

シールドトンネルNATM切上げ時の覆工の挙動に関する考察

A study on the lining behavior during enlargement of shield tunnel by NATM

桑原弘昌*・浦沢義彦*・海老沼保文**・桑田尚史***

Hiromasa KUWABARA, Yoshihiko URASAWA, Yasubumi EBINUMA and Hisashi KUWATA

Enlargement of shield tunnel for the connecting section, has been executed by NATM. In order to establish a safe and economical enlargement method, it is necessary to clarify the behavior of various supporting measures, such as shield segment, shotcrete and of course ground itself. However, it is very difficult to estimate their behavior during enlargement, because the supporting system changes along with the complicated enlargement process. Detailed field measurement and numerical analysis were carried out, and the behavior of supportings is discussed. Obtained informations are useful for the planning of further enlargement of shield tunnel.

Keywords: enlargement, shield, NATM, field measurement

1. はじめに

シールドトンネルの連係部・分岐部等において通常の内空断面より大きな空洞をある一定区間確保する必要が生じた場合、しかも地上の周辺環境、埋設構造物の存在あるいは新設構造物の大深度化等により地上からの開削工法が適用できない場合に地中切上げ工事が実施される。地中切上げ工法としては、拡大シールド方式と山岳トンネル方式（以下、NATM方式と言う）の2つの工法があり、どちらの工法とも施工実績は良好であったと報告されている^{1)・2)}。

本報告は、土被りの小さい未固結な砂質地山中において補助工法として薬液注入工法（低圧浸透注入工法）を採用し、シールド施工後にトンネル内部からNATM方式により地中切上げ工事を行った場合の設計および計測結果についてまとめたものである。一般に、NATM方式による地中切上げ工事を計画するに当っては、施工の進展とともに変化する覆工構造の挙動を事前に予測することが重要である。

今回、数値解析により地盤改良範囲、NATM支保部材を設計するとともに、切上げ部に隣接するセグメントおよびNATM支保工の計測を行い、切上げ時の各支保部材の挙動を把握し、計測結果と数値解析とを比較検討した。その結果NATM方式による地中切上げ工事における各支保部材の役割が明確となり、今後の同様な工事の計画の際に有用となる知見が得られた。

* 正会員 東京電力株式会社 地中線建設所船橋工事事務所

** 正会員 東京電力株式会社 地中線建設所土木課

*** 正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部

2. 工事概要

本工事は、地表面下約10mにおいて、NATM方式により既設のシールドトンネル（セグメント外径 $\phi 4.2$ m）を内部より切抜けて高さ5.5 m、幅5.1 mの8心円断面の地下空間を構築するものであり、仕上り延長は約11 mである（図-1、図-2参照）。

切抜け工事付近の地質は、上層から埋土、関東ローム、松戸粘土、成田砂から構成されている。掘削対象土層は成田砂層であり、事前のボーリングデータによると地表面下10 m付近ではN値6～50（平均29）、均等係数1.9～8.6（平均4.0）の比較的均一な粒径となっている。細粒分は14%以下の極めて均質な細砂層であり、水で飽和されると流砂現象を生じ易い地層である。

切抜け工事付近の地下水は、地表面下7 m付近の成田砂層内に自由水面を有する地下水帯が存在し、この地下水は若干の季節変動を生じるものの概ね地表面下7～12 mの範囲におさまっている。

今回の切抜け工事の施工手順を図-3に示す。

本工事では補助工法として切羽の安定性、湧水対策および周辺環境への影響防止を考慮し、トンネル内部からの薬液注入工法（低圧浸透注入工法）を採用した³⁾。また掘削工法は、切羽の自立性の確保お

よび地山の初期応力の解放を小さくするために無支保で放置される掘削面積および時間を極力少なくし、かつ早期に断面閉合を図れるミニベンチ工法（基本：上半支保工3基先行）を採用した。

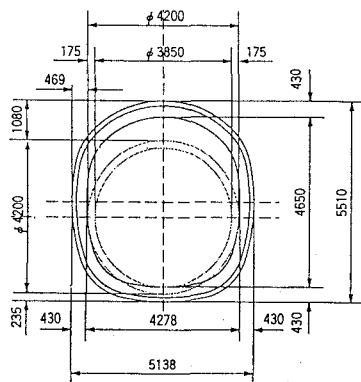


図-1 切抜け断面図

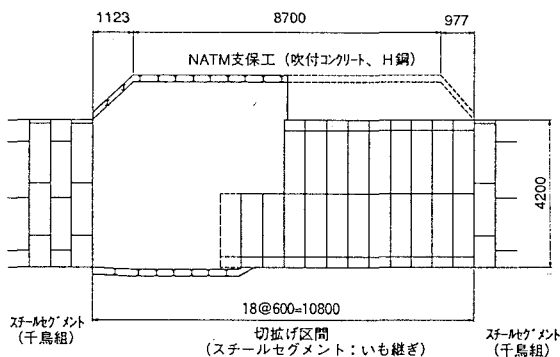


図-2 切抜け縦断面図

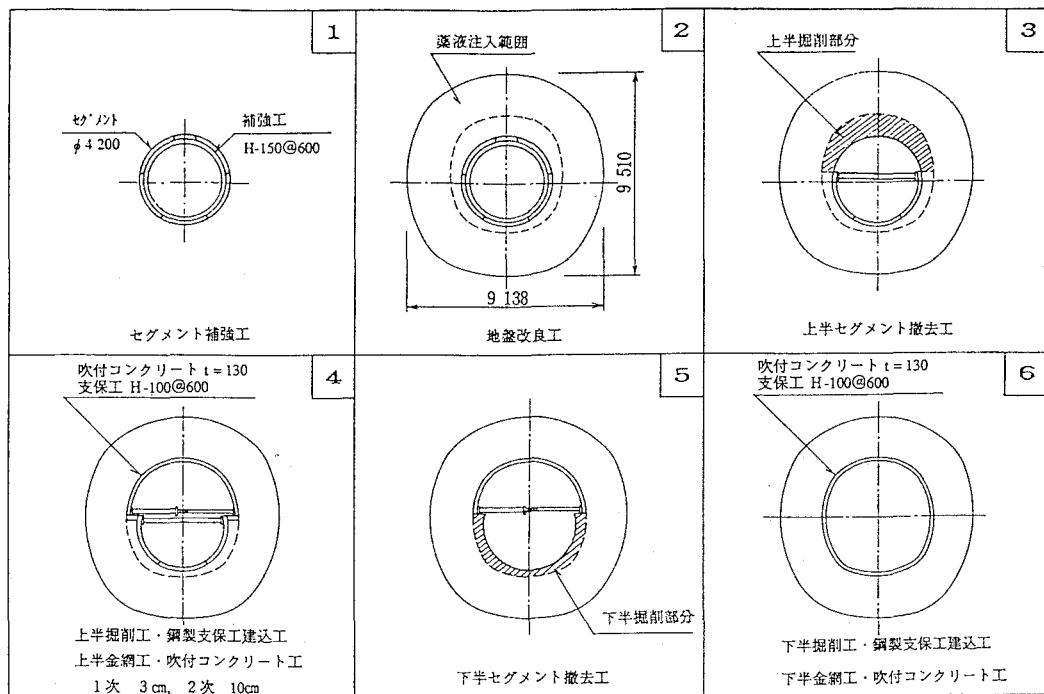


図-3 切抜け施工手順

3. 設計

3. 1 NATM支保工

本工事における切掘り断面のNATM支保工はロックボルトを使用しないことを基本とし、トンネル標準示方書（山岳編）および既往の成田砂層における施工実績から支保規模を概ね設定し、2次元有限要素法弾性解析によって支保の良否を検討し、最終的に以下のように決定した。

吹付コンクリート厚： $t = 13 \text{ cm}$ （1次吹付3 cm、2次吹付10 cm）

鋼製支保工： $H-100@60 \text{ cm}$

3. 2 薬液注入工法の改良範囲

薬液注入工法の設計に当っては、①地山の安定性、②地盤改良体の強度および剛性、③施工段階、④周辺環境（例えば地表面沈下）への影響等を評価する必要がある、本工事における地盤改良範囲は2次元有限要素法弾性解析により決定することとした。設計手順は、まず地盤改良体の要求品質を既存の指針および施工実績より決定し、次に事前に設定した地盤改良体の物性値を用いて解析を行い、

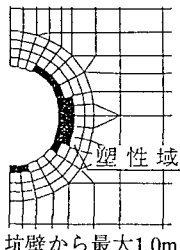
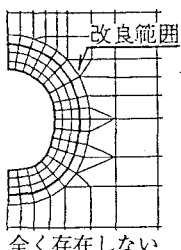
設定した設計条件を全て満足する改良範囲を決定した。今回、地盤改良体の要求品質として粘着力は既存の指針より 9.0 tf/m^2 に、変形係数は改良前の1.5倍（ 3450 tf/m^2 ）とした。

解析に用いる地盤の物性値を表-1に、解析結果を表-2にそれぞれ示す。ただし、表-2は掘削解放率⁴⁾を63%として解析した場合の結果である。表-2より地盤改良範囲は坑壁から1.5 mあれば許容値を満足し、塑性域も発生しないことが明かとなった。この結果を受け、今回の切掘り工事の薬液注入法による地盤改良範囲は解析により得られた値に改良体の不均一性を考え安全のため0.5 mの余裕を加えて切掘り断面坑壁から2.0 mとして施工を行うこととした（図-3参照）。

表-1 地盤物性値・材料諸元

土層名	変形係数 [tf/m^2]	*アソビ比	単体重量 [tf/m^3]	粘着力 [tf/m^2]	摩擦角 [$^\circ$]
埋土	200	0.45	1.6	2.8	0.0
松戸粘土	200	0.45	1.6	2.8	0.0
成田砂	改良前	2300	0.4	1.9	0.0
	改良後	3450	0.4	1.9	9.0
吹付コンクリート	$E=3.0 \times 10^4 [\text{tf/m}^2], A=0.13 [\text{m}^2], I=0.0 [\text{m}^4]$				
鋼製支保工	$E=2.1 \times 10^7 [\text{tf/m}^2], A=21.9 \times 10^4 [\text{m}^2], I=383 \times 10^8 [\text{m}^4]$				

表-2 解析結果（地盤改良範囲の設定）

評価項目		地盤改良無	地盤改良有 ($t=1.5\text{m}$)	許容値	備 考
地表面沈下[mm]		13.5	9.8	20.0	建築学会
地表面傾斜[rad]		1.10×10^{-4}	0.93×10^{-4}	1.0×10^{-3}	
応力	吹付コンクリート[kgf/cm ²]	0.7	0.7	20	6 時間強度
	鋼製支保工[kgf/cm ²]	730	630	1400	S S 4 1
壁面ひずみ	天端部[%]	1.1	0.8	$u/r < 1.0\%$	都市NATMの 設計施工マニュアル 土木学会関西支部
	側壁部[%]	0.5	0.4	u : 壁面変位	
	底版部[%]	0.7	0.6	r : トンネル半径	
塑性域分布				S F 1.0 以下 が全く存在し ない。	安全率 (SF) は モーラー-ロンの破壊 基準による。

4. 計測

4. 1 計測概要

今回のNATM方式による切上げ工事では、トンネルの支保効果と周辺地盤の挙動を把握し、施工の安全に万全を期すことおよび事前設計の妥当性を検証することを目的として図-4に示すような計測を実施した。また、切上げ施工時には掘進に伴ってトンネルの縦断方向の構造が刻々と変化するため、切上げ部のセグメントおよびNATM支保工に発生する応力の把握が困難である。そこで、今回の計測ではNATM支保工の他に切上げ部に隣接するセグメントの応力測定を実施して、隣接セグメントとNATM支保工の荷重分担機構を定量的に把握することとした。

4. 2 計測結果

計測結果の一覧表を表-3に、内空変位の経時変化図を図-5に、切上げ区間に隣接する掘削開始側のセグメントの天端部の断面力の経時変化図を図-6に示す。

表-3、図-5に示すように今回の切上げ工事においてはNATM支保工応力、坑壁の内空変位・天端沈下、周辺地盤の沈下は事前解析結果に比べて全て小さく十分安全な施工が行えた。

また、図-6の切上げ部隣接セグメントの断面力の経時変化図から切上げ部掘削開始側の隣接セグメント天端部の断面力は切羽の進行に伴い増加し、軸力は最大で20tf程度、曲げモーメントは最大で0.1t・m程度となる。

このように、切上げに伴い隣接セグメントに新たに発生する軸力および曲げモーメントは小さく十分安全な施工が行えたと考えられる。また、切上げ時の隣接セグメントに発生する断面力は軸力が卓越すること、切羽の進行に伴い軸力が緩やかに増加すること、切羽が離れても僅かであるが軸力は増加すること等を把握することできた。

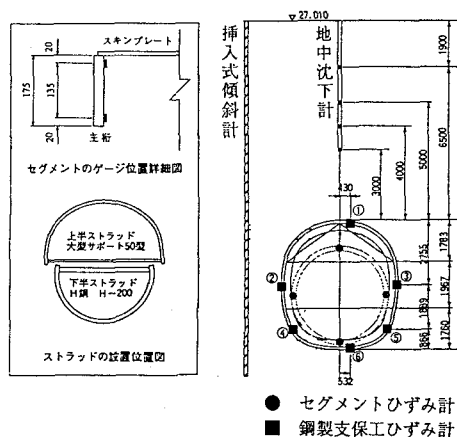


図-4 計測器配置図

表-3 計測結果(切上げ完了時)

計測項目	測定位置	計測結果	解析結果
内空変位		1.2mm	2.5mm
天端沈下		1.0mm	-
地表面沈下	シールド直上	1.0mm	3.0mm
地中沈下	GL-2.0m	1.0mm	3.6mm
	GL-3.5m	1.0mm	4.1mm
	GL-4.5m	1.1mm	4.6mm
	GL-5.5m	0.8mm	5.2mm
地中水平変位	GL-0.0m	1.0mm	0.9mm
	GL-5.0m	0.6mm	1.4mm
	GL-10m	0.5mm	2.1mm
	GL-15m	0.2mm	2.7mm
隣接セグメント軸力	開始側	19.4tf	-
	終了側	15.8tf	-

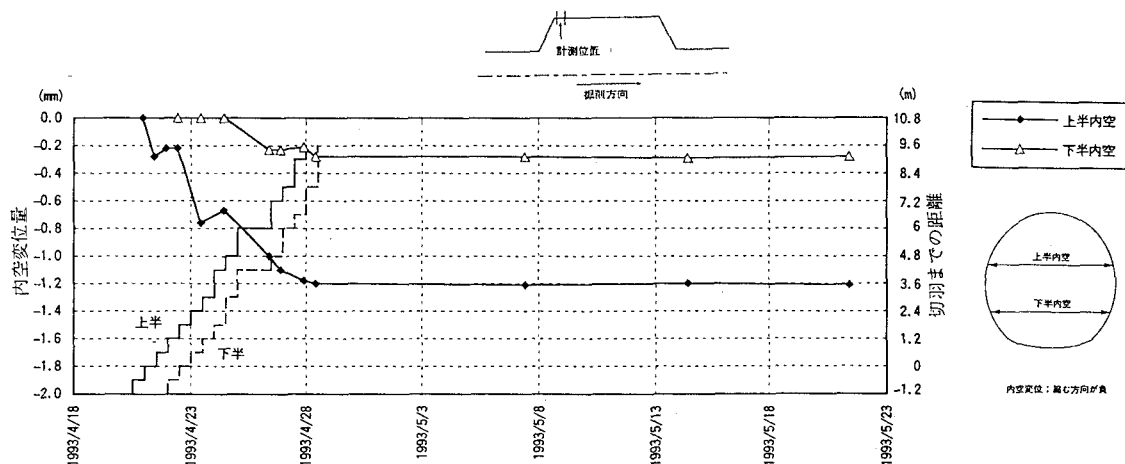


図-5 内空変位の経時変化図

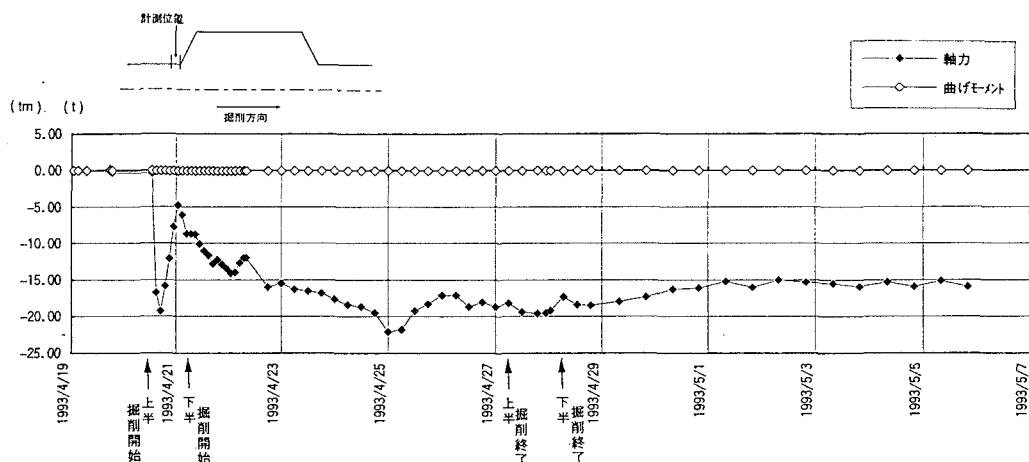


図-6 掘削開始側の隣接セグメント（天端部）の断面力経時変化図

5. 考察

5. 1 軸対称解析

今回の計測結果のうち切揚げ部隣接セグメントに発生する断面力の経時変化より、切揚げ掘削時に解放される応力がNATM支保工および地盤改良体を介して隣接セグメントに伝達されていると推定される。

このことを確認するために軸対称FEMによる解析を行い、切揚げ時のセグメント、NATM支保工および地盤改良体の荷重分担機構について検討を行った。今回、解析手法として軸対称FEMを採用したのは、隣接セグメント天端部に着目した場合、切揚げにより新たに発生する断面力のうち軸力が卓越し、曲げモーメントが小さくなっているためである。

軸対称FEMの解析モデルを図-7に示す。解析は図-7のモデルを用いて逐次掘削解析とし、解析ケースは地盤改良の有無で2ケースとした。

また、解析に用いる地盤物性値は表-1の値を用いるが、地盤改良体の変形係数は原位置コアボーリングにより採取した試料で行った室内試験の結果を用いた。

解析結果のうち地盤改良有の場合の隣接セグメントの掘削開始側の軸力と切羽位置の関係を図-8に示す。

ただし、図-8では、隣接セグメントから切羽までの距離を掘削径（今回は6mに設定）で、各ステップの発生軸力は掘削完了時の軸力でそれぞれ正規化している。

解析結果、計測結果はほぼ一致しており掘削開始側では切羽の進行に伴い軸力の増分値が小さくなる傾向となっている。また、ここには示されていないが掘削終了側では開始側とは逆に切羽が近づくに従い軸力の増分値が大きくなる傾向を示している。

このように、切揚げ施工時における隣接セグメントの軸力の増加は軸対称FEMにより定性的に把握出来ることが判る。

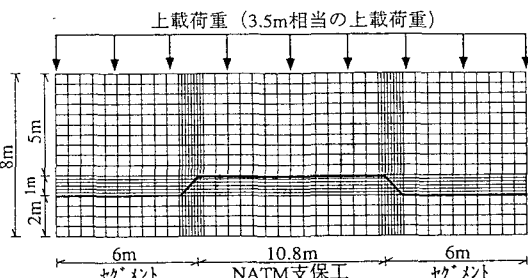


図-7 解析モデル（軸対称FEM）

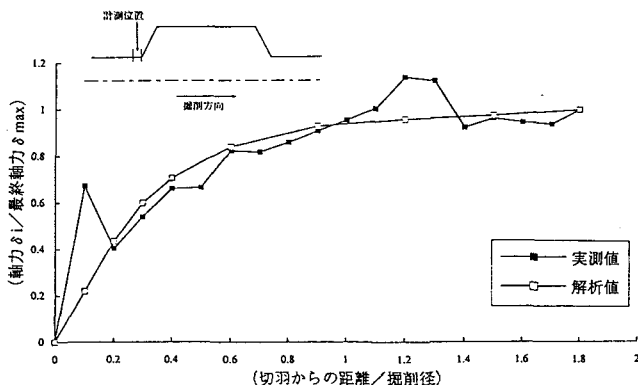


図-8 解析結果（開始側隣接セグメントの軸力）

5. 2 荷重分担機構

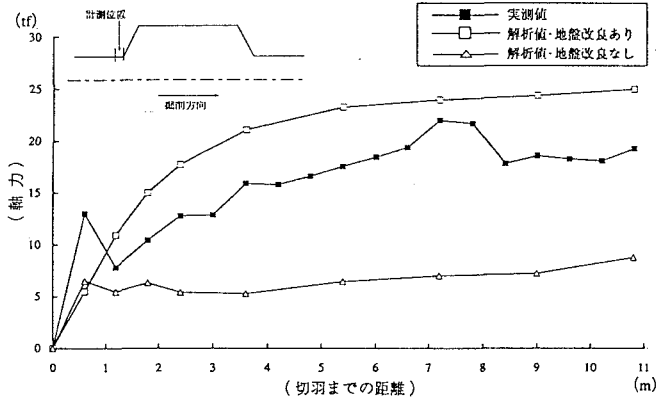
解析結果のうち隣接セグメントの掘削完了時の軸力を表－4に、開始側隣接セグメントに発生する軸力と切羽の位置関係を図－9にそれぞれ示す。

表－4 発生軸力一覧表 [tf]

表－4の解析結果より切上げ時の隣接セグメントに発生する軸力は、地盤改良の有無により大きく異なる。特に掘削開始側では両者の差は大きい。また、図－9より掘削開始側の隣接セグメントに発生する軸力の増加経路が地盤改良の存在により全く異なっている。すなわち、地盤改良を考慮した場合には最初の掘削時に軸力が大きく

部材名		地盤改良		計測結果 (掘削完了時)
		有	無	
セグメント	開始側	25.1	8.8	19.4
	終了側	19.2	16.7	15.8
支保工(開始側)		10.1	24.4	7.5

増加した後、切羽の進行に伴って徐々に増加するのに対し、地盤改良を考慮しない場合には最初の掘削のみにより軸力が大きく増加し、その後の切羽の進行に対してはあまり影響を受けていない。またNATM支保工の開始側に発生している軸力を見ると地盤改良が有る場合には無い場合より発生軸力が小さくなっている。今回の計測結果および表－4、図－9の解析結果より、切上げ工事における荷重分担機構は、地盤改良体が地盤の支



図－9 セグメント軸力(開始側)と切羽位置の関係

保効果を高めるとともに、縦断方向の荷重伝達機能を発揮してNATM支保工の強度発現までは前後の隣接セグメントおよびNATM支保工に荷重を再配分することが明かになった。従って、NATM方式による切上げ工事において薬液注入工法を採用する場合には横断方向の荷重分担のみではなく、縦断方向の荷重分担機能も考慮して地盤改良体を積極的に地山支保部材として評価できることが判った。

6. まとめ

今回、土被りの少ない未固結砂質地山においてNATM方式による地中切上げ工事において薬液注入工法を採用して無事工事をすることが出来た。また、詳細な現場計測を行うことにより、改良範囲の設計として数値解析(2次元有限要素法)が有効であること、切上げ時の応力再配分過程において地盤改良体の縦断方向の荷重伝達機構が重要な役割を果たしていることが明かとなった。

今後、未固結な砂質地山における地中切上げ工事においても、今回のような設計手法および施工法・計測管理を採用することにより安全かつ経済的なNATM方式が適用出来ることが判った。

(参考文献)

1) 林・西脇・真砂：シールド工法による都市トンネルの内部切上げ工事，土木学会誌，1986.3
2) 畑・松平・真下：事前数値解析による電力洞道連係部地下空洞の挙動予測手法について，
第2回トンネル工学研究発表会論文報告集，土木学会，1992.10
3) 浦沢・松尾・桑原：砂地盤における薬液注入材の浸透・固結状況等に関する設計管理手法について，
薬液注入における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，1993.3
4) 里・亀村：切羽の進行を考慮したトンネルの二次元平面ひずみ弾塑性解析，
第15回岩盤力学に関するシンポジウム論文報告集，土木学会，1983.2