

## 中位の粘性土地盤のシールド工事における設計時土圧について

シールド工法 中位の粘性土 土圧

早稲田大学 学生会員  
 東電設計株式会社  
 東京電力ホールディングス株式会社  
 早稲田大学 国際会員  
 早稲田大学 国際会員

○足立 賀奈子  
 伊藤 喜広  
 岡 滋晃  
 Alireza Afshani  
 赤木 寛一

### 1. はじめに

日本では戦後から 1950 年代の高度経済成長期にかけて多くの社会基盤設備が整備され、主に首都圏を中心に機能性・利便性が向上してきた。その結果、首都圏の地上空間では構造物が密接しており、余剰空間が少なくなっていることから、地下空間の利用に期待が寄せられている。また、地下空間の利用は、工期・コストの短縮や騒音・振動の低減、環境保護、景観維持といったメリットが多いことから地下開発は効果的であり、今後さらに進んでいくと考えられる。

地下構造物を施工する際、東京都などの都心部では軟弱な粘性土層であってもトンネルを建設できるシールド工法が主に用いられる。図 1 に示すとおり、東京都の地盤では、とくに沿岸部に広範囲に N 値 4~8 の中位の粘性土層が広がっている。したがって、東京都湾岸部でトンネルを施工する場合、中位の粘性土地盤でシールド工事をおこなうケースが発生する。このような中位の粘性土地盤におけるセグメント設計では、現行のトンネル標準示方書<sup>1)</sup>によれば設計時土圧を図 2 に示す土水分離または土水一体のどちらの地盤として計算するか、明確な基準は定められておらず、各設計者が個別に判断する。また、トンネルに作用する土圧についても図 3 に示す全土被り圧と緩み土圧のどちらを適用するか明確な基準はない。このように、中位の粘性土地盤における発生土圧については不明な点も多い。

したがって、中位の粘性土地盤におけるシールドトンネルの土圧を適切に評価することは、都心湾岸部におけるセグメント設計上の重要な課題の 1 つといえる。

以上のことから、本論文では、東京都湾岸部の電力用シールドトンネルにおける検討<sup>2)</sup>を参考に、中位の粘性土地盤における設計時土圧についてケーススタディを行い、中位の粘性土における設計時の土圧条件がセグメント仕様に与える影響を明らかにすることを目的とした。

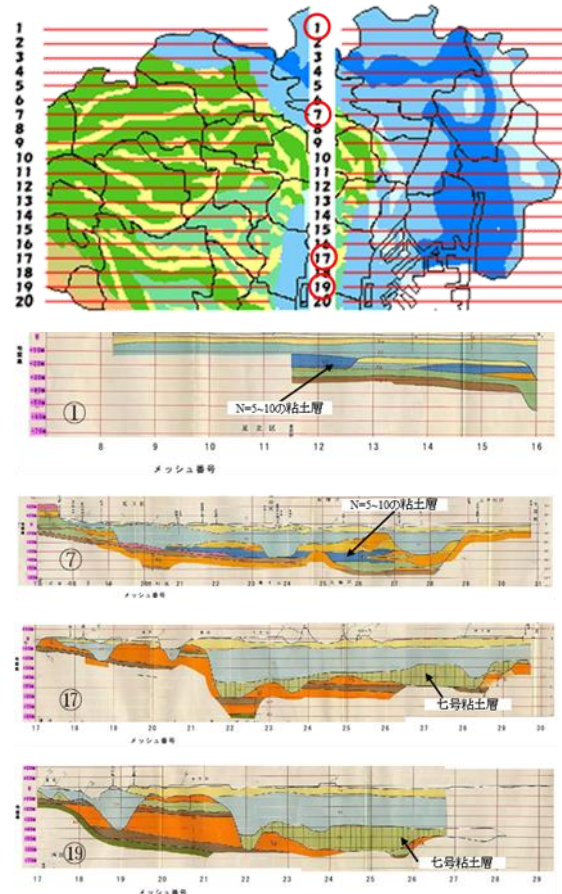
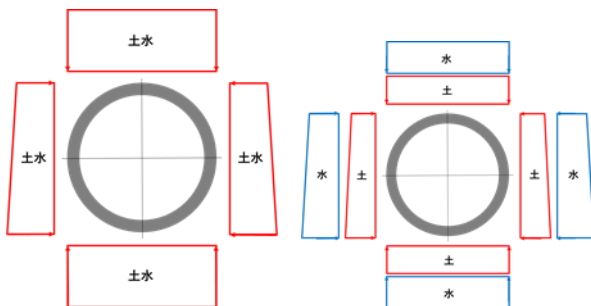
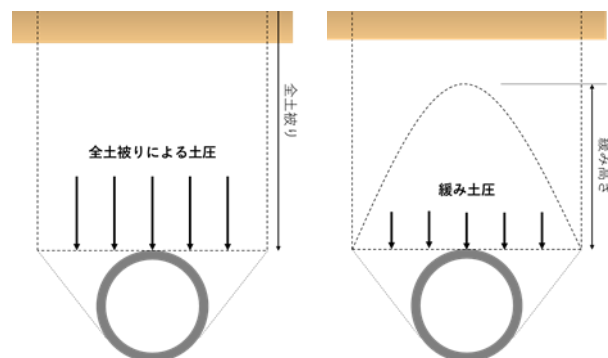


図1 東京都の地質断面図（東京都建設局より引用<sup>3)</sup>）



(a) 土水一体の場合 (b) 土水分離の場合

図2 土水一体地盤と土水分離地盤



(a) 全土被り圧の場合 (b) 緩み土圧の場合

図3 全土被りによる土圧と緩み土圧

地盤モデル図

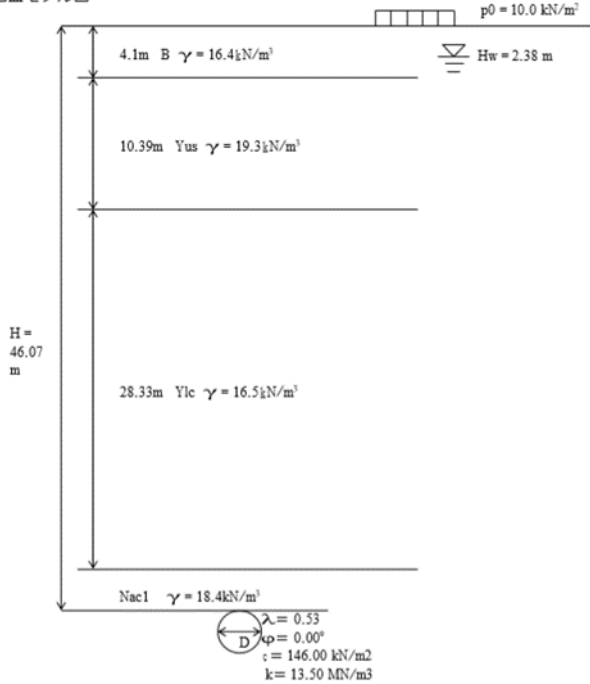


図4 想定する地質構成図

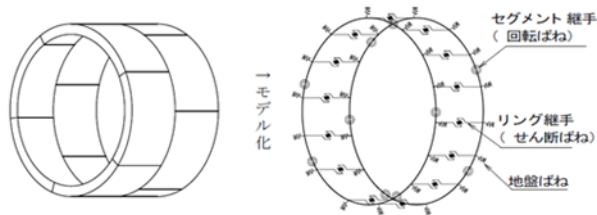


図5 2次元非線形はりばねモデル

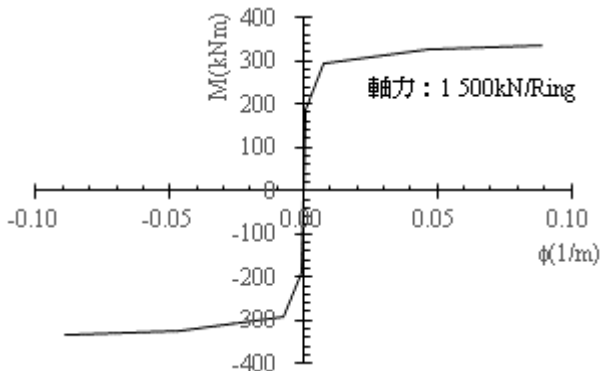


図6 はりの非線形M-φ曲線

## 2. 検討内容

東京都湾岸部の電力用シールドトンネルを参考に、中位の粘性土地盤におけるセグメントの設計土圧がセグメント仕様に与える影響について検討を行った。

本シールドトンネルは、図4のように平均N値約6の七号地層上層部粘性土層 Nacl を通過する。ここで、七号地層とは、東京都湾岸部の地下約-40m以深に分布する約2~1万年前の海退時の堆積物であり<sup>4)</sup>、トンネル標準設計書に規定する中位の粘性土層に相当する。したがって、本検討でもN値6の粘性土層として、表1に示すとおり地盤物性値を決定した。

表1 想定地盤の地盤物性値

土水の取扱い	側圧係数 $\lambda$	地盤反力係数 $k$
	(-)	(MN/m <sup>3</sup> )
土水分離	0.5	7.5
土水一体	0.7	7.5

表2 構造解析モデルの想定諸元

項目	緒元
トンネル内径	3 000mm
セグメント幅	1 350mm
厚さ	最小値 150mm とする
分割数	6 分割
鉄筋	
地山側	SD345 D13 @ 8 本
内空側	SD345 D13 @ 8 本
かぶり	60mm
ヤング率	210GPa
許容応力度	195N/mm <sup>2</sup>
コンクリート	
設計基準強度	60N/mm <sup>2</sup>
ヤング率	48GPa
許容応力度	21.6N/mm <sup>2</sup>
継手	
セグメント間	2 190kNm/rad の回転ばね
リング間	98kN/mm せん断ばね

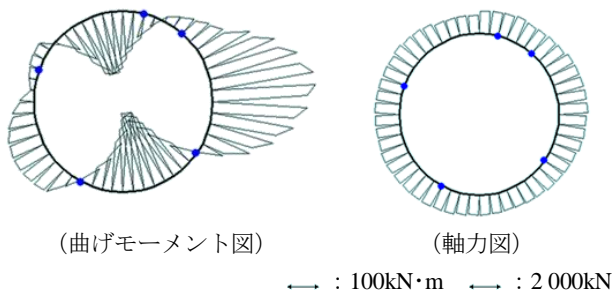
表3 検討条件一覧

検討ケース	検討条件		
	土被り	土水の取扱い	$\lambda$
ケース(A)	全土被り有効	土水一体	0.7
ケース(B)	全土被り有効	土水分離	0.5
ケース(C)	緩み土圧 2D	土水分離	0.5

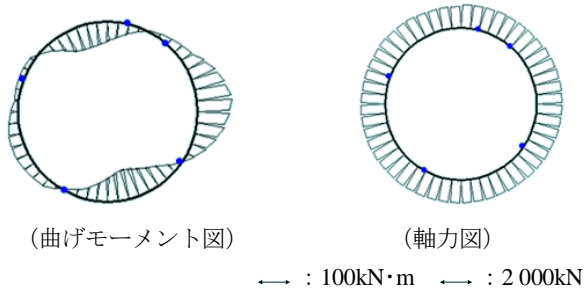
一方、図5に示すとおり、構造解析モデルにはセグメントを非線形のはり要素、継手をばね要素とする2次元非線形はりばねモデルを使用した。表2に解析に使用したセグメントの構造諸元、図6にはりのM-φ曲線を示す。モデルは、2リング千鳥組みとし、千鳥組みによる継手の添接効果を再現した。なお、本来であれば鉄筋量を増加させることができ、今回の検討では、鉄筋量については全ケースで一定としている。この理由は、セグメントの厚さに対する設計時の地盤条件の影響を考察することを、本研究の目的としているためである。

以上の物性値を用いて、表3に示す全土被り有効かつ土水一体地盤、全土被り有効かつ土水分離地盤および緩み土圧適用かつ土水分離地盤の3ケースの条件で構造計算を実施し、各ケースで許容応力度法により決定されるセグメントの厚さを評価した。

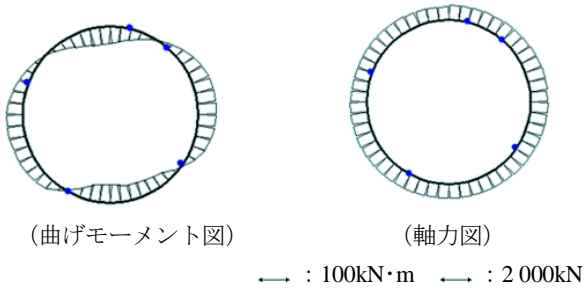
なお、ケース(C)の緩み土圧に適用する緩み高さの決定にあたっては、次のように決定した。齊藤ら<sup>5)</sup>によると、海



(a) ケース(A)：全土被り有効，土水一体



(b) ケース(B)：全土被り有効，土水分離



(c) ケース(C)：緩み土圧適用，土水分離

図7 発生断面力計算結果(No.1リング)

表4 計算結果一覧<sup>(※)</sup>

ケース	$t$ mm	$M$ kNm	$N$ kN	発生箇所
(A)	375	310.0	1 909.0	右端付近
(B)	200	103.7	1 798.7	右端付近
(C)	150	56.9	1 133.0	下端付近

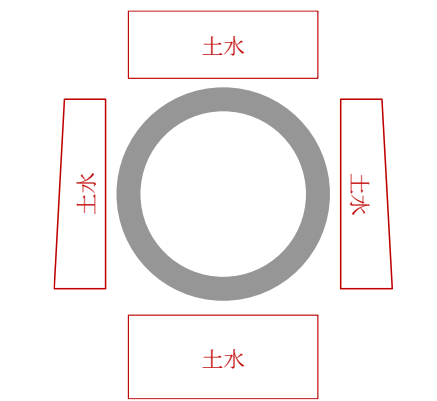
(※)  $t$ ：セグメントの厚さ， $M$ ：曲げモーメント， $N$ ：軸力

底下大深度での  $N$  値 7 の七号地層においてセグメントに作用する土水圧は、緩み高さ  $2D$  ( $D$ ：トンネル外径) に相当する荷重が計測されている。そこで、今回の検討においても緩み高さ  $2D$  に相当する荷重を鉛直荷重として入力した。

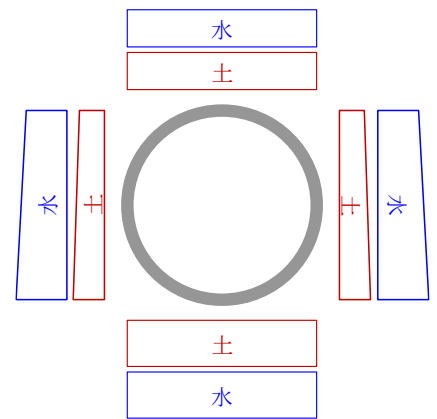
### 3. 検討結果および考察

図 7 に各ケースにおける発生断面力の計算結果を示す。また、表 4 に許容応力度法により決定したセグメントの厚さと、そのときのはりの発生断面力を示す。

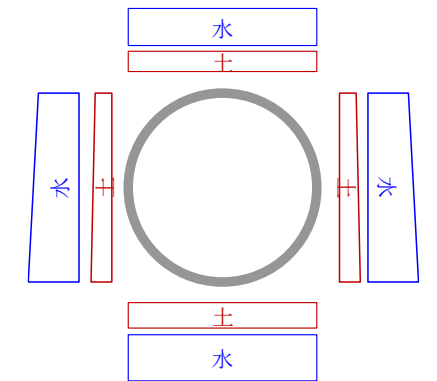
まず、ケース(A)全土被り有効かつ土水一体地盤として計算するとセグメントの厚さは  $375\text{ mm}$  である。次に、ケース(A)全土被り有効かつ土水分離地盤として計算すると、セグメントの厚さは  $200\text{ mm}$  までとなった。さらに、ケース(C)緩み土圧適用かつ土水分離地盤として計算すると、セグメントの厚さは  $150\text{ mm}$  と決定されることが確認できた。



(a) ケース(A)：全土被り有効，土水一体



(b) ケース(B)：全土被り有効，土水分離



(c) ケース(C)：緩み土圧適用，土水分離

図8 各検討ケースでの荷重条件

この違いは次のように考えられる。

まず、ケース(A)では、土被りおよそ  $40\text{ m}$  の鉛直土圧を土水一体地盤として計算している。したがって、図 8 に示すように水圧に相当する側方荷重にも側方土圧係数を乗じた荷重条件で計算しているため、鉛直土圧に比較して側方土圧が小さくなり、とくに No.1 リングでは負曲げが大きく発生する結果となっている。この負曲げに対抗するために、セグメントの厚さが大きい計算結果となったと考えられる。

次に、ケース(B)では、土水分離地盤として計算しているため、側方の水圧をそのままセグメントリングが負担する荷重条件となっている。また、今回想定したトンネルの地下水面はほぼ地表面にあり、高水圧下での設計である。したがって、ケース(A)の場合と比較して、鉛直土水圧に対す

る側方の土水圧が高く、セグメントリングに対して構造上安定した荷重条件となっている。さらに、地盤は中位の粘性土であるため、地盤反力係数は  $7.5\text{MN/m}^3$  と比較的高い。この結果、セグメントの厚さがケース(A)に比較して小さくなったと考えられる。

最後に、ケース(C)では、緩み土圧を適用しているため、ほぼ水圧によりトンネルが支持されることとなる。その結果、鉛直方向および側方よりトンネルに等方的な荷重が作用している状況となり、トンネルの構造上安定な状態が確保され、小さなセグメントの厚さであっても許容応力度を満足していると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究では、中位の粘性土地盤中にある東京都湾岸部の電力用シールドトンネルを対象に、はりばねモデルによる解析を実施し、鉛直土圧を全土被り圧、土水の扱いを土水一体地盤および土水分離地盤とした場合のセグメントの厚さを評価した。さらに、鉛直土圧を緩み土圧、土水の扱いを土水分離地盤の場合についてのセグメントの厚さの評価をおこなった。その結果、土水の扱いを土水一体から土水分離として計算するだけで、セグメントの厚さは  $375\text{ mm}$  から  $200\text{ mm}$  と大幅に薄くでき、さらに緩み土圧を適用すると  $150\text{ mm}$  まで薄くできることが確認された。

土水の扱いを土水分離とする場合、トンネルにかかる荷重は有効土圧と水圧に分けて計算され、側方荷重は有効土圧にのみ側方土圧係数を乗じ、水圧は等方的に働くとして計算される。一方で、土水一体とする場合は、水圧にも側方土圧係数を乗じて側方荷重を計算する。その結果、土水分離地盤とした場合、土水一体地盤よりも断面力が小さくなり、セグメントの厚さを薄くすることができたと考えられる。また、トンネルにかかる土圧を緩み土圧とした場合、全土被り圧より土被りが小さいとして鉛直荷重を計算できるため、さらにセグメントの厚さを薄くすることができたと考えられる。したがって、土水分離地盤および緩み土圧が適用可能な場合は、土水分離地盤、緩み土圧で設計できればセグメント仕様の合理化を図ることができると考えられる。

今後は、本シールドトンネルでの現地計測実施後に、はりばねモデルによる解析により算出した断面力と現場計測値による断面力を比較検討することで土圧発生メカニズムを解明し、メカニズムに裏付けられた合理的な設計時土圧の算出手法について検討を進めていきたい。

#### 5. 謝辞

本研究の実施にあたり、早稲田大学 岩波基教授に多大なご協力を頂いた。ここに記して深甚な謝意を表す。

#### <参考文献>

- 1) (社)土木学会：トンネル標準示方書シールド工法・同解説，2016。
- 2) 出雲，金城，小寺：葛西橋通り付近管路新設工事におけるRCセグメントの設計，電力土木技術協会，電力土木(392)，pp129-134，2017.11。
- 3) 東京都建設局：箇所別地質断面図 東部（最終閲覧日：2018.8.29）  
<http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/jigyo/tech/start/03-jyohou/danmenzu/menu3.html>
- 4) 東京都地盤調査業協会：技術ノート(No.37)特集：東京湾，2004.11。
- 5) 齊藤，中島，竹林，白井：東京湾海底下七号地層におけ

るセグメントの荷重計測結果について，土木学会第60回年次学術講演会，pp.219-220，2005.9。