは、まず傾斜面に地形の起状を考慮し階段上に鋼管パイプでボーリングのステージを組立てた。ボーリングはロータリーオイルフィード型(UD-5)ボーリングマシンを用いφ86mmのオールケーシング穿

孔とした。次に異形鉄筋D32mmを建込みモルタル填充を行うが、モルタルはステージ上でモルタルミキサー(利根ボーリングM&E100)により

練り上げ小型モルタルポンプ(MM35スクイズ式)で填充し、縫地ボルトを形成した。崩積土が非常にルーズなためモルタルポンプで圧送可能で、しかもモルタルの浸透が縫地ボルト径20mm程度に修まるようなモルタル配合を試験により決定した。

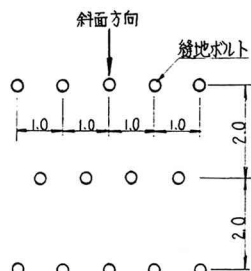


図4-6 縫地ボルト配置図

C:S=1:0.5 %=50% 1m³当り

セメント	砂	水
988 kg	494 kg	494 kg

表5-1 縫地ボルトモルタル配合

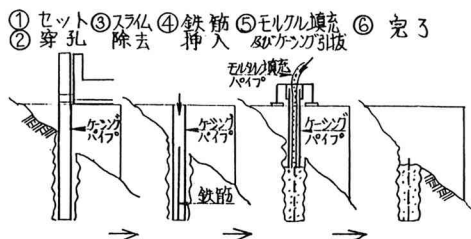


図5-1 縫地ボルト施工順序図



写真-1 トンネル出口斜面での縫地ボルト施工のための鋼管パイプステージ

縫地ボルト総本数88本、総ボルト長264mを崩積土の層厚により1本当たり2.5m～4.0mとし、配置は設計の項によりトンネル山側に斜面方向2m、斜面直角方向1mの千鳥、トンネル断面内に入るボルト及びトンネル右側については2m×2mの千鳥配置とした。またトンネル右側についてはエアームタルの沈下を考慮し1m×1mの千鳥とした。

エアームタルの施工範囲に位置するボルトにはプレートをつけモルタルに定着させ、掘削時の地山に対する吊り下げ効果を期待するものとした。

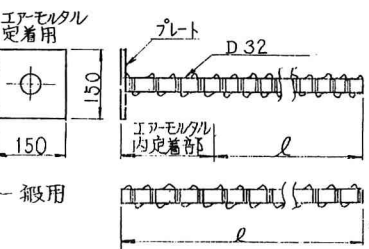


図5-2 縫地ボルト用鉄筋

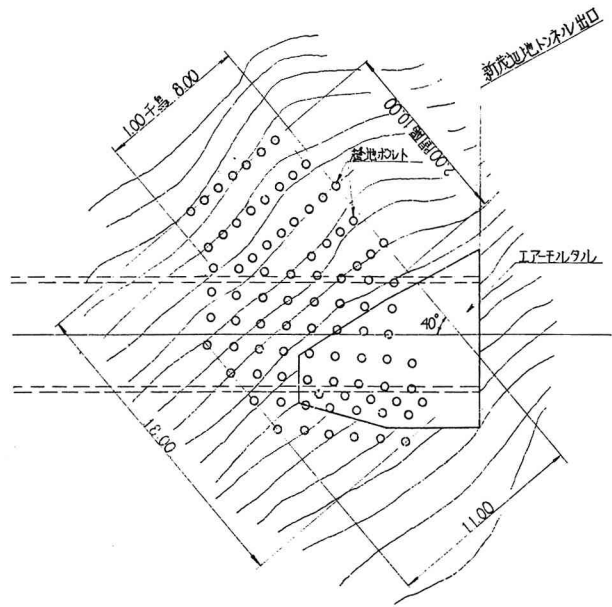


図5-3 縫地ボルト施工配置図

縫地ボルト施工後、崩積土上にエアームタルを施工した。エアームタルは地形上広場に制約を受けたためモルタルはレディー・ミクストモルタルを使用し、現場では発泡液との混合を行い2インチの耐圧フレキシブルホースにて圧送した。平均打込高さを1.2m程度とし6回に分割し打設した。

縫地ボルトの定着部は密接金網(6%×150mm×150mm)で補強を行った。エアームタルの配合及び仕様については表5-2である。



写真-2 縫地ボルト形成状況

このトンネルはNATMで施工されておりトンネル掘削断面積は36m²である。掘削方法はショートベンチであり上下半ともロードハンダーによる機械掘削である。

トンネル出口部の標準設計を図5-4に示す。土被りが浅く崩積土が厚く存在することから、ロックボルト径25%、 $l=3$ mを1断面8本、但し掘削断面がエアームタル内に入る部分はロックボルトは打設しないこととした。また吹付コンクリート厚15cm、鋼製支保工100Hを1

C:S=1:3 % = 93% 1m³当り

セメント	砂	水	発泡液
200kg	600kg	186ℓ	1.3ℓ
圧縮強度	空気量	フロー値	生比重
σ _{ck} 15kgf/cm ²	49±3%	180±20mm	1.02±0.03

表5-2 エアームタルの配合及び仕様

m間隔、覆工コンクリート巻厚は45cmで鉄筋を補強した設計とした。

坑口掘削進行に伴って崩積土が掘削断面に現われた状況についてはやはり非常にルーズな状態であり、少量ではあるが崩落が見られたため崩落防止の処置として斜めロックボルトを施工したものの大きながみ押しの出しもなくトンネル断面に対しての変状も見られなかった。

掘削中は地表の沈下測定、崩積土の地滑り計測を行ったが異状は見られなかった。縫地ボルトの形成状態については写真でも見られるようにボルトとして十分形成されており、十分に地滑り抑止及び崩落防止に役立ったと思われる。

6 あとがき

今回縫地ボルトとエアームタルを組合せた地滑り抑止工法を初めて採用したが、結果は斜面の変位は全く見られず安全に且つ経済的にトンネルを完成させることができた。

特に縫地ボルトについては理論的に未解決な点も多く多少の不安も残ってはいるが初期の目的を十分達成できたものと確信している。当事例のような条件下の施工というものは決して稀なことではなくこれから多々出てくることであろう。そのためにもさらに今後の研究と理論的設計法の確立が望まれることであるが、ある意味で仮設的、短期的補助工法として考えれば現在の考え方で通用するものと思われる。

最後にこの計画を立てるに当って資料を提供いただいた方々、厳しい条件下で無事工事を完成させた施工者関係諸氏にはこの場を借りて謝意を表する次第である。

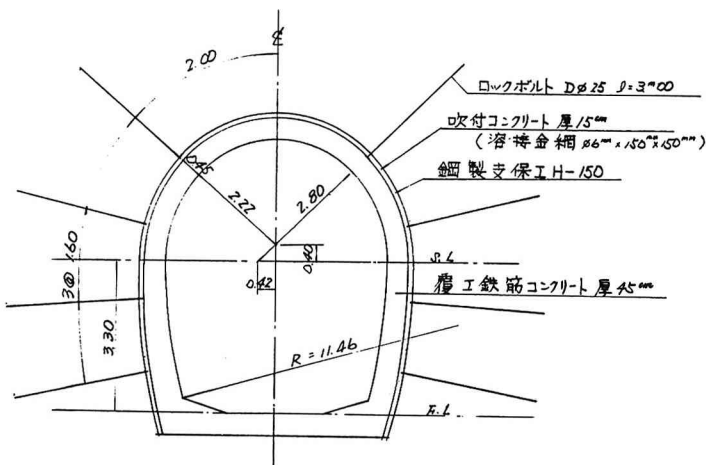


図5-4 トンネル標準設計断面

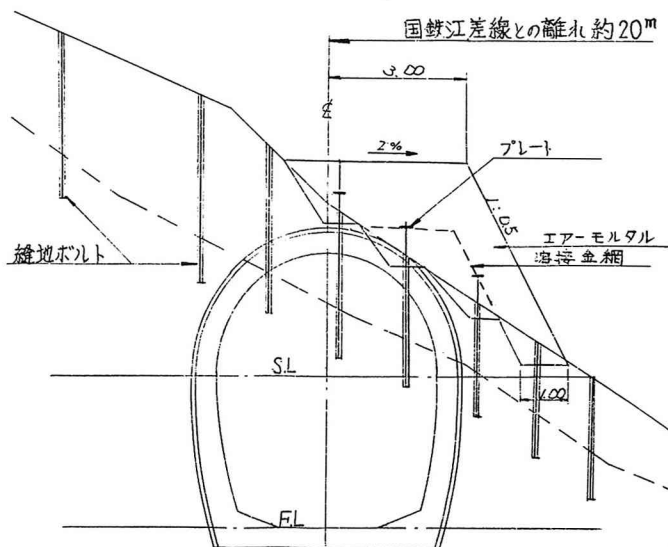


図5-5 縫地ボルト及びエアームタル施工断面図

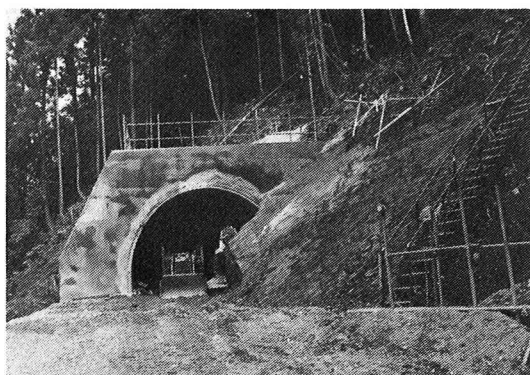


写真-3 トンネル上半完了