

都市部における小土被り大断面トンネル掘削に伴う地表面変位に関する一考察

吉野 弘明¹・河村 和信²・鶴原 敬久³

¹正会員 (前) (独) 鉄道・運輸機構 東京支社 仙台鉄道建設所 (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町9-7)

E-mail: hir.yoshino@jrtr.go.jp

²正会員 (独) 鉄道・運輸機構 東京支社 仙台鉄道建設所 (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町9-7)

E-mail: k.kawamura@jrtr.go.jp

³正会員 応用地質株式会社東北支社ジオテクニカルセンター (〒983-0043 仙台市宮城野区萩野町3-21-2)

E-mail: turuhara-takahis@oyonet.oyo.co.jp

仙台市高速鉄道東西線、八木山トンネルは、延長648.5mの複線断面NATMである。起点方到達部である動物公園駅は開削延長を最小限にし、ホーム等駅設備の一部をNATM区間まで延長することで工事費の縮減を図っている。そのため、到達部付近はトンネル断面が駅設備を含む大断面となる。駅部大断面区間は、掘削断面積181㎡、延長約73m、土かぶり約9m、掘削対象地質はN値20～50程度の軟岩層である。

本トンネル直上付近には、比較的交通量の多い市道及びコンクリート擁壁が存在する。これらの施工条件より、掘削工法は、先行事例及び安全性から中壁分割工法を採用し、地上への安全性の確保に努めた。本稿は、トンネル施工に伴う地山挙動について報告し、小土被り大断面トンネルにおける地表面沈下の発生形態について分析した。

Key Words : Center Diaphragm Method, large section, small overburden, surface subsidence

1. 工事概要

(1) 施工の概要

仙台市高速鉄道東西線（以下、仙台東西線）は、仙台市の南西部の八木山動物公園付近からJR仙台駅を中心とする都心を経て、市の東部に位置する仙台市東部道路仙台東IC付近に至る延長約13.9kmの地下鉄路線である。このうち、起点方の動物公園駅（駅名は全て仮称）から丘陵地帯を経て、平野部の国際センター駅の起点側までの延長4.3km区間の土木・軌道工事を、鉄道・運輸機構が事業主体である仙台市交通局から受託し、平成27年の開業に向けて施工を進めている（図-1）。



図-1 仙台市高速鉄道東西線のルート

八木山トンネルの周辺は、動物公園、遊園地、そして竜の口溪谷があり、自然豊かなレクリエーション地域となっており、トンネルは動物公園内を土被り10m程度で横断し、交通量の多い市道と並行して駅部を掘削する厳しい条件下の施工である。トンネル工事は、平成22年1月に開削トンネル部から動物公園駅へ向けて掘削を開始した（図-2）。

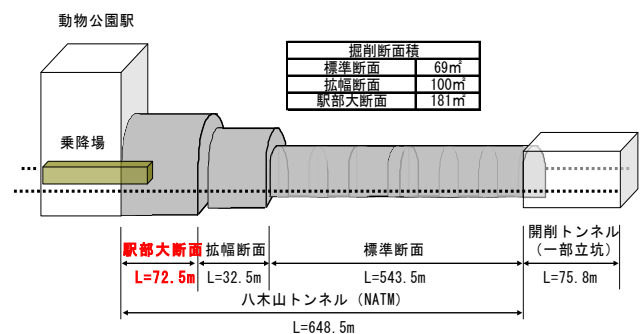


図-2 八木山トンネルの断面形状の分布

トンネル断面は、掘削進行方向から標準断面（69㎡，L=543.5m），拡幅断面（100㎡，L=32.5m），駅部断面（181㎡，L=72.5m）と段階的に拡幅し動物公園駅に接続する。駅部の土かぶりは平均約9m，トンネル上に高さ約6mの擁壁が構築された偏圧地形である（図-3）。

前述のようにトンネル駅部の地上部には、市道などの重要構造物があり、その直下を小土被り+大断面で掘削することから、安全な施工法の採用に加え、通常実施する地表面変位計測、トンネル内の内空変位はもちろん、地表およびトンネル内からの地中変位計や傾斜計、支保工や吹付けコンクリート及びロックボルトなどの計測管理を行い、施工の安全性を検証した。

なお、トンネル工事と並行して地表部分の道路整備等が施工されており、計測期間はトンネル掘削開始から中壁撤去までの期間に限定された。

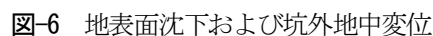


八木山トンネルの地質は、概ね水平構造となっており、上部より青葉山層、大年寺層、向山層から構成される。

大年寺層 (Dn) は、新第三紀の凝灰質泥岩及び凝灰質砂岩からなる N 値が 20 程度の脆弱な軟岩層であり、風化に伴い固結度及び N 値が低い。特に掘削天端・上部に存在する大年寺層 (Dn-s 層, Dn-m 層) は、孔内水平載荷試験による変形係数が $10 \sim 25 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ 程度しかなく、固結度の低い軟岩である。

向山層は (Mku) , 新第三紀凝灰質泥岩・シルト岩及び凝灰質砂岩からなる地層で, N 値 50 以上を示す軟岩層である. 互層であるため, 固結度にばらつきが見られるが, 全体的に固結度が高い.

八木山トンネル施工前に、同線区で先行区間での中壁分割工法と多段ベンチカット工法の 2 工法について、「安全性」、「施工性」及び「経済性」、周辺環境や諸条件の厳しさを考慮して、切羽の安定、地山の過大な変状への対策が最優先と判断し、安全性に優れた中壁分割 (D) 工法が適当であると総合的に判断した。



(1) 地表面沈下計測

トンネル掘削による地表面沈下やその範囲を把握するために、駅部大断面区間を含む $L=100\text{m}$ 区間で約 10m 間隔とし（図-5），トンネル横断方向はセンター(CL)のほか、擁壁基礎（R1），擁壁天端（R4）など、CLから左側に 30m 、右側に 13m の範囲（図-6）とした。

(2) 天端沈下とトンネル内空変位の計測

天端沈下量及び内空変位量測定（以下、計測A）は、坑内支保部材の3次元的な挙動を把握するため、図-7のターゲット位置で 5m ごとに計測断面を設け、3次元計測システムにて計測管理を行った。

前述のとおり、中壁分割工法の掘削段階ごとに逐次監視し、先進坑上半掘削段階からの累積変位量を把握した。天端沈下量は、先進坑上半掘削時に設置した先進坑側天端のターゲットをインバート掘削前まで同一点にて計測管理することとし、内空変位量は、先進坑掘削時は地山側と中壁の支保工の相対変位量を、後進坑掘削時は先進坑側と後進坑側の支保工の相対変位を計測した。

(3) 地表から設置した地中変位計と地中傾斜計での計測

測定断面は坑内B計測と同じ $0\text{k}293\text{m}$ 断面とした。

傾斜計はトンネルの左右に配置し、極力トンネル側壁に接近させたが、後進坑側のB-3孔は地上に歩道があるためトンネルセンターから 13m の位置となっている。設置深度は、トンネルインバートから 1D （約 16m ）下方までとした。傾斜計は挿入式傾斜計を使用し、 50cm 間隔で鉛直方向からの傾斜角を測定し、傾斜角の変化量に測定長さを掛けて水平変位を計算している。

地中変位計はトンネルセンターに設置した。トンネル掘削の影響があるため、地表面からトンネル天端 $+2.0\text{m}$ の位置（GL- 7.4m ）までを測定範囲とした。測定点数が6点と制約があるため、GL- 7.4m から 1.0m 間隔でGL- 2.4m までを測定点とした。

以下ではこれらの計測の内、地表面変位量の計測結果を中心とした検討内容について述べる。

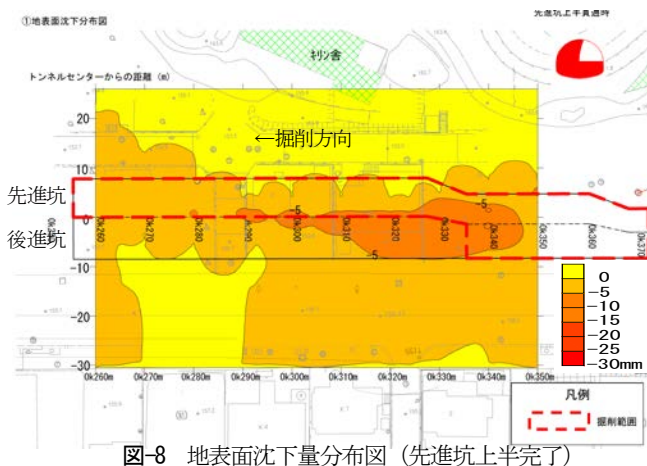


図-8 地表面沈下量分布図（先進坑上半完了）

3. 変位計測結果

(1) 地表面沈下平面分布について

駅部の拡幅部掘削完了時を初期値とし、中壁分割工法施工に伴う沈下量の平面分布を図-8～12に示した。

a) 先進坑上半掘削（図-8）

拡幅部と駅部断面との境界部、 $0\text{k}310\text{m} \sim 0\text{k}335\text{m}$ の約 25m 間で、先進坑掘削範囲より後進坑（L側）に沈下範囲が広がっている傾向がみられる。

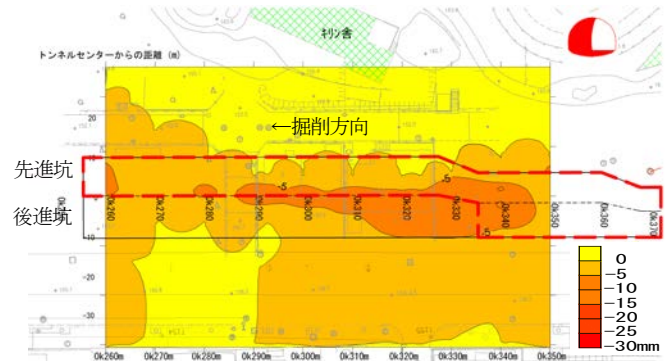


図-9 地表面沈下量分布図（先進坑下半完了）

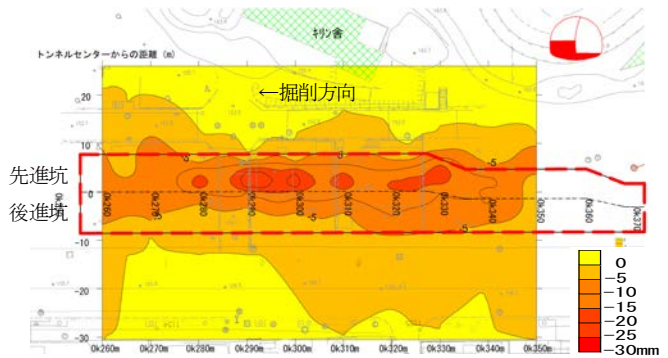


図-10 地表面沈下量分布図（後進坑上半完了）

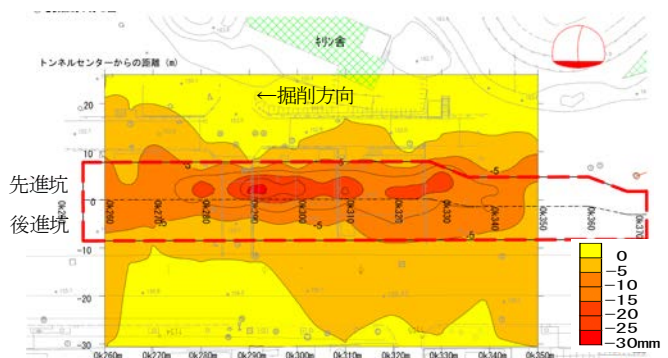


図-11 地表面沈下量分布図（後進坑下半完了）

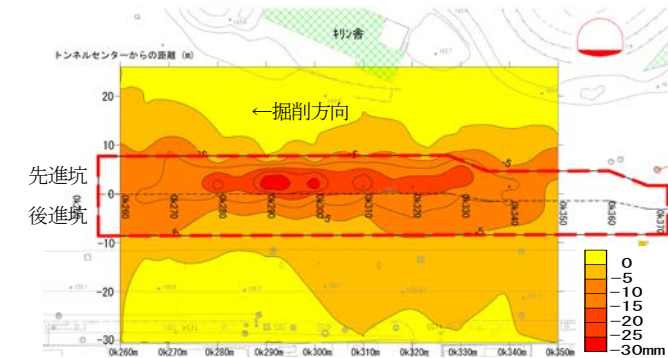


図-12 地表面沈下量分布図（中壁撤去）

b) 先進坑下半掘削 (図-9)

分布形状に大きな変化は認められないが、5mm以上の沈下範囲が0km280mまで達している。

c) 後進坑上半掘削 (図-10)

最大沈下量は24mmと増加し、沈下分布は0km290～300mのCLより先進坑 (R側) に移動し、0km290～300mをピークに不連続に点状分布する。

d) 後進坑下半掘削 (図-11)

最大沈下量は26mmとさらに増加し、15mm以上の沈下分布は0km280～330mに広がり、0km290～300mのCLより先進坑側にピークが形成される。

e) 中壁撤去 (図-12)

最大沈下量は30mmとさらに増加し、分布の傾向に大幅な変化はないが、ピークが0km290～300mの範囲に集中する傾向が顕著となる。

(2) 地表面沈下横断分布 (0k293m) について

0k293m断面での、掘削に伴う地表面沈下量の分布を図-13示す。計測位置の詳細については図-6を参照されたい。

a) 先進坑上半掘削

地表面沈下はCLとR1の2計測点のみで5～6mm発生しており、沈下の分布範囲が狭く、掘削範囲の左端部分に集中する。

b) 先進坑下半掘削

CL、R1で2～3mm程度の累積変位が認められるが、それ以外の計測点での変化は計測されていない。

c) 後進坑上半掘削

L5やR4およびR7でも沈下が発生する。累積沈下量の最大はR1で24mmであり、後進坑上半掘削時の沈下発生量ではR4の21mmが最大である。ピークはR1と変わらないが、沈下量分布形状は先進坑 (R側) にシフトしている。

d) 後進坑下半掘削

上半とほぼ同じような変化を示しており、掘削範囲直上のL5には変化がみられない。

e) 中壁撤去

R1で3mm、CLとR4で2mm程度の新たな変位が認められるが、その他の計測点では変化がみられない。

f) まとめ

先進坑掘削段階では、沈下の最大値が先進坑中心のR4ではなく左側のCLであること、地表面の沈下はトンネル幅よりも狭い範囲となっている点に特徴がある。

後進坑掘削段階では、トンネルのやや右方の計測点R1、R4での沈下量が大きく、その範囲はやや拡大したが、トンネル掘削幅にほぼ等しい範囲に限定されている。

中壁撤去段階での変位増分は2mm～3mmと小さく、その範囲はトンネル中心部に限定されている。

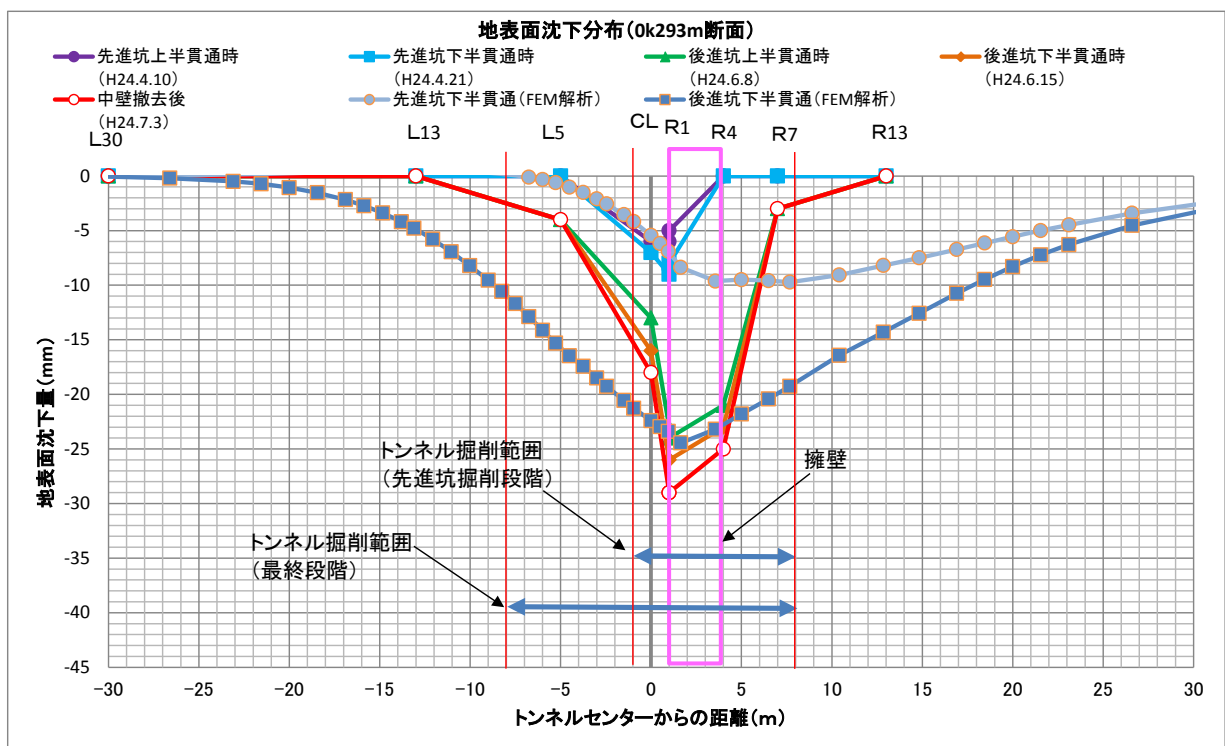


図-13 地表面沈下横断分布 1)に加筆

(3) 地中傾斜計と地中変位計の測定結果

地中傾斜計（No.1, No.3）と地中変位計（No.2）の計測結果を図-14に示す、0km293m断面に設置しており、詳細は図-5と図-6を参照されたい。

（深度別の変位の傾向）

a) インバート下端以深

2mm以下の非常に小さな変位発生が認められるが、インバート下端+5m以深では、掘削完了までの期間での変位は発生していない。

b) トンネル部

地中傾斜計No.3では、トンネル外側への変位がみられる。変位量は、先進坑掘削で1～2mmと小さく、後進坑で3～4mmとやや大きい。

地中傾斜計No.1では、変位量の変化傾向により①インバート～踏まえ部、②側壁部、③肩部から天端、に区分できる。

①部分：掘削の進行に伴ってトンネル外側に向かっての1～2mm程度の変形が段階的に累積し、5mm程度の最終累積変位が発生している。

②部分：深度が浅くなるにしたがってトンネル側への変位が増加し、最終的な最大累積変位は10mmとなる。変位発生量は先進坑上半と下半掘削でそれぞれ最大5mm程度、後進坑掘削での増加はほとんどみられない。

③部分：掘削に伴う変位量の増加がほとんどみられない。

c) トンネル天端以浅

地中傾斜計No.3では、深度が浅く（トンネルからの離隔が大きく）なるにしたがって累計変位量が徐々に少なくなる。変位は先進坑上半掘削より始まり、後進坑上半掘削まで増加するが、その後は少ない。

地中傾斜計No.1では、変位量の変化傾向により、④天端～天端+5m程度、⑤天端+5m以浅に区分できる。

④部分：先進坑掘削での変位量の増加はみられないが、後進坑以降での掘削に伴って最大5mm程度の変位がみられる。

⑤部分：掘削の進行に伴ってトンネル側に向かっての変形が段階的に累積し、累計変位量は浅部に向かって大きくなり、地表部で最大25mm程度の累積変位が発生している。

地中変位計では、先進坑掘削では変位発生が少なく、後進坑上半掘削以降で変位が計測されており、深度増加に従い変位量の増加が認められる。なお、深度5.4mのデータについては、全般的な累計変位量に比べ逸脱しており、先進坑上半掘削時に5.4m深度において大きなシフトを発生させるような亜炭層などの弱層に起因した固有の

イベントがあったことが推測される。

以上、地中傾斜計や地中変位計の計測結果では、以下の特徴が認められる。

- ・掘削に伴いトンネル中心より先進坑側の地山において変位が発生している
- ・トンネルインバート以深では変位はほとんど発生していない
- ・インバートから下半部にかけてはトンネル外側への変位が発生している
- ・トンネル先進坑側のトンネル天端以浅ではトンネル側への変位が発生している

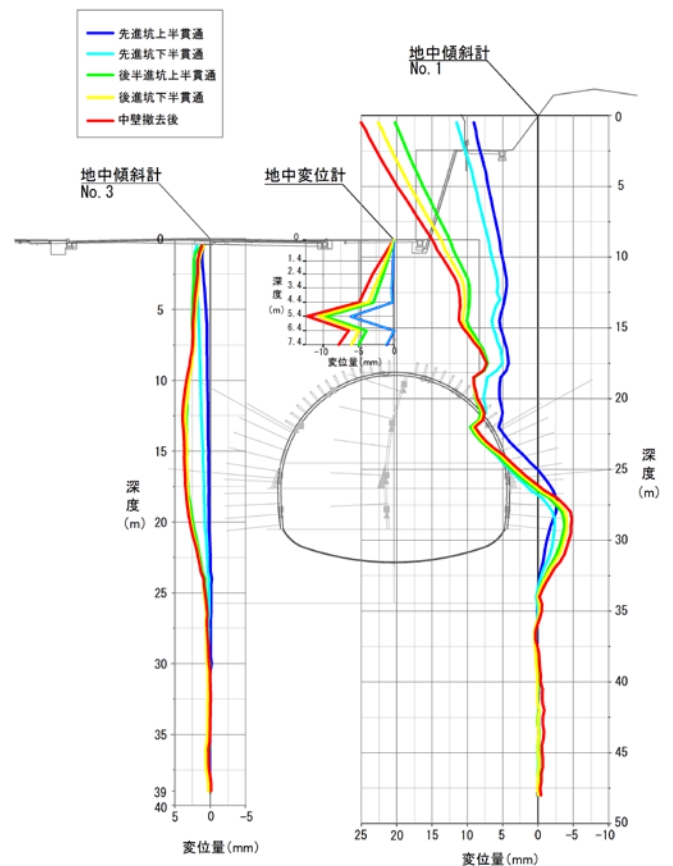


図-14 坑外地中変位計測結果¹⁾

4. データの分析 (0k293m)

(1) 地表面沈下と切羽位置の関係

0k293mのCL位置での地表面沈下と切羽位置との関係を図-15にまとめた。

先進坑上半掘削では、計測点手前1D (D=8m) 位置に切羽が到達した時点で沈下が計測され始める。沈下は、切羽が1D超えるまでは増加し、その後収束している。

一方、後進坑上半掘削では、計測点手前0.5D

(D=16m) 程度で沈下が発生し始め、切羽との離れが1D (D=16m) 程度で収束している。

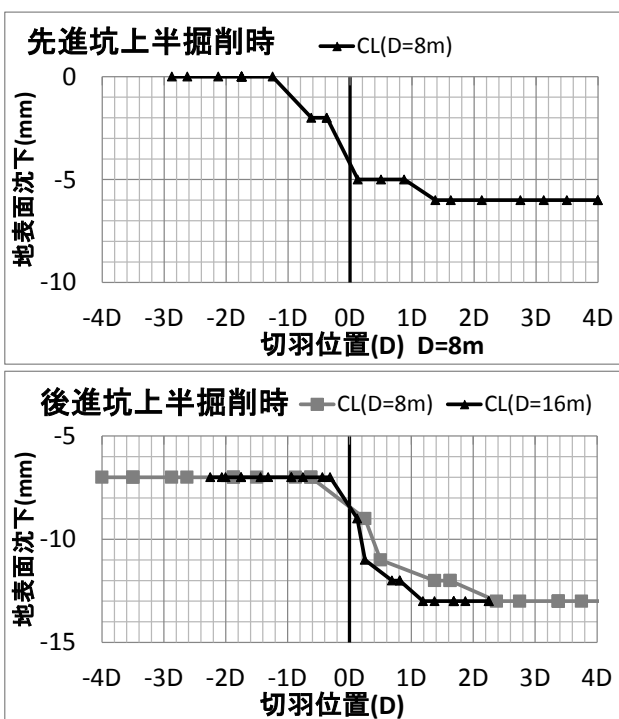


図-15 切羽位置と地表面沈下の関係

(2) 各掘削段階での地表面への影響について

図-16に示したように、先進坑に比べ後進坑の掘削による沈下量がより大きく、変位のピークもより掘削範囲の中に集中する傾向が認められた。各段階における掘削の影響がどの程度かより定量的に評価するために計測データを再整理した。

各段階の掘削進行に伴って、段階的に変位が発生し、切羽通過後は速やかに収束することが確認できる (図-16)。

掘削段階毎の変位の発生比率 (各段階の沈下量/総沈下量) を図-17にまとめた。CLでは先進坑上半貫通時に33%沈下が発生したのに対して後進坑上半貫通時の増分は33%と同程度の変位が発生している。

なお、後進坑下半では17%、中壁撤去では11%と合計で28%の沈下が発生しており、後進坑掘削以降では合計で61%の変位が発生している。したがって、先進坑より

も後進坑部分の掘削の影響が1.5倍程度発生している。

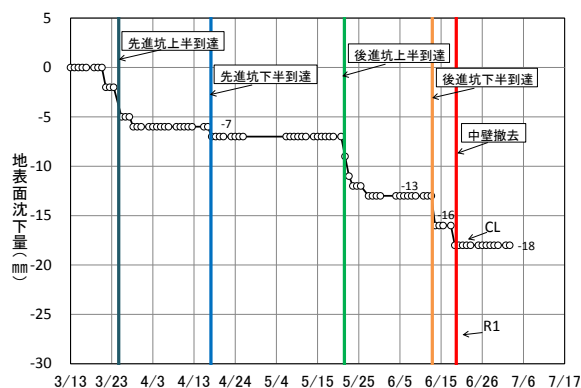


図-16 地表面沈下 (CL) の経時変化図

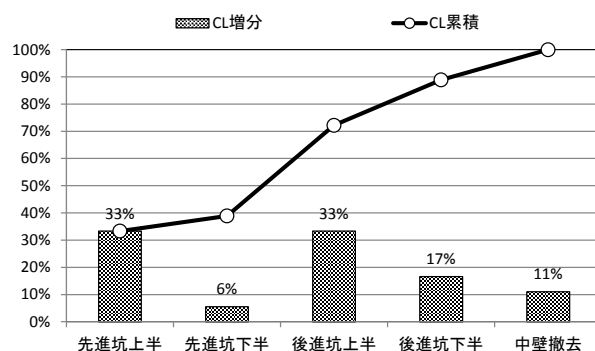


図-17 地表面沈下 (CL) の変位出現率

(3) 各掘削段階における地山への影響について

トンネル右側の地中傾斜計No.1では、先進坑の上下半掘削と後進坑上下半掘削とはほぼ同程度の変位量が発生している (図-14)。天端上方に設置した地中変位計および地中傾斜計No.3では後進坑掘削段階で大半の変位が発生している。したがって、地山挙動を総合的に判断すると、後進坑掘削段階で多くの変位が発生したと考えられる。

これらの計測結果は、上述の地表面変位量 (後進坑以降の変位が全変位量の61%であること) とほぼ同じ傾向を示しており、地表面と地山とは計測結果からも一連の変位を示している。

5. 考察

(1) トンネル掘削による地表面変位について

① 地表面への平面的な広がり

図-13に示したように先進坑掘削段階では、CL (トンネルセンター) およびR1 (擁壁基礎) のみで沈下が観測されており、最大沈下はR1 (擁壁基礎) で観測された。しかし、先進坑のトンネル中心であるR4 (擁壁天端) では沈下は観測されていない。先進坑掘削段階において、地中傾斜計でも、トンネル天端から地表面まで

の間に、トンネル掘削による地山の相対水平変位が少なく、地上構造物（擁壁）の沈下挙動はほとんど発生していないと考えられる。したがって、偏圧地形と地上構造物の影響はあまり受けておらず、R1が最大変位を示したのは、土被りが大きく影響していると考えられ、R4（擁壁天端）の土被り（土被り比 $H/D=2$ ）に比べ、R1（擁壁基礎）の土被り（ $H/D=1$ ）が小土被りであったことが大きく影響していると考えられる。

後進坑掘削段階では、沈下はR1（擁壁基礎）～R4（擁壁天端）にピークが集中しており、トンネル中心を最大沈下とした分布形状となっていない。後進坑掘削後において、図-15の地中傾斜計では、トンネル天端から地表面までの間に、トンネル掘削による地山の水平変位が発生しているため、偏圧地形の影響を受けており、さらに地上構造物（擁壁）が挙動したことにより、R1（擁壁基礎）～R4（擁壁天端）に沈下のピークが集中したことが考えられる。

②先行変位について

図-18に示した地表面沈下と切羽位置の関係から、切羽前方5~10m程度までしか地表面沈下の影響が認められない。一般的な先行沈下の影響範囲は切羽前方45°の地表面までと考えられているため、今回はSL～天端までの高さ+土被り高さ=8m+9m=17mとなるが、上記のようにその半分程度までが影響範囲であるため、地山のゆるみは切羽前方1D程度の範囲しか発生しなかったことが考えられる。

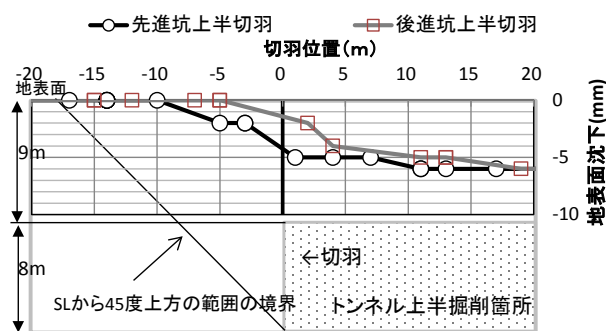


図-18 地表面沈下の影響範囲とトンネル位置の関係

(2) トンネル施工における特徴的な沈下傾向について

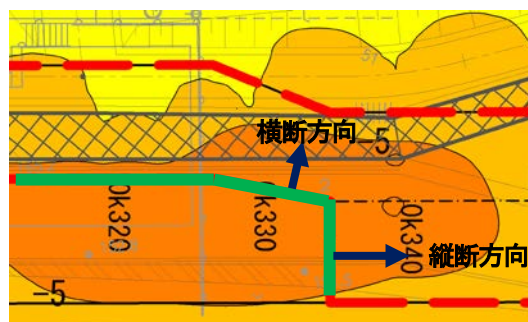
①先進坑上半掘削時の沈下範囲

先進坑掘削段階では0k260m~0k300m付近まではトンネルセンター付近に最大沈下が発生しているが、0k310mから拡幅断面近傍の0k335kmの間では掘削を行っていない後進坑側に沈下が広い範囲に発生している（図-8）。

これらの範囲は拡幅部との近接箇所であり、拡幅部の掘削により拡幅部に近接する後進坑側の地山にゆるみが生じ、その箇所に先進坑上半の掘削解放応力が作用し、

特に図-19に示したように拡幅部に近接した箇所は自由面が2方向あり、変位が発生しやすい断面形状にあることが要因と考えられる。

また、天端付近に分布する大年寺層は、場所により脆弱な亜炭層を挟在する場合があります。これらの範囲に局所的に亜炭層が挟在されていた可能性もあり、亜炭の分布が変位を誘発した可能性もある。



拡幅部近傍では横断方向と縦断方向の2方向に変形が発生するため、横断方向の1方向よりも水平方向への体積変化が大きくなり、沈下が増大した可能性がある

図-19 拡幅断面付近の沈下発生原因の概念図

②地表面沈下量の擁壁側への偏りについて

後進坑掘削貫通から中壁撤去後までは、掘削を行った後進坑上部の地表面沈下よりも、掘削が完了した先進坑上部の地表面沈下が卓越した点に特徴がある（図-20）。後進坑掘削段階では、図-14に示したように地盤の水平変位No.3は地山方向を示し、その変位量はNo.1よりも小さい変位しか発生していない。No.1では後進坑掘削段階でトンネル天端より上方でトンネル中心方向に変位が増大している。

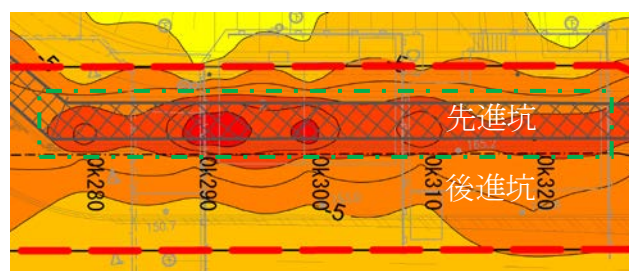


図-20 地表面沈下分布図（中壁撤去後）

このように、地中の水平変位は土被りの大きい方から小さい方向に発生していることから偏圧の影響を受けていると考えられる。そのような偏圧に依存した地盤挙動の影響を受けて先進坑上方の地表面に沈下が大きく発生したものと考えられる。

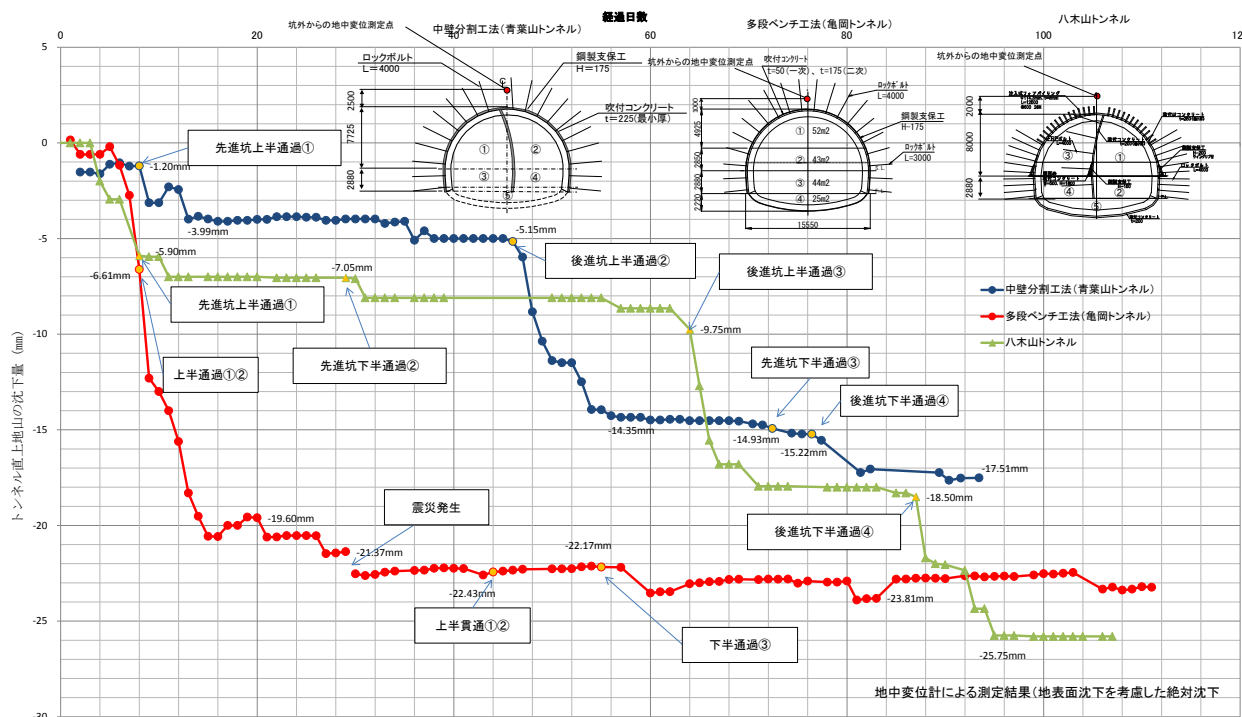


図-21 各トンネルにおける地中変位量の増加傾向 ②に加筆

(3) 大断面トンネルの掘削工法の違いによるトンネル周辺地山の変位発生傾向の対比検討

仙台地下鉄東西線においては、断面積がほぼ同一の異なる3つの大断面トンネルを中壁分割工法（青葉山トンネル、八木山トンネル）と多段ベンチ工法（亀岡トンネル）とで掘削した（図-21）。ここでは各トンネルでの変位の出現傾向を対比し考察する。

まず、青葉山トンネルは青葉山駅の起点側、一方、亀岡トンネルは青葉山駅の終点側に位置しており、土被り及び地質は概ね同一条件となっている。先行掘削した青葉山トンネルは安全な施工を重視し中壁分割工法を採用し、この結果を踏まえ後続の亀岡トンネルは、施工性や工期等を重視し多段ベンチ工法を採用した。両トンネルの地表面沈下結果を図-21に示すが、青葉山トンネルの中壁分割工法では、変位が段階的に徐々に増加している。一方、亀岡トンネルの多段ベンチ工法は、上半通過後に最大変位の大半が発生している。土被り比で比較すると多段ベンチの上半掘削時が $H/D=1.5$ 、中壁分割工法の先進坑上半掘削時が $H/D=3.2$ となり、土被り比が沈下量に影響していることが分かる。これより、中壁分割工法の沈下の縦断勾配が相対的に小さく地表面への影響が少なく、特に八木山トンネルのような小土被りで地表に構造物等が存在する場合は、地表に与える影響が小さい中壁分割工法による掘削が有利であることが確認できた。

6. まとめ

- ・先進坑掘削段階での沈下分布形状は、偏圧地形と地上構造物の影響はあまり受けていない。
- ・後進坑掘削段階での沈下分布形状は、偏圧地形及び地上構造物の影響により、沈下のピークが先進坑側に集中したと考えられる。
- ・先行変位は切羽前方1D程度の狭い範囲で発生している。
- ・拡幅部に近接した箇所地表面沈下は、拡幅部の掘削による地山のゆるみ、先進坑上半の掘削解放応力、自由面が2方向の断面形状、脆弱層の挟在による影響から後進坑側に発生したものと考えられる。
- ・後進坑掘削から中壁撤去後までは、偏圧に依存した地盤挙動の影響を受けて先進坑上方の地表面に沈下が大きく発生したものと考えられる。
- ・中壁分割工法では、変位が段階的に徐々に増加している。一方、多段ベンチ工法は上半通過後に最終変位の大半が発生している。
- ・中壁分割工法の先進坑上半掘削時の $H/D=3.2$ 、多段ベンチの上半掘削時の土被り比は $H/D=1.5$ となり、土被り比が小さいほど地表面沈下量が大きく発生していることが分かった。
- ・小土被りおよび地表に構造物が存在する大断面トンネルの掘削は、沈下縦断勾配が相対的に小さく地表面への影響が小さい中壁分割工法が有利である。

7. おわりに

トンネル掘削に伴う地表面沈下は、地形・地質、土被り、トンネル形状・寸法、掘削工法などの多くの要因が複合的に作用し、地表面沈下量やトンネル横断・縦断方向の沈下形状・影響範囲が決まる。本報告においては、トンネル掘削時の変位計測により、地表面沈下の実態を確認するとともに、各要因との関連を考察した。

また、都市部における山岳トンネルの施工にあたっては、地表面沈下が直接第三者に影響を与えることも少なくない。

今回、中壁分割工法と多段ベンチ工法で掘削した2つの大断面トンネルの地表面計測結果を比較した結果、小土被りで地表に構造物が存在するときは、掘削に伴う地表に与える影響が少ない前者の工法が有利であることが確認できた。

今後は、数値解析への再現化を行い、解析精度を上げることにより、より合理的なトンネル掘削が可能となると考える。

最後に、本トンネルの施工にあたり多大なるご指導・ご鞭撻を賜った、朝倉俊弘委員長（京都大学大学院教授）をはじめとした仙台地下鉄東西線トンネル技術検討会の皆様に深甚なる謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 吉野弘明, 河村和信, 山本敏明, 鶴原隆久: 道路・動物公園直下の小土かぶり駅部大断面を中壁分割工法により施工, トンネルと地下, 512号, Vol.44 (No.4), pp.25-36, 2013.4
- 2) 今井正樹, 河村和信, 山田亮志, 鶴原敬久: 隣接工区の実績を再評価し駅部大断面を多段ベンチにより経済的に施工, トンネルと地下, 499号, Vol.43 (No.3), pp.27-38, 2012.3

(2014.9.15 受付)

SURFACE SUBSIDENCE OF THE EXCAVATION IN CROSS DIAPHRAGM METHOD ON CONDITION OF SMALL EARTH COVER AND LARGE CROSS SECTION TUNNEL

Hiroaki YOSHINO, Kazunobu KAWAMURA and Takahisa TSURUHARA

The Yagiyama tunnel should be connected to the Dobutsu-Koen Station, so that the tunnel has a large section area to facilitate island type boarding place with one platform for double tracks.

In this article, the result of the construction in the large section part carried out by the Center Diaphragm Method(hereinafter CDM) will be described referring to either the stability criteria of the ground subsidence or the intensive monitoring and additional countermeasures to restrain the deformation behavior of the ground surrounding tunnel during the progress of tunnel face. The ground surface subsidence was analyzed for the factor of cross-sectional area, the ratio of overburden.