

山岳トンネル坑口部の計測管理への 三次元測量システムの適用

鍛冶茂仁¹・西尾宗雄²・千葉英治³・清水則一⁴・古川浩平⁵・中川浩二⁵

¹正会員 (株) 鹿島建設土木技術本部工務部 (〒107 東京都港区元赤坂1-2-7)

²正会員 日本道路公団彦根管理事務所副所長

³正会員 (株) 鹿島建設北陸支店

⁴正会員 博(工) 山口大学工学部助教授 社会建設工学科

⁵正会員 工博 山口大学工学部教授 社会建設工学科

坑口付近の地山においては、トンネル掘削に伴う変形だけではなく、掘削によって引き起こされる可能性がある斜面のすべりに対しても、安全性を評価できる計測管理手法が必要である。それに対して著者らは、地山の三次元変位を的確に計測することが有効であると考え、新しい三次元変位測量システムを坑口部の計測管理に適用した。本報告は、実際の計測を通じこの測量システムの有効性を明らかにし、計測結果について考察を加えるものである。

Key Words: monitoring, portal of tunnel, three dimensional displacement measurements, total station

1. はしがき

近年山岳トンネル工事は、用地問題や路線線形の重視のために、地形あるいは地質上の問題を含むところに計画・施工される機会が増えている。その場合、トンネル坑口部は脆弱な地山に建設されることもあり、トンネル掘削時に地すべりや斜面崩壊、また、トンネル坑内には予期せぬ変状を引き起こすなど、安全な施工を実施する上での障害が多い。もちろん、多くのトンネルにおいて、坑口部では安全性を確保するために何らかの補助工法を採用し、対処しているが、不測の変状が発生したり、それを進行させないようにやむを得ず大幅な設計変更による変状防止対策を実施することもしばしばある。

このような問題に対して、最近では現場計測に基づく施工管理を実施することが一般的となってきた。その場合、地形・地質的にも複雑な条件にある坑口部では、地山の三次元的な変形挙動を的確に捉えることが重要である。従来実施されている坑口付近の地山の変位計測は、伸縮計、傾斜計などの電気式の計測、また、地表面はレベル測量を用いた沈下計測が一般的である^{1)・2)}。従来の山岳トンネル坑口部の計測項目を表-1に示す。これらの計測項目のうち、一般的に採用されている地表面の計測について述べる。

① 地盤伸縮変動：地表面に現れた亀裂の活動性、

地形変換点付近の活動の可能性を把握するために、予想される地形変換点等を挟んだ2点間をインバール線で接続し、これの伸縮状況を自動記録させて地表面上の2点間の相対変位を測定するものである。

② 地表面沈下：地表面の沈下測定はレベル・スタッフ(標尺)による水準測量により、基準点(既知の不動点)からの絶対高さ(標高)を求めるものである。地表面沈下は絶対高さの経時変化による差分としてとらえることができる。

電気式の計測機器は精度よく地中変位が計測できる反面、機器の新設あるいは再設置が比較的困難で、計測は当初設置された場所に限定されたものとなる。また、2測点間の距離を測定する伸縮計測定については自動記録できるという特長があるが、固定された2測点間の距離を測定するためにその2点を結ぶ方向でしかすべりの方向が特定できないうえ、トンネル掘削の影響を受けない不動点の設置も難点で両測点共移動してしまう場合もあって、坑口地山の絶対的な変位挙動を把握することは難しい。一方、レベル測量は容易に広い範囲で沈下の測定ができるが、斜面に人間が入り込む必要があり、測定に手間がかかるうえ、通常、高い精度は望めない問題がある。さらに、上記のいずれの方法も基本的には一次元的な変位計測法であるため、三次元計測を行うためにはいくつかの計測法を組み合わせる必要が生じる。

表一 山岳トンネル坑口部の計測項目

計測項目	内容
坑内地質観察	切羽及び切羽後方の状態の観察(岩質、地質構造、風化、変質、破砕状況、湧水状況)
内空変位測定	壁面変位、天端沈下(不動点を基準)
地中変位測定	相対変位(掘削後計器設置)、絶対変位(掘削前に予め設置)
地表面沈下測定	浮石、亀裂、陥没、移動等の地表面観察を含む(不動点を基準)
地すべり変位	地表の移動、すべり面の動き
移動測定	トンネルの移動(不動点を基準)
支保・覆工の観察	支保工の変形、ロックボルトのプレート変形、吹付けコンクリート・二次覆工コンクリートのクラック
地下水調査	坑内湧水量、間隙水圧、地下水位、降雨・降雪量
鋼製支保工	地盤反力、応力、ひずみ
ロックボルト	軸力
吹付けコンクリート	応力

表二 システム構成

システム部位	構成機器
測定部	高精度光波測定器(距離、水平角、天頂角同時測定) 3DステーションNET2
測点部	粘着テープ付き反射シート(T=0.5mm) シートサイズは10mm角~50mm角の4種類
データ集積計算部	16ビットハンドヘルドコンピュータSDR4B

筆者らは、先にトンネルの坑内計測を対象として、測距測角儀であるトータルステーションを用いた三次元変位測量システムを開発した³⁾。トータルステーションを用いた地盤変位計測はこれまでも研究されているが^{4)~7)}、筆者らのシステムは、特に測距精度を向上させ、さらに観測点の座標を即座に得られる機構を有したトータルステーションを利用し、測量結果がすぐさまコンピュータに記録・表示される点に特徴がある。

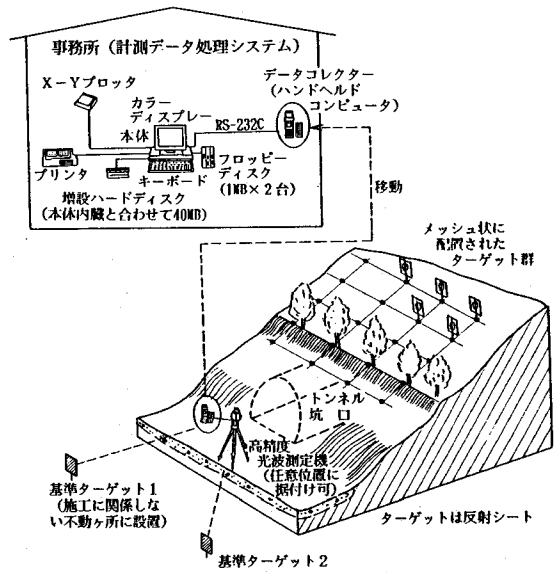
本研究では、山岳トンネル坑口付近の計測管理に、上述の三次元変位測量システム³⁾を用いた結果について述べ、その有用性を示す。

なお、計測結果の一部には、すでに発表されているものもあるが^{8)・9)}、本報告は全計測結果をとりまとめて考察を加えたものである。

2. 三次元変位測量システム³⁾の概要

一般の山岳トンネルの特に坑口付近の地表面の挙動観測においては、地山挙動は三次元的である。挙動の方向・程度について知るために、測点一点一点の挙動計測が是非必要となり、この計測が簡単に行える三次元地表面計測方法を適用した。表二にシステム構成を示す。実際の測定手順は以下のようになる。

- ① 本光波測定機を任意位置にセット
- ② 最低2点の基準点を測定



図一 三次元変位測量システム³⁾の概念図

- ③ トンネル坑口周辺等の地表面にメッシュ状に設置した測点となる反射シートの位置(3次元の座標値)を測定
 - ④ 一度で測定できない場合は、途中で仮基準点を設けて本光波測定機を移設して測定する
 - ⑤ その場でデータはデータコレクタに自動記録
 - ⑥ データコレクタは事務所内に携帯してコンピュータに接続し、計測データ整理システムにデータを転送
 - ⑦ 各種帳票の打ち出し
- 本研究で用いた変位測量システムは、もともと船舶や建築構造物などの構造上の観測点の座標を三次元的に精密に測量する事を目的として開発されたもので、それを特にトンネルの計測を対象として改善したものである。

このシステムの特徴は以下のとおりである。

- ① 一般測量に比べて測距精度が高く(特に沈下の計測精度は従来のレベル測量より標準偏差が1オーダー小さい)、また、視準後ただちに観測点の三次元座標を得られる機構を有したトータルステーションを用いている。
- ② トータルステーションを既知点に据え付ける必要がないので迅速な測量が可能である。
- ③ トンネル坑内外の変位計測結果が同一の原点をもつ座標系で容易に表される。
- ④ 計測点は安価な反射シートを用いるので、経済的に多数の計測点が設置できる。
- ⑤ 計測点の新設が容易であり、実際の挙動に応

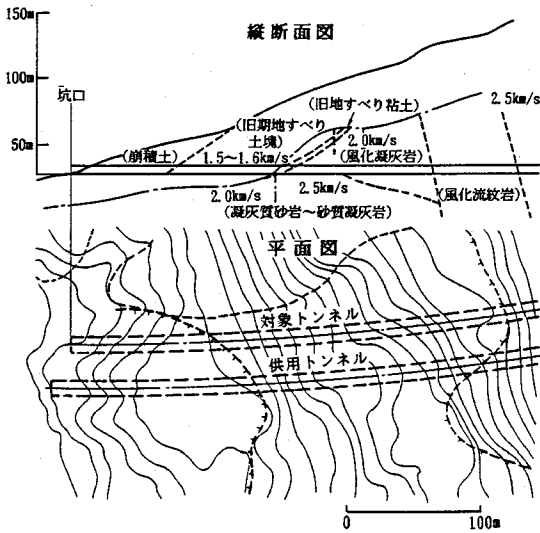


図-2 トンネル坑口部縦断および平面図

じて柔軟性のある変位計測が行える。

- ⑥ 測量結果を直接コンピュータに転送でき、地山の変形挙動が即座に図化される。具体的には、変位情報が見易いようにトンネルの任意の横断面・縦断面・平面に投影されたベクトル図で表示される。

図-1に本システムをトンネル坑口地山の変位計測に適用する場合の概念図を示す。

3. 計測現場の概要と計測点の配置

(1)現場の概要

計測を行ったトンネルの坑口部の地山は、図-2および図-3に示されるように、坑口から崩積土、旧期地すべり土塊、そして、旧地すべり粘土を介して、凝灰質砂岩～砂質凝灰岩、風化凝灰岩から構成される。崩積土は、風化作用が著しく土砂化し、岩質は手で割れる程度である。また、亀裂には粘土をはさみ、少量の水で泥状になる。旧期地すべり土塊は砂礫混じり灰色粘土と砂質凝灰岩からなり、風化作用を受けて変質している。粘土をはさんだ亀裂には、幅の大きい小断層が油目に沿って見られる。岩自体はハンマーでたたくと亀裂に沿って割れる。このような地質状況のため、トンネル掘削による変状と同時に斜面のすべりの再発が懸念された。

したがって、計測はトンネルの掘削に伴う通常の切羽周辺地山の安定性の評価のみならず、掘削によって斜面のすべりが誘発されないかを監視すること

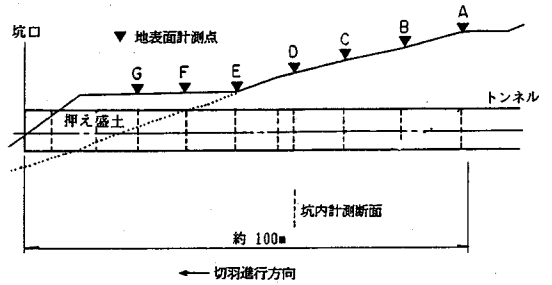


図-3 トンネル坑口部付近拡大図(縦断面)

表-3 坑口部支保パターン

	D III b	D III a-3	D II - 1
区間	0m~76m	76m~97m	97m~206m
支保工	H 2 0 0	H 2 0 0	H 1 5 0
ロックボルト	L=4m、8本	L=4m、8本	L=4m、18本
フォアボーリング	L=3m、18本	L=3m、18本	
吹付けコンクリート厚	25cm	25cm	20cm
覆工コンクリート厚	35cm	35cm	30cm
インバートコンクリート厚	50cm	50cm	50cm

が目的となる。その場合、地山の沈下や横断面内の変位挙動のみならず、トンネル縦断方向(坑口方向に向かう)の変位を計測することが重要である。すなわち、三次元計測を行う必要がある。

トンネルは自由断面掘削機とブレイカを併用した上部半断面先進ショートベンチカット工法で掘削した。参考までに、表-3に坑口部の支保パターンを示す。坑口から0~76m区間(支保D III b区間)では側壁導坑先進上部半断面工法(坑内深礎)、76~97m区間(支保D III a-3)ではウイングリブおよびH100による脚部補強工を用いた。さらに、D III b区間の地上部は斜面すべりの対策として押さえ盛土を施工した。

(2)計測点の配置

三次元変位計測のための測定点は、①坑外基準点、②地表面計測点、および③坑内計測点に分け次のように設置した(図-3および4参照)。

- ① 坑外基準点: 基準点はトンネル掘削の影響が及ばない位置に、工事用の測量基準点から測量して設置したが(図-2において左遠方)、この点は実際に測量する位置から見えないこともあるので中間点を設けた。中間点の座標は適時基準点を用いて測量した。
- ② 地表面計測点: 坑口部の斜面に、基本的に約12m間隔の格子状に40点配置した(図-5参照)。計測点は地表に打ち込まれた高さ約1mの木杭頭部に、反射シートを取り付けたものを

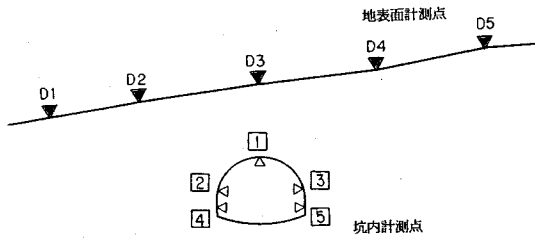


図-4 計測点の配置 (D断面)

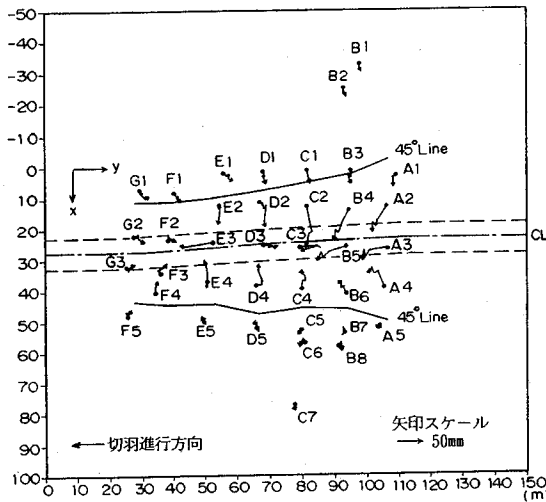


図-5 地表面変位ベクトル (平面図)

用いた。また、立木や岩に直接反射シートを取り付けた測点も利用した。計測されるべき量は測点の三次元変位であるが、直接的には基準点を原点とした計測点の三次元座標を測量し、その経時的な変化から変位を求めるものである。この他に、杭の上部に上下2ヶ所のターゲットをとりつけた計測点も設置したが、とくに杭の倒れと認められる動きはみられなかった。

- ③ 坑内計測点：通常のトンネルA計測の場合と同様に、横断面内の5点に計測点を設けた。図-4において、計測点①～③によって上半の3つの測線を、点④と⑤によって下半の水平測線を設定し、各点の座標値の変化から内空変位を得る。また、各点の座標を経時的に追うことから、天端沈下や脚部沈下を得ることができる。

以上のようにして計測点を設置し、坑内外の計測点の変位を、同一の基準点を用いてトンネル掘削の進行にあわせて計測した。なお、この場合坑口は出

口であるので、坑内計測における中間点は反対側坑口 (入口) を経て設置されるものとなる。

4. 本システムの坑口計測への適用性

ここでは、計測結果から得られた地山の変形挙動の特徴を一般的に述べ、計測結果に基づく地山の安定性評価については次章で考察する。

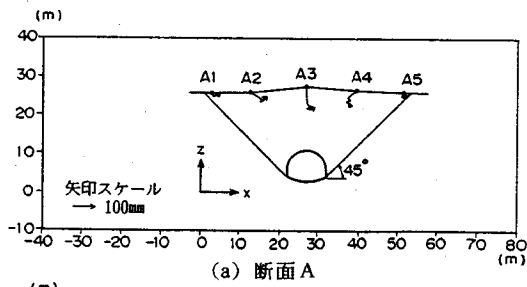
(1)地表面変位の生じる範囲

図-5に、トンネル掘削による地表面変位ベクトルの計測結果 (平面図) を示す。また、図-6(a)～(g)はトンネル横断面内の地表面変位ベクトルである。

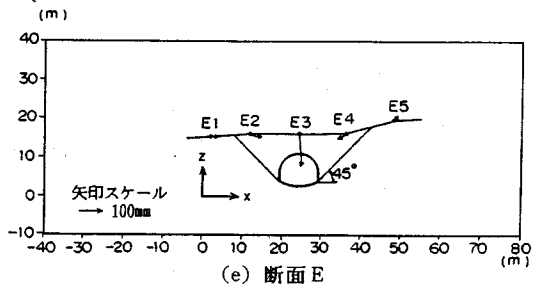
図-5において、「45° line」と示している実線は、トンネル横断面において、トンネル脚部から上向きに45°方向に伸ばした直線と地表面とが交わる点 (図-6参照) を結んだものである。地表面沈下の測定においては、一般に、この「45° line」の内側を測定範囲とし、その範囲外に不動点となるべき基準点を設置することが多いようである^{1), 2)}。しかし、図-5から明らかのように「45° line」の外側のかかなり離れた測定点 (たとえば、B1およびB2) においても10mm程度の変位がみられる。このことは、従来の地表面変位 (一般には沈下) の測定範囲は、地山やトンネルの施工条件によっては必ずしも適切ではないことを意味している。すなわち、不動点をトンネル上部周辺の地表面にとる場合、たとえ「45° line」の外であっても、実際には不動としないことがある。その点、本研究で用いた三次元測量システムは、不動点をトンネル掘削の影響が及ばないと考えられる十分に離れた位置にとっており、上記のような問題は生じない。しかも、このシステムでは遠方にある不動点を基準としても、迅速に測量できるので、本研究で対象とした地表面変位が生じる範囲が大きい現場においては、特に有効であるといえよう。

(2)横断面における地表面沈下形状の特徴

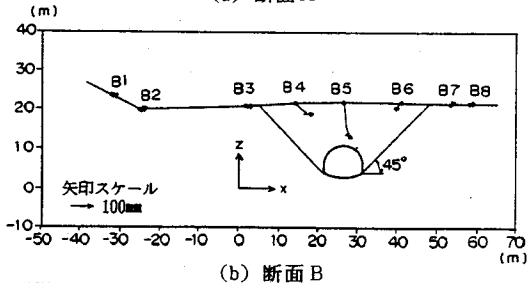
図-6において、いずれの断面もトンネル天端直上の地表面点の変位が非常に大きい。このような特徴は、土被りの小さいトンネルの特徴の一つと思われる。また、「45° line」より外の地表面では沈下より水平変位が卓越している。ここでは図-6に示された結果に基づいて、本トンネルの横断面内の地表面沈下挙動の特徴について考察する。まず、従来から現場計測や実験結果に基づき整理されているトンネル横断面内の地表面沈下の形状と本計測結果とを比較する。



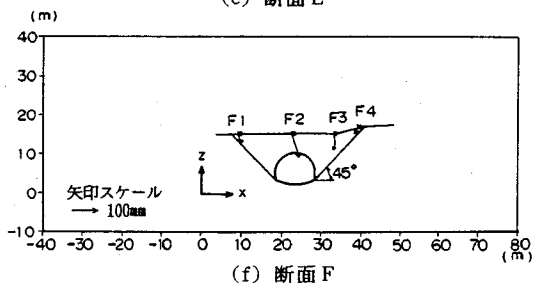
(a) 断面 A



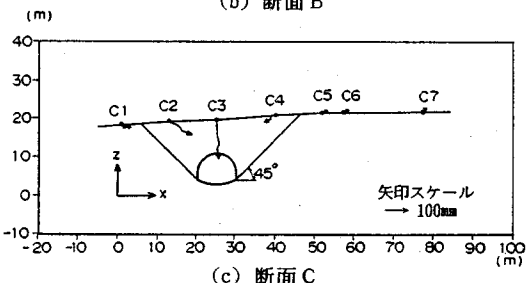
(e) 断面 E



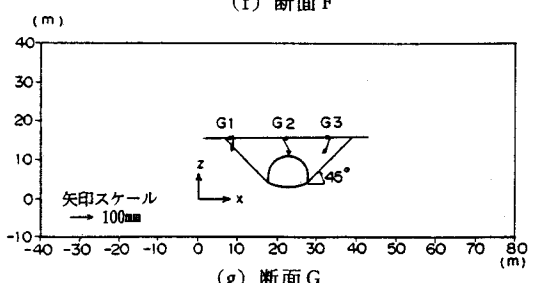
(b) 断面 B



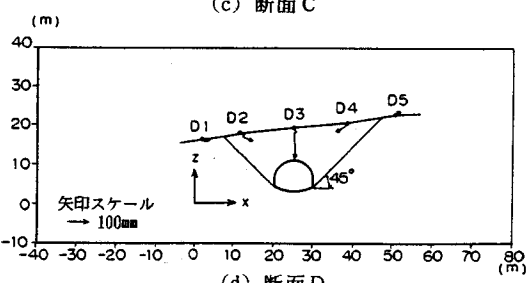
(f) 断面 F



(c) 断面 C



(g) 断面 G



(d) 断面 D

図-6 地表変位ベクトル (横断面図, 断面位置は図-3 参照)

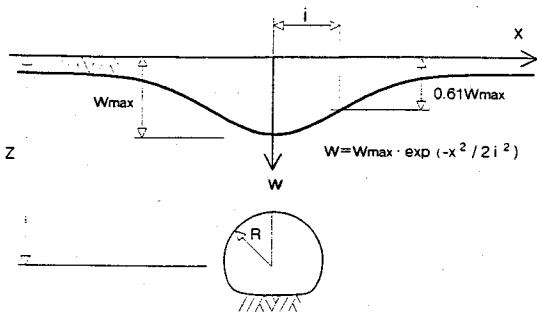
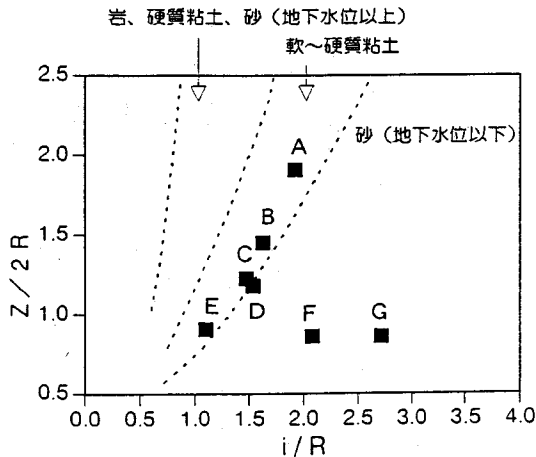


図-7 正規分布曲線で近似する沈下曲線

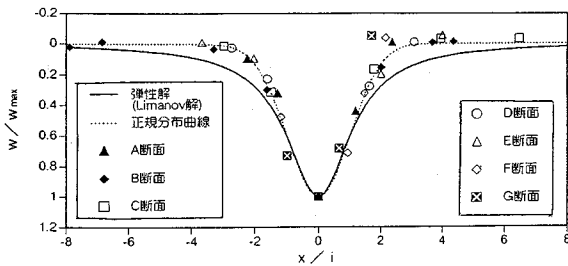
トンネル横断面内の地表沈下形状は、一般に図-7に示す正規分布曲線で近似される。Peckをはじめ多くの研究者は、この曲線に基づいて数々の現場計測結果を整理した^{10) - 13)}。図-7に示す記号を用いて沈下曲線を正規分布曲線で表すと次のようになる。

$$W = W_{max} \cdot \exp(-x^2 / 2i^2) \quad (1)$$

ここで、 i は正規分布の標準偏差に相当する量で、 $x=i$ の位置で沈下曲線は変曲点を迎え、沈下は $w=0.61w_{max}$ となる。 i の値はトンネル沈下形状を特徴づけるパラメータであり、トンネル半径 R と土被り Z を用いて、数々の現場計測結果に対して $i/R \sim$

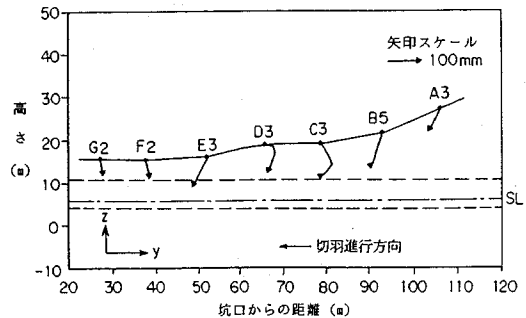


図一八 土被り比と地表面沈下のパラメータの関係



図一九 正規化した弾性沈下、正規分布曲線並びに計測結果の比較

$Z/2R$ 関係が求められている^{10)~13)}。本トンネルで得られた地表面沈下(図一六)に対して、最小自乗法を用いて i を求め、その結果を他の研究で得られた曲線とともに図一八に示す。いずれの断面においても、 i/R は1.0以上であり、沈下曲線の変曲点はトンネル断面外側の直上位置より外にあることがわかる。また、同図から本トンネルの地表面沈下の形状は、Peckらの分類するところの「軟らかい～硬い粘土」に属しており、計測区間の地山が崩積土、旧期地すべり土塊、粘土が介在している風化凝灰岩などから構成されていることを考えると、この沈下形状の特徴は概ね従来得られているものと一致すると考えられる。ただし、FおよびG断面では土被りが大きい割には、 i/R がかなり大きく、広範囲にわたって地表面は沈下していることがわかる(ここで Z はトンネル中心から地表面までの距離であり、厳密な意味で土被りではないが便宜上土被りと呼ぶ)。これはF、G断面は押さえ盛土区間であるため、トンネル掘削以外に盛土地盤の沈下の影響があったのではな



図一〇 トンネル中心縦断面の地表面変位ベクトル

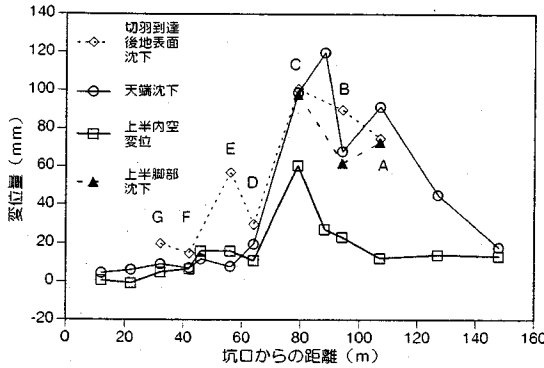
いかと思われる。それは、F、G断面では切羽が近づくかなり以前から沈下が始まっていることが計測されたこと、また、他の断面においては変位ベクトルはトンネル中心軸に向かっているのに対し、FおよびG断面の変位はトンネル軸上以外の測点においても鉛直方向の成分が他の断面に比べて卓越している(図一五および六参照)ことから推測される。

一方、有限要素法などによる弾性解析によって予測した地表面沈下形状は、土被りが小さい場合、実際の沈下形状より平坦であることが知られている¹⁴⁾。図一九に本トンネルの計測結果とLimanoの弾性解¹⁵⁾、ならびに式(1)の正規分布曲線をあわせて示す。いずれもトンネル天端直上の地表面の位置における沈下量で正規化している。同図からわかるように、弾性解析による沈下形状は実際の沈下形状を近似する正規曲線に比べて平坦で(傾きが緩い)、トンネル遠方まで掘削の影響が及んでいることがわかる。

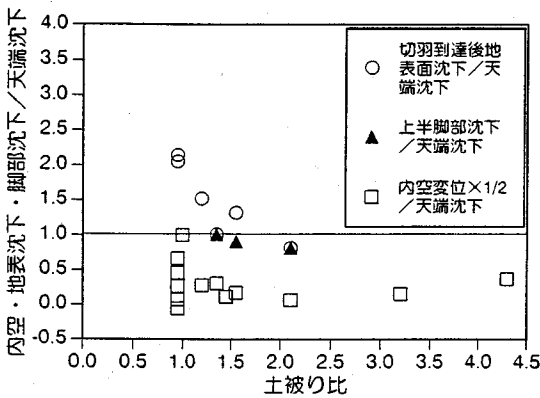
さらに、同図では、本トンネルで得られた計測結果は、F、G断面を除いて、ほぼ正規曲線上に分布している。したがって、本計測結果は従来の研究で得られたと同様の沈下形状の傾向を示しており、坑口付近の地山の沈下予測においても、足立ら¹⁴⁾が指摘しているように等方等質の弾性解析には限界があることを示唆している。しかし、これは弾性解析が無意味であるということではなく、適用の際にはその限界を知ることと、そして、事前予測を補うためにも現場計測が重要であることを意味している。

(3)縦断面における地表面変位の特徴

図一〇にトンネル中心軸付近の計測点の計測結果から得られるトンネル縦断面図内の地表面変位ベクトルを示す。同図において切羽は右から左に向かって進行する。この図から変位は3つのパターンに分類されるようである。



図一 1 1 地表面沈下・天端沈下・内空変位・脚部沈下計測値



図一 1 2 地表面沈下・内空変位・脚部沈下とそれぞれの天端沈下との比と土被り比との関係

① 弾性地山としての挙動

計測点C3およびD3のような、切羽の接近に伴い切羽に向かう変位が生じ（図中右向き）、切羽が通過すると向きを反転し切羽進行方向へ向かい（図中左向き）、最終的にはトータルの軸方向変位はほとんど生じないパターン

② 斜面の影響を受けた挙動

計測点A3およびB5のような、切羽の進行とともに単調にトンネル軸方向変位が図中左向きに増加するパターン

③ 盛土沈下が支配的な挙動

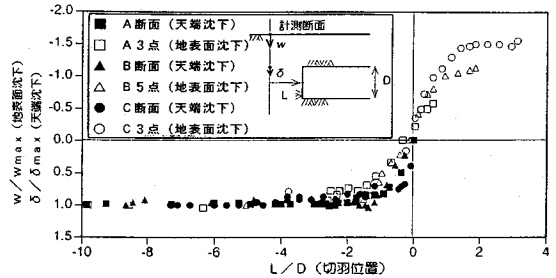
計測点F2およびG2のような、トンネル軸方向変位が小さいパターン

これらの変位挙動については5章において考察する。

(4)坑内計測結果と地表面沈下との関係

a)とも下がり

図一 1 1 に各計測断面における、切羽到達後の地表面沈下、天端沈下、上半水平内空変位および上半



図一 1 3 正規化した地表面・天端沈下量と進行距離（断面A, B, C）

脚部沈下（左右の脚部沈下の平均）の最終値を示す。この図からいずれの断面においても比較的大きい地表面沈下がみられるが、A～E断面では特に大きい。また、天端沈下や内空変位についても同様の傾向がみられる。

さて、一般に設計時に行われる弾性解析では、地表面沈下は天端沈下に比べてかなり小さいが（たとえば、Limanovの解の場合、地表面沈下/天端沈下は約50～60%）、土被りの小さいトンネルでは、両者は同程度の大きさとなることが知られている^{14)・16)}。このような現象は、「とも下がり」と呼ばれ、未固結地山における土被りの小さいトンネルの特徴的な挙動である。

本トンネルに対して、図一 1 1 の切羽到達後の地表面沈下と天端沈下との比を求め図一 1 2 に示す（図中○）。この図では土被り比（土被りをトンネル直径で除したもの）との関係で示している。この図からいずれの計測点においても地表面沈下と天端沈下の比はほぼ1あるいはそれ以上であり、特に盛土区間においてはかなり大きい。

また、同図には、A, B, およびC断面の上半脚部沈下と天端沈下の比をあわせて示している（図中▲）。この値はいずれの断面においても1.0に近い。また、同断面では上述のように、地表面沈下と天端沈下はとも下がる傾向を示している。これらのことより、上半脚部の沈下が、天端から地表面にかけて一体となって沈下する原因となる可能性がある。したがって、地表面沈下の抑制には脚部沈下を押さえることが重要であることを示唆していると考えられる。

さらに、壁面ひずみ比¹⁷⁾、すなわち上半水平内空変位の1/2値と天端沈下との比を示している（図中□）。ほとんどは1.0より小さく、0.3前後にある。本トンネルにおいては、垂直方向の変位が水平方向の変位より卓越していることを示している。

b) 地表面沈下および天端沈下と切羽距離との関係

図-13に、A、BおよびC断面の地表面沈下および天端沈下を切羽距離との関係で示す。この図は、地表面沈下・天端沈下をそれぞれの最終値で正規化したものである。A、B、Cいずれの測点においても切羽到達前の地表面沈下の傾向は異なるが、切羽通過後にはほぼ同様になることがわかる。これにくらべて天端沈下の傾向には相違がみられ、C断面でいくらか早期に沈下がみられるようである。しかし、切羽通過後、切羽距離が2~4Dとなる時点で沈下が収束するのが認められる。また、地表面沈下と天端沈下はそれぞれ、異なる断面においてもほぼ同様な曲線を描く。さらに、切羽通過前後で最大となる沈下の傾きは、天端沈下の方が地表面沈下の傾きより大きいようである。これは、横山らの示した、縦断面内における地表沈下と地中変位曲線の係^{18)、19)}と同様な結果となっている。

本章で示したように本測量システムを用いることにより、地山の三次元変位を比較的容易に測定でき、平面およびトンネルの横断と縦断の変位挙動を詳細に知ることが可能であることが示された。また、地表面とトンネル坑内を同じ基準点から計測できるため、両者を関連づけて評価することが容易となる。以上のことから、ここで用いた三次元測量システムは坑口地山の変位計測へも十分に適用できることが示された。

5. 計測結果に基づく坑口地山の安定性の評価

本章では、4章に示した計測結果に基づいて、坑口地山の安定性を、特に地表面の斜面すべりに対して評価する。

なお、以下に述べる内容は、現場において行った評価を基にして、本報告をまとめるにあたって、計測結果を再整理し、新たな考察を加えたものである。

まず、平面上で地表面の変位ベクトルを調べてみる。図-5では地表面の測定点が概ねトンネル中心線に向かう変位を示しており、トンネル軸方向の変位成分は、トンネル直上の計測点を除いて、他の成分に比べて小さい。しかし、坑口斜面の上部における計測点(A2~4およびB4~6、図-3および5参照)ではトンネル軸方向変位の成分がみられる。これは斜面の傾斜(図中、右から左に向けて低くなる)の影響を幾分受けたものと思われる。これに対して、斜面下部付近の断面C~Eでは、変位ベクトルはおおむね横断面内に収まっている。これは、斜面のり先に施工した押さえ盛土の効果と思われる。ただし、斜面と盛土の境界付近にある計測点E3においては、

坑口方向(トンネル軸方向)へ大きな変位が生じている。この原因については明らかではないが、周辺の地表面の変位と比較すると特異な挙動であり、計測点近傍の局所的な要因によるものと思われる。また、その変位は切羽が遠ざかるとともに収束したため、地山の安定性にかかわる挙動とは判断されない。

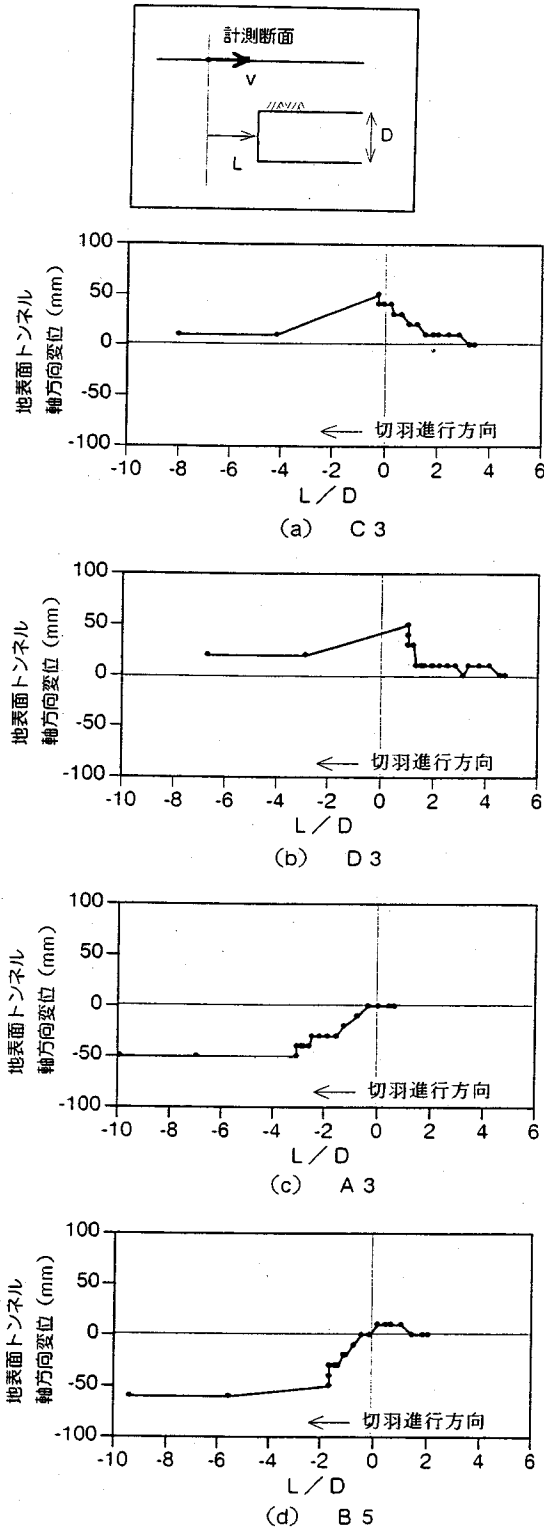
次に、トンネル中心軸付近の縦断面上の変位ベクトルを調べる(図-10参照)。4.(3)で述べたように、図-10において計測点C3およびD3はパターン1、すなわち、切羽の接近に伴い切羽に向かう変位が生じ、切羽が通過すると向きを反転し切羽進行方向へ向かい、最終的にはトータル軸方向変位はほとんど生じない、という特徴的な変位挙動を示している。そこで、両点のトンネル軸方向変位を切羽の進行との関連で整理すると図-14(a)、(b)のようになる。一方、図-15は三次元弾性解析による円形トンネルの軸方向変位(最大値で無次元化している)と切羽距離との関係を示した一例である(ポアソン比は0.3)。図-14(a)、(b)に示す計測結果は図-15の弾性解とほぼ同様の傾向を示していることから、C3およびD3点の変位はトンネル掘削による弾性的な挙動に支配され、斜面のすべりの影響は受けなかったものと思われる。

次に、計測点A3およびB5はパターン2、すなわち、切羽の進行方向とともに単調にトンネル軸方向変位が増加するという変位挙動を示している。図-14(c)、(d)に両点のトンネル軸方向変位を切羽の進行との関連で整理して示す。同図から掘削とともに単調的に切羽の進行方向に変位が生じていることがわかる。その挙動は、弾性体的な切羽進行の影響よりも、地表面の傾斜の影響をより強く受けたものと思われる。変位のベクトルの方向と旧地すべり面の方向との関係は明確ではないが(もし同方向であれば、トンネル掘削が誘因となって地すべりが生じた可能性がある)、変位は切羽が遠ざかると収束したことから特にトンネルの安定性に影響を及ぼすことはなかったと判断される。

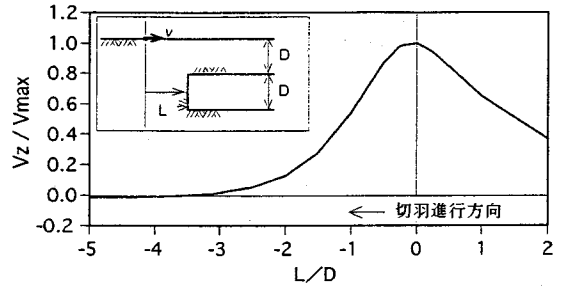
計測点F2およびG2はパターン3、すなわち、トンネル軸方向変位が小さい変位挙動を示している。先に述べたように、両計測点は盛土上にあるため、もともとの地山の挙動とは異なった特殊な変位が生じたものと思われる。両点の沈下も切羽進行とともに収束している。

以上のように計測結果の評価から問題となるような斜面のすべりは生じなかったものと判断された。

なお、トンネル内部については、若干大きい変位が生じた断面もあるが、いずれも切羽が遠ざかるにつれ収束し、また、管理基準値以下であり、安定性



図一14 トンネル軸方向地表面変位と切羽距離の関係 (計測結果)



図一15 トンネル軸方向変位と切羽距離との関係 (弾性解析結果)

を損なうような挙動は示さなかった。

6. 結論

本報告では、山岳トンネル坑口部の変位計測に三次元変位測量システムを用い、その適用性および地山安定性の評価について調べた。

本研究で得られた結果を以下に列挙する。

- ① 実際の工事環境の下で本システムを用いて、トンネル坑口部地山の三次元変位を計測することができた。
- ② 本システムでは基準点を十分遠くに設置しても迅速に測量でき、広範囲の地表面変位が計測された。また、地表面の傾斜がきつくと、測定エリアに毎測定時に入場するのが困難な施工場所に有効であった。
- ③ 3次元変位を計測することによって、地すべりの方向にとらわれることなく計測点を配置することができ、その結果、トンネル掘削による地山の変位挙動について詳細な検討を行うことが可能となった。
- ④ たとえば、地表面変位ベクトル（地表面沈下、トンネル横断・縦断方向変位）を計測したことによって、斜面部、平坦部、盛土部でそれぞれ特徴のある変位挙動が得られた。
- ⑤ 計測結果から、本トンネルの坑口地山においては、従来から得られている土被りの浅いトンネルの特徴的な変位挙動と同様な挙動を示したことがわかった。
- ⑥ また、得られた計測結果から坑口部の安定性の評価を行うことができた。

また、システムの有用性としては以下のものが挙げられる。これらによって、今回の変位はトンネル掘削に伴う地表面変位であり、地すべりの徴候としての動きではないとデータから判断できたので、トン

ネル掘削を安心して続けることができ、無事に貫通している。

- ① 地表面変位がトンネル掘削軸上で大きく、掘削軸を挟んでほぼ対象であること、地表面の傾斜に沿った変位が認められないことが確認できた。
- ② トンネル掘削に伴う先行変位が計測データとして確認できた。
- ③ トンネル内外の計測が同一の機械で行うことができ、同じテーブルで検討することができた。

以上のように、坑口施工管理への三次元変位測量システムの有効性が示されたが、本研究ではシステムを実験的に適用したため、計測点の配置や計測日が必ずしも計画的に設定されたわけではない。また、計測結果に基づく安定性の評価に対しても、現在のところ確立された方法や基準値はないため、過去に提案された考え方を適用したり、定性的あるいは経験的な判断によらざるを得なかった。したがって、計測結果の整理や評価が十分に満足されるものではなかったかもしれない。今後は、計測管理の目的と方法をあらかじめ明確にし、目的が達成されるように計測計画を綿密に組み立てることが課題と考えられる。

謝辞：本報告における図面の作成および弾性解析にあたって、山口大学工学部技官 坂尾和男氏、および同大学院学生 寺戸秀和君、鹿島の山根正樹氏の協力得た。ここに深く感謝する。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：NATMの計測指針に関する調査研究報告書，1983年3月。
- 2) 日本トンネル技術協会：山岳トンネルの坑口部の設計・施工に関する研究報告書（日本道路公団委託），1985年2月。
- 3) 銀治茂仁，田中政芳，古川浩平，中川浩二：山岳トンネルにおける新しい計測方法の開発とその適用，土木学会論文集，No.486/VI-22,pp.115-124,1994。
- 4) Chrzanowski,A.,Y.Q.Chen and J.M.Seord:*Geometrical analysis of deformation surveys*, Proc. Deformation Measurements Workshop(ed.Y.Bock),MIT Conference Services Office,pp.170-206,1987。
- 5) 大野睦雄，馬渡裕二・T.D.フィ. オアン：光波測距儀を用いた地すべり自動観測システム，建設の機械化，7,pp.41-44,1989。
- 6) 今村裕，鈴木敦巳，長沢元之，山口進吾，今西克之：自動監視システムによる地表面移動の測定，第24回

土質工学研究発表会，pp.249-250,1989。

- 7) 桜井春輔，岡野兼夫，清水則一，北村元：トータルステーションを用いた地盤変位計測手法の開発，建設工学研究所報告，No.32,pp.1-20,1990。
- 8) 西尾宗雄，千葉英治，笠川雅章，銀治茂仁，高橋祐治，島崎省二：トンネル坑口部の地すべり挙動解析に関する研究（第1報），土木学会第47回年次講演会，VI部門，pp.260-261,1992。
- 9) 千葉英治，井ノ川良弘，笠川雅章，田中久人，風間和則：高速道路のⅡ期線トンネルの施工実績について（供用トンネルに対する併進トンネルの施工），第10回土木学会新潟会研究調査発表論文集，pp.383-399,1992。
- 10) R. B. Peck : *Deep excavations and tunneling soft Ground*, Proc.the 7th Int.Conf.SMFE, State of the Art Volume,Mexico,pp.225-290,1969。
- 11) T. Hanya : *Ground movements due construction of shields-driven tunnel*, Proc. the 9th Int.conf. SMFE, Case History Volume,Tokyo,pp.759-790,1977。
- 12) J. H. Atkinson and D. M. Potts : *Subsidence above shallow tunnels in softground*, Journal ASCE, 103, GT4,pp307-325,1977。
- 13) 島田隆夫：土被りの浅い山岳トンネルの地表面沈下，土木学会論文報告集，No.296,pp.97-109,1980。
- 14) 足立紀尚，田村武，八嶋厚，上野洋：被りの浅い砂質地山トンネル掘削に伴う地表面沈下，土木学会論文集,370/Ⅲ-5,pp.85-94,1986。
- 15) 木山英郎，藤村尚：地下浅所トンネル掘削に伴う地表面沈下の弾性解析，土質学会論文報告集，22,3,pp.161-169,1982。
- 16) 横山章，高瀬昭雄：土被りの薄い未固結地山におけるトンネル掘削時の地山挙動，土木学会論文集，352/Ⅲ-2,pp.79-88,1984。
- 17) 桜井春輔，足立紀尚（共編）：都市トンネルにおけるNATM，鹿島出版，1988。
- 18) 横山章，堀内義朗，木村宏：被りの浅い砂質地山におけるトンネル掘削時の地山挙動，土木学会論文集，388/Ⅲ-8,pp.151-160,1987。
- 19) 横山章，堀内義朗，木村宏：トンネル掘削による土かぶりの浅い未固結砂質地山の挙動を特徴づける指標に関する研究，土木学会論文集，388/Ⅲ-8, pp161-170,1987。

(1995.3.7受付)

APPLICATION OF THREE DIMENSIONAL SURVEYING SYSTEM FOR MONITORING DISPLACEMENTS AROUND THE PORTAL AREA OF A TUNNEL

Shigehito KAJI, Muneo NISHIO, Eiji CHIBA, Norikazu SHIMIZU,
Kohei FURUKAWA and Koji NAKAGAWA

Displacements monitoring around portal area is required to detect sliding behavior at slope as well as ground subsidence due to tunnel excavations.

The authors applied the three dimensional surveying system using a high accurate total station to measure ground displacements around a tunnel. It was proven that the system is highly applicable to monitor the stability of portal of tunnel through the practical use.