

切羽前方を補強したD地山における ADECO-RS的施工

野間 達也¹・土屋 敏郎²・三河内 永康¹

Claudio DE GIUDICI³・Giovanna CASSANI³

¹正会員 株式会社フジタ 建設本部土木エンジニアリングセンタートンネルシールド部
(〒151-8570 東京都渋谷区千駄ヶ谷4-25-2)

E-mail:tnoma@fujita.co.jp

²株式会社フジタ 東北支店土木工事部 (〒980-0803 仙台市青葉区国分町2-14-18)

³ Rocksoil S. p. A. (Piazza San Marco, 1 - 20121 MILANO (ITALY))

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に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。

Key Words : ADECO-RS, concave-face, face bolting

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。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¹⁾。

ここでは、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この中で直面前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

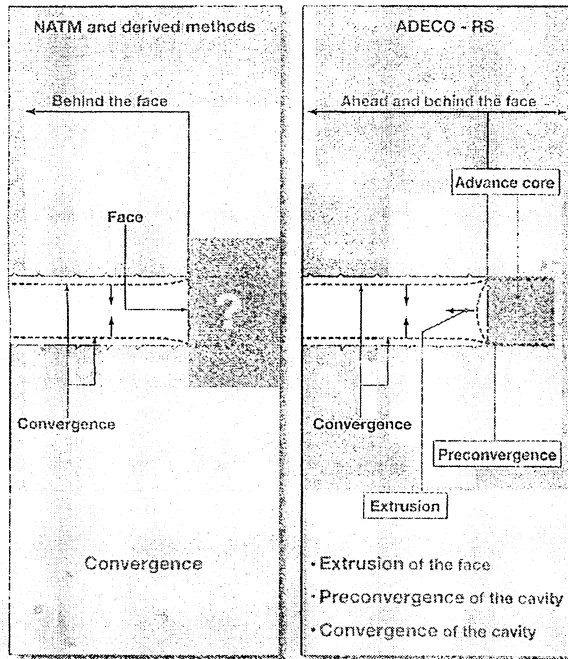
った区間との計測結果の比較について示す。

さらに、この条件における三次元弾性有限要素解析も実施し、測定結果を検証した。

2. 「ADECO-RS工法的施工」とは

ADECO-RS工法とは、筆者らの一部がイタリアにおいて開発した工法であり、NATMとの比較を図-1に示す²⁾。図に示されているように、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

Analysis of the deformation response of the ground



Control of the deformation response of the ground

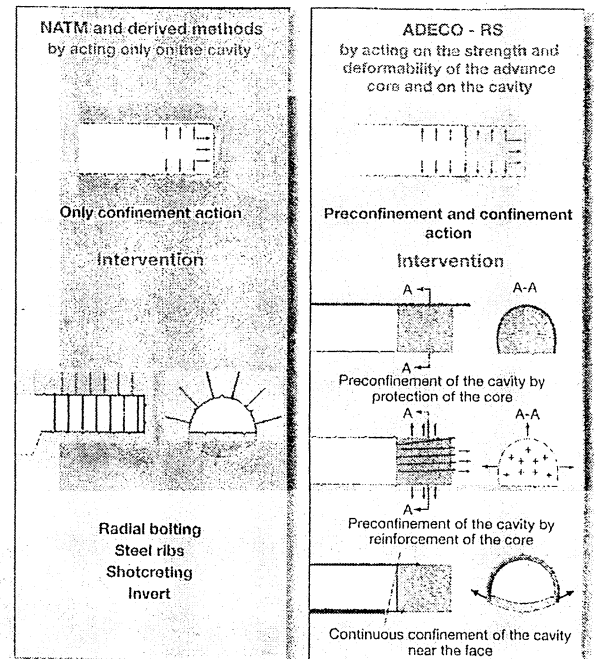


図-1 NATMとADECO-RSの違い²⁾

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
設する必要がある、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-2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 (MdI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, DI, DIF, W-DIF) の支保
パターンに分類されるが、ここでは本工事特有のDIFと
W-DIFについて示す (図-3)。DIF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

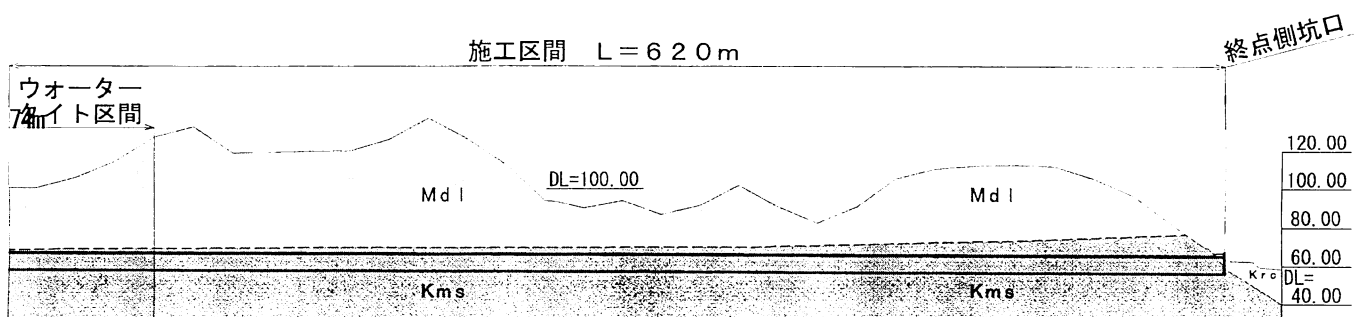


図-2 笠森トンネルの地質縦断面図

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(Mdl)	19	-	0.025	40	50	0.35

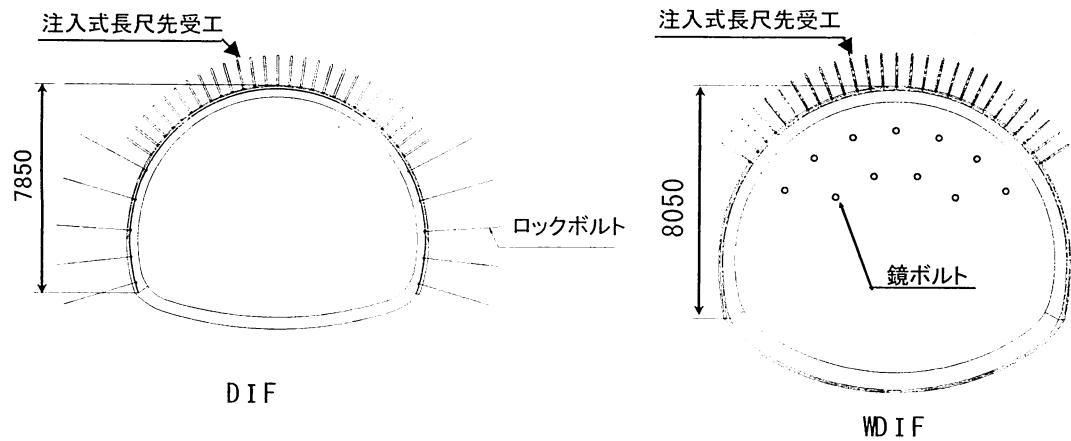


図-3 対象断面の加背割り

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（ $L=13.65\text{m} \times 27\text{本} \times \phi 8.0\text{mm}$ ）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-DIF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（ $\phi 76\text{mm}$ 溝付き鋼管タイプ、 $L=13.65\text{m} \times 11\text{本} \times \phi 8.0\text{mm}$ ）を追加した。

DIF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-DIF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-DIF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。

(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

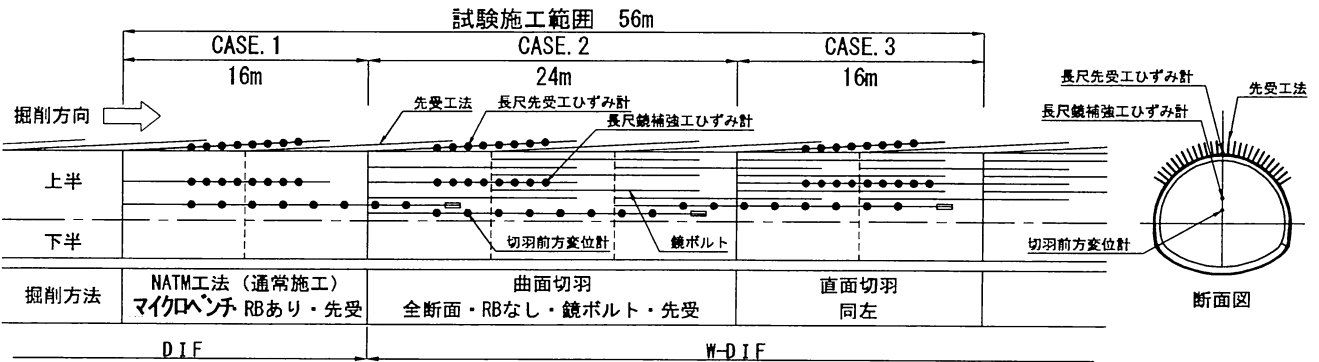


図-4 試験施工範囲と計測項目

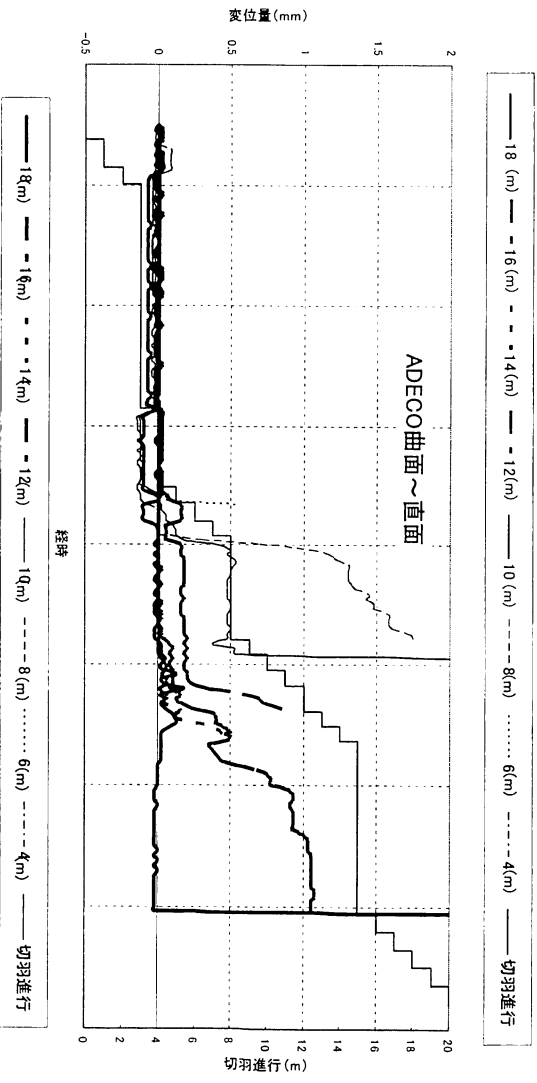
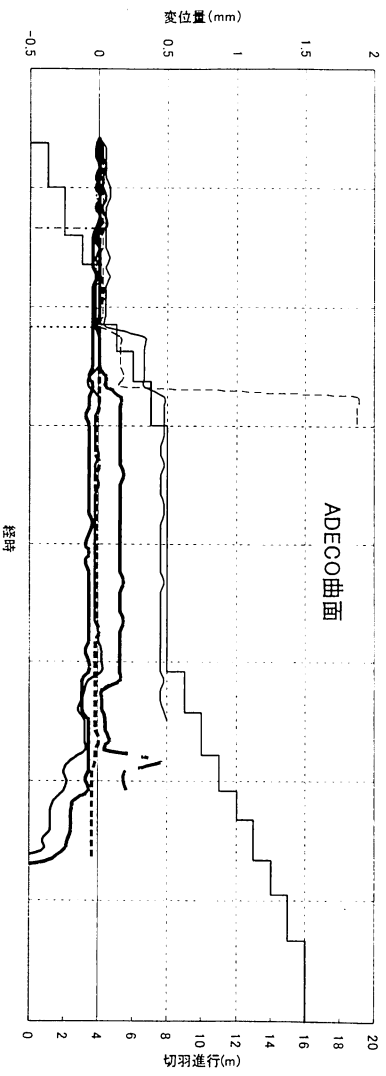
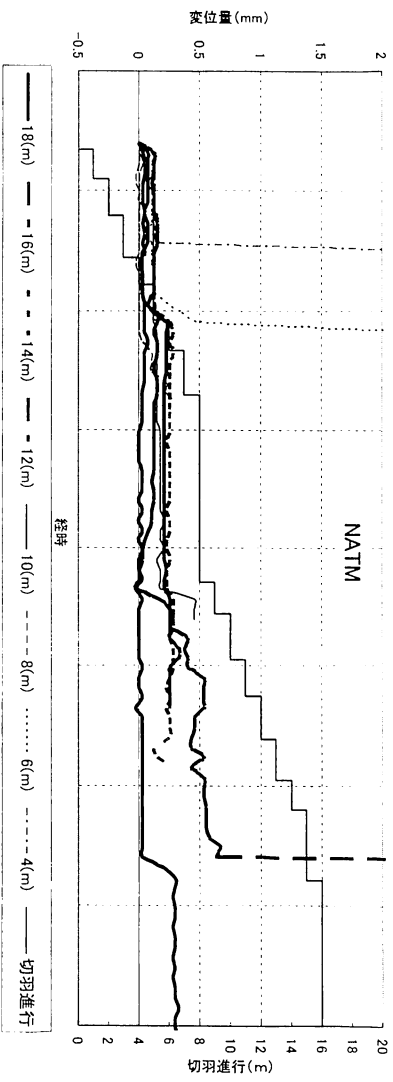


図-5 前方変位計測結果

ずみ計・長尺先受工ひずみ計を設置した(図-4)。ここで、前述したようにADECO-RS工法では掘削前に切羽の押出し量を計測し、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ーローガーを埋設し、掘削終了後データーを回収するタイズのため、本来のADECO-RS工法とは異なる。

(2) 計測結果と考察

a) 切羽前方変位結果

図-5に前方変位計測結果を示す。図に示されているよ

うに、各パターンにおいて非常に小さい値となっているが、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。前方変位が始まる深度は概ね切羽前方2～4m程度と推定されるが、発生変位量は0.5mm以下と小さく、切羽直近1～0mで一気に開放される。

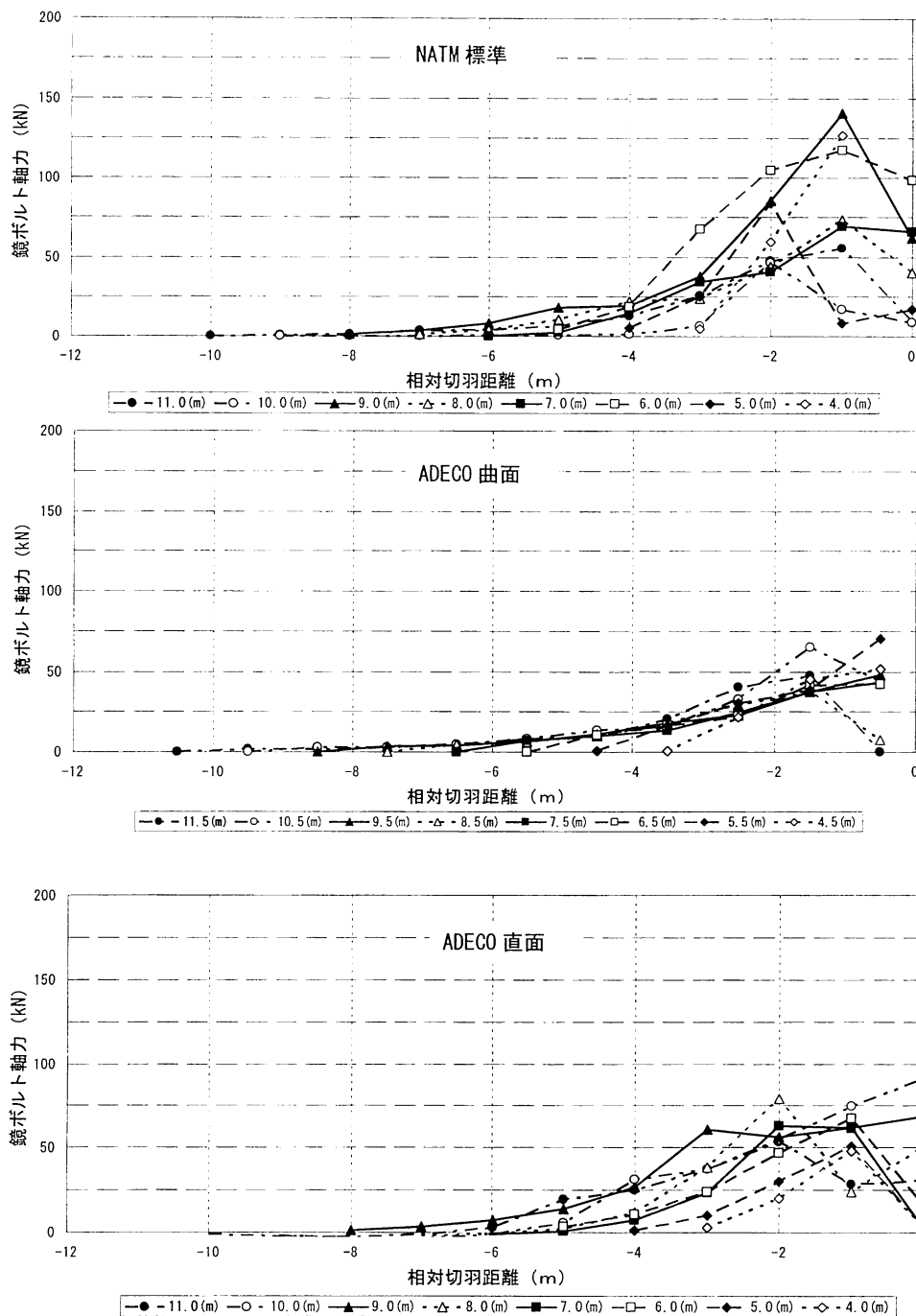


図-6 鏡ボルト軸力測定結果

b) 鏡ボルト軸力測定結果

図-6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。

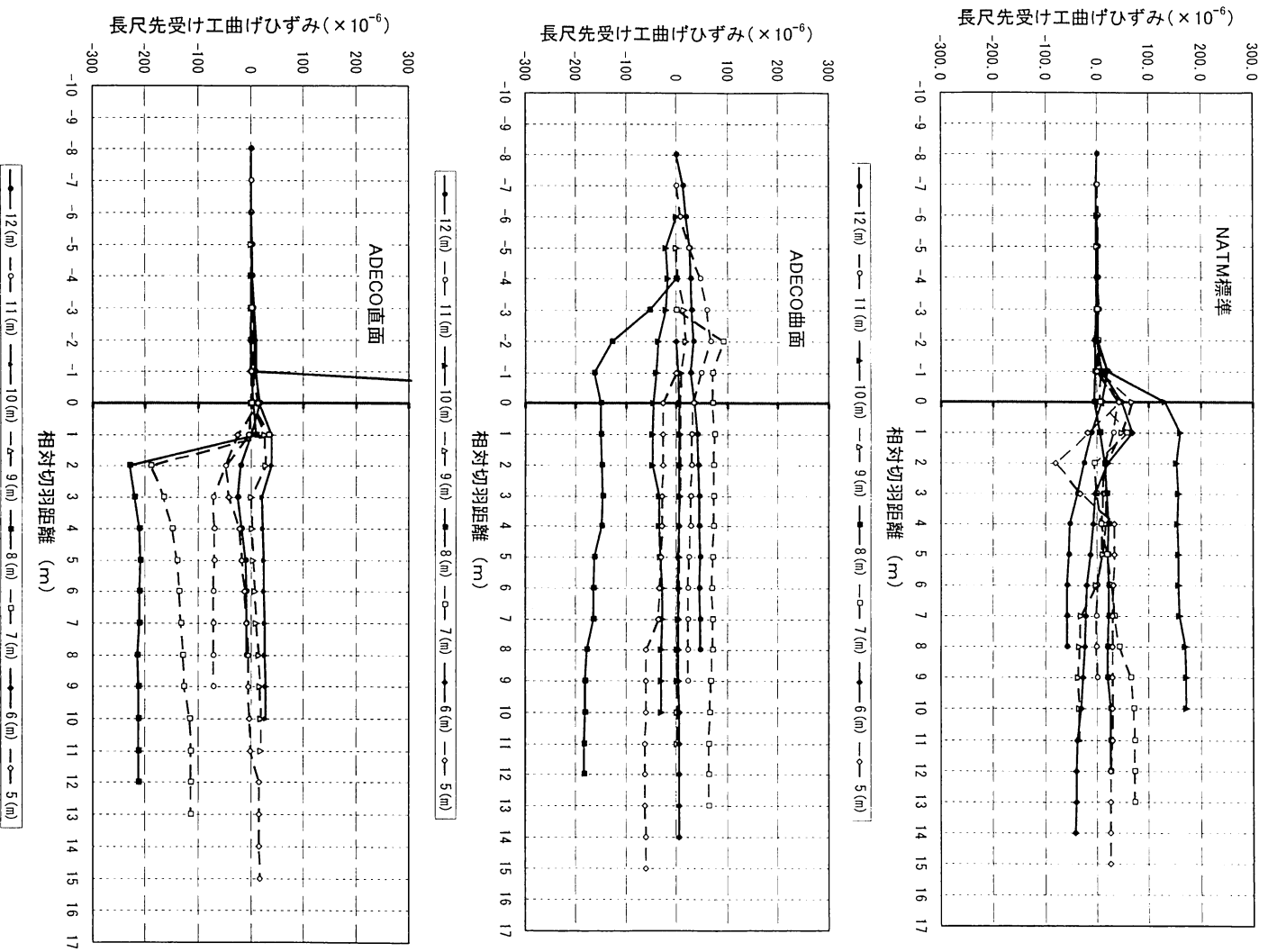


図-7 先受け工ひずみ測定結果

c) 先受け工ひずみ測定結果

図-7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。

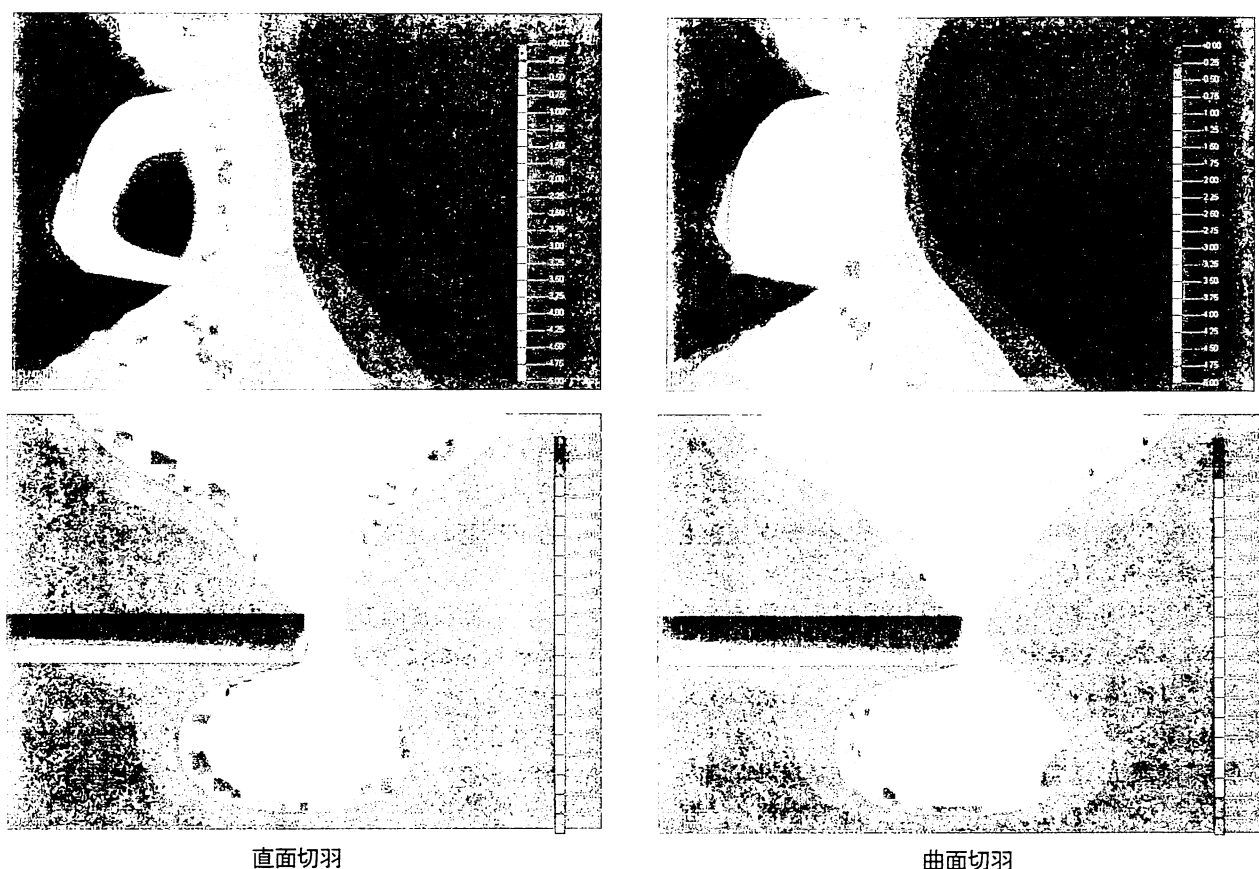


図-8 三次元解析結果より求めた切羽前方変位状況

d) 計測結果のまとめ

- ① 切羽前方変位結果，鏡ボルト軸力測定結果より鏡ボルトの効果は検証された。
- ② 曲面切羽は，直面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。
- ③ 切羽周辺の挙動を見ると，曲面切羽は直面切羽と比較すると応力を緩和させている可能性が高い。

5. 三次元有限要素解析結果

切羽前方を補強した全断面掘削における曲面切羽と直面切羽との差異を解析的に検討し，さらに今回の計測結果を検証するために，三次元弾性有限要素解析を実施した。切羽形状の差異を検証するのみのためモデルとしては単層構造とし，地盤の入力物性値としては表-1中の砂質泥岩層の値を使用した。

解析結果のうち，切羽前方変位分布コンター図を図-8に示す。図に示されているように，直面切羽は曲面切羽と比較すると切羽からの押出し量が卓越しており，図-6で示した鏡ボルト軸力測定結果と整合しているものと考えられる。また，センター断面図を比較してみると，直面切羽の卓越した押出し量の形状は，曲面切羽の形状と

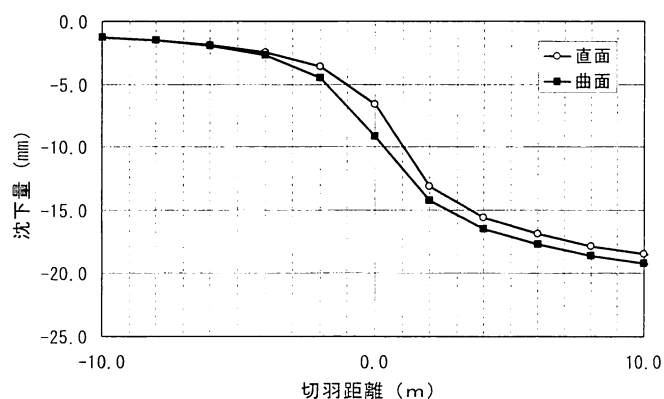


図-9 切羽の進行と天端沈下量の関係

ほぼ一致しており，曲面切羽ではこの押出し量が作用する領域をあらかじめ掘削し切羽にアーチ効果を発揮させた結果となることが推察される。

図-9に切羽の進行と天端沈下量の関係を示す。図に示されているように，曲面切羽の方が直面切羽よりも若干であるが切羽掘削以前の沈下量が大きくなっており，図-7に示した先受け工ひずみ測定結果と一致している。これよりも，曲面切羽の場合は切羽周辺の応力を緩和することが示されていると考えられるが，データ数の観点からもこの点については今後も検討する必要がある。



写真-1 曲面切羽形成状況

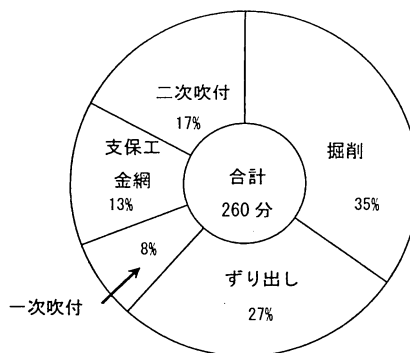


図-10 サイクルタイムの一例

6. 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-10に今回施工したサイクルタイムの一例を示す。

7. 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：本報については、解析・計測・施工全般にわたり東京都立大学名誉教授今田徹先生のご指導を賜った。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 今田徹：変化するトンネル技術 NATM後の動向」，J I C Eリポート，第14号，pp.74～79，2008.
- 2) Pietro Lunardi：Design and Construction of Tunnels Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS)，Springer, p372, 2008.

TUNNEL EXCAVATION WITH ADVANCE CORE REINFORCEMENT IN D-TYPE GROUND BY USING ADECO-RS APPROACH

Tatsuya NOMA, Toshiro TSUCHIYA, Nagayasu MITSUGOCHI,
Claudio DE GIUDICI and Giovanna CASSANI

Based on NATM, a half face with short-bench method is adopted in excavation of D-type ground in Japan in order to keep tunnel face stable by dividing it into two sections. Meanwhile, the ADECO-RS method, developed in Italy, can be used to excavate tunnels with full-face method even in weak ground by improving soil in advance of the core using face reinforcement bolts. In foreign countries, the ADECO-RS has been applied to many tunnel excavation projects. However, the method has not been applied to Japanese tunnel excavation projects.

In this paper, 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.