

推進施工時における異なる断面の地盤変状への影響

島田, 英樹
九州大学大学院工学研究院 : 教授

笹岡, 孝司
九州大学大学院工学研究院 : 准教授

濱中, 晃弘
九州大学大学院工学研究院 : 助教

<https://hdl.handle.net/2324/7168683>

出版情報 : 月刊推進技術. 38 (2), pp.66-76, 2024-02. LSプランニング
バージョン :
権利関係 :



技術 寄稿

推進施工時における異なる断面の地盤変状への影響



しま ひでき
島田 英樹

九州大学大学院
工学研究院教授



ささおか たかし
笹岡 孝司

九州大学大学院
工学研究院准教授



はまなか あきひろ
濱中 晃弘

九州大学大学院
工学研究院助教

1 はじめに

我が国は国土が狭い上に都市に人口や経済拠点が集中し、過密な都市構造となっている。一方、上下水道、ガス、電力、通信ケーブル等のライフラインの管理設は、この過密化した都市部の地下浅部空間に施工せざるを得ない。このような都市部の管きょ構築現場への適用を目指したものが、発展著しい推進工法である。

非開削工法のひとつである推進工法は、発進・到達立坑間において工場で製造された推進管の先端に掘進機・先導体または刃口を取付け、ジャッキ等の推進力によって管を地中に圧入して管きょを埋設する工法であると定義され¹⁾、交通量の多い道路または地下埋設物の輻湊した道路で地上からの掘削が困難な場合、軌道または河川を横断するため地上からの掘削が困難な場合、管きょの埋設位置が深いため地上からの掘削となると工事費が高む場合、さらに市街地等の周辺環境や道路占用条件から地上からの開削が適さない場合等に採用される。このような採用条件から、既設都市ライフライン構造物周辺での施工が多い推進工法は、これらの既設周辺構造物に対して、できる限り施工の影響を抑制する必要がある。

現在推進工法は、その発展過程において様々な新しい技術を取り込み、改良、創意工夫がなされて多様な工法が生まれている。近年、多くなった呼び径800～3000の大口径管推進工法は、切羽面を開放状態で掘削を行う刃口式推進工法と、掘進機に隔壁を設け密閉状態で行う泥水式、泥土圧式あるいは泥濃式推進工法に分類される。

小口径の刃口式推進工法から始まった推進工法は、大口径管推進工法へと発展するにつれて次第に密閉型機械掘削方式が採用されるようになり、その結果、大口径管推進工法は次第にシールド工法に類似した工法へと変遷を遂げてきた。一方、小口径管推進工法においては、位置計測技術や掘削方向制御技術の進歩により長距離、曲線施工という意味で飛躍的にその適用範囲を拡大している。このように推進工法は著しく進化を遂げてきたが、シールド工法のような巨大プロジェクトの主体には残念ながらなり得なかった。また、掘削方法がシールド工法に模擬していることや、既製管をジャッキで地中に押し込むという簡便な工法という発想から現場実践的に発展してきた経緯があるため、推進理論の確立においては軽視される傾向にあった。その結果、推進工法は経験工学ともいわれた時代もあったが、近

年では1kmを超える長距離施工や交角合計が180度以上の曲線施工が可能となったことにより、理論工学的にもようやく脚光を浴びはじめ、施工、管理、材料等の各分野での研究開発が進められている。

我が国の総人口は減少傾向にある一方、総人口に占める65歳以上の割合は増加の一途を辿っている。現在ではその割合は過去最高の26.0%に達し、今後も人口減少・高齢化は進行していくことが予想されている²⁾。このような状況を受け、現在人口減少・高齢化社会に向けたユニバーサルデザイン、およびコンパクトかつ機能性に優れた都市空間が求められており、ハートビル法（平成6年）と交通バリアフリー法（平成12年）を統合したバリアフリー法（平成18年）の施行によって地下歩行空間の整備等といった地下空間を有効活用した魅力ある都市づくりの構築が進められている³⁾。このため、現在我が国の都市部では、アンダーパスやバリアフリー地下通路等といった地下空間の有効活用が進められている。管きょを地下に埋設する工法として、開削工法やシールド工法といった矩形函渠構築工法が挙げられるが、これらの既存の工法は広範囲の施工領域の占有が必要であることや、工期が長く高コストであるといったデメリットがある。そこで都市部における有効な施工方法として、非開削技術である密閉型矩形掘進機を用いた推進工法、通称矩形推進工法が開発され、近年管きょの推進施工が実施されてきている。推進工法による管きょの施工は、工事公害が少なく低コストであるため脚光を浴びており、今後、大断面の管きょの推進施工も見込まれている⁴⁾。さらに、近接構造物による制約や地形条件による制約などから、多様な断面を構築する推進工法の需要が増大している。

このような社会的背景に基づき、本稿は国内外で供用されている地下インフラの構築に利用されている推進工法の多様な断面構築に向けた種々の検討例について、総括的に紹介することを目的とする。

2 大断面矩形推進工法における周辺地山の挙動

2.1 矩形推進工法における課題

近年、都市部での施工において優位である矩形推進

工法が注目を集めており、矩形推進工法を用いた小中口径の矩形函渠埋設施工の事例も増えてきている。また、今後はより大口径の矩形函渠埋設施工（大断面矩形推進）も見込まれている。しかしながら、一般的な円形管きょの推進工法等と比較すると矩形函渠の推進施工事例は少なく、特に大断面矩形推進時における周辺地山の挙動に関する学術的検討は十分になされていない。以上の観点から数値解析を実施し、まず二次元応力解析によって大断面矩形推進施工における周辺地山の挙動を把握するとともに、円形管きょと比較した場合の断面形状の相違および管径の相違による周辺地山の挙動を地山変形に着目して比較し、大断面矩形推進施工における課題を抽出した。また、大断面推進施工の際、掘削面が大きいとテールボイド保持が困難となると予想され、テールボイド変形に起因した周辺地山の変形が生じる可能性がある。そのためテールボイド保持等を目的としてテールボイドに注入される滑材の性状の相違による周辺地山の挙動の変化についても検討を行った。

図-1に本検討に用いた解析モデルを示す。解析モデルは無水層とし、対象範囲は荷重、構造系ともに左右対称であるため、高さ40m、幅40mの半断面モデルとした。また、モデルは弾性体とし、境界条件として地表面である上端面以外は面と垂直方向に固定した。地山は砂質土と礫質土の二層とし、地表面から深度15mまでを砂質土、深度15mから深度40mまでを礫質土とした（図-1）。このデータは、大断面矩形推進工法が適用された関東地区のある地域の特性値を用いたも

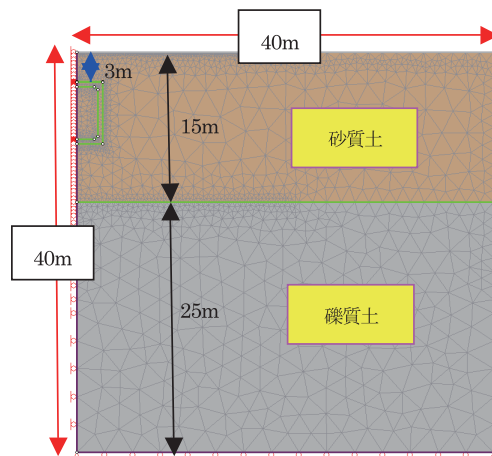


図-1 解析モデル

のである。解析ステップは、実際の推進施工の施工過程を考慮し、STEP1で初期応力状態の解析を行い、STEP2で切羽圧を掘削面に作用させ、推進機が切羽を掘削する状況を再現した。次に、STEP3で矩形函渠または円形管きょの敷設および掘削後のテールボイドへの滑材注入に関するパラメータを入力し、掘進機通過後に形成されたテールボイドに固結型滑材が注入される状況を再現した。敷設される管きょについては呼び径800、呼び径3000、呼び径5000の円形管きょ3種類、内寸□800×800mm、3,000×3,000mm、5,000×5,000mmの矩形函渠3種類の合計6種類を検討に用いた。なお検討は、土被り3.0m、テールボイド厚30mm、切羽圧20kPaで一定とした。本解析に用いた入力パラメータを表-1に示す。

表-1 入力パラメータ

	砂質土 (地山)	礫質土 (地山)	コンクリート (管)	固結型滑材 (テールボイド)
ヤング率: E (MPa)	10	50	3.2×10^4	0.23
ポアソン比: ν (-)	0.35	0.30	0.20	0.41
単位体積重量: γ (MN/m ³)	0.018	0.020	0.024	0.022

2.2 矩形と円形形状による地山変状の相違

(1) 矩形と円形の断面形状の相違による

周辺地山挙動の変化に関する検討

本節では、矩形函渠を推進施工した場合と、円形管きょを推進施工した場合について、断面形状の相違が周辺地山の挙動に与える影響に関して地山変形に着目して検討を行った。なお、本検討では呼び径5000の円形管きょと内寸□5,000×5,000mmの矩形函渠の施工を想定し、同じ内寸であるが断面形状の異なる管きょを施工した場合の周辺地山の挙動に関して検討した。

図-2に断面形状の相違による地表面変形量の解析結果を示す。この図より円形管きょを推進施工した場合と比較して矩形函渠を推進施工した場合の方が管中心部分の地表面沈下量が大きく、また地表面沈下の範囲が大きいことがわかる。これは円形管きょと比較して矩形函渠上面が平面であることにより、地表面沈下が大きくなったと考えられる。

また、図-3に深度2.97m（テールボイド天端部と同

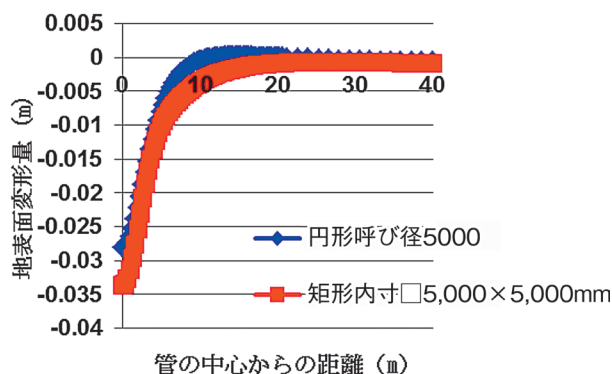


図-2 断面形状の相違による地表面変形量

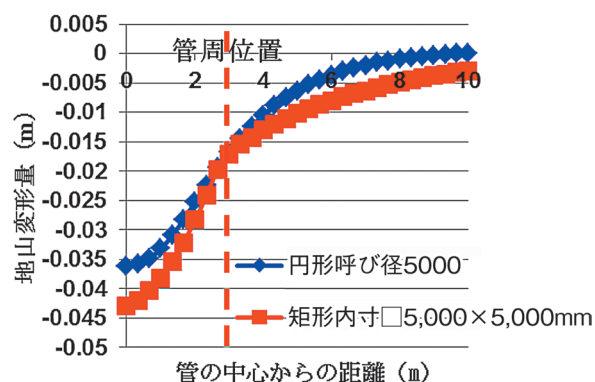


図-3 断面形状相違による周辺地山変形挙動（深度2.97m）

じ深度）における管の中心からの距離と円形管きょおよび矩形函渠推進時の地山変形量の関係を示す。解析結果より、円形管きょの場合はアーチ状の沈下挙動がみられるのに対し、矩形函渠の場合は管中心部から管の角隅部付近まで大きく沈下し、それよりも外側では円形管きょと同じような沈下挙動を示すことがわかる。このことから、矩形函渠推進では、上面の平面部が特に周辺地山挙動に大きく影響を与えていることがわかる。

本結果より、矩形函渠を推進施工する場合、円形管きょ推進と比して沈下量が大きく、また広範囲で沈下が生じるため、より広範囲の近接構造物にまで影響を及ぼす恐れがあると考えられる。したがって矩形函渠の推進施工の際には地表面沈下の程度および影響範囲に関して、円形管きょの推進施工時よりも留意する必要がある。

(2) 内寸の相違による周辺地山変形挙動の

変化に関する検討

本節では、円形管きょと矩形函渠のそれぞれの施工において、内寸の大きさの相違が周辺地山の挙動に

与える影響について検討を行った。本検討では呼び径800、3000、5000の円形管きよ、内寸□800×800mm、3,000×3,000mm、5,000×5,000mmの矩形函渠を推進施工した場合において地表面変形量に着目して比較した。

図-4に円形管きよ、図-5に矩形函渠における呼び径または内寸の相違による地表面変形挙動をそれぞれ示す。これらの結果より、それぞれの場合において内寸の増大とともに地表面沈下量と地表面沈下の範囲が増大することがわかる。

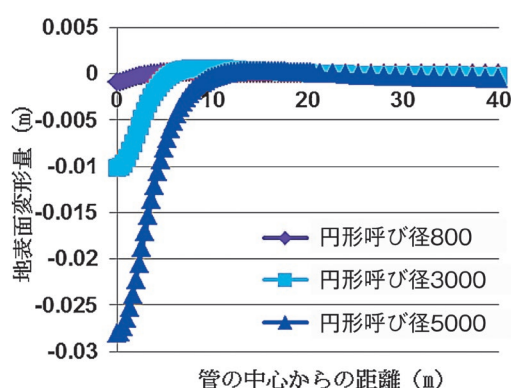


図-4 呼び径の相違による地表面変形量（円形管きよ）

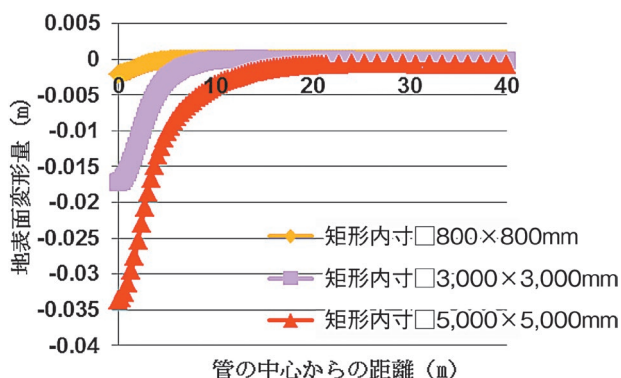


図-5 内寸の相違による地表面変形量（矩形函渠）

また、図-6に呼び径または内寸の相違による地表面沈下の範囲について示す。この結果より、管の中心から地表面沈下が生じる地点までの距離を地表面沈下の範囲とすると、円形管きよおよび矩形函渠のいずれの場合においても内寸の増大とともに地表面沈下の範囲は増大するが、矩形函渠の場合の方が内寸の増大に伴う地表面沈下の範囲が大きいことがわかる。また、円形管きよの場合は呼び径の増大に伴い地表面沈下の範囲が線

形に増大しているのに対し、矩形函渠の場合は内寸の増大に伴い二次関数的に増大していることがわかる。このことから、矩形函渠の推進施工においては、施工する内寸の増大とともに、影響範囲が急激に増大するため、より広範囲の近接構造物にまで影響が及ぶ可能性があると考えられる。

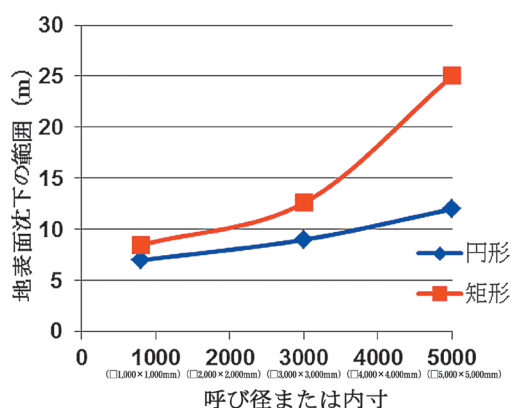


図-6 呼び径または内寸の相違による地表面沈下の範囲

2.3 滑材の性状の相違による

周辺地山挙動の変化に関する検討

推進施工において、テールボイドに注入する滑材は推進する際の摩擦抵抗の低減効果とともに、テールボイド自体を保持するといった点で重要な役割を果たすものである⁵⁾。本節では、この滑材の中でも推進施工において管の大きさや地山によらず幅広く適用されている固結型滑材を用いて、その性状の相違による周辺地山挙動の変化について検討した。なお、本検討では固結後の強度が異なる3種類の固結型滑材を用いており、固結後のヤング率の比は1：235：1,000である。これらの滑材をヤング率の小さい方から滑材（弱）、滑材（中）、滑材（強）としてそれぞれを用いた場合における地表面変形挙動を比較した。表-2に本検討に用いた固結型滑材の入力パラメータを示す。ここでは、強度が増

表-2 固結型滑材の入力パラメータ

	滑材 (弱)	滑材 (中)	滑材 (強)
ヤング率：E (MPa)	9.8×10^4	0.23	0.98
ポアソン比： ν (-)	0.49	0.41	0.30
単位体積重量： γ (MN/m ³)	0.022	0.022	0.022

大するとともにヤング率が増大することから強度の大小はヤング率の大小として表現した。また、検討には内寸□5,000×5,000mmの矩形函渠を用いた。

図-7に滑材の性状の相違による地表面変形量の解析結果を示す。この図から、滑材（弱）よりも滑材（中）、滑材（強）を用いた場合の方が管中心部の地表面沈下が抑制されていることがわかる。これは、滑材（弱）と比して滑材（中）および、滑材（強）の方が固結後の強度が大きいため、テールボイド天端部の沈下が抑制されたことに起因すると考えられる。また、滑材（中）と滑材（強）を用いた場合の地表面変形量の差は、滑材（弱）と滑材（中）を用いた場合の差と比して、はるかに小さいことがわかる。また、いずれの滑材を用いた場合においても、地表面沈下の範囲は、ほぼ同程度であった。このことから、固結後に強度をもつ固結型滑材を施工に用いることで管中心部の地表面変形をある程度抑制することができるが、滑材の強度が一定値以上の強度になると、滑材強度を増大させたとしても、滑材による地表面変形の抑制効果を増大させることは困難であることがわかる。以上の結果より、大断面矩形推進施工時に管中心部の地表面変形を許容値以内に抑制することが困難であると推測される場合、先受け工法や薬液注入工法等の補助工法によるさらなる沈下抑制対策が必要であることが考えられる。

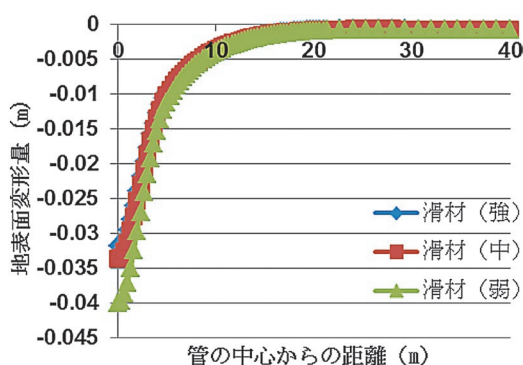


図-7 滑材の性状の相違による地表面変形量

2.4 矩形と円形形状による地山変状に関するまとめ

本節では、二次元応力解析によって大断面矩形推進における周辺地山の挙動を把握するとともに、円形管きよと比較した場合の地山挙動の変化および呼び径の相違

による周辺地山挙動の変化に関する検討を行った。また、大断面推進施工の際、テールボイド変形に起因した周辺地山の变形が生じる可能性があり、テールボイドに注入する滑材に起因したテールボイド変形が周辺地山の变形を引き起こす可能性があるため、滑材の性状の相違による周辺地山の挙動の変化に関する検討をあわせて行った。

その結果、矩形函渠を推進施工する場合、円形管きよと比して管周辺の地山は大きく沈下し、その沈下範囲も広範囲に及ぶことが明らかとなった。また、大口径の矩形函渠の推進施工になるほど、これらの影響は円形管きよの場合と比して急激に増大するため、影響範囲を考慮した管きよの設計が必要であることが示された。さらに、矩形推進の際、テールボイドに滑材を注入後すぐに強度発現する固結型滑材を用いることで、ある程度管中心部の地表面沈下を抑制することができるが、滑材の強度が一定値を超えるとそれ以上の地表面沈下の抑制効果が認められなくなることがわかった。

3 大断面推進工法における異なる形状を有する上部半断面掘削工法の適用性

3.1 はじめに

大断面推進工法を、小土被り条件下で適用することが求められているが、小土被り条件下では、地表面沈下など、周辺環境への影響が懸念されている。そのような影響を軽減させる施工法として、上部半断面掘削工法の適用が期待されている。さらに、小土被り条件下のバリアフリー地下通路の換気設備の構築には、矩形断面よりも管きよ上部の形状がアーチ屋根形や三角屋根形の方が、断面の小さな換気設備を配置できるという意味で目的に応じた必要断面を確保できる。

以上のような背景から、本章では、三次元応力解析ソフトウェア3D-σを用いた数値解析により、大断面推進工法における上部半断面掘削工法の効果ならびに異なる上部掘削断面形状による周辺地山への影響について種々検討を行った結果について述べる。

3.2 解析方法

本節では、上部半断面掘削工法施工時の周辺地山の挙動を明らかにするため、三次元応力解析ソフト3D-

σ を用いて種々検討を行った結果について示す。解析では、1STEPを2.5m掘削とし、10回STEPを繰り返すことで25mまで推進した。また、掘進機の大きさは、実際の掘進機の寸法に基づき設定した。図-8 (a)、(b)に数値解析モデルおよび掘削工程のモデル図を示す。

また、解析に用いた入力物性値を表-3に示す。解析には、関東ローム層を想定した一般的な物性値を用いている。

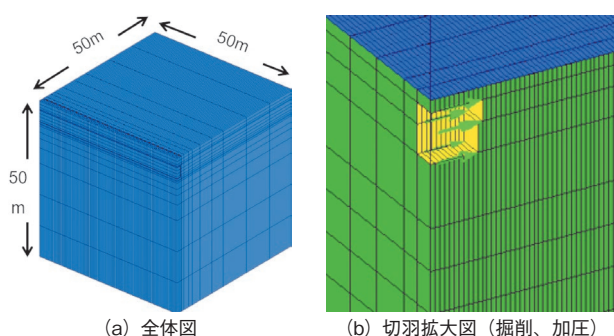


図-8 数値解析モデルおよび掘削工程モデル

表-3 入力物性値

	地山
ヤング率: E (MPa)	5.0
ポアソン比: ν (-)	0.3
単位体積重量: γ (MN/m ³)	0.021

3.3 異なる断面形状による

周辺地山への影響に関する検討

(1) 3種類の異なる断面形状が地盤変状に及ぼす影響

本項では、上部判断面掘削工法を適用せずに25m掘削を行った際のそれぞれの断面形状による周辺地山への影響を比較する。図-9は土被り3mにおける地表面変位量の結果である。地表面の沈下量については、

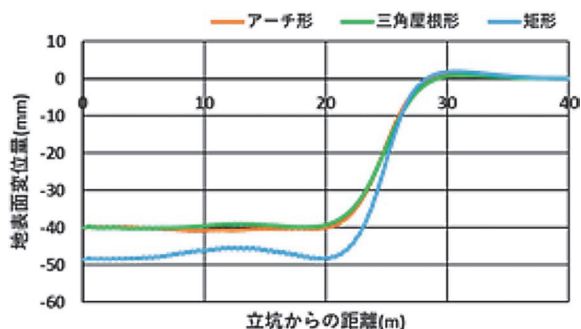


図-9 地下構造物直上の地表面変位量 (土被り3m)

アーチ屋根形と三角屋根形に大きな差は見られず、矩形がもっとも地表面沈下量が多いことがわかる。さらに、図-10、11に土被り5m、1mの結果をそれぞれ示す。土被り5mの結果については、土被り3mと同様、矩形と比較してアーチ屋根形・三角屋根形の沈下は抑制され、2つの断面に大きな差は認められなかった。一方で、土被り1mについては3つの形状の差が顕著に表れた。これらの結果より、矩形と比較してアーチ屋根形・三角屋根形は地表面沈下量が抑制されるといえる。また、その効果は土被り1mにおいて最も大きい。

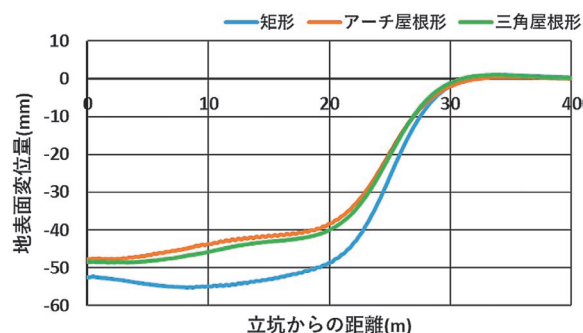


図-10 地下構造物直上の地表面変位量 (土被り5m)

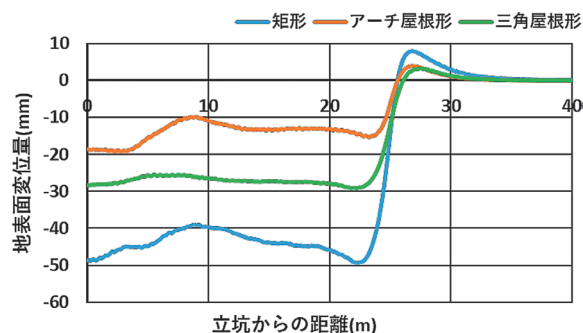


図-11 地下構造物直上の地表面変位量 (土被り1m)

次に、図-12に示す土被り1mにおける結果より、地表面の沈下量が0mmになる地点にはほとんど違いがないため、地表面変形の影響範囲については差がないと考えられる。また、図-11に示した結果より、地下構造物直上ではアーチ屋根形が最も沈下量が小さかったが、図-12によると、地下構造物直上から5m以上離れると三角屋根形の沈下量が最も小さいことがわかる。以上より、埋設する推進管については、側面部や屋根部の平面部の厚さを増大させるなどの補強対策が必要となることが考えられる。

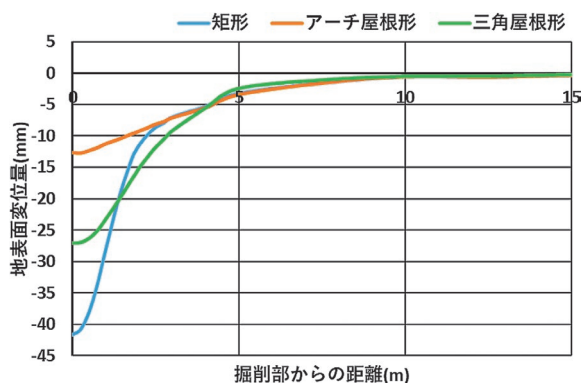


図-12 解析モデル端面から12.5m地点の横断方向の地表面変位量（土被り1 m）

(2) 先行部の長さによる

周辺地山への影響に関する検討

本項では上部半断面掘削工法を用い、先行部の長さを変えることで生じる周辺地山への影響の変化について検討した結果を示す。先行部の長さは0m、0.5m、1.0m、1.5mに設定した。

図-13～15は矩形、アーチ屋根形、三角屋根形の先行部長さによる地表面変位量の結果を示している。また、土被りが大きくなるほど、地表面沈下量が小さくなる傾向にある。同図より、3つの形状全てにおいて先行部を長くすることで地表面の沈下が抑制される結果が得られた。なお、上部半断面掘削工法を用いた場合もアーチ屋根形、三角屋根形では矩形の場合より地表面沈下量が小さい。

また、解析モデル端面から12.5m地点の横断方向の地表面変位量においてもアーチ屋根形、三角屋根形の結果は矩形と同じような傾向が見られることも別途、示されており、3つの形状全てにおいて先行部を長くすることで周辺の地表面への影響を抑制することができると考えられる。以上の結果より、上部半断面掘削工法を用いることで周辺地山への影響を小さくすることができることが確認されたため、アーチ屋根形・三角屋根形でも上部半断面掘削工法の適用の優位性が示されたといえる。さらに、先行部を長くすることで、その効果を発揮することも示された。このような結果が得られた要因としては、上半部を先行させることで傘のような役割となり下半部の掘削における安定性が向上すると考えられる。

以上の結果より、断面形状として矩形と比較してアー

チ屋根形・三角屋根形は周辺地山への影響が抑制されることが示された。また、矩形、アーチ屋根形、三角屋根形のどの断面形状においても上部半断面掘削工法の適用による地表面変形の抑制を確認することができた。すなわち、小土被り条件下において、上部半断面掘削工法を適用したアーチ屋根形・三角屋根形の断面形状による施工は周辺地山の変形量を低減できる有用な工法であることが示された。

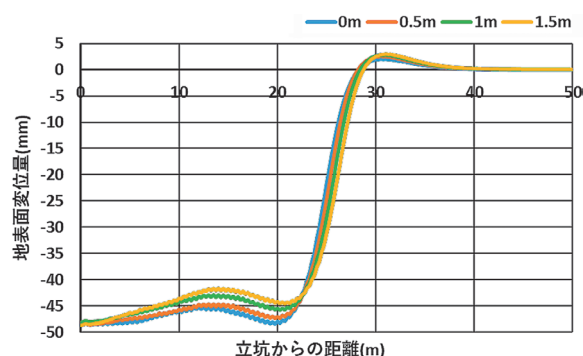


図-13 地下構造物直上の地表面変位量（矩形）

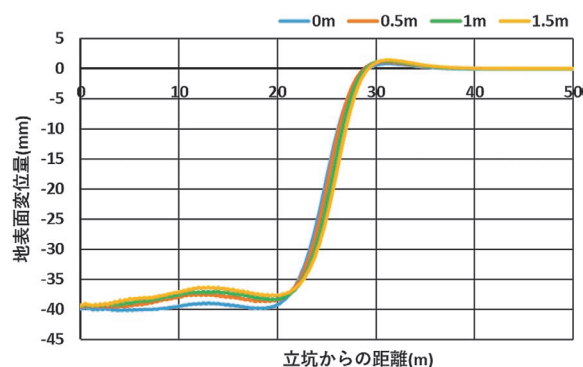


図-14 地下構造物直上の地表面変位量（アーチ屋根形）

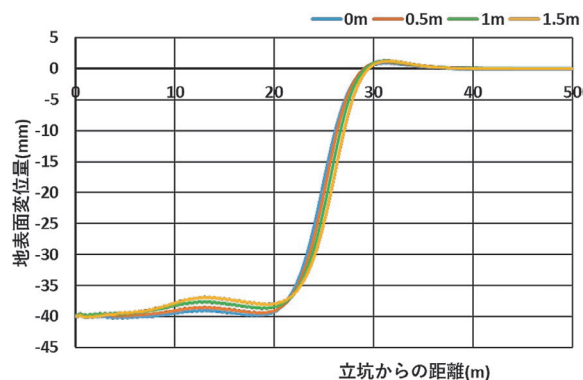


図-15 地下構造物直上の地表面変位量（三角屋根形）

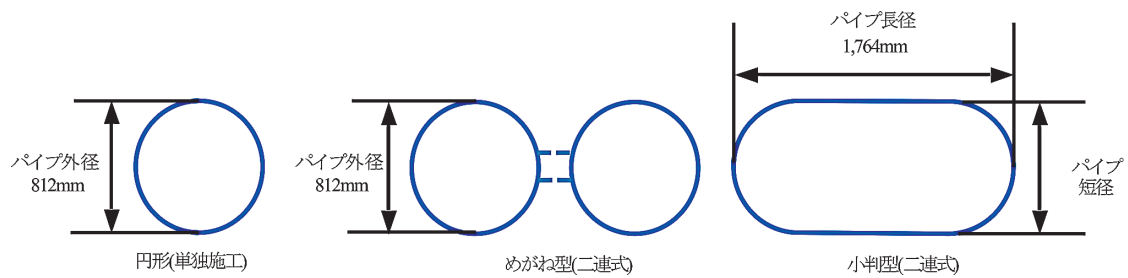


図-16 パイプルーフ掘削断面

4 新規構造物施工時の補助工法としての推進工法

次に、多様な断面を構築する推進工法の具体例として、パイプルーフ工法ならびにアンダーピニング工法を取り上げる。既存構造物が隣接する状況で新規構造物を施工する場合、新規構造物の施工に伴う既存構造物への影響を低減する施工方式を採用する必要があるが、そのひとつとして推進工法を用いたパイプルーフ工法やアンダーピニング工法の適用が着目されている。

パイプルーフ工法は、ボーリング機械によりトンネル上部周辺にパイプを打設してルーフを形成し、トンネル施工における地山の緩みを抑制するトンネル掘削の先受け工法として発展してきた工法であるが、このパイプの打設に推進工法を用いることにより、適用土質範囲の拡大や施工延長の増大、さらに周辺地山への影響もより少なくなるという長所が数多く報告されている⁶⁾。

推進工法による埋設管（パイプ）の打設においては、通常複数のパイプを1台の掘進機で一つずつ順次推進する。しかし、大規模なパイプルーフ工法の施工では埋設パイプの数が増加し、一つずつの施工では推進総日数が長くなるという欠点がある。そのため、工期の短縮とそれに伴う工費の削減を図る目的で、多連式推進工法のニーズが高まっている。

トンネル本体がセグメントを組み上げることによって構築されるシールド工法においては、異形断面トンネルや複数のトンネルを同時施工する多連式を用いて施工を行った事例が多数報告されている。一方、推進工法では掘進機の後続に既製の埋設管を継ぎ足すことで施工するため、異形断面や多連式による施工が比較的困難であり、また多数のパイプを打設しなければならないため、前述のように推進日数が長くなり工期が延長してしまう。

そのため、図-16に概念的に示すようなパイプルーフ工法への多連式推進工法を用いた施工事例はこれまでにないが、工期の短縮とそれに伴う工費の削減が図れるため、今後需要が増大すると考えられている。しかし、施工事例もないため地盤変形挙動の解明も学術的に不十分であり、今後学術的なデータを蓄積していく必要がある。

アンダーピニング工法とは、既存構造物の下部および周囲を新規構造物の施工の前に補強することで、新規構造物の施工に伴う既存構造物の沈下などを抑制する工法の総称である。このアンダーピニング工法への推進工法の適用に際し、地下の既存構造物の下部に新規構造物の施工を想定した場合、事前に新規構造物の周囲にパイプなどの鋼管を推進工法により打設することで、新規構造物の施工に伴う周辺地山への影響を低減させるという効果が期待できる。そこで筆者らは、図-17の模式図をもとに、既存構造物および周辺地山の变形挙動について、パイプの有無の影響、従来のアンダーピニング工法と推進工法を用いたアンダーピニング工法適用時の比較、パイプと新規構造物間の距離、パイプ

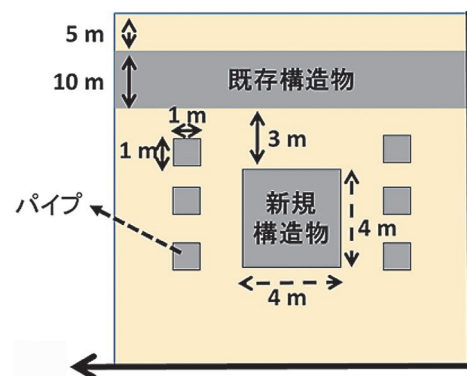


図-17 アンダーピニング工法によるパイプの配置
(各パイプの上下間隔は1 m)

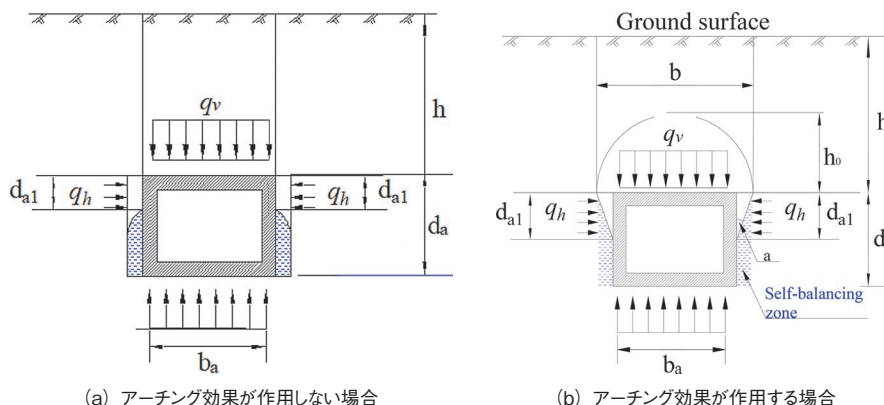


図-18 ボックスカルバートと地山の接触モデル

の打設長さの影響等に関する理論的検討を試みた。その結果、推進工法を用いたアンダーピニング工法を施工することにより、既存構造物への影響のみならず周辺地山への影響をも低減できることが示されたので、今後パイプルーフ工法との併用工法についても、十分適用の可能性があると予想される。

5 深度の異なる大断面推進工法の地山変状モデルと推進力ならびにボックスカルバートへの作用荷重

ボックスカルバートと地山の接触状態および滑材の分布状況は、推進時の摩擦抵抗に影響する重要な要因となる。既存の研究によると、トンネルの土圧は不均一であり、オーバカットに充填した滑材が壁面下部では地山と混合しやすくなり、ボックスカルバートの高さが大きくなるほどその影響が顕著に認められる。したがって、側面のオーバカットに滑材が均一に充填されている理想的な状態では、側壁部には滑材の影響による小さな土圧分布の領域があると仮定され側壁部全体の摩擦力が低減されると考えられる⁷⁾。

さらに、施工深度が大きくなると、矩形函渠の天端部には直土圧ではなくアーチアクション効果に伴う土圧が作用することになり、天端部に作用する土圧が小さくなる。この施工深度の大小に伴う天端部への土荷重の作用の相違ならびに側壁部における滑材のオーバカットへの充填状況を考慮したボックスカルバートと地山の接触モデルを図-18 (a)、(b) に示す。図-18 (a) は天端部に直土圧が作用する場合、図-18 (b) はアーチ

アクション効果を考慮する場合のボックスカルバートと地山の相互作用を示したものである。

先述のアーチング効果を考慮しない場合と異なる点は、ボックスカルバートに作用する直土圧の計算である。ここで、鉛直方向の土圧 q_v は以下の (1) 式によって求められる。

$$q_v = \frac{b \left(\gamma - \frac{c}{b} \right)}{2K \tan \varphi} \left(1 - e^{-K \tan(\varphi) \frac{h}{b}} \right) + e^{-K \tan(\varphi) \frac{h}{b}} \quad \dots (1)$$

さらに、この場合の水平方向の土圧 q_h は、水平方向の土圧係数 K_0 を用いて (2) 式で算出される。

$$q_h = K_0 q_v \quad \dots (2)$$

また、実際の現場では、前述したような水平方向の土圧の影響を受けない領域は側壁部全体に存在しているのではなく、ボックスカルバートの高さ方向に局所的に分布している。そこで、ボックスカルバートと地山の接触状態を評価するために接触率 λ を導入し、(3) 式により算出する。 $\lambda = 1$ のとき、滑材が存在せず側壁部の前面が水平方向の土圧を受けており、摩擦抵抗は最も大きくなる。一方で、 λ が 0 のとき、側壁部は完全に滑材で満たされており、水平土圧による摩擦抵抗は無視できる状態である。

$$\lambda = \frac{d_{a1}}{d_a} (0 \leq \lambda \leq 1) \quad \dots (3)$$

表－4 既存の推進力算定式

モデル略称	推進力算定式	備考
JSTT ⁹⁾	$F_{fric} = \mu' L \beta \{ (B_c q + W) + B_c C \}$ $\mu' = \tan(\varphi/2)$	β : 推進力低減係数 B_c : 管の外周 q : 垂直応力 W : 管の重量 C : 粘着力 L : 推進距離
Bennett ¹⁰⁾	$F_{fric} C_a d_a \gamma L \tan(C_f \varphi) B_c$	C_a : 低減係数 C_f : 摩擦低減係数 d_a : 掘進機の高さ
Chapman ¹¹⁾	$F_{fric} = 10(a + 0.38 \times b_a)L$	b_a : 掘進機の幅
Weber ¹²⁾	$F_{fric} = \mu \gamma L H \left[(K b_a + K_o d_a) + K_o \frac{d_a^2}{2H(b_a + d_a)} \right]$	K_a : 水平方向の土圧係数 K : 土圧係数 H : 土被り μ : 摩擦係数
Staheli ¹³⁾	$F_{fric} = \mu \frac{0.5 b_a \gamma \cos(45^\circ + 0.5\varphi)}{\tan \varphi} B_c L$	γ : 単位体積重量 φ : 内部摩擦角

(1) ～ (3) 式を踏まえ、矩形推進工法における摩擦力予測式の新たなモデルとして、(4) 式が導出される。なお、推進距離が長いことを考慮し、滑材と側壁の接触界面抵抗 τ を考慮した。 τ は、ベキ乗則流体モデルにより、(5) 式のように計算した⁸⁾。

$$F_{fric} = \mu L (q_v (2b_a + K_o \lambda d_a) + W) + 2L(1 - \lambda) d_a \tau \quad (4)$$

$$\tau = \xi \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^m \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ξ と m は滑材の粘性係数であり、本研究においては $\xi = 1.31$ 、 $m = 0.5$ を用いている。また、 v は推進速度 (mm/min)、 ε は滑材の厚さ (mm) である。

このような仮定の下で、現場から得られた実際のデータに基づき、筆者等は矩形推進工法を対象としたこれまで種々提案されてきた既存のモデル (以下、既存モデル) の検討および新たな摩擦力予測式の提案・検討を行っている。表－4に検討に用いた既存モデルの例を示す。既存のモデルは、①ボックスカルバートに作用する土圧等を理論的に導出したJSTTモデル⁹⁾、②現場データに基づく統計的評価により構築されたBennet¹⁰⁾あるいはChapmanモデル¹¹⁾、③実験結果に基づいて構築されたWeber¹²⁾あるいはStaheliモデル¹³⁾、の3種類に大別されている。これらの既存モデルを用いて摩擦力を計算した結果、既存モデルでは摩擦力を過大に予測する傾向が見られたため、滑材による摩擦力低減効果を踏まえた新たな摩擦力予測式を提案した。この予測式では、

ボックスカルバート側壁部の滑材の分布状態を示すパラメータとして、(3) 式に示すボックスカルバートと地山の接触率 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) を採用した。このモデルによる摩擦力予測値と実測値の比較においては、予測結果の精度は既存モデルと比較して大幅に向上した。縦横比が小さい場合 (高さが幅よりも小さい場合) においては $\lambda = 0$ の予測結果が最も近い値を示し、縦横比が大きい場合 (幅より高さが大きい場合) においては $\lambda = 1$ の場合の予測結果が最も近い値を示した。このことから、ボックスカルバートの形状が縦に長くなるにつれてオーバカットに充填された滑材が地山成分に置き換えられている状態になっている傾向にあるという経験的な実績結果を裏付けている。さらに、掘削断面積を統一した場合であっても新モデルと同様にボックスカルバートの縦の比率を増加させることで、オーバカットに充填された滑材が地山成分に置き換えられている状態になっている傾向にあることが確認された。

また、現在までの研究成果より、矩形推進工法において図－18 (a) のようにボックスカルバートに直土圧が作用する場合と図－18 (b) のようにボックスカルバート上部の直土圧が作用せず、アーチアクション効果が発揮する土被り比 (ボックスカルバートの高さ $\times$ 土被り深さの比) が1 : 3程度であることが経験的に明らかにされている。しかしながら、このアーチアクション効果が発揮する土被り深さは、土質条件、地下水条件等に大きく左右される。このため、敷設されたボックスカルバートが土圧により破壊しない許容応力で管路を設計した場合、直土圧に耐

え得るボックスカルバート厚を準備する必要があるが、実際には準備した以上の土圧が作用する可能性が極めて小さいと想定されるため、安全性とコストを両立させた函体構造の設計に際して検討の余地を残している。

6 まとめ

推進工法による管きょの施工は、工事公害が少なく低コストであるため脚光を浴びており、今後、大断面の管きょの推進施工も見込まれている。また、近接構造物による制約や地形条件による制約などから、多様な断面を構築する推進工法の需要が増大している。このような社会的背景に基づき、本解説では国内外で供用されている地下インフラの構築に利用されている推進工法の多様な断面構築に向けたいくつかの検討例について言及した。

近年、推進工法は、シールド工法との融合等、互いの特徴を活かした施工も行われ、また、呼び径3000以上の超大口径推進管の開発により大断面での適用拡大が行われている⁸⁾。さらに、下水道分野においては、老朽化や損傷した管きょを撤去しながら新しい管に置換える改築推進など維持管理時代に対応した技術も誕生している¹⁴⁾。推進工法は、重要構造物が埋設されている都市部での採用が多いことや、今後さらなる超大断面化、長距離化および急曲線化が発展することが予想される。

今後、推進工法の核心的技術の保護をはじめ、輻輳化した都市部の地下構造物の設計には、多様な断面を有する管きょの敷設に関する需要が増大すると予想されている。このため、我が国では多様な断面を有する埋設管敷設に推進工法が積極的に展開されつつあることから、これらのさらなる技術発展が今後の活路として切り開かれると強く期待する。

【謝辞】

本解説をまとめるにあたり、(株)アルファシビルエンジニアリングの松元文彦本部長ならびに森田智博士には、資料提供ならびに多大なるご助言をいただいた。また、(公社)日本推進技術協会の千田尚博士には、本解説の内容についてご指導いただいた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 「推進工法講座基礎知識編」(社)日本下水道管渠推進技術協会、2p (2002年)
- 2) 「高齢化の状況及び高齢社会対策の実施の状況に関する年次報告」内閣府政策統括官(共生社会政策担当)付高齢社会対策担当、pp2-12 (2015年)
- 3) 「地下空間の有効的な活用促進方策の検討に関する調査報告」国土交通省都市・地域整備局人都市圏整備課 pp1-5 (2007年)
- 4) 「推進工法の歴史と現状」月刊推進技術 pp2-3 (1987年11月)
- 5) 「Behavior of Lubricant Injection into Over-cutting Area for Slurry Pipe Jacking」Shimada, H., Kawai, T., Sasaoka, T., Matsui, K., Ichinose, M., Fujita, S., and Yoshida, Y. Proceedings of No-Dig International Conference, Brisbane, on CD-ROM (2006年)
- 6) 「大容量送水管(奥平野工区)において 大深度地下使用法の全国初適用に向け、認可申請書を兵庫県知事に提出」神戸市HP (2007年)
- 7) 「P. Site-based Research in Pipe Jacking - Objectives, procedures and a Case History」 「Tunnelling & Underground Space Technology」 Milligan, G. W. E., & Norris, I. (Suppl.1) pp3-24 (1996年)
- 8) 「ボックスカルバート推進工法設計指針」(一社)ボックス推進工法技術協会 (2018年)
- 9) 「Box Jacking Method Design for Quantity Survey in Japan」 Japan Society for Trenchless Technology (1998年)
- 10) 「Jacking Loads and Ground Deformations Associated with Microtunneling」 Bennett, R. D. University of Illinois at Urbana-Champaign (1998年)
- 11) 「Prediction of Jacking Forces for Microtunnelling Operations」 「Tunnelling and Underground Space Technology」 Chapman, D. N., & Ichioka, Y. (SUPPL. 1) pp31-41 (1999年)
- 12) 「Experimentelle Untersuchungen in rolligem Boden zur Dimensionierung von Pressbohranlagen」 Weber, W. (1981年)
- 13) 「Jacking Force Prediction an Interface Friction Approach Based on Pipe Surface Roughness」 Staheli, K. School of Civil and Environmental Engineering, Ph.D, 385p (2006年)
- 14) 「“超大口径管推進工法”の施工計画」露崎他、日本プロジェクト・リサーチ (2005年)