地盤と建設
Vol.12, No.1, 1994

上下併設シールドトンネルの覆工設計法について

Design method of segment lining on the Existed Shield tunnel encountered a parallel construction of a New tunnel under the Existed tunnel

栗木　実 *　(Minoru Kuriki)
田中　弘 **　(Hiroshi Tanaka)
吉田　保 ***　(Tamotsu Yoshida)

本報告は、上下併設シールドに伴う先行シールド覆工の設計法を検討したものである。

まず解析条件に、地層構成，覆工剛性，応力解放率等を反映させた二次元弾性有限要素法で、後行シールド掘進に伴う地盤応力の増加比を求め、次にその増加応力比を用いて先行シールドの覆工に作用する偏荷重を算出し設計を行う手法を提示したものである。

本設計法で大深度に建設される上下併設シールドトンネルをケーススタディーで検討した結果、先行シールドトンネルの覆工応力から考えて、必要な離隔距離は0.3D（D:後行シールド覆工外径）と得られた。

キーワード：シールドトンネル，近接施工，地盤変状，慣用計算法，有限要素法　(ICC: H5,E1)

1．はじめに

近年、東京を初めとした大都市圏では、過密した地上空間の代替に地下空間の有効活用を図ろうとする傾向がある。例えば、これまで地下を計画対象とすることの少なかった道路，河川等のような大規模線状構造物も、昨今では多数に及ぶ計画がなされている。

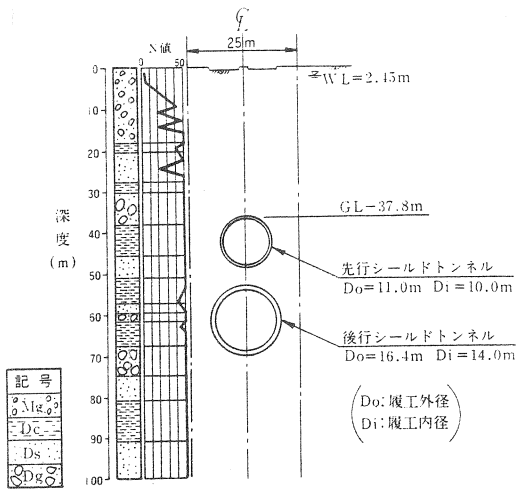
このように地下空間を利用し建設を行う場合でも、現在の法制度上では、計画対象エリアとして何かと制約を受けることの少ない公共用地（主には道路下）に、施設整備を行う計画が大多数であり、従っていずれの計画においても他構造物との近接施工を余儀なくされている。

併設シールドトンネルの近接施工を例にとると、先行シールドトンネルは、後行シールドの掘進に伴い断面力の変化，断面変形が発生し、著しい場合は覆工体に構造上の問題を引き起こすことが懸念される。そのため、先行するシールドの覆工設計にあたっては、後に近接して施工される後行シールドの影響を検討し、それを反映した設計としなければならない。こうした併設シールドに伴う覆工設計上の問題に関して、横併設の場合の先行シールド覆工への影響の考え方を示した指針[1]はあるものの、上下併設を扱った規準・指針類は、これまでのところ見当たらない。

本文は、公道幅員内でしかも比較的大深度に建設される上下併設シールドを対象に、後行シールド施工が先行シールドトンネルの覆工に与える影響の検討手法，ならびに覆工の安定上，必要な上下併設トンネル離隔の検討結果を報告するものである。

2．検討対象モデル

本文では、図－1に示すモデルケースを用いて上下併設シールドトンネルの覆工影響検討を行った。トンネルは、幅員25mの公道下に上下併設されるものとし、地盤条件はN値50の洪積地盤の礫層と粘土層の互層地盤，地下水位はGL-2.45 mに設定した。先行シールドは覆工外径φ11mで土被りGL-37.8 mに、後行シールドはφ16.4mで先行シールドの直下に併設されるものとした。



図－1　モデルケース

*　日本工営㈱　広島支店　技術部　主任技師
**工修　日本工営㈱　コンサルタント第五事業部　都市土木部　構造解析担当課長
***工博　日本工営㈱　コンサルタント第五事業部　都市土木部　次長

3．検討する上での技術的課題

(1) 大深度シールド覆工設計の課題

従来より、トンネル深度が浅く，軟弱な地盤（主に沖積地盤）条件下での併設シールドに伴う先行シールド覆工に与える影響検討には、地層構成，覆工剛性，応力解放率等を考慮できる有限要素法（実務的には弾性解析）が多く用いられてきている。

一方、本文においてケーススタディーとして扱っている洪積の良質地盤を対象とし、かつ覆工外径に比して深い位置に建設されるシールドトンネルの場合、覆工に作用する鉛直土圧は地盤のアーチング効果が期待できるため、緩み土圧を考えるのが一般的である。ところが、有限要素法を覆工設計に用いる場合、通常は土水一体の全土被り荷重として算定されるため、覆工荷重に緩み土圧を考慮できず、また水圧成分にも土圧係数が作用することによって、先行シールドの初期覆工断面力に、実状とはそぐわない過大な曲げモーメントを与えることとなり、的確な設計法とは考えられない。

上記の課題に対しては、先行シールドの覆工荷重の評価を後行シールドが施工される前の初期状態と，後行シールド掘進後に扱う影響の部分とに２分して扱うこととした。初期覆工荷重は、慣用計算法モデルに準じて、緩み土圧を考慮した土水分離の荷重条件を設定した。次に後行シールド掘進後の覆工荷重は、シールド掘進に伴う周辺地盤の応力状態の変化を有限要素法で算定し、緩み土圧ならびに土水分離の荷重条件下で設定した初期覆工荷重に乗することで評価した。

(2) 後行シールドによる影響要因

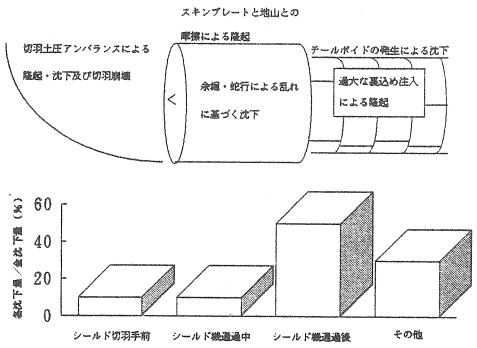
一般的に、シールド掘進時の周辺地盤変状は、シールド機の掘進過程で３つに大別できる[2]。

１つには、シールド機切羽前方に生じる切羽土圧のアンバランスから生じる変状であり、付加土圧による先行隆起が主体である。またシールド機の通過中では、余堀り，蛇行によってシールド機周辺に地盤の乱れが生じて地盤の沈下を引き起こす。３つめは、セグメントリングがシールド機から離脱した時に発生するシールド機とセグメントリングの隙間部（テールボイド）を、周辺地盤が閉塞するに伴って地盤沈下が発生する。

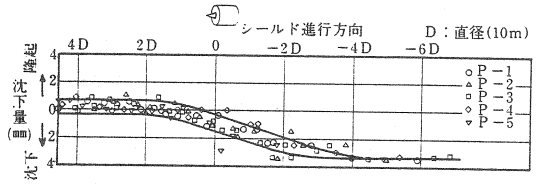
また、吉田[2]は、これまでの膨大な現場計測データを基に、この３つの要因からなる地盤変状の内，大部分を占めるのは、テールボイド閉塞に起因したテールボイド沈下が全沈下量の30～50%（洪積の砂質土を対象とした場合）と報告している。（図－２参照）

図－３は、当該モデルの地盤条件とほぼ同様な洪積地盤で施工された覆工外径φ10mのシールド掘進時の地盤沈下曲線の１例である[3]。同図からも、先の図－２に示したように、シールド機通過後に発生するテールボイド沈下が、全沈下量の大半を占める結果が得られている。

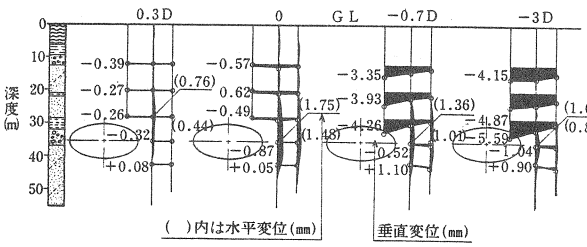
これより、後行シールド掘進が先行シールドの覆工応力状態に与える影響の主要因として、テールボイド閉塞に起因する応力解放を考慮することとした。



図－２　シールド掘進時の地盤変状要因



(a) 切羽からの距離と地表面沈下



(b) 地中の鉛直および水平方向変位（横断方向）

図－３　洪積地盤で施工されたシールド掘進時の地盤沈下曲線

4．先行シールドの覆工応力算定法

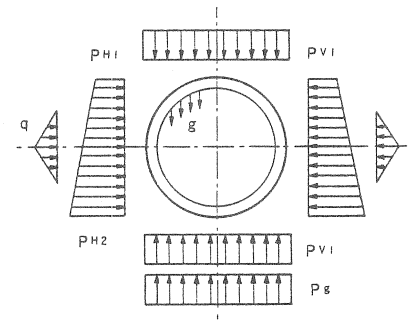
(1) 初期応力状態の評価

後行シールド施工前の先行シールドの初期覆工応力の算定は、セグメントリングを剛性一様としたリングとして取り扱う「慣用計算法モデル」を用い，荷重条件も「慣用計算法モデル」に準じた方法で設定した。

先行シールドトンネルの設計条件は、表－1に明記するように、覆工外径φ11m の大断面シールドトンネルであり、土被りは約38m （約3.5D_o。）と覆工外径 D_oに比して深い位置にある。先行シールドの地盤条件，トンネル深度から考えて、覆工鉛直土圧は緩み土圧とした。一般的に緩み土圧の算定は、*Terzaghi*の緩み土圧算定式[1)4)5)] が用いられており、本検討でもそれを用いている。同式から算出した緩み高さは、9.1 mと得られた。

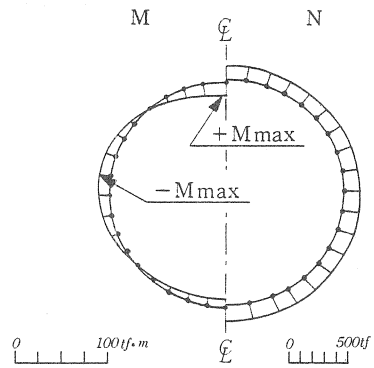
これらの条件から得られた，後行シールド施工前の先行シールド初期覆工応力を算定する荷重条件を、図－4に示す。

この荷重条件を用いて、初期状態のセグメント発生断面力を計算すると、図－5のようになる。正曲げの最大値は、一般的に見られる断面力モードと同様にクラウン部に発生し、この発生断面力に必要なセグメント鉄筋の諸元は、最小鉄筋量（鉄筋比で0.43% ）で可能である。



P_{v1} ：鉛直荷重＝46.6tf/m²
P_{h1} ：上部水平荷重＝39.6tf/m²
P_{h2} ：下部水平荷重＝54.3tf/m²
g ：セグメント円周単位当たり重量＝1.3tf/m²
P_g ：自重による下部反力荷重＝4.1tf/m²
q ：抵抗土圧＝0.0tf/m²

図－4　セグメントリング初期荷重分布図



	M(tf・m)	N(tf)
+Mmax	18.4	230.8
−Mmax	14.7	254.0

図－5　初期覆工断面力図

表－1　先行シールドトンネルの設計条件

項　目	設計条件
セグメント外径	D_o = 11m
セグメント内径	D_i = 10m
セグメント厚	t = 0.5m
曲げ剛性低減率	η = 0.8
曲げﾓｰﾒﾝﾄ 割増率	ζ = 0.2
荷重条件	土水分離タイプ（洪積礫層）
土被り	H = 37.8m
地下水位	H_w = 2.45m
土の単位体積重量	γ_t = 2.13 tf/m³
土の内部摩擦角	ϕ = 42°
土の粘着力	C = 0 tf/m²
側方土圧係数	λ = 0.35
地盤反力係数	k = 5.0 kgf/cm³

(2) 後行シールド掘進による影響検討

当該地盤条件は、洪積礫層が大半を占める地層ではあるものの、礫層と粘土層が互層に重なり合った複雑な地層にて構成されている。また、シールド工法では、シールド機とセグメントリングの隙間部にできるテールボイ

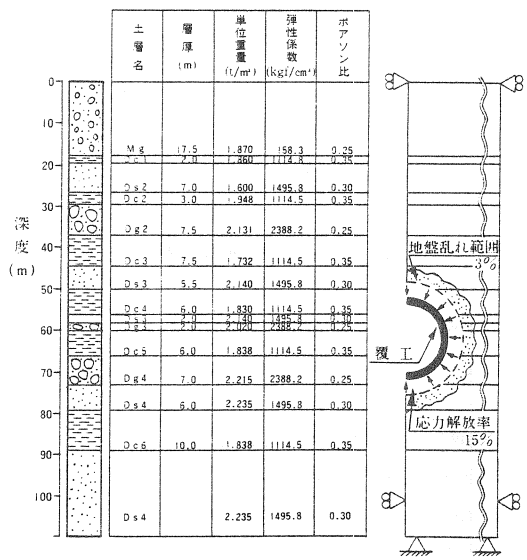
ドを、セメント系の充填材で裏込め注入するため、密閉型シールドの場合は応力解放率として100%にはならない。

地盤掘削に伴う周辺地盤の応力変化を求める方法としては、均一な無限弾性地盤内での円孔理論解[6]等もあるが、地層構成や応力解放率等を考慮できないため、ここでは地盤とセグメントリングを一体にモデル化した二次元弾性解析の有限要素法（以下、F.E.M と称す）を用いて、より実状に近いシールド掘進時の地盤応力状態を算定することとした。

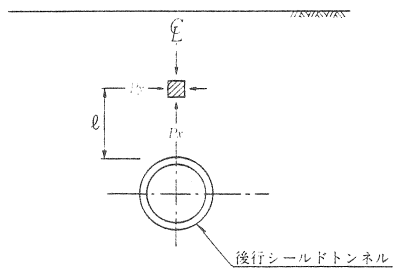
F.E.M に用いた解析モデルは、図－6に図示するように、当該地盤の地層構成を加味したモデル化を行い、地盤は平面ひずみ要素，セグメントリングは等価一様な剛性をもつ梁要素とし、セグメント間の継手効果を考慮してηEI(η：曲げ剛性低減率<1.0) と曲げ剛性を低下させている。曲げ剛性低減率は、同様の大断面シールドである東京湾横断道路（φ13.9m ）の覆工設計に用いられたη=0.8[7]を準用した。

また、これまでの洪積地盤を対象とした実態調査から、応力解放率は15%[8)9)]，さらにシールド機通過時に発生するセグメント外周地盤のみだれ範囲は、これまでの実態調査から[8)10)] 覆工外径の3%とし、その範囲の地盤弾性係数を低減させた。

ここでは、本文の検討対象が上下併設で、しかも先行トンネルは上に位置するため、トンネルより上方の地盤応力状態に着目し（図－7参照）、解析結果から得られたシールド掘進に伴う周辺地盤の応力状態を、各成分（鉛直・水平）に区分して図－8に整理した。



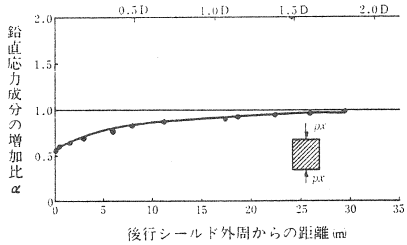
図－6　F.E.M 解析モデル



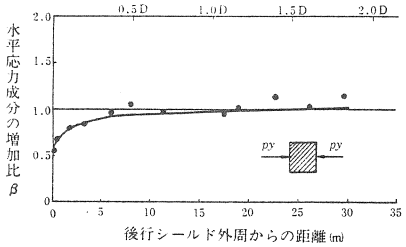
図－7　地盤応力の着目点

同図より、応力が急変する離隔としては、各成分とも0.2 ～0.5D(D: トンネル外径=16.4m) 程度であることが読みとれる。

これは、無限弾性地盤内における円孔理論解よりはやや小さく，解析条件に地層構成，覆工剛性，応力解放率，覆工外周の地盤にみだれを考慮したためと考えられる。



(a) 鉛直応力成分の増加比



(b) 水平応力成分の増加比

図－8　F.E.M から得られたシールド掘進時の周辺地盤応力状態（トンネルより鉛直上方向）

(3) 併設トンネルの影響を考慮した先行シールドの覆工応力の算定

併設シールド（ここでは先行シールド直下に併設される後行シールド）の掘進に伴い、周辺地盤の応力変化によって、先行シールドの覆工の断面力も初期状態から変化する。

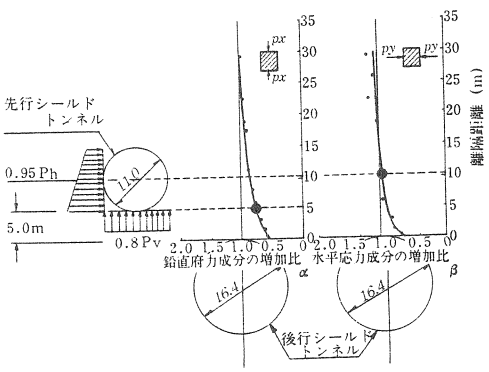
図－9は、後行シールド掘進時の周辺地盤の応力状態（図－8参照）に、先行シールドの覆工を同スケールで付記したものである。なお、鉛直応力の増加比をα，水平応力の増加比をβとすると、後行シールド施工の影響を受けて二次再配分される先行シールドの荷重分布は、鉛直覆工荷重αPv，水平覆工荷重βPhとして扱うことが可能である。

この時の鉛直増加比αは、最も影響の大きいトンネル下端位置の値，水平増加比βはスプリングラインの値を用いる。仮に離隔距離が5mの場合、鉛直覆工荷重は初期から20%,水平覆工荷重は5%の減少があった。

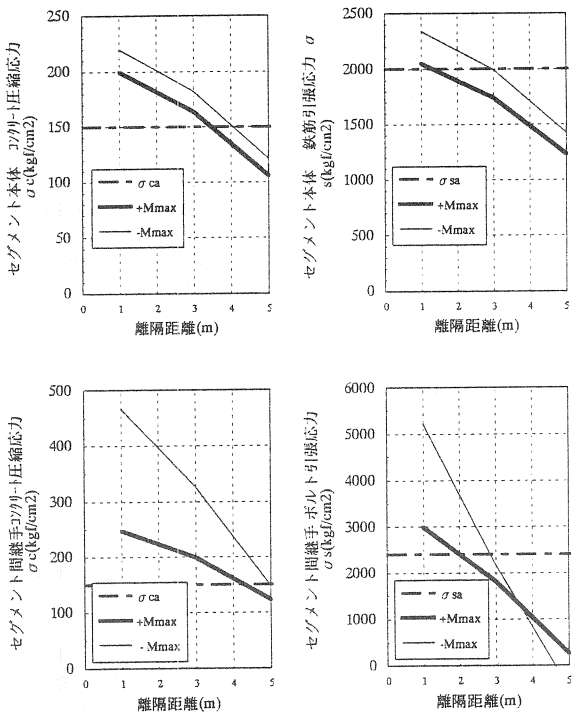
トンネル離隔距離に応じたα，βを、それぞれの鉛直・水平荷重に乗して、再度慣用計算法を用いて先行シールドの覆工発生応力を計算し、その結果を図－10に取りまとめた。なお、この覆工応力を評価する際に仮定したセグメント構造（図－11参照）は、現況のセグメント諸元で配置可能な最大鉄筋量まで増加させて強化したものである。

また、添接効果を考慮して、慣用計算法から求まる曲げモーメントMを、$(1+\zeta)M$と曲げモーメントを割増ししている。ζ値は先の継手効果ηと同様に、東京湾横断道路での採用値$\zeta=0.2$[1]を用いた。

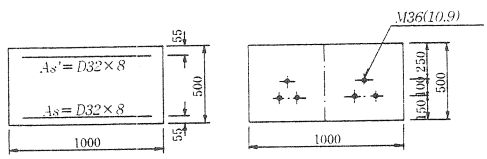
考察として、別途特別な補助工法を必要としない覆工



図－9　トンネル離隔距離に応じて設定可能な荷重係数



図－10　トンネル離隔距離と覆工発生応力の関係



図－11　セグメント鉄筋諸元

安定上の離隔距離は、セグメントの許容応力を満足する5mという結果が得られ、後行シールド覆工外径Dの0.3Dである。

8．おわりに

大深度における上下併設の影響を考慮したシールドトンネルの覆工設計は、これまでの基準・指針類では的確な算定が困難であり、今回シールド掘進時の周辺地盤応力の変化に着目した検討法を紹介した。また、離隔距離と覆工応力の関係に関しては、これまで数断面の$F.E.M$解析を行うのが通例であったが、本手法によれば1断面の解析結果から類推することが可能である。

今後、同様なシールドトンネルの近接施工問題に、本手

法が活用されればこの上ない喜びである。

最後に、本紙面をお借りして、本文で報告した上下併設シールドの覆工設計法の検討に協力いただいた関係各位に、末筆ながら謝意を表します。

参考文献

1)シールドトンネルの設計施工指針（案）：日本鉄道施設協会，pp99～pp101，1978年8月
2)吉田　保：シールド掘進に伴う地盤及び構造物挙動と近接施工に関する研究　学位論文，1994年3月
3)中村信義ら：大断面泥水加圧シールド工法によるトンネル周辺地盤の挙動について（洪積地盤を対象），土木学会　第41回年次学術講演会，pp851～pp852，1989年 6月
4)㈱土木学会・㈱日本下水道協会共編：シールド工事用標準セグメント，㈱日本下水道協会，pp94～p96，1992 年 9月
5)トンネル標準示方書（シールド編）・同解説：土木学会，pp34～pp35，1993年7月
6)例えば，樽木　武：トンネル力学，共立出版，pp107，1977年10月
7)東京湾横断道路技術検討　報告書（シールドトンネル）：東京湾横断道路㈱・東京湾横断道路シールドトンネル検討会，pp5-78 ～pp5-85，1991年4月
8)山本　智ら：洪積地盤の大断面シールドに伴う地盤挙動，第24回土質工学研究発表会，pp1715 ～pp1718，1989年6月
9)間片博之ら：シールドトンネルの新技術(7)Ⅲ設計・施工編，トンネルと地下 連載講座，pp55～pp64，1990年12月
10) 山田孝治ら：洪積地盤における泥土圧シールドの施工と計測結果その２，第21回土質工学研究発表会，pp1723～pp1724，1986年 6月