

# 低土被りの未固結溶岩層に 双設大断面トンネルを築く

長谷川 功<sup>1</sup>・伊藤 邦彦<sup>2</sup>・西浦 秀明<sup>3</sup>・西小倉 修<sup>1</sup>

<sup>1</sup> (株)大林組 東名今里第二JV工事事務所 (〒412-0033 静岡県御殿場市神山字大野原1940-7)

<sup>2</sup> 工修 (株)大林組 東名今里第二JV工事事務所 (〒412-0033 静岡県御殿場市神山字大野原1940-7)

<sup>3</sup> 正会員 工修 (株)大林組 東名今里第二JV工事事務所 (〒412-0033 静岡県御殿場市神山字大野原1940-7)

今里第二トンネルは、トンネル直上に「トヨタ自動車(株)東富士研究所」のテストコースがあり、その直下土被り 10m 前後のところを越える双設の大断面トンネルをNATM中壁工法で施工している。掘削対象地山は、玄武岩層と未固結溶岩層(自破碎溶岩層)の互層地山であり、地表面付近には粘性土やテストコース造成のための盛土が分布している。

本報文では、トンネル掘削に先立ち施工した超微粒子セメントミルクを主体とする地盤改良工および地盤改良工により注入改良が行えなかった粘性土部のトンネル補助工法、トンネル掘削の施工について報告する。

キーワード: 双設大断面トンネル, CD-NATM, 低土被り, 未固結溶岩, 地盤改良工, 縫地パイプ工, 路面変位計測

## 1. はじめに

今里第二トンネルは、第二東名高速道路の内、静岡県裾野市今里に建設されるトンネル延長 340m の上下 3 車線双設大断面トンネルである。本工事は、トンネル延長 340m の内、上り線 122m、下り線 155m の区間を山岳トンネル工法のひとつである NATM 中壁工法で施工し、残りの区間を開削工法によるアーチカルバート構築により施工するものである。

工事区間に沿って民間研究施設「トヨタ自動車(株)東富士研究所」があり、多くの研究施設や社員寮、市道、民家等が点在する。トンネル直上にはテストコースがあり、その土被りはわずか 10m 前後である。掘削対象地山は、玄武岩層と未固結溶岩層(自破碎溶岩層)の互層地山であり、地表面付近には粘性土やテストコース造成のための盛土が分布している。

本工事では、前述のテストコースにトンネル掘削による影響を与えることなく、その直下に低土被

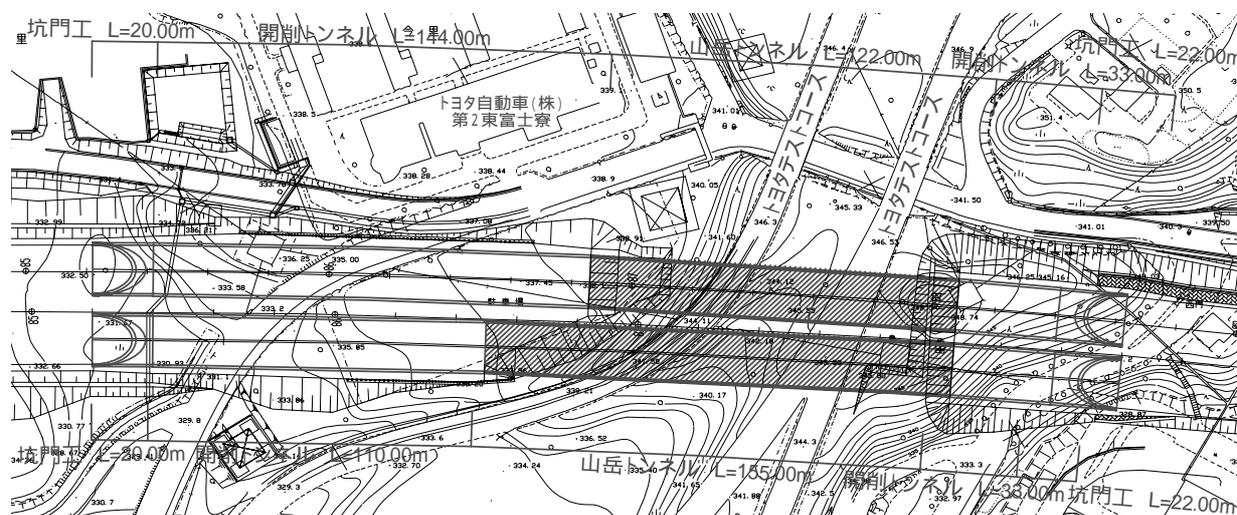


図-1 施工平面図

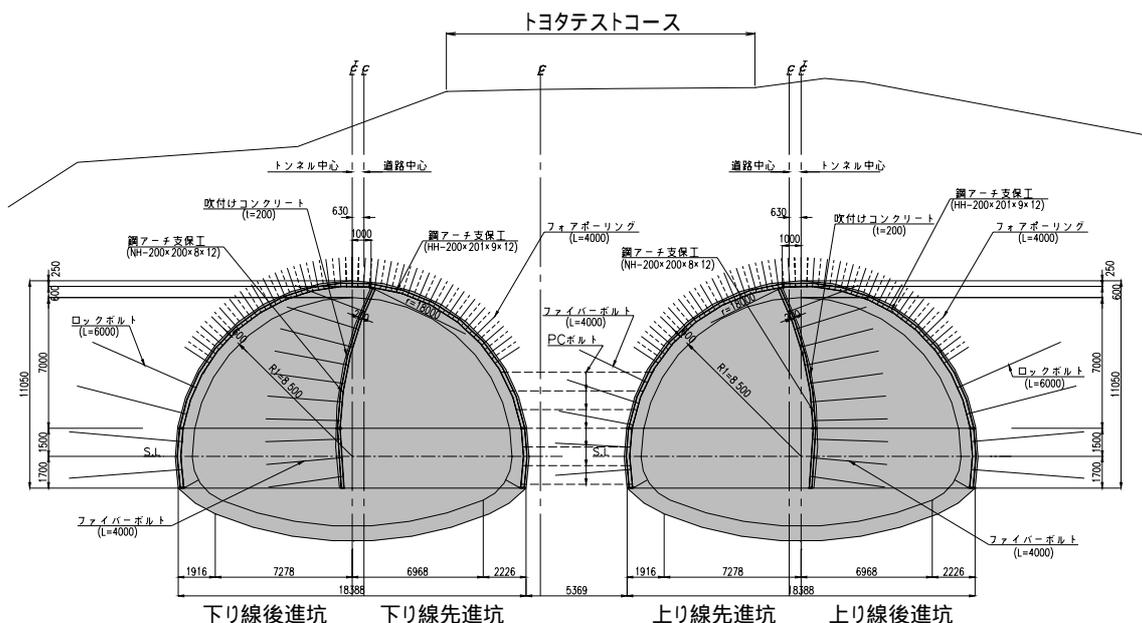


図-2 トンネル掘削断面図(加背割り図)

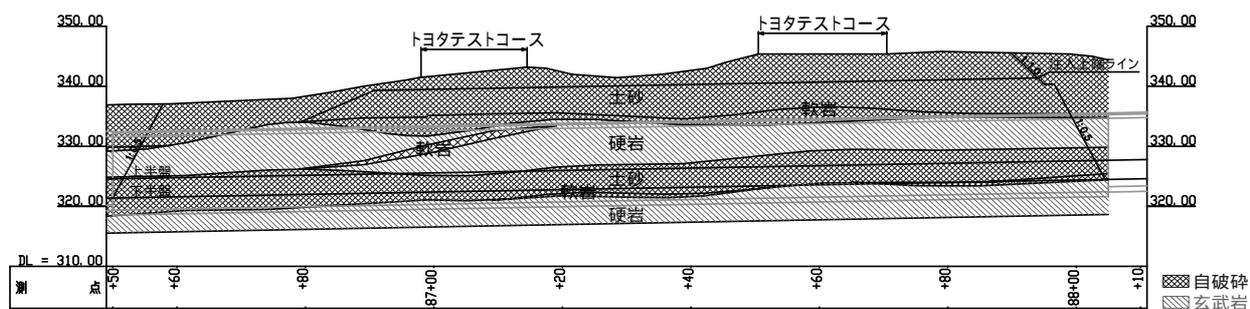


図-3 地質縦断面図(設計)

り条件下で大断面の双設トンネルを築くために超微粒子セメントミルクを主体とする地盤改良工の施工を行った。また、地盤改良工により注入改良が行えなかった粘性土部のトンネル補助工法を提案し、施工を終えている。

本稿では、超微粒子セメントミルクを主体とする地盤改良工、地盤改良工により注入改良が行えなかった粘性土部のトンネル補助工法およびトンネル掘削工の施工について報告する。

## 2. 工事概要

< 工事名称 > 第二東名高速道路  
今里第二トンネル工事

< 発注者 > 日本道路公団 静岡建設局  
(現 中日本高速道路株式会社 横浜支社)  
< 施工場所 > 自) 静岡県裾野市今里  
至) 御殿場市大字神山  
< 工期 > 平成 15 年 7 月 24 日 ~  
平成 19 年 3 月 4 日  
< 工事内容 > 工事総延長: 1,253m  
(トンネル延長: 340m, 土工延長: 913m)  
うち, NATM 区間 上り線: 122m, 下り線: 155m  
掘削断面積: 206.4 m<sup>2</sup>  
明り巻区間 上り線: 219m, 下り線: 185m  
土留工: 1,830m<sup>2</sup>, 切盛土工: 360,000m<sup>3</sup>, 他  
< 掘削工法 > NATM 中壁工法  
(CD-NATM 工法), 発破掘削

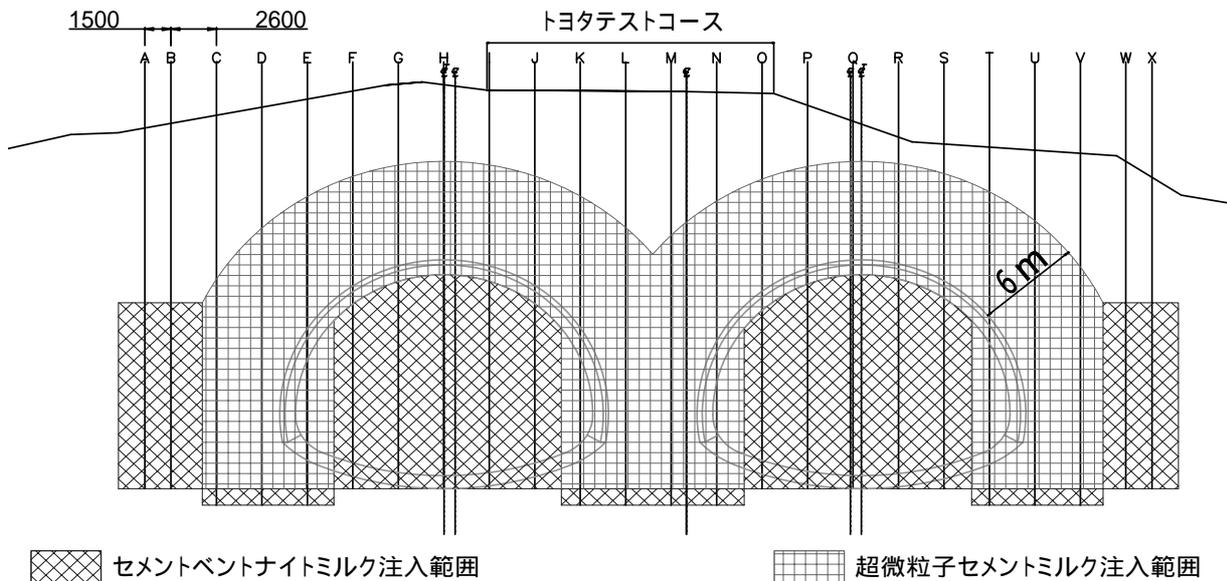


図-4 注入範囲基本横断面図

### 3. 施工条件

#### (1) 地形・地質条件

今里第二トンネルは、静岡県東部、富士山南東山麓の標高 300m 前後に位置する。この付近一帯は、愛鷹山および箱根山に挟まれ、南北に長い谷状の地形を呈する。富士山、愛鷹山、箱根山のかつての火山活動は、現在の地形に強い影響を与えている。特に 3 火山の中で富士火山は最も新しく、その噴出物は谷に沿って溶岩流を厚く堆積させている。

溶岩流の性状は塊状を主体とするが、部分的に土砂状を呈し空洞を伴っており、不安定である。塊状を呈する部分は非常に堅硬であるが、土砂状を呈する部分は未固結の自破碎状の溶岩であり、その分布範囲の連続性、規模を把握することは非常に困難である。

掘削対象となる地山は、新生代完新世裾野溶岩の玄武岩質溶岩と自破碎溶岩の互層である。玄武岩質溶岩は一軸圧縮強度：100～300MPa、変形係数：1,760～2,550MPa を有する硬岩であるのに対し、自破碎溶岩は変形係数：32.7～36.3MPa の多孔質な小礫状の未固結地山である。

#### (2) 施工上の制約条件

前述のテストコースでは、最高機密の研究が行われており、コース使用時は一切立入不可である。今里第二トンネルを施工する上での制約条件は、テストコースを走行する上で有意な変状を及ぼさないことである。施工に先立ち、「トヨタ自動車㈱」と協議を行い、トンネル掘削、地盤改良工等、施工による変状を 20mm 以内に抑えることとした。

### 4. 施工上の技術的特徴

#### (1) 地盤改良工

地盤改良工は、トンネル掘削時の地表面沈下対策および切羽の自立性確保のため、自破碎溶岩を対象として地表面から超微粒子セメントミルクを主体とする地盤改良注入を行うものである。施工は、所定の注入箇所に確実かつ効率的に注入するため、二重管ダブルパッカー工法により施工した。また、自破碎層の分布範囲の連続性、規模を把握することは非常に困難である当該地山において、自破碎層に限定して経済的な注入を行うため、削孔時に地層判別システム（ITSシステム）を用い、地層の把握を行った。

地盤判別システムは、削孔機械に取付けた各種センサーにより掘進速度・トルク・送水圧等の数種類のデータを測定・解析し、地盤の硬軟を判別するものである。本システムでは、削孔深度 5mm 毎に各種データを測定した。

本システム導入時には、既存の地質調査ボーリング孔近傍で試験削孔を行い、システムのキャリブレーションを行った。削孔は、データのバラツキを無くすため同機種の削孔機を用い、フィード圧力、吐出量を一定に保ちながら施工した。

注入改良範囲は、設計時の FEM 解析結果より、トンネル壁面から 6m の範囲であり（図-4 参照）、目標地盤改良強度は変形係数 200MPa 以上である。

注入材料は、試験施工や近接し先行して施工している今里第一トンネルの実績を踏まえ、変形係数 200MPa が確保できる超微粒子セメントミルク（W/C = 300%）を採用した。

自破碎層は空隙が大きく、浸透性が非常に高いため、超微粒子セメントミルク注入（UC注入）を行った際、注入改良範囲外に逸走する恐れがある。

そこで、改良範囲をより確実に注入するため、注入改良範囲外周にセメントベントナイトミルク注入（CB注入）を行った。また、トンネル掘削面についても、UC注入より安価なCB注入を行った。

テストコース直下の注入に際しては、路面隆起と路面に注入材がリークすることにより、テストコースの運用に支障を来す恐れがあった。そこで、その対策として下記の5点を実施した。

注入時の現象を把握するため、影響範囲外の注入を先行して行った後、テストコース直下の注入を行う。

テストコース直下の注入は、地表面に近い上部注入孔から順次下方の注入孔に移る。

テストコース直下 10m 以内の注入は、UC注入とする。

テストコースの運用上、昼間の目視による路面監視が困難なため、影響範囲内の注入作業を夜間に行い、目視による常時監視を行う。

異常発生時の緊急連絡体制を整備し、緊急連絡訓練を実施する。

## (2) トンネル掘削工

今里第二トンネルは、前述のようにテストコース直下、土被り 10m 程度のところに、200 m<sup>3</sup>を超える双設の大断面トンネルを構築する工事であり、施工による変状を 20mm 以内に抑えなければならない。

そこで、第二東名 3 車線トンネルでは横長偏平型断面のトンネル形状が多く採用されているのに対し、本トンネルでは、真円に近いトンネル形状とし、より安定したトンネル形状としている（図-2 参照）。また、掘削工法として中壁分割工法（Center Diaphragm Method = CD工法）を採用し、地表面の変位抑制や掘削切羽の安定性確保を図っている。

## (3) 路面変位計測

トンネル掘削、地盤改良工等の施工が、直上に位置するテストコースに与える影響を監視することを目的として、トータルステーション（TS）による路面変位計測と気泡型水平変位計（ELビームセンサー）による路肩の変位計測を 24 時間自動制御にて行っている。

トータルステーションによる計測は、後方交会により計測毎に機械点座標をチェックし、自動追尾

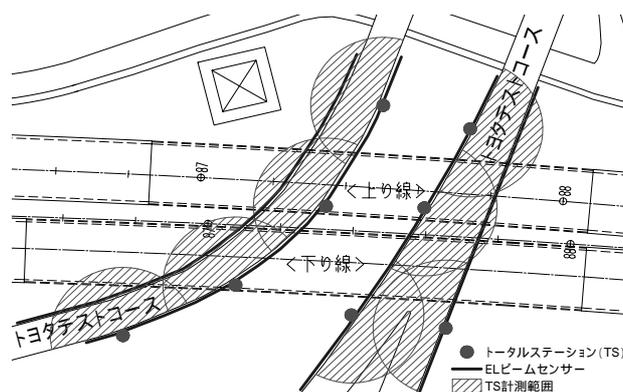


図-5 路面計測位置図

によるノンプリズム測定により路面上を 2m×2m 間隔で測定している。トータルステーションは、機密保持のためテストコース沿いに 3m の目隠し板を設置しているため、テストコース脇 8 箇所に計測塔を設置し、770 地点の計測を 30 分間隔で行っている（図-5 参照）。

ELビームセンサーは、剛なビームに極めて微小な傾斜が測定できるセンサーを取付けたもので、路肩の区間傾斜を計測し、鉛直変位に変換して沈下や隆起を計測するものである。ELビームセンサーは、2本のテストコース両脇に計4列配置し、158のセンサーで計測している（図-5参照）。

## 5. 実施例

### (1) 地盤改良工施工計画

削孔は、7 台のクローラー式のロータリーパーカッションドリル（ビット径 101mm）にて施工した。削孔ピッチは、トンネル軸方向 3m、横断方向 2.6m を原則とし、テストコース直下は斜め削孔にて施工した。削孔完了後、注入用外管（マンシュエッチューブ）を建込み、注入用外管と地山との間にグラウト材（セメントベントナイトミルク）を充填した。

注入は、1 バルブ当り 33cm のステップアップ注入による二重管ダブルパッカー工法にて、72 セットで施工した。各材料は全自動ミキサーにて混練りし、インジェクションポンプにて流量計・二重管注入ホースを通して注入先端部に送られる。注入流量・注入圧は、流量計にて検出し、制御コンピューターに予め設定した注入条件（注入量、注入流量、注入圧）にて制御した。

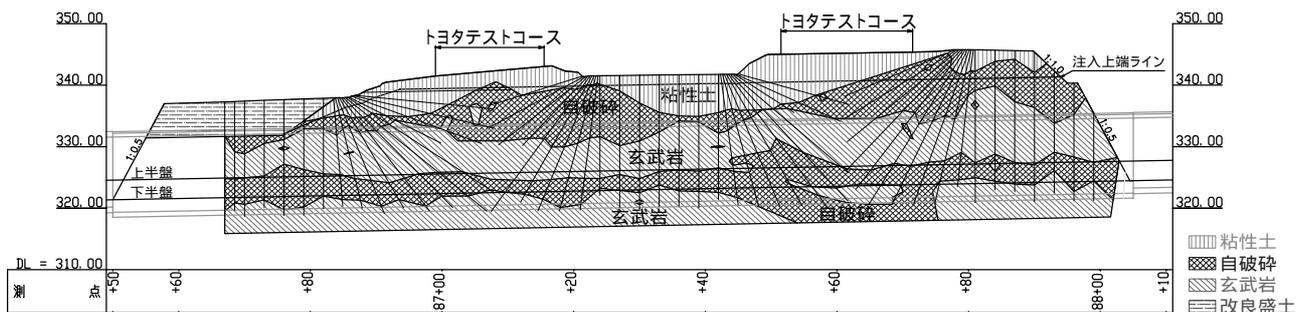


図-6 地質縦断面図 (ITSシステムによる)

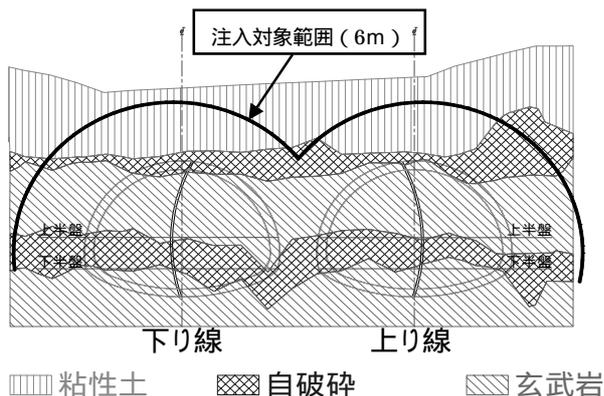


図-7 地質横断面図 (STA. 87+40)

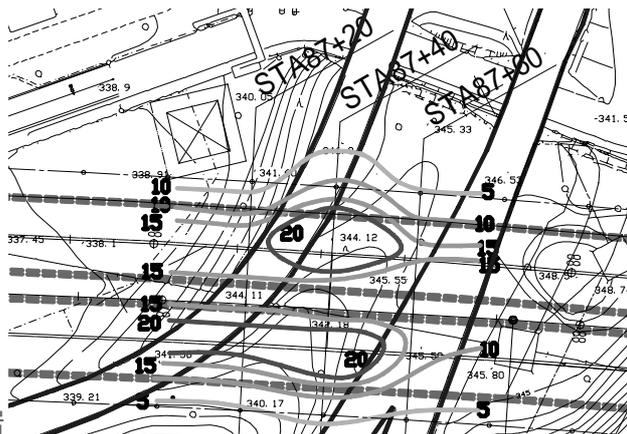


図-8 地表面沈下コンター図

## (2) 削孔結果

削孔時、ITSシステムにより把握した地層データから描いた地質縦断面図を図-6に示す。

地層データより、地表付近に当初想定していなかった注入改良を行えない粘性土層が分布し、その粘性土層が設計改良範囲を大幅に侵していることが判明した。

このようにITSシステムの採用により、設計図の地質縦断面図(図-3)に比べ、より詳細な地層構成が判明し、注入工、トンネル掘削工の施工を行う上で有効な判断材料を得ることができた。

## (3) 注入結果

図-4に示す注入範囲に分布する自破碎層を対象に、前述のUC注入およびCB注入を施工した。

UC注入は、1バルブ当りの注入量に換算すると、設計注入量に対し25%程度多く注入する結果となった。これはUC注入の浸透性が非常に高く、自破碎層の間隙が想定以上に大きかったためであると考えられる。

一方、CB注入は、1バルブ当りの注入量が設計に対し84%程度に収まった。これはUC注入に比べてCB注入の浸透性が低いためであると考えられる。

当初懸念された注入によるテストコースの変

状・リークについては、数度の路面へのリークがあったものの、隆起量は最大で15mm程度に収まり、施工前に「トヨタ自動車株」と協議した管理値内に収めることができた。

## (4) 粘性土部の地表面沈下対策工法

粘性土層の存在のため地盤改良の対象範囲であるにもかかわらず注入改良できなかった領域について、3つの断面を対象にFEM解析を実施した結果、十分な沈下抑制効果を得られないことが判明した。FEM解析を実施した断面のうち、最も地表面沈下が大きかった断面の地質横断面図(ITSシステムによる)を図-7に、FEM解析結果から推考して描いた地表面沈下コンターを図-8に示す。FEM解析の結果によると地表面沈下の最大値は、テストコース上で23.1mm、テストコースから少し外れるもののトンネル直上で30.3mmとなり、管理値を大きく超えることがわかった。そこで、坑内外から施工できる沈下抑制対策工法について、FEM解析により効果を検証するとともに、施工性・信頼性・工期・工費について検討した(表-1参照)。

検討の結果、沈下抑制効果が高く、信頼性、施工性が優れ、工期、工費でも勝る「鋼管による縫地パイプ工」を採用することとした。

文献や過去の施工実績によると、トンネルを安

表-1 地盤改良工による未改良部（粘性土部）の沈下抑制対策工法比較表

工 法	鋼管による縫地パイプ工	パイプルーフ工	無拡幅による中尺先受け工
工 法 要 概	地表面から鋼管を1.5mピッチに打設し、地山と鋼管を単一複合体として挙動させることにより地山を補強し、沈下を抑制する工法	坑口からトンネルアーチ上部に鋼管を40cmピッチに打設し、地山をアーチ状に補強することにより沈下を抑制する工法	トンネルを3m掘削する毎に鋼管を70cmピッチ(千鳥配置)に打設し、前方地山を補強することにより沈下を抑制する工法
横断面図			
縦断面図			
沈下抑制量	無対策：30.3mm 対策工実施：17.4mm	無対策：30.3mm 対策工実施：19.1mm	無対策：30.3mm 対策工実施：16.8mm
長 所	・汎用機で施工可能 施工性が良い ・トンネル掘削サイクルに影響しない ・工期短縮が図り易い	・専用機で施工できるので、システムティックな施工が可能 ・トンネル掘削サイクルに影響しない	・状況に応じて仕様の変更が可能 ・トンネル施工機械を改良して施工できる
短 所	・将来、地表面付近の鋼管撤去が必要となる<トヨタ区分地上権>	・坑口近傍以外の施工は困難 ・孔曲りする可能性がある ・施工盤造成に時間を要する	・中壁があるため、天端付近の施工が均等な打設ピッチで行えない ・トンネル掘削サイクルに影響する
信頼性			
施工性			
工 期		×	
工 費			×
総 合 評 価			

全に掘削する上で最低限必要な注入改良域として3m以上必要であると考えられる。そこで、沈下抑制対策工の施工範囲は、地盤改良工における6mの改良範囲の内3m以上粘性土が介在し注入改良できない箇所とした。

**(5) トンネル掘削工**

今里第二トンネルは、土被りが10m程度と小さく、トンネル直上にトヨタテストコースが存在すること、トンネル掘削延長が短いことから、支保パターンは全線D a、地山等級はDとなっている。また、設計の掘削工法は、先進坑上半部のみ発破掘削であり、その他の加背については機械掘削である。

しかし、図-6に示す地質縦断面図から判るように、上半の大部分は一軸圧縮強度：100～300MPa、変形係数：1,760～2,550MPaを有する硬岩であり、僅

かな岩塊を掘削するにも、3tブレーカーを使用した機械掘削では多大な時間を要する地山であった。

A計測、B計測の計測結果においても、天端沈下、内空変位は極めて小さく、鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルトに架かる荷重も小さいものであった。

このような地山条件下において、先進坑上半部以外の加背を機械掘削にて施工することは困難であると考えられたので、施主と協議の上、発破併用の機械掘削に変更した。

中壁は、B計測結果より後進坑掘削後にほとんど荷重が架かっていないことが判明した。よって、最初は段階的に撤去を行い、支保に変状が生じないことを計測により確認した上で切羽1D手前まで撤去した。

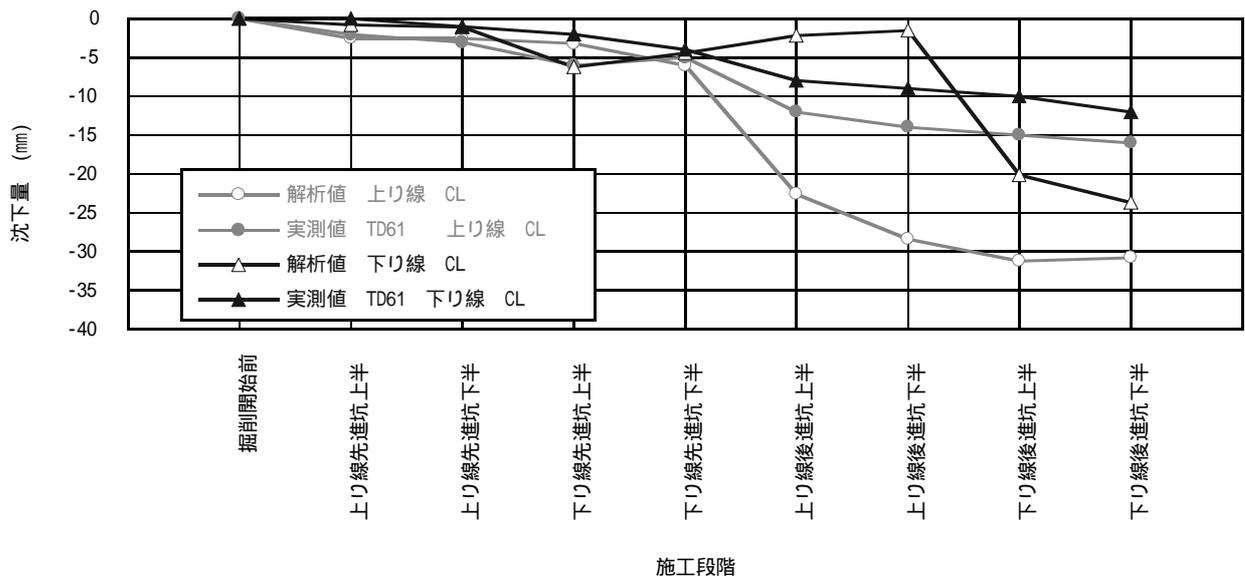


図-9 「縫地パイプ工を施工しなかった場合の解析値と実測沈下量（対策工実施時）の比較」

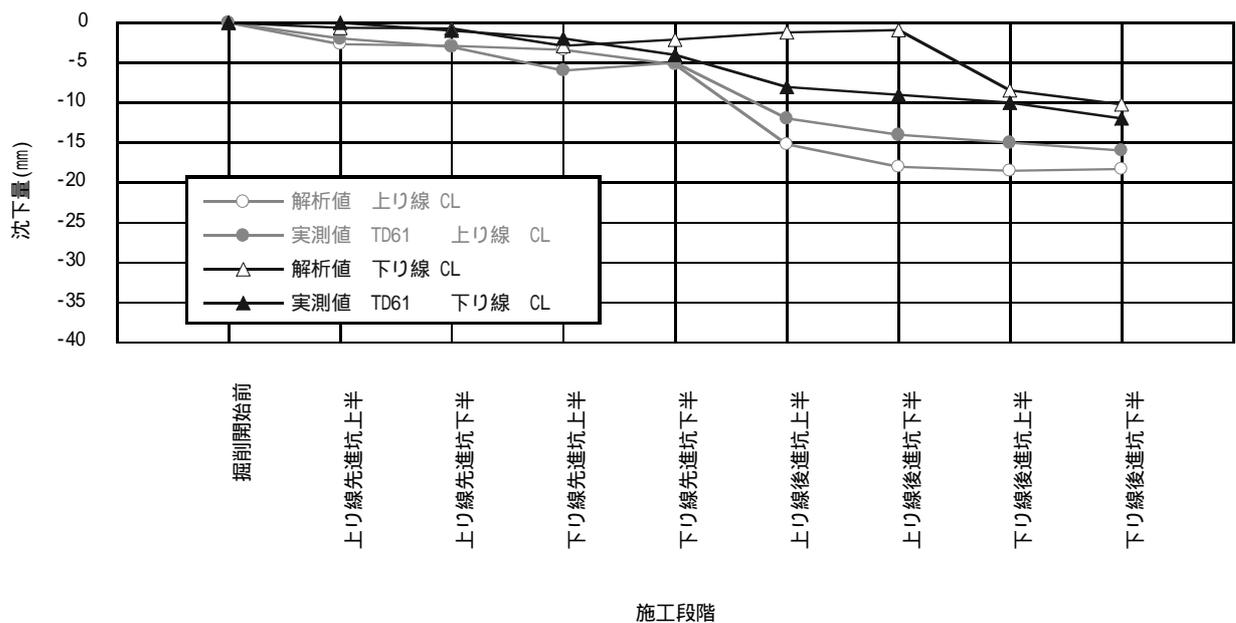


図-10 「縫地パイプ工を施工した場合の解析値と実測沈下量（対策工実施時）の比較」

## 6. 現在までの技術的評価

現在、地盤改良工、鋼管による縫地パイプ工は完了し、トンネル掘削工を行っている。トンネル掘削の進行は下記の通りである。

上り線 先進坑 上半：112m，下半：108m  
 後進坑 上半：111m，下半：107m  
 下り線 先進坑 上半：96m，下半：89m  
 後進坑 上半：95m，下半：89m

### (1) 地盤改良工

掘削時の切羽面から、地盤改良工に関する所見として下記の点が挙げられる。

- ・ U C 注入は自破碎層の細部にまで良く浸透しており、非常に堅固に固結している。
- ・ C B 注入は、自破碎層の粗な部分には良く浸透しているが、細粒部での浸透性はあまり良くない。しかし、切羽の自立性を確保する上では効果的な改良である。

- ・ 注入材は、玄武岩の割れ目にも脈状に注入されており、切羽の自立性を高めている。

## (2)鋼管による縫地パイプ工

トンネル掘削による地表面沈下は、現在のところ上り線センターで 16mm、下り線センターで 12mm 程度である。坑口近辺の粘性土の薄い部分では、ほとんど地表面沈下が生じていない。地表面沈下が生じている箇所は、粘性土の層厚が厚く、特に地盤改良工の改良範囲に粘性土が介在している箇所の沈下量は大きくなっている。

粘性土層が厚い箇所では地表面沈下が生じている原因として下記のことが考えられるが、現在、データの整理・分析中である。

- ・ 地盤改良時のブリージング水が粘性土層に滞留しており、トンネル掘削によりこの滞留水が抜けたため沈下した。
- ・ トンネル掘削時の発破振動により、粘性土が緩み沈下した。

鋼管による縫地パイプ工を施工した TD61m 付近でも 12～16mm 程度の地表面沈下が発生しているが、この結果は FEM 解析の結果と非常に近似している。

図-9 は、「鋼管による縫地パイプ工」を施工しなかった（無対策）場合の解析結果とトンネル掘削時の地表面沈下（実測値）の比較である。下り線先進坑下半掘削時までは、各実測値とも解析結果とほぼ同様の傾向を示すが、その後の地表面沈下増加は

小さなものとなり、最終的には解析結果の半分程度に収まっている。これは、「鋼管による縫地パイプ工」が非常に高い地表面沈下抑制効果を発揮していることによるものだと考えられる。

図-10 は、「鋼管による縫地パイプ工」を施工した（対策工実施時）場合の解析結果とトンネル掘削時の地表面沈下（実測値）の比較である。無対策時同様、下り線先進坑下半掘削時までは、各実測値とも解析結果とほぼ同様の傾向を示している。下り線下半掘削終了時における沈下量は、上り線センターで 16mm、下り線センターで 12mm 程度であり、解析結果とほぼ同等の沈下量に収束した。これは、「鋼管による縫地パイプ工」が当初の想定通りに効果を発揮している結果であると考えられる。

## 7.おわりに

トンネル掘削は、トヨタテストコース直下の掘削を 4 箇所の内 3 箇所終え、終盤を迎えている。

現在までのところ、テストコースにおける施工による変状は、当初「トヨタ自動車㈱」と協議した管理値内に収まっており、下り線貫通側 1 箇所の掘削を残すのみである。

今後、本工事と全く同様の工事が行われる可能性は少ないものの、本工事で培った要素技術を種々の工事で活用し、より高度で高品質、安全で廉価な工事が行えるよう、努力を重ねていく所存である。