

低土かぶり・未固結シルト層における NATM施工と計測管理

NATM tunneling in unconsolidated silt formation under thin overburden cover
and measurement-based construction management

藤本浩志¹・都築保勇²・山木昇³

Koji Fujimoto, Yasuo Tsuzuki and Noboru Yamaki

¹正会員 工修 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 北陸新幹線建設局 飯山鉄道建設所

(〒389-2253 長野県飯山市飯山1071-2)

E-mail:kuj.fujimoto@jrtr.go.jp

²正会員 工学 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 北陸新幹線建設局 飯山鉄道建設所 所長

(〒389-2253 長野県飯山市飯山1071-2)

³戸田建設株式会社 (〒383-0053 長野県中野市大字草間字大久保1973-1)

The ground in which the south work section of the Takaoka Tunnel is located is subject to plastic deformation, and the tunnel had to be driven under a thin overburden cover. Since there are many houses and other important surface structures directly over the tunnel, it is of vital importance to minimize the influence of tunnel excavation on these structures. For the purpose of settlement management, therefore, surface settlement was estimated on the basis of data obtained from past tunnel projects. This paper reports on the process that led up to the adoption of this management method, the estimation method used at present and the construction procedure.

Key Words : NATM, unconsolidated silt, thin overburden cover, surface settlement

1 はじめに

北陸新幹線高丘トンネルは、高崎起点 131 km 572 m～138 km 490 m に位置し、長野県北部を流れる千曲川右岸側の長丘丘陵を縦断する全長 6,918 m のトンネルである。長丘丘陵は、北部は標高 400 m 以上の比較的起伏の富んだ地形であり、南部は標高 380 m の茶臼嶺を最高点とした起伏の緩やかな丘陵性の地形を成す。当トンネルは南工区 (L=2,928 m) と北工区 (L=3,990 m) の 2 工区に分けて施工している。起点方工区である南工区は土かぶり 1D～5D 程度と低土かぶり区間である。また、本線地上付近には、民家集落地のほか高速道路、送電線鉄塔など重要構造物が多数存在する。

そのうち、132 km 288 m～132 km 740 m 付近にはトンネル本線直上付近には家屋や市道などが存在する。土被りは 10 m～25 m 程度であり、トンネル掘削により地表面沈下が生じることが考えられる。これら構造物への影響を最小限にすることが最重要課題である。

そこで、施工実績に基づいた地表面沈下予測により沈下管理を現在行なっている (図-2)。その管理手法に至るまでの経緯と現在の予測方法、施工の進め方について報告する。

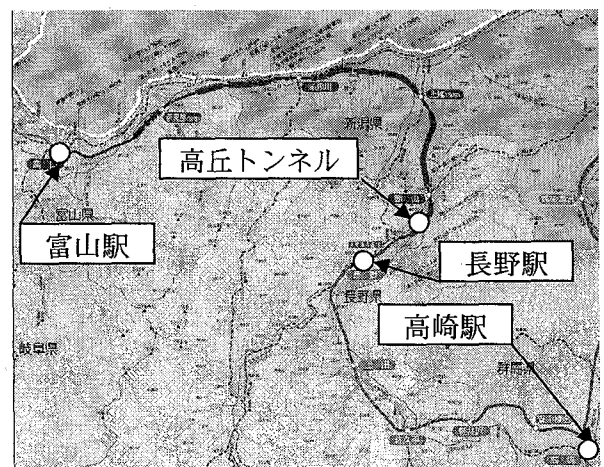


図-1 位置平面図

2 地質概要

長丘丘陵周辺の地質は古い飯綱火山を起源とする火山砕屑物、シルト、砂、礫が湖底で二次堆積したものであり、第四紀更新世前期にあたる猿丸層、中期の豊野層から構成され、これらを覆って更新世後期とされる南郷層がトンネル上部に分布する。全体的に新しい年代の地層が分布しているため、非常に軟質で緩い状態の地質と言える。また、長丘丘陵は激しい地殻変動と長丘断層（活断層）の運動によって隆起した丘陵であるため、丘陵周辺の地層の走向・傾斜は短距離の間に複雑に変化し、シルト層は亀裂を有している。更に、滞水砂層・礫層が挟在するため、亀裂質シルトと相まって土砂流出が発生する場合もある。トンネル断面に出現するシルト層は豊野層であり、一軸圧縮強度は 0.8MPa (8.0kgf/cm^2) 程度と小さく、変形係数 20MN/m^2 、地山強度比 $G_n < 1.5$ 程度と共に低いものとなっている（図-3）。

3 これまでの施工実績

(132 km 740m~134km500m)

当工区の主な特徴は以下の3点である。

- ① トンネル直上に存在する重要構造物
- ② 応力開放による地山の塑性変形
- ③ 低土かぶり

このような特徴を有するため、トンネル掘削による影響がトンネル直上に現れ、重要構造物に影響を与える。当工区の最重要課題はトンネル直上の重要構造物の防護であり、そのために掘削パターンや掘削方法の検討と施工を繰り返してきた。このような施工実績より、日和ヶ丘団地区間の掘削工法及び掘削パターンを設計した。

掘削パターンの設計にあたり、地表面沈下に着目したFEM解析を採用した。力学モデルは、応力の増加に伴い変形係数が徐々に減少する特徴を有する非線形弾性モデルとした。掘削工法は、施工機械の配置や鏡の安定を考慮し、ショートベンチ工法（最小ベンチ長6m）とした。支保パターンは、支保工200H（吹付厚25cm）とし、早期閉合を目的とした上半

仮インバート（吹付厚30cm）、下半仮インバート（吹付厚20cm ストラット有）とした。NATM補助工法は、切羽の自立性確保および地上の構造物の防護を目的とした先受工・鏡止工（注入式AGF（ $L=12.5\text{m}$ ・シリカレジン））、トンネル脚部沈下抑制を目的とした側壁先行改良（上半：鋼管50A（ $L=6.0\text{m}$ ）シリカレジン注入、下半：ファイバーボルト（ $L=4.0\text{m}$ ）シリカレジン注入）を設定した（図-4）。

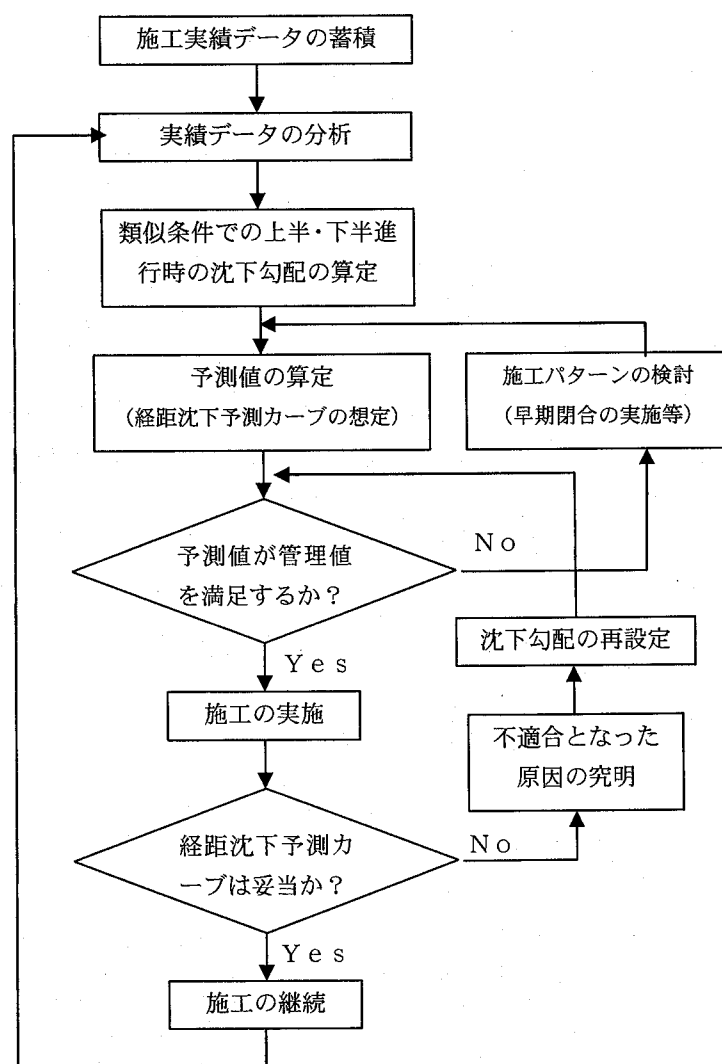


図-2 地表面沈下管理フロー図

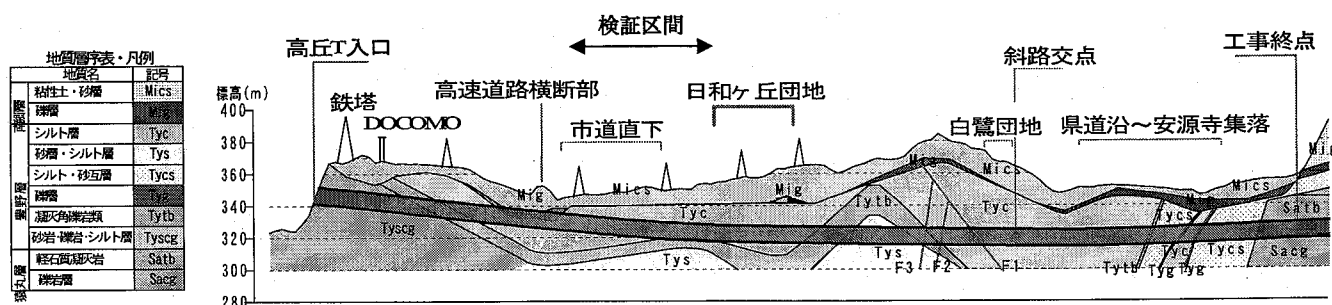


図-3 高丘トンネル南工区地質縦断面図および保安物件位置図

上記のような掘削パターンにより掘削した施工結果を図-7に示す。当区間の計測結果は、最大値として地表面沈下量 15mm、天端沈下量 23mm、内空変位量 71mm であった。地表面沈下量はこれまでの施工実績より小さい値となり、家屋被害報告も非常に少ない結果となった。

この施工結果を踏まえ、132 km 740m 以降について地上に存在する構造物も考慮した管理値を設定し、段階的に掘削パターンの変更を行った。

4 市道区間付近の施工計画および結果

4. 1 管理値の設定

地上に存在する重要構造物を防護することが最重要課題であるため、地上に管理限界値を設定した。家屋傾斜角は、日本建築学会「建築基礎構造設計指針 2001 年改訂版」を参考とし、民家に被害が生じる一つの目安である 3.0/1000rad を採用した。また、施工実績より地表面沈下量 80mm のときに家屋傾斜角が 3.0/1000rad となるため、地表面沈下量の管理限界値を 80mm に設定した。更に地表面沈下量は管理限界値に対して注意値（6割）、警戒値（8割）を設定し、注意値を管理目標値とした。

4. 2 掘削パターンの設定

設定を行った管理限界値に対して、計測による管理の下、段階的な掘削パターン変更のために区間設定を行った（図-4）。132 km 740m～132km960m までをA区間（日和ヶ丘団地区間）とし、132 km 590m～132km740m 区間を準家屋密集地区であるB区間、132km288m～132km590m を市道直下であるC区間とした。

各区間の地上状況を考慮し、補助工法を段階的に軽減する掘削パターンを設定した。A区間からB区間への変更点は、上半仮インバート工の厚みを変更（吹付厚 30cm→15cm）し、脚部沈下抑制対策である上半側壁先行改良を削減するパターンとした。C区間では、更に先受工の打設ピッチを 45cm（25 本打設）から 60cm（19 本打設）への変更、下半側壁先行改良を削減するパターンとした。このような掘削パターンを設定したが、地表面沈下量およびA計測の変位量および変位速度増大が確認された場合は、補助工法の見直しなどを実施する計画とした。

4. 3 地表面沈下量管理手法

B・C区間は土かぶりおよび地質条件が比較的均一であることから地表面沈下量の計測結果を検証し、検証結果を踏まえ地表面沈下予測を行い、掘削管理手法を確立した。

検証したデータは132 km 730m 以降の地表面沈下計測データとした。このデータを上半掘削および下半掘削による沈下量に分け、観測点を中心として10 m毎に掘進長1 m あたりの平均沈下量（沈下勾配）をまとめたものが図-5である。この結果より、上半掘削による沈下量が大きいことがわかる。特に上半切羽通過直後に掘削による応力開放によって地表面沈下量が増加している。

この結果を用いて、地表面沈下予測を行った。予測方法としては、沈下予測位置での掘削計画を立て、経距沈下カーブを想定した。この沈下予測結果が管理目標値を満足するかいなかを判断し、満足しないならば、下半インバート工による閉合距離の短縮などの対策を実施する計画とした。満足するものであ

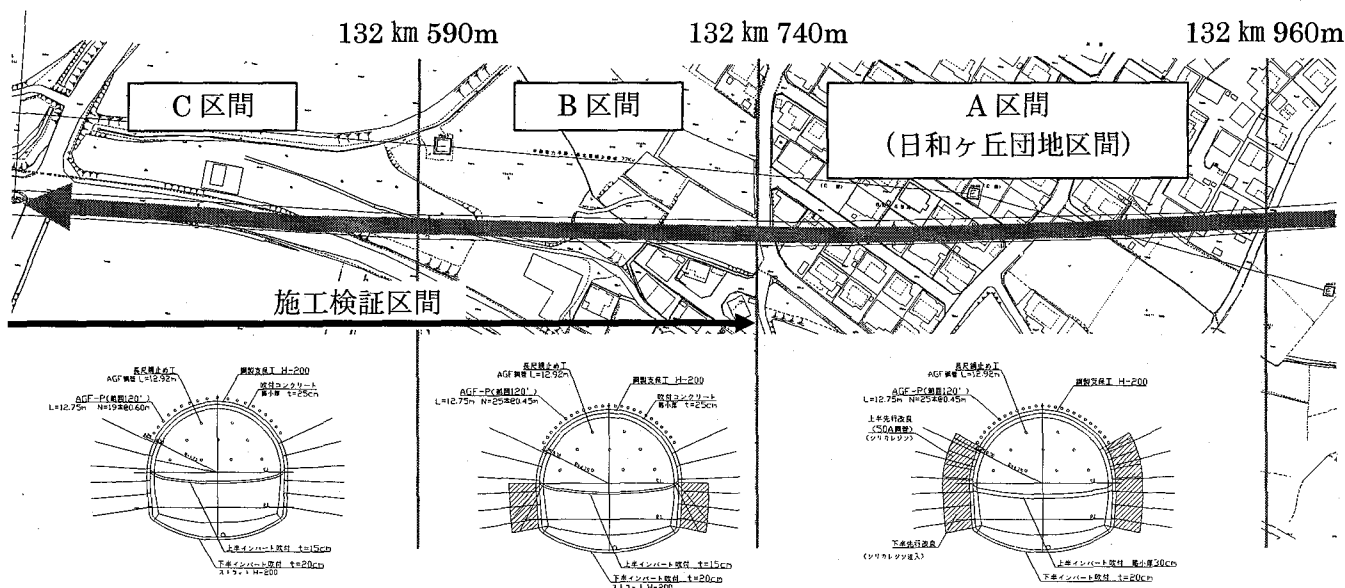


図-4 高丘トンネル工区 平面図および各区間掘削パターン

れば、施工を継続した。

また、沈下予測と施工結果を比較し、予測の妥当性を検討した。沈下予測と施工結果が不適合な場合は、その原因を究明し、必要に応じて沈下勾配の見直しを行った。

例として、図-6に132km610m付近での地表面沈下予測と実績とを比較したものを示す。当工区はAGFによる先受工の施工を行っており、2シフト（1シフトあたり9m）毎の上下半交互掘削とした。先受工の施工切羽位置より掘削計画を立て、図-5を元に経距沈下カーブ（実線）を想定した。結果、予測収束値は32.7mmであったため、管理目標値以内と予測された。次にトンネルの進行に合わせて測定結果（点）をグラフ上にプロットした。実測値が想定した経距沈下カーブに対して妥当な値となり、平均沈下量（沈下勾配）の変更は実施しなかった。最終的な実測による地表面沈下量収束値は34mmであった。経距沈下カーブとの差は、1.3mmであり、おおむね一致する結果となった。

4. 4 施工結果

各区分での施工結果についてトンネル直上の地表面沈下量、天端沈下量、内空変位量を図-7に示す。各計測データの最大値は、地表面沈下量42mm、天端沈下量61mm、内空変位量104mmであった。検証したB・C区間は、重要構造物の減少に伴い経距グラフによる地表面沈下の管理を行いつつ、補助工法の軽減を図り掘削を進めた。その結果、図-7の計測結果のとおり、地表面への影響を管理限界値内に収めて、掘削を完了している。これは上半仮インバート・側壁先行改良・先受工の補助工法軽減を行ったが、地表面沈下予測による管理方法の工夫によって実現された。こういった管理方法の工夫により、工事費の縮減に努めた。

5. おわりに

低土かぶり・未固結シルト層において、地表面沈下量を予測し、トンネル掘削を管理する手法にて無事に掘削を進めている。本沈下予測手法は、施工実績を踏まえて行う手法であるため、地質条件・土被りなどが変化する区間での管理が課題と考えられる。

今後、高速道路、中部電力送電線鉄塔、携帯電話中継鉄塔などの構造物直下を掘削することとなる。これまでの施工実績および計測データを今後の施工に反映しながら無事施工完了を目指したい。

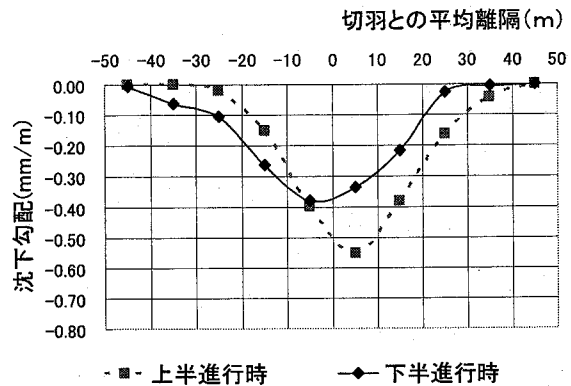


図-5 切羽位置と沈下勾配
(132 km 620m~132 km 730m)

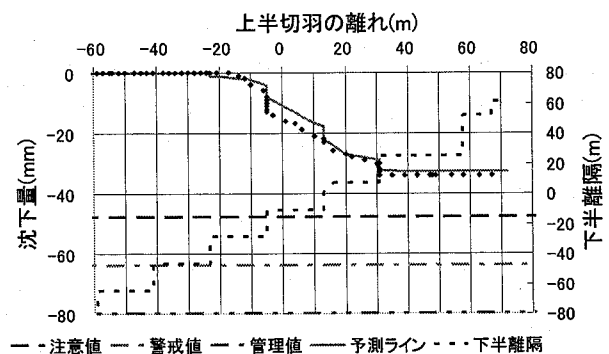


図-6 地表面沈下量 予測と実績の比較
(132 km 610m付近)

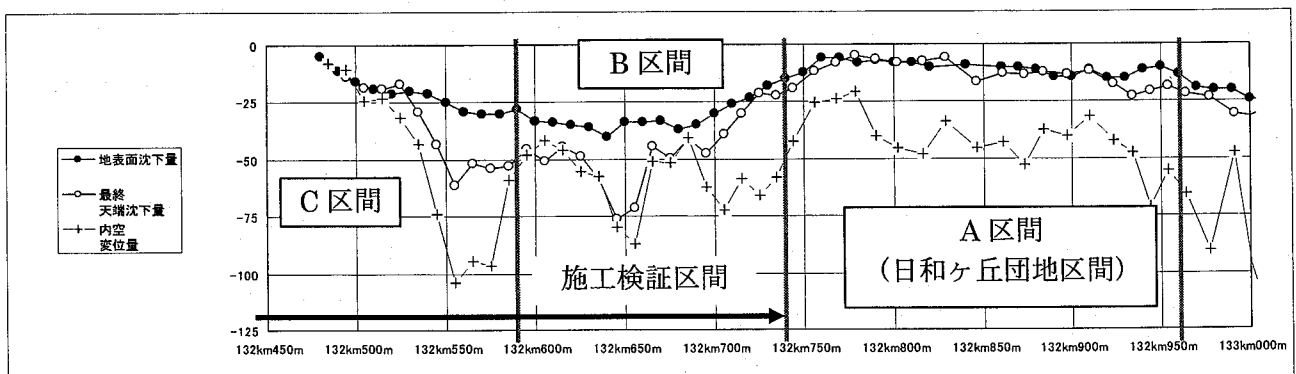


図-7 計測結果（地表面沈下量・天端沈下量・内空変位量）