## オーバーラップ施工に用いる シールドトンネル覆工構造の開発

齋藤 祐磨1・粥川 幸司2・守田 貴裕3・名倉 浩4

<sup>1</sup>正会員 株式会社 安藤・間 建設本部 (〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目 1-20) E-mail: saito.yuma@ad-hzm.co.jp

<sup>2</sup>正会員 株式会社 安藤・間 建設本部(〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目 1-20) E-mail: kayukawa.koji@ad-hzm.co.jp

<sup>3</sup>株式会社 安藤・間 建設本部(〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目 1-20) E-mail: morita.takahiro@ad-hzm.co.jp

<sup>4</sup>正会員 株式会社 安藤・間 建設本部(〒107-8658 東京都港区赤坂六丁目 1-20) E-mail: nagura.hiroshi@ad-hzm.co.jp

都市部において、併設トンネルを計画する際、トンネル間の離隔を小さくしたとしても、建設用地に収まらないなど、空間的な制約条件が厳しい場合がある。そこで、上記のような制約条件を満足するために、すでに開発されているシールドで切削可能なセグメントを利用することで、後行するシールドが先行トンネルの断面の一部をオーバーラップして施工する工法を考案した。このようなトンネルを実現するためには、永久構造物となる覆工構造、ならびにその設計法等の技術開発が必要となる。そこで、本工法に用いる覆工構造を考案するとともに、模擬トンネルを作製し、推進機によるセグメント切削実験を実施した。また、設計において、この覆工構造の構造モデルに、はり・ばねモデルの適用した。本報では、その実験および構造計算の結果から、本覆工構造の実現性について述べる。

Key Words: shield tunnelling method, overlap, segments, cutting, beam-spring model

#### 1. はじめに

都市部において、併設トンネルを計画する際、トンネル間の離隔を小さくしたとしても、建設用地に収まらないなど、空間的な制約条件が厳しい場合がある。このような場合に、すでに開発されているシールドで切削可能なセグメントを利用することで、後行するシールドが先行トンネルの断面の一部をオーバーラップして施工することにより、必要な内空を維持しつつ占有断面を小さく

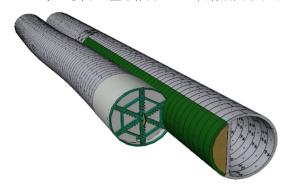


図-1 シールドのオーバーラップ施工

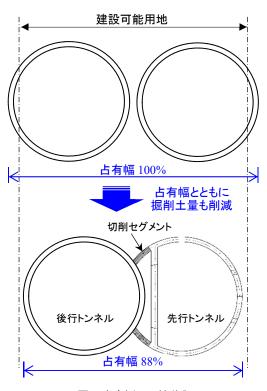
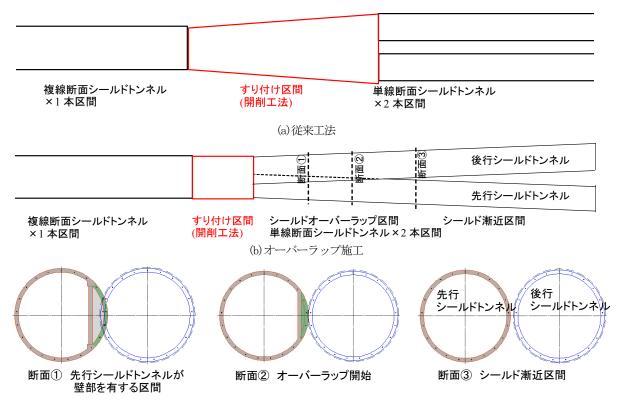


図-2 占有幅の比較(例)



(c) シールドトンネルの漸近区間~オーバーラップ区間の断面状況 図-3 オーバーラップ施工によるすり付け区間の縮小例

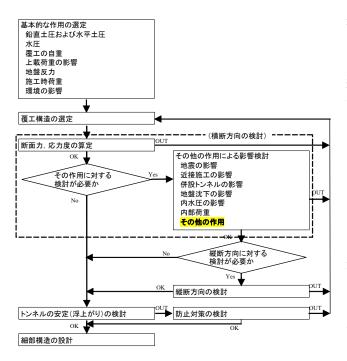


図4 覆工の設計の流れ(2)の一部記載省略)

することを考えた. 図-1, 2 に、考案したシールドのオーバーラップ施工についての模式図、および従来工法と本工法についての比較例を示す.

上記のような制約条件を満足する類似の工法として、

複数のカッターフェイスを持つシールドにより複円形断面を構築する工法がある.しかし、本工法は、一般的な単円形のシールドにて施工可能であり、また、占有幅の縮小が必要な区間のみをオーバーラップさせることが可能であることから、併設した2本のトンネルの線形の自由度が高まる点で優れている.

また,図-3に示すように,2本の単線断面シールドトンネルの区間(併設区間)から1本の複線断面シールドトンネルの区間にすり付ける場合,一般的に開削工法で築造するすり付け区間を縮小できるという点も挙げられる

本工法では、先行シールドトンネルの覆工構造が非円形となり、円形断面に比べて、発生断面力が大きくなることが想定されるり。また、後行シールドに切削されることによって、先行シールドトンネルへの影響が考えられる。これらの観点から、本覆工構造の実現には、施工時の挙動を把握すること、および本覆工構造の設計方法の確立が必要である。図4に、一般的な許容応力度設計法による覆工の設計の流れっを示す。切削による影響は、図中における「その他の作用」に該当し、これを考慮することで、本覆工構造についても、従来の設計方法で設計可能であると考えた。

そこで、本覆工構造を模擬したセグメント切削実験を

行い、およびはり-ばねモデルを用いて構造計算を行った。本報では、その実験結果、および計算結果との比較結果より、本覆工構造における切削による挙動の明確化を行い、本工法の実現性について述べる。

#### 2. オーバーラップ施工と覆工構造

図-5 に、本工法の先行トンネルに用いる覆工構造として考案したタイプーA およびタイプーB を示す. タイプーA は、後行シールドが先行トンネルに漸近する、また

は、オーバーラップ量の少ない区間で使用し、切削部分を一体化したセグメントを有する。タイプーBは、オーバーラップ量の多い区間で使用し、後行シールドがオーバーラップする部分に「切削セグメント」、後に組み立てる「本体壁」および「特殊構造セグメント」を有する。

「切削セグメント」と「特殊構造セグメント」は、自身のシールド掘進時にエレクターで組立てることとし、シールド掘進後に「本体壁」をボルト締結等で組立てる.これらの先行トンネルの施工後に、タイプーBでは「本体壁」と「切削セグメント」の空間を流動化処理土

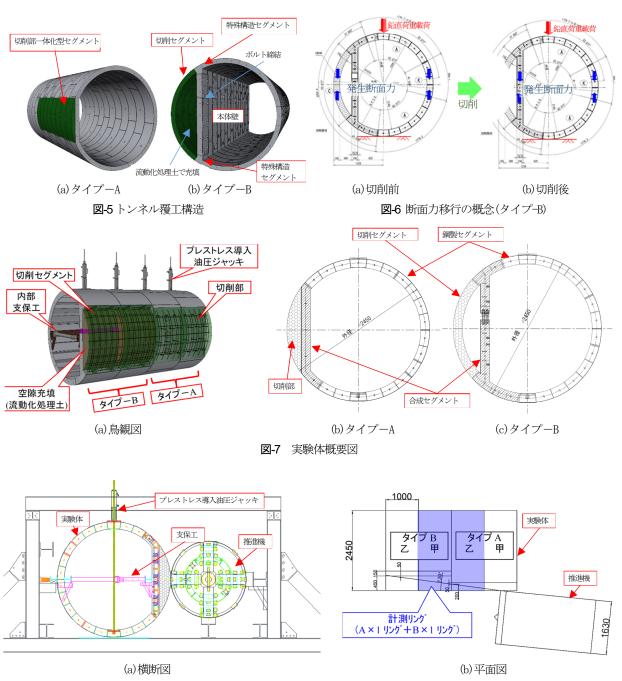


図-8 実験体および推進機の配置

等で充填する. そして、後行シールドを通常掘進し、支 保工で補強した先行トンネルを切削することで、独立し た各々のトンネルを構築する. 最終的に, 「タイプーA では円弧の一部が弦となり、タイプーB では弦の部分が 壁構造となる. このように、本覆工構造はの形状が、切 削に伴って円形から非円形へと移行し、タイプーAの隅 角部やタイプーBの「特殊構造セグメント」における発 生断面力の増加が想定される(図-6).

#### 3. セグメント切削実験

#### (1) 実験概要

先行トンネルの覆工構造を模擬した φ2.4m の実験体を 作製し、シールドによるセグメントの切削実験を行った. 図-7 に、実験体の概要図、写真-1 に、実験体および推進機 を示す. 実験体は、セグメント幅 1m とし、タイプーA およびBともに2リングずつ計4リングで構築した. タ

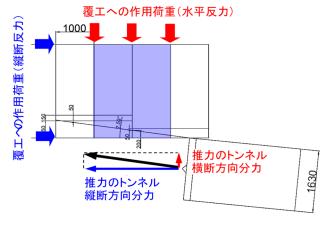


図-9 切削中の荷重関係



(a) 実験体



(b)推進機

写真-1 実験体および推進機



(C)カッタービット



(a)切削前

500

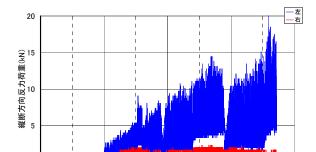
-500



(b)切削中



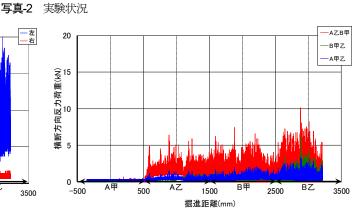
(C)切削後



(a)縦断方向反力

1500

2500



(b) 横断方向反力

図-10 覆工への作用荷重

3500

イプーA の切削部およびタイプーB の切削セグメントは、 実強度約 60N/mm²の軽量コンクリート、タイプーB の合成セグメントのコンクリートは、実強度約 70N/mm²であった。弦部を構成する「切削部一体型セグメント」およ

び「特殊構造セグメント」は、発生断面力が大きくなる ことを想定して、合成セグメントで構築した. その他の 円弧部は、鋼製セグメントで構築した.

シールドには φ1.63m 泥土圧推進機を用い、縦断方向

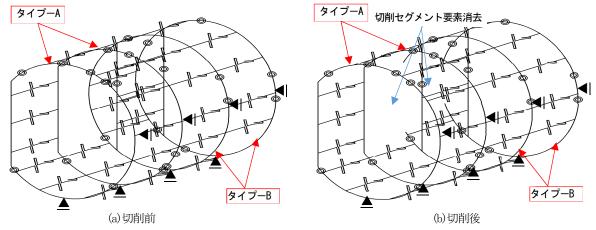


図-11 4リングはり-ばねモデル

表-1 構造計算における各ステップの条件

	状態	構造要素	荷重	
STEP1	初期載荷	タイプーB:壁部未締結	各リング:鉛直方向に集中荷重80kN	
STEP2	壁部締結・支保工組立	タイプーB:壁部締結箇所の要素追加 各リング:支保工の要素追加(軸力のみ伝達)		
STEP3	流動化処理土充填		タイプーB:流動化処理土の自重を載荷	
STEP4	タイプーA(甲組)切削時	タイプーA(甲組):切削部一体型セグメントの剛性変更	タイプーA(甲組): 弦部に水平方向分布荷重(合計100kN) タイプーA(甲組): 切削部自重を除荷	
STEP5	タイプーA(乙組)切削時	タイプーA(乙組):切削部一体型セグメントの剛性変更	タイプーA(乙組): 弦部に水平方向分布荷重(合計100kN) タイプーA(乙組): 切削部自重を除荷	
STEP6	タイプーB(甲組)切削時	タイプーB(甲組): 切削セグメントの要素消去	タイプーB(甲組): 壁部に水平方向分布荷重(合計100kN) タイプーB(甲組): 流動化処理土の自重を除荷	
STEP7	タイプーB(乙組)切削時	タイプーB(乙組): 切削セグメントの要素消去	タイプーB(乙組): 壁部に水平方向分布荷重(合計100kN) タイプーB(乙組): 流動化処理土の自重を除荷	

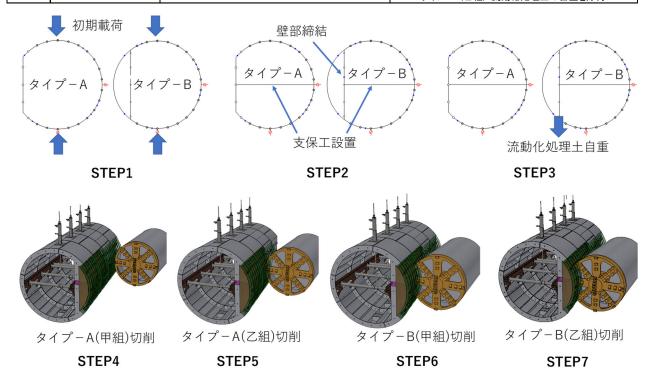


図-12 構造計算における各ステップ状況

で7.59°の角度で切削するとした. 図-8に,実験体および推進機の配置図を示す. 実験中は,推進機の推力,掘進速度,カッタートルク (カッター回転数約 2pm)を,実験体においては各部に発生するひずみとともに,実験体の縦断方向(左右2個所),横断方向(リング継手位置3個所)の反力を測定した. 図-9に,切削中における覆工への作用荷重の関係を示す.

#### (2) 実験手順

#### (3) 実験結果

実験状況を**写真-2** に示す. 切削掘進中, コンクリートの大割れ等はなく, また, 特に大きな振動, 騒音の発生もなかった. 掘進中の推力について, 自重による摩擦抵抗を除いて, 切削面積の小さいタイプーA では掘進速

度  $10\sim15$ mm/min で 10kN 前後、タイプ-B では掘進速度 20mm/min 前後で 40kN 前後であった。また、カッタートルクは最大で約 8kN・m であった。

図-10 に,覆工への作用荷重(縦断反力,横断反力)の測定結果を示す.縦断方向では,数 kN から最大で15kN 程度で,切削側であるトンネル左側でほぼ負担した形であった.一方,横断方向では,タイプーA, B間のリング継手位置で最大であったが,3個所合計で5~10kN 程度であり,推力の横断方向分力に近い結果であった.また,これらの反力は覆工構造の耐力と比べて小さいものであった.

#### 4. 実験体の構造計算モデル概要

セグメント切削実験の実験体に、はり-ばねモデルを 適用し構造解析を試みた. 構造解析は、初期載荷時から 各リング切削の一連の流れを逐次解析にて行った. 図-11 に、 適用した切削前および切削後の4リングはり-ばねモデルを示 す. タイプーA の切削部については、要素として考慮しない が、剛性に関しては弦部と一体として考慮した. タイプーB の

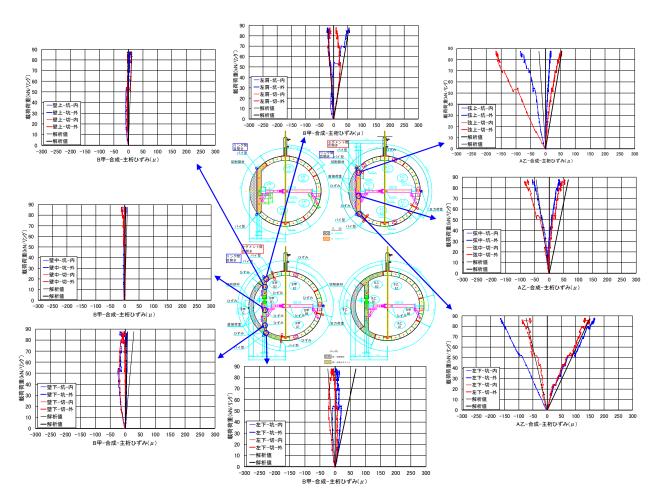


図-13 初期載荷時における荷重~ひずみ曲線および計算結果(合成セグメント部)

切削セグメントは、初期載荷時は覆工構造体として考慮し、 切削に伴い消去した.

境界条件について、非切削側スプリングライン部を鉛直ローラー、インバート部を水平ローラーとし、かつ、モデルの剛体回転を防ぐためにインバート部に仮の回転ばねを与えた. 与えた回転ばねは、剛体回転を抑えるとともに、構造計算結果への影響がないように設定した.

表-1, 図-12 に、各ステップ毎の要素設定および荷重条件、および各ステップ説明図を示す。今回の実験において、組立後のひずみを変化量の基準としたため、初期載荷時の荷重条件では覆工体の自重を考慮しない。タイプーBの壁部締結箇所について、初期載荷時は要素を設定せず、壁部締結時に要素を設定した。支保工については、軸力のみ伝達するようにトラスとした。流動化処理土の自重は、タイプーBの各リングに外荷重として与えた。タイプーAについては、切削に伴って、切削部の自重を除荷し、加えて、切削部一体型セグメントの剛性を、切削部と合成セグメントを合わせた値から、合成セグメントのみの値に移行するように設定した。タイプーBについては、切削に伴って切削セグメント

の要素を消去するとともに、流動化処理土の自重を除荷した. 推進機による切削荷重は、切削中のリングの弦部または壁部 に、単位荷重として合計 100kN となるように水平方向の分布 荷重として与えた.

#### 5. 実験結果と構造計算結果の比較

#### (1) 初期載荷時

図-13 に、初期載荷時の合成セグメントにおける実験より得られた荷重~ひずみ曲線、および解析による計算結果を示す。タイプーAの合成セグメントの弦中部と弦下部にて、実験値と計算結果が概ね一致していることが分かる。一方、弦上部においては、計算結果に比べて、圧縮側のひずみ値が大きく、引張側が小さくなった。弦中部について、今回の切削部を構造体として含んだモデルにて、相関が高かったことから、切削部もジベルにより構造体と一体になって挙動していると考えられる。

タイプーB において、壁部および左肩部は、実験値と 計算結果が概ね一致していることが確認できる. 一方,

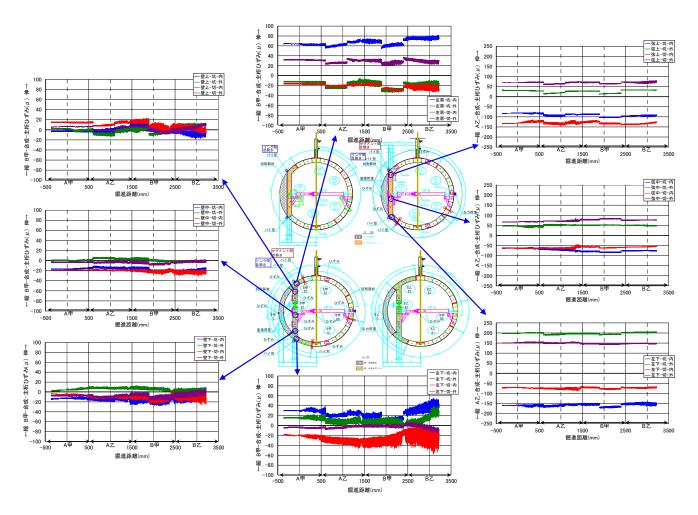


図-14 切削時におけるひずみ変化(合成セグメント)

左下部において、圧縮側のひずみは実験値と計算値の相 関が高いが、引張側は計算値が実験値より過大となって 値の差異が大きい主な箇所は、壁部と円弧部の取合いの いる.

タイプーA とタイプーB に共通して、計算結果と実験 隅角部である. その理由として, 今回は, はり-ばねモ

表-2 切削時における曲げモーメントおよび軸力の計算結果

		初期載荷 (STEP1)	月	タイプーA(乙組)切削時 (STEP5)	タイプーB(甲組)切削時 (STEP6)	タイプーB(乙組)切削時 (STEP7)
タイプー <b>A</b> (甲組)	曲げモーメント図 [kN・m]	最大: 42.0 最小: -45.2	最大: 42.8 最小: ·46.8	最大: 41.5 最小: -44.8	最大: 40.6 最小: -46.3	最大: 39.4 最小: ·44.8
	帕力図 [kN]	最大:150.1 最小:·19.1	最大:172.9 最小:-7.1	最大:145.4最小:-16.9	最大:153.9 最小:-19.3	最大:147.2 最小:22.4
タイプーA (乙組)	曲げモーメント図 [kN・m]	最大: 43.3 最小: -46.7	最大: 43.9 最小: ·44.8	最大:42.8 最小:-43.2	最大:41.9 最小:-45.1	最大: 40.1 最小: -45.0
	帕力図 [kN]	最大:156.1 最小:-18.1	最大:147.3 最小:-16.0	最大:170.0 最小:-4.8	最大:151.1 最小:-17.3	最大:145.7 最小:-21.4
タイプーB (甲組)	曲げモーメント図 [kN・m]	最大: 33.5 最小: -33.3	最大: 33.6 最小: -33.3	最大: 33.7 最小: -33.2	最大: 33.8 最小: ·14.6	最大: 33.1 最小: -13.9
	帕力図 [kN]	最大: 38.7 最小: -23.1	最大: 37.5 最小: -34.6	最大: 38.6 最小: -36.8	最大: 38.7 最小: ·24.0	最大: 39.9 最小: 28.9
タイプ- <b>B</b> (乙組)	曲げモーメント図 [kN・m]	最大: 37.3 最小: -35.9	最大: 37.1 最小: -35.8	最大: 36.3 最小: -35.8	最大: 36.3 最小: -36.0	最大: 36.5 最小: -20.0
	軸力図 [kN]	最大: 52.5 最小: ·1.9	最大:47.2 最小:48.8	最大: 45.7 最小: -10.6	最大: 53.0 最小: -6.6	最大: 72.2 最小: 4.7

デルを用いたが、隅角部における曲げ剛性の再現性が低い可能性があることが考えられる.

#### (2) 各リング切削時

図-14 に、各リング切削時の合成セグメントにおける ひずみ変化を示す. 切削の影響により、ひずみ値の振動 があるものの、全体的にひずみ値の大きな増減の傾向は ないことが分かる. したがって、覆工構造に発生する断面力の大きさや分布は、切削によって大きく変化しないと言える. 一方、壁中部におけるひずみ値については、切削に伴ってわずかに増える傾向を示している. これは、切削部一体型セグメントの剛性が、切削により小さくなることによると考えられる.

表-2 に、各リングにおける曲げモーメントおよび軸力の計算値を示す。タイプーA(乙組)における切削一体型セグメントの弦部にて、自身が切削されている STEP5の時にわずかに軸力が増えているが、全体的に、発生断面力の移行は、切削時にほとんど発生せず、解析においても実験と同様の傾向を再現することができた。

以上より、当初想定していた発生断面力の変化は、実験および構造計算ともに発生しなかった。ただし、今回の実験では荷重レベルが小さかったため、より大きな荷重が負荷した際について、同様の結果が得られるか検討が必要である。また、今回の構造計算に用いた切削荷重は、単位荷重100kNを用いており、実験により得られた反力の約10倍ほどであるが、それでも発生断面力の変化はほとんどなかったため、切削荷重の設定による影響は小さいと考える。

#### 6. おわりに

模擬トンネルを用いたセグメント切削実験の結果から、過大な断面力や反力は発生せず、覆工構造体への切削による影響は小さいことが分かった。本実験のように、覆工構造を支保工で補強することで、本施工法は実現可能であると言える。一方で、本実験において、カッタービットが切削セグメントに引っかかることなく切削が可能であったことが、過大な切削荷重が発生しなかった要因であることが考えられる。したがって、切り込み深さやコンクリート強度が大きい場合、カッタービットが引っかかり、切削荷重が増大する可能性があることを念頭に置いて、今後の技術開発や実施工を行う必要がある。

また、本覆工構造に対して、はり-ばねモデルを適用して構造計算を行った結果から、モデルの改善の余地があるものの、はり-ばねモデルの適用が可能であると考えられる。特に、壁部と円弧部の取合いの隅角部を除いた箇所のひずみ値や、切削に伴う覆工構造体の変化による発生断面力の変化傾向について再現性が高かった。隅角部においては、剛域を用いる、またはセグメント継手やリング継手の設定を見直す等を行い、モデルの再現性の向上が課題である。

#### 参考文献

- 1) 土木学会 トンネル工学委員会: トンネルライブラリー 23 セグメントの設計【改訂版】~許容応力度設計法から限界状態設計法まで~, p.306, 公益社団法人 土木学会, 2010.
- 2) 土木学会 トンネル工学委員会:トンネル標準示方書 【共通編】・同解説 【シールド工法編】・同解説, p.50,公益社団法人土木学会,2016.

(2021. 8.6 受付)

# DEVELOPMENT OF THE TUNNEL LINNING STRUCTURE FOR OVERLAP SHIELD TUNNELING METHOD

### Yuma SAITO, Koji KAYUKAWA, Takahiro MORITA and Hiroshi NAGURA

In urban areas, when multiple shield tunnels are installed side by side, spatial restrictions such as insufficient construction area and connection to existing structures may be severe. Therefore, in order to satisfy the above restrictions, we devised a construction method in which the following shield overlaps a part of the cross section of the preceding tunnel. In order to realize such a tunnel, it is necessary to develop a lining structure that becomes a permanent structure and its design method. Therefore, we devised the lining structure used for this method, and conducted a segment cutting experiment with a propulsion machine, we also considered applying the beam-spring model to the structural model of this lining structure. This report describes the feasibility of this lining structure based on the results of the experiment and the reproducibility of the beam-spring model.