

大断面土砂トンネルにおける水平ジェットグラウト工の 沈下抑制効果

CONTROL OF SETTLEMENT USING HORIZONTAL-JET-GROUTING IN TUNNEL WITH LARGE CROSS SECTION

春山 和彦¹⁾・下山 稔²⁾・信田 英俊³⁾・平 和男⁴⁾・奥本 現⁵⁾

Kazuhiko HARUYAMA, Minoru SHIMOYAMA, Hidetoshi NOBUTA, Kazuo TAIRA and Gen OKUMOTO

Ome-Tunnel has the maximum excavation cross section of approximately 260m², which is quite large for a tunnel constructed directly under downtown area. Since numerous lifeline facilities are buried above the tunnel, the effects of construction on such facilities or nearby buildings have to be kept as small as possible. In order to meet this requirement, we have applied the horizontal-jet-grouting to minimize the surface settlement above the tunnel. The excavation of second bench of upper half of this tunnel has been finished so far and it has been proved, based on our measurement results, that this method is very effective to reduce the surface settlement. For example, the settlement after the excavation was 10-20mm for the grouted area while it was 20-40mm for the non-grouted area.

Key Words : large cross section tunnel, gravel layer, surface settlement, horizontal-jet-grouting

1. はじめに

近年、都市部の土被りの浅い未固結地山を対象とした大断面トンネル工事が増加している。このような未固結地山のトンネルにおいては、切羽崩落の危険性が高く、かつ住宅密集地や公共埋設物直下であることから、トンネル掘削による構造物及び埋設物への影響を少なくするために、地表面沈下を極力抑制する必要がある。そのため、長尺鋼管等を用いた先受け工によって切羽崩落を防止するとともに、地盤支持力が十分でない場合には、沈下を抑制するために脚部補強工を併用することが多い。

脚部補強工としては、フットパイル工、薬液注入工等があるが、首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル¹⁾・²⁾北工事においては、掘削に先立って切羽前方にセメントミルク噴射による改良体を水平方向に造成し、掘削後の一次覆工に作用する土圧を直接改良体で支持する水平ジェットグラウト工を採用した³⁾。その結果、水平ジェットグラウト工が沈下抑制に優れた効果を有していることが明らかとなったことから、以下、水平ジェットグラウト工による脚部補強工の施工法及びその沈下抑制効果を報告する。

-
- | | | | | |
|----|-------------|----------|-------------------|--------|
| 1) | 日本道路公団東京建設局 | 八王子工事事務所 | 青梅中工事区 | 工事長 |
| 2) | 日本道路公団東京建設局 | 八王子工事事務所 | 青梅中工事区 | |
| 3) | 鹿島建設(株) | 東京支店 | 圏央道青梅トンネルJ V工事(事) | 所長 |
| 4) | 正会員 鹿島建設(株) | 東京支店 | 圏央道青梅トンネルJ V工事(事) | 工事課長 |
| 5) | 正会員 鹿島建設(株) | 東京支店 | 圏央道青梅トンネルJ V工事(事) | 工事課長代理 |

2. 工事概要

青梅トンネルは、我が国初めての NATM による上下線二層構造の道路トンネルである。青梅トンネル北工事では、土被り 6.9～7.8m で、掘削断面積 221～261 m^2 (図-1) の卵型超大断面のトンネルを掘削している。鋼製支保工は H-200 (ウイングリブ付き)、吹付け厚さは 25cm で、1、2 段ベンチは 20cm の吹付けコンクリートで仮閉合している。

掘削位置の土層は立川礫層と青梅礫層で、砂礫が主体であるが、シルト以下の細粒分が 10～20% 程度あり、数 cm から 70cm 程度の玉石を含んでいる。土層全体の透水係数は、立川礫層が $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ cm/s}$ 、青梅礫層が $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm/s}$ であるが、1 段ベンチに位置する立川礫層と青梅礫層の層境には、砂及びシルト以下の細粒分がほとんどない水みちが所々存在し、豪雨時には多量の湧水がある。常時の地下水位は立川礫層と青梅礫層の層境にあるが、300mm 程度の豪雨時には、6m 程度地下水位が上昇したことがある。

トンネルの施工手順は、図-2 に示したとおりで、4 段ベンチに分割して掘削する。また、当初、上部覆工の自重は、下部覆工と下部地山を支点とした上部覆工のシェル構造で支持し、下部の 3、4 段ベンチを抜き掘りする計画¹⁾であったが、抜き掘り時の上部覆工の沈下が累積し、地表面沈下を増加させること等が考えられたため、現在は、上部 2 段ベンチ掘削後、上部覆工を構築する前に上部覆工の自重分を支持する仮設支持杭を 1 スパン 9m に 4 本施工し、その後、下部 3、4 段ベンチ掘削、下部覆工の構築を行う施工方法に変更している。

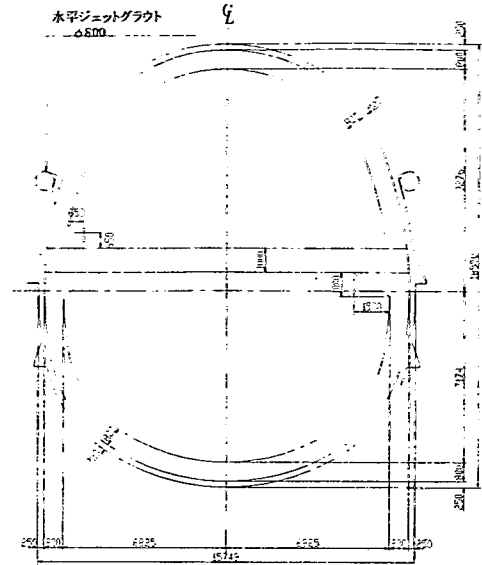


図-1 掘削断面

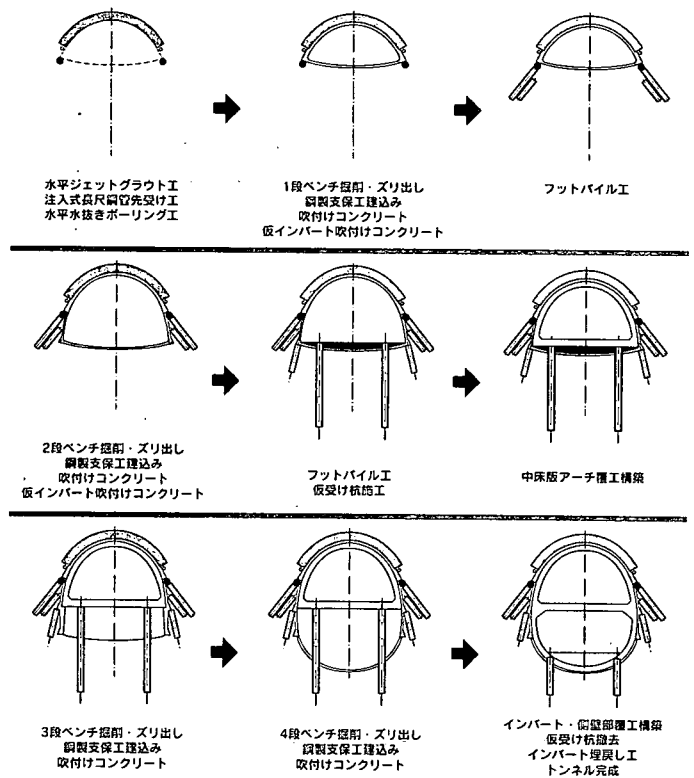
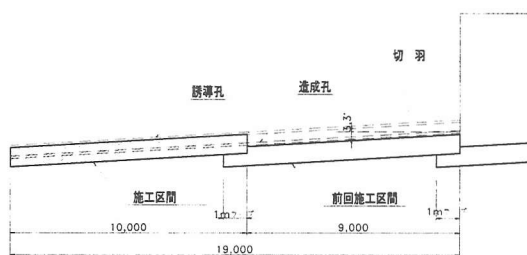


図-2 施工手順



図－３ 水平ジェットグラウト施工パターン

３．水平ジェットグラウトの施工

本工法では、ジェットグラウトによる改良体をより水平に近い角度にし、かつ造成時の切羽崩壊を防止するために、切羽から 9～19m 先に直径 80cm の改良体を造成している。また、造成時のスライム誘導とブリージング後のセメントミルク再充填を目的とした誘導孔を削孔する方法を採用し（図－３）、さらに、改良体の径を確保するために、水噴射によるプレジェットを行っている。

水平ジェットグラウト工の施工は、表－１に示す仕様に従い、以下の手順で行った。

- ① 誘導孔のケーシング削孔
- ② 造成孔のケーシング削孔
- ③ 10m 区間のプレジェット
- ④ 10m 区間のセメントミルク噴射造成
- ⑤ ケーシング引き抜き後、セメントミルク再充填

施工状況は写真－１に示すとおりである。試験施工における改良体は、写真－２、３に示すように、改良径 80cm 程度で、28 日強度が平均 $7.0\text{N}/\text{mm}^2$ 程度のものとなり、仕様を満足した。

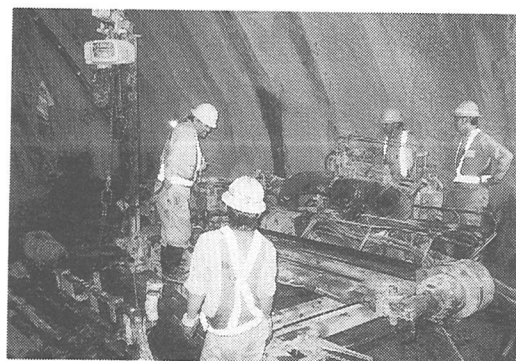
実施工では、掘削のサイクルタイムへの影響を極力なくすために、次々シフトの水平ジェットグラウト工と次シフトの先受け工をトンネル切羽の両側に分かれ、同時施工にて行った。ウイングリブ付きの鋼製支保工が乗る位置には改良体が造成されており、 $\phi 80\text{cm}$ のうち、平均上部 20cm をはつり成形してから鋼製支保工を設置した。地下水位が 1 段ベンチ掘削盤以上となる春から秋にかけては湧水があり、掘削盤が泥濁化した。鋼製支保工は堅固な改良体の上に乗る、支持力が極端に低下した地盤に乗ることはなかった。

表－１ 水平ジェットグラウト仕様

施工仕様			
造成径 (mm)	噴射圧力 (N/mm^2)	噴射量 (リットル/分)	引き上げ速度 (分/m)
800	30	1,000	10

注入材配合

セメント (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	混和剤 (kg/m^3)
760	750	12



写真－１ 施工状況



写真－２ 改良体全景

4. その他の補助工法

トンネル掘削に先立ち、注入式長尺鋼管先受け工を9m毎に施工した。鋼管は $\phi 114\text{mm}$ 、 $t=6\text{mm}$ 、 $L=12.5\text{m}$ のもので、60cmピッチで打設し、セメントミルクを注入した。注入管理は、注入圧 0.5N/mm^2 以内もしくは設計注入量の3倍である $2,514\text{kg/本}$ 以下とした。先受け工の下部には、スリットを切った鋼管を両側に1本ずつ打設し、水抜きボーリングとして使用した。

また、2段及び3段ベンチ掘削に先だって、沈下抑制及び側壁崩落防止のために、ジェットグラウト工によるフットパイルを施工した。

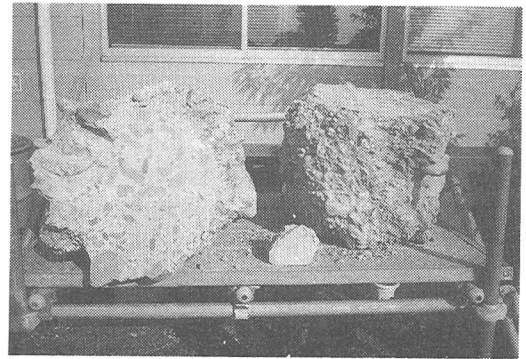


写真-3 改良体断面

5. 計測結果

トンネル上部の1、2段ベンチ掘削までを完了した段階で、水平ジェットグラウト工適用区間の地表面沈下量は、1ベンチ掘削時に最大15mm、2段ベンチ掘削時に最大20mmであったのに対し、水平ジェットグラウト工を適用しない区間では、1段ベンチ掘削時に最大23mm、2段ベンチ掘削時に最大40mmとなった。

図-4は、水平ジェットグラウト施工の有無による地表面沈下量の経時変化の一例を示したものである。先行変位における大きな差はないが、水平ジェットグラウトを施工した区間では、1段ベンチ掘削の収束時点で7mm程度、2段ベンチ掘削の収束時点で20mm程度沈下が小さくなっている。

この沈下量の差は、地下水位上昇に伴う湧水により、掘削盤が泥濘化したことが一因として考えられ、水平ジェットグラウト工適用区間においてはその影響を受けにくかったものと想定される。

図-5は、水平ジェットグラウト施工区間の天端沈下・内空変位の一例を示したものである。天端沈下と内空変位については、1段ベンチ掘削時には天端沈下が10mm程度、内空変位が5mm程度で収束した。その後、2段ベンチ掘削によって掘削高さが10mに達すると、天端沈下はほとんど増加しなかったのに対し、内空変位は30mmを越えるまで増加した。トンネルの掘削幅が15m程度であるのに対し、高さが10mであり、掘削形状が通常の大断面トン

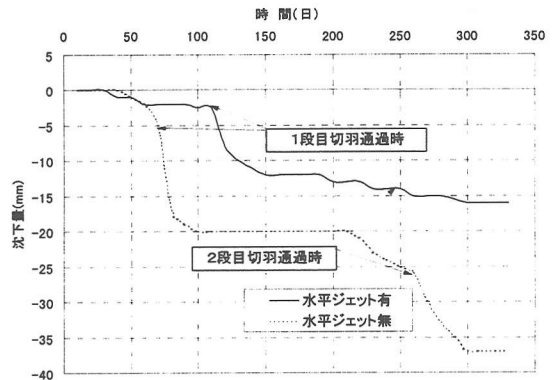


図-4 地表面沈下計測結果

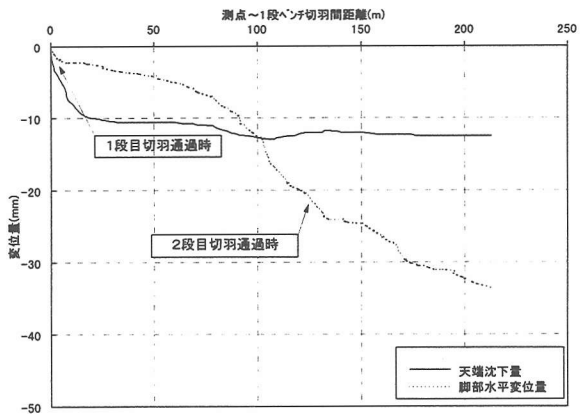


図-5 天端沈下・内空変位計測結果

ネルよりも縦長で、下部が開いた形状になっていることが水平方向の変位を増加させたものと考えられる。
また計測によると、1段ベンチの一次覆工に作用している軸力は $0.7\sim 1.5\text{N/mm}^2$ であった。

6. 沈下抑制効果の検討

水平ジェットグラウト工の沈下抑制効果としては、以下のようなことが考えられる。

(1) 支持地盤の剛性向上

水平ジェットグラウト工は、切羽前方に予め改良体を造成するため、鋼製支保工を直接改良体に乗せることができる。

本工事のように掘削盤が湧水で泥濘化する場合には、支持地盤の剛性が極端に低下してしまい、解析上評価できない施工上の沈下を増大させることが考えられる。

しかし、水平ジェットグラウト工による改良体がある場合には、表層の泥濘化の影響を受けることなく、原地盤より高い剛性を有する改良体で、一次覆工に作用する緩み土圧を掘削直後から支持することが可能であるため、解析条件により近い状態となり、施工上の沈下を抑制できるものと考えられる。

支持地盤の剛性を評価するため、平板載荷試験を実施し、水平ジェットグラウト工改良地盤と原地盤の地盤剛性を比較した。

その結果、図-6に示すように、水平ジェットグラウト工での改良体上では変形係数が 140N/mm^2 程度であったのに対し、原地盤では、湧水がなく泥濘化していない状態で 30N/mm^2 程度しかなかった。この試験によると、実際に1段ベンチの一次覆工に作用している軸力 1.0N/mm^2 において、沈下量の差は 5mm となっており、沈下計測結果とも整合性がとれている。

沈下に対しては、この変形係数が重要な要因となるが、今回、 140N/mm^2 の変形係数は、N値50程度の砂礫層で、改良体の径が 60cm 以上の条件で得られている。原地盤の 30N/mm^2 の変形係数についても湧水がない条件での値であり、泥濘化した場合は地盤剛性がさらに低下し、沈下量の差はさらに大きくなり、1段ベンチ掘削時の地表面沈下量の差の拡大に繋がるものと考えられる。

(2) フットパイル施工時のブリージングの影響抑制

2段及び3段ベンチ掘削に先立ち、沈下抑制及び側壁崩落防止のために、ジェットグラウト工によるフットパイルを施工したが、施工時にはジェットグラウトにより、周囲の地山がセメントミルクに置換され、一次覆工下が一時的に緩むとともに、造成後のセメントミルクのブリージングにより、フットパイルと一次覆工の間に隙間ができる可能性がある。

このブリージングによる隙間が大きいと、フットパイル施工後、また2段ベンチ掘削時に沈下が大きくなることが考えられる。セメントミルク噴射後のスライムのブリージング率を測定してみると15%程度であり、フットパイル造成長 3.5m においては 50cm 程度の隙間となる。フットパイル施工後にセメントミルクの再充

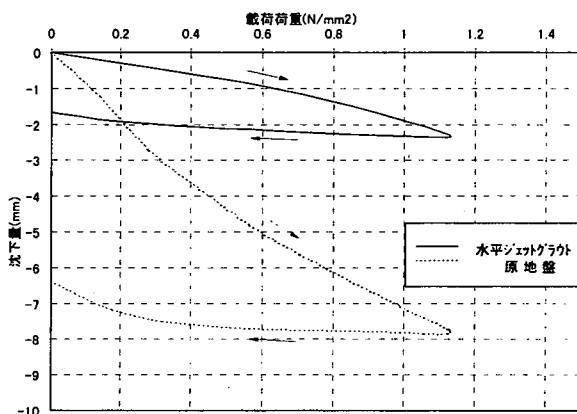


図-6 平板載荷試験結果

填を行って隙間を少なくしているが、湧水等の影響で表面が洗われ、鉛製支保工の下に若干の隙間ができる可能性はある。

これに対し、水平ジェットグラウト工を施工した場合は、切羽側からの 9m 間で 0~40cm、平均 20cm は取り取るが、改良体の径が 80cm であるため、鉛製支保工から平均 60cm 下まで改良体が残ることになる。従って、セメントミルクのブリージングによる空隙は、改良体の下部にできる可能性があるが、再充填によって下部が充填されやすいため、改良体とフットパイルとの間に隙間ができにくくなると考えられる。

計測結果では、水平ジェットグラウト工施工区間での 2 段ベンチ掘削時の沈下増分は水平ジェットグラウト工未施工区間と比較して 20mm 程度少なくなっていることから、水平ジェットグラウトによる改良体とフットパイルが、ブリージングの影響を受けることなくほぼ一体化し、トンネル掘削による緩み土圧が一体化した支持機構で支持され、2 段ベンチ掘削時の沈下を抑制しているものと考えられる。

以上のように、トンネル掘削時の緩み土圧を掘削直後から堅固な改良体で支持し、掘削盤の湧水による泥濘化の影響を排除し、さらにフットパイル造成時のブリージングの影響を抑制することによって、先受け工、水平ジェットグラウト工、フットパイル工がトンネル周囲に 1 段、2 段ベンチ掘削時の緩み土圧を支持するアーチ状の支持機構を形成し、この支持機構が沈下を抑制しているものと考えられる。また、計測結果と FEM による順解析⁴⁾、弾性及び異方性損傷を考慮した逆解析⁵⁾の結果から、本トンネルの挙動は弾性解析に非常に近い挙動を示しており、解析と施工での挙動の違い、解析上考慮しにくい施工上の問題が少ない状態で本トンネルが施工されているものと考えられる。

7. まとめ

土砂地山では、湧水によって地盤の物性が大きく変化し、沈下に大きな影響を及ぼす。1 段ベンチでの脚部補強工については、切羽前方、つまり掘削前に施工するのが効果的であり、これまでも切羽前方に改良体を造成する試みがなされている。今回施工した水平ジェットグラウト工は、切羽到達前に脚部に改良体を造成し、脚部沈下を抑制する目的で施工したものであり、結果として、2 段ベンチ掘削時の沈下抑制も含めて、非常に効果的であることが明らかとなった。

本工事では、水平ジェットグラウト工の施工本数は両側 1 本ずつとした。地盤支持力が低い場合には本数を増加させて支持面積を広げることが有効であるが、広い範囲に連続して施工する場合は、施工時に地盤を緩めることになり、かえって沈下を増加させることも考えられるため、施工パターン決定に際しては慎重に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 藤村・山野・原田・須藤：国内初の 2 層道路トンネル 首都圏中央連絡自動車道青梅トンネル、トンネルと地下、第 9 巻、9 号、1998
- 2) 藤村・山野・原田・加藤：市街地道路直下の二層道路トンネルの施工、土と基礎、47-7、1999
- 3) 藤村・下山・中村・信田・平・奥本：道路直下における大断面土砂トンネルの施工（その 1）、第 55 回土木学会年次学術講演会、2000
- 4) 藤村・田中・萩原・渡辺：道路直下における大断面土砂トンネルの施工（その 2）、第 55 回土木学会年次学術講演会、2000
- 5) 藤村・並川・森川・日比谷・芥川：道路直下における大断面土砂トンネルの施工（その 3）、第 55 回土木学会年次学術講演会、2000