

### 3次元弾塑性FEM解析による長尺鏡ボルトの支保効果に関する検討

Study on support effect of long face bolts by 3D elasto-plastic finite-element analysis

北里新生\*・飯村博之\*\*・梨本 裕\*\*\*・梶山孝司\*\*\*

Arao KITAZATO, Hiroyuki IIMURA, Yutaka NASHIMOTO, Takashi SUGIYAMA

*An alteration zone of tuff was encountered at the tunneling site of Ryugatake. As supporting measures, long face bolts were placed, which lead to successful work through the zone by full-face cutting. Significant effect of long face bolts could be concluded from this case history. It is however impossible to quantitatively evaluate the support effect by the data of measurements at the site, because of difficulty inherent to measurement of displacement in ground before face, squeezing at face and axial force of face bolts. On top of it, it is in fact impracticable to compare, under the same conditions, the behavior of face-bolted ground with that of ground where no face bolts are driven. Numerical analysis with 3D models is therefore necessary for quantitative evaluation of the support effect.*

*This paper discusses the support effect of face bolts, referring to the results of 3D elasto-plastic finite-element analysis with models including face bolts.*

Keyword: 3D elasto-plastic FEM, face bolt, umbrella method

#### 1. はじめに

竜ヶ岳トンネルは、盤越自動車道の中で福島県と新潟県のほぼ県境に位置し、竜ヶ岳を東西に貫くトンネルである。本トンネルは、下り線を暫定対面2車線のトンネル（本坑）として、将来の上り線を避難坑として計画された。地質は全体的に均一で比較的堅硬な凝灰岩であると推定されたので、両坑とも全断面掘削工法を採用した。しかし、本坑より先行している避難坑において膨張性の変質帯が出現した。そのため、本坑においては対策工として先行長尺鏡ボルト（以下、鏡ボルトと略す。）を実施し、変質帯区間を全断面掘削で無事終了することができた<sup>1)2)</sup>。

この施工実績から、鏡ボルトの支保効果（変位抑制効果・緩み防止効果）は大きいと考えられる。しかし、鏡ボルトの支保効果は、現場の計測データに基づいて評価することはできない。トンネル天端や側壁部の先行地山変位、鏡部の押し出し量、鏡ボルトの軸力などの計測が困難であることに加えて、同一条件下で鏡ボルトの有無の地山挙動を比較することは不可能に近いからである。

この支保効果を定量的に把握するには数値解析に頼らざるを得なくなるが、2次元解析において鏡ボルトや最近広く採用されている先受け工の支保効果を表現・評価することは困難である。そのため、3次元解析が要求される。

本報告は、鏡ボルトを考慮したトンネル逐次掘削解析を3次元弾塑性FEMで実施し、その解析結果より鏡ボルトの支保効果を検討したものである。

\* 日本道路公団新潟建設局津川工事事務所西会津工事長

\*\* 前田建設工業（株）竜ヶ岳トンネル作業所所長

\*\*\* 前田建設工業（株）土木設計本部

## 2. 解析概要

### 2・1 解析モデル

竜ヶ岳トンネルの変質帯区間を対象として、表-1に示す3ケースの解析を実行した。なお、case-3の先受け工は、実施工では行われていない。解析モデルは、対称性を考慮して図-1に示すように半断面とした。図-2は、トンネル横断面で、鏡ボルト（○）および先受け工（●）を表現するビーム要素の配置を示してある。また、同図には後述する節点変位（□、A LINE、B LINE）の出力位置も示してある。図-3に、鏡ボルトおよび先受け工を表現するビーム要素の配置状況を示す。

表-1 解析ケース

| case   | 補強工    |
|--------|--------|
| case-1 | 補強工法無し |
| case-2 | 鏡ボルト工  |
| case-3 | 先受け工   |

### 2・2 解析ステップ

図-4に、解析ステップを示す。step 1の初期応力状態は、竜ヶ岳トンネルの変質帯区間の土被りが150m程度であることより、図-1のように外側境界面に $300\text{tf/m}^2$ の分布荷重を3方向から作用させて再現した。step 2とstep 3においては解析ステップ数を低減するために要素重積法<sup>3)</sup>を用いて、奥行27.2mまでの掘削過程を簡略化した。要素は2枚重ねとし、step 2で重積させた要素のうちの1つ（地山A 表-2参照）を消滅（掘削）させ、同時にcase-2では鏡ボルトを表すビーム要素を付加する。case-3では先受け工を表すビーム要素を付加する。

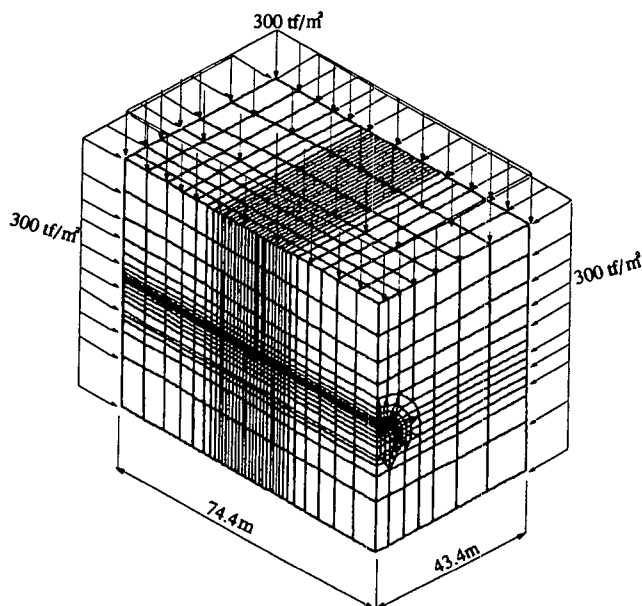


図-1 解析メッシュ

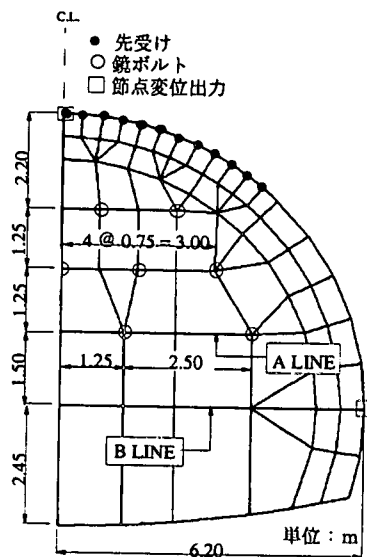


図-2 トンネル掘削面横断面

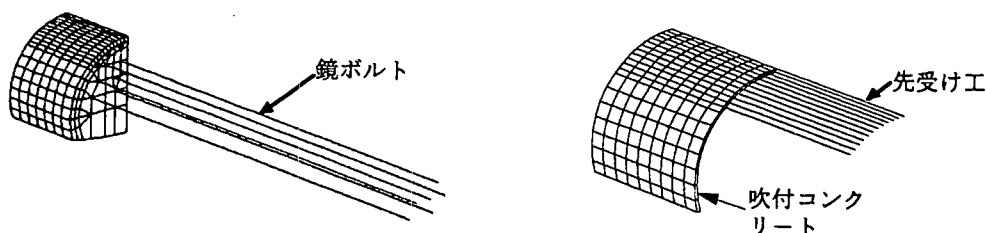


図-3 鏡ボルトおよび先受け工の配置状況

ーム要素を付加する。ここで、両者は奥行74.4mまで設置している。step 3で、重積させた残りの要素（地山 B 表-2 参照）を消滅させ、同時に奥行27.2mまで支保（ソリッド要素 表-2 参照）を設置する。step 4から、掘進長1mの逐次掘削を開始し、各ステップの掘削後に1掘進遅れで吹付コンクリート（ソリッド要素）、鋼製支保工（ビーム要素）を設置する。そして、奥行37.2mまで掘進（10掘進）し、この時（step 13）を最終状態とし解析結果の比較を行った。なお、インパートは、実施工で打設しているが、解析では全ケースとも考慮していない。

## 2・3 解析に用いた物性値

表-2に、本解析に用いた物性値を示す。地山は、Drucker-Pragerの降伏規準に従う弾塑性体とした。降伏パラメータ（ $\alpha$ 、 $\kappa$ ）は、Drucker-Prager降伏曲面がMohr-Coulomb降伏曲面に引張り午線上で外接するとして、表-2の $c$ 、 $\phi$ より算定した。奥行27.2mまでの要素重積部の支保は、吹付コンクリートと鋼製支保工の複合材としてソリッド要素で表現し、

等価弾性係数を算出した。同様に、先受け工の弾性係数も鋼管と中詰めモルタルの複合材として算出した。鏡ボルトは、高強度FRPロックボルトで、1孔に直径28mmのボルトを2本挿入している。

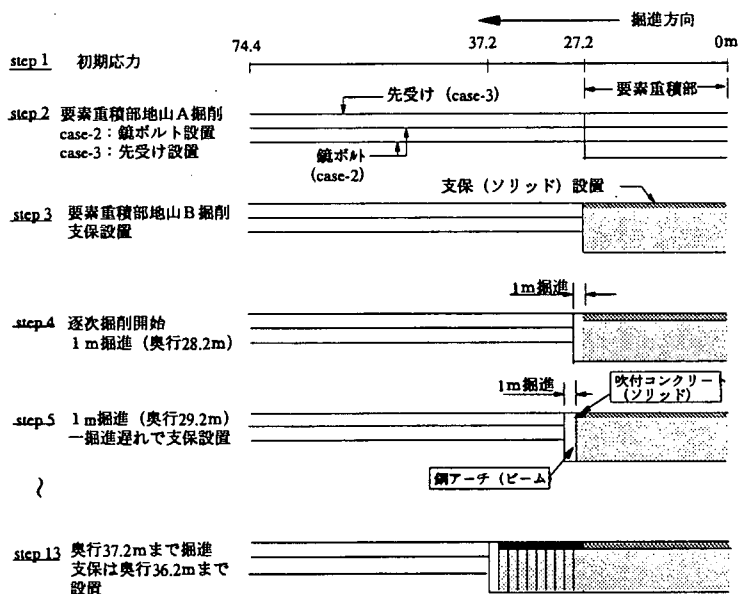


図-4 解析ステップ

表-2 解析に用いた物性値

| ソリッド   | 弾性係数<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | ポアソン比             | 粘着力<br>C (tf/m <sup>2</sup> ) | 内部摩擦角<br>$\phi$ (deg) | 備考                    |
|--------|------------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 地 山    | 10000                        | 0.3               | 50                            | 20                    | 弾塑性                   |
| 吹付コン   | $3.3 \times 10^5$            | 0.2               |                               |                       | 線形弾性 ( $t=0.25m$ )    |
| 要素重積部  | 地山A                          | 7000              |                               |                       | 弾塑性                   |
|        | 地山B                          | 3000              | 50                            | 20                    | 弾塑性                   |
|        | 支保工                          | $8.6 \times 10^5$ |                               |                       | 線形弾性 ( $t=0.25m$ )    |
| ビーム    | 弾性係数<br>(tf/m <sup>2</sup> ) | ポアソン比             | 断面積<br>(m <sup>2</sup> )      |                       | 備考                    |
| 鋼製支保工  | $2.1 \times 10^7$            | 0.1               | $6.4 \times 10^{-3}$          |                       | H-200                 |
| 長尺先受け工 | $3.5 \times 10^6$            | 0.2               | $8.1 \times 10^{-3}$          |                       | 鋼管 (D=101.6mm) + モルタル |
| 長尺鏡ボルト | $3.5 \times 10^6$            | 0.2               | $1.2 \times 10^{-3}$          |                       | D=28mm 2本/孔           |

## 3. 解析結果および考察

### 3・1 変位

図-5(a)および(b)に、トンネル天端沈下および側壁水平変位の経時変化を示す。着目した節点（図-2の□）は、奥行37.2mのトンネル横断面上のものである。横軸に切羽距離（経時変化）、縦軸に変位をとっており、変位はstep1の初期変位を引いた値である。表-3に最終状態（step 13）のトンネル壁面変位を示す。図-5(a)より、case-2（鏡ボルト）は切羽距離-6mより天端沈下量は小さくなり、最終状態では

case-1 (補強工無し) より約14%小さくなっている。case-3 (先受け工) は、切羽距離-7~-1mまでの間はcase-1より小さくなっている。しかし、先受けによる先行変位抑制効果は出現しているものの、効果は小さく、最終状態ではcase-1の天端変位とほぼ同じとなっている。図-5(b)の側壁水平変位は、case-1とcase-3はほぼ同様な値を示し、case-2が最も小さくなっている。

表-3 トンネル壁面変位 (step 13)

|            | case-1 | case-2(face bolt) | case-3(umbrella) |
|------------|--------|-------------------|------------------|
| 天端沈下(mm)   | -93.3  | -80.0             | -92.9            |
| 側壁水平変位(mm) | -59.0  | -54.8             | -60.0            |
| 側壁鉛直変位(mm) | -16.4  | -16.9             | -14.9            |

図-6(a)および(b)は、最終状態 (step 13) の鏡面 (奥行き37.2m) のトンネル軸方向の変位を示したもので、(a)はA LINE (図-2参照) 上の節点変位、(b)はB LINE (図-2参照) 上のものである。横軸にトンネル中心軸からの距離、縦軸にトンネル軸方向の変位をとってあり、変位はstep 1の初期変位を引いた値である。図-6(a)のA LINEでは、鏡ボルトの効果により変位は最大で40%程度小さくなっている。図-6(b)の鏡ボルトを設置していないB LINEでも、変位は他のものより小さくなっている。鏡ボルトのトンネル軸方向の変位抑制効果は、非常に大きいことがわかる。

### 3・2 鏡面の応力分布

図-7(a)および(b)は、最終状態の鏡面の鉛直方向の応力コンター図で、(a)はcase-1 (補強工無し)、(b)はcase-2 (鏡ボルト) のものである。図中のコンター数値は負が圧縮である。トンネル掘削境界面の周囲の白色部は圧縮応力が $350\text{tf/m}^2$ 以上の領域である。掘削周辺部では、掘削により初期応力 ( $300\text{tf/m}^2$ ) から変化しているが、図-7(b)の鏡ボルトが設置してあるトンネル上半部の応力変化は図-7(a)に比べて小さくなっているのがわかる。無論トンネル軸方向の応力変化は小さくなっているが、横断面方向も同様な結果であった。図-7より、鏡ボルトが、応力解放の抑制および3軸応力状態の保持に結びつくことがわかる。そのために、トンネル軸方向の変位だけでなく、図-5のように天端沈下や内空変位の抑制にも効果があると推察される。

### 3・3 塑性ひずみ

図-8(a)および(b)は、最終状態の切羽周辺部のトンネル軸方向の塑性ひずみコンター図で、(a)はcase-1 (補強工無し)、(b)はcase-2 (鏡ボルト) のものである。図中のコンター数値は塑性ひずみ成分のみの値で、正が引張りの方向である。図-8(b)の鏡ボルトを設置した周辺では(a)に比べて、塑性ひずみが小さくなっているのがわかる。横断および鉛直方向も、トンネル軸方向に比べて顕著ではないが塑性ひずみは小さくなっている。鏡面の安定性を検討する場合、塑性ひずみは1つの重要な目安と考えることができ、塑性ひずみを抑制する鏡ボルトは、鏡面の安定性の向上に大きく寄与すると考えられる。

なお、case-3 (先受け工) の図-7および8のコンター図は、case-1とほとんど同様な結果であった。

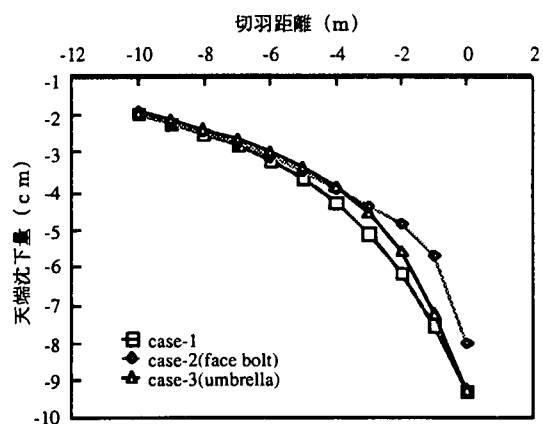
### 3・4 鏡ボルトの軸力

図-9は、最終状態 (step 13) の鏡ボルトの軸力分布で、横軸に切羽距離、縦軸に軸力をとってある。軸力は、鏡ボルト2本分の値で、トンネル壁面に近い鏡ボルトAとトンネル中心側の鏡ボルトBのものである。図-9より、軸力の最大となる位置は鏡面から1.5mの位置で、トンネル中心側のBの方が、最大で軸力は約20%大きくなっている。このことより、鏡ボルトの配置はトンネル中心部を密にし、トンネル壁面に向かって粗にすれば経済的な配置になると考えられる。

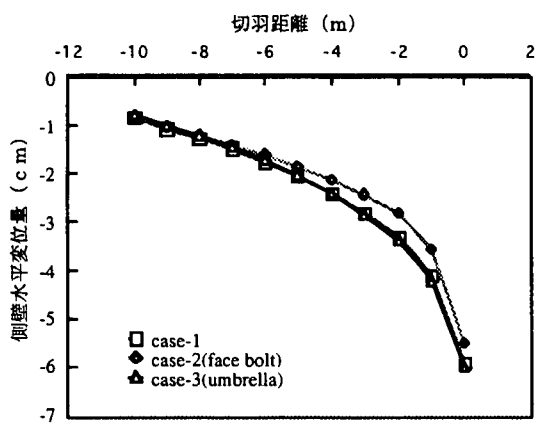
## 4. おわりに

先行長尺鏡ボルトの3次元モデルによる解析を行い、支保効果について検討した。

先行長尺鏡ボルトは、本来の目的である鏡面からの押し出しを抑制し、鏡面の安定性の向上に大きく寄与

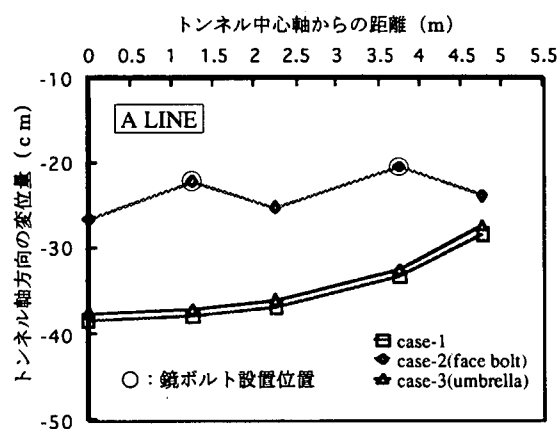


(a) 天端沈下量

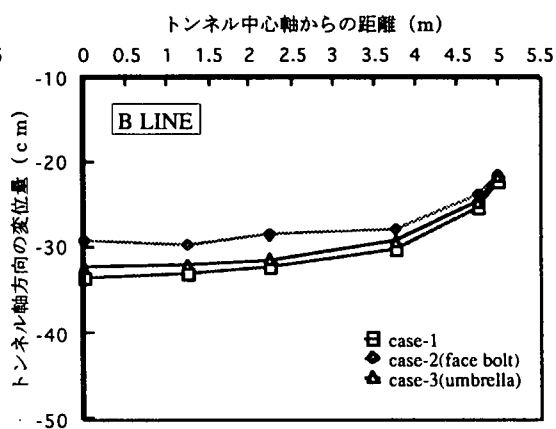


(b) 側壁水平変位量

図-5 トンネル壁面変位

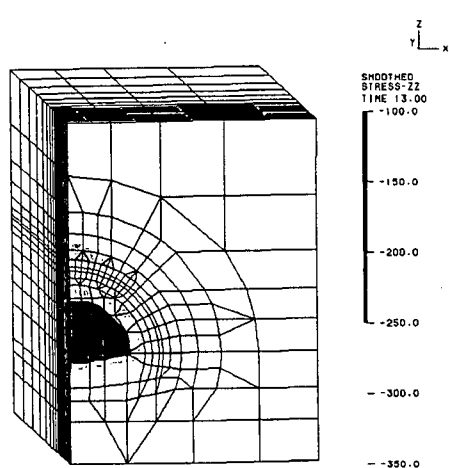


(a) A LINE

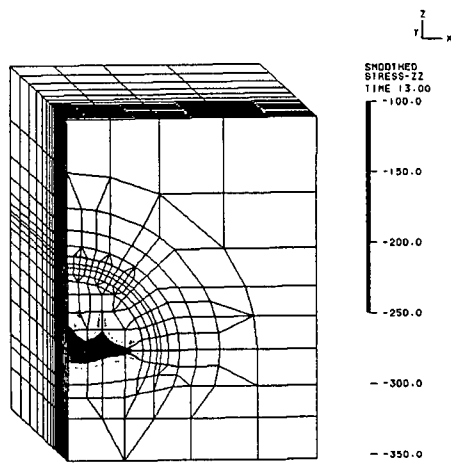


(b) B LINE

図-6 トンネル軸方向の変位量



(a) case-1  
(補強工無し)



(b) case-2  
(鏡ボルト)

図-7 鉛直方向の応力コンター

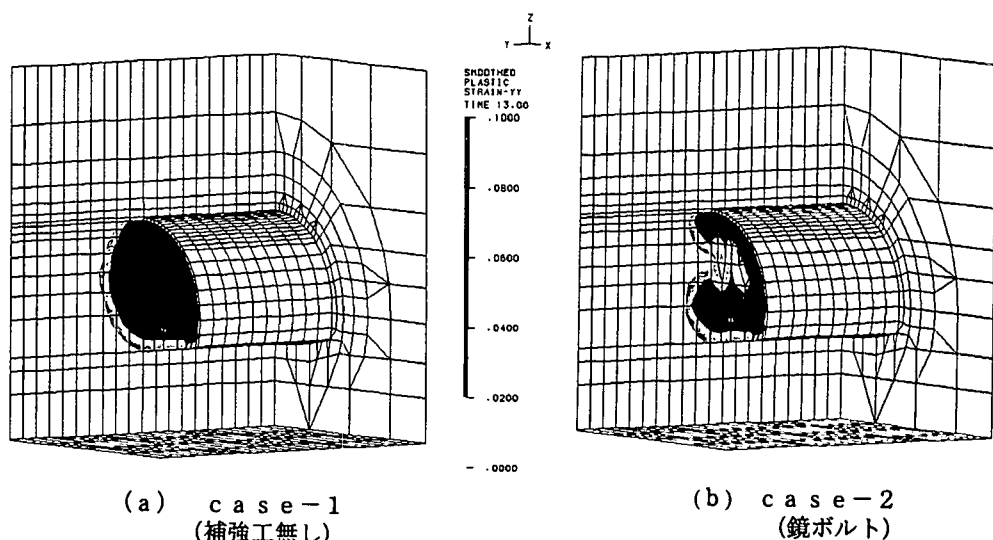


図-8 トンネル軸方向の塑性ひずみコンター

すると考えられる。これは、切羽前方の応力解放を抑制し3軸応力状態を保つ効果があるためである。さらに、この効果のため、鏡面からの押し出しだけでなく、天端沈下や内空変位も抑制する。しかし、注意することは、節点を共有する鏡ボルトのビーム要素と地山のソリッド要素との相対変位(ずれ)は考慮していない。トンネル軸方向の地山変位が増大しても、鏡ボルトは地山にどこまでも追従して変形し、抵抗力を発揮してしまうことになる。そのため、鏡ボルトの支保効果を過大に評価しているとも考えられる。

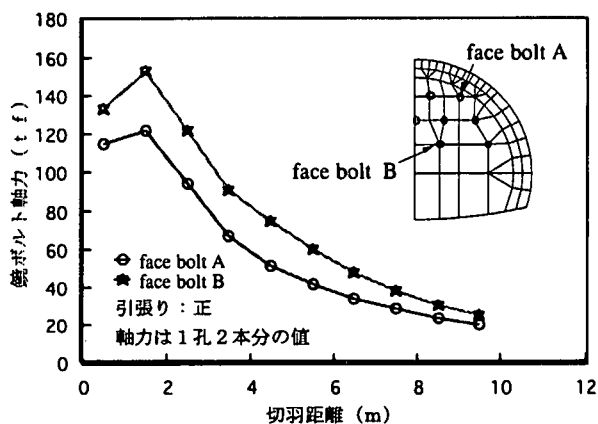


図-9 鏡ボルトの軸力 (step 13)

また、先受け工は、先受け効果だけではなく、アーチ効果も期待できるといわれている。しかし、解析ではアーチ効果は考慮していない。しかも、ほとんどの実施工において先受け工と併用される脚部補強工も考慮していない。これらの要因が解析において先受け工の効果を小さくしていると考えられる。

なお、本報告の解析は汎用FEMプログラム「ADINA」を使用した。

## 5. 参考文献

- 1) 北里新生・飯村博之・野村忠彦・櫻井孝臣・梨本裕：膨張性地山における鏡崩落対策工—先行長尺鏡ボルトの施工—，土木学会第50回年次学術講演会，VI-87 pp.174~175，1995.9
- 2) 飯村博之・野村忠彦：大型自由掘削機による補助ベンチ付き全断面掘削，日本トンネル協会第33回施工体験発表，1994.12
- 3) 大西有三・岸本英明：トンネル切羽進行の影響を近似的に考慮した2次元有限要素解析，トンネルと地下，pp.7~12，1980.12