

III-280 土被りの浅い軟弱地山トンネルにおける切羽安定化のための薬液注入の効果

東京都西多摩建設事務所○熊谷光雄・増田幸三
フジタ工業（株） 川畑則雄・本川祥一
福島伸二・香川和夫

1. まえがき

本報告で対象とするトンネルは土被りの浅い、砂礫を含む軟弱な埋戻し土よりなる地山中に掘削したもので、地表には供用中の道路がある。ここではまずこのトンネルの切羽の安定性の検討から何らかの地山改良が必要となったので切羽安定化のために薬液注入工法を施工したこと、そして薬液注入の効果をブロックサンプリングした供試体の大型三軸圧縮試験により改良地山の強度を調べることににより直接的に確認した事例を紹介する。

2. 切羽の安定性の検討

トンネル（横断面の概略寸法を図-1に示す）は既設の権田トンネルの拡幅工事として全長45.0m（このうち明り区間12.7m、トンネル区間32.3m）の新権田トンネルで、地表には供用中の道路（秋川街道）がある。地山は土被りが約4.5mと浅い砂礫を含む軟弱な埋戻し土よりなっている。土被りが浅いのでオープンカット案あるいは橋梁案が考慮されたが、既設トンネル内と地表の交通を維持する必要があること、また経済性と工期などから比較検討して本工法を選択した。トンネル掘削は側壁導坑先進型上部半断面リングカット工法（掘削高さD=3.3m）で、地山の崩落防止のために吹付けコンクリートを施工している。また地山が軟弱なことから、補助工法として地表面沈下防止のためのパイプルーフ工法（パイプ径φ114.3mm、n=49本）を上部半断面（120°）に施工している。地山の強度・変形特性は大型三軸圧縮排水試験（供試寸法が直径30cm、高さ60cm）により調べたところ $c=0.1\text{kgf/cm}^2$ 、 $\phi=16^\circ$ であった。供試体は側壁導坑から攪乱状態で採取してきた試料（粒度曲線を図-2に示す）をその含水状態（含水比 $w=13.5\%$ ）のまま供試体作製モールド内で原位置密度（湿潤密度 $\gamma_t=1.91\text{t/m}^3$ ）になるようにパイプレータにより締め固めて作製した。トンネル掘削時の切羽の安定性を評価するために、図-3に示すように切羽下部を通る水平面から角度 $\alpha=(45+\phi/2)$ をなす直線すべり面を考え、三角形部分（Oab）に作用する力のつりあいを強度安全率 $F_s(=\tau_t/\tau)$ を導入して安定計算を行なった。

$F_s = \{c \cdot D + (W + Q_T) \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi\} / (W + Q_T) \sin^2 \alpha$ ここで
 $W = \gamma \cdot DB/2$ ($B = D(1/\tan \alpha - 1/\tan \beta)$)、 $Q_T = (\gamma - 2c/B) \cdot B^2 \cdot \{1 - \exp(-2K \cdot H \tan \phi/B)\} / 2K \cdot \tan \phi$ (Terzaghi の式) である。
求めた内部摩擦角 ϕ の値を用いて上式により計算した結果を図-4に示してある。図中には上部半断面掘削（掘削高さD=3.3m）と全断面掘削（掘削高さD=6.3m）について、パイプルーフ工法の効果を考慮するためにパイプルーフがその上部の

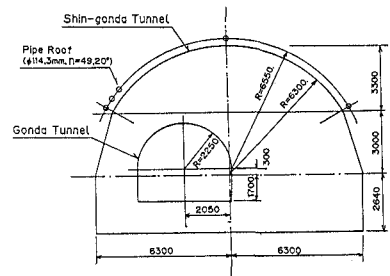


図-1 トンネル横断面概略寸法

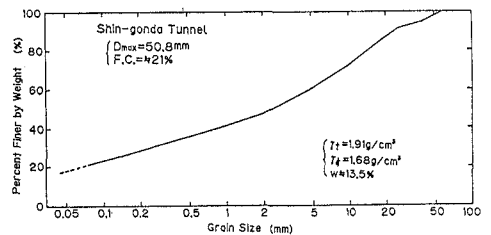


図-2 地山の粒度曲線

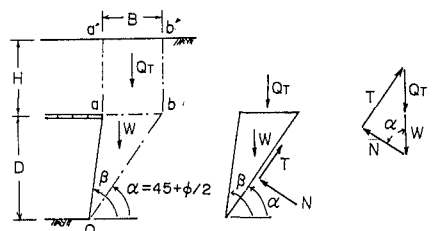


図-3 切羽の安定計算（直線すべり面）

地山部分の土被り荷重 Q_T をすべて支え3角形部分(0ab)に作用しない場合($Q_T=0$)と、地山部の土被り荷重を支えず3角形部分に作用する場合($Q_T \neq 0$)のそれぞれの結果を示してある。切羽の安定に必要な粘着力は安全率 $F_s=1.0 \sim 1.2$ に相当する値として求めると $c \geq 0.17 \text{ kgf/cm}^2$ （掘削高さ $D=3.3\text{m}$ ）、 $c \geq 0.27 \text{ kgf/cm}^2$ （掘削高さ $D=6.3\text{m}$ ）である。これより土被り荷重が作用する場合の方が危険側にあるが、パイプルーフにより土被り荷重がすべて支えられ下方に伝達しない場合でもこの地山強度では切羽は安定せず崩壊の危険性が考えられる。パイプルーフが地表面沈下を防止するように効果的に機能するためにはその下部の切羽は安定していなければならないから、何らかの対策工法により切羽が安定するように地山を改良する必要がある。

3. 薬液注入工法による切羽の安定化

切羽安定化のために切羽面に施工した薬液注入工法は表-1に示すように瞬結用半懸濁型水ガラス系のエヌタイト-SG1溶液とケイ酸ナトリウム（3号水ガラス）溶液の混合による注入材を使用した。施工は径40.5mmのボーリングロッドにより水平方向に計画深度まで水で掘削し、掘削完了後注入材に切り替え奥から手前へのステップアップ方式によりピッチ0.25mで行なった。注入範囲は上部半断面部に注入ポイント間隔1.0mを標準とした。また注入量は注入率35%とした。薬液が計画通り注入されているかどうかの判定は掘削した切羽面にフェノールフタレイン($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$)液の塗布と目視により確認した。またここでは地山改良効果を直接的に調べるために薬液注入をした切羽部の地山から径30cm、高さ60cmの供試体をブロックサンプリングして大型三軸圧縮排水試験を実施した。試験から得られたMohrの応力円を図-5に示してある。このMohrの応力円を包絡線から薬液注入をした地山の粘着力と内部摩擦角を求めるとそれぞれ $c_g=0.64 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\phi_g=19.3^\circ$ となる。また薬液注入をした供試体の湿潤密度はやや増加し $(\gamma_s)_g=2.03 \text{ t/m}^3$ であった。薬液を注入したのは掘削高さ($D=3.3\text{m}$)の領域であるのでこの部分は上述した強度パラメータ(c_g 、 ϕ_g)を、土被り部は未改良のままの強度パラメータ(c 、 ϕ)をそれぞれ用いて安定計算をすると以下ようになる（掘削高さ $D=3.3\text{m}$ ）。 $F_s=2.41$ ($Q_T \neq 0$)、 $F_s=4.29$ ($Q_T=0$)。これより薬液注入による地山改良により土被り荷重が作用する場合でも安定性が確保されたことがわかる。

4. あとがき

本報告では土被りの浅い、砂礫を含む軟弱な埋戻し土からなる地山内に掘削したトンネルの切羽の安定性の検討を2次元的な直線すべり面法により行なった。またこの結果から切羽安定化のために何らかの地山改良が必要になったので薬液注入工法を施工し、この効果を大型三軸圧縮試験により調べたところ十分な安定性が確認できた。

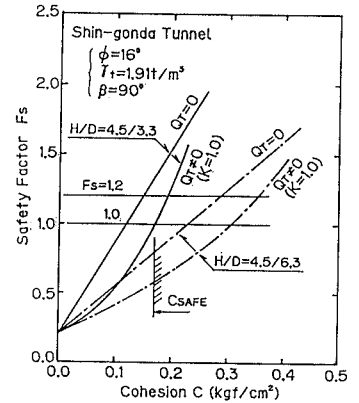


図-4 安定計算結果

A液 (200リットル)	B液 (200リットル)
ケイ酸ナトリウム (3号水ガラス) 100リットル	エヌタイト-SG1 硬化剤 A 40kg
水 100リットル	硬化剤 B 20kg
	安定剤 0.5kg
	水 173リットル

表-1 使用した注入材

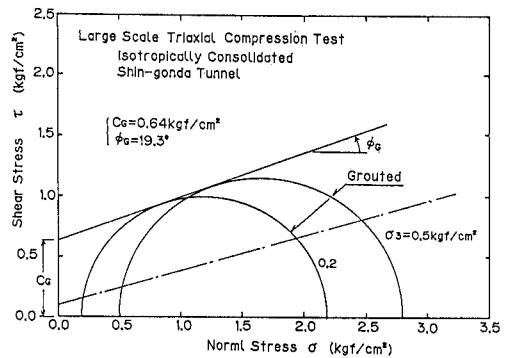


図-5 Mohrの応力円（薬液注入供試体）