

第四紀未固結粘性土層への 注入による地山改良効果

Natural ground stabilization effect by the chemical grouting to unconsolidated silt formation in Quarternary period

依田淳一¹・魚津宗²・都築保勇²・藤本浩志³・山木昇⁴

Junichi Yorita, Tsukasa Uotsu, 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 大阪支社 工事部
(〒531-0071 大阪市北区中津1-6-24)

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
(〒389-2253 長野県飯山市飯山1071-2)

E-mail:t.uotsu@jrtt.go.jp

³正会員 工修 鉄道・運輸機構 鉄道建設本部 計画部 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)

⁴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. Therefore side wall precedent improvement by the chemical grouting was effective in various supporting methods of construction that I adopted till now. I report it about a choice reason of the chemical grouting that I adopted and an chemical grouting improvement effect.

Key Words : NATM, unconsolidated silt, chemical grouting

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 NATM 工法により掘削しているトンネルである。(図-1) 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 程度と小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 178 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および高速道路な

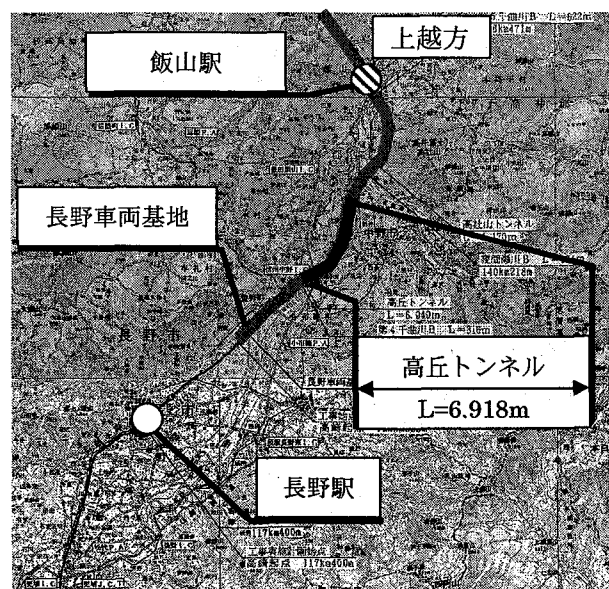


図-1 位置平面図

土被りは10m～25m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、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。本稿では、これまで採用してきた様々な補助工法の中で、地表面沈下抑制に効果的であった注入による側壁先行改良について注入材選定理由および注入改良効果について報告する。

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、これらを覆って第四紀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、非常に軟質で変形性の強い地質と言える。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、シルト層は多亀裂な状態である。更に、砂層・礫層が挟むため、滞水している場合には、亀裂質シルトと相まって地山の小崩落を生ずる場合もあった。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程度と小さく、変形係数 20MN/m^2

3. 高丘トンネル南工区の特徴と補助工法

- ① トンネル直上に存在する重要構造物
- ② 多亀裂な未固結状シルト(応力開放による地山の塑性変形)
- ③ 小土かぶり

このような条件の下、掘削工法は、地表面への影響、施工機械の配置および鏡の安定を考慮し、ショートベンチカット工法（最小ベンチ長6m）とした。

また、補助工法として脚部沈下抑制のための上半仮インバートによる上半閉合、下半ストラットを入れた断面閉合、長尺先受工・長尺鏡止工（注入式AGF（L=12.5m・シリカレジン））、トンネル脚部沈下抑制と側壁部の塑性化抑制を目的とした側壁先行改良、下半：ファイバーボルトを地質状況により採用を検討した。

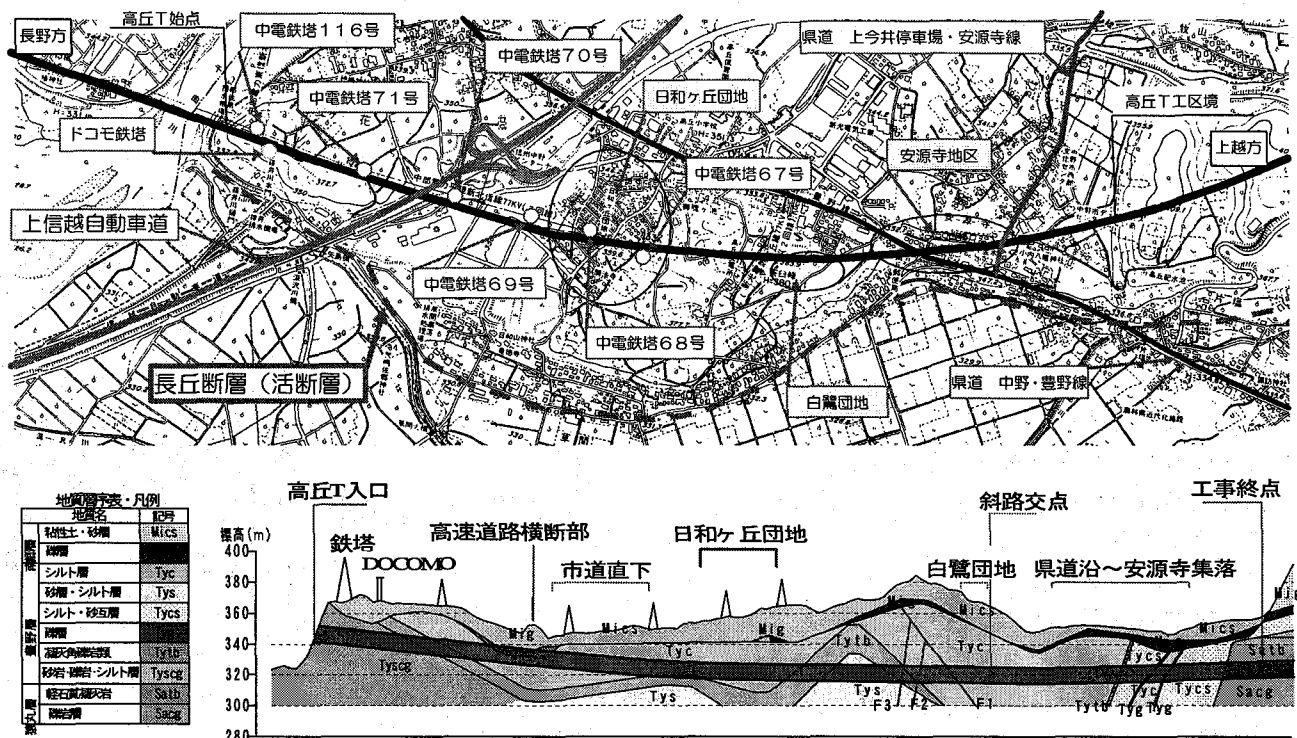


図-2 高丘トンネル南工区位置平面図および地質縦断面図

4. 解析モデルの選定

第四紀未固結粘性土層を NATM で掘削する際の補助工法を選定するに当たり、近接構造物への影響を抑制するために地表面沈下量の再現精度が高い FEM 解析モデルを構築した。¹⁾

解析手法については、これまでの施工区間における地表面沈下量に着目し、弾性解析、非線形弾性解析、弾塑性解析を行い、再現性が高いモデルを予測モデルに採用することとした。

解析に用いた断面は地質が比較的均一なシルトが主体である 133 km 680m 付近とし、地質条件は変形係数 $E=27\text{MN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=20^\circ$ 粘着力 $C=101\text{KM/m}^2$ 、土かぶり 35m の地点で実施することとした。

解析断面において地表面沈下量の実績値と各解析手法の順解析による地表面沈下量、また、各解析ステップにおける地表面沈下量とトンネルの天端沈下量を比較検討した。(表-1)

その結果、非線形弾性解析は最終的な地表面沈下量、天端沈下量が実績値に近い値を表現でき、最大主ひずみの分布において天端と上半脚部に緩み領域が発生し、本工区の地山変形特性を表現できると判断した。この結果を受け、掘削パターン検討のための解析モデルとして非線形弾性解析モデルを採用することとした。

表-1 解析ステップ毎の解析値の比較

ステップ	地表面沈下量 (mm)				天端沈下量 (mm)			
	実績	弾性	非線形弾性	弾塑性	実績	弾性	非線形弾性	弾塑性
1 自重解析	-	-	-	-	-	-	-	-
2 上半掘削 開放率40%	-	29	38	31	-	90	117	94
3 上半支保工	-	-	-	-	-	-	-	-
4 上半掘削 開放率60%	-	58	91	71	-	160	239	186
5 下半掘削 開放率40%	-	64	105	79	-	169	261	198
6 下半支保工	-	-	-	-	-	-	-	-
7 下半掘削 開放率60%	104~ 119	69	121	85	210~ 232	177	288	204

表-2 検討ケースと数値解析予測値

補助工法		CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6
条件	先受	-	○	○	○	○	○
	フットパイル	-	○	○	○	○	○
	上半仮閉合	-	○	○	○	○	○
	吹付厚	-	15cm	30cm	15cm	15cm	15cm
	上半ストラット	-	-	-	H150	-	-
	吹付インバート (20cm)	-	○	○	○	○	○
	側壁先行改良	-	-	-	-	下半	上半、下半
結果	地表面沈下量 (mm)	127	87	86	84	76	70
	天端沈下量 (mm)	141	103	101	99	87	81

5. モデルによる補助工法の選定

上記のモデルを用いて、本工区の標準的土かぶりと地質条件を想定し、支保パターン、補助工法などの支保の組み合わせを行い、それらの地表面沈下抑制効果を評価することとした。

地質条件は $N=24$ 、 $E=24\text{MN/m}^2$ 、 $\phi=18^\circ$ 、 $C=94\text{KM/m}^2$ 、土かぶり 25m、シルト主体の地質としてシミュレーションすることとした。その結果を表-2に示す。

6. 側壁先行改良の評価

本工区は掘削に伴い側壁部の亀裂破壊が一部進行し、この破壊が地山全体への劣化へと波及し、そして、トンネル周辺の全体の地山の変形係数が低下していくと想定される。

そこで新たな補助工法として地山の変形係数が低下する前に、特にその契機となる上半下半の側壁部について、切羽が到達する前に地山強度を上げてしまふことが重要ではないかと考え、側壁先行改良を施工することとした。(図-3、図-4)

側壁先行改良の効果を検証するため、掘削前に先方に向かって注入式ロックボルトなどを用いて先行改良を行った場合と、掘削後坑内から注入式ロックボルトにより後追いで改良する場合について数値解析を行った。(表-3)

地表面沈下を比較すると先行改良した場合、地表面沈下量を抑制でき、側壁先行改良の有効性を確認することができる。

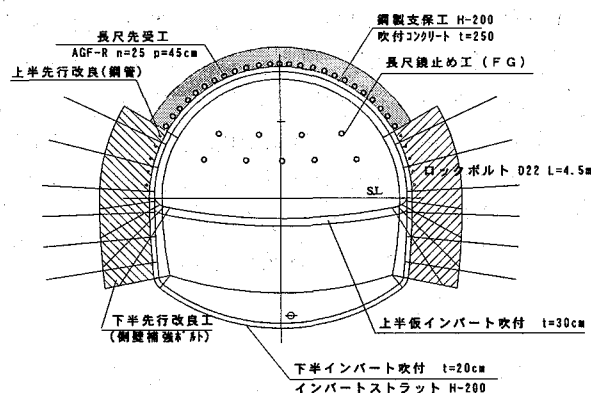
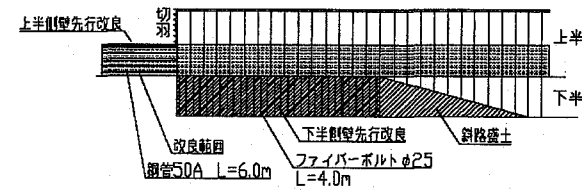
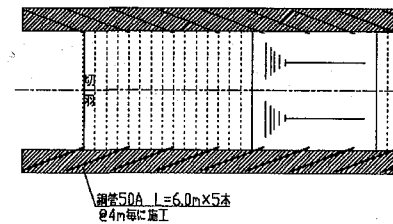


図-3 掘削パターン図



側壁先行改良縦断面



側壁先行改良平面図（上半）

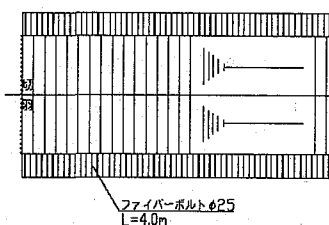


図-4 側壁先行改良の概要図

表-3 側壁先行改良の効果（解析結果）

	天端沈下量 (mm)	地表面沈下量 (mm)
改良なし	173	86
掘削後側壁改良	154	84
側壁先行改良	138	75

7. 側壁先行改良の効果確認

非線形弾性解析により側壁先行改良の有効性が確認されたが、側壁先行改良を実施した場合と、実施しなかった場合での実際の状況を検証する。²⁾

検証については住宅密集地手前 133 km000m地点において、地表面沈下横断分布の予測を非線形弾性解析にて行って得られた解析値と実測値との比較を行った。そ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。(図-5)

側壁先行改良の効果について、掘削前にトンネル側壁部の地山強度を改善する側壁先行改良を実施した区間と実施しなかった区間における地表面沈下量及び内空変位量の実績値により比較を行ったグラフを図-6 に示す。データ分布にばらつきはあるもの

の、各々の近似直線の比例係数を比較すると、側壁先行改良を実施した区間の方が小さい値となり、地表面沈下量の低減効果が約 85% 得られることが分かった。

よって、側壁先行改良が、先行沈下を抑え地表面沈下を抑制する上で有効であることを確認した。

8. 注入材の選定

側壁先行改良の施工に先立ち、当工区の地山に適応した注入材の検討を行った。検討した注入材は懸濁型（水ガラス系超微粒子セメント）、溶液型（水ガラス系無機系シリカゾル、高分子系ポリウレタン）であった。

注入材に求められる効果は、当工区の地山が多亀裂シルト層であるため、亀裂部への確実な充填による亀裂性地山の一体化、注入圧等による地山の密着効果および地山の塑性変形の抑制効果である。各注入材を試験施工した結果、これらの効果を総合的に評価した。

(1) 水ガラス系超微粒子セメント

水ガラス系超微粒子セメントによる注入の結果を以下に示す。実施した地山は帯水砂層と亀裂質シルト層の互層であった。結果、当トンネルの地山では、設計注入量程度で注入圧の上昇が起こり、設定した注入圧の上限 (2.0MPa) を超過したため、注入完了となった。後の掘削により改良範囲を確認した結果、砂層に注入材が集中し、注入ボルト周辺に $\phi 100$ mm $\sim$ 300mm の改良体が形成されていた。(図-7) よって、シルト層に存在する亀裂への浸透性は低く、当工区のシルト層への改良効果は満足いくものではないと考察された。

(2) 水ガラス系無機系シリカゾル

溶液型水ガラス系無機系シリカゾルによる注入の結果は、地質状況によってもまちまちだが、ある程度の注入量に達すると超微粒子セメントと同様、注入圧の上昇が起こり、注入完了となった。注入範囲を掘削した結果、シルト層の亀裂部に注入材が確認され、脈状に浸透していることがわかった。(図-8)

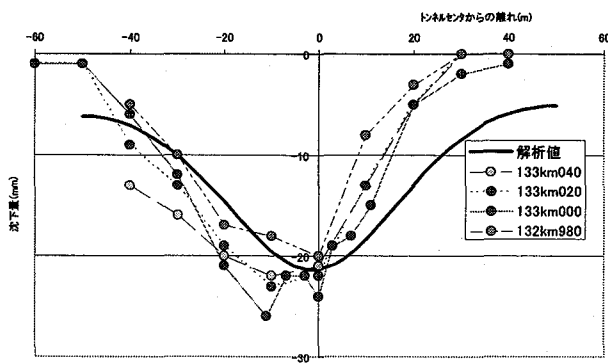


図-5 解析値と実績値との比較（地表面沈下量）

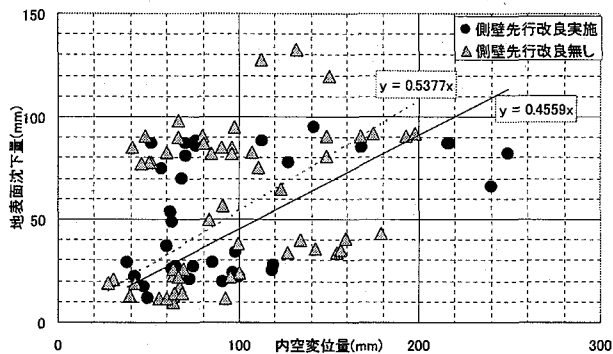


図-6 側壁先行改良効果の評価

よって、当工区の亀裂質シルト層への浸透性は問題ないと考察された。しかし、亀裂へ浸透した注入材自体の強度・粘着力が低く、注入材によって亀裂によるシルト層の分離を助長する傾向が切羽の観察から確認された。

(3) 高分子系ポリウレタン

溶液型高分子系ポリウレタンによる注入の結果は、他の注入材と同様の注入量と注入圧力の傾向を示していた。注入範囲を掘削した際の浸透状況確認についても、脈状に浸透していることが確認された。(図-9) よって、当工区の亀裂質シルト層への浸透性は問題ないと考察された。

また、注入材自体に強度・粘着力があるため、割裂脈がネットワーク状に形成され、マスとしての強度増加と変形性を抑制し、地山を一体化させている状態が確認された。よって、注入による地山改良効果があると考察された。

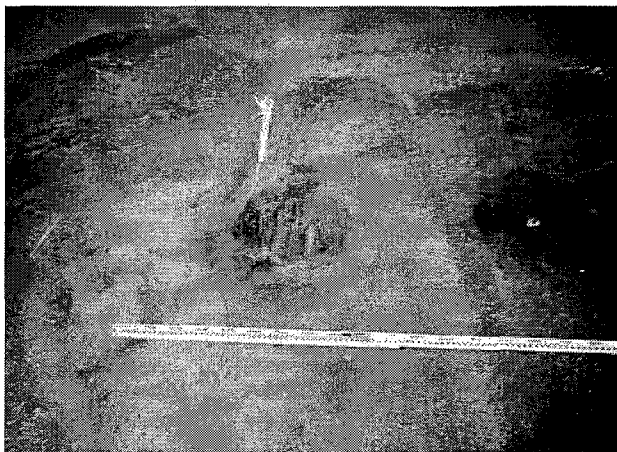


図-7 改良範囲確認写真（フェノール反応）

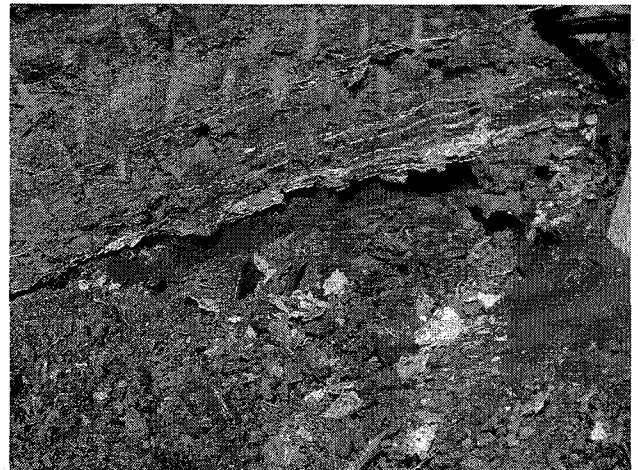


図-9 注入材浸透状況写真

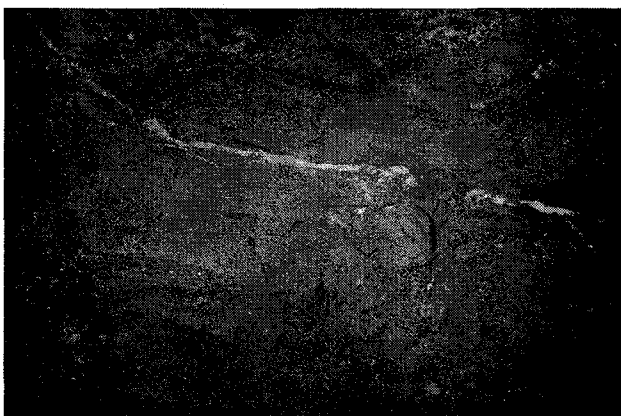


図-8 注入材浸透状況写真

(4) 各注入材の地山改良効果に基づく考察

各注入材について、亀裂質シルト層への浸透性、注入による地山改良効果について整理した結果を表-4に示す。これによれば、亀裂質シルト層への浸透性については、水ガラス系無機系シリカゾル及び高分子系ポリウレタンが効果が認められた。地山の塑性変形抑制効果については、後者の方が有効であると思われることから、溶液系高分子系ポリウレタン注入による改良効果を確認することとした。

(5) 注入による改良効果確認

前述の注入材（溶液型高分子系ポリウレタン）の当工区における地山への適用性を確認するために、孔内載荷試験による地山改良効果確認を行った。測定項目は地盤反力係数であり、改良前後の変化割合から改良効果を推定した。試験方法は注入前後に削孔した孔内（図-10中の①・②が注入前の孔、③が注入後の孔）にゾンデを挿入し、1サイクル方式

による載荷とした。（図-11）載荷ステップは20 kPaとし、載荷は降伏点を越えて破壊点に達した時点で終了した。この試験によって得られた結果より、地山の改良効果を考察した。

試験結果より、改良後の地盤反力係数は、改良前の1.90～2.60倍の値となった。また、同様に変形係数は、1.75～2.39倍の値となった。結果を考察すると、溶液型高分子系ポリウレタンによる注入工によって、地山の変形性は約2倍に改良されたものと思われる（表-5）。一般に粘性土では、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³⁾、改良によって粘着力も約2倍の向上が見込まれることになる。この結果および考察より当工区における側壁先行改良は溶液型高分子系ポリウレタンを採用した。

表-4 注入材の比較表

対象地山	補助工法の狙い	注 入 材		
		懸 濁 形	溶 液 型	
		水ガラス系 超微粒子セメント	水ガラス系無機系 シリカゾル	高分子系 ポリウレタン
亀裂質 シルト層	- 注入材の確実な充填（割裂）による亀裂性地山の一体化 - 不連続面の注入材による固化と地山の一体化で地山変形性能を改善する	ゲル化 60～120sec	ゲル化 15～40min	ゲル化 60～120sec
		△	△	◎
		・ 割裂注入に不向き	・ 割裂注入は可能 ・ 不連続面でシルト層を分離し不安定性を助長する	・ 割裂注入が可能 ・ 不連続面の一体化が可能

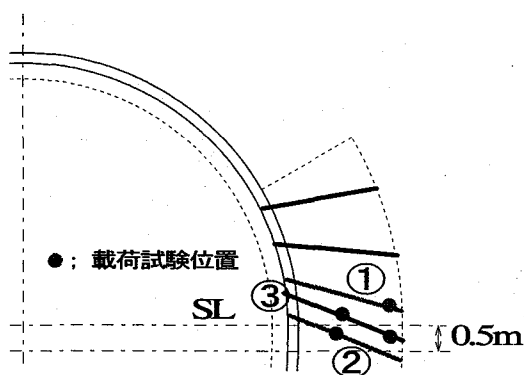


図-10 孔内載荷試験方法

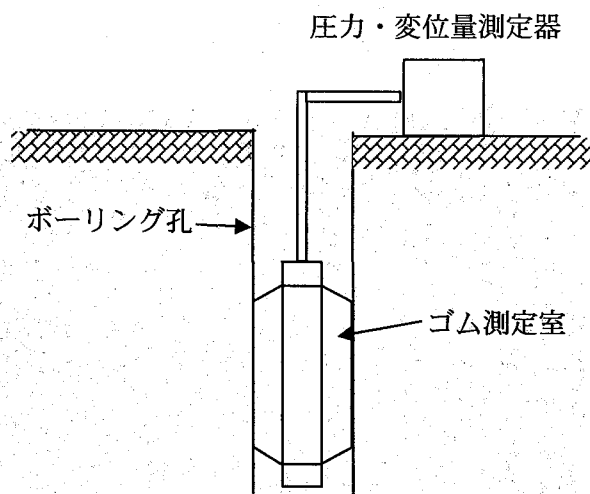


図-11 孔内載荷試験概念図

表-5 注入による改良効果

試験番号	状態	測定深度 (m)	地盤反力係数 (MN/m ²)		変形係数 (MPa)	
			測定値	平均値	算出値	平均値
1	注入前	3.3	354.6	394.4	19.43	20.50
2		2.0	434.2		21.60	
3-1	注入後	3.2	750.0	888.0	35.90	42.45
3-2		2.0	1026.0		49.00	

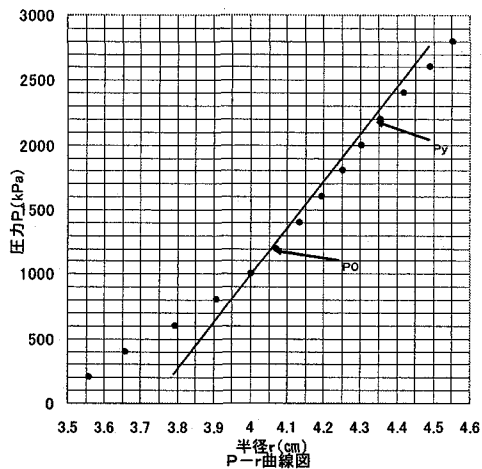


図-12 孔内载荷試験結果（注入前）

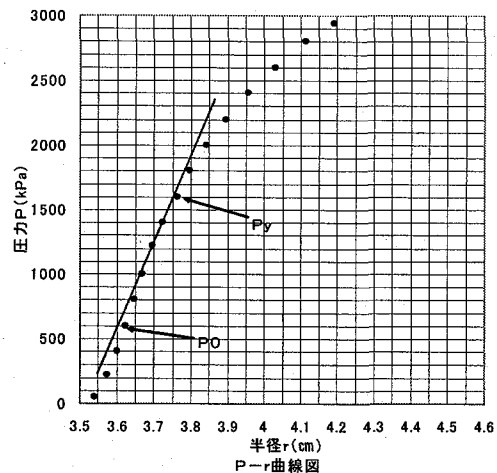


図-13 孔内载荷試験結果（注入後）

10. 重要構造物直下での側壁先行改良の適用

当該工区は、132km178m～132km288m にかけて、上信越自動車道と土被り約 15m（盛土部約 7m、地山部約 8m）で交差する。実質的な土被りが約 8m であるため、トンネル掘削に伴う上信越自動車道への影響が懸念される。（図-14）また、道路管理者との協議により、地表面沈下の管理限界値を 50mm としていることから、掘削時における天端防護とともに盛土による上載荷重を確実に支持するという観点から、パイプルーフ工法を採用している。当該区間の地質は、軟弱な亀裂質シルト層が存在しており、掘削時におけるパイプルーフの脚部沈下が懸念された。（図-15、16）

そこで、パイプルーフ脚部沈下抑制と側壁部の塑性化抑制を目的とした側壁先行改良を採用することとし、多亀裂性未固結シルト層における改良効果の実績を考慮し、前述の溶液型高分子系ポリウレタンによる注入を実施することにした。

なお、注入に際しては、上半脚部から側壁にかけて発生する塑性領域を抑制するという観点から、剛性の高い AGF 鋼管（L=15.5m）を使用するこ

ととした。（図-17）

側壁先行改良の適用にあたっては、上信越自動車道の地表面沈下量の管理限界値 50mm に対して、前述の非線形弾性解析により地表面沈下量の予測を行った結果、25mmの解析値を得た。パイプルーフの打設による沈下量 19mm を加えると、合計 44mmとなり、管理限界値を満たす結果を得ている。

施工後の上信越自動車道の地表面沈下の実測値は、最大 44mmとなり、解析値と同じ結果となった。

これにより、溶液型高分子系ポリウレタン注入による側壁先行改良が、当トンネルの未固結シルト層における地表面沈下抑制効果に有効であることを確認することができた。

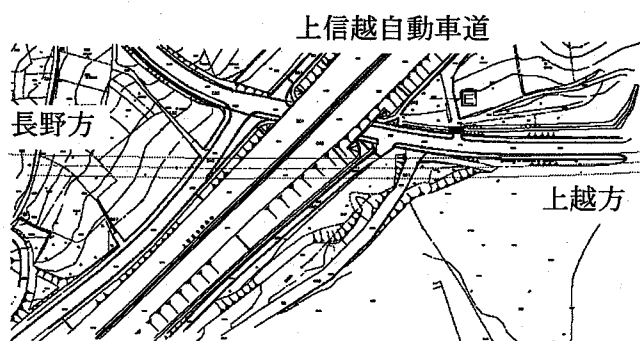


図-14 上信越自動車道交差位置平面図

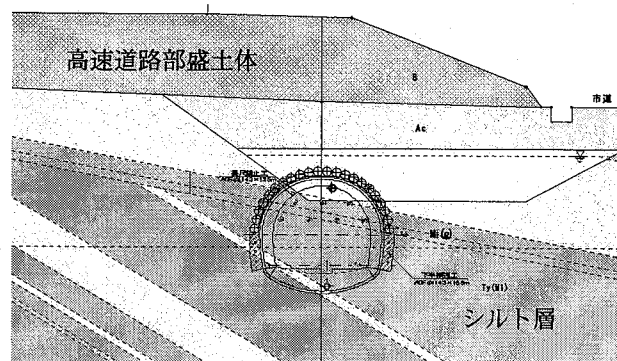


図-15 横断面想定地質図 (132km248m 付近)

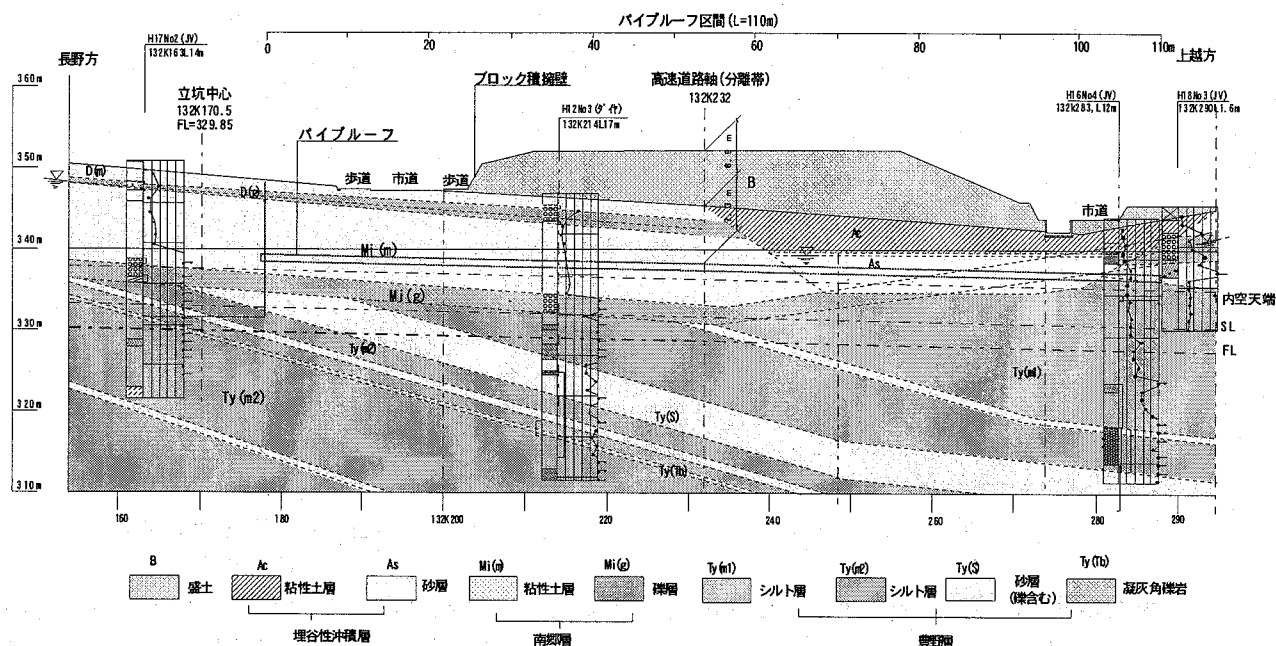


図-16 縦断面想定地質図

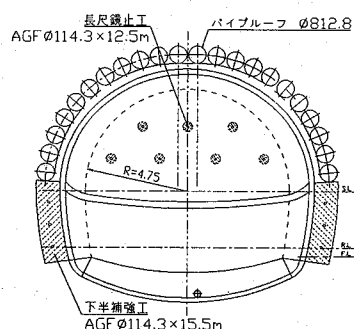


図-17 側壁先行改良図

11. おわりに

本論では、多亀裂な未固結シルトにおける本トンネルの掘削において有効な注入材の選定を行い、試験施工及び改良効果確認の結果および類似箇所における同工法の施工結果から、高分子系ポリウレタン注入による側壁先行改良が、地表面沈下抑制に効果的であることを確認した。

本トンネルの施工においては、このような側壁先行改良のほか、さまざまな補助工法の総合的な効果によって現在まで地上の重要構造物に大きな影響を与えずに掘削を進めている。今後も電力送電鉄塔等の重要構造物直下の掘削を予定しており、これまでの施工実績を踏まえながら、適切に補助工法の選定を行い、慎重に且つ安全に工事を進めて行きたい。

参考文献

- 1) J.Yorita & Y.Sasaki, N.Yamaki & M.Okamura : Selecting Auxiliary Construction Methods for NATM tunnel Excavation in Urban Areas, ITA, 5-10 May 2007Prague (Czech Republic).
- 2) 本堂亮、依田淳一、山木昇、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 平成17年度トンネル工学研究発表会。
- 3) 土質調査法、土質工学会編、1982。