

ボックスカルバート推進施工時の周辺地山の 安定性に関する研究 STUDY ON STABILITY OF SURROUNDING SOIL USING CULVERT PIPE JACKING

森田 智¹, 島田英樹², 松井紀久男³, 松元文彦⁴
Tomo MORITA, Hideki SHIMADA, Kikuo MATSUI, Fumihiko MATSUMOTO

In constructing infrastructure in urban area, rectangular pipes have been increasing gradually. Rectangular pipes are very efficient because cross-section area becomes larger, and maintenance of the lifeline becomes easier compare with circular pipes. And from the viewpoint of the influence to the neighbouring environment, there is a tendency to shift from open cut method to trenchless technology. This paper shows the result of a numerical analysis of the influence on the surrounding soil in case of rectangular pipe jacking with closed type machine, and examines the extent of the impact to the surrounding soil when compared to the circular pipe jacking which has many construction results.

Key Words : Pipe jacking method, Rectangular pipe, Stability of soil, numerical analysis

1. ボックスカルバート敷設に関する既往の技術

ボックスカルバートを敷設するに当たり, 以前から開削工法やシールド工法といった施工技術が多く用いられている。以下に, 既往の施工技術について示す。

(1) 開削工法

開削工法は, ボックスカルバートの布設に対して最もポピュラーな施工法であり, 経済的にも有効な工法である。布設箇所を路上より規定の深さまで掘削機械を用いて掘りおこし, カルバート布設後土砂を埋め戻し, 復旧を行う工法である。掘削深さに応じて土留め工を併用し, 施工を行う。

この工法では, 開削に伴い, 広範囲にわたる路上の占有が必要となり, 道路交通が存在する場所においては通行止めもしくは片側交互通行の措置が必要となり, 周辺環境に与える影響は非常に大きくなる。そのため, 現在地下通路構築が求められる市街地, 特に線路下の通路構築には適応することができないと判断できる。

(2) シールド工法

シールド工法は, シールドと呼ばれる掘進機で周辺土砂の崩壊を防ぎ, 前方で掘削を行いながら, でき上がった覆工体からジャッキ反力をとってシールドを前進させ, シールド後部のジャッキを戻した空間に, セグメントといわれる鉄筋コンクリート製や鋼製の工場で製作されたブロックを1リング分組み立てて覆工を行い, 地下空間を構築する工法である。現状ではほとんどのシールド工事が機械式密閉型による施工となっており, 掘進機構造を変更することであらゆる土質に対応可能であり, 高深度・長距離・急曲線施工と難条件化においても対応可能となっている。

しかし, シールド工事の特徴として, 1現場において掘進機を全損扱いとするため, 工事費に占める機械装置の割

キーワード: 推進工法, 矩形管, 地山の安定性, 数値解析

¹非会員 九州大学大学院 工学府地球資源システム工学専攻 博士後期課程

²正会員 九州大学大学院 工学研究院地球資源システム工学専攻 准教授

³正会員 九州大学大学院 工学研究院地球資源システム工学専攻 教授

⁴非会員 株式会社 アルファシビルエンジニアリング 技術開発部 計画課長

合が非常に高く、短距離推進では経済的な理由から採用されず、推進工事等によって施工されているのが現状である。このことから、シールド工法は、都市部における小規模地下通路の構築にとっては非経済的であり、適応する条件に限界があると考えられる。

(3)手掘り式推進工法（刃口推進工法）

手掘り式推進工法は、布設区間の両端に立坑を構築し、立坑に設置した元押ジャッキによりボックスカルバートを推進する。地山の掘削は刃口管と呼ばれる管列先端部にて土砂を人力にて掘削することで行われ、路上からの作業なしにボックスカルバートの布設が可能な工法である。ただし、土質条件として、掘削対象地盤の自立が前提となり、また地下水位下における施工においては止水用の地盤改良が必要となる。

都市部での施工の場合、地山が自立していない場合が多く、ほとんどのケースにおいては地盤改良が必要となる。そのような状況にもかかわらず、既設埋設物が地下に輻輳しているため、その影響により必要な断面を改良できないことが多い。そのような状況下にて施工を行った場合、推進に伴い、地山耐力の不足から地山の崩壊を招き、既設埋設物への影響や地表面の沈下・陥没等を引き起こし、周辺環境に甚大な影響を及ぼすことが考えられる。

以上のように、都市部における施工においては既設埋設物の影響、あるいは経済性の問題から適応できない可能性があると考えられる。そのため、密閉型矩形掘進機を用いて、推進工法により施工することが最も優位性のある施工法であると考えられる。表-1に従来工法の特徴を示す。

表-1 従来工法の特徴

工法名	長所	短所
開削工法	・機械装置を必要とせず経済的 ・施工・精度管理が容易	・高深度における布設に向かない ・施工時に開削部分の通行止めが必要 ・天候の影響を受ける
刃口推進工法	・路上の占有面積が比較的少なくて済む	・布設延長全てに地盤改良が必要 ・埋設物の影響で地盤改良が不完全となる場合がある ・延長により施工不能となる場合がある
シールド工法	・高深度における布設に対して有効 ・長距離施工が可能 ・どのような土質に対しても対応可能 ・地盤改良範囲が少なくて済む	・短距離における施工費が高価（1現場にて掘進機全損となるため）

2. 推進工法について

推進工法は掘進機により掘削した孔内を通して地中に管列を構築する技術であり、推進には発進立坑に設置した油圧ジャッキが用いられる。日本では泥水工法が地下に管列を非開削にて構築する工法として生み出された。

泥水工法では推進中、泥水と滑材が切羽と余掘り部（推進管と地山との間）に注入される。その後泥水が地山に充填し、その結果管外周の地盤が安定する。図-1に推進工法の概略図を示す¹⁾。

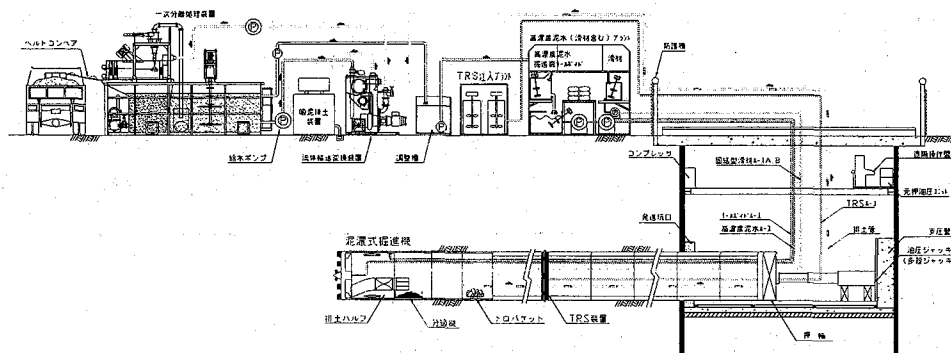


図-1 施工状況概略図

3. 密閉型矩形掘進機を用いた推進工法

密閉型矩形掘進機を用いた推進工法における施工状況概略図を図-2 に示す。道路の両端に構築された立坑より元押ジャッキを用いて推進力を順次推進管に伝達させながら掘進を行う。地盤改良工は両立坑付近のみにて施工可能である。本工法は推進工法であるため、使用される掘進機および設備は全て損料扱いとなり、短距離施工においても十分経済的である。

掘進機は密閉構造とし、切羽での土圧管理が可能なものとなっている。切羽における土圧管理により掘削土砂の取り込み過ぎや過大な押し付け力による地盤の隆起等もほとんど無く、地表面への影響を少なくできる。この事は、実証実験においても証明されており、 $\square 850\text{mm} \times 850\text{mm}$ 矩形掘進機にて低土被り条件 ($H=1.5D_0$) を推進した結果、地表の変位量は最大で 5mm 程度であった²⁾。以上のことから、上記掘進機を用いた推進工法によりボックスカルバートの推進を行った際の地盤変状等について数値解析にて検討を行った。

4. 数値解析

(1) 解析について

推進工法における矩形管の敷設に伴う地山の挙動を解明するため、3次元有限要素解析を行った。解析ソフトとしては、トンネル掘削等の弾塑性解析に適した3次元応力解析ソフト 3D- σ を用い、破壊規準は Mohr-Coulomb の破壊規準を適用した。

(2) 解析条件

a) 解析モデル

本解析では、円形、矩形の掘削断面について行った。その際、各掘削断面において、施工による地山の挙動を把握するため、切羽に掘削泥水圧を作用させて施工するモデルについて、土被りを 500mm, 1,000mm, 2,000mm と変化させ、計6モデルについての解析を行った。解析モデルは、円形、矩形ともに H/D を 0.5, 1, 2, 4 に変化させ、それぞれ4種類、計8モデルで解析した。さらに、掘削されてない状態から推進長 1,000mm を1ステップとして総延長 5,000mm までの計6ステップを掘削した。図-3 および図-4 に矩形および円形モデルの断面図およびメッシュを示す。

なお、掘削断面が共通なモデルについては、解析対象、メッシュ、STEP1 (初期応力状態) は共通である。さらに、掘進状況についての解析を行うため、加圧掘削モデルを作成し検討を行った。

加圧掘削モデルについては、STEP1 を初期応力状態とし、以降カッター室部分を掘削と同時に加圧するという工程を繰り返し、掘削長が 5D に達した時点で施工終了とした。円形モデル、矩形モデルともに STEP6 で施工終了とした。

カッター室の大きさ (奥行: z 方向) は、実際の掘進機の寸法に基づき、円形、矩形ともに $Z=400\text{mm}$ とした。切羽圧は、切羽圧=土被り圧+0.02MPa~0.05MPa によって求め、円形モデルにおいては $P=\text{土被り圧}+0.05\text{MPa}$ 、矩形モデルにおいては $P=\text{土被り圧}+0.02\text{MPa}$ とした。切羽通過後は、切羽圧を除去すると同時に、シェル要素によってテールボイド層を構築し、円形モデルにおいては $h=30\text{mm}$ 、矩形モデルにおいては $h=25\text{mm}$ とした。図-5~7 に各ステップにおける切羽拡大図を、図-8 に加圧掘削モデルにおける最終ステップ鳥瞰図をそれぞれ示す。

また、矩形モデルにおいても円形同様のステップにて解析を行った。

b) 解析に用いたパラメータ

解析に用いたパラメータは表-2 および表-3 のように設定した。

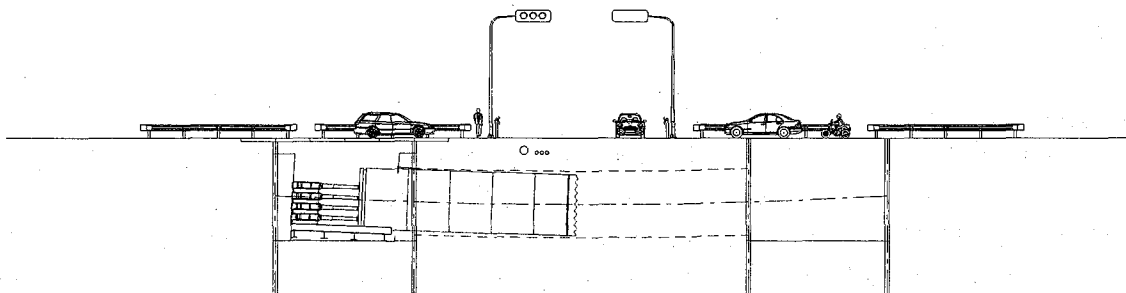


図-2 施工状況概略図

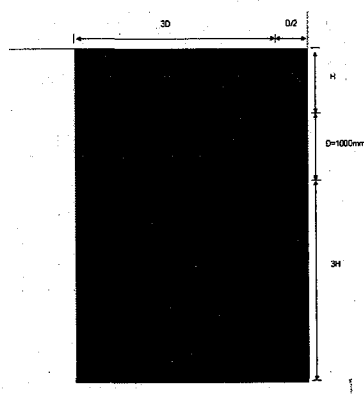


図-3 矩形モデル x-y 断面図およびメッシュ

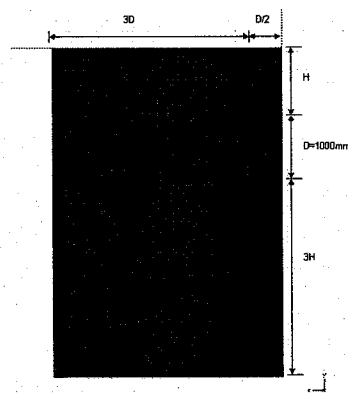


図-4 円形モデル x-y 断面図およびメッシュ



図-5 初期応力状態 (STEP1)

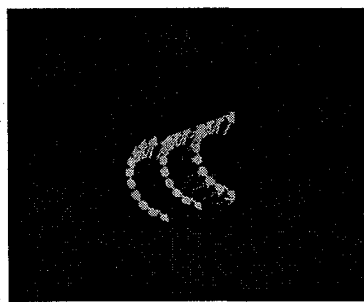


図-6 カッター室加圧掘削 (STEP2)

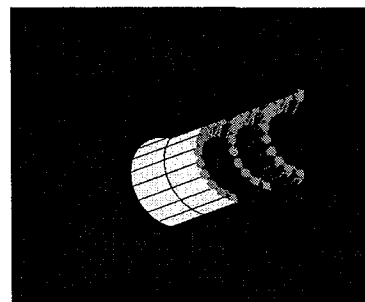


図-7 テールボイド構築 (STEP3)

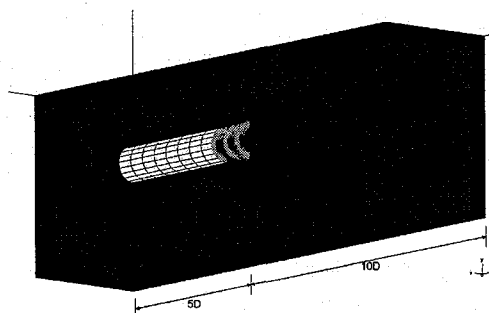


図-8 加圧掘削モデル最終STEP鳥瞰図

表-2 ボディ材入力物性値

材料名	ヤング率 (MPa)	ポアソン比 ν (-)	比重 ρ (MN/m ³)	せん断強度 (MPa)	摩擦角 ϕ (deg)	引張強度 (MPa)	硬化パラメータ (-)	側圧係数 λ (-)	側圧係数 Z (-)
砂質土	33.4	0.36	0.0189	0.01048	41.8	0.0234	0	0.5	0.5

表-3 シェル材入力物性値

材料名	ヤング率 (MPa)	ポアソン比 ν (-)	厚さ(mm)	
			円形	矩形
DKI α	0.121	0.4	30	25

5. 解析結果および考察

(1) 矩形掘進時の地表面沈下量への土被りの影響

図-9 に解析結果の一例を示す。この図より、土被りが深くなるとともに、切羽部での隆起量は小さくなる。また、掘進機通過後のテールボイド沈下においても低い値で収束しており、良好な結果が得られることが分かる。

切羽部において隆起が見られるのは、受動抵抗が鉛直方向に作用することにより、地表方向に進展したすべり線が認められ、砂質土のせん断変形による前方の隆起が発生することに起因していると考えられる。泥濃式推進工法では、掘削と同時に土圧+地下水圧と切羽圧とを平衡させ、応力の開放を防止することが理想的である。したがっ

て、切羽における過剰な圧力は地表面への影響を大きくするため、適切な切羽圧力管理を行う必要があると考える。

(2) 矩形掘進時の進捗に伴う地表面沈下量の変化

解析結果を図-10 に示す。この結果から推進の進捗に伴い、切羽圧およびその残圧から解放されたテールボイド部においては沈下が生じることが分かる。

しかし、その沈下量は約 0.5mm となっており、この工法は周辺地山の変位に対して非常に優位性のある工法であると考えられる。

(3) 矩形掘進時の応力状況および破壊接近度

地中応力状況についての解析結果を図-11 に、破壊接近度についての解析結果を図-12 にそれぞれ示す。解析の結果から、矩形掘進時には掘削角部において引張応力が増大し、破壊を生じやすくなることが分かる。この傾向は土被りが浅くなるほど顕著になっている。また、破壊接近度についても引張応力の影響を受け、土被りが浅くなるほど角部における破壊領域が広がっている。

最大主応力を見ていくと、その形状から掘削断面に垂直方向の切羽圧が作用するため、角部においては引張応力が発生していると考えられる。土被りによりその応力が大きくなるのは、土荷重が土被りの減少に伴い低下し、その分垂直方向の切羽圧が卓越するためであると考ええる。

また、破壊接近度については、土被りが浅いモデルでは掘削機直上で破壊領域が認められる。これは、地山と切羽が受動状態にあり、すべり線が地表面まで進展し地表面を隆起させるためである。このことにより、地表面での破壊に影響を及ぼしていると考えられる。

以上のことから、矩形管では角部で引張応力が集中するため、この部分から破壊を生じにくくするために、角部に丸みをもたせる対策や切羽圧の管理によって地表面での過剰隆起を抑えることが必要である。

(4) 矩形および円形掘進時の地表面沈下量の比較

図-13 に矩形および円形掘進時の地表面沈下量を示す。この結果は、土被り比 $H/D=4$ 、掘進距離 5000mm の条件

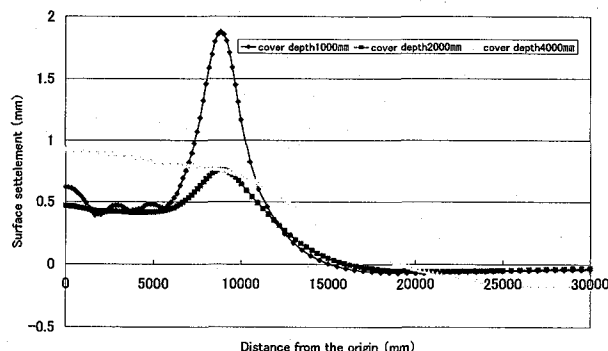


図-9 矩形掘進時の地表面沈下量
(土被りによる比較)

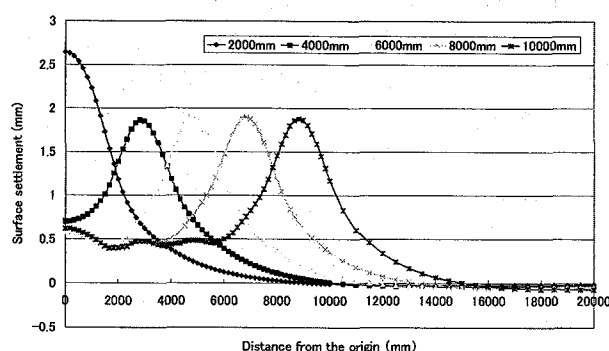


図-10 矩形掘進時の地表面沈下量
(推進の進捗による比較)

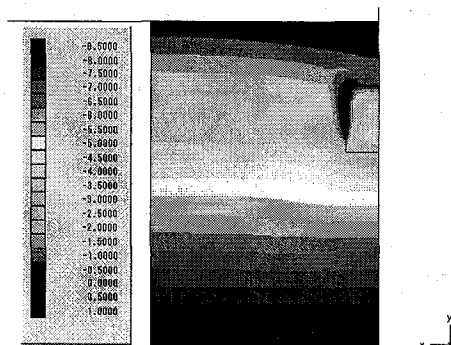


図-11 矩形掘進時の応力分布

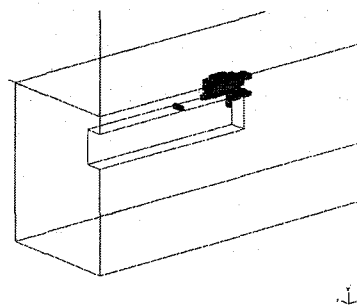


図-12 矩形掘進時の破壊接近度

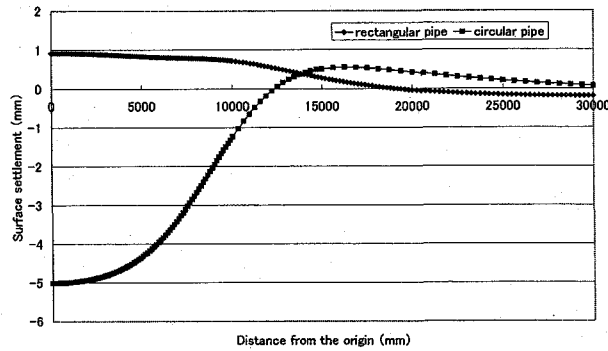


図-13 矩形および円形掘進時の地表面沈下量

における結果である。この結果から、円形掘進機では最大変位量が -5mm であるのに対し、矩形掘進機は $+1\text{mm}$ となっている。この要因としては、矩形掘進時における切羽での圧力伝播方向が掘削断面に対して垂直であり、上部地山を保持する形で効果的な圧力が作用するためであると考えられる。一方で、円形掘進時には掘削断面が円となり、それに対して垂直方向への圧力伝播となるため、地山の保持に対する圧力が外周方向に分散するため、上部地山の保持が不完全となり沈下を生じてしまうと思われる。

このことから、矩形掘進機において均一なカッター室を構築し、圧力伝播が可能な性状とすることで、地山の沈下に対しては非常に有効であると考えられる。

6. まとめ

本研究では、矩形管を密閉型掘進機を用いて推進した際の周辺地山への影響および地表面への影響について数値解析を行った。その結果をまとめると以下のようである。

- (1) 矩形掘進による地表面への影響は、地山への切羽圧が直接的に地山の保持効果として作用するため、円形掘進と比較しても良好で十分に施工できると考えられる。
- (2) 土破りに対しては、土破りが深くなるほど地表面への影響は少なく、また破壊領域も減少する傾向がある。
- (3) 推進の進捗に伴い、テールボイド沈下が発生する。その沈下量を低減するためにも、余掘り部の管理が十分必要となる。
- (4) 掘削角部においては引張応力が集中するため、破壊が生じやすくなる。そのため、角部の掘削をハンチ構造とする掘削機構にするなど工夫があれば、より安定な掘削が可能となる。

7. おわりに

今回の研究により、密閉型矩形掘進機を使用した推進工法が非常に有効であることが分かった。しかし、今回の解析条件のような理想的な掘削を行うためには、①カッタービットによる全断面の連続的な掘削機構、②地山と切羽添加材との十分な攪拌・混合により切羽全体を、圧力伝播可能な良好な性状にする攪拌機構などが必要となる。

現状では、この機構を有する掘進機は数少なく、また今後求められるボックスカルバートの用途として、人が入坑して点検・修理が可能な共同溝や、人道として使用される地下通路などが挙げられる。このような大口径ボックスカルバートに対しても対応可能な掘進機の開発が望まれる。

参考文献

- 1) 酒井・時枝：超流セミシールド協会、「超流バランスセミシールド工法 設計指針（案）」，p.8, 2006
- 2) 酒井栄治ら，推進工法における土破りの浅い掘進地盤への影響に関する実証実験，第14回非開削技術研究発表会論文集，p.167, 2003