

扁平大断面トンネルの坑口部における 脚部沈下対策工の施工と効果の検証

Evaluation of the Effects of Foot Reinforcement Method at the Entrance
of Flatness Large Section Tunnels

八木 弘¹・米倉文雄²・浅野 剛³・安井義則⁴

Hiroshi Yagi, Fumio Yonekura, Takeshi Asano and Yoshinori Yasui

¹正会員 日本道路公団 関東第二支社 掛川工事事務所 (〒436-0047 静岡県掛川市長谷1413-3)

E-mail: Hiroshi.Yagi@jhnet.go.jp

²日本道路公団 関東第二支社 掛川工事事務所 (〒436-0047 静岡県掛川市長谷1413-3)

³正会員 株式会社奥村組 技術研究所 (〒302-0025 茨城県つくば市大字大砂387)

⁴正会員 (株)奥村組・大日本土木(株)・太平工業(株) 共同企業体 (〒428-0008 静岡県島田市竹下163)

In this paper, we report the effects of foot reinforcement method preformed to KANAYA tunnel (flatness large section tunnel).

As a result of having executed the method, following facts were recognized. 1) Executed foot and side reinforcement piles are effective by suppressing subsidence of the whole tunnel where unsymmetrical earth pressure works. 2) As well as reinforcement piles, top heading temporary inverts are also effective for tunnel subsidence control. 3) Flexural rigidity of foot piles contributes as well as side piles in subsidence control.

Key Words : flatness large section, unsymmetrical earth pressure, foot reinforcement method

1. まえがき

日本道路公団関東第二支社では、現在静岡県内における第二東名高速道路（以下「第二東名」という）の建設を進めている。

第二東名に建設されているトンネルは上半掘削時には扁平率（トンネル高さ／トンネル幅）が約40%という扁平形状となっており、それに起因すると考えられるアーチ部におけるゆるみの発生、支保脚部に作用する荷重の増大により、地山不良区間では上半脚部あるいはトンネル全体の沈下が発生する事例が多くなっている。

第二東名で最も長い金谷トンネル（延長：上り線4527m, 下り線4667m, 掘削断面積191m²）においてもトンネルのとも下がり的な現象が発生している区間が見られ、サイドパイル、レッグパイル、上下半仮インパート、高耐力ボルトの性能向上を期待したPC鋼棒等の対策工を施工してきた。

本文では、これらの中から金谷トンネル東工事の下り線坑口部におけるSTA448+54～447+00の延長154mの区間（以下「検証区間」という）で実施した脚部沈下対策工の検証結果について報告するものである。

2. 検証区間の概要

金谷トンネルの地質縦断図を図-1に示す。同トンネルの地質は、トンネルのほぼ中央部を境界として西側が新第三紀中新世の倉真層群、東側が古第三紀漸新世の瀬戸川層群から構成されている。瀬戸川層群は全体に砂岩頁岩の互層となっており、砂岩は堅硬であるが頁岩は亀裂が発達しており強度が相対的に低くなっている。特に、検証区間では砂岩頁岩ともに風化が進んだ状況であり、砂岩については砂質土状を呈し、頁岩部分は粘土化が進み破碎帯状になっており変状が発生しやすい状況であった。切羽評

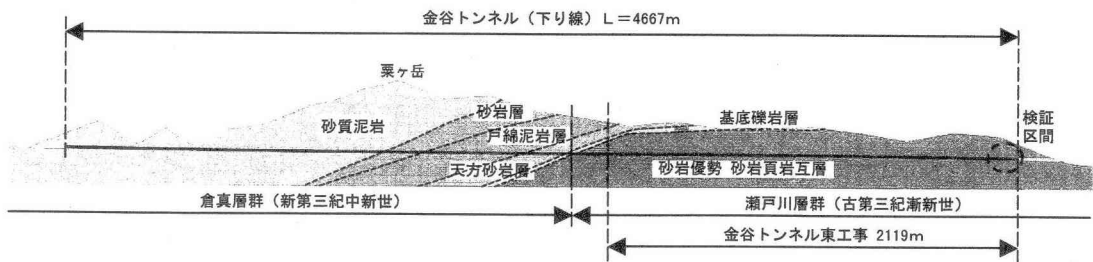


図-1 地質縦断

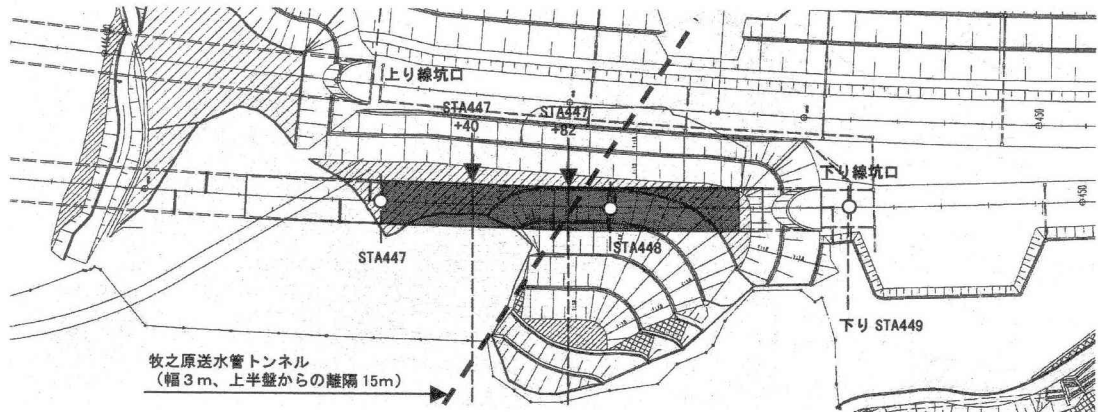


図-2 検証区間

価点¹⁾は11～19程度であり、地山等級としてはDⅡ相当以下であった。

検証区間の平面図を図-2に示す。図からわかるように検証区間では地形的制約からトンネルルートが斜面に平行になっており、偏圧・低土被りといった条件下で掘削せざるを得ない状況であった。

なお、検証区間では、第二東名における長大トンネルの標準的な掘削工法であり金谷トンネルの他の区間で用いられているTBM導坑先進拡幅掘削工法ではなく、中央導坑先進拡幅掘削工法により施工を行った。これは、当初より工程的な関係で検証区間におけるTBM導坑の施工が不可能であったこと、また検証区間における地形的・地質的悪条件をふまえ、事前の地質の確認、トンネルの先行補強といったことが可能である工法が望ましいと判断したことによるものである。図-3に検証区間における支保パターンの一例を示す。

3. 検証区間における地山の挙動と対策工の効果

(1) 検証区間における施工状況とトンネルの挙動

検証区間のSTA448+22付近までは切羽の谷側の一部に改良盛土が現れており、天端付近からの肌落ち、

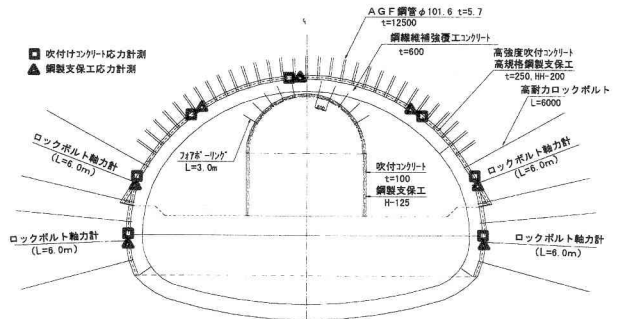


図-3 検証区間の支保パターン例 (STA447+82)

小崩落を防止する目的で地山部分に注式式フォアローリングを施工しながら掘削を進めた。また、STA448+22以降は切羽全体に脆弱な地山が広がるような状況となったこともあり、AGF工法を用いて掘削を進めた。

切羽距離が1D時点 (掘削幅D=20m) の天端沈下は、概ね50mm以内で推移していた。しかし、STA447+97～447+74の区間では切羽の状況については特に変化は見られなかったにもかかわらず、切羽距離が0.5D時点の天端沈下が50mmに近づくような状況となり、最終的に内空断面を確保できない懸念が出てきたことからSTA447+62において切羽を停止して既施工区間の上半脚部に脚部沈下対策工を施工した。

図-2に示したように、この区間は既設の牧之原送水管トンネルが本線トンネルと交差している部分である。送水管トンネルの幅は3m、本線トンネル上半盤と送水管トンネル天端の離隔は15mである。本線トンネルの掘削断面積が大きいことから、その掘削が送水管トンネルに影響を及ぼす可能性があると判断し、事前解析により送水管トンネルの変位に関する管理基準を設定して慎重に施工した。一方、送水管トンネルの幅に対して本線トンネルとの離隔が大きいことから、送水管トンネル施工時に発生する地山のゆるみは本線トンネルに影響する可能性は低いと判断していた。この地点において谷側の改良盛土幅が最も小さいことや地形の影響も一因と考えられるが、結果的に上半掘削時の天端沈下は本線トンネルと送水管トンネルの交差点付近で大きくなった。このように、送水管トンネル掘削時に発生した地山のゆるみが本線トンネルの天端沈下を増加させる要因となった可能性は否定できない。

図-4、5にSTA447+82における天端沈下および脚部沈下の上半掘削時の推移とトンネル坑壁変位状況を示す。これらの結果から、上半掘削時にはトンネル天端と脚部は同じような沈下の推移を示しているこ

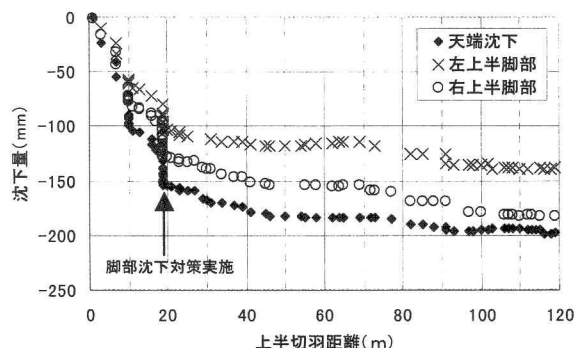


図-4 天端沈下と脚部沈下の推移 (STA447+82)

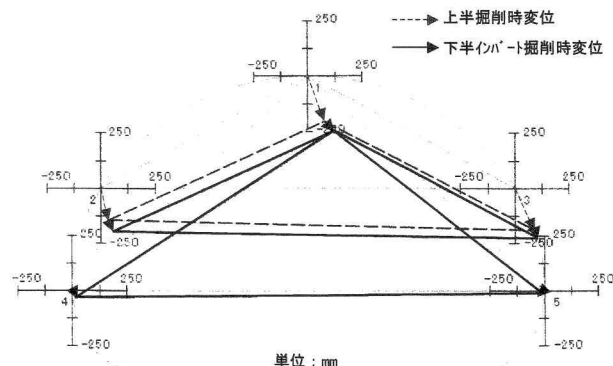


図-5 トンネル坑壁変位状況 (STA447+82)

と、偏圧を受けることでトンネル全体が谷側に移動していることが読み取れる。この断面以外においても天端沈下と脚部沈下が概ね同程度発生しており、脚部の変位の抑制が天端沈下あるいはトンネル全体の変位の低減につながる事が示唆される。また、図-5には下半掘削時の変位も示しているが、後述する脚部補強を行ったことで下半掘削時の沈下量が抑制されている様子が読み取れる。

(2) 対策工と効果について

検証区間の脚部沈下対策工を表-1に、送水管トンネルとの交差部となるSTA447+82の対策工パターンを図-6に、検証区間の天端沈下を上半切羽距離0.5D、1.0D、2.0D、3.0D、4.0D、上半最終および下半・インバート掘削時に分けて図-7に示す。

前節で述べたように、上半切羽をSTA447+62において停止して上半脚部沈下対策工の施工を開始した。検証区間全体の上下半を含めた対策工施工手順の概要は以下のとおりである。

- ① 上半切羽をSTA447+62において停止し、送水管トンネルとの交差区間を中心に30m程度の範囲で上半左右脚部にレッグパイルおよびサイドパイルを施工。
- ② 切羽においてレッグパイル、サイドパイルを施工しながら上半掘進 (STA447+62～447+45)。ただし、谷側については改良盛土が再び切羽に現れてきた時点でパイルの施工を省略した。
- ③ 下半掘削に先立ち、下半掘削時の沈下抑制を目的として送水管トンネルとの交差区間に上半仮インバートを施工するとともに、坑口から仮インバート区間の間の谷側を中心にレッグパイルを施工。また、STA447+45以降の上半谷側についても、レッグパイルおよびサイドパイルを施工。
- ④ 坑口から送水管トンネルと本線トンネル交差点地点までの区間では、下半掘削時の切羽においてレッグパイル、サイドパイル、下半仮インバートの施工に加え下半の鋼製支保脚部に支保軸力

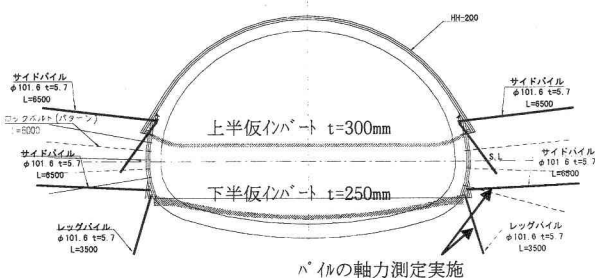


図-6 対策工施工パターン (STA447+82)

表-1 検証区間の脚部沈下対策一覧

測点 STA	447+10	447+20	447+30	447+40	447+50	447+60	447+70	447+80	447+90	448+00	448+10	448+20	448+30	448+40	448+50
				+45	+54	+62				+1					+54
上半掘削	レグパイル	ウレタン系(後施工) (2004/4/10~4/15)					ウレタン系(後施工) (2003/11/18~11/25)				セメント系(後施工) (2004/3/8~3/11)				
	サイドパイル	ウレタン系(後施工) (2004/4/9~4/15)				+61	ウレタン系(後施工) (2003/11/18~11/25)			+1					
	レグパイル		ウレタン系(切羽施工)				+62	ウレタン系(後施工) (2003/11/20, 11/25)			+97	セメント系(後施工) (2004/5/10~5/11)			
	サイドパイル					+45		ウレタン系(後施工) (2003/11/20, 11/25)			+91				
	仮インバート						+62	仮インバート (2004/3/1~3/4)			+3	上半変位収束後の施工であり、下半掘削時の沈下抑制を目的とする			
下半掘削	レグパイル						+75	セメント系(切羽施工)							+54
	サイドパイル						+75	セメント系(切羽施工)							
	プレロード						+75								
	レグパイル						+75	セメント系(切羽施工)							
	サイドパイル						+76	セメント系(切羽施工)							
	プレロード						+75								
	仮インバート						+75	仮インバート (2004/4/8~6/4)							

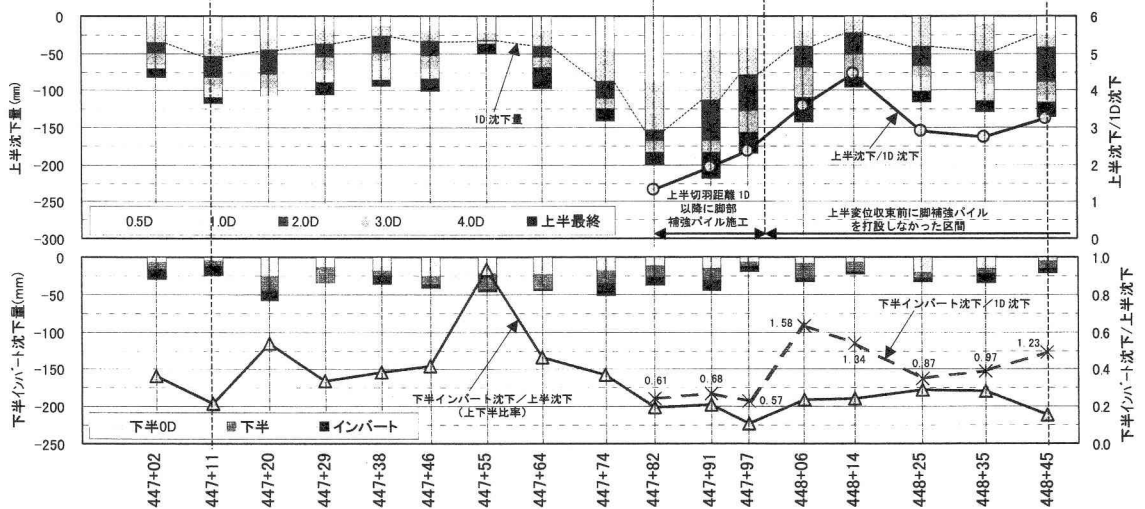


図-7 天端沈下の発生状況

の地山への効率的な伝達を目的としてプレロードシェルを導入した。プレロードシェルは逆止弁付きの特殊縫製の耐圧袋を支保工脚部と地山の間に設置し、耐圧袋に早強性（1日強度 20N/mm^2 程度）を持つ無収縮モルタルを圧入（ 0.3MPa ）することにより形成させた。

以上のような手順で対策工を施工したことから、検証区間では、結果的に上半切羽が1D以上となった時点で脚部補強パイルを打設した区間（STA448+01～447+82）と、上半変位収束時点までパイルを打設しなかった区間（STA448+54～01）が存在する。両区間において切羽距離が1D（すなわちこの時点では両区間ともに脚部補強パイルは未施工）となった時点の天端沈下がその地点の地山の変形性を表していると考え、切羽距離が1Dの時の天端沈下（1D沈

下）に対する上半施工時の天端沈下収束値（上半沈下）の比率を比較することで脚部補強の有無による効果を分析できる。図-7に検証区間における上半沈下/1D沈下の推移を併記した。図より、脚部補強パイルを施工した場合には1D沈下に対する上半沈下が相対的に小さくなっており、脚部補強パイルの効果が認められる。また、対策工施工時の上半切羽距離は、STA447+82、447+91、447+97の場合が各々1.0D、1.4D、1.7Dとなっており、それぞれの上半沈下/1D沈下の値を比較すると、パイル施工時の切羽距離が近いほど天端沈下抑止効果が大きいことがわかる。

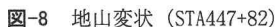
図-7には上半沈下に対する下半・インバート掘削時に発生した沈下量の比率（下半・インバート掘削時沈下量/上半掘削時沈下量を、以下「上下半比率」という）も示した。上下半比率は下半脚部沈下

また、上半沈下が特に大きかったSTA447+82, 447+91, 447+97では下半・インバート掘削時の沈下量は20～46mmにとどまった。上半沈下の検討と同様に、1D沈下に対する下半・インバート掘削時の沈下量の比率を図-7に併記したが（数値も図に併記）、他の下半脚部沈下対策施工区間と比較してもこれらの3地点における下半・インバート掘削時の沈下量は小さいことがわかる。これは、サイドパイルを左右両側脚部に打設したことに加え、上半仮インバートも施工したことが効果を大きくした原因と考えられる。

検証区間ではトンネルが偏圧を受けることから、**図-5**に示したように上半掘削時にトンネル自体が谷側に移動するような挙動が認められた。前節で述べたように、上半仮インバートあるいは下半脚部対策を実施した区間では下半掘削時の沈下が抑制されているが、送水管トンネルと交差する地点（STA447+82）では最終的に**図-8**に示すような法面の変状が発生した。なお、谷側の傾斜計No. 1は上半収束後に設置しており、この傾斜計による計測値は

STA447+82では、トンネル近傍だけではなく60～80m程度離れた法面上部においても明確なすべり面がとらえられており、法面全体がトンネル掘削にともない谷側に移動している状況が認められる。STA447+40においても傾斜計により変位の不連続面がとらえられており、STA447+82と同様に法面上部の変位ベクトルはほぼ斜面の方向に一致しているが、法面上部のすべり面の深さは特定できていない。変位の推移図からわかるように、両断面ともトンネルの変位増加にともなって法面の変位が進展しているが、トンネル山側の法面変位（STA447+82ではC5、C6、STA447+40ではD4、D5、D6、D8）は、ある時点以降はトンネル変位を上回るような状況が見られる。ただし、この場合でもトンネル変位が収束に向かうと各計測点の変位も収束に向かっており、トンネル自体の変位を抑制することが法面安定化の重要なファクターであることがわかる。

法面上部では小さい変位速度（1.0mm/週以下）で現在でも変位増加が継続しており、降水量が多くなると変位速度も増加する傾向がある。このため、イ



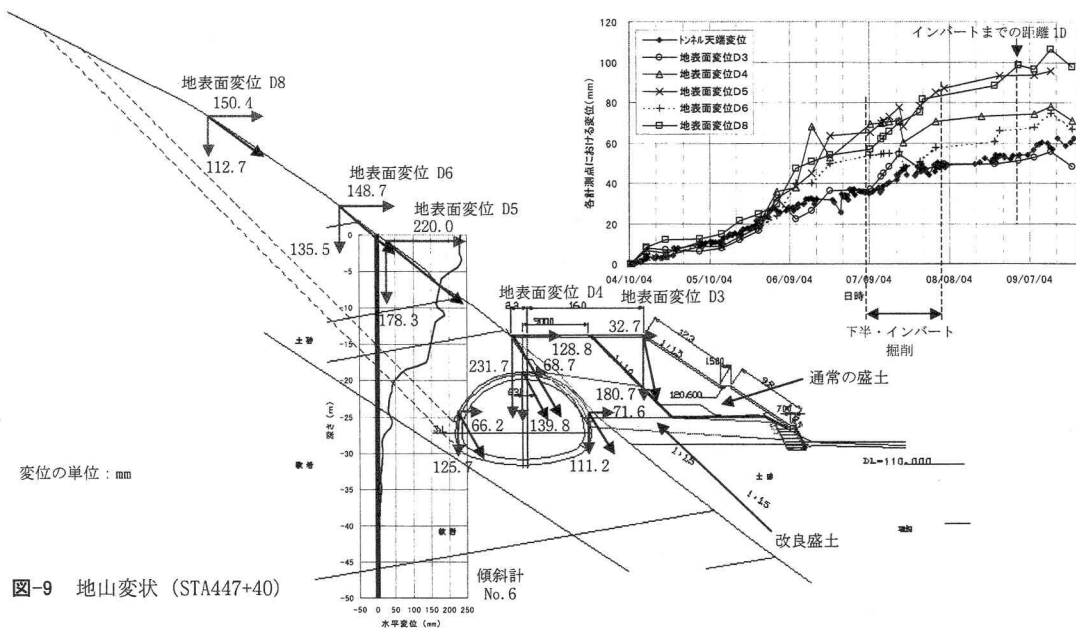


図-9 地山変状 (STA447+40)

ンバート閉合が終了した現在でも監視を継続している。

法面の安定に関しては、トンネル自体の変位を抑制することで当面保つことができると判断した。これを受けて、トンネル掘削時の地山の強度低下を考慮した極限解析²⁾を行い、安全率1.05を確保できる仮押え盛土を施工してインバート閉合までのトンネル掘削を進めた。インバート閉合後、集水井および水抜きボーリングを施工して地下水位の低下による安全率の向上を図った。今後はアンカーによる恒久対策を施工後に仮押え盛土の撤去を行い（この時点で安全率1.20を確保）、変位収束確認後に覆工コンクリートを施工する予定である。

(4) 支保部材力

STA447+82およびSTA447+40において計測された吹付けコンクリート応力、鋼製支保工の軸力および曲げモーメントを図-10～15に示す。STA447+40の鋼製支保工軸力と曲げモーメントの計測点が左右1点ずつ多いが（N6、N7、M6、M7）、これは脚部でウィングリブの部材力も計測しているためである。これらの点の軸力については同一箇所プロットされている■印の2点の合計（例えば、N6の場合は660+330=990kN）が最終的なウィングリブ全体の軸力となる。

STA447+82では、吹付けコンクリート、鋼製支保工ともに山側脚部および谷側肩部の軸力が相対的に大きい。また、鋼製支保工曲げモーメント分布より、山側の上半脚部から肩部では内空側に凸の変形モー

ドが、谷側の上半脚部から肩部では地山側に凸の変形モードが発生しており、軸力分布と合わせて判断すると、トンネルが山側から偏圧を受けて変形している状況が読み取れる。

STA447+40では、山側肩部において鋼製支保工の曲げモーメントが最終的に若干内空側に凸になっているものの、谷側についてはSTA447+82のように地山側に凸になっているような変形モードは見られず、支保部材力のみから判断すると大きな偏圧が作用しているような状況とは思われない。これは、図-9からわかるように、この断面ではトンネル天端、左右脚部の鉛直および水平変位が同程度であることから、トンネル全体の形状が大きくゆがむことなく谷側下方に移動したことに起因すると考えられる。STA447+82においてもトンネル全体が谷側下方に移動している状況が見られるが、左脚部と天端および右脚部の水平変位が大きく異なることから前述のような変形モードが発生している可能性が高い。地質的な要因の他に、STA447+40では谷側肩部の盛土がSTA447+82よりも大きいこと、盛土自体が改良盛土であることも一因と考えられる。

これらの断面では最終的に140～250mm程度の天端沈下が発生したが、支保部材力自体は最大値で吹付けコンクリート応力が4～9N/mm²、鋼製支保工軸力は1000～1400kN程度と極端に大きな値とはなっていない。これは、上記のようにモードは若干異なるもののトンネル全体が谷側下方に移動していることから支保部材のひずみ自体が大きくなっていないことに起因するものと考えられる。

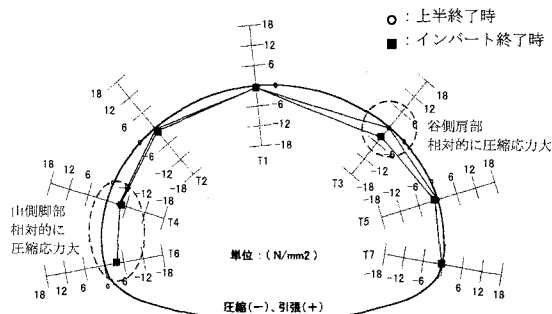


図-10 吹付けコンクリート応力 (STA447+82)

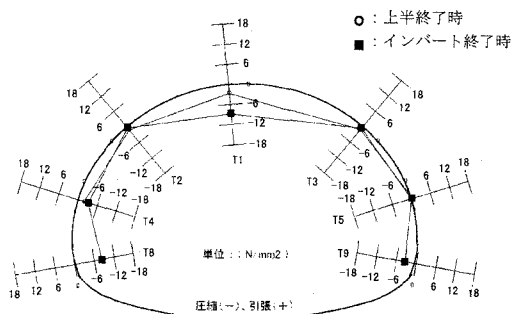


図-13 吹付けコンクリート応力 (STA447+40)

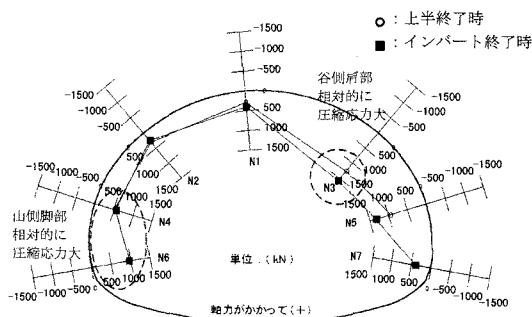


図-11 鋼製支保工軸力 (STA447+82)

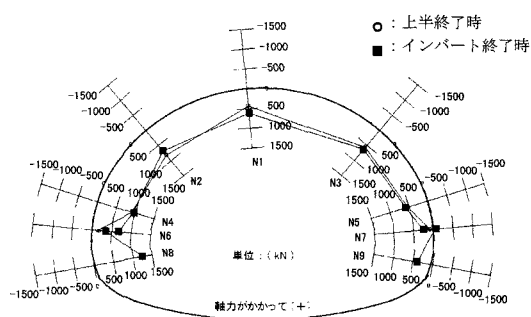


図-14 鋼製支保工軸力 (STA447+40)

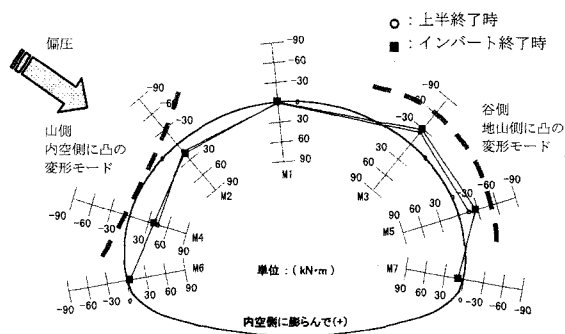


図-12 鋼製支保工曲げモーメント (STA447+82)

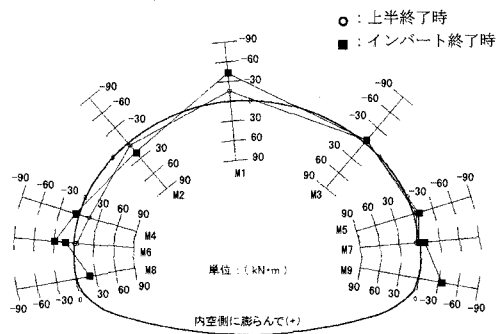


図-15 鋼製支保工曲げモーメント (STA447+40)

(5) レッグおよびサイドパイルの部材力

STA447+82では下半谷側に打設したレッグパイルおよびサイドパイルの軸力と曲げモーメントを計測した。図-16, 17にこれらの計測結果を、図-18に曲げモーメント分布から考えられるパイルの変形モード想定図を示す。

軸力はいずれも圧縮でありトンネルの挙動と整合性が見られる。レッグパイルは、その軸力分布よりパイル先端において70kNの先端支持を受けており周面摩擦による抵抗を含めて170kNの力でトンネル脚部を鉛直方向に支持している状況が読み取れる。サイドパイルは、口元から2m位置で軸力最大となった。3~6m間の軸力がほとんど変化していない状況を考

慮すると、60kNの先端支持と2~3m間の周面抵抗により100kNの力でトンネル脚部を水平方向に支持しているものと考えられる。すなわち、脚部の開きを抑制することによる沈下の低減効果を発揮しているものと想定できる。

曲げモーメントは、トンネル近くでいずれのパイルにおいても相対的に大きくなった。レッグパイルについては、0~2mの間でパイルのトンネルセンター側が伸びとなる曲げが発生したのに対し、2mより深い位置ではほとんど曲げが発生しなかった。曲げモーメント分布よりレッグパイルは図-18に示したような変形モードと考えられるが、これは偏圧によるトンネルの変位とレッグパイルの打設方向との関

単位: kN
圧縮が正

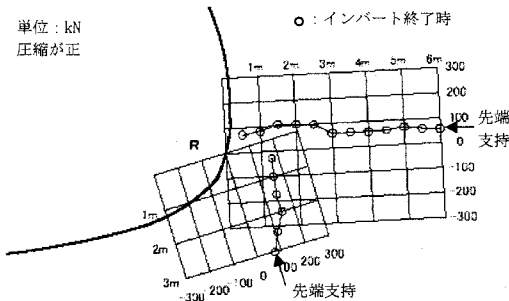


図-16 鋼管パイル軸力 (STA447+82)

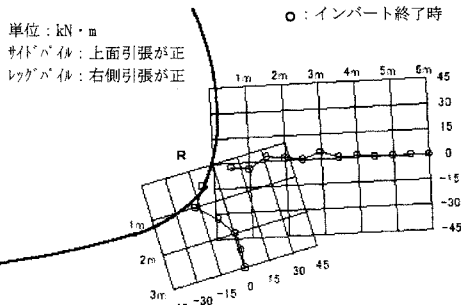


図-17 鋼管パイル曲げモーメント (STA447+82)

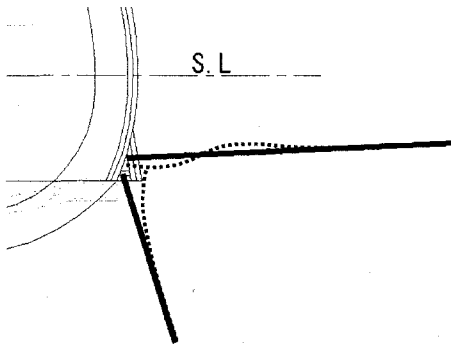


図-18 鋼管パイル変形モード想定図

係が原因となっている可能性が高い。基本的にパイルについては軸力による支持効果が最も効率的であると思われるが、トンネルの変位方向によってはレグパイルの軸力だけではなく、その曲げ剛性も沈下の抑制に寄与することを示唆している。サイドパイルには、0～1mの間でパイルの下面が伸びとなる曲げ、1.5～3.5mの間で逆の曲げが発生し、3.5mより深い位置ではほとんど曲げが発生していない。曲げモーメント分布より、サイドパイルは図-18に示したような変形モードとなっているものと考えられ、サイドパイルの場合にも軸力による水平方向変位の抑制だけではなく、パイルの曲げ剛性が沈下の抑制に寄与している可能性がある。

サイドパイルがトンネル脚部沈下に効果的である

という例はいくつか報告されており^{3), 4)}、そのメカニズムとしては、ロックボルトと類似した「引張耐力による内圧効果」「地山のせん断補強効果」、さらにパイル先端が支持岩盤に固定されることによる「軸力と曲げを複合した吊り下げの効果」「ゆるみ域の外側に地山の荷重を分担させる荷重分散効果」などが指摘されている⁵⁾。本報告の例は偏圧作用区間という特殊なサイトにおける谷側のパイルに関する計測例であり、予想どおり圧縮軸力により水平変位を抑制している状況が確認できたが、同時に曲げ剛性が鉛直変位の抑制に寄与している可能性についても知見を得ることができたと考えている。

5. まとめ

本報文は、扁平大断面トンネルにおける脚部沈下対策工に関して、第二東名金谷トンネル東工事で実施した対策工の概要を報告するとともに計測データに基づく効果の検証結果を述べたものである。検討によって得られた知見を以下に要約する。

- ①偏圧を受けてトンネル全体が谷側に移動するとともに、とも下がり的な沈下が生じているような状況において、上半施工時にレグパイルおよびサイドパイルを施工することによりトンネルの沈下を抑制することが可能である。
- ②上半掘削による変位が収束した後の上半仮インバートの施工は、下半掘削時のレグパイル、サイドパイルの施工と組み合わせることで最終的な沈下量の抑制に効果的である。
- ③レグパイルやサイドパイルは、先端支持や周面摩擦力による変位の抑制効果に加えて、トンネルの変位方向によっては曲げ剛性による変位の抑制効果が期待できる。

参考文献

- 1) 「日本道路公団試験研究所報告」, vol. 36, 1999. 11.
- 2) トンネル掘削を誘因とする地すべり対策に関する基本検討 報告書, 高速道路技術センター, 1996. 2.
- 3) 佐々木他: 都市部住宅密集地におけるトンネル掘削による地表面沈下の予測と対策, 土木学会トンネル工学研究発表論文・報告集第12巻, pp. 367-370, 2002. 11.
- 4) 北川他: 地山改良とサイドパイルで小土被り土砂地山を掘削, トンネルと地下, vol. 35, 2004. 4.
- 5) 脚部補強工技術資料 (第三版), ジェオフロンテ研究会, 2004. 11.