

# 長尺鏡ボルトの切羽安定効果 に関する解析的検討

Analytical Study on Tunnel Face Stability by Long Face Bolt

森本真吾<sup>1</sup>・岡部正<sup>1</sup>・西村好恵<sup>2</sup>・中川浩二<sup>3</sup>

Shingo Morimoto, Tadashi Okabe, Yoshie Nishimura and Koji Nakagawa

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社ケー・エフ・シー トンネル技術室 (〒105-0014 東京都港区芝二丁目5-10)

E-mail: morimoto.shingo@kfc-net.co.jp

<sup>2</sup>正会員 工修 株式会社東亜測器 技術部 (〒220-0051 神奈川県横浜市中央一丁目28-8)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 NPO法人臨床トンネル工学研究所 (〒755-0084 山口県宇部市川上南側181番地)

This paper discusses the face stability to use long face bolts on NATM by using numerical analysis.

First, it confirmed the face stability to use long length face bolts by using numerical analysis. And then, the relation between the horizontal resistance pressure that acts on tunnel face and face that acts on long length face bolts was considered.

Secondly, we compared measurement data and an analytical value.

**Key Words :** long face bolting, analysis, face stability, measurement

## 1. はじめに

近年の山岳工法は、坑口部や低土被り部等の軟弱地盤において地上構造物が近接するなど厳しい条件下でも施工が行われるようになり、補助工法等を駆使しながらの都市山岳工法に近い施工形態が増えてきている。そのような場合に用いられる長尺鏡ボルトは、単に切羽の安定を目的とした補助工法ではなく、先行変位を含めた周辺地山の変位抑制も期待される。一方、トンネル周辺地山の変位・変形を抑える典型的な工法であるシールド工法は、切羽に水圧、土圧に抵抗する応力(内圧)を作用させ、初期の地山応力を保ちながらセグメントにより閉合を行う。

そのため、山岳工法においても、周辺地山の変位が問題となる場合は、できるだけ初期応力を解放させないような工夫が必要であると考えられる。

本研究は、長尺鏡ボルトによる内圧効果の把握を目的として、切羽面に作用する内圧に着目し3次元数値解析を行った。また、近年長尺鏡ボルトの施工実績の増加に伴うボルト軸力計測事例が増

え始めていることを踏まえ、長尺鏡ボルトに発生する軸力に関して計測結果と解析結果の比較を行い、実現象と力学モデルとの違いについて検討を行った。

## 2. 数値解析による長尺鏡ボルトの初期応力の解放抑制効果の検討

### (1) 両工法の特性曲線の概念<sup>1)</sup>

以下に、シールド工法および山岳工法の初期応力の解放抑制効果と変位抑制のメカニズムについてそれぞれの特性曲線の概念図を示し、両工法の比較を行う。

#### a) シールド工法の場合の特性曲線の概念

図-1にシールド工法の特性曲線の概念を示す。シールド工法は地山の変形を極力小さくすることを目的とする工法であることから、地山の初期応力に近い内圧で地山を支持することになる。したがって、セグメントに作用する土圧は、山岳工法の支保工に比べて大きくなる。

## b) 山岳工法の場合の特性曲線の概念

図-2に示すように、支保剛性はシールド工法に比べて小さく、また、支保効果を発揮するまで時間がかかるため、作用土圧は小さなものとなっている。これは、ある程度の地山の変形を許容することで支保に作用する土圧の減少を期待できる。

しかしながら、非常に軟弱な地山や、支保工の施工によってつり合う点の地山変位が大きくなりすぎると、内空変位、地表面沈下が増大して周辺構造物に影響を及ぼしかねない。そのため、山岳工法においてシールド工法のように変位を拘束し、安定な条件で掘削するためには、内圧効果に匹敵するような手段が求められる。今回検討対象である長尺鏡ボルトは切羽面を拘束し、図中の破線が示すように初期応力の解放を抑制することで変位量を小さくすることが可能になると考えられる。

そこで、山岳工法における長尺鏡ボルトの内圧効果を数値解析モデルで検証し、その効果のメカニズムの把握を行う。

### (2) 数値解析による検討

これまでの長尺鏡ボルトに関する既存の研究成果によると、長尺鏡ボルトの鏡部の安定化効果は、部材の軸方向（水平方向）の引張り抵抗により、鏡部の解放面を三軸状態に保持することであるとされている<sup>2)</sup>。ここでは、長尺鏡ボルトに作用する軸力と押出し変位抑制効果に着目し、長尺鏡ボルトが鏡面を前方地山に“縫い付ける”力と、内圧効果と同じ働きをするものとして切羽面に加える水平抵抗力の関係を調べる。

#### a) 解析モデル

図-3に解析モデル図を示す。トンネル掘削半径

表-1 地山入力値

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| 単位体積重量 : $\gamma$ | 19 kN/m <sup>3</sup> |
| 弾性係数 : E          | 100 MPa              |
| ポアソン比 : $\nu$     | 0.35                 |
| 粘着力 : c           | 0.01 MPa             |
| 内部摩擦角 : $\phi$    | 30°                  |

表-2 支保工、長尺鏡ボルト入力値

| 項目       | 支保工                  | 長尺鏡ボルト               |                |
|----------|----------------------|----------------------|----------------|
| 構造要素     | shell                | beam                 |                |
| 弾性係数 : E | $8.65 \times 10^3$   | $20.00 \times 10^3$  | MPa            |
| 断面積 : A  | $2.5 \times 10^{-1}$ | $1.7 \times 10^{-3}$ | m <sup>2</sup> |

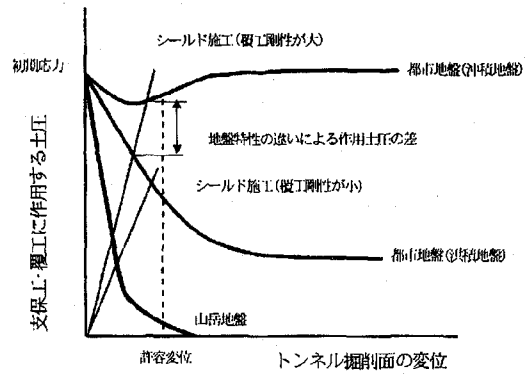


図-1 シールド工法の場合の特性曲線の概念

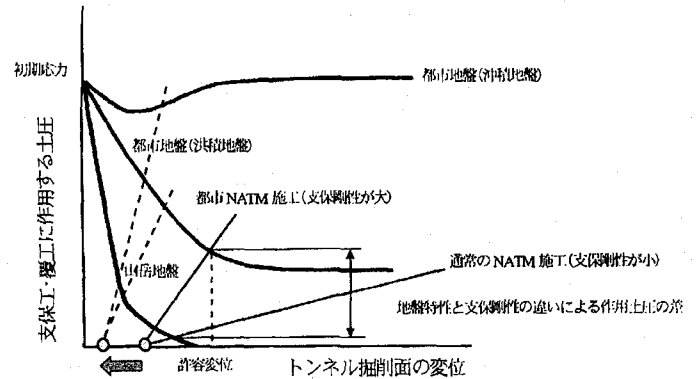


図-2 山岳工法の場合の特性曲線の概念

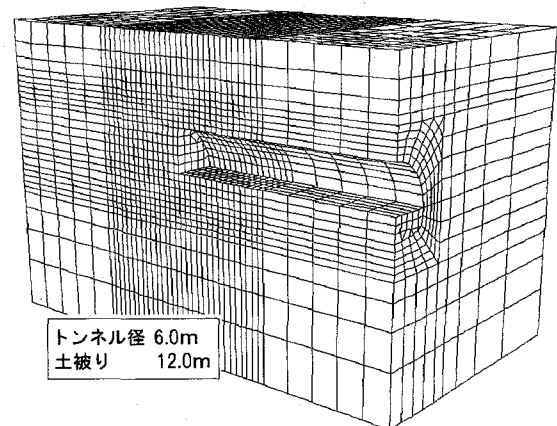


図-3 解析モデル図

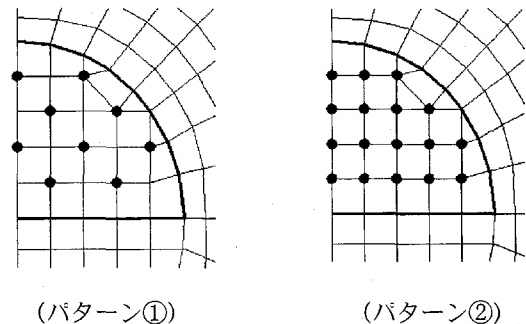


図-4 長尺鏡ボルト配置図

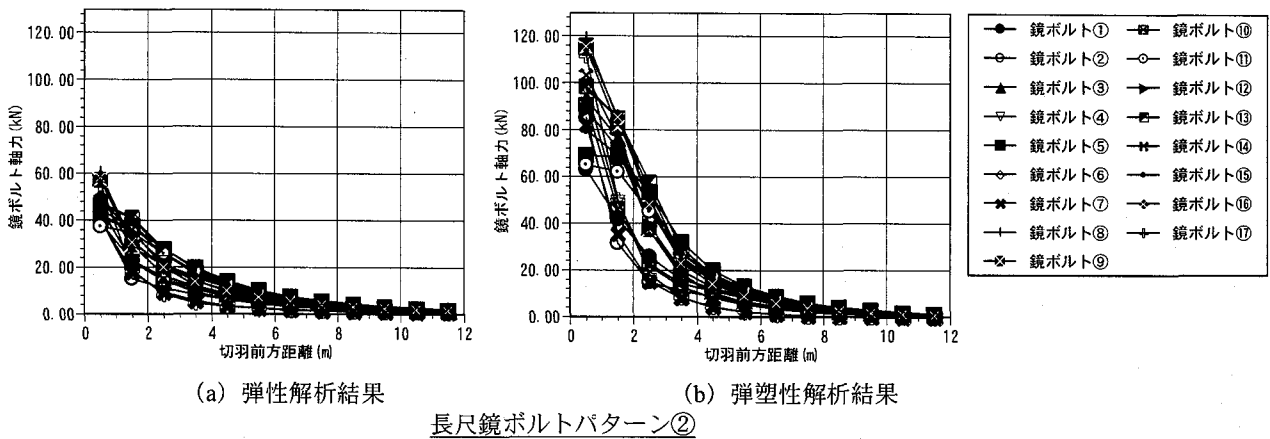
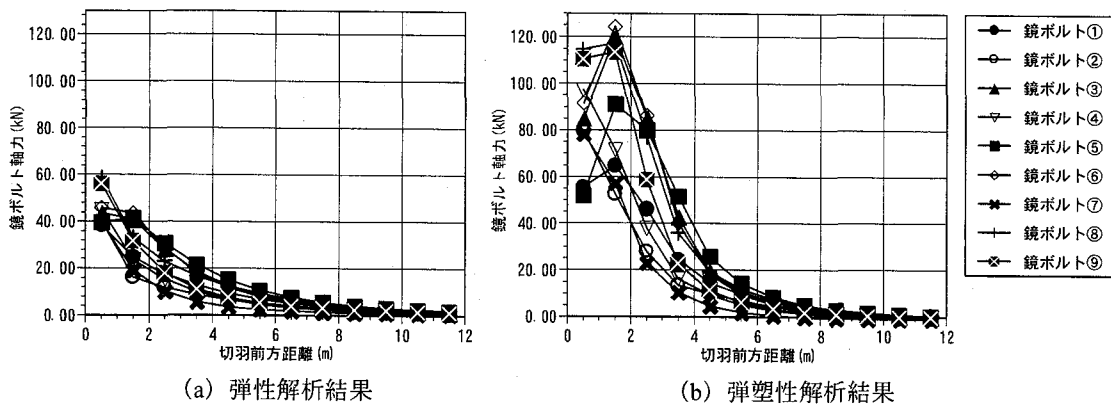


図-5 長尺鏡ボルト軸力分布図

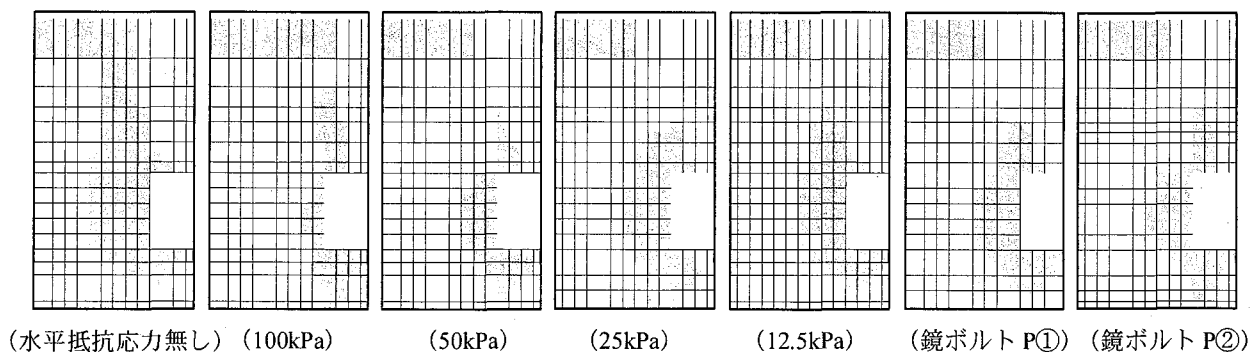
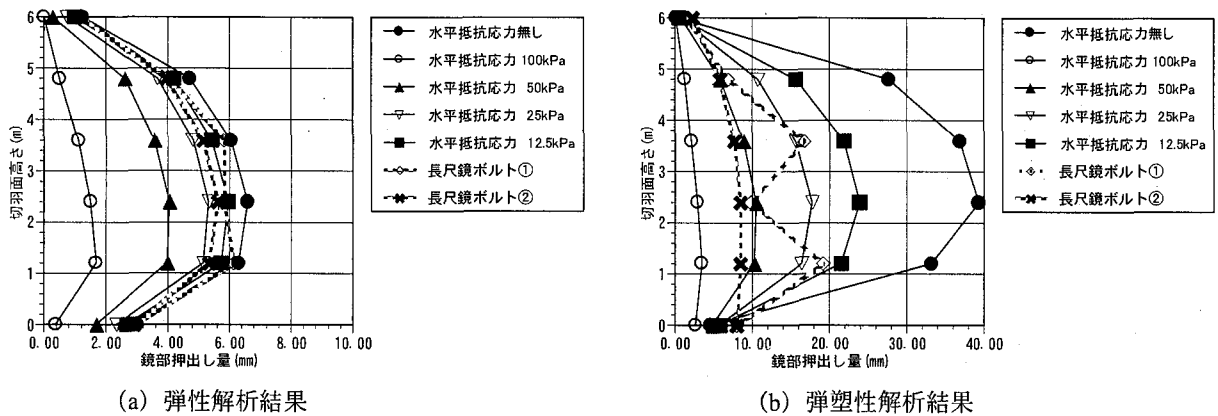


図-7 塑性領域図

6m, 土被りは12m (1D) とした. 表-1 に地山の物性値を示す. 地山は長尺鏡ボルトが必要であるような低土被りの未固結地山を想定している. また, 支保工, 長尺鏡ボルトの物性値を表-2 に示す. 長尺鏡ボルトについては実際の地山状況に見合ったボルト～定着材間 (あるいは定着材～地山間) の付着特性を考慮すべきであるが, 今回, ボルト～地山モデル間には剛結されたモデルとした. 長尺鏡ボルトの配置については図-4 に示すように2ケース設定し, 各々, 弾性解析と弾塑性解析を実施した.

#### b) 長尺鏡補強工の軸力分布

図-5 に長尺鏡ボルトパターン①, ②における長尺鏡ボルトの軸力分布図を示す. (a)弾性解析結果に比較し, (b)弾塑性解析結果では長尺鏡ボルトに作用する力が大きくなる. これはボルトの付着特性を考慮していないため, 地山の塑性変形に伴い, 軸力が変位に比例した分布形状となるためである. また, 長尺鏡ボルトのパターン①とパターン②を比較してみると, (a)弾性解析結果ではあまり相違がみられないが, (b)弾塑性解析結果では, パターン①は切羽前方 1.5m でピークとなるが, 鏡ボルト本数を増やしたパターン②は切羽前方 0.5m でピーク値を示している. このことはパターン①では鏡部前方 1.5m～0.0m に塑性化した分布形状を示すが, パターン②ではパターン①に比較し, “縫い付け力” により切羽前方の土塊が弾力的な挙動に近づいたことによるものと考えられる.

#### c) 長尺鏡ボルトによる初期応力解放の抑制効果

切羽鏡部の押出し挙動に抵抗する水平応力についてのパラメトリック解析を行い, 長尺鏡ボルトにどの程度の初期応力解放の抑制効果が期待できるかについて検討する. 図-6 に鏡の押出し量について示す. (a)が弾性解析結果, (b)が弾塑性解析結果である. また, 図-7 に弾塑性解析により発生した塑性領域図を示す.

図-6 より, 切羽鏡面に水平抵抗等分布応力を与えることにより鏡の押出し量を抑制する効果が見られる. また, 図-7 より鏡部の押出し変位の抑制効果に比例して, 鏡部前方地山の塑性領域の減少効果が確認できた. 長尺鏡ボルトは直接鏡面に抵抗力を与えるものではないが, 鏡部前方地山に設置することにより鏡面の押出し, 前方地山の塑性領域の抑制効果がみられた. 弾性解析, 弾塑性解析においても長尺鏡ボルトパターン①は水平抵抗応力12.5kPa～50kPaの間の塑性領域とほぼ等しく, 長尺鏡ボルトパターン②は水平抵抗荷重25kPa～

50kPaの間の塑性領域とほぼ等しいと言える.

ちなみに, 解析モデルの天端での静止土圧 $P_v(=\lambda \gamma h)$ は, 側圧係数 $\lambda=0.5$ , 単位体積重量 $\gamma=19\text{kN/m}^3$ , 土被り厚 $h=12\text{m}$ とすると,  $P_v=0.5 \times 19 \times 12=120\text{kPa}$ である. したがって, 山岳工法で用いられる長尺鏡ボルトは, 土圧 (120kPa) に対して1/2～1/8 (12.5kPa～50kPa) 程度の小さな内圧しか鏡面に作用していないにもかかわらず, 十分に変位抑制効果は得られている.

また, 図-5, 6に示すように, 長尺鏡ボルトのパターン②の方が, パターン①に比べ, 軸力分布形状に関しても切羽面での軸力の減少もなく, 切羽の押出しに関しても弾力的な変位挙動を示していることから, 初期応力の状態に近いと言え, 内圧効果が発揮されていると考えられる.

以上より, 長尺鏡ボルトによりシールド工法における泥水圧等と同様な内圧による切羽鏡部の安定化効果が期待できると考えられる.

### 3. 長尺鏡ボルトの計測値と解析値の比較

解析により, 切羽面に打設される長尺鏡ボルトは内圧による切羽安定効果があることを把握した.

そこで, 実現場でも同様の効果が発揮されているかを確認するため, 実現場での長尺鏡ボルトの軸力データと解析とを比較する. なお, 計測データおよび解析データについては「長尺鏡ボルトの作用の計測と解析による評価, トンネル工学報告集, 2004.11<sup>3)</sup>」を引用した.

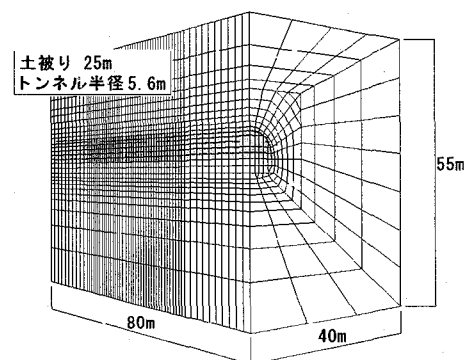


図-8 解析メッシュ図

表-3 地山入力値

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| 単位体積重量 : $\gamma$ | 19 kN/m <sup>3</sup> |
| 弾性係数 : E          | 50 MPa               |
| ポアソン比 : $\nu$     | 0.42                 |
| 粘着力 : c           | 0.01 MPa             |
| 内部摩擦角 : $\phi$    | 30 °                 |

表-4 長尺鏡ボルト入力値

|           |            |                                     |
|-----------|------------|-------------------------------------|
| 単位体積重量    | : $\gamma$ | 17.5 kN/m <sup>3</sup>              |
| 弾性係数      | : E        | $2.0 \times 10^3$ MPa               |
| 断面積       | : A        | $1.7 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> |
| グラウトせん断剛性 | : kbond    | $8.2 \times 10^2$ MN/m <sup>2</sup> |
| グラウト付着強度  | : sbond    | $7.6 \times 10^{-2}$ MN/m           |

表-5 実現場と解析の相違点

|         | 実現場  | 解析モデル |
|---------|------|-------|
| 土被り     | 35m  | 25m   |
| トンネル径   | 6.4m | 5.6m  |
| 上・下半離れ  | 4m   | 5m    |
| 上半ボルト本数 | 23本  | 16本   |
| 下半ボルト本数 | 8本   | 6本    |

解析モデルおよび入力物性値を図-8、表-3、4に示す。解析は弾塑性解析のみを実施した。また前回と同様、表-5に示すように実現場と解析モデルとの相違点が多く、特に数値解析は逆解析を行っていないため、傾向について検討するものとする。軸力の計測された測点は図-9に示すトンネルのほぼ中央の長尺鏡ボルトで、解析においても同様に切羽中央における鏡ボルトの軸力を用いた。

図-10に計測、数値解析における長尺鏡ボルトの軸力分布図を示す(同報告書・再掲)。長尺鏡ボルトの残長(付着長)が十分に長いとき、発生軸力は小さいという観点から、同図を図-11に示すように最大軸力およびその発生位置、そのときの長尺鏡ボルトの残長に着目し、プロットしなおした。残長と最大軸力のグラフを図-12に、残長とその最大軸力が発生した測点からの残長を図-13に示す。図中における横軸の残長とは鏡ボルトの残長(L)を、図-12中の縦軸の最大軸力は横軸に対応した掘進ごとの最大軸力値を示し、また、図-13の縦軸は長尺鏡ボルト先端からその最大軸力が発生した測点までの距離( $\ell$ )を示している(図-11参照)。

図-12の計測値は、最大軸力値が一度小さくなってすぐ上昇を数回繰り返しているように見える(例: ①~②および、I~II)。これは図-13中の①~②および、I~IIに示すように、最大値の計測点が増える、すなわち、掘削により最大軸力発生測点位置が移動し、切羽よりさらに奥の計測点の軸力計(ひずみゲージ)が最大値を示し始めたからであると考えられる(図-11中の矢印)。

図-12に示すように、計測値はどの断面においてもばらつきはあるものの、残長が短くなるにつれ(掘進が進むにつれ)、最大軸力値は大きくなって

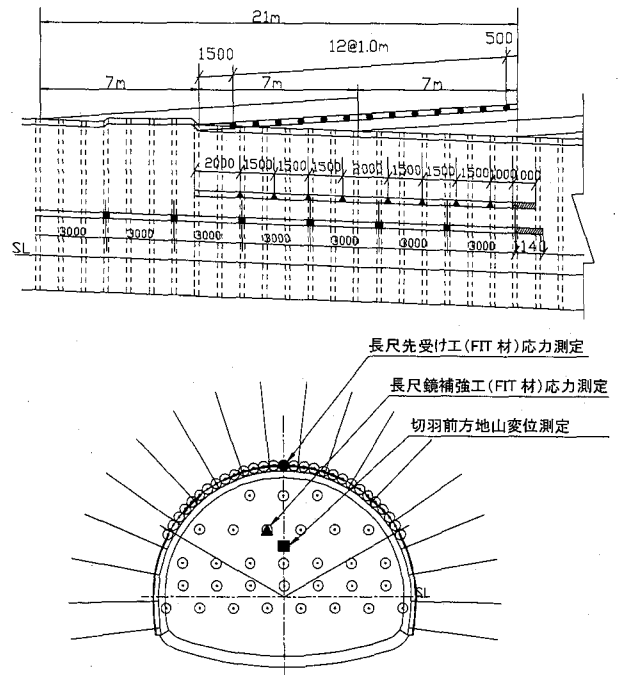
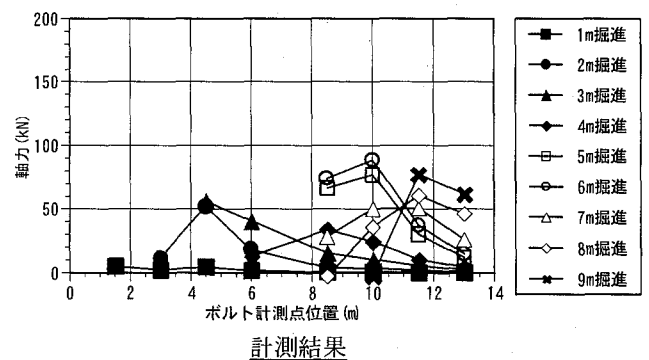
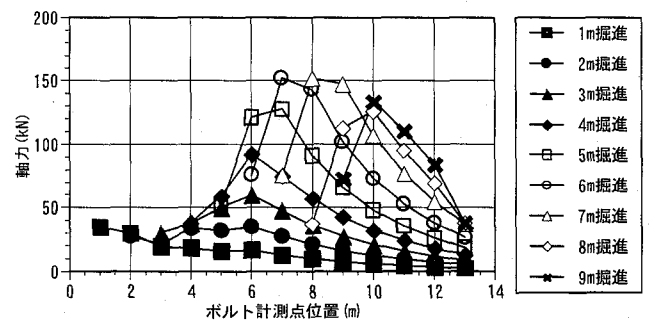


図-9 計測配置図



計測結果



解析結果

図-10 長尺鏡ボルト工軸力分布図  
(上: 計測結果, 下: 解析結果)

いる。解析値も同様に残長が短くなるにつれ、最大軸力値は大きくなっている。残長が短くなる分、付着面積が小さくなり、鏡ボルトが負担する軸力も大きくなるようである。また、B断面を除いて計測値も解析値も残長が約5m以下になるとピーク値からやや値が落ちている。長尺鏡ボルトが短くなり塑性領域内に入ってしまう、十分な定着が

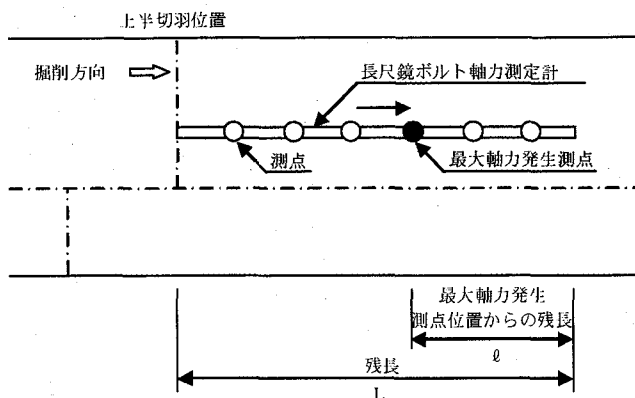


図-11 残長と最大軸力発生測点からの残長の関係

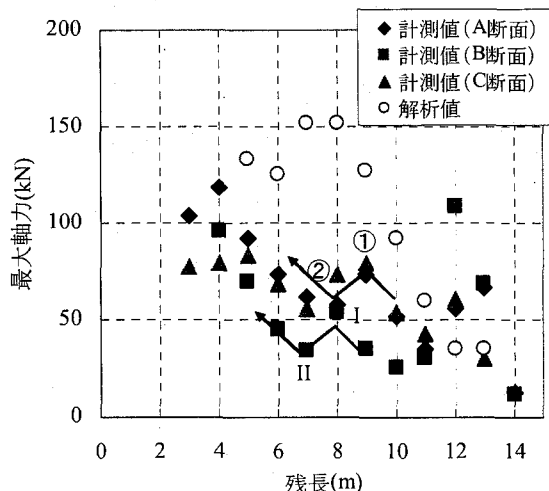


図-12 残長と最大軸力

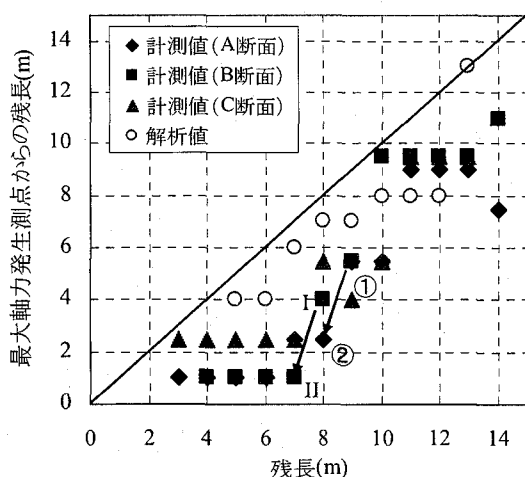


図-13 残長と最大軸力発生測点からの残長

得られなくなっていると考えられる。

ただ、解析値の方が、計測値に比べ大きくなっているが、これは表-5に示すように実現場に比べ解析の方が長尺鏡ボルトの本数が少なく一本当りに負担する軸力が増加していると考えられる。また、計測値のどの断面においても残長7m前後で最

大軸力値が低い値を示している。これは、今回計測された現場の長尺鏡ボルトがラップ長7m(打設長14m)で施工されており、その影響を受けていると考えられる。

また、図-13に示すように、長尺鏡ボルトが十分に長い場合、2~3m掘削が進んでも最大軸力発生測点位置の変化は見られない。これは計測値および解析値で同様な傾向が得られた。しかし、掘削が進み残長が10m以下になると、解析では切羽面に近い位置で最大軸力が発生しているのに対して、計測では、切羽から若干離れた位置で最大軸力が発生している。これは、先に述べたように施工の影響を受けていると考えられる。

#### 4. おわりに

長尺鏡ボルトの切羽安定効果について、解析および、計測結果と解析結果により以下のような傾向が見られた。

- ・切羽の内圧と押し出し変位の解析では、長尺鏡ボルトの内圧は一樣な水平内圧に換算すると静止土圧の1/2~1/8程度の小さな水平抵抗力ではあるが、押し出し変位を小さく抑えることができ、鏡部の安定効果を得られることが分かった。
- ・数値解析と計測結果の比較では、残長が短くなるにつれ、最大軸力値が大きくなるという結果が得られた。また、残長および最大軸力発生位置は残長が十分長い場合に概ね数値解析、計測結果とも同様な傾向を示すが、残長が短くなると施工の影響により計測値の最大軸力発生位置が切羽から若干離れた位置を示している。

ただし、計測データが少ないため、今後データのさらなる蓄積と分析を必要とする。

#### 参考文献

- 1) 土木学会，都市NATMとシールド工法との境界領域，トンネルライブラリー第13号，pp.4-6，2003。
- 2) 森本真吾，岡部正，西村好恵，中川浩二：ボルト材による地山補強効果の数値解析的研究，トンネル工学報告集，vol.15，pp.63-68，2005。
- 3) 西村好恵，森本真吾，岡部正，中川浩二：長尺鏡ボルトの作用の計測と解析による評価，トンネル工学報告集，vol.14，pp.231-235，2004。