

D 地山における ADECO-RS 的トンネル掘削

野間達也 *1 浅田浩章 *1
三河内永康 *1 土屋敏郎 *2

概 要

従来のトンネル掘削において、D 区間では掘削工法としてショートベンチカット工法を採用し、切羽の自立が困難な場合できるだけ掘削断面を小さくすることにより切羽を安定させることが主流であった。ここで、イタリアで開発された ADECO-RS 工法は、積極的に切羽前方を鏡ボルトで改良し、切羽前方も壁として支保効果を作用させ、軟弱な地山でも全断面掘削を採用しており、海外における実績は豊富なものの我国では種々の制約により本格的な導入は見送られてきた。

本報告は、ADECO-RS 工法の導入に比較的容易な条件のトンネルにおいて、部分的に ADECO-RS 的施工を試験施工した結果について示す。

Tunnel excavation with advance core reinforcement in D-type ground by using ADECO-RS method

Abstract

In Japan, the excavation of D-type ground is performed using a half face with short-bench method based on NATM. This keeps the tunnel face stable by dividing it into two sections. The ADECO-RS method, developed in Italy, can be used for full-face excavation even in weak ground by improving soil in advance of the core using face reinforcement bolts. Although the ADECO-RS has been applied to many tunnel excavation projects in other countries, it has not yet been applied to Japanese tunnel excavation projects.

In this paper, the results of a pilot project to excavate a part of a tunnel by using ADECO-RS approach in a D-type ground where the ADECO-RS can be easily applied are discussed.

キーワード： ADECO-RS、長尺切羽補強

*1 建設本部土木エンジニアリングセンター

*2 東北支店

§1. はじめに

従来のトンネル掘削において、D 区間では掘削工法としてショートベンチ工法を採用し、切羽の自立が困難な場合できるだけ掘削断面を小さくすることにより切羽を安定させることが主流であった。しかしながら最近では、自立性の劣る切羽でも鏡ロックボルトや鏡吹付けを併用することにより断面を大きくすることが可能となり、マイクロベンチ等による D 区間の施工により断面の早期併合が可能となってきた。

ここで、イタリアで開発された ADECO-RS 工法は、積極的に切羽前方を鏡ボルトで改良し、切羽前方も壁として支保効果を作用させ、軟弱な地山でも全断面掘削を採用している¹⁾。さらに、今後は切羽を安定化させるためには切羽の形状を直立や核残しのような凸型の切羽ではなく、凹型となる曲面切羽の採用を推奨している²⁾。

本報では、ADECO-RS 工法を意識して、D 地山においてロックボルトを打設しないパターンを対象とし、鏡ボルトにより前方地山を改良した後、試験的に全断面掘削を採用した。この中でも、直面切羽と曲面切羽で施工した場合の施工性・計測結果の比較、および鏡ボルトで補強しなかった区間との計測結果の比較について示す。

さらに、D 地山を全断面掘削した場合の施工性や、サイクルタイムについても述べる。

§2. 「ADECO-RS 工法的施工」とは

ADECO-RS 工法とは、イタリアで開発された工法であり、我国の標準工法である NATM との比較を以下に示す。

NATM の特徴は、前方地山の挙動は計測せず掘削後の挙動を A・B 計測により把握する、支保としてはロックボルト・吹付けコンクリート・鋼製支保工を採用する、対象地山が軟弱または崩壊しやすい場合、ベンチカット工法を採用するなどの点にある。

これに対して ADECO-RS 工法は、掘削後の挙動とともに前方地山の押し出し量を計測により把握し、この結果を鏡ボルトの打設本数に反映すること、切羽前方を補強し切羽にも支保効果を期待すること、支保部材としてはこの切羽および吹付けコンクリート、鋼製支保工を使用しロックボルトはほとんど用いないこと、どのような地山でも全断面掘削を基本とし、掘削後可能な限り早期にインバートを打設すること、などが挙げられる。

このうち、我国の導入における最大の課題となる点は、NATM を標準設計としているためロックボルトはほとんどの場合打設する必要があり、これを省略した施工は困難

となる点などが考えられる。

ここで、今回取り組んだトンネルには、ウォータータイトとする区間があり、この部分についてはロックボルトを打設しない設計となっており、さらに技術提案により切羽に鏡ボルトを打設する計画としたため、ADECO-RS 工法を比較的容易に導入できる条件となった。ただし、切羽前方の押し出し量を事前に計測して鏡ボルトの打設本数に反映させるまでは至らず、また予想よりも地山が良好であったためインバートの早期併合も実施しなかったため、完全な ADECO-RS 工法の導入とはいえず、「ADECO-RS 工法的施工」の報告となる。なお、ADECO-RS 工法でも曲面切羽の採用を基本としている。

§3. 地質および支保パターン

対象としたトンネルは圏央道笠森トンネルその 2 工事であり、図 1 に示すようにトンネル延長 L=620m のうち到達側 74m はウォータータイト(WT)区間となっている。本工区の地質は第四紀上総層群に属する固結度の低い笠森砂質泥岩層(Kms 層)を主体としているが、トンネル断面より上側(本工区では 0.2~1.0D)に透水性の高い万田野砂礫層(Mdl 層)が存在しており、トンネル中央に進むにつれて切羽面まで出現する。この笠森砂質泥岩層と万田野砂礫層地山の地山物性値を表 1 に示す。

本工区では大きく 4 つ(DIII、D I、D I F、W-D I F)の支保パターンに分類されるが、ここでは本工事特有の D I F と W-D I F について示す(図 2)。D I F はトンネル上部から砂層までの離隔が少なくなる地点から設定されている支保パターンである。肩~天端部のロックボルトを廃し、GFRP による注入式長尺先受け工(L=13.65m×27 本×@8.0m)と水抜きボーリングを併用した補助工法により、切羽前方の緩み抑制を行なう計画となっている。W-D I F は WT 区間に設定されている支保パターンである。完成後、トンネル内に地下水を取り入れないために、ロックボルトは打設されず、インバート部を含めて全周防水シートを施す構造としている。補助工法として、GFRP による注入式長尺先受け工と水抜きボーリングの他、注入式長尺鏡ボルト(φ 76mm 溝付き鋼管タイプ、L=13.65m×11 本×@8.0m)を追加した。

D I F 区間はベンチ長を 3~5m とするマイクロベンチにより施工したが、切羽は安定し天端沈下等の変位も 10mm 以下であり、さらに W-D I F 区間は前述の通り鏡ボルトにより切羽前方の安定性が担保されるため、W-D I F 区間は部分的に全断面掘削とする試験施工とした。さらに、直面切羽と曲面切羽の効果の差異を検証するために、全断面掘削の試験区間を両者で施工して比較を行った。本報における

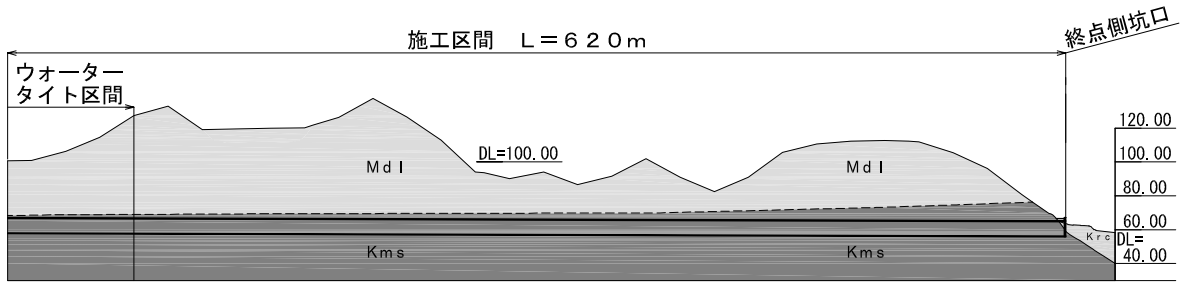


図1 笠森トンネルの地質縦断面図

表1 掘削対象地山の物性値

	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	一軸圧縮強度 S_c (MPa)	粘着力 c (MPa)	内部摩擦角 ϕ (degree)	変形係数 E (MPa)	ポアソン比
砂質泥岩層(Kms)	19	2.0	0.7	20	260	0.3
砂礫層(MdI)	19	-	0.025	40	50	0.35

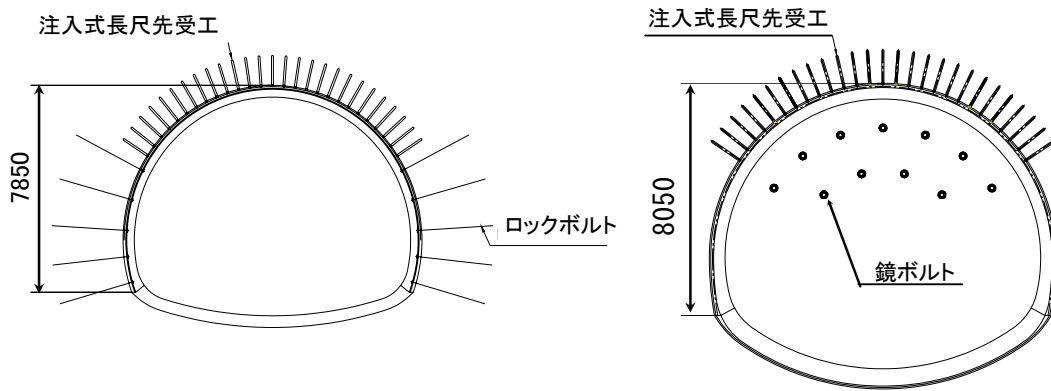


図2 対象断面の加背割り

W-DIF 区間の計測結果等は、この試験施工した全断面掘削の区間を示している。なお、対象区間の土被りは 30m 程度である。

§4. 計測方法・計測結果および考察

ここでは、通常の A・B 計測の他に、曲面・直面前切羽と切羽前方補強との関係を定量的に把握するために、以下に示す計測を実施し結果を検証した。

4.1 試験施工範囲と計測機器の配置

試験施工は DIF~W-DIF の 56m 間で CASE.1~3 に区間割りして行い、各区間に切羽前方変位計・長尺鏡補強工ひずみ計・長尺先受工ひずみ計を設置した(図 3)。ここで、前述したように ADECO-RS 工法では掘削前に切羽の押し出し量を計測し、鏡ボルトの打設量を定量的に決定するのであるが、今回採用した切羽前方変位計は計測器先端の固定点にデータロガーを埋設し、掘削終了後データを回収するタイプのため、本来の ADECO-RS 工法とは異なる。

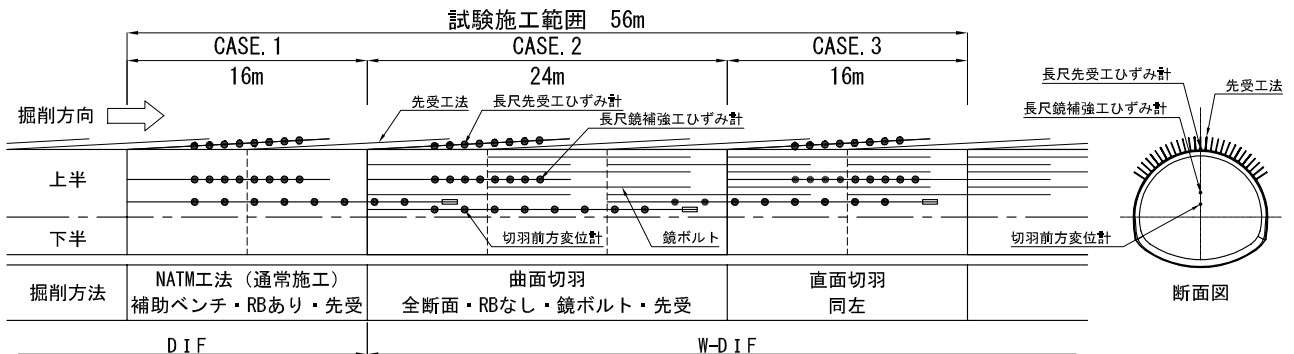


図3 試験施工範囲と計測項目

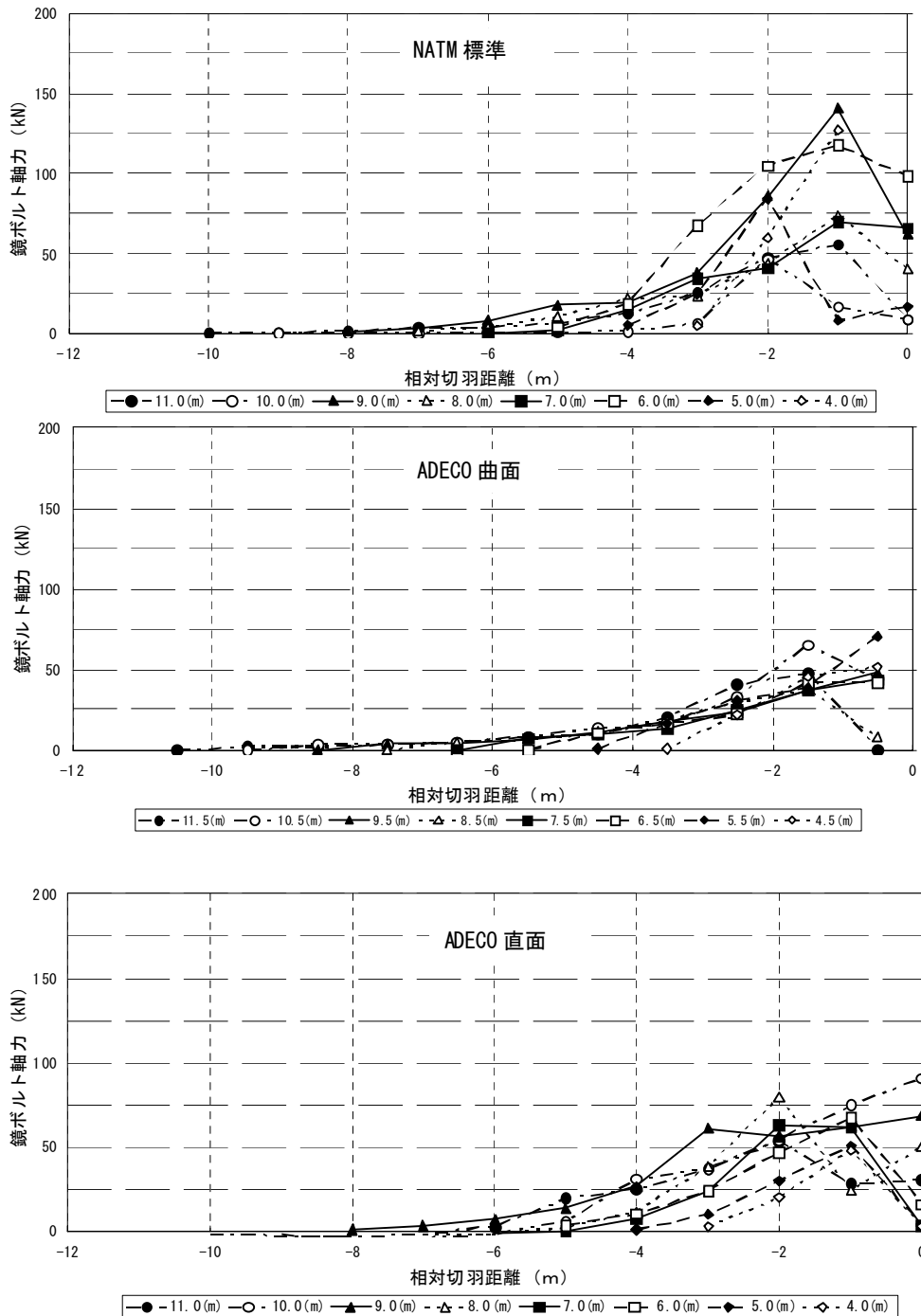


図 4 鏡ボルト軸力測定結果

4.2 鏡ボルト軸力測定結果

図 4 に鏡ボルト軸力測定結果を示す。図に示されるように、軸力値、軸力発現深度(≒ゆるみ深さ)ともに NATM 標準 > ADECO 直面 > ADECO 曲面となっている。ただし、NATM 標準では鏡ボルトの打設はなく鏡ボルトの効果は測定に使用した中央 1 本であるのに対し、WT 区間では 11 本の鏡ボルトを打設することより応力を分担しているため、単純に相互比較することはできないものの、鏡ボルトによる効果は相対的に発揮されていると考えられる。

軸力が発現を始める深度はほぼ切羽前方 5~4m であり、3~2m で軸力のピークを迎える。切羽直近 1~0m の深度ではボルト定着長がなくなるとともに変位を伴って切羽側へ応力開放され軸力は減少する。この傾向は前述の切羽前方変位データとほぼ一致している。

ADECO 曲面切羽と直面切羽を比較すると、直面切羽のほうが軸力値、発現深度ともに若干大きい。このことは、切羽形状の違いによる前方のゆるみ抑制に対しては直面切羽より曲面切羽のほうに優位性があることを示唆している。

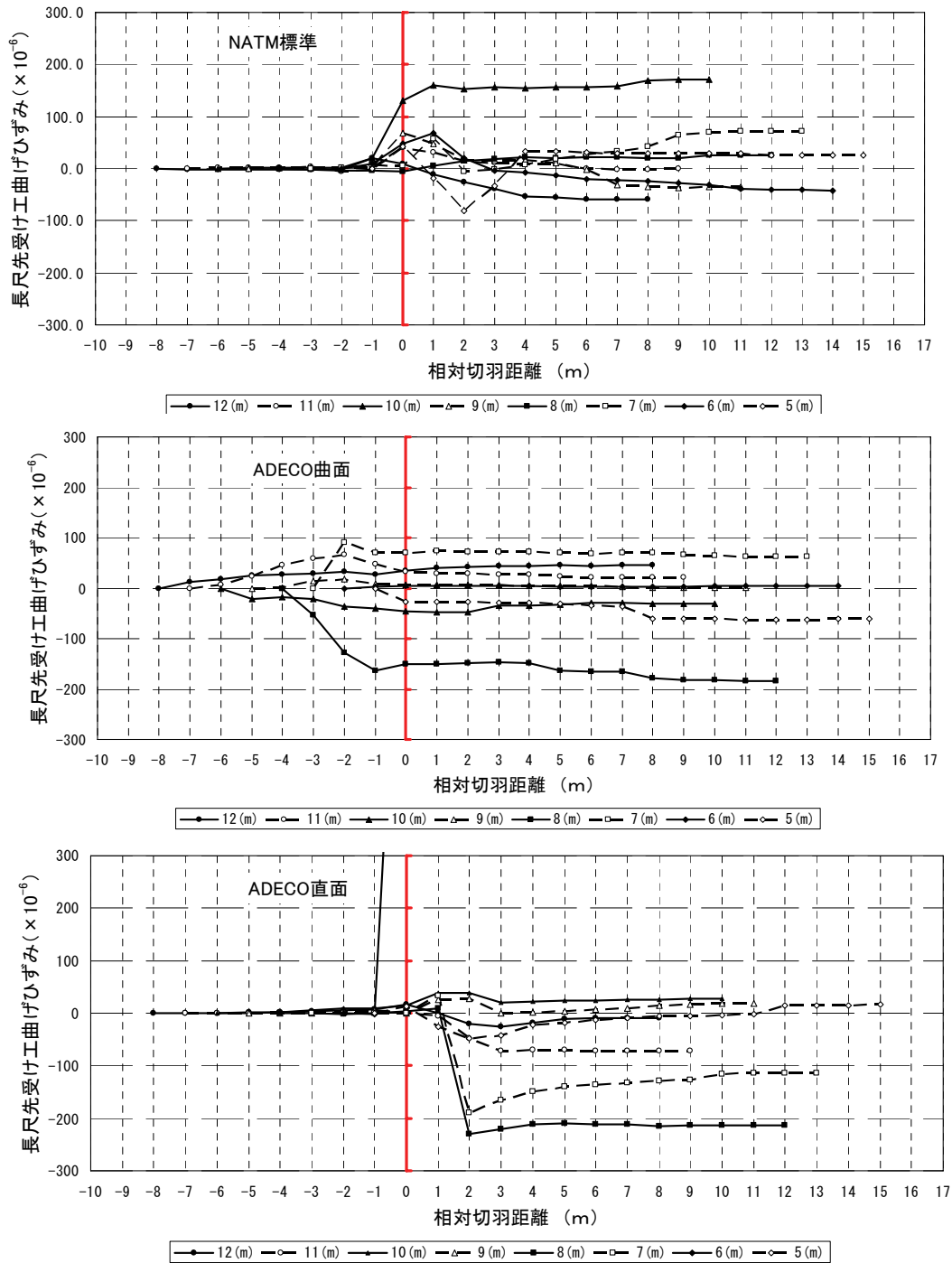


図5 先受け工ひずみ測定結果

4.3 先受け工ひずみ測定結果

図5に先受け工ひずみ測定結果を示す。図に示されているように、切羽前方で生じるひずみの発生深度に明確な差異が認められる。先受け工に曲げひずみが作用する深度は ADECO 曲面>NATM 標準>ADECO 直面であり、ADECO 直面では鏡ボルトによる切羽前方コアの改良により、鏡の押し出し変位に加えて切羽前方で生じる先行(鉛直)変位も効果的に抑制していることが確認できる。一方 ADECO 曲面切羽では鏡ボルトの効果は同様と考えられるが、支保

工位置より大きく切羽前方を掘削しているため、この時点で上部にゆるみが発生し先受け工に曲げひずみが生じているものと推察できる。

すなわち、ADECO 曲面切羽では、切羽の前方の変位は抑制するが切羽の周囲は穏やかに応力を緩和させているのに対し、直面切羽では、掘削により一度に応力を開放させるため、隅角部などに応力を集中させる可能性があると考えられる。

4.4 計測結果のまとめ

- 1) 曲面切羽は、直面前切羽と比較すると切羽前方の緩みを拘束している可能性が高い。
- 2) 切羽周辺の挙動を見ると、曲面切羽は直面前切羽と比較すると応力を緩和させている可能性が高い。
- 3) 羽前方変位結果については、本報では測定結果を割愛するが、変位量は NATM がわずかに大きい傾向が認められるため、ADECO では曲面、直面ともに鏡ボルトの変位抑制効果が発揮できているものと推察できる。



写真 1 曲面切羽形成状況

§5. 施工状況

トンネル掘削には油圧式切削機(ツインヘッド)を主体とし、部分的に大型ブレーカも併用した。

曲面切羽の曲率については、欧州におけるこれまでの実績をふまえ最大凹部を約 0.15D となる 1.5m とし、トンネル中心より円滑な曲面を形成した。切羽整形後の状況を写真 1 に示す。

掘削時には油圧式切削機の使用により作業員が切羽内のオーバーハングとなる部分に立ち入る必要が無く、掘削地山も Kms 層のみであったため自立していたこと、また鏡ボルトが打設されており掘削後直ちに鏡吹付けを実施したこと、などにより掘削時の安全性に特に問題は認められなかった。これより、今回の様な地山条件では、「ADECO-RS 工法的施工」は十分可能であり、軟弱地山に対しても全断面掘削が可能となる本工法の採用により大型機械の導入などによる有意性が明らかとなった。

図 6 に今回施工したサイクルタイムの一例を示す。

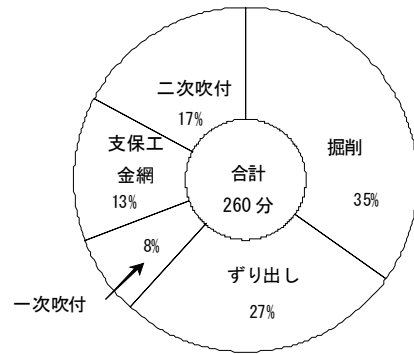


図 6 サイクルタイムの一例

参考文献

- 1) Pietro Lunardi : Design and Construction of Tunnels Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS), Springer, 2008.
- 2) 今田徹: 変化するトンネル技術 NATM後の動向, JIC Eリポート, 第 14 号, pp.74~79, 2008.

§6. おわりに

設計より ADECO-RS 工法に取り組み易いトンネルに対して「ADECO-RS」的施工を実施し、施工性について確認した。また、曲面切羽と直面前切羽の差異についての比較も行い、曲面切羽の有効性について示唆が得られる結果となった。

ただし、今回の掘削対象地山は切羽の自立性が高く、さらに軟弱な地山における ADECO-RS 工法の施工法の確認までは至らなかった。ADECO-RS 工法の真価はこのような地山で発揮されるため、今後何らかの方法でこのような地山に対する適用性を確認したいと考えている。

謝辞

曲面切羽形成は Rocksoil 社の Mr. Claudio DE GIUDICI の指導によるものであり、記して謝意を表します。

ひとこと

ADECO-RS 工法を国内にそのまま導入することはまだ難しいが、部分的にでも技術移転していければと考えています。



野間 達也