

トンネル工事における補助工法の効果についての考察

出島バイパス建設事務所 建設課 ◎川内野俊治
○横尾 利春

1. はじめに

近年、未固結層で、しかも低土被り地における NATM によるトンネル施工では、地山の変位を小さくすることや切羽の安定を目的とした補助工法の技術的進歩が著しい。

一般国道 324 号（出島バイパス）道路改良工事(L=約 5km)のうち、その大部分がオランダ坂トンネル(L=約 3km)である。オランダ坂トンネルの起点側坑口から約 500m 区間は、未固結層が分布し、低土被りであり、しかも地表部は住宅密集地でライフラインが縦横無尽に張り巡らされているというトンネル施工にとっては厳しい条件であった

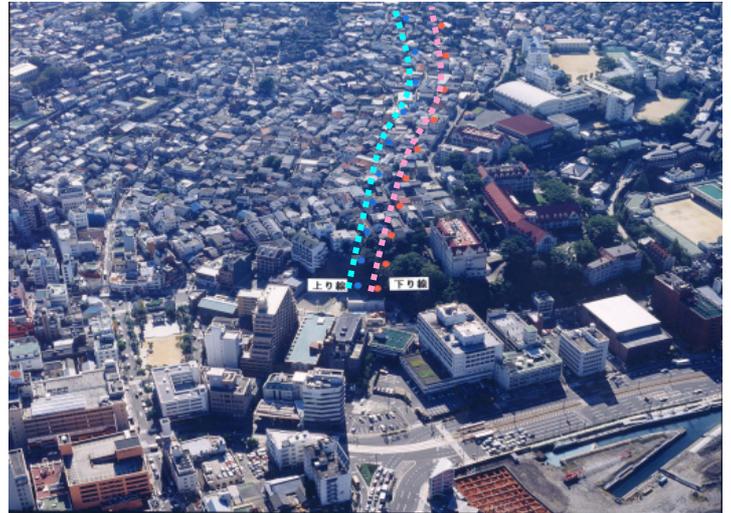


図-1 オランダ坂トンネル起点側の住宅密集地

(図-1 参照)。このため、切羽の安定及び地山の変位抑制を目的として、いくつかの補助工法を採用し、計測管理を行った。

本報告は、トンネルの計測管理で得た結果から、今回採用した補助工法の効果について考察を行うものである。

2. オランダ坂トンネルの概要

本トンネルは、上り線 2,923m、下り線 2,967m の 2 車線併設トンネルであり、完成後は県内最長の道路トンネルとなる。トンネル工事は、終点側である早坂町からの、2 本同時の片押し施工である。表-1 にオランダ坂トンネルの概要を取りまとめた。

表-1 工事諸元

掘削方法	機械掘削 (ロードヘッダ S-300kw 級)
掘削工法	補助ベンチ付全断面掘削工法
	上半先進ショートベンチカット工法
掘削延長	上り線 2,923m
	下り線 2,967m
掘削断面	約 70m ²
縦断勾配	下り勾配 i = 2.65%

3. 地形・地質概要

トンネルルート起点側から約1.5kmは、標高30m～150mのなだらかな丘陵地形であり、2km地点にかけては比高差で約50mの谷地形となる。終点側の約1km区間は、標高約230mの山岳地形である。図-2の地質縦断面図に示すようにトンネルルートの地質は、基盤岩として長崎火山岩類の凝灰角礫岩が分布し、その上位に安山岩溶岩及び安山岩自破碎溶岩などが分布する。

トンネル切羽位置の地質は、終点側から1.7km間は火山礫凝灰岩および凝灰角礫岩であり、起点側の0.5kmから1.3km間は、岩屑なだれ層と安山岩自破碎溶岩である。起点側坑口から0.5km間は、岩屑なだれ層、湖沼堆積層、土石流堆積層であり、これらの地質は固結度が低く、切羽の安定と地山の大きな変位の発生が懸念された。図-3に施工中の追加ボーリングおよび切羽観察結果も考慮した起点側坑口付近の地質縦断面図を示す。

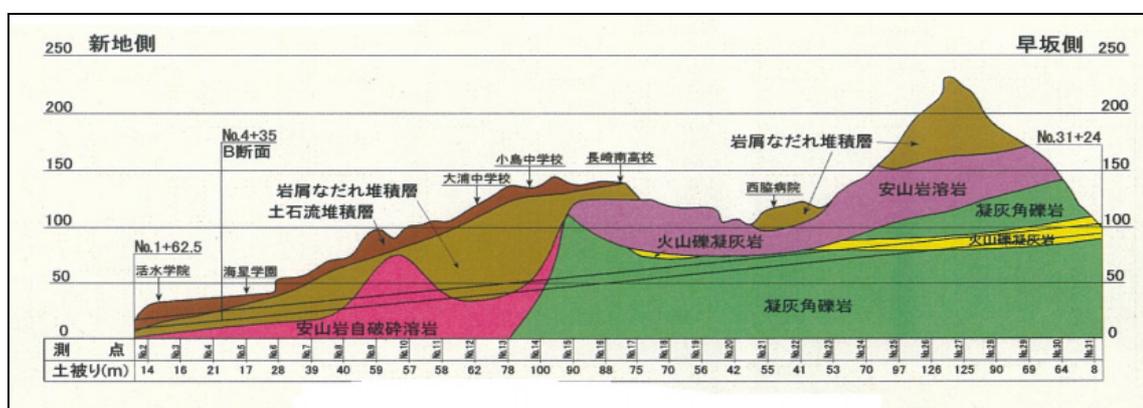


図-2 トンネル全線の概略地質縦断面図

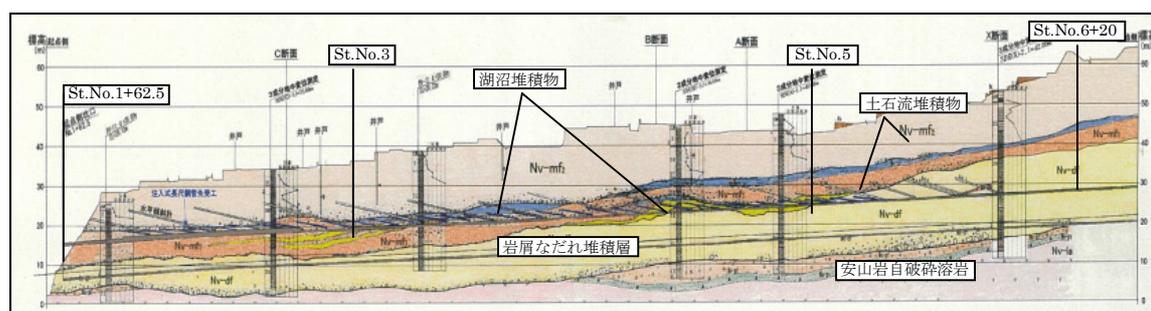


図-3 起点側坑口部付近の詳細地質縦断面図

4. 計測の目的と内容

補助工法を採用した起点側において実施した計測工位置を図-4に示した。表-2には計測内容の一覧を示したが、計測工のうち、坑内計測の水平傾斜計および、坑外計測の地中変位計（3成分測定用）は通常 mountain tunnel construction では、あまり行わない計測である。しかし、ここでは以下の理由により、これらの計測工を採用した。

- ・ 土被りが薄く、地山が未固結であるため、トンネル掘削が、上部住宅密集地に与える影響が大きいと考えられること。
- ・ 計画トンネルルート上には、ライフライン及び未確認の井戸もあることから、切羽

前方の地山変位を把握することが必要であること。

- ・ 地上部には住宅密集地があることから、十分な地表面沈下測定ができないこと。
- ・ トンネル上部が住宅密集地であり、事前に地表部からの補強工法が取れないこと。
- ・ トンネル掘削の地表面に対する影響を早期に捉え、管理基準値内での施工を行うための計測管理が必要であること。
- ・ 補助工法を併用したトンネル掘削の変形モード等を確認し、より効果的な補助工法を選定する必要があること。

表-2 起点側坑口付近における計測工一覧

	工種	測定項目	主な目的
坑内計測	A計測	・天端沈下 ・内空変位	地山内部および各支保部材の挙動把握
	坑内B計測	地中変位測定	トンネル掘削による周辺のゆるみ領域と地山挙動の把握
		ロックボルト軸力測定	応力度(荷重)を測定しボルト長や本数の適否の判断
	水平傾斜計	天端沈下量	切羽前方の変位量(先行変位)把握
坑外計測	地中変位計	地中変位量	トンネル周辺地山(地表部～トンネル下端)のゆるみ領域と地山挙動の把握(全変位量)
	地表面沈下測量	地表面沈下量	地上構造物への影響把握

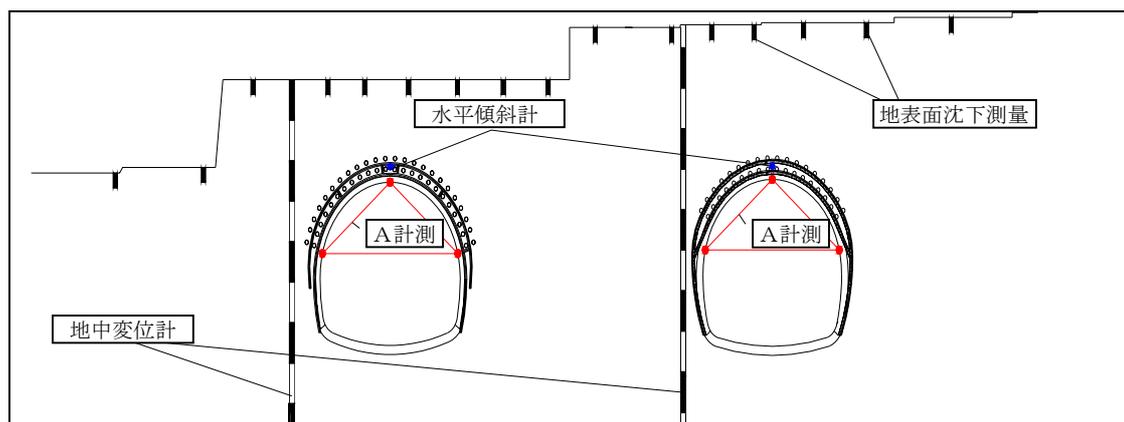


図-4 起点側坑口付近における計測工位置図

5. 計測結果

5.1. 計測結果の概要

未固結地山等で切羽の安定性を向上させる方法には、核残し、鏡吹付けコンクリート、フォアポーリング等さまざまな補助工法がある。オランダ坂トンネルの場合は、上部に住宅密集地があることから、地表面陥没を避けるために現時点で一番安全性の高い長尺鋼管フォアパイリング(トレヴィチューブ)を採用した。

長尺鋼管フォアパイリングの効果は、模型実験、数値シミュレーション、施工実態調査などさまざまな観点から検討されている。その中で、武内ら¹⁾は、長尺鋼管フォアパイリングの効果は、『切羽安定効果と沈下抑制効果として説明できる。』としている。オランダ坂トンネルでは、これらの効果により住宅密集地を地表面陥没から守ることを期待して長尺鋼管フォアパイリングを新地側坑口から約 500m 間で施工した。

以下に、長尺鋼管フォアパイリングを施工することにより地表面陥没から守れた結果

とインバート部の早期閉合を行うことにより地表面の沈下が抑制できたことを、得られた計測のデータから示す。

5.2. 地表面陥没から回避できた事例(長尺鋼管フォアパイリングの効果)

長尺鋼管フォアパイリング施工中に確認されたせん断変位を水平傾斜計のデータを用いて図-5 に示す。

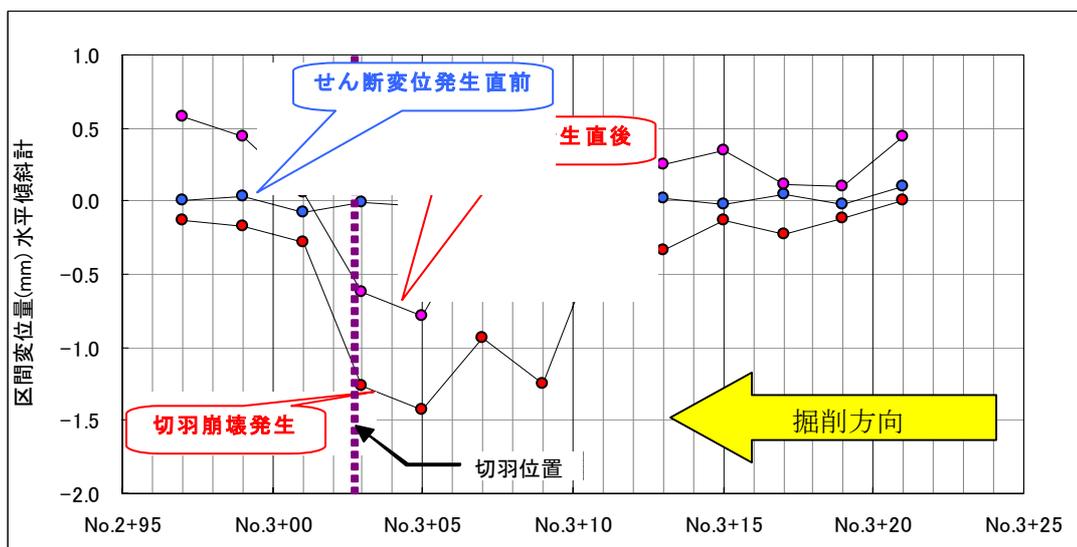


図-5 せん断変位発生 (水平傾斜計データ)

この図は、せん断変位発生前、発生直後、切羽崩壊時のデータを区間変位量で示したものである。せん断変形発生時期には、切羽は停止しており、長尺鋼管フォアパイリングを施工中であった。また、その後の切羽崩壊発生は、切羽掘削再開までの間であった。

この図から、せん断変位発生後から切羽崩壊までの間の影響範囲は、切羽前方だけでなく、切羽後方にまで及んでいることがわかる。

図-6 には、累積変位量を示したが、切羽崩壊前後における水平傾斜計位置でのたわみ量を赤線で示している。このたわみを見ると切羽前方では、沈下傾向を示し、切羽後方ではその沈下に対して切羽位置を支点に支える傾向が読み取れる。

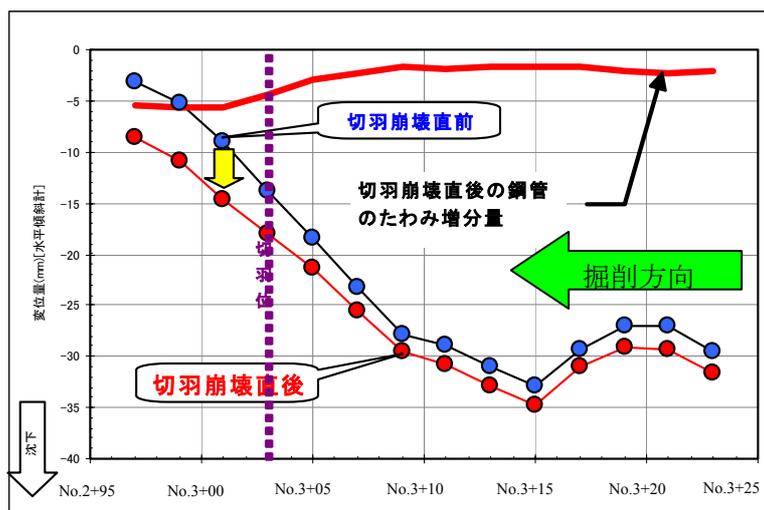


図-6 切羽崩壊時の水平傾斜計データ

また、その時の地盤傾斜計のデータでは、 $0.7/1000\text{rad}$ の局所的な傾きが確認できた。このことから、図-7 に示すようなせん断面が形成されたかどうかは不明であるが、地表面で確認されたクラックからその影響は地表面まで及んでいることが確認できた。

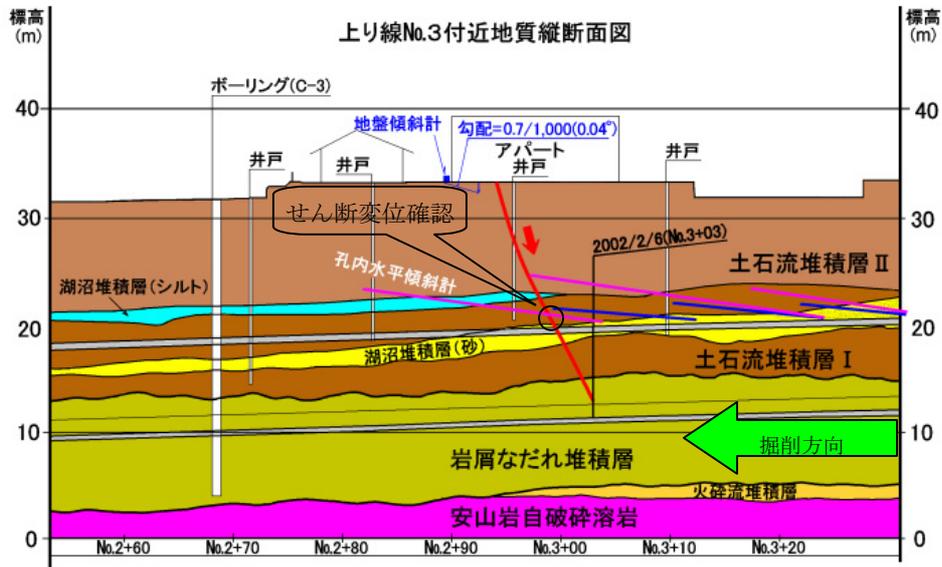


図-7 せん断変位の概念図(縦断面図)

以上のことから、総合的に判断すると、長尺鋼管フォアパイリングが切羽崩壊を最小限にとどめたものとする。言い換えれば、先受け長が短い場合や、鋼管の剛性が小さい場合には、長尺鋼管フォアパイリングに梁の効果が期待できず、地表面陥没を誘発していたと考える。これ以降、長尺鋼管フォアパイリングの効果を高めるために、ラップ長を長く(4m⇒6m)変更した。

5.3. インバート早期閉合による変形抑制効果

インバートによる早期閉合は、トンネル周辺地山のグランドアーチ形成を速やかにし、トンネルの安定だけでなく、地山の変位抑制効果がある。オランダ坂トンネルでは、A計測から得られる脚部沈下量に着目し、インバートによる早期閉合の効果を検証した。

図-8は、上半脚部沈下が切羽通過後にどのように推移するかを見たものである。

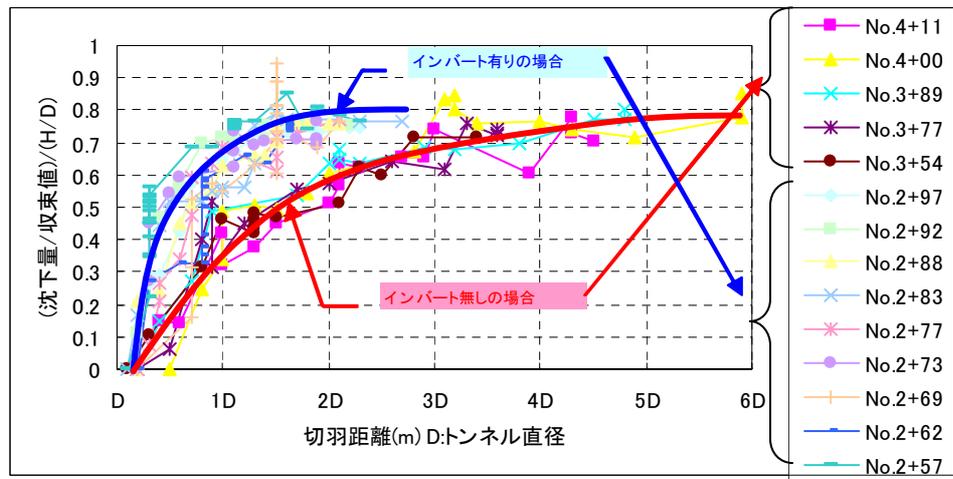


図-8 上半脚部沈下と切羽距離との関係

この図の縦軸は、上半脚部の沈下量を収束値で除算することにより無次元化し、さらに各計測断面の土被りの影響(荷重の影響)を取り除くために土被り比(H/D,H:土被り高

さ、D:トンネル直径[≒10m])で除算した値をプロットしたものである。

この図から、インバート無しの場合には、上半脚部の沈下は、収束するまでに5D程度要しているのに対し、インバート有りの場合には、2D程度で収束していることがわかる。このことから、上半脚部の沈下量は、インバート有りの場合の方が小さくなることを示している。もし、インバート施工区間の方が施工していない区間に比べ、地山の弾性係数が大きい場合には、このことは当然の結果となる。そこで、インバート施工有り、無しの区間の地山の力学特性を見るために、事前に実施した孔内載荷試験の結果を図-9から見た。

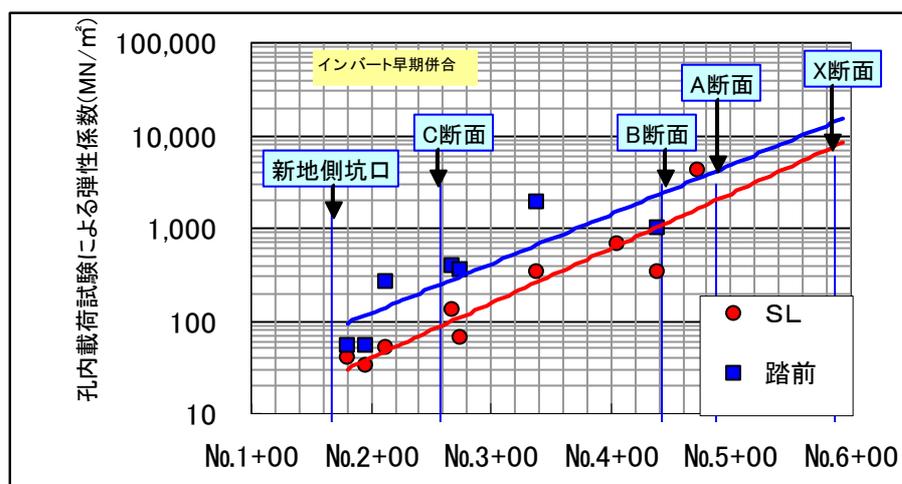


図-9 孔内試験結果から得られた地山の弾性係数

この図から、トンネル踏前部およびスプリングライン部で得られた地山の弾性係数は、新地側坑口に向けて低下している。インバート施工の有無の区間で見ると、トンネル掘削以前の地山の弾性係数はインバートを施工している区間の方が小さいことがわかる。

以上のことから、図-9 に示すインバート施工の有無の違いによる収束距離の違いは、荷重条件およびトンネル掘削以前の地山の弾性係数を考慮しても、インバート施工の効果であることを示している。

6. あとがき

本トンネルで採用した主たる補助工法は、長尺鋼管フォアパイリング(トレヴィチューブ)である。トレヴィチューブは、切羽の安定や沈下対策だけでなく、地表面陥没のようなゆるみ土圧にも対処できることが、現場状況および計測データから明らかになった。またインバートの早期閉合が、地山変位を抑制することも計測データおよび事前の調査結果から明らかになった。

現在は、県内だけでなく全国の今後施工される都市 NATM トンネルに役立つ資料を作成するため、オランダ坂トンネルで得られた成果をさまざまな角度から取りまとめている。

現在、オランダ坂トンネルは平成16年春供用に向けて、防災設備等の施工を行っている。

¹⁾武内秀木,河上清和,折橋恒春,中川浩二 長尺鋼管フォアパイリング(AGF工法)の効果に関する研究,土木学会論文集 No.623/VI-43,pp233-246,1999年