

地層傾斜方向の違いによるトンネル掘削に伴う 地山挙動及び垂直縫地ボルトの作用効果

益田 光雄¹・城間 博通²・松井 幹雄³・進士 正人⁴・西村 和夫⁵

Mitsuo Masuda, Hiromichi Shiroma, Mikio Matsui, Masato Shinji and Kazuo Nishimura

¹正会員 株式会社熊谷組 土木事業本部トンネル技術部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町 2-1)

Email:mmasuda@ku.kumagaigumi.co.jp

²正会員 日本道路公団 試験研究所トンネル研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

³正会員 工博 前田建設工業株式会社 土木本部土木技術部 (〒179-8903 東京都練馬区高松 5-8 J. CITY)

⁴正会員 学博 山口大学 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁵正会員 工博 東京都立大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

Vertical reinforced bolting has been widely used for stabilizing the slopes at tunnel portals and around tunnel face. In this method, reinforcing bolts are driven into the ground loosening tunnelling. Though this reinforcing mechanism is known, no reasonable design technique has been established yet. Aiming at verifying its mechanism, the measurement data of a tunnelling project were re-organized and analyzed for review. This study demonstrated that, if the scale of vertical bolting meets the ground stabilizing conditions well, the ground behaves as a continuum, because of the ground integrating effect, thereby confining the ground displacement and settlement. A well-established design technique is desirable, for ensuring the continuum behavior of ground braced with vertical bolting.

Key Words: vertical bolt, tunnel, slope, slope collapse, ground arch

1. はじめに

垂直縫地工法は、山岳トンネル工事における切羽安定、地表面沈下および坑口部斜面对策と適用範囲が広いことから、施工実績も多い。当然、現場計測の事例も数多く報告されている。しかし、断片的なデータも多く、系統だったものは少ない。その理由のひとつは垂直縫地工法の作用機構が、補強材を適当な間隔で打設することにより地山の一体化を図り、トンネル掘削に伴うゆるみに起因する現象を抑制するといった概念で説明されているものの、従来の設計法は地山のすべり荷重に対して、実際には軸力が卓越する補強材の仮想せん断抵抗力を必要抑止力として斜面安定を保つという考え方をしている。そのため、現場計測の目的や評価が明確でないことから、計測が設計にフィードバックしていないと考えられる。

こうしたことから、現場計測データによる力学的作用効果の確認と検証を行い、垂直縫地工法の

合理的設計手法の検討を行うために、過去の施工事例の中で多種の計測が実施され、データも比較的多く記録されていたJR篠ノ井線第二白坂トンネル工事に着目し、計測データの再整理、見直しを行った。

本工事において実施された垂直縫地ボルト施工箇所は、図-2に示すように泥岩・砂岩の互層からなる地すべり地の沢部をトンネルが低土被りで通過する区間で、地層構造は傾斜角約35°で一方の斜面が差し目、反対側は流れ目の両側斜面である。そのため、現場計測位置には地層の傾斜方向の違いによると思われる特徴的な挙動が明らかとなったため、ここに報告する。なお、垂直縫地工の施工規模等については以下の通りである。

(垂直縫地工の施工規模)

- ・打設総延長：9,245.1m
- ・打設本数：833本
- ・打設間隔（横断方向）1.5m
（縦断方向）1.0m

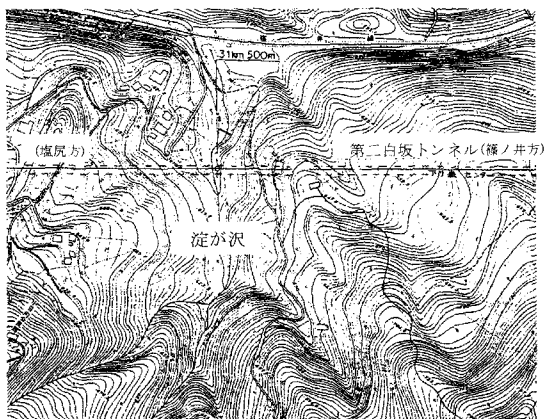


図-1 施工対象区間の地形²⁾

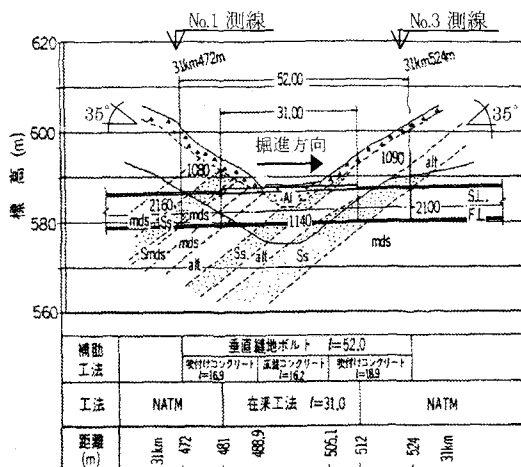


図-2 垂直縫地工区間縦断面図¹⁾

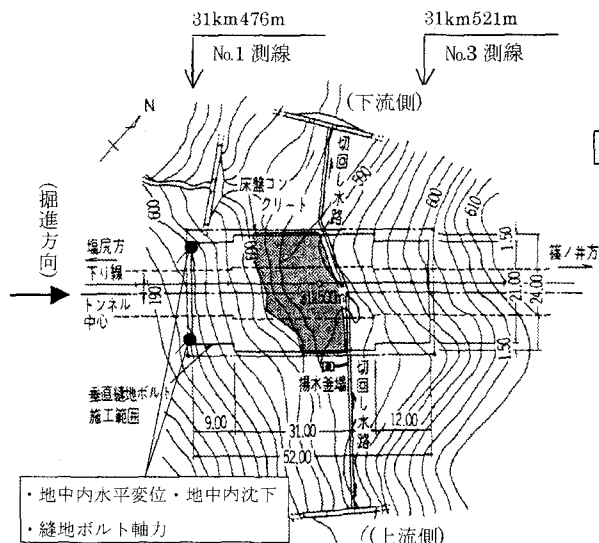


図-3 垂直縫地工区間平面図¹⁾

(垂直縫地工の仕様)

- ・穿孔径: $\phi 101.6$ 、86
- ・鉄筋径: D32
- ・充填材: セメントミルク (W/C=0.51)

(地山物性値)

すべり層となる地質は泥岩・砂岩互層

- ・上記地層の内部摩擦角 $\phi=30^\circ$
- ・同上粘着力 $C=2.0\text{t/m}^2$
- ・同上単位体積重量 $\gamma=1.8\text{t/m}^3$

2. 現場計測結果

(1) 計測項目

表-1 に計測項目一覧を示す。

表-1 計測項目一覧

計測項目	計測内容	計測機器
ボルト 応力測定	軸力 曲げモーメント せん断力	ひずみゲージ (単軸、2 軸)
地中内変位測定	地中内鉛直変位 地中内水平変位	地中変位計 地中傾斜計
地表面沈下測定	地表面沈下 地表面水平変位	レベル 地すべり計
NATM計測	天端沈下 内空変位	レベル 内空変位計

(2) 地表面沈下

地表面沈下の測定結果を3頁の図-5に示す。なお、地表面沈下計はNo.1、No.3 測線の地表面に7.5m 間隔で設置した。

a) No.1 測線— 31km476m (差し目盤斜面)

トンネル断面方向にトンネルセンターから両側15m 間の地表面沈下測定結果によると、切羽との距

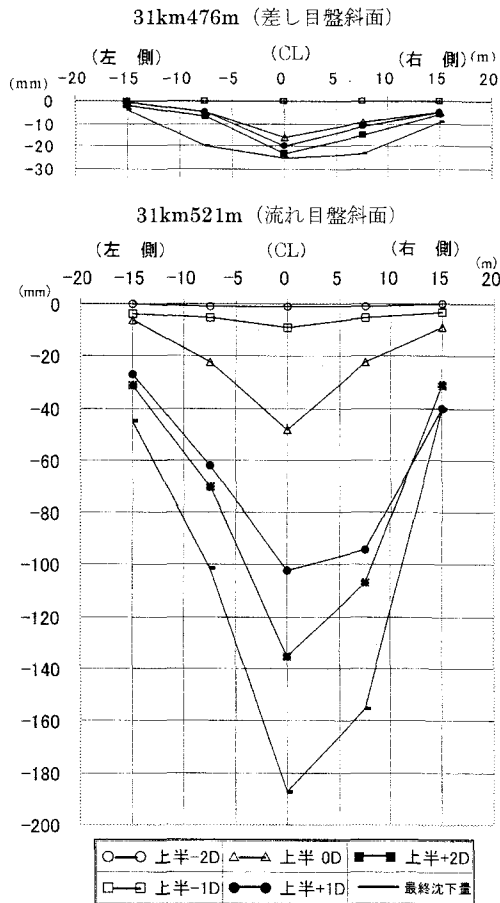


図-5 地表面沈下経時変位図²⁾

離が-0.5D に近づくまでほとんど動きは生じていないが、その後徐々に沈下し、上半通過時には全沈下量の50%に達している。しかし、最大値である最終沈下量でも25mmと地表面沈下は小さい。

b) No.3 測線-31km521m (流れ目盤斜面)

全体的に、沢部上流側にあたる右側の変位が大きい傾向にある。沈下量そのものが大きく、下半通過後もかなり沈下している。また、土被りはNo.1 測線とほぼ同じであるが下半通過後も沈下が継続しており、差し目盤斜面での変位と比べて大きな差があることが示された。

(3) 地中内水平変位

差し目盤斜面に設置した傾斜計による地中内水平変位測定結果をトンネル縦断方向は図-6、トンネル横断方向は図-7 に示す。なお、傾斜計はNo.1 測線のトンネルセンターから左右両側の7.5m 地点に設置した。

a) TL-1 (左側 7.5m)

全体的傾向としては、トンネル縦断方向の斜面方

向に沿った動きが卓越しており、特に崖錐部 (GL ~8m) での変位が顕著である。

b) TL-3 (右側 7.5m)

トンネル天端付近を境として上部層はトンネル縦断方向に、下部層ではトンネル横断方向の変位が卓越しており、TL-1 とは対照的な挙動を示した。地表面沈下の方

向と地中内水平変位の測定結果から、
・崖錐層である地表近くは斜面傾斜の影響を大きく受けた。

・トンネル天端付近では掘削による応力解放に伴い
右側から比較的大きな偏圧を受けた。

と考えられる。

(4) 地中内鉛直変位

図-8 に差し目盤斜面における地中沈下測定結果による深度別ひずみ分布を示す。なお、地中内沈下計はNo.1 測線のトンネルセンターから左右両側の7.5m 地点に設置した。

a) 31km476m 左側 (PV-1)

地表面沈下が比較的小さいことから、トンネル近傍の深さまで地中沈下はあまり認められない。しかし、切羽の進行に伴いトンネル天端付近から下半盤にかけて圧縮域が形成された。

b) 31km476m 中央 (PV-2)

切羽接近に伴い地表面から GL-4.0m には圧縮域が、また GL-4.0m から下層にはゆるみ域が形成された。特にトンネル天端付近の GL-7.5~9.5m では上半切羽通過直後に急激に大きな引張りが発生したが、支保工設置によりその後の増加は止まった。

c) 31km476m 右側 (PV-3)

特徴的な変位は SL 付近で上半切羽-1D より始まり+2D で収束した圧縮域である。後述の軸力計の値が降伏点を超過しており、GL-14m 付近に変位が集中して発生した。

(5) 軸力

図-9 に差し目盤斜面での軸力測定結果を示す。なお、垂直縫地ボルト軸力計はNo.1 測線のトンネルセンターと左右両側の7.5m 地点に設置した。

a) No.1 測点 (31km476m 左側 : PS-1)

GL~-5m までの各点 (-1、-3、-5m) での発生軸力は小さい。-5m 以深では、上半切羽-1D を境として-11m と-17m の2箇所を中心として圧縮力が発生している。上半切羽通過以降は上半天端より上部 (9m 以浅) は圧縮力が減少傾向となるのに対し、-11m と-17m 付近では圧縮力が増加している。

特に-17m 地点は上半通過後の圧縮力増加が最も大きく、下半通過時にはひずみゲージが破損する現

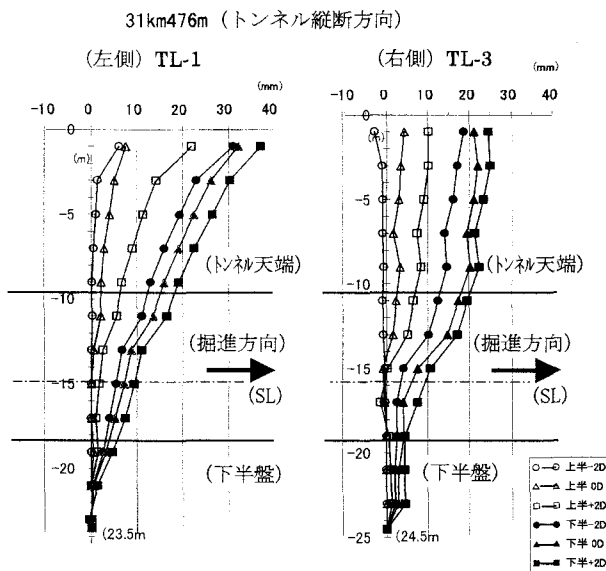


図-6 地中内水平変位経時変化図²⁾

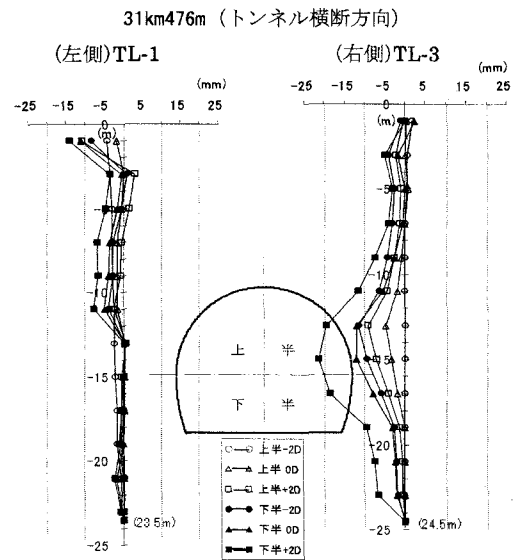


図-7 地中内水平変位経時変化図²⁾

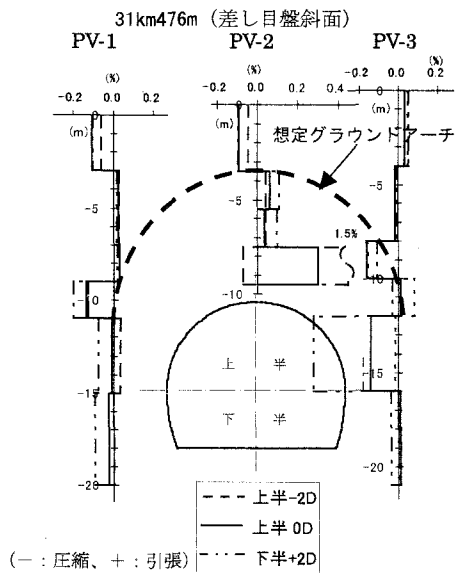


図-8 深度別地中内沈下ひずみ分布図²⁾

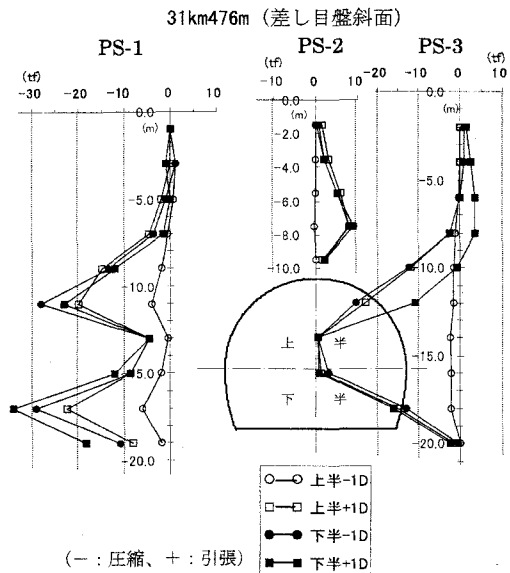


図-9 縫地ボルト軸力経時変化図²⁾

象が見られたこと、および-19m以深の地中水平変位が極めて小さいことなどから、GL-17m付近のトンネル側部が荷重分担しているものと思われる。

b) No.2 測点 (31km476m 中央 : PS-2)

上半切羽が-1Dに接近するまで軸力はほとんど発生していないが、上半切羽の通過直前に5.5m、7.5m地点で急激に引張りが増加し、通過直後にやや減少している。下半掘削の影響はほとんどなく、全ての点で引張りが発生しており、垂直縫地ボルトが地山を吊り下げて一体化していることがうかがえる。

c) No.3 測点 (31km476m 右側 : PS-3)

トンネル天端より下 (GL-10m) の各点では、上

半切羽-1D以後に圧縮力が急激に発生し始める。特に、-12、-14、-16mの増加が顕著で、SL付近では上半通過後ひずみゲージの測定可能範囲を超える挙動を示した。これに対して、地表付近のGL-6mまでは上半通過後に引張力が発生し、下半切羽の通過に伴いこの引張力はさらに増加傾向を示している。また、トンネル天端上部では下半切羽の接近通過に伴い圧縮力が急速に低減し、GL-8.0m以浅では引張り側に変移している。

上記の3測点とも地表面の近い層では最終的に軸力は圧縮力から引張りに反転していることから、垂直縫地ボルトがトンネル掘削により発生したゆるみ

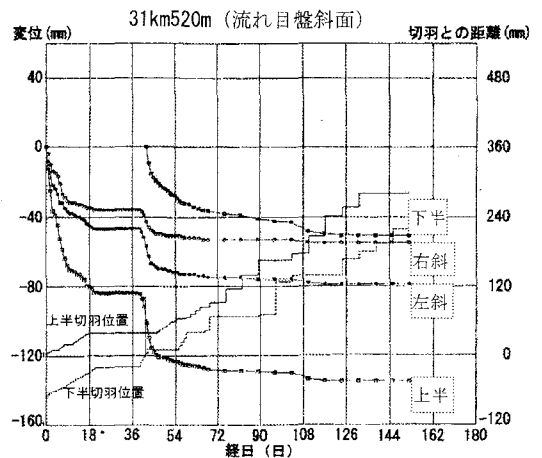
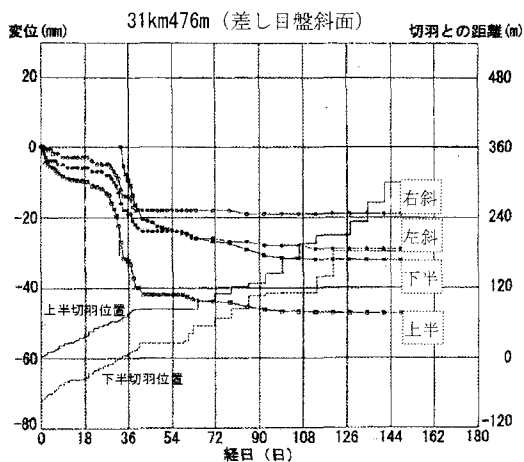


図-10 内空変位経時変化グラフ²⁾

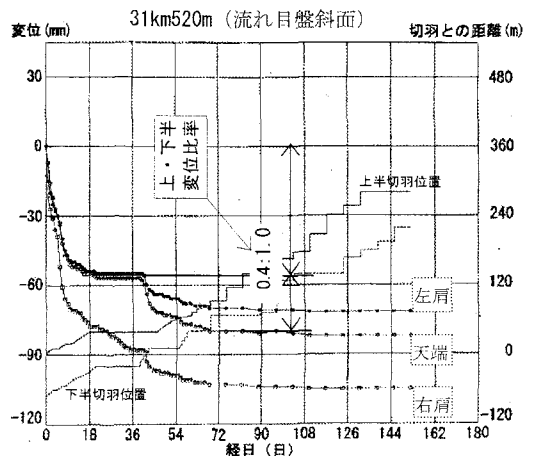
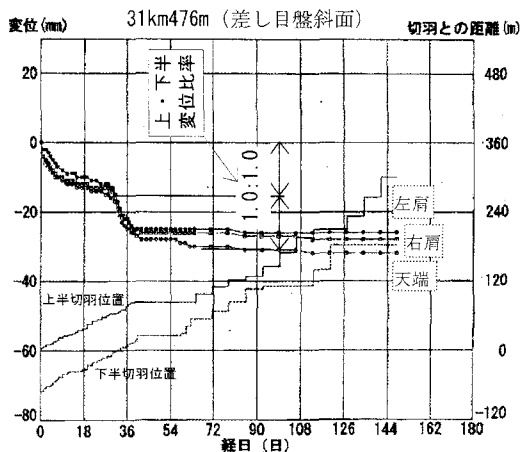


図-11 天端沈下経時変化グラフ²⁾

土塊を吊り下げている状態を示している。

(6) 内空変位・天端沈下

差し目盤斜面のNo.1 測線および流れ目盤斜面No.3 測線のトンネル計測断面の内空変位経時変化を図-10、天端沈下経時変化を図-11に示す。

内空変位、天端沈下ともにその大きさは差し目盤斜面の31km476m地点の方が小さく、かつ初期変位速度もはるかに小さい。

また、変位の発生状況は31km476m地点が下半切羽通過後2D以内でほぼ収束したのに対して、31km520m地点では2Dを過ぎても微少ではあるが変位が継続している。中でも図-11の(流れ目盤斜面)に示すように右天端(右肩)の沈下傾向はトンネル掘削を停止しても継続しており、地表面沈下にも同様の傾向があることから、流れ目盤斜面はかなり長い区間にわたり地盤支持力不足の傾向があったこと、

砂質泥岩と泥岩との層境の影響による挙動が見受けられるなど、全体に極めて地山状況が悪かったことが分かる。

3. トンネル掘進に伴う地山挙動

(1) トンネル縦断方向における地山挙動

a) 差し目盤斜面

差し目盤斜面での計測結果によると、図-9に示したようにトンネル天端付近(地表面からの深度-10~-12m)では上半切羽が1.0D付近まで接近すると縫地ボルトに軸力が発生し、トンネル中心部は引張り力、トンネル側部には圧縮力が作用しはじめる。また、地表面沈下については図-5にあるように上半切羽が0.5D付近に達するまでは、ほとんど変化を生じていない。

上半掘削時と下半掘削時のトンネル天端沈下の測定結果を比較すると、図-11の（差し目盤斜面）に示すように、上・下半掘削による変位発生比率はほぼ1.0:1.0となっている。しかし、図-5の（差し目盤斜面）によると地表面沈下量はわずかに増加した程度で下半掘削の影響はほとんど現れていない。また、地中内沈下（図-8）の上半切羽通過以降の変位状況についても上半+2.0Dから下半+2.0Dの間に下半部左側（-15m～-20m）と右側（-16m～-21m）区間で圧縮の増加があった他には変化がなかった。

さらに、図-9で示したようにトンネル中心軸上の縫地ボルト軸力測定においても下半切羽の接近に伴う変化はほとんどなかった。このことは、下半掘削の影響によりトンネル天端付近の地山は下方に変位したにもかかわらず、トンネル天端より上方の地山はほとんど変位していないことを示している。これは、縫地ボルトの効果により地山変位を拘束したものと考える。

トンネル切羽通過後はほとんどの計測結果が2.0D付近で収束しており、比較的早期に収束したといえる。このことは、地山を弾性体と考えた場合に切羽前方1.5D程度から影響が出始めて、切羽後方2.0Dで収束するといわれることと近似しており、トンネル掘削に伴う周辺地山はほぼ弾性体的挙動をしたと考えられる。

b) 流れ目盤斜面

流れ目盤斜面における地表面沈下測定結果によると、切羽前方2.0D程度から影響が現れ始め、-1.0Dからは著しく変位が増大している。また、下半掘削後の影響も顕著に現れている。

また、図-11の天端沈下（流れ目盤斜面）によると、上半掘削と下半掘削時の変位の比率は1:0.4となっているが、この地点での地表面沈下のほとんどが上半切羽通過時に生じており（157mm）、下半掘削時の変位量は少ない（34mm）。

このように流れ目盤斜面では地表面沈下が天端沈下より大きくなっているが、これは沈下量が大いこともあるが斜面に沿った下方への動きの影響が大きかったことを示していると思われる。

以上のことから、流れ目盤斜面では地山は弾性的挙動を示しておらず、かなり広範囲にわたり破壊され、地山劣化が生じたと考える。

(2) トンネル横断方向における地山挙動

a) 差し目盤斜面

差し目盤斜面では、図-6と図-7に示す地中内水平変位の測定結果によると左右で顕著な違いが生じて

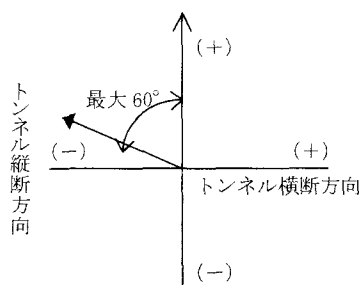


図-12 地中内水平変位測定による地山変位方向

いる。図-7に示す右側傾斜計（TL-3）ではトンネル天端より上部はトンネル縦断方向の斜面に沿った変位、すなわち斜面下方に向かった変位が卓越しているが、トンネル天端から上部約2mまでは変位方向がトンネル横断方向へ傾き始め、トンネル天端付近からは一層その傾斜が顕著である。図-12に示すように、縦断方向と横断方向とを合成した真の変位方向の角度は最大でトンネル軸に対して約60°の傾きになる。通常、平坦な箇所での傾斜計の測定値はトンネル縦断方向に対して90°変位することが一般であることからすると、斜面の影響を強く受けているといえる。

図-6に示す左側傾斜計（TL-1）は全ての深度において変位はトンネル縦断方向が卓越しているが、トンネル上部はわずかにトンネル側とは反対方向である左側に傾斜している。トンネル位置の深度ではほぼトンネル軸と平行に傾斜しており、右側がトンネル横断方向に顕著に変位しているのとは対照的である。

この結果から、地表面に近い部分は斜面に沿った動きをしており、深部では元来右側から左側に偏圧が作用しているものと考えられる。

傾斜計の計測結果ではトンネル天端から2m上方で異なった変位をしていることは上記に示したが、この傾向は垂直縫地ボルトの軸力分布にも同様な傾向が現れている。

図-9の縫地ボルトの軸力分布を見ると、トンネル天端上方2～3m付近から大きな圧縮力が生じ始め、特に右側ボルト（PS-3）において地表面から-14～-16mの深度ではボルト材の降伏荷重以上の力が作用している。また、下半切羽が計測点の手前約1.0Dに達した時点から、右側縫地ボルトの深度-8～-12m付近に生じていた圧縮力が急激に減少し始めた。

左側（PS-1）の軸力分布は上半掘削時に、深度-11mと-17m地点に大きな圧縮力が作用している。下半掘削時の影響は右側の計測結果とは逆に、深度-11mと-17m付近に生じている圧縮力は切羽接近によりさらに増大している。

トンネル中心上の縫地ボルト（PS-2）には左右の縫地ボルトとは異なり、引張り力が作用しており、下半掘削の影響は受けていない。

地中内沈下については、図-8 に示すように縫地ボルト軸力分布とよく合致している。右側（PV-2）の地中内沈下は、上半掘削に伴い地表面より深度-12～-16m 間、すなわちトンネルの側壁部付近のみ 区間変位量が顕著な圧縮となっている。また、下半掘削時点でこの圧縮域は深度-6～-21m 間に生じている。

左側（PV-1）の地中内沈下は、上半掘削時にはほとんど目立った動きはないが、下半通過後は深度-15～-20m 間に圧縮域が見られた。

以上の結果から、差し目盤斜面での地山挙動について考察する。

上半掘削後はトンネル形状が半円であることから、右側縫地ボルトの下端部（地表面より深度-16m 付近）の岩盤は掘削の影響をあまり受けず、上載荷重をこの部分で支えており、このことは深度-12～-16m 間の軸力が圧縮力で降伏応力を超えるほど発生していることから明らかである。縫地ボルト 1 本当たりが受け持つ面積から土荷重を計算するとおよそ 36tf となり、これは縫地ボルトの軸力とほぼ一致していることから、土被り分の土荷重全体が縫地ボルトに作用していることになる。

下半掘削後は側方荷重に対するトンネル側壁部の受圧面積が増大したこともあり、図-10 の（差し目盤斜面）に示すように上半で 10mm 程度であった内空変位が 45mm と急増した。トンネル掘削が下半盤まで行われて受動側の地山が小さくなったことによるもので、この変位の増加により側方へのゆるみが拡大し、縫地ボルトがトンネル断面側へ変位して反力が取れなくなったために軸力が大きく減少したものと考えられる。

前に述べたように、当地域におけるトンネル周辺地山は元来トンネル横断方向で右側から左側への偏圧を受けているものと想定される。傾斜計の測定結果にもあるようにトンネル掘削に伴う地山の動きは、平坦部での挙動と異なりトンネル内空側への変位となっていない。また、下半掘削によって内空変位の測定値は急増しているが、傾斜計のデータでは右側からの変位のみが大きく、左側に設置した傾斜計データによるとトンネル内空側への変位はほとんど発生していない。

したがって、トンネルの左側には下半掘削に伴う地山のゆるみは生じているものの、右側からの圧力は支保工を通じて左側地山を押すことにより地山内の圧縮力が高まり圧縮域が形成され、左側の縫地ボ

ルトの軸力が増大したものと考えられる。

図-8 の地中内沈下ひずみ分布を見ると、トンネルセンター上はトンネル壁面から GL-4m 程度まではゆるみ領域で、その上部は圧縮域となっている。NATM 計測におけるロックボルト軸力測定結果によると引張り力が出ているのはトンネル壁面から GL-4m 付近であり、両者の挙動はよく一致している。

当計測地点のように土被りが 1.0D 程度で地形的に斜面であるという条件下では、トンネル掘削に伴いグラウンドアーチの形成は困難であると想定されていたが、これらの計測結果からグラウンドアーチの形成が認められたと考える。

以上のように、差し目盤斜面では地山全体の挙動が弾性体的挙動をしており、下半掘削の影響が地表面にほとんど及んでいないことから、縫地ボルトの効果により地表に近い層にグラウンドアーチが形成され、安定した地山状況を作り出したと考えられる。

b) 流れ目盤斜面

流れ目盤斜面では切羽通過後も地表面沈下、天端沈下、内空変位とも収束せず、変形状況から周辺地山は破壊ひずみを超えて塑性化しつつあったものと考えられる。また、天端沈下よりも地表面沈下の方が大きくなったことは斜面方向への斜面すべり現象を起こしており、当初設定した縫地ボルトの規模では効果が不十分であったことを示しており、最終的にはトンネル断面の閉合により変位収束をみた。

4. 地層傾斜方向による垂直縫地ボルトの支保効果の相違

(1) 差し目盤の斜面

差し目盤斜面での計測結果によると、トンネル縦断方向ではトンネル天端部地山の沈下は切羽通過後 2.0D 程度でほぼ収束し、弾性範囲内での挙動を示した。

また、トンネル横断方向では、土被り 1.0D 程度の斜面ではトンネル掘削に伴うグラウンドアーチ形成は困難と想定されたが、トンネル側部の縫地ボルトへの大きな圧縮力発生、およびトンネル上方の地表面に近い地層が圧縮域となってグラウンドアーチの形成が認められるなど、縫地ボルト効果によりトンネル周辺地山が連続体的挙動を示した。

このように、差し目盤という斜面安定に対して有利な条件下では、当初の設計条件（地山物性値、地層傾斜角など）により設定された垂直縫地工の規模で十分に作用効果を発揮させることができた。

下に差し目盤の計測結果から判明した事柄を示す。

- ・差し目盤では斜面方向でのすべりに対する潜在力が比較的小さかったことから、縫地ボルトの効果によりトンネル周辺の斜面地山がほぼ弾性体的挙動を示し、トンネル掘削後の応力再配分により圧縮域およびグラウンドアーチが形成された。
- ・トンネル軸上の縫地ボルト軸力に引張り力が作用しており、縫地ボルトの地山一体化効果により沈下が抑制された。
- ・地表面に近いトンネル上部地山では、斜面方向の動きが卓越していた。
- ・沢部上流側となるトンネル切羽に向かって右側から偏圧を受けた。

(2) 流れ目盤の斜面

斜面安定に対して不利な条件となる流れ目盤斜面では、トンネル縦断方向では切羽通過後も地表面沈下、天端沈下、内空変位とも収束せず、周辺地山の変形は破壊ひずみを越えたものと考えられる。

また、天端沈下より地表面沈下が大きい斜面方向へのすべり傾向も現れ、設定した規模の縫地ボルトだけでは効果が不十分であり、結果的に圧縮域およびグラウンドアーチ形成による連続体的地山を作り上げて斜面安定を図ることはできなかった。

このように地質条件が不利な流れ目盤斜面では、従来からの設計手法では地山挙動を抑制する設計根拠に合理性がないため、安易な地山条件設定では施工規模が不足して効果が不十分、かつ大きな変状発生を許してしまうことになる。

5. 結論

同じ地山物性値として評価した差し目盤、流れ目盤斜面で同一規模の垂直縫地ボルトを打設した場合に、その効果に大きな差が出た。これは、トンネル縦断方向における地層傾斜方向の相違が斜面地山安定に与える影響の大きさの違いを示している。

このことから、地層傾斜方向が異なる差し目盤、流れ目盤斜面で垂直縫地工の効果を発揮させるためには、同一仕様で設定することには極めて問題があるといえる。

垂直縫地ボルト打設による地山安定効果とは、地山一体化によるグラウンドアーチおよび側部の圧縮域形成により周辺地山が連続体的挙動をすることにより変位・沈下を抑制するものであると考えられる。

設計で考慮すべき観点は、垂直縫地ボルトによる地山一体化効果における地山物性値の向上あるいは低下抑止効果の把握であると考えられる。

斜面すべりに対する必要抑止力による設計手法は、都市部などでの低土被り区間における地表面沈下対策としての設計検討への適用は合理的ではなく、また斜面でのすべり荷重算定のためのトンネル掘削による地山物性値低減率についても合理的な根拠は考えにくい。

こうしたことから、垂直縫地工のより合理的な設計に向けて縫地ボルトの作用効果である地山一体化効果の解明を行い、地山の連続体的挙動を確保させることにポイントをおいた設計手法が今後必要と考える。

参考文献

- 1) 伊藤輝一、岩田始典、石丸憲次、明吉幹雄：膨張性地山に挑むNATN―篠ノ井線第2白坂トンネル(2)、トンネルと地下、第18巻6号、pp-7-16 1987.6
- 2) 榎熊谷組 明科作業所：篠ノ井線明科工区第2白坂トンネル工事誌、1988.3