

低土被り土砂地山トンネルの掘削時挙動の分析

Analysis on Behavior of Soft Ground Tunnels with Low Earth Covering during Excavation

北川隆¹・後藤光理²・磯谷篤実³・野城一栄⁴・松長剛⁵

Takashi Kitagawa, Mitsutaka Goto, Atsumi Isogai,
Kazuhide Yashiro and Takeshi Matsunaga

¹正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 九州新幹線建設局 (〒812-8622 福岡市博多区祇園町2-1)

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 東北新幹線建設局 (〒020-0034 盛岡市盛岡駅前通1-41)

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計技術部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

⁴正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

⁵正会員 パシフィックコンサルタンツ トンネル部 (〒163-0730 新宿区西新宿2-7-1)

We analyzed geological features and measured data of soft ground tunnels with low earth covering to study behavior of those tunnels during excavation. As a result, we found that 1) crown settlement depended on earth covering and stratification, 2) surface settlement of soft ground tunnels with low earth covering is equal to crown settlement and foot settlement, 3) horizontal distribution of surface settlement of soft ground tunnels with low earth covering is limited.

Key Words : tunnel, excavation, soft ground, low earth covering, measured data

1. はじめに

経済性や補助工法の技術開発に伴い、最近では低土被り土砂地山トンネルにも山岳工法が採用される事例が増加している。山岳工法は、経済性の他、工事中の公害防止の面でもシールド工法や開削工法よりも優れる工法であるといえるが、切羽を開放して掘削するため、地山の剛性が小さい低土被り未固結地山では以下のような課題がある。

①切羽が不安定になりやすい

②変形（特に沈下）が大きくなりやすい

これらの課題に対しては補助工法により対策がなされているが、補助工法は、施工段階において現場単位で地山に応じて個別に検討がなされることが多く、設計段階において統一的な基準に基づき計画されることは少ない。すなわち、補助工法の設計は、試行錯誤的、経験的になされている部分が多いのが現状である。

本報告は、低土被り土砂地山における補助工法の選定に対する基礎的な知見を示し、将来的には補助工法の選定指標を提案することを目標として、低土被り土砂地山トンネルの掘削時挙動の分析をおこなった結果についてまとめたものである。

2. 地質状況とトンネルの設計

(1) トンネルの概要

現在建設中の東北新幹線（八戸・新青森間）のうち、青森県東部の八戸・七戸間には、低土被りの土砂地山を貫くトンネルが12本存在するが、そのうちの多くはNATMにより施工されている。この中で、延長の長い、五戸¹⁾、六戸²⁾、三本木原^{3,4)}、牛鍵^{5,6)}の4トンネル（全長8.2km）を研究の対象とすることとした。

この区間の地形は第四紀更新世に形成された台地および段丘群である。土被りは5～45mで、特に六戸トンネル、牛鍵トンネルで小さく、10～20m程度となっている。

地質は、新第三紀鮮新世から第四紀更新世にかけて堆積した細粒分含有率が低く粒径の均一な未固結の砂層を主体として、同時期に堆積したシルト層が互層として分布している。また、表層には八甲田山由来の火山灰層が堆積している。

この区間の地質平面図を図-1に、この区間のトンネルの概要を表-1に示す。なお、地質縦断面図については、図-4～7にて後述する。



図-1地質平面図

表-1トンネルの概要

トンネル名	延長 (m)	平均 土被 (m)	地質	主な補助工法
五戸	1,090	22	第四紀 更新世 の砂 層・シ ルト層 を主体	フットパイル
六戸	3,810	13		ディープウェル(DW)
三本木原*	1,265	23		DW, 長尺鋼管先受
牛鍵	2,070	8		地盤改良, DW 鋼管鋼矢板先受 サイドパイル

※：三本木原トンネルについてはNATMで施工される区間のみ

表-2 代表的な地山の物性値

	表層・ローム	シルト層	砂層
N値	0~10	10~50	24~50
湿潤密度 γ_t (g/cm ³)	1.37~1.65	1.53~1.63	1.74~2.00
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.59~2.74	2.56~2.66	2.63~2.83
含水比 w (%)	49.7~113.5	45.9~75.8	18.8~39.8
間隙比 e	1.55~3.15	1.45~2.01	0.69~1.12
細粒分含有率 F_c (%)	64.4~92.3	60.3~92.9	6.8~23.9
相対密度 D_r (%)	—	—	92~135
均等係数 U_c	—	—	0.7~1.1
一軸強度 (kPa)	32~279	202~422	—
内部摩擦角 (°)	—	—	30~40
粘着力 (kPa)	32~73	300	0~80

(2) 地質の状況

表-2に代表的な地山の物性値を示す。これは、ボーリング調査や切羽でサンプリングされた試料について実施した室内試験の結果をまとめたものである。なお、各トンネルの切羽付近の深度の試料についてのみまとめている。ここで、地質はトンネルによって少しずつ異なり、必ずしも同じ地層が出現している訳ではないが、考察を容易にするために、表層・ローム、シルト層、砂層、の3種類に工学的に分類することとした。

砂層については、細粒分含有率が低く粒径のそろ

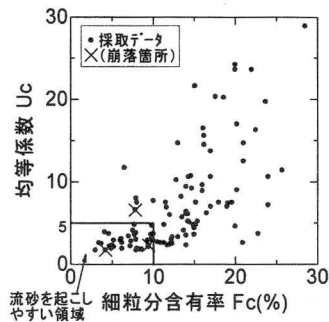


図-2均等係数、細粒分含有率の分布

った未固結の砂層を主体としており、地山の流動化が生じやすい地山となっている。細粒分含有率 F_c 、均等係数 U_c の分布を図-2に示すが、 F_c は5~20%程度、 U_c は概ね3~10程度に多く分布しており、一般に流砂を起こしやすいといわれている $F_c < 10\%$ かつ $U_c < 5$ の領域にも多くの試料が入っている。後述するが、いくつかのトンネルにおいては掘削中に崩落を生じており、崩落箇所の試料もこの領域に近いところに位置していることがわかる。なお、相対密度は概ね80%以上であり、文献⁸⁾によれば、地山等級 $I_{LS} \sim I_N$ に分類される。

シルト層については洪積粘性土からなっている。一軸強度は300kPa程度と大きくなく、また、N値も10~50と幅広く分布するが、全体的に過圧密となっており、また、深度が大きくなるとN値も大きくなる傾向にあり、シルト層そのものはトンネルの安定に大きな問題を与えることはない地質である。

(3) 設計

図-3に代表的な断面を示す。断面は標準的な新幹線複線断面であり、全区間インバートが施工されている。鋼製支保工はH・125~H・150、吹付けコンクリートは厚さ15~20cm、ロックボルトは8~12本/断面と砂質土地山における一般的な諸元となっている。また、文献⁸⁾における地山等級 $I_{LS} \sim I_N$ の場合の一般的な諸元ともなっている。

補助工法については、先受工については、天端や切羽が比較的安定している区間はフォアポーリング等の簡易な先受のみを併用して掘削しているが、天端が不安定な区間(三本木原トンネルや牛鍵トンネルの一部区間等)においては、注入式鋼管長尺先受工や鋼管鋼矢板先受工を併用して掘削を行っている。その他、沈下大きい箇所においては鋼管によるサイドパイルやフットパイルも併用している。

なお、トンネルによっては地下水位が高く、ディープウェルやウェルポイントの地下水位低下工法を併用して掘削している区間がある。

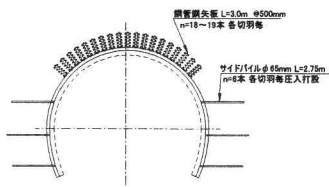
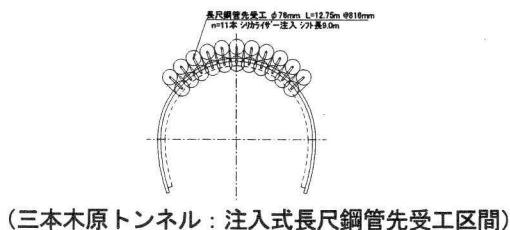


図-3 代表的な断面

3. 各トンネルの概要

ここでは、各トンネルについて、地形、地質と、内空変位（水平内空、天端沈下）の関係について整理することにする。なお図中の横軸は東京起点のキロ程を示しており、右方向が終点（新青森）方となる。なお、これ以降特に断りのない限り、内空変位についてはインバート掘削後の最終の収束値である。

(1) 五戸トンネル¹⁾

五戸トンネル（図-4）は、土被りは10~30m程度と比較的大きく、トンネルが位置する深度にはシルト層が互層として分布している。詳細に見ると、起点方ではシルト層が「カバーロック」として上半に出現する一方で、終点方では切羽内にシルト層が挟み層として出現し、湧水による泥ねい化、沈下量の増加が生じた。キロ程602k791mにて切羽崩落が生じており、この付近で沈下、変形が特に大きくなっていることがわかる。

(2) 六戸トンネル²⁾

六戸トンネル（図-5）は、一部ピート層が分布している区間を除き、ほぼ全線にわたって、全断面が比較的固結した砂層に収まる状況にある。ただし、土被りは全線にわたって10m~20mと小さくなっている。内空変位は一般に他のトンネルと比べて小さいといえるが、ピート層が出現した区間では大きな沈下を生じている。

(3) 三本木原トンネル^{3,4)}

三本木原トンネル（図-6）は618k800mより終点方をNA TMで施工した。土被りは10~45mとこれらのトンネルの中では最も大きい。地層構成は619k500mを境に大きく変化し、起点方ではシルト層が「カバーロック」となっているが、終点方ではシルト層と砂層との位置関係が逆転している。起点

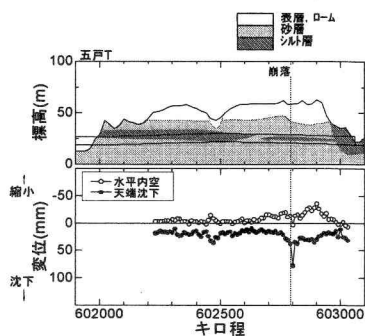


図-4 トンネル内空変位（五戸トンネル）

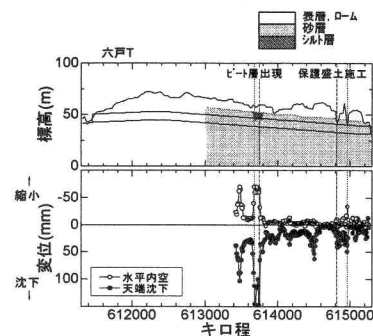


図-5 トンネル内空変位（六戸トンネル）

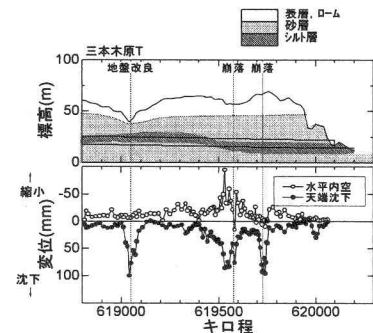


図-6 トンネル内空変位（三本木原トンネル）

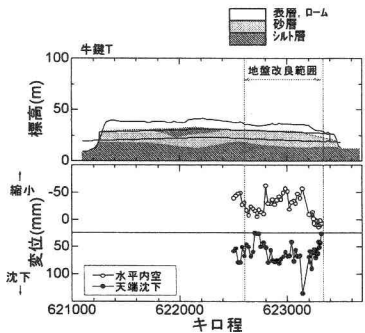


図-7 トンネル内空変位（牛鍵トンネル）

方については、沢部において腐植土が堆積しているため、天端部を地盤改良したにもかかわらず沈下が大きくなったことを除けば、崩落もなく安定して掘

削ができています。また、内空変位も小さい。一方で、終点方については、ラミナが発達した地層となっており地下水位を十分に下げられず切羽からの湧水が多かったことも相まってほぼ全線にわたって切羽が不安定となり、長尺鋼管先受工（注入型AGF）を使用して施工した。崩落も2回発生し、内空変位も大きくなっていることがわかる。

（4）牛鍵トンネル^{5,6)}

牛鍵トンネル（図-7）は土被りは概ね10m程度以下とこれらのトンネルの中では最も小さい。トンネルが位置する深度にはおもに砂層が分布するが、622k000m付近ではシルト層が互層として出現している。砂層についてはこれらのトンネルの中で堆積年代が最も新しく、固結度が小さくなっている。このため、622k600m付近から終点方はトンネル上部を一旦開削し改良を行った後にNATMで掘削する工法を採用した。

土被りが最も小さく固結度も最も低いという条件であるため、水平内空、天端沈下の平均値についてはこれらのトンネルの中で最も大きくなっている。

4. 計測結果

これらのトンネルにおいては、内空変位や地表沈下、地中変位等について計測が数多く実施されている。ここでは、計測結果のうち沈下を示す指標である、天端沈下、地表沈下、地中沈下に着目してデータの分析を行った。

4.1 天端沈下

（1）切羽地質と天端沈下との関係

まず、天端沈下に着目して考察を行った。2.でも述べたように、切羽地質と切羽の安定性には関連があると考えられる。切羽地質の特性値として、均等係数 U_c 、細粒分含有率 F_c をとり、これらが天端沈下に与える影響について調べることにした。

図-8に均等係数、細粒分含有率と天端沈下量との関係を示す。これより、 U_c については弱いながらも天端沈下量と相関があり、 U_c が小さくなると天端沈下量が大きくなる傾向が見られたが、 F_c については、天端沈下量とほとんど相関がないことがわかった。ただし、天端崩落箇所については、 U_c 、 F_c ともに小さく、また天端沈下も大きいことは確認できる。切羽地質については、切羽の不安定化を通して沈下量の増大に関連するとは考えられるが、天端沈下量そのものについては、切羽地質と天端沈下にはそれほど強い相関は見られなかった。

（2）土被りと天端沈下との関係

図-9に土被りと天端沈下量との関係を示す。文献

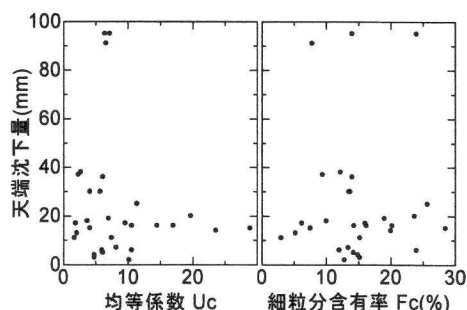


図-8 均等係数、細粒分含有率と天端沈下量との関係

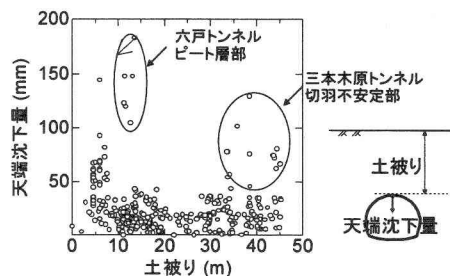


図-9 土被りと天端沈下量との関係

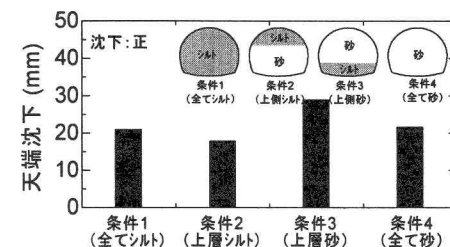


図-10 地層構成と天端沈下量の平均値との関係

⑨によれば、土被り比が小さくなるに従って天端沈下が大きくなるとされているが、六戸、三本木原トンネルの一部区間を除けば、今回の対象トンネルにおいても同様の傾向が見られた。ただし、図からもわかるように、トンネルによって土被りに偏りがあり、トンネル毎の個別の特性が強く表れてしまっている可能性があることには留意する必要がある。

（3）地層構成と天端沈下との関係

図-4～7において示した各トンネルの概要から、トンネルの沈下は切羽地質、土被り等の地形条件以外に地層構成にも密接に関連していることが予想される。ここでは、簡単のため切羽の地質を砂層、シルト層に分け、両者の位置関係により地層構成を条件1～4の4タイプに分類し、切羽の地層構成とトンネルの沈下・変形の間関係を調べることにした。なお、この際、地盤改良を行った区間やピート層が出現した区間については特殊区間と考え、除外している。

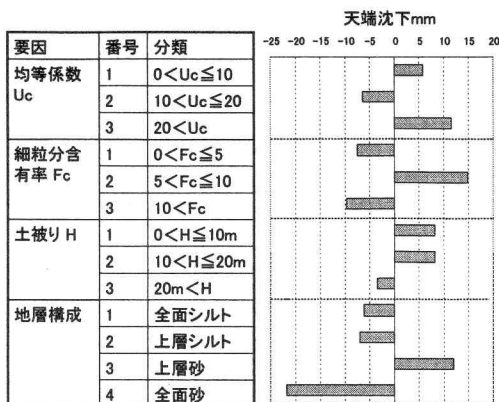


図-11 数量化Ⅰ類による分析結果

図-10に、地層構成と天端沈下量の平均値との関係を示す。図より、天端沈下の最も大きいのは条件3の、互層区間で上部に砂層、下部にシルト層の組み合わせで、それ以外の条件1, 2, 4についてはそれよりも小さくなっている。これは、条件3についてはシルト層の影響で地下水位低下工法の効果が小さくなり、切羽に帯水しやすく、脚部の泥ねい化、天端の不安定化が生じやすくなるためと考えられる。条件2, 4については、条件3と比較し地下水の処理が容易であるために沈下が小さくなっていると考えられる。また、条件1については、切羽がシルト層で覆われ、もともと湧水が少ない条件であるためと考えられる。ただし、条件1については、いわゆる土丹のような過圧密状態のシルト層である場合は問題は少ないが、ピート層のような圧密・圧縮性のシルト層である場合は沈下の問題が生じた。

(4) 数量化Ⅰ類による分析

以上のように収集したデータについて、数量化Ⅰ類による分析を実施した。数量化Ⅰ類は多変量解析手法の一つで、目的変数が数量データ、説明変数がカテゴリーデータの場合の現象の解明、予測手法である。図-11左に説明変数のカテゴリー化を示す。説明変数を天端沈下量にとり、カテゴリー化された U_c , F_c , 土被り H , 地層構成を説明変数として、数量化Ⅰ類により天端沈下量に関するカテゴリースコアを求めた結果が図-11右である。右側にあるほど天端沈下を起こしやすい説明変数であることになる。サンプル数が少ないので今後データの蓄積により精度を上げていく必要があるが、これより、天端沈下に有意に有意な影響を与えるのは土被り H と地層構成で、土被りについては小さいほど天端沈下量が大きく、また、地層構成については、条件3の互層区間で上部に砂層、下部にシルト層の組み合わせで天端沈下が増加することが確認できた。

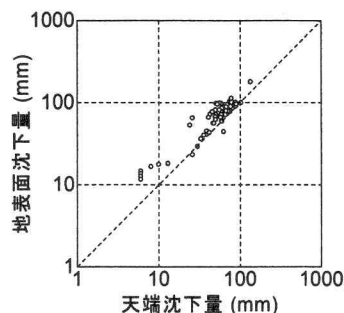


図-12 天端沈下量と地表面沈下量との関係

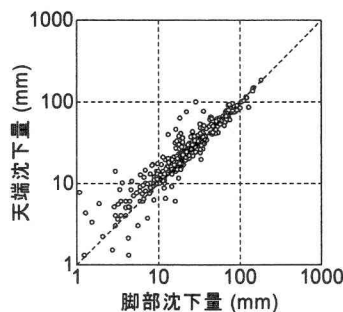


図-13 脚部沈下量と天端沈下量との関係

4.2 地表面沈下

次に地表面沈下に着目して考察を行った。

(1) 沈下挙動

図-12にトンネル坑内の内空変位計測により得られた天端沈下量とトンネル直上部地表面の沈下計測から得られた地表面沈下量との関係を示す。天端沈下量には切羽が到達する前の沈下分や、掘削開始～計測開始までの沈下分が含まれないため、天端沈下量は地表面沈下量より小さくなる傾向にあるが、両者はほぼ同様の値を示している。

図-13に脚部沈下量と天端沈下量との関係を示す。図より、脚部沈下量と天端沈下量はほぼ等しいことがわかる。図-12, 13より、当該区間のトンネルにおいては、「地表面沈下量」≒「天端沈下量」≒「脚部沈下量」という「とも下がり現象」が生じ、グラウンドアーチが形成されにくい状況にあることが確認された。

(2) 土被りの影響

図-14に土被り比（土被り H /直径 D ）と地表面沈下量との関係を示す。一般に、土被りがある程度以上あればトンネル掘削によって地山内にグラウンドアーチが形成されるので、地表面沈下は小さくなるとされている。六戸トンネルの一部区間では、ピート層が出現したため土被り比が1.5程度あるにもかかわらず沈下が大きくなっているが、これを除

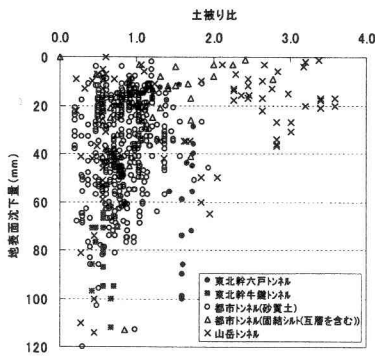


図-14 土被り比と地表面沈下量との関係
(文献⁸⁾に加筆)

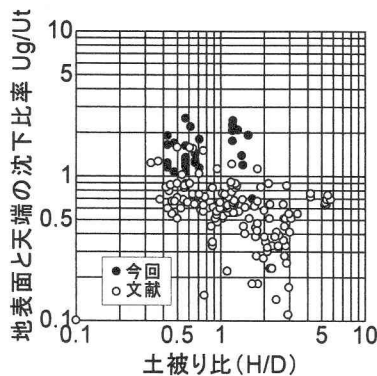


図-15 土被り比と沈下比率の関係 (文献⁹⁾に加筆)

けば、既存のデータと同様、土被り比が小さい場合は地表面沈下量が大きくなる傾向が見て取れる。

図-15 に土被り比と沈下比率 (地表面沈下量 U_g / 天端沈下量 U_t) との関係を示すが、沈下比率は1程度ないし1以下となっているデータが多く、地表と天端が一緒に沈下し、グラウンドアーチが形成されにくい状態にあることが確認できる。なお、当該区間は土被りが小さい区間が多く、既存のデータと比べてもとも下がり傾向が顕著であることがわかる。

(3) 地表面沈下曲線

図-16(a) (b)に、横断方向の地表面沈下計測の結果を示す。なお、縦軸については、沈下量 S を断面の最大沈下量 S_{max} により除して正規化し、沈下比として示す。沈下はトンネル近傍の比較的狭いエリアに集中して生じていることがわかる。また、土被り $0.5 \sim 1D$ の(a)ではより狭いエリアに沈下が限定されていることがわかる。図中には島田¹⁰⁾の提案式(1)による予測沈下量を実線で示すが、概ね $\alpha=2$ で近似できる。なお、提案式では、シルト質の砂質土で

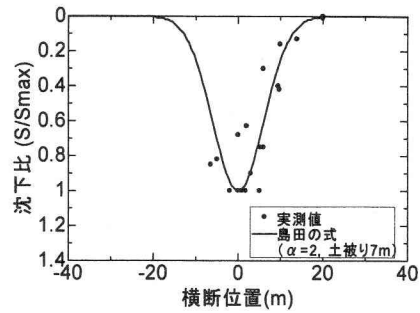


図-16(a) 地表面沈下曲線 (土被り $0.5 \sim 1D$)

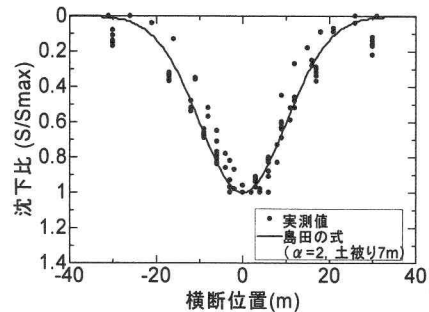


図-16(b) 地表面沈下曲線 (土被り $1 \sim 2D$)

$$S = S_0 e^{-\alpha X} \quad \text{----- (1)}$$

$$X = (x/z)^2$$

ここに、

S : 地表面沈下量(m)

S_0 : トンネル中心直上における地表面沈下量(m)

x : トンネル中心からの水平距離(m)

z : トンネル中心における土被り(m)

α : 地質によって決まる定数

$\alpha=2 \sim 6$, 粘土で $\alpha=0 \sim 4$ とされており、今回の実測値はシルト質の砂質土のうちでも比較的粘土に近い分布形状であった。これは、当該区間は、トンネルの深度には砂質土が主に分布するが、トンネル上方にはローム層が比較的厚く分布する地質条件であることも影響しているものと考えられる。

4.3 地中変位

図-17に、六戸トンネルにて実施された地中変位計測の結果について、上半切羽到達時、上半切羽通過30m後、下半切羽通過30m後に分けて示す。図中の変形はそれぞれ300倍に誇張して示してある。上半切羽到達時はトンネル直上部の沈下、それに伴う側方の地盤のトンネルセンター方向への移動が主であ

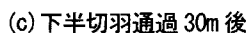
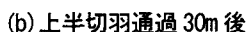
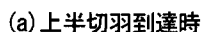


図-17 地盤の沈下状況

図-18に地中のせん断挙動の計測結果を示す。これは、地盤中にパイプひずみ計を挿入し、トンネルの掘削に伴う曲げにより行われた地盤上部ではパイプひずみ計には負曲げの傾向が、また、深度が大きくなるとある点を境に正曲げを示す変形の挙動である。これより、トンネルの掘削に伴い、トンネル上部の地山が緩みトンネル方向に変形していることが読み取れる。

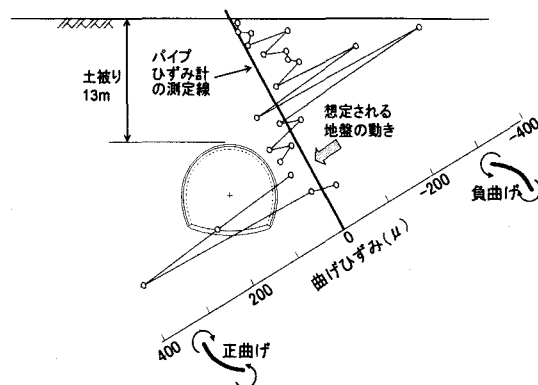


図-18 地中のせん断挙動

5. まとめ

1) 低土被り土砂地山トンネルにおいては、天端沈下は、土被り、地質構成に依存し、低土被りの場合や、互層区間で上部に砂層、下部にシルト層の条件の場合には沈下が大きくなる。

- 2) 低土被り土砂地山トンネルにおいては、地表面沈下量は天端沈下量、脚部沈下量とほぼ等しい。地表面沈下の抑制に際しては、天端沈下や脚部沈下を抑制することが重要となる。
- 3) 低土被り土砂地山トンネルにおいては、沈下は狭い範囲に集中して生じる。これは、グラウンドアーチが十分に形成されず、とも下がりが生じているためと考えられる。

低土被り土砂地山トンネルを都市部で施工する場合など、地表面沈下等、地表に与える影響を極力抑えることが要求される場合は、上記事項に充分留意した設計、施工が必要になると考えられる。

今後は、補助工法についても同様の分析を行い、将来的には補助工法の選定指標についても提案していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 北川隆他:種々の切羽安定対策工で未固結地山を掘削, トンネルと地下, Vol.35, No.11, 2004.11
- 2) 田辺宏他:地下水位低下工法による土砂地山トンネルの施工, トンネルと地下, Vol.35, No.6, 2004.6
- 3) 蓼沼慶正他:含水未固結地山トンネルにおける切羽安定方策, トンネル工学研究論文・報告集, Vol.13, pp.207-212, 2003.11

- 4) 小西真治他:地下水位を考慮した切羽安定評価法,
トンネル工学論文集, Vol.14, pp.1-7, 2004.11
- 5) 蓼沼慶正他:地山改良工を併用した低土被りトン
ネルの施工, トンネル工学研究論文・報告集,
Vol.13, pp.201-206, 2003.11
- 6) 北川隆他:地山改良とサイドパイルで小土被り土
砂地山を掘削, トンネルと地下, Vol.35, No.4,
2004.4
- 7) トンネル標準示方書〔山岳工法編〕, 土木学会,
1996.7
- 8) 鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法
トンネル, 鉄道総合技術研究所, 2002.3
- 9) 桜井春輔, 足立紀尚:都市トンネルにおける
NATM, 鹿島出版会, 1988.12
- 10) 島田隆夫:鉄道技術研究報告:土被りの浅い鉄
道山岳トンネルにおける地表沈下の形状および発
生機構に関する研究, 鉄道技術研究報告, 1981.2