

小断面NATMトンネルの連結による非開削大断面構築工法の開発

—多段NATM連結外殻先行覆工工法—

Development of a Non-open-Cut Method for Constructing of Large Underground Spaces by Connecting a Number of Small NATM Tunnels

渡部 昭一¹・森田 泰司¹・岩野 政浩²・大里 祥生²

Shoichi WATABE・Yasushi MORITA・Masahiro IWANO・Yoshio OSATO

The diverging and merging parts of road tunnels are usually constructed using conventional open-cut methods. However, non-open-cut methods are becoming increasingly necessary due to tight usage restrictions on the ground surface. This paper describes the development of a non-open-cut method for constructing large underground spaces by connecting a number of small NATM tunnels and constructing outer shell linings around the diverging and merging parts. This construction method offers the following benefits.

- (1) Existing techniques and standard machines can be used.
- (2) Diverging and merging parts in road tunnels are economical to construct.

Keywords: deep underground, non-open-cut, diverging/merging, urban tunnel, NATM, surface settlement

1. はじめに

従来, 市街地における道路トンネルの分岐合流部の構築は, 地上からの開削工法で計画されてきた。しかし, 開削工法は交通渋滞の原因となり, 地上部における工事用地の確保も困難になってきていることから, 非開削工法を用いた道路トンネル分岐合流部構築技術の開発が強く要望されている。そこで, 多数の小断面 NATM トンネルを掘削し, 分岐合流部全体を覆う外殻覆工体を施工した後, 外殻覆工体内部を掘削して分岐合流部を構築する多段 NATM 連結外殻先行覆工工法(以下, 多段 NATM 工法と呼ぶ)を開発した。本工法の特徴は, 既存の技術を用いて汎用機械により施工が可能であり, 経済的な非開削による分岐合流部の構築が可能なことである。

本稿では, ①本工法の概要と, ②分岐合流部への適用性を判断する大きな指標の1つとなる地表面への影響について試算した結果について報告する。

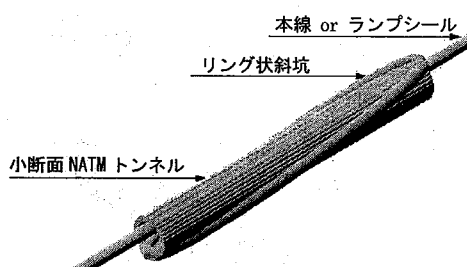


図-1 多段 NATM 工法概念図

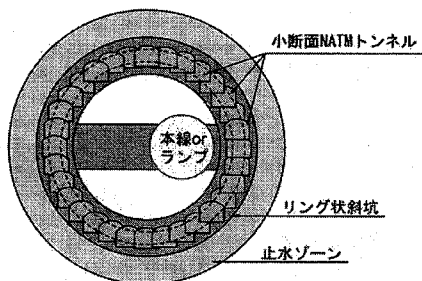


図-2 多段 NATM 工法概念図 (断面図)

キーワード: 大深度, 非開削, 分岐合流技術, 都市部トンネル, NATM, 地表面沈下

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術開発部

²正会員 大成建設株式会社 土木本部土木設計部

2. 工法の概要

今回開発した多段 NATM 工法は、道路トンネルの分岐合流部を、リング状の斜坑から多数の小断面 NATM トンネルを掘削し、分岐合流部全体を覆う外殻覆工体を施工した後、外殻覆工体内部を掘削して構築する（図-1, 2）。リング状斜坑は本線またはランプシールドから NATM 工法で掘削する。都市部での未固結地山では必要に応じ、シールド内より事前に薬液注入を行い、周囲に止水ゾーンを形成する。

本工法の特徴としては、既存の技術を用いて汎用機械により施工が可能であり、経済的な非開削による分岐合流部の構築が可能なこと、構造物の形状や地質の状況に応じて、任意に切羽数の増減や掘削断面の形状を変更することが可能なことなどが挙げられる。

3. 施工手順及び施工方法

(1) 施工手順

多段 NATM 工法の施工手順は以下の図-3 に示す通りである。

小断面 NATM トンネルは、沈下抑制のため、掘削後逐次、外殻覆工体に相当する部分のコンクリートの打設と残りの部分のエアモルタル等による埋め戻しを行う。

(2) 施工方法

本工法を用いて、大深度地下（土被り 40m 以深）に本線トンネル 3 車線、ランプトンネル 2 車線の分岐合流部（延長約 370m と設定）を構築する場合の形状寸法を図-4 のように設定した。外殻覆工形状は円形とし、小断面 NATM トンネルの形状寸法（内空幅 4.5m×高さ 4.25m）は外殻覆工体の必要厚さ（2m）と施工性から、リング状斜坑の形状寸法（内空幅 10.5m×高さ 7.25m）は施工性より設定した。

a) 止水ゾーンの形成

薬液注入等による止水ゾーンの形成は、先行して施工する本線またはランプトンネルから、あらかじめセ

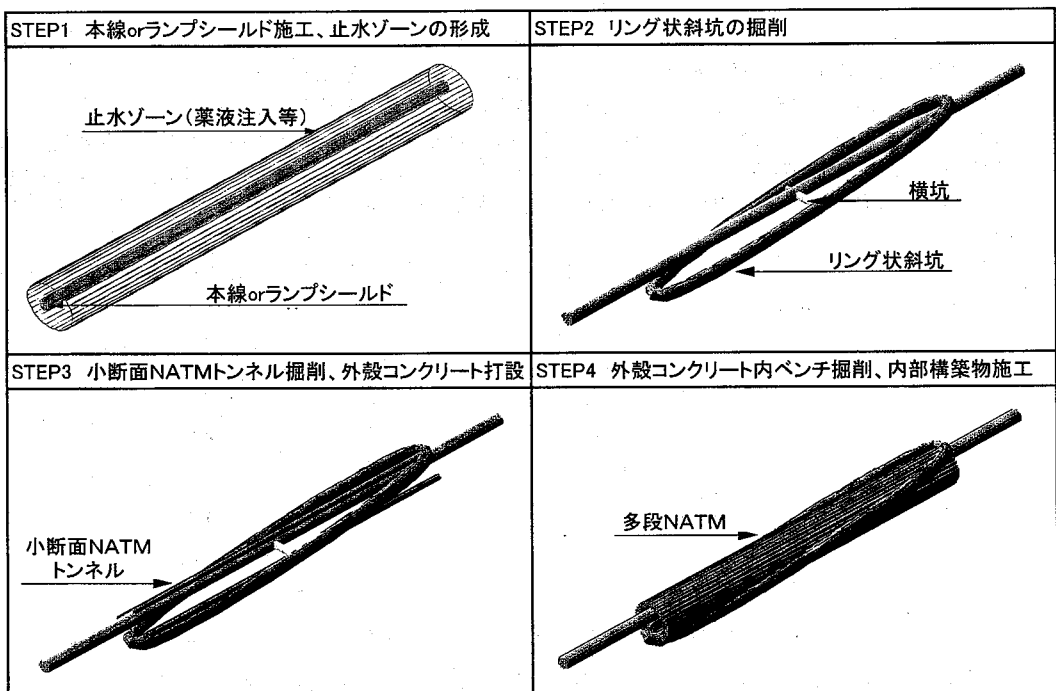


図-3 施工手順図

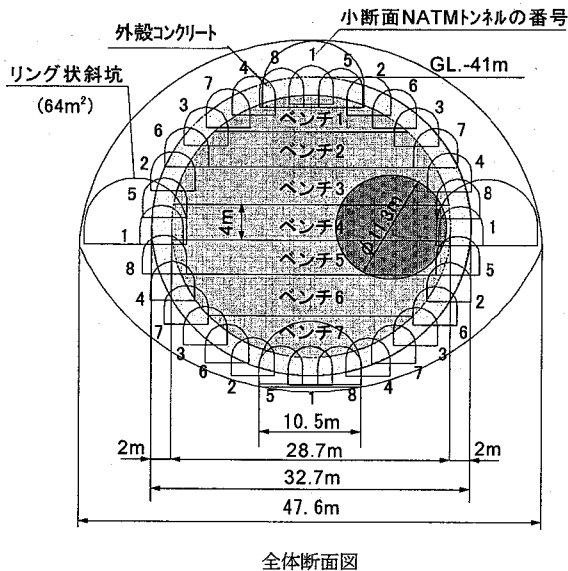


図-4 多段 NATM 形状寸法

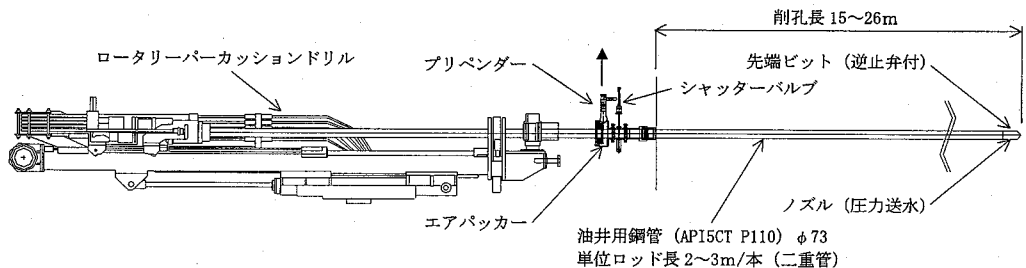


図-5 薬液注入用機械概要図

グメントに設置した注入孔を用いて行う。薬液注入を行う場合の削孔機構の概要図を-5に示す。高水圧下での施工となるため、口元にプリベンダーを設置する。止水ゾーンの幅を外殻覆工体より外側5mの範囲とすると、削孔長は15~26m程度と長尺となるため、孔曲がり対策として油井用鋼管 (API15CT P110, $\phi 73$) を用いる。また、削孔途中で、ジャイロによる孔曲がり測定を行い、必要に応じ再削孔等の対策を実施する。

b) リング状斜坑の掘削

リング状斜坑は、先行して施工する本線またはランプトンネルから NATM にて横坑を施工し、上下半同時併進 (ショートベンチ) で掘削する。今回設定したケースの場合、斜坑延長は450m、勾配は6.5%である。

c) 小断面 NATM トンネルの施工

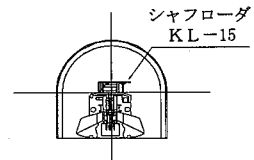
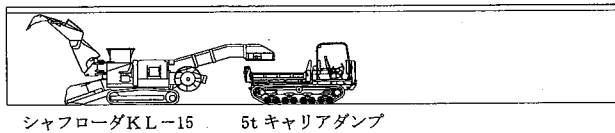
小断面 NATM トンネルは、互いの掘削の影響が小さくなるように十分離れた4箇所程度の位置で並行して掘削を行う。掘削後は逐次、外殻覆工体に相当する部分は鉄筋を配置してコンクリートを打設し、隣接トンネル掘削時に再掘削する部分はエアモルタル等で埋め戻すものとする。鉄筋は、隣接トンネル施工時に機械継手等で接続する。

小断面 NATM トンネルの施工次第図を図-6に示す。なお、リング状斜坑と小断面 NATM トンネルの接続部には、工事用機械の通行のため図-7に示すような斜路架台を設置する。

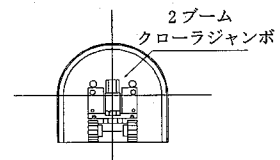
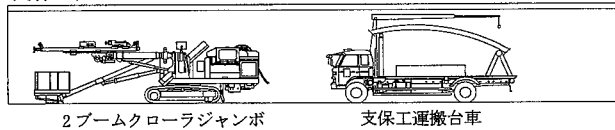
d) 外殻コンクリート内ベンチ掘削，内部構造物構築

外殻コンクリート内は，1 ベンチ 4m 程度のベンチ掘削を行う。端部は，施工時の水圧・土圧に抵抗できる薬液注入ゾーンを確保するとともに，端部切羽のはらみ出しを抑制するため，小断面 NATM トンネルを外殻覆工トンネル断面の直径程度外側まで施工し，内部掘削後，完成時の土水圧に抵抗可能な端部コンクリートを施工する。（図-16 参照）また，切羽は，アンカーを打設するなどして安定を図り，端部コンクリートは，必要に応じて逆巻き施工を行う。棲部の施工後，内部構築物を施工し完成となる。

掘削（全断面掘削）



支保工建込



吹付けコンクリート

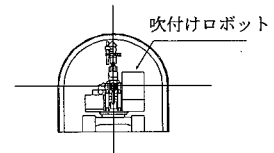
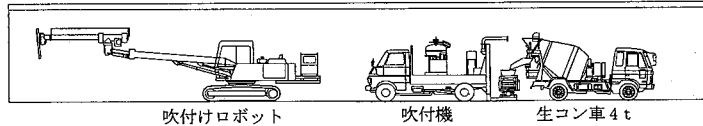


図-6 小断面 NATM トンネル施工次第図

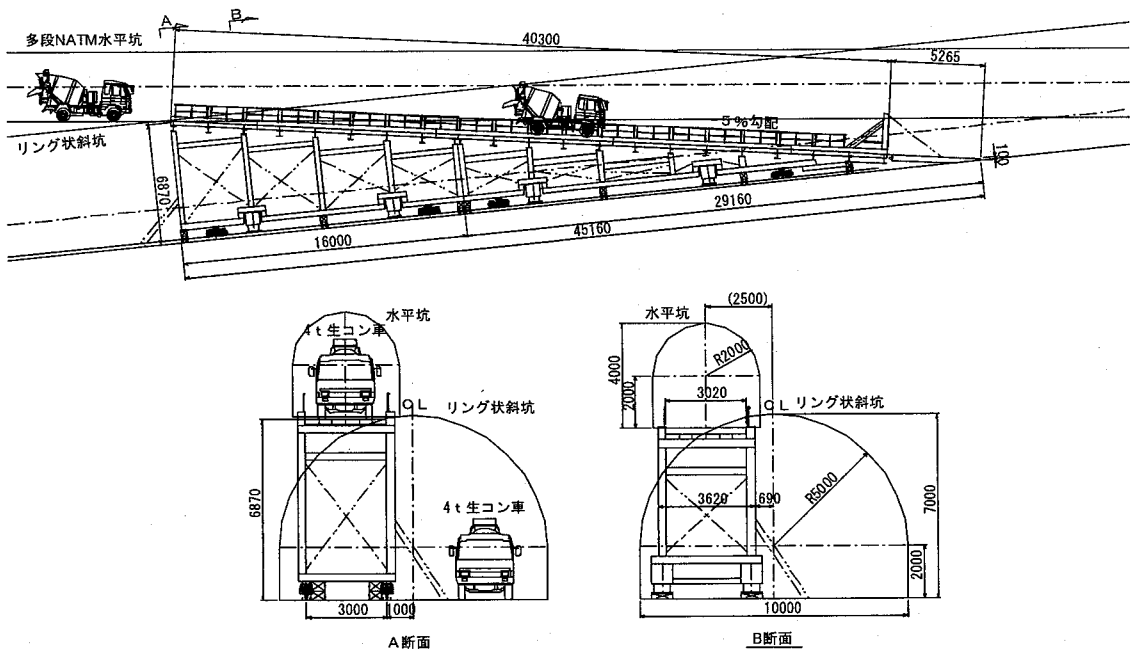


図-7 斜路架台

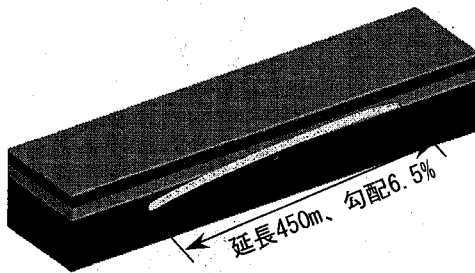
4. 地表面への影響検討

ここでは、本工法により分岐合流部を構築する場合の地表面への影響について、図-4 のように設定した断面形状を対象として試算を行った。地表面沈下量の算定に当たってはリング状斜坑と小断面トンネルの三次元的な交差による影響を評価するため、三次元有限差分法(解析コード名: FLAC3D)を用いた。

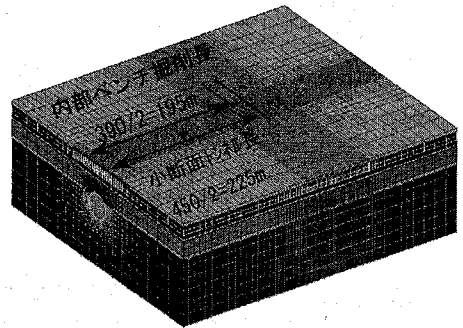
(1) 解析条件及び解析手法

多段 NATM 工法は、リング状斜坑掘削後、小断面トンネル掘削を実施するため、小断面トンネル掘削時には、リング状斜坑掘削によって地盤が乱れていることが想定される。よって、一連の掘削逐次解析が可能な三次元メッシュを作成することが望ましいが、ここでは、リング状斜坑と小断面トンネルの三次元メッシュを個別に作成し、それぞれから算定された結果を足し合わせて地表面沈下量及び地表面傾斜角を算定する。リング状斜坑と小断面トンネルの三次元モデルを図-8 に示す。モデル化にあたっては、構造の対称性から、リング状斜坑は長軸方向を、小断面トンネルは長軸中央部を対称にそれぞれ 1/2 モデルとした。解析手順を表-1 に示す。地盤は首都圏に広く分布する地盤を対象として関東ローム層及び砂質土と粘性土の互層と設定した(表-2)。なお、多段 NATM 工法が大深度地下に計画されることを想定し、リング状斜坑の天端を GL-41m に設定した。

また、地盤の応力-ひずみ関係は完全弾塑性とし、Mohr-Coulomb の破壊基準を用い、シールドセグメント、外殻コンクリート、エアモルタルは弾性体としてモデル化した。



リング状斜坑の半断面解析モデル



小断面トンネルの半断面解析モデル

図-8 解析モデル

表-1 解析ステップ

○リング状斜坑掘削	
Step1	初期応力解析
Step2	リング状斜坑一括掘削 (素掘り: 64m ²)
○小断面NATMトンネル掘削	
Step1	初期応力解析
Step2	ランブシールド掘削 セグメント設置
Step3	小断面NATM1 (4箇所) 掘削 (17m ²)
Step4	小断面NATM1 (4箇所) 外殻コンクリートとエアモルタルの打設
Step5~18	小断面NATM2~8 掘削・コンクリート打設の繰返し
Step19	内部ベンチ1 掘削
Step20~25	内部ベンチ2~7 掘削
Step26	端部コンクリート打設

表-2 地盤の物性値

層 序	深 度 (m)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (度)	変形係数 $E0$ (kN/m ²)	ポアソン 比 ν
ローム	4.10	14	63	15	13,000	0.45
礫質土	9.75	18	—	42	50,000	0.30
砂質土	15.40	19	100	41	215,000	0.30
粘性土	21.00	17	680	10	115,000	0.45
砂質土	22.30	19	100	41	215,000	0.30
粘性土	24.65	17	680	10	115,000	0.45
礫質土	43.00	19	25	42	278,000	0.30
粘性土	47.00	19	290	10	95,000	0.45
砂質土	—	19	100	42	430,000	0.30

▽天端
GL-41m

表-3 構造部材の物性値

	弾性係数 KN/m ²	ポアソン比	単位体積重量 KN/m ³	備考
シールドセグメント	3.9×10^7	0.2	24.5	厚さ: $t=0.5m$
覆工コンクリート	3.0×10^7	0.2	24.5	
エアモルタル	1.5×10^9	0.3	11.5	

(2) 地表面沈下量の解析結果

リング状斜坑及び小断面トンネルを縦断方向に一括掘削（無支保）とし、ベンチ掘削の切羽を無支保とした安全側の解析結果を図-9、図-10に示す。図-9は、代表ステップにおける外殻覆工センターでの縦断方向地表面沈下量と傾斜角であり、リング状斜坑の土被りの小さい側の内部掘削切羽位置で最大地表面沈下量が42.5mm、最大傾斜角が0.93/1000radとなった。図-10に、図-9で最大沈下量を示した位置での横断方向の地表面沈下量と傾斜角を示す。最大傾斜角は1.07/1000radであった。

次に、小断面トンネルの一次支保工の効果を考慮した検討を行った。この検討では、小断面トンネル掘削時の地表面沈下量が最も大きい小断面 NATM3 を代表として、無支保で一括掘削した場合の沈下量と一次支保（吹付けコンクリート、 $t=12\text{cm}$ ）を考慮して別途実施した逐次掘削解析（支保と切羽の離れ2mと設定）における沈下量の各位置での比を算出し、この比率が各小断面トンネル掘削時とも同様であると仮定した。その結果、最大沈下量26mm（図-11）、最大傾斜角0.73/1000rad（図-12）となった。最大沈下量が図-9に示した素掘りの場合の6割程度となっていることから、一次支保工の効果が大きいことがわかる。

以上のように、地表面への影響は「建築基礎構造設計指針：日本建築学会：2001.10」における許容最大傾斜角1/1000rad以内に収まる結果が得られた。

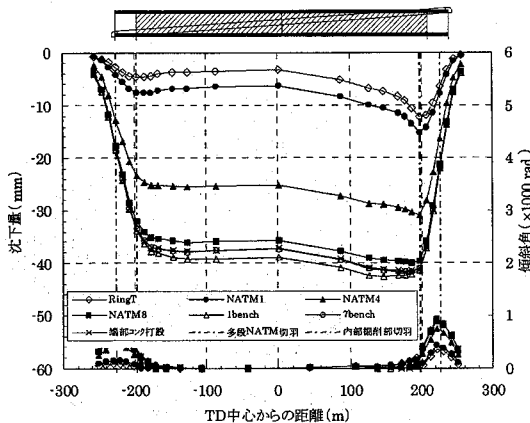


図-9 縦断方向の地表面沈下

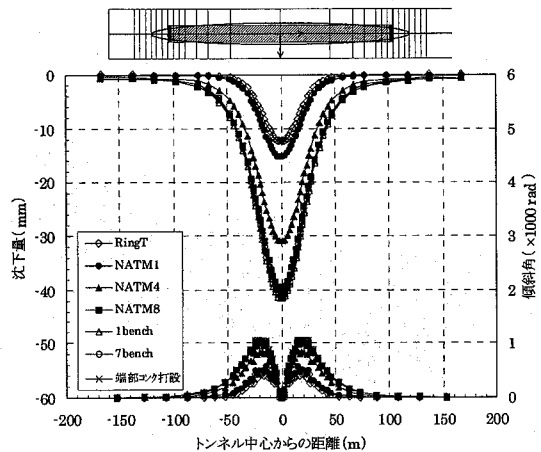


図-10 横断方向の地表面沈下

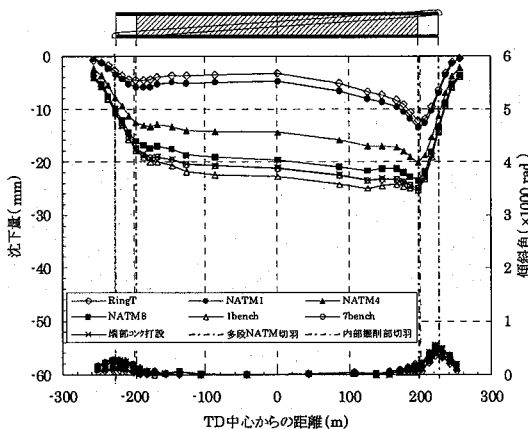


図-11 縦断方向の地表面沈下
(小断面トンネル掘削時の一次支保考慮)

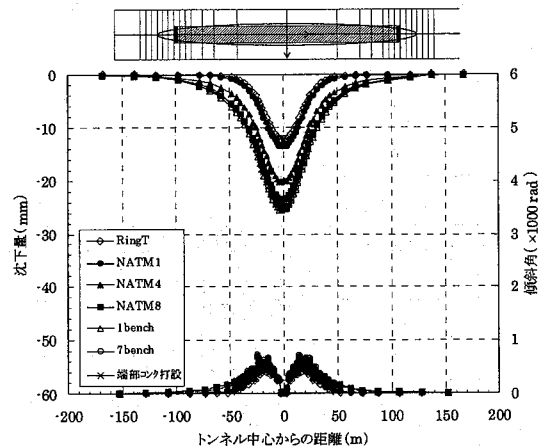


図-12 横断方向の地表面沈下
(小断面トンネル掘削時の一次支保考慮)

(3) 内部掘削時の天端沈下と切羽押出し量

本検討では、外殻覆工体内部掘削時の切羽の安定を考慮し、覆工体端部の位置は切羽より約30m外側とし、切羽面は鉛直としている。

図-13 は、内部掘削時に発生した天端沈下の経時変化図（小断面トンネル施工完了時からの増分変位）であり、最大値は4ベンチ掘削後で約8mmとなった。

内部掘削時の切羽の状況として、押し出し量を図-14 に、塑性領域分布図を図-15 に示す。切羽の変形は、S.L. 下部において切羽手前側へ約30mmの変位が発生している。また、切羽から4m～6mの範囲及び切羽頂部前面の約30m程度の範囲で塑性領域が発生している。切羽の安定については、ベンチ掘削時に切羽への長尺ロックボルトの打設等の適切な切羽安定対策を行うことにより確保できると思われる。

5. 棲部の検討

本工法により分岐合流部を構築する場合、棲部の構造及び施工方法も課題の一つとなると考えられるため、棲部の検討を行った。

施工方法については「3. (2)」に示した通りであり、ここでは棲部の構造検討結果について記述する。

棲部は本線及びランプシールド断面部分を開口部としたスラブ構造として、完成時の土水圧に抵抗できるよう検討を行った。（図-16 参照）

(1) 検討条件・検討方法

棲部の形状寸法は図-17 に示す通りとした。鉛直荷重としては、「大深度地下使用技術指針（案）同解説」（H12.6）に準拠して算出した建物荷重+鉛直土圧及び全土被り荷重の大きい方の全土被り荷重を考慮した。また、水平荷重としては、 $0.45 \times \text{鉛直荷重} + \text{水圧}$ を考慮した。図-19 に FEM 解析に用いたモデル図を示す。モデル周囲には、図-20 に示すように地盤バネ（テンションカット）及び外殻覆工体のバネを考慮した。なお、コンクリートの設計基準強度は別途検討した外殻覆工体（厚さ2m）の必要強度と同様の 36N/mm^2 とした。

(2) 検討結果

図-21 に棲部スラブの断面照査結果を示す。本線・ランプシールド間の幅が狭くなっている部分のコンクリートの圧縮応力が厳しく、スラブ厚は9m必要となった。ただし、スラブ厚は、この部分の構造体の幅を大きくするなどの対策を講じれば、低減することは可能である。

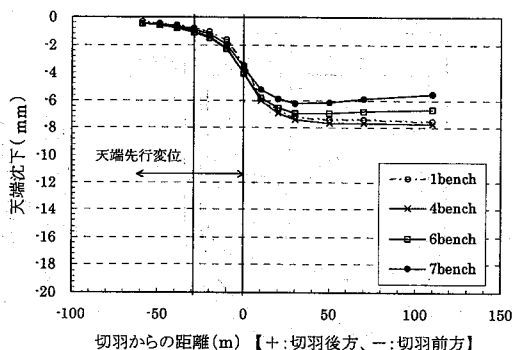


図-13 内部掘削時の天端沈下

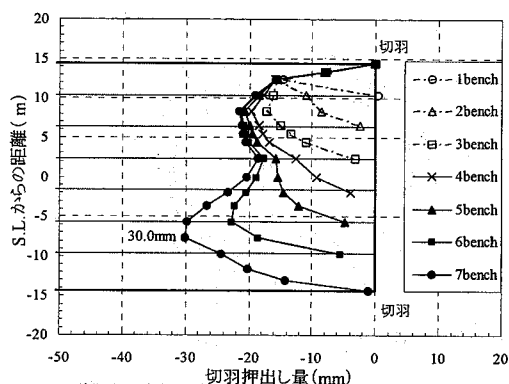


図-14 内部空洞切羽の押し出し量

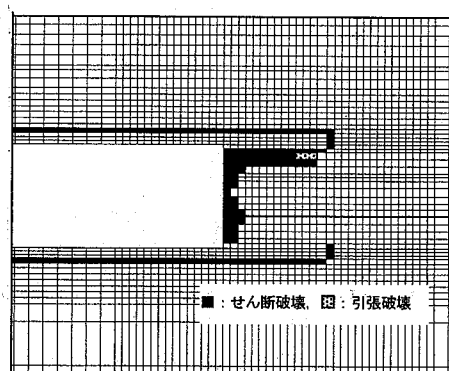


図-15 塑性領域分布図（断面：トンネル中心）

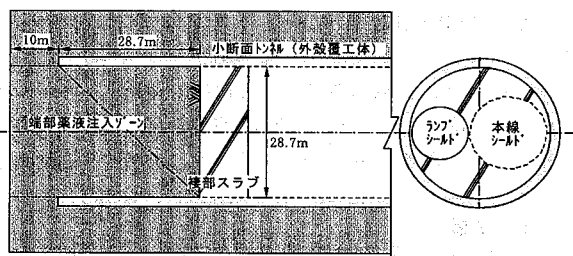


図-16 棲部構造図

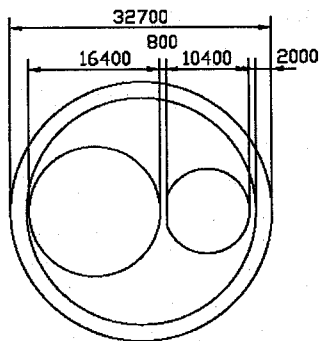


図-17 棲部断面図

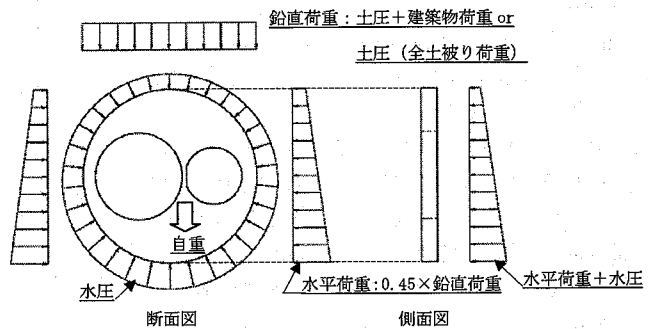


図-18 棲部の構造検討に考慮する荷重

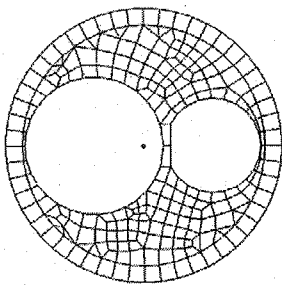


図-19 棲部の解析モデル図

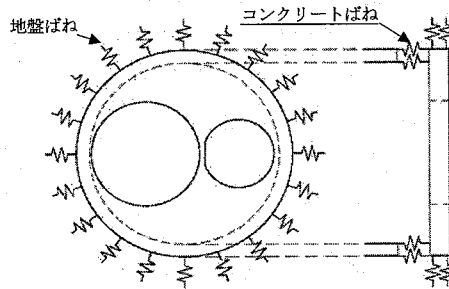
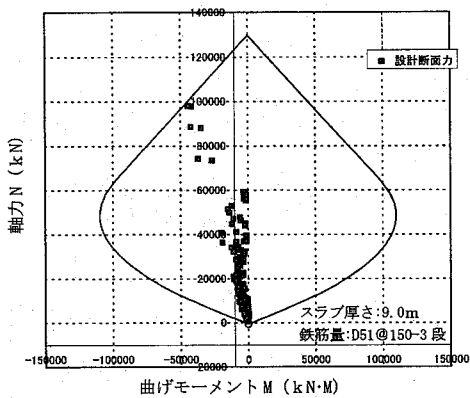
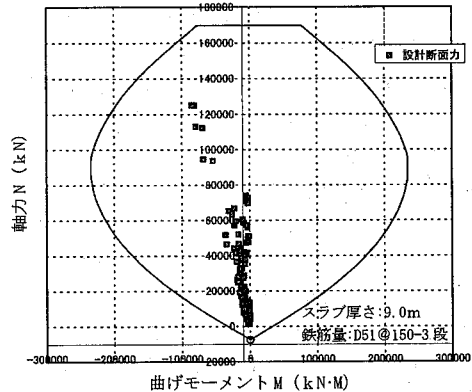


図-20 棲部の解析に考慮するバネ



使用性照査結果 (鉛直方向)



安全性照査結果 (鉛直方向)

図-21 棲部の曲げと軸力に対する断面照査結果

6. おわりに

多段 NATM 連結外殻先行覆工工法は、道路トンネルの非開削での分岐合流部の構築に適用可能なことが確認できた。施工の重要なポイントとなると考えられる薬液注入の施工方法等についても基本的な開発は終了しており、今後は実施工への適用に向け、小断面トンネルの構造や掘削順序について、詳細な検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 西川他：推進工法を用いた外殻先行トンネルの分岐合流技術に伴う地表面沈下の推定，土木学会第60回年次学術講演会，2005。
- 2) 大里他：小断面 NATM トンネルの連結による非開削大断面構築工法の開発，土木学会第61回年次学術講演会，2006。