

民家直下のシルト質小土被り未固結地山 におけるNATM対策工について

Selecting Auxiliary Methods for Tunnel Excavation in Unconsolidated Silt Strata
Directly under Urban Areas with Small Overburden

本堂亮¹・依田淳一²・山木昇³
Akira Hondou, Junichi Yorita 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 長野県飯山市大字飯山1071-2)

E-mail : a.hondo@jrtr.go.jp

²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 所長
(〒389-2253 長野県飯山市大字飯山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1073-1)

The Takaoka Tunnel on the Hokuriku Shinkansen is a NATM tunnel excavated through a hill in an urban area where the overburden depth is only about 30m. In this area, there is an apartment block of a housing complex and about 80 private houses. The key issue is to control ground level subsidence in order to prevent damage to the private houses. This paper reports a method of selecting auxiliary methods based on FEM analysis in the apartment complex section, method of measuring surface displacement at each excavation stage, and present construction situation.

*Key Words : NATM, Auxiliary Methods, Small Overburden, Urban Areas,
Measurement of Surface Displacement*

1. はじめに

北陸新幹線高丘トンネル (L=6,940m) は、北陸新幹線建設区間の中で最起点のトンネルであり、長野県の善光寺平北縁部の丘陵部に位置する(図-1)。

当トンネルは南工区 (L=2,928m) と北工区 (L=3,990m) の2工区にて施工を行っている。そのうちの起点側工区である南工区 (高崎起点 131km572m ~ 134km500m) は10m~50m程度の小土被りであり、直上には家屋密集地域をはじめ、高圧線鉄塔など多数の重要構造物が存在する。高崎起点 132km740m ~ 132km960m (L=220m区間) 付近に位置する団地では、土被り25m~35m程度の直上に約80軒の民家が存在する。当該区間では、地表面沈下を抑制し、家屋への被害を防ぐことが最

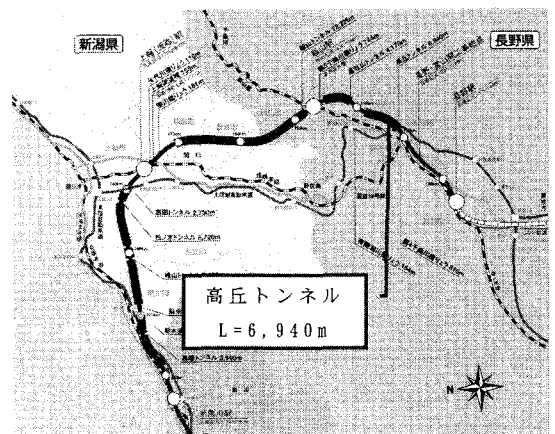


図-1 北陸新幹線 (長野~糸魚川間)
路線平面図

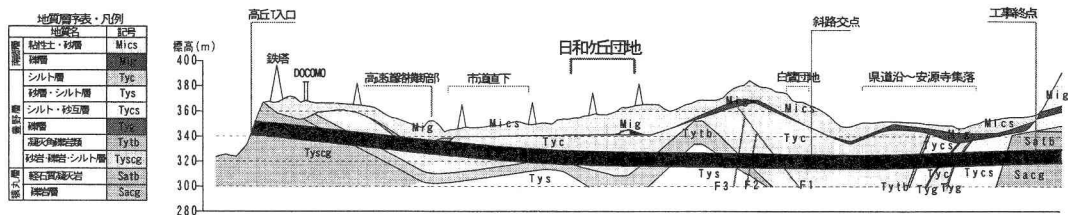


図-2 高丘トンネル南工区地質縦断面図及び保安物件位置図

重要課題である。これら家屋の影響を最小限に抑制するため、力学モデルによる沈下予測及び実測値より、対策工の選定を行った。本報告では、団地区間にて行った対策工の選定方法、シルト質地山の挙動特性、計測管理手法及び現在の施工状況について報告する。

2. 団地区間の地質概要

図-2 に高丘トンネル南工区の地質縦断面図を示す。高丘トンネル近傍には長丘断層があり、豊野層は地殻変動による影響を受けている。民家直下付近には褶曲が存在し、地層が波を打つように分布している。団地区間のトンネル上部には、N値 10～20 程度の粘性土を主体とする南郷層、トンネル断面及び下部にはN値 10～30 程度のシルト質土を主体とする豊野層が分布する。且つこれら粘性土は亀裂性を有しているという特徴がある。加えて、これら粘性土が地下水を有した細砂層と互層を成していることも相まって、切羽の自立性が低い。

3. 力学モデルの構築

当該区間における対策工の選定にあたり、これまでの施工実績を踏まえ、地表面沈下量に着目した力学モデルの構築を行った。解析モデルとして①弾性モデル、②非線形弾性モデル及び③弾塑性モデルを構築し、各モデルの変位特性、特に地表面沈下に着目し、解析値と実測値を比較することとした。なお、解析断面は、比較的地質が均一

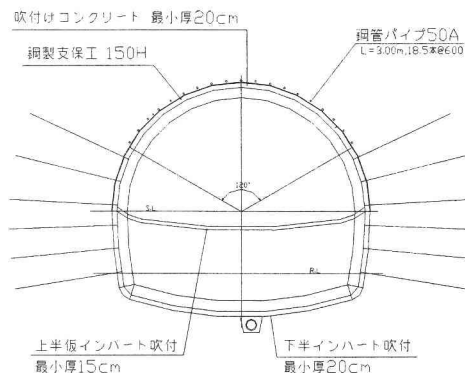


図-3 133km680m 付近掘さくパターン図

表-1 解析モデルの再現性比較
(地表面沈下量)

力学モデル	弾 性	非線形	弾塑性
解析値	69mm	121mm	85mm
実測値	104～119mm		

であった 133km680m 付近（土被り 35m）とし、地山物性値はそれぞれ、変形係数 $E=27\text{MN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=20^\circ$ 、粘着力 $C=101\text{kN/m}^2$ とした。133km680m 付近の掘さくパターン図を図-3 に示す。

その結果、表-1 に示すように、地表面沈下量について非線形弾性モデルが最も再現性が高いという結果を得た。これは非線形弾性モデルが、応力が増加するに従って変形係数が徐々に減少する現象を表現し、当工区の地山変形特性を捉えることができたためと考えられる。この結果より、このモデルを用いて各種対策工の選定を行うこととした。

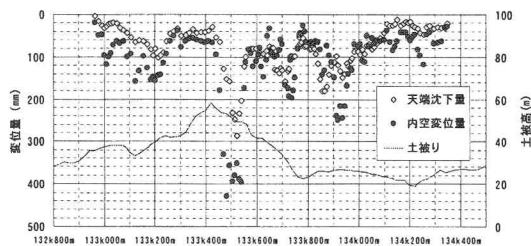


図-4 内空変位量と天端沈下量の関係

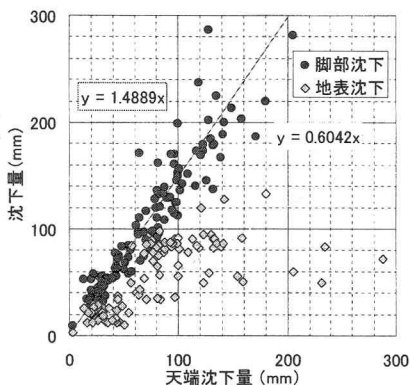


図-5 脚部沈下量と地表面沈下量

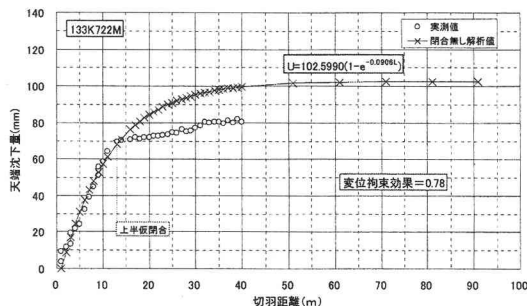


図-6 上半仮閉合効果の評価

4. 団地区間における対策工の選定

(1) シルト質地山の挙動特性

図-4 に既掘さく区間における内空変位量と天端沈下量の関係を示す。このグラフより、当工区は内空変位量より天端沈下量が卓越するといった特徴を有し、特殊な地

山と判断される。

次に、天端沈下量に対する脚部沈下量及び地表面沈下量との関係を図-5 に示す。脚部沈下量は天端沈下量の約 1.5 倍であり、脚部沈下量が大きいことが分かる。また地表面沈下量は天端沈下量の約 60%、脚部沈下量の約 40% となっており、地表面沈下は脚部沈下からの影響が大きいと考えられる。

(2) 管理値の設定

団地最起点の 132km760m 付近は、豊野層上部の粘性土が N 値 < 20 と豊野層中で最も脆弱である上、土被りも 25m 程度であり、団地内で最も大きな沈下が予想される区間である。この箇所にて、解析モデルにより掘さくパターンの選定を行った。選定の判断基準となる地表面沈下の管理値は、当工区のこれまでの実績より、トンネル直上部の地表面沈下量を 50mm 以下にすることで、家屋に有害な不同沈下を抑制できると考えた。また傾斜角は、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ひとつの目安である 3/1,000rad を管理値とした。

(3) 掘さくパターンの選定

これまで述べた地山挙動特性及び管理値をふまえ、団地区間における掘さくパターンの選定を行った。

a) 支保パターン及び仮閉合

当工区では施工機械の配置や鏡の安定を考慮し、掘さく工法をショートベンチ工法（最小ベンチ長 20m）としている。団地区間においては、支保工 200H（吹付厚 25cm）とした。また団地区間においては、各施工段階における閉合を図ることとし、上半掘さく時は上半盤吹付（吹付厚 30cm）により仮閉合を行い、さらにインパートについては中央集水管抱込み式とし、下半・インパート掘さく毎にストラット付インパート吹付により早期閉合を行うことで、変位抑制を図ることとした。

b) 吹付インパートによる早期閉合効果

図-6 に上半盤仮閉合による天端沈下量の低減効果のグラフを示す。仮閉合施工前の A 計測データから指数関数近似した曲線（実線）と仮閉合施工後の実測値（○点）

表-2 シリカレジン注入効果 確認試験結果

	地盤反力係数 K (MN/m ³)	変形係数 E (MPa)
注入前	394.4	20.50
注入後	888.0	42.45
改良効果 (比率)	2.25	2.07

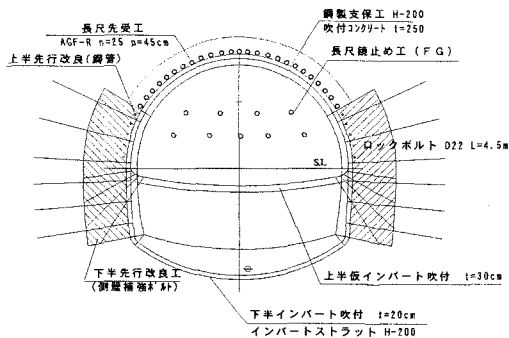


図-7 団地区間 掘さくパターン図

を比較した結果、上半盤仮閉合を行うことで、天端沈下量について約 20% 低減される効果があることが分かった。また、内空変位量についてもほぼ同様の効果が見られた。つまり仮閉合により地表面沈下を抑制できることが示されている。

c) 先受工及び鏡止工

先受工については地山への確実な注入ができ、鋼管自体の芯材としての先受効果の付加を考慮し、注入式 AGF (L=12.5m) を選定した。また鏡止工については、自立性確保と掘さくによる地表面の先行変位抑制を目的とし、同様に注入式 AGF による鏡止工を行うこととした。なお、注入材は亀裂質粘性土への改良効果を考慮し、シリカレジンを選定した。

d) 側壁部補強工

地表面沈下の抑制を図るには、掘さくに先立ち側壁部を補強して、脚部沈下を抑制することが当工区においては効果的であった。側壁先行補強の方法は、先行改良 (注入改良や攪拌改良等) や側壁導坑先進工法などが考えられるが、経済性や施工速度を考慮し、上半側壁は注入管に鋼管 50A (L=6.0m) を用いることで鋼管の芯材としての強度を付加することとし、下半側

壁はファイバーボルト (L=4.0m) により、それぞれシリカレジン注入による先行改良を選定した。

e) シリカレジン注入効果

シルト質地山に対するシリカレジン注入効果について、事前に試験施工を行い確認している。試験方法は原位置試験とし、改良前地山及び改良後地山に対し孔内載荷試験を行い、「変位 (半径) ~ 荷重強度」の関係より降伏圧を求め、地盤反力係数及び変形係数をそれぞれ求めた。

その結果、表-2 に示すように改良による地山の变形性能は約 2 倍程度改善されることが分かった。また一般に、変形係数と粘着力が比例関係にあることが知られており、シリカレジン注入を行うことにより、地山粘着力もおおよそ 2 倍程度の向上が図られることが推察された。

(4) 実施掘さくパターンにおける解析値

図-7 に団地区間での掘さくパターン図を示す。この掘さくパターンにより、団地最起点におけるトンネル直上部の地表面沈下量は解析上 48mm となり、概ね管理値 50mm 以下の沈下量になるものと想定される。しかし、この予想沈下量は許容限界に近いことから、施工状況に応じて対策工を適宜追加することを検討していく。

(5) 解析における地山物性値の妥当性検証

既施工区間におけるこれまでの計測結果により、構築したモデルの解析値は、地質構造のモデル化、特にその地質構成の評価が大きな影響をもつことが明らかとなった。そこで、団地区間の施工に先立ち、解析モデルに用いた地山物性値の妥当性を検証するため、団地区間と地質構造が類似している 132km980m ~ 133km045m (L=65m 区間) において、選定した掘さくパターンで施工を行い、解析に用いた地山物性値の妥当性を検証するための地表面沈下計測を行った。これにより、団地区間における変位予測の精度向上を図るとともに、実際の地山挙動の傾向から、団地区間での確実な施工管理を実現するものである。本線縦断方向の計測間隔はセンター10m ごと、本線横断方向については、左右 40m ずつ 10m 間隔で沈下計測することとした。

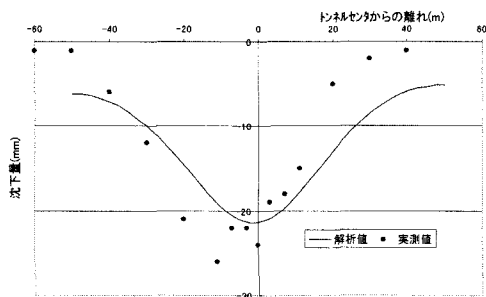


図-8 解析値と実測値の比較
(地表面沈下量)

表-3 上半段階の地表面沈下管理値及び対応策

レベル	沈下量 (mm)	対 応
		(注意値未満) ・通常施工
注意値	21	(注意値を超える見込み) ※ ・通常施工の継続 ・対策工の追加検討
警戒値	28	(警戒値を超える見込み) ※ ・地表面計測の強化 ・対策工の追加実施 ・下半、インバート早期施工の検討
管理値	35	(管理値に達する見込み) ※ ・下半・インバート施工への移行 ・上半盤補強工の検討と実施

※沈下量の見込みは計測データの回帰分析による

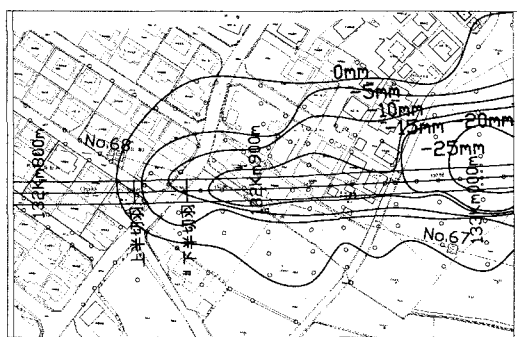


図-9 団地区間 地表面沈下状況

図-8 に 133km000m における地表面沈下横断分布について、解析値と実測値の比較グラフを示す。比較の結果、トンネル直上の沈下量は、解析値 21mm に対し実測値 24mm であった。また、横断方向の分布についても本線左側にやや傾倒している点も含め、概ね良好な一致を得られた。以上の

ことより、解析に用いた地山物性値は妥当性があると判断した。

5. 地表面沈下管理値と計測管理手法

団地内の地表面沈下計測については、24 時間監視体制を行うため、トータルステーション 2 基による自動追尾計測を行うこととした。

地表面沈下量最終値の管理値は、前述のように 50mm と設定しているが、この管理値を遵守するべく、各施工段階において実測データから上半施工段階、下半通過後及び最終段階の沈下量を回帰式を用いて予測し、施工段階に対応した対策工を検討・選択していくこととした。

上半切羽通過時の地表面沈下量は、解析より最終値の 70%程度と予測されることから、管理値を $50\text{mm} \times 70\% = 35\text{mm}$ とした。また、下半切羽通過時の地表面沈下量については、これまでの実績より下半通過時から収束（吹付けによるインバート仮閉合）まで約 5mm 程度沈下することより、 $50\text{mm} - 5\text{mm} = 45\text{mm}$ を管理値とした。さらに管理値の 60%である注意値、80%である警戒値を設定し、沈下の状況に応じ、事前に対策工を検討できる管理手法を構築した。例として、表-3 に当工区で構築した上半段階の地表面沈下量管理値及び各レベルにおける対応策を示す。

6. おわりに

平成 17 年 8 月末時点で、団地区間はほぼ中間地点まで掘さくを完了している。図-9 にこれまでの地表面沈下の状況を示す。現在のところ地表面沈下量最終値は 20mm 程度で収束をしており、沈下による家屋の被害や住民の苦情等は発生していない。団地区間は残り 100m 程度の掘さくが残っているが、前述のように団地の最起点側に向かうにつれ地質条件が悪くなると想定されており、今後も構築した管理手法に基づき適切な施工に心がけたい。