

軟弱地山における大断面トンネルの ADECO-RS 工法的施工について

野間 達也 *1 山口 耕二 *2

米澤 和人 *2

概 要

イタリアで開発された ADECO-RS 工法は、軟弱な地山のトンネル掘削に適用される工法であり、①長尺鋼管先受けや鏡ボルト等を使用して積極的に切羽前方地山を改良する、②軟弱な地山でも基本的に全断面掘削を採用し、早期閉合によりトンネルの安定性を確保する、③切羽前方の挙動を計測により把握し設計に反映させる、といった点に特長がある。

今回は掘削断面が上下半で 165m²、インバートを含めると 190m² という大断面トンネルであり、かつ掘削対象地山の圧縮強度が 2MPa 程度以下という軟弱な地山に対して部分的に ADECO-RS 工法的手法を導入した結果について報告する。

Use of the "ADECO-RS Method" for large cross-section tunnels through weak ground

Abstract

The ADECO-RS method, of developed in Italy, is a method of tunneling applied to soft ground. Features of this method are, a. tunnel cores are actively reinforced by forepiling and face bolting, b. full face excavation and an early cross section closure method are adopted, c. displacements of the tunnel core are measured and results are reflected in updated tunnel designs.

In this paper, the introduction of the ADECO-RS method is described for the construction a large section tunnel (excavation area of 165m²) under weak ground conditions (< 2MPa) .

キーワード：切羽前方補強、鏡ボルト、ADECO
-RS 工法

*1 建設本部 土木エンジニアリングセンター

*2 東京支店土木工事部

§1. はじめに

犀川河川トンネルは掘削断面積が上下半で 165m²、インバートを含めると 190m² という大断面トンネルであり、かつ掘削対象地山の圧縮強度が 2MPa 程度以下という軟弱な地山から成る。そのためトンネル掘削時の切羽及び周辺地山の安定対策として、設計段階で長尺切羽補強工(長尺 GFRP 鏡補強工+小口径長尺鋼管先受工)の補助工法が採用されていた。

イタリアで開発された ADECO-RS 工法¹⁾は、軟弱な地山のトンネル掘削に適用される工法であり、①長尺鋼管先受けや鏡ボルト等を使用して積極的に切羽前方地山を改良する、②軟弱な地山でも基本的に全断面掘削を採用し、早期閉合によりトンネルの安定性を確保する、③切羽前方の挙動を計測により把握し設計に反映させる、といった点に特長がある。

現状では ADECO-RS 工法を全面的に日本に導入することは困難であるが、本工事で部分的に ADECO-RS 工法的手法を導入した結果について報告する。

§2. 事業および地質概要

2.1 事業概要

一級河川信濃川水系犀川久米路地域において、昭和 58 年 9 月の台風 10 号による水害を契機に、「犀川恒久治水対策」(通称 3 点セット)が立案され、久米路河川トンネル(第 1 トンネル: 1 点目)と杉山開削(2 点目)が完成している。本工事では、対策の 3 点目である「久米路第 2 河川トンネル+ No.14 開削」のうち、久米路第 2 河川トンネルを施工し、河川のバイパストンネルを構築する。

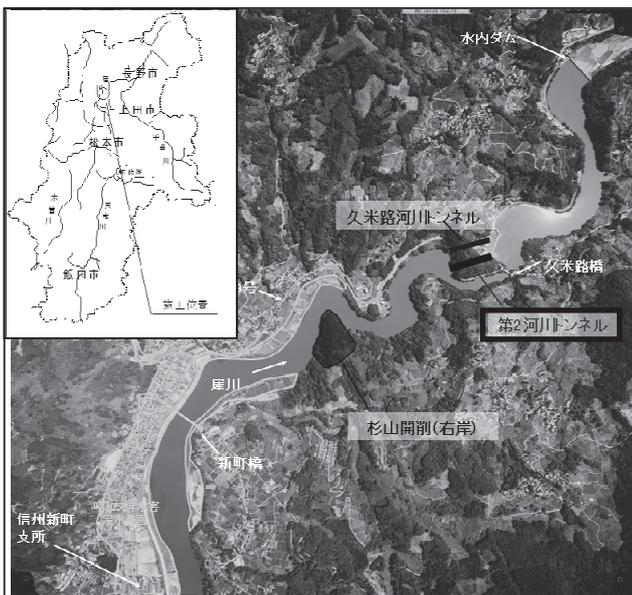


図 1 犀川恒久治水対策概要図

2.2 地質概要

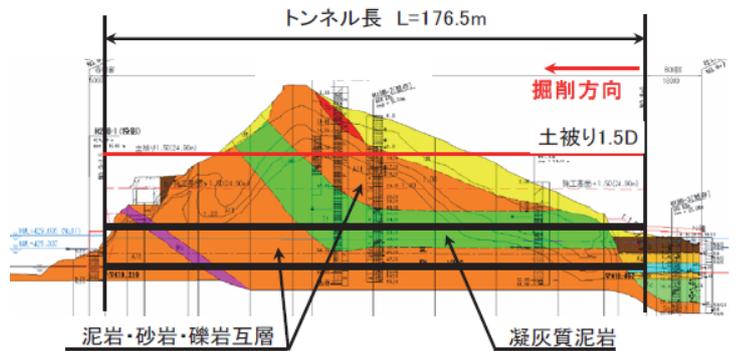


図 2 地質縦断図

図 2 に本トンネルの地質縦断図を示す。図に示すように本トンネルの土被りは 3D 以下の低土被りとなっている。またトンネル構成地質は新第三紀の堆積岩類(いわゆるグリーンタフ系)であり、特に坑口より 108m まではトンネル上半に凝灰質泥岩の出現が予想されていた。この凝灰質泥岩は、地下水の作用により急速に劣化する可能性があり、かつ吸水膨張性に富むことから、トンネル掘削時に構造的な弱部となり得ることが指摘されていた。

§3. ADECO-RS 工法とは

NATM は、基本的に切羽前方の地山の挙動は把握せず、計測及び支保は切羽後方を対象としている。また、軟弱な地山となる D パターンでは上半先進工法としており、C パターン以上でないと全断面掘削工法は採用しない。また最近では軟弱な地山に対して長尺鋼管先受けや長尺鏡ボルトを採用されているが、これらの切羽前方補強はあくまで掘削時の天端や鏡面の安定を目的とした補助工法であり、支保部材としては扱っていない。

これに対して ADECO-RS 工法は以下の点で NATM との相違点がある。

- ① 軟弱な地山に対しては鋼管先受けや鏡ボルトを支保の一部とみなして積極的に前方地山を補強することにより変形を抑制し、結果的に切羽自体も支保部材の一部と見なす。
- ② 切羽前方及び鏡面の押し出し量を計測し、前方補強の妥当性を確認する。
- ③ 切羽前方を補強したことにより全断面掘削を可能とし、これより早期閉合を可能とする。

§4. 切羽前方補強の取り組み

4.1 設計時における切羽前方補強

2.で示したように、坑口から 108m 間はトンネル上半に膨張性を示す凝灰質泥岩の出現が予想されていたため、設計時よりトンネル外周に小口径長尺鋼管先受け(φ76mm、長さ12.5m、ラップ長3.5m)27本、及び長尺 GFRP 鏡ボルト(商品名 FIT、φ76mm、長さ13.5m、ラップ長4.5m)27本を打設する計画となっていた。

しかし、設計を照査したところ、鏡ボルトのラップ長を4.5mとした場合27本では切羽の安定性は保てず、60本程度に増加する必要があること、ラップ長を6m以上確保すれば図3通りの鏡ボルトの配置で安定を確保できることが分かった。このため、FIT を使用する場合には、製品の単位当り長さの関係より、打設長16.5m、ラップ長7.5mで施工することに変更した。代表的な加背割りを図3に示す。

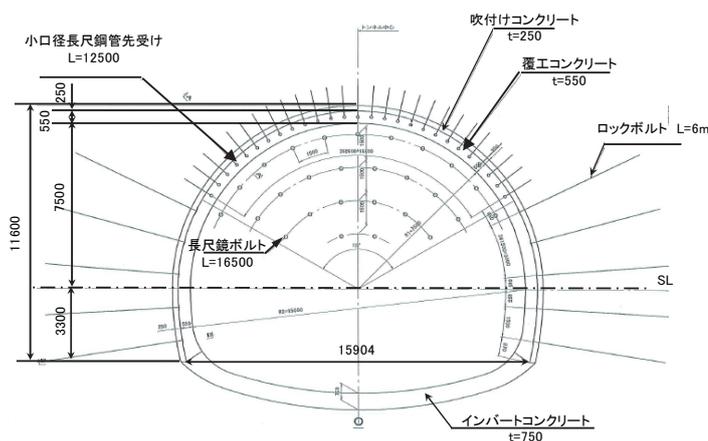


図3 代表的な加背割り

4.2 新規鏡ボルトの試験施工

1) 新規鏡ボルトの概要

現在イタリアでは、図4に示すような Corrugate Pipe(以下CG管)と呼ばれる鏡ボルトの使用が主流となっている。このCG管は、外径60mm・内径40mmのGFRP管であり、外径はネジ状となっているため外周が平滑であるFITと比較してグラウト材との付着強度は高くなる。また、FITとCG管の機械的特性を表1に示すが、圧縮強度、せん断強度ともFITより高く、鏡ボルトとしての機能も向上することが予想される。さらに材料費としての経済性もFITと比較して安価である点に特長がある。

ただし、イタリアでは専用機による挿入方式で長さ18~

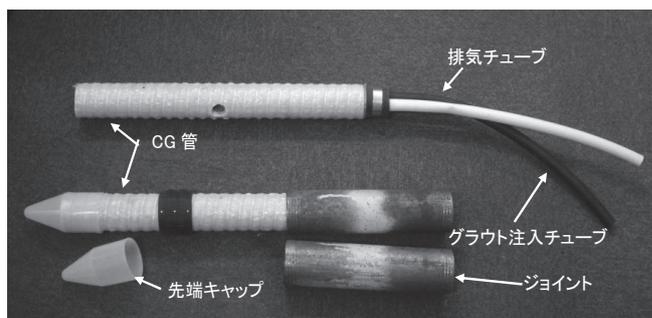


図4 CG管の外形

表1 FITとCG管の機械的特性

	FIT	CG管
圧縮強度(MPa)	460	600
引張強度(MPa)	600	600
せん断強度(MPa)	100	150
弾性係数(MPa)	20,000	30,000



図5 人力によるCG管の挿入状況

24mのCG管による切羽補強が実施されるのに対し、このような専用機を国内で採用することは困難であり、穿孔には国内の汎用ドリルジャンボを使用せざるを得ず、CG管の挿入も人力が主体となる。一方、FITは先端にロストビットと呼ばれる使い捨てのビットを使用し、国内の汎用ドリルジャンボにより自穿孔で施工されるため挿入は比較的容易なのに対し、CG管はドリルジャンボで穿孔した孔壁が自立しない場合人力による挿入は困難となることが予想される。FITとCG管の経済性の違いはこれらが背景となっている一面もある。

CG管にはこのようなリスクを伴うため、予定されていた前方補強区間108mのうち約半数を施工するように準備した。なお、当初はCG管による打設長は10m+ジョイント+8mとして18m、ラップ長を6mと設定した。

2) 試験施工結果

試験施工開始時は、孔壁の自立を確実なものとするため

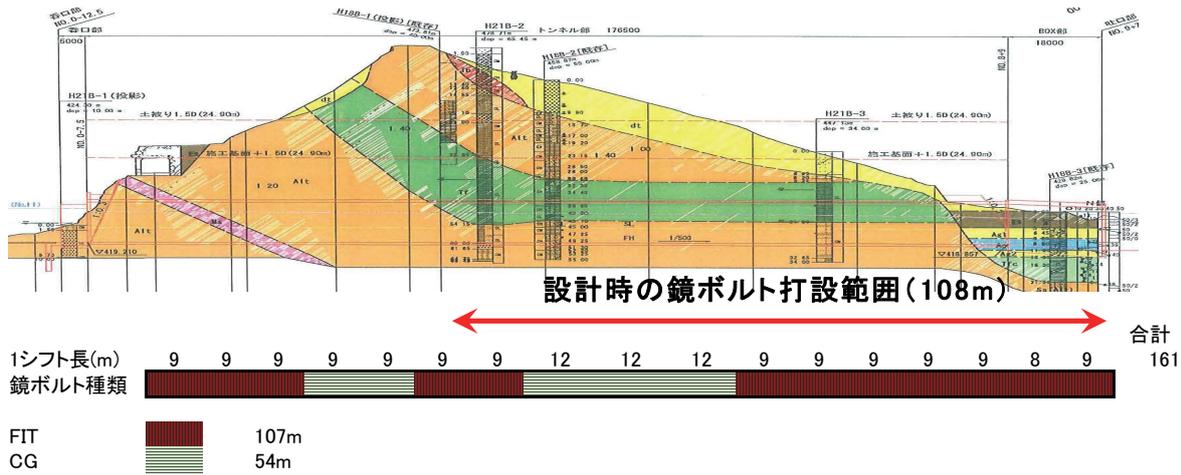


図6 打設した鏡ボルトの全結果

に、通常の削孔水による穿孔のほか、削孔水に少量の安定液分解剤(商品名マーゼル)を混入させたものや泡削孔を準備したが、施工を比較したところ通常の削孔水による穿孔により孔壁は自立する結果となった。また、挿入についても、15~16m程度までは人力のみにより挿入可能であり、残りの部分は作成した治具を介してドリルジャンボ等により挿入することが可能であった。図5に人力による挿入状況を示す。これより、準備したCG管は全て使用することが可能であった。

4.3 切羽前方補強の全結果

設計では坑口より108m進行した段階でトンネル路線の地質は凝灰質泥岩から泥岩・砂岩・礫岩互層へ変化することになっていたが、全線において地層状況の大きな変化は見られず、最終的にはほぼ全線にわたり鏡ボルトにより切羽前方地山を補強する結果となった。用いた鏡ボルトの種類と採用した1シフト長の関係を図6に示す。CG管採用時には打設長18m ラップ長6mとし、掘削長12mで次の鏡ボルトを打設したが、同時施工の長尺鋼管先受けは掘削長9mで次の鋼管の打設となるため、次シフト以降の鏡ボルトと鋼管先受けの打設位置が異なり、施工性の悪化を招いた。このため、後半の2シフトでは打設長18m ラップ長9mとし、長尺鋼管先受けとの同時施工とし良好な結果を得た。

施工した結果のCG管の長所としては①挿入さえ可能であれば、FITと比較して経済性が高い、②削孔に汎用のビットを使用するために安定した掘進速度を得られる、にある。短所としては、①孔荒れした際の対応、②グラウト注入チューブの耐圧製がFITと比較して低い(最大1MPa程度)、③口元コーキングの改善、といった点にある。ただし、②③については後半の施工で注入用ホースを改善する事により、良好な結果を得ることが出来た。

§5. 切羽前方計測の取り組み

5.1 切羽前方変位計測の概要

切羽前方変位計測には、図7に示すスライディングデフォーメータを使用した。

切羽前方変位計測は、図8に示す計測管を切羽中心に事前に埋設し、計測管の周囲を低強度グラウト材(商品名Sパック)で固定する。この計測管には図に示されているように1m間隔に計測用マーカが設置してある。このマーカが切羽の進行に伴う地山の変形に追随するため、スライディングデフォーメータを計測管に挿入し、計測用マーカの距離の変化を計測することにより切羽前方の押し出し量を正確に把握することができる。なお、この計測管埋設時に

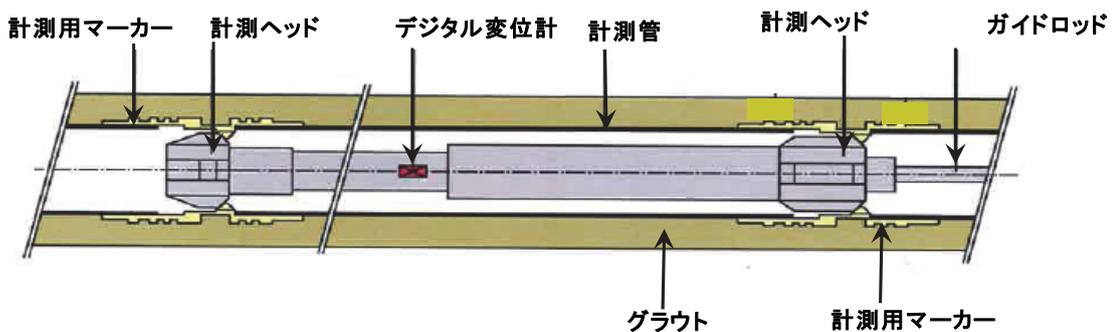


図7 スライディングデフォーメータの概念図



図 8 埋設する計測管

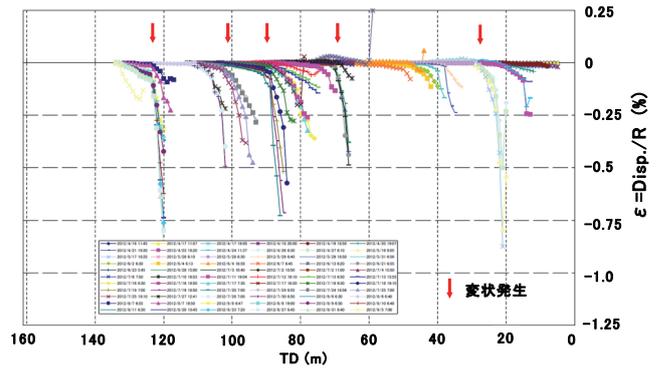


図 10 切羽前方変位計測結果

を計測し管理基準値を設定することは有効な手段となると考えられる。

§6. 早期閉合への取り組み

前述したように本トンネル掘削中には、特に天端沈下に伴うトンネルの変状がしばしば見られた(最大沈下量 136mm)。変状対策として増ロックボルトや上半仮補強リブの設置などの対策により変位速度は低下したものの、収束には至らなかった。このため下半施工時期を早め、上半 65m 時点で下半掘削および H200 のインバートストラット設置後に厚さ 250mm の吹付けコンクリート(σ 28=36N/mm²)打設による吹付けインバート閉合を実施した(図 11)。



図 9 切羽前方変位計測状況

は、切羽前方の地質確認も兼ねるために、φ100mm のビットを使用してロータリーパーカッションワイヤーライン工法を用いて 50m 穿孔し、コアの採取と計測管の埋設を実施した。

5.2 切羽前方変位計測結果

図 10 に前方変位計測結果を示す。トンネル施工時には、前述したように土被りが薄く、軟弱な地山に大断面トンネルを掘削したためにしばしば変状が発生したが、図に示されているように、切羽前方変位の卓越した部分とトンネルの変状は一致している。図より、本トンネルでは切羽前方変位が 0.3%(変位にして 45mm)になると注意レベル、0.5%(変位にして 75mm)になると危険レベルに相当すると考えられる。これより、今後軟弱な地山を掘削する場合には、切羽前方



図 11 吹付けインバートによる早期閉合状況

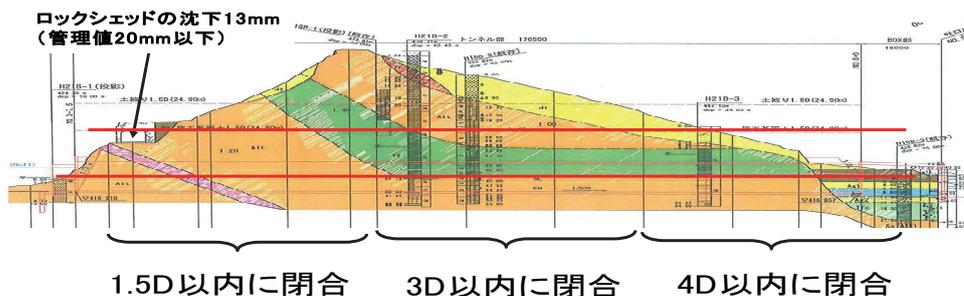


図 12 吹付けインバートによる閉合時期

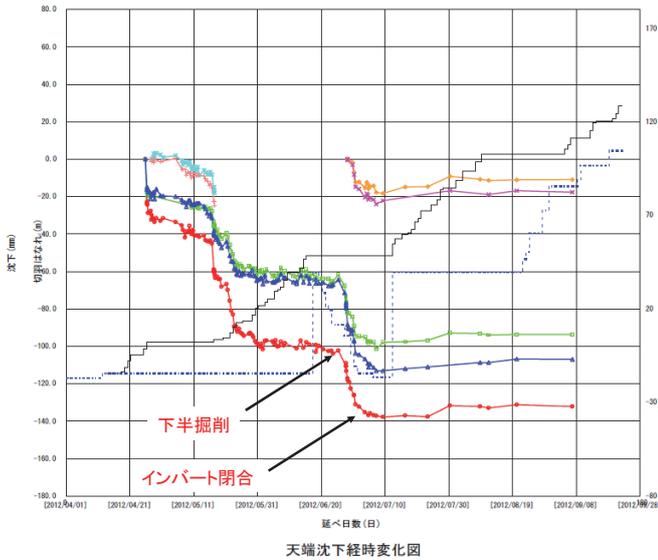


図 13 早期インバート閉合前の天端沈下

これより天端沈下は収束したため、インバート閉合が最も効果的であることが認められた。このため、図 12 に示すように吹付けインバートによる閉合時期を徐々に早くしていき、最終的に上半掘削後 1.5D 以内にインバートを閉合した。図 13 に早期閉合前の天端沈下計測の一例を、図 14 に早期閉合後の天端沈下計測の一例を示す。図に示されているように、早期閉合により沈下量は半減し、その後変位は収束していることが分かる。なお、上半のベンチ長を短くすればさらに早期閉合も可能であるが、本トンネルは断面が大きいことより、施工上 25m 程度のベンチ長は不可欠であった。

このように様々な補強方法を組み合わせることにより、出口側既設ロックシェッド下部の掘削についても、規格値以内(20mm)の沈下量で無事貫通させる事が出来た。

§7. おわりに

軟弱地山における大断面トンネルにおいて、全面的に切羽前方を補強する、可能な限り早期閉合とする、切羽前方の挙動を把握する、という ADECO-RS 工法的施工を実施し、問題点の抽出や改善案を練ることで、良好な結果が得られた。今後の本工法の積極的な適用と、本報告が今後の施工時の一助となれば幸いである。

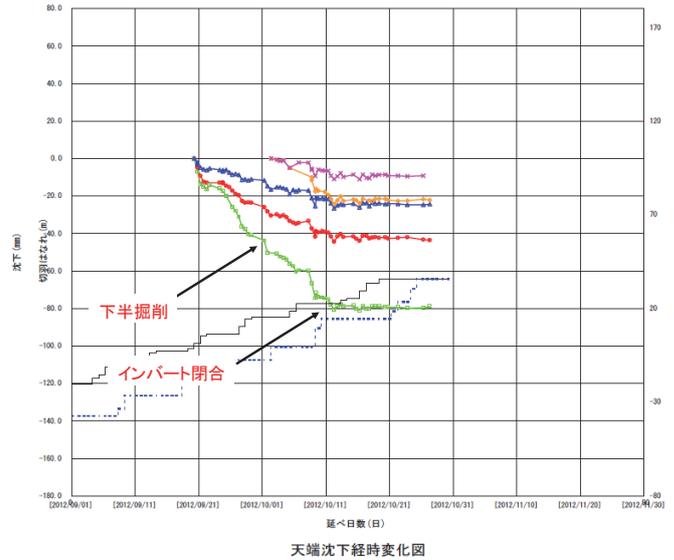


図 14 早期インバート閉合後の天端沈下

参考文献

- 1) Pietro Lunardi : Design and Construction of Tunnels Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS), Springer, 2008.

ひとこと

軟弱な地山の掘削方法としては、ADECO-RS 工法は最適なものと考えられます。今後も地山により積極的に活用する事例が増加するものと思われます。



野間 達也