

(10) 重要構造物直下における土被りの浅いトンネルの
施工とその計測結果に関する一考察

西日本旅客鉄道(株) 正 河内 清
西日本旅客鉄道(株) 吉岡 勉
西日本旅客鉄道(株) 正〇 川嶋 正年
西日本旅客鉄道(株) 安居 和博

A Study of Execution and Measurement of Shallow Tunnel Just Below an Important Structure

Kiyoshi KAWACHI Masatoshi KAWASHIMA
Tsutom YOSHIOKA Kazuhiro YASUI
(West Japan Railway Co.)

abstract

The Ogurayama tunnel on San-in main line, which is a double-truck tunnel (length 1,450m) runs through palaeozoic formation which forms a slate. For the shallow section at the entrance side of the tunnel (average Overburden about 25m), there were an important cottage (Okouchi-Sanso) and its garden (about 20,000m²) directly above the tunnel. To minimize deformation of this one, we had to use jointly sub-method. And for construction control, we measured the surface settlement and inner displacement, and setted up some instruments, to measure the displacement taking place with approach to a face.

We mainly discuss here the relations between advancement of each face and results of field measurements.

1. 緒言

小倉山トンネルは山陰本線嵯峨～馬堀間を別線ルートにより複線化する目的で建設された延長1,450m、複線断面の鉄道トンネルで、他の5トンネルと共に平成元年3月より共用を開始した。このトンネルが貫く小倉山の付近一帯は、歴史的風土特別保存地区、史跡名勝嵐山、京都府立自然公園に指定された風光明媚な観光地であり、山裾には常寂光寺、落柿舎、二尊院等の社寺が点在していること等を考慮して、中央部に立坑を設けて起点方および終点方の両方へ掘削を行ったが、起点方坑口の50m区間は工期の関係で迎え掘りを行って貫通させた。また、この小倉山トンネルの起点方坑口上部には観光用道路と名庭園（大河内伝次郎の六千坪の庭園）が存在し、庭園内の重要構造物である茶室付近では土被りが約23mと浅く、地表沈下を極力防止する必要が生じた。さらに、坑口付近では最小中心間隔16mで在来線の亀山トンネル（明治32年建設、単線断面、レンガ構造）が隣接しており、小倉山トンネル掘削に伴う影響が懸念された。

本論文は、小倉山トンネルの起点方坑口において実施した各種の計測結果を示し、トンネル掘削に伴う地表沈下および地山の変形挙動について報告するものである。

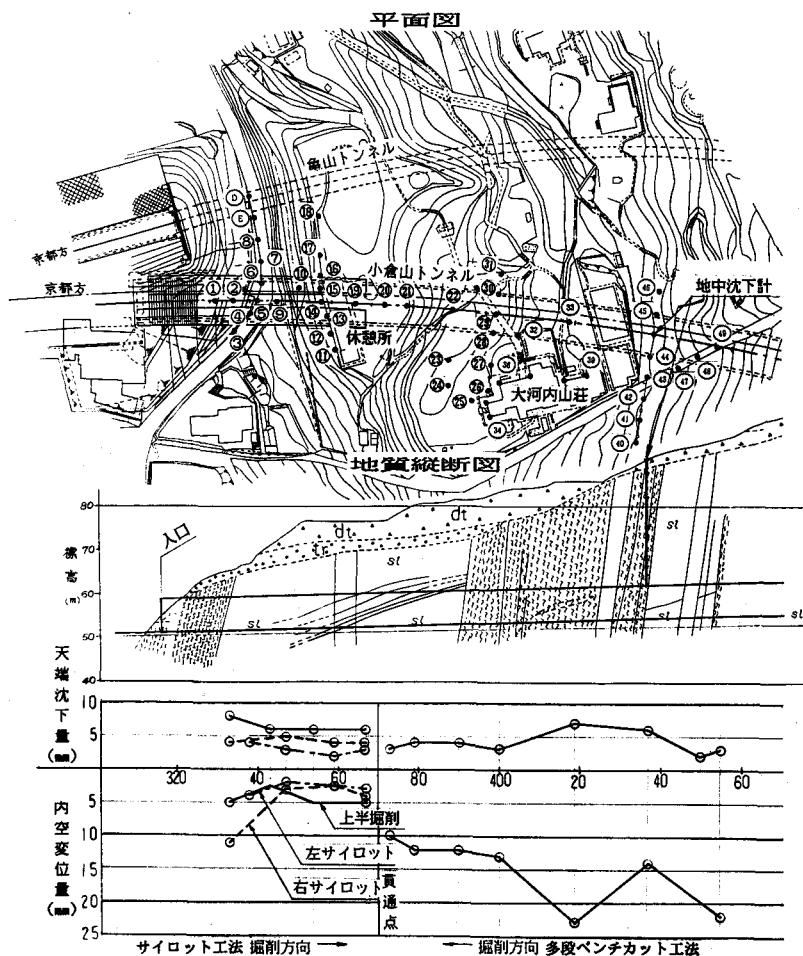


図-2 小倉山トンネル京都方坑口付近概要

2. 地形・地質の概要

小倉山トンネルの地質は、主として古生代二畳紀～中生代ジュラ紀に形成された丹波層群の粘板岩を主体として局部的に砂岩の薄層を含んでおり、断層・褶曲が発達し、地層の走向・傾斜は概ねN80W, 70Sである。図-2は起点方坑口付近の地質縦断面図を示したものであるが、粘板岩は一部が破砕されており、その上部に第四紀の未固結段丘堆積物および崖錐堆積物（主として砂礫および粘土）が堆積して緩斜面を形成している。従って、破砕された粘板岩のゆるみによる地表沈下の増大や層境に沿った地表面のすべり等が懸念され、適切な補助工法の選択が必要と判断された。なお、坑口から水平ボーリング（ $L=150\text{m}$ ）を行い孔内水平載荷試験を実施したところ、粘板岩の弾性係数は坑口から12m区間および66m～126m区間が $E_0=250\sim740\text{kgf/cm}^2$ 、その他は $E_0=580\sim2,200\text{kgf/cm}^2$ であり、採取されたコアの一軸圧縮強度は、 $40\sim292\text{kgf/cm}^2$ とばらついた値を示した。

3. 設計・施工の概要

立坑方からの掘削は図-3に示す多段ベンチ工法により行い、補助工法としてミニパイプルーフの打設、上半切羽に対する鏡吹付けを併用した。また、迎え掘りを行った起点方の50m区間は図-4に示す通り地表面沈下を極力防止する目的でサイロット工法を用い、補助工法としてミニパイプルーフの打設、切羽に対



図-1 トンネル位置図

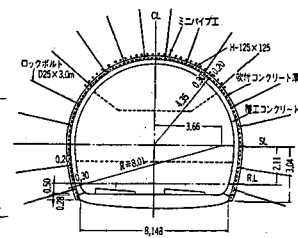


図-3 多段ベンチ工法パターン

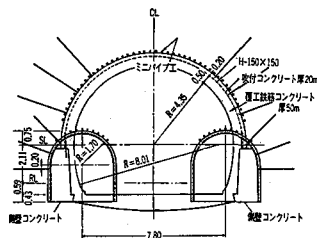


図-4 サイロット工法パターン

する鏡吹付け ($t=5\text{ cm}$)、吹付けコンクリートの早期閉合を実施した。なお、掘削は前者が大型ブレイカーによる機械掘削、後者が人力および機械の併用である。

4. 計測の概要

計測項目としては、まずトンネル掘削に伴う地表面の沈下量を把握するため、図-2に示すようにレベルによる地表沈下測定を49箇所で行った。さらに重要構造物である大河内山荘直下の掘削に先立って、トンネル掘削によるゆるみ領域の発生状況、天端沈下と地表面沈下の関係等を把握するため、地表面より地中沈下計を1箇所を設置した。この他、トンネル内における計測として内空変位計測、天端沈下計測を実施した。

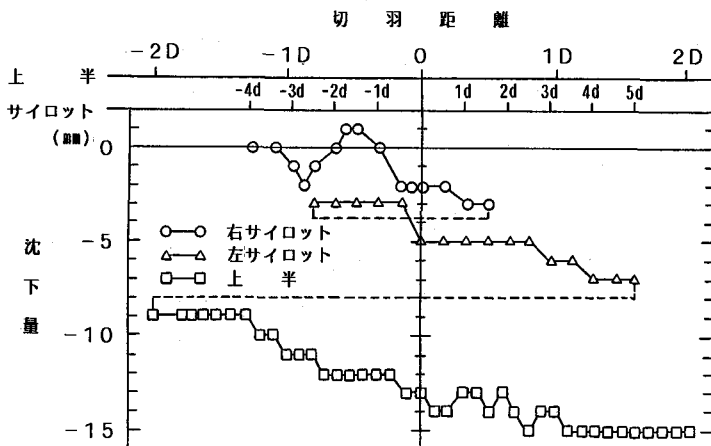


図-5 測点No.5における切羽距離と地表面沈下量の関係

5. 計測結果とその考察

5.1 各掘削段階ごとの地表沈下量

図-5は、最大沈下量を示した測点No.5における地表面沈下量の変化を、切羽距離との関係で示したもので、最終沈下量は -15 mm に達した。各掘削段階ごとの沈下量に着目すると、先進した右サイロットの掘削時には $-3.5d$ ($1d \approx 4\text{ m}$)より沈下が始まり、一旦隆起傾向を示した後、 $-1.5d$ より再び沈下傾向を示した。一方、約 $4d$ 遅れて掘削を開始した左サイロットでは隆起傾向を示すことなく沈下が進行し、サイロットがすべて貫通した時点での沈下量は -7 mm に達した。ここで、上半掘削までの約1カ月の間に 2 mm の時間依存性変位が認められ、上半の掘削ではさらに -6 mm の変位の進行があり、その後収束した(下半の掘削による沈下はなし)。これらの計測結果から、右サイロットの掘削により地表面の隆起現象が一時的に見られたこと、左右のサイロットの掘削により最終沈下量の約50%が生じたこと、上半の施工に伴うアーチの閉合により地表面沈下がほぼ収束したことが認められた。

5.2 トンネル横断面方向の地表面沈下量

図-6は、測点No.5における横断面方向の地表面沈下量を、各掘削段階ごとに示したものである。先進した右サイロットの掘削では、トンネル中心より右側における変位が増加し、左サイロットの掘削ではトンネル中心より左側における変位が増加する傾向が見られた。さらに、上半掘削時にはトンネル中心より左側において特に沈下量が増大し、傾斜地におけるトンネル掘削では地表面沈

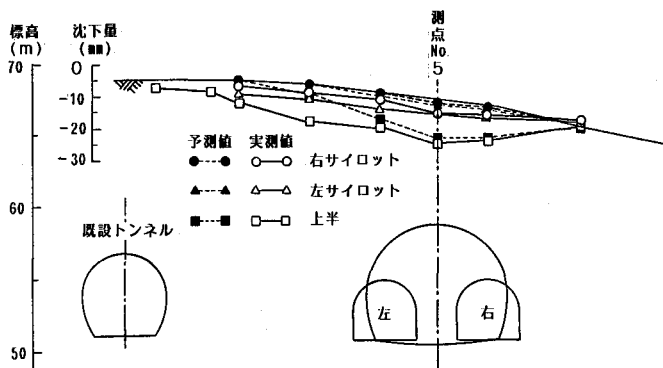


図-6 測点No.5における地表面沈下

下形状が山側に拡大するという一般的傾向が今回の計測においても認められた。

一方、島田（1981）は、土被りの浅い鉄道トンネルにおける地表面沈下量の予測式を下記のように提案している。

$$S_{ij}=a \cdot T \cdot \exp (-\alpha \cdot X-\beta \cdot Z)$$

- S_{ij} : 任意の地点での地表面沈下量
 a : 地質条件により定まる定数 ($a=1.2/\exp(-\beta)$)
 T : トンネル天端沈下量

α, β : 地質条件によって定まる定数
 Z : 土被り比 ($Z=\text{土被り}/\text{トンネル半径}$)
 X : $X=\text{トンネル中心からの離れ}/\text{土被り}$

ここで、 $\alpha=4.0$ 、 $\beta=0.3$ （風化岩に相当）とした場合の予測値を図-6に示すが、沈下量は実測値と良い一致を示すものの、左サイロット側の沈下形状は斜面地形の影響を受けて実際より少ない値を示した。

5.3 トンネル縦断面方向の地表面沈下量

図-7はトンネル縦断面方向における各掘削段階ごとの地表面沈下を示したもので、斜面先端部では図-5でも示したように右サイロットの掘削時に一旦隆起する挙動を見せた。また、図-8は地表面沈下量の等沈下線を示すが、坑口付近では旧トンネル（亀山トンネル）方に等沈下線が伸び、大河内山荘付近では山荘方へ等沈下線が伸びていることがわかる。さらに、図-9は土被りと地表面沈下量の相関関係をプロットしたもので、地表面沈下量は土被り10m付近で一旦ピークに達した後、再び減少する傾向を示す。

これらの計測結果から、右サイロットの掘削時に隆起現象が生じる理由としては、掘削に伴い周辺地山にゆるみが発生し、坑口斜面に若干の滑りを誘発したものと推定される。また、等沈下線のパターンが坑口付近と大河内山荘付近とで異なる理由としては、横断面の地表の傾斜方向が両者で相違するためと考えられる。さらに、土被り10m付近で地表面沈下量がピークに達する点は、土被りが10mを越えると徐々にグラウンドアーチが形成され、このためトンネル掘削による地表面沈下への影響が徐々に減少するためと思われる。なお、島田の予測式に基づく予測値を図-9にプロットしたところ、ここでも比較的良好一致を示した。

5.4 トンネル掘削に伴う地中沈下

図-10は、多段ベンチ工法

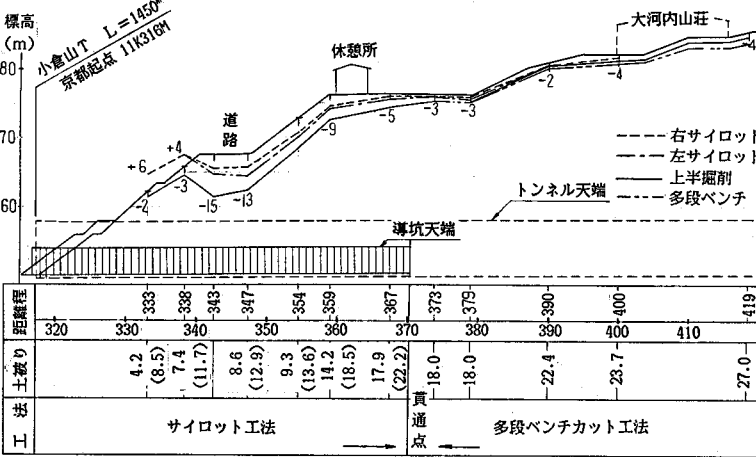


図-7 トンネル縦断面方向の地表面沈下

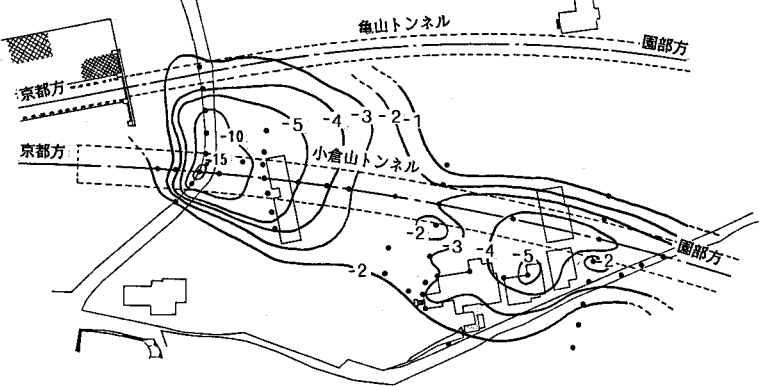


図-8 地表面沈下量の等沈下線（単位mm）

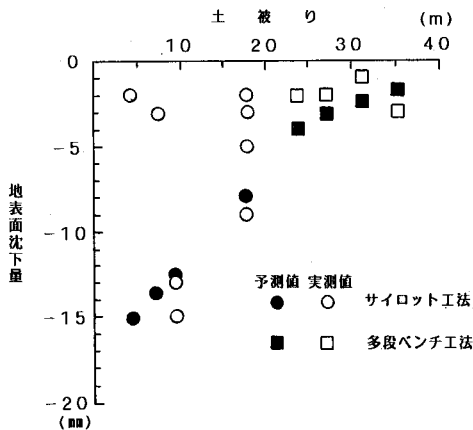


図-9 土被りと地表面沈下量の関係

区間における地中沈下量と上半切羽の関係を示したもので、ゆるみ領域の境界はトンネルの掘削面より約5.0m上方にあることがわかる。また、図-11は、各測点での最終地中沈下量を1.0として変位量の割合を示したもので、上段切羽の通過時に収束変位量の約10～20%が生じていることがわかる。

6. まとめ

今回、小倉山トンネルの起点方坑口で行った各種の計測データに検討を加えた結果、地表面沈下量を予測する手法として島田の提案する予測式が比較的良好一致を見せ、地山条件に応じた定数を選び、天端沈下量を計測することにより地表面沈下量の予測が可能となることが明らかとなった。

また、地表面沈下量と土被りの相関関係から、このトンネルにおいては土被りが約10mを越えるとグラウンドアーチが徐々に形成されて地表面沈下量が減少することが認められ、一方、地中沈下量の計測結果からはトンネル壁面から5.0m付近までゆるみ領域が存在することがわかった。今回は重要構造物直下の施工と言うことで地表面沈下量の測定を主体とした密な計測を実施したが、その結果、島田の式を用いて地表面沈下量を予測することによって土被りの薄い坑口付近での施工管理がより的確に行えること、本トンネルのような地質・地形、設計・施工条件のもとでは土被り約10m以上でグラウンドアーチが形成されることなどが解明された。

なお、大河内山荘直下の設計・施工、現場計測にあたって、御指導いただいた（財）鉄道総合技術研究所地盤・防災研究室の吉川室長、朝倉主任研究員をはじめとする各位に深甚なる謝意を表し、結びとする。

【参考文献】

- 1) 島田隆夫「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, No.1162(1981)
- 2) 島居興彦, 藤岡繁樹, 川嶋正年, 牧野安展「嵯峨野の山荘下をトンネルで抜くー山陰線小倉山トンネルー」トンネルと地下, Vol.19, No.8(1988)

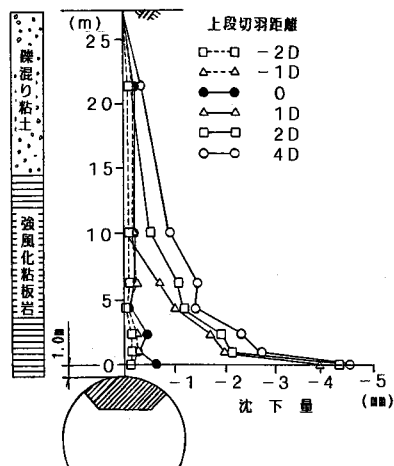


図-10 地中沈下量と切羽距離（上段切羽）

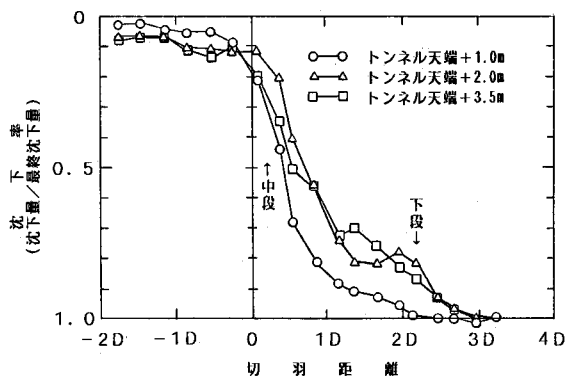


図-11 切羽距離と沈下率