

ボックスカルバート推進時の推進力伝達に関する数値解析的研究

森田 智^{1*}・島田 英樹¹・笹岡 孝司¹・松井 紀久男¹
・松元 文彦²・酒井 栄治²

¹九州大学大学院 工学研究院地球資源システム工学部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

²株式会社アルファシビルエンジニアリング 技術開発部 (〒812-0015 福岡県福岡市博多区山王 1-1-18)

*E-mail: arfa@oregano.ocn.ne.jp

昨今、雨水対策工事や下水道整備工事において、ボックスカルバートを用いた矩形管路の構築が徐々に増えてきている。これは、同一径で比較した場合、円形管よりも内空断面が増大できることが理由として考えられる。従来、矩形管路の構築は、主として開削工法やシールド工法、オープンシールド工法などで行われてきたが、近年、都市部を中心とした輻輳化する埋設物や公共事業の縮小傾向から推進工法での施工が徐々に増えつつある。一方で、今後は施工箇所が地方都市へ移行することで砂礫層・岩盤層など厳しい土質への対応が必要となることが予想される。

本報告では、ボックスカルバート函体に負荷される推進力の上昇および曲線推進時の偏位した推進力の伝達がボックスカルバート函体に与える影響について数値解析にて検討した結果について述べる。

Key Words: pipe jacking method, rectangular pipe jacking, Box Culvert, numerical analysis

1. はじめに

昨今、雨水対策工事や下水道整備工事において、ボックスカルバートを用いた矩形管路の構築が徐々に増えてきており、今後は電力洞道や共同溝などの地下構造物の構築にも広がりを見せると考えられる。これは、同一径で比較した場合、既存の円形管よりも大きな内空有効断面が確保でき、構築された空間の維持管理が容易となることが理由として挙げられよう¹⁾。

従来からの矩形管路の構築は、開削工法やシールド工法などにより行われているが、地下構造物が輻輳した都市部や地上からの施工が非常に困難な鉄軌道や国道横断等での施工においては、開削工法が適用できなくなっている。そのような条件下では、シールド工法が多く適用されるものの、国道や鉄軌道横断のみといった小規模工事では不経済となることから、敬遠されているのが実状である¹⁾。このような状況に対応するため、安全性・経済性を有する推進工法により、ボックスカルバートを布設する工法が提案され、その実績が蓄積されつつある²⁾。

一方で、布設されるボックスカルバート本体については、開削工法による布設後の上載荷重に対する耐荷力を主として設計・製造され、推進時に作用する推進力に対

する耐荷力については、ほとんど検討がなされていない。そこで、本報告では、ボックスカルバート形状および摩擦抵抗に応じた許容推進延長について3次元数値解析により検討を行った結果について述べる。

2. 推進工法について

推進工法のうち、密閉型推進工法は推進管の先端に切羽圧力の制御機能や方向修正装置を装備した密閉型掘進機を先導体とし、操作性を保持しつつ、発進立坑に設置された元押しジャッキにより、推進力を順次推進管に伝達させながら掘進を行う工法である²⁾。大中口径推進工法の分類を図-1に示す。

推進工法における最大の課題は推進力の低減すなわち管外周と地山との摩擦力の低減にある。推進工法では掘進機にて余掘りを行い、その部分に切羽添加材と地山を攪拌・混合したものおよび滑材を充填させることで、管渠と地山との接触を避け、摩擦を低減させている。

また、元押しジャッキの他に、推進管列の途中で中押しジャッキを予め設置し、これらを交互に作動させ推進力を分担することで、推進距離を長くすることも可能である²⁾。図-2に推進工法概要図³⁾を示す。

3. ボックスカルバートについて

(1) 規格および種類

ボックスカルバートは、構造、基本形状、種類などから8種類に分類され、それぞれの分類において標準的な寸法が設定されて製品化されている。図-3(写真)にその一例を示す。また、標準寸法とは異なる製品として、曲線対応やマンホール・取付管用などの異型製品が区分されている。なお、規格化されているのは主として開削工法用のみで、推進工法に対応可能な継手性能や止水性についての検討および規格化には至っておらず、その都度の検討により対応が図られている⁴⁾。

なお、一般的なボックスカルバートにはハンチと呼ばれる構造を有している。ハンチとは、図-3に示すボックスカルバートの函内角部に打設されるコンクリートの部分であり、ボックスカルバート強度の向上を図るために設置される。

(2) 品質および検査

ボックスカルバートの品質については、製造管理上製造者側の規格に基づいて、形状、寸法、外観、外圧検査および水密性に対する確認試験が行われる。一般的には、ボックスカルバートを利用する場合は、これらのデータで品質確認がなされる場合が多く、施工者側の品質確認試験は省略することができる⁴⁾。

(3) 設計手法

ボックスカルバートの設計は、許容応力度法に基づいて行われている⁴⁾。

荷重条件としては、①死荷重、②活荷重(鉛直荷重および水平荷重)、③衝撃荷重、④土圧(鉛直土圧、水平土圧)、⑤水圧、を考慮して検討されるが、その組合せについては図-4に示すとおりとなる。土被りについては、最大3.0mとなっているが、これは過去の施工実績のうち、93%が土被り3.0m以下であったことが理由として挙げられる。

以上のように、ボックスカルバートについては、開削工法による布設後の上載荷重に対する耐荷力が主として

検討され、推進時に作用する推進力に対する耐荷力については、ほとんど検討されていないのが現状である。

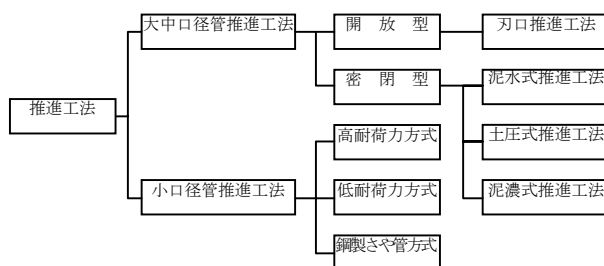


図-1 推進工法の分類



図-3 開削工法用ボックスカルバート

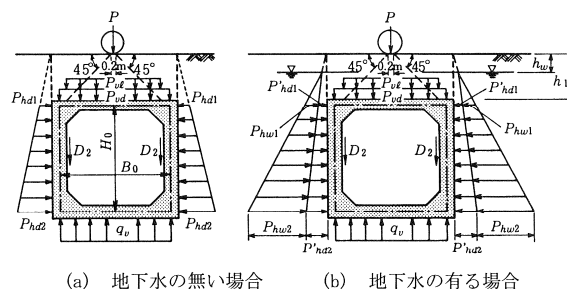


図 3.1.2 ボックスカルバート上に輪荷重の載荷される場合

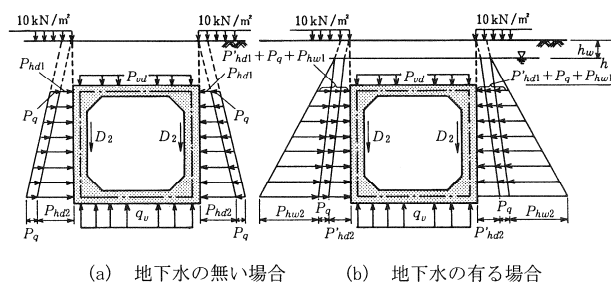


図-4 ボックスカルバートに作用する応力

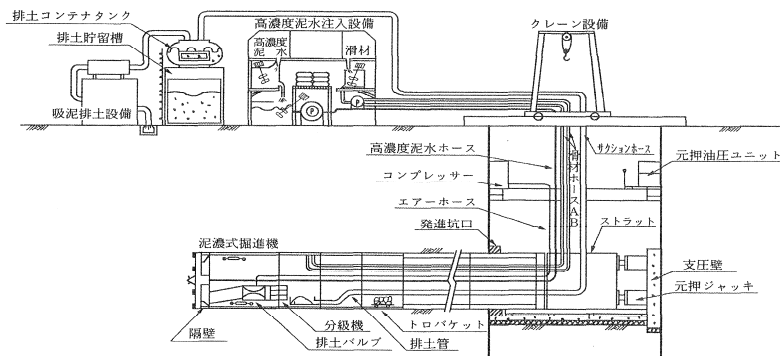


図-2 推進工法概要図

4. 推進工法における推進力の伝達について

推進工法においては、シールド工法とは異なり、元押ジャッキによる推進力を、推進する管体を介して掘進機まで伝達する必要がある。そのため、直線推進はもとより、曲線推進時においても、推進管体内を通った推進力の伝達が必要となる。

図-5 に曲線部における推進力伝達状況概略図を示す。この図に示すとおり、推進力は管体間に設置されたクッション材を介して掘進機側の管体へ伝達され、その軸心は曲線内側へ偏位する傾向がある。

そこで、推進工法によって布設されるボックスカルバートを想定して、その形状、土被り等について以下に述べる3次元数値解析により検討を加えた。

5. 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に、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、破壊基準はMohr-Coulombの破壊基準を適用した⁵⁾。

(2) 解析条件および解析モデル

解析に用いたボックスカルバートの入力物性値を表一

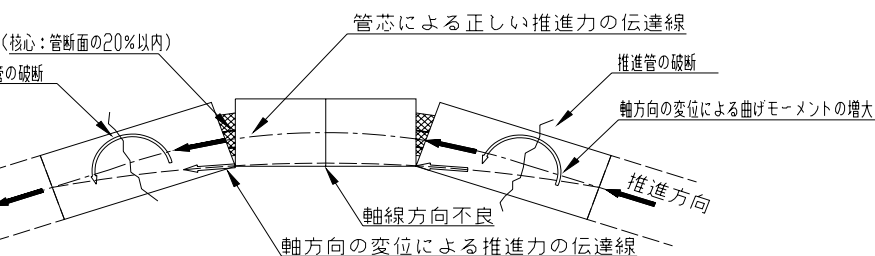


図-5 曲線部における推進力伝達状況概略図

表-1 解析に用いたボックスカルバートの入力物性値

ヤング率 (MPa)	ポアソン比 (-)	比重 (MN/m ³)	せん断強度 (MPa)	摩擦角φ (deg)	引張強度 (MPa)
7300	0.2	0.027	7.9	54	3.8

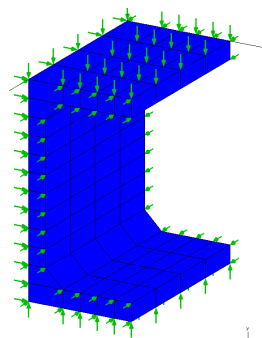


図-7 ボックスカルバートへの荷重作用状況

1 に、解析の基本モデルの一例（半断面モデル）を図-6 に示す。本解析ではSTEP1 を初期応力状態とし、STEP2 で計算した推進力および各荷重を作用させた。荷重作用状況を図-7 に示す。基本的な解析条件は、ボックスカルバート肉厚0.2m、土被り2.4m、推進時の摩擦抵抗30kPaである。これに、布設されるボックスカルバート形状、摩擦抵抗や推進力伝達軸心の偏位に応じた許容推進延長について検討を行うため、以下の項目について、パラメータを変化させた。

- ①ボックスカルバート形状(肉厚、ハンチの有無)
- ②摩擦抵抗
- ③推進力伝達軸心の偏位

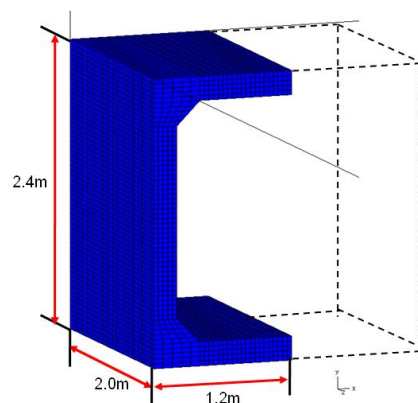


図-6 解析基本モデル

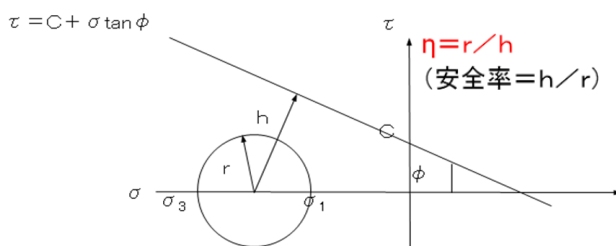


図-8 破壊接近度模式図

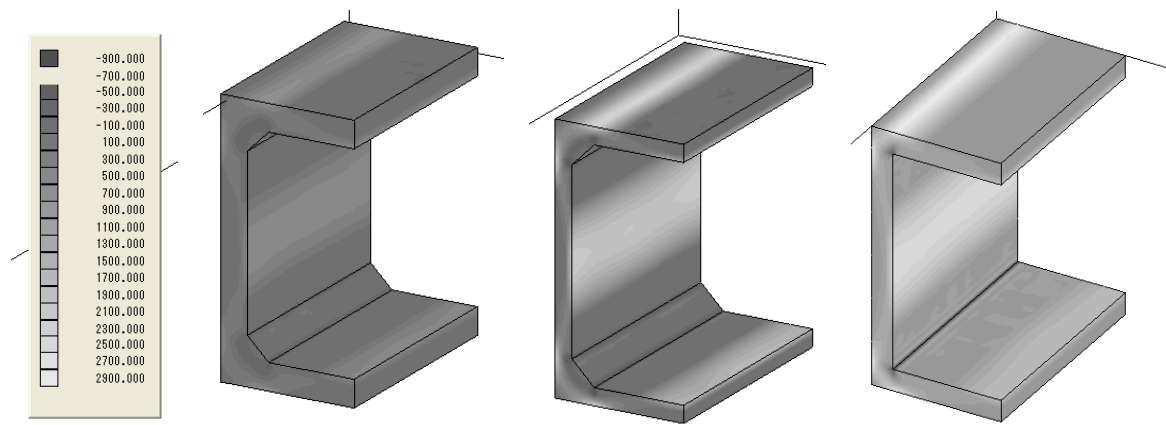


図-9 (左：最小主応力(肉厚0.25mハンチ有) 中：最小主応力(肉厚0.20mハンチ有) 右：最小主応力(肉厚0.20mハンチ無))

本報告では得られた結果に基づき、最小主応力 σ_1 および破壊接近度 η に着目して検討を行った⁹⁾。なお、破壊接近度とは、モール円の半径 r と、破壊規準線とモール円の中心との距離 h によって定義され、安全率の逆数となっている。図-8 に破壊接近度模式図を示す。

6. 解析結果

(1) ボックスカルバートの形状について (肉厚の変化・ハンチの有無)

一般的なボックスカルバート構造であるハンチを有するモデルにおけるボックスカルバートの肉厚およびボックスカルバートのハンチ構造の有無が強度に及ぼす影響について解析した。すなわち、肉厚を 0.2m から 0.15m, 0.25m へと変化させて比較した。また、ハンチ構造の有無の検討には肉厚 0.20m を用いて検討した。

解析結果の一例(最小主応力)を図-9 に示す。これらの結果、カルバートの天端部分の引張応力(最小主応力)は肉厚の変化とともに大きくなり、肉厚が 0.05m 薄くなることで約 2 倍となることが分かる。また、ハンチ構造がない場合には約 1.5 倍となった。

これは、肉厚を厚くすることで、コンクリート部材の断面二次モーメントの増大とともに、外圧によるボックスカルバートのたわみ量が減少し、それに伴う引張応力の減少を図ることができることを意味している。同時に推進力の伝達面積が増大することで推進力に対する耐力の向上を図ることができる。一方、ハンチ構造の有無により、上載荷重の支持間隔が大きくなり、発生する引張応力に大きな差が発生することに依ると考えられる。

このような結果から、ハンチの具備により、高土被りおよび推進延長の長距離化に対して、十分な適用性を発揮することができると判断できることが分かった。

(2) 摩擦抵抗の変化

推進力による影響を考慮するため、ボックスカルバー

ト形状(図-6) および土被り 2.4m の条件において推進時の摩擦抵抗を 30kPa から 10kPa へと変化させた。

解析結果の一例(最大推進延長)を図-10 に示す。解析の結果、最大推進延長は摩擦抵抗と反比例して 3 倍程度長距離化が可能となる結果が得られた。

これは、ボックスカルバートが許容可能な推進力に達するまでの距離が摩擦抵抗の減少により増大したためと考えられる。なお、実施工における刃口式推進工法では、推進管と地山とが接触することで摩擦抵抗が高くなり、長距離推進への対応が困難であるのに対し、密閉型矩形掘進機を使用した推進工法では、余掘り部に二液性固結型滑材を充填などの対応により推進力の低減を図ることが可能であると考えられる³⁾。

(3) 推進力伝達軸心の偏位(曲線推進時の影響)

推進工事において理想的な推進力の伝達方法は、推進管接続部に設置したクッション材を介し、推進管の中心に推進力を伝達させることである⁹⁾。しかし、実施工においては、前述のとおり、曲線推進の影響や推進対象土質に起因するボックスカルバート函列の蛇行やそれに伴う方向制御により、推進力が必ずしも推進管の中心を伝達しないのが実状である。

そこで、推進力伝達の軸心がボックスカルバート芯から推進力が偏位して作用した場合にボックスカルバート

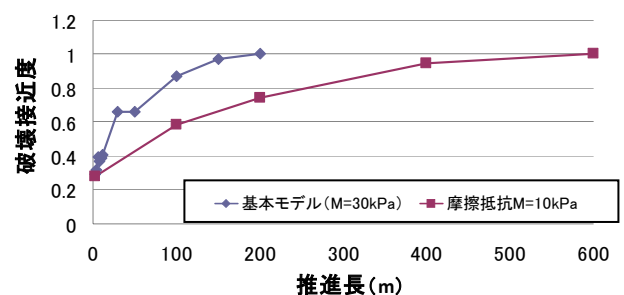


図-10 推進延長と破壊接近度との関係
(最大推進延長)

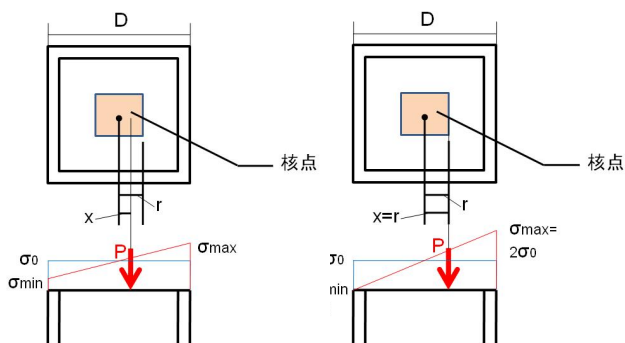


図-11 軸心が偏位しているときの管の応力状態

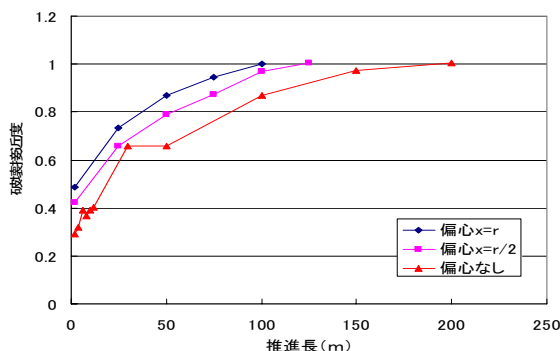


図-12 推進延長と破壊接近度との関係
(最大推進延長)

にカルバート芯=軸心の場合は200m, 偏位量 $x=r/2$ の場合及ぼす影響について検討を行った。すなわち, 推進力伝達の軸心を偏心無し($x=0$)から, 軸心を核点内($x=r/2$)に存在する場合および核点の端($x=r$)に作用している場合へと左に偏位させて解析した。なお、解析モデルは全断面モデルで解析した。 $x=r/2$ の場合および $x=r$ の場合の推進管応力状態は図-11 のようになる。解析結果の一例(最大推進延長)を図-12 に示す。最大推進延長についての解析結果を見てみると、ボックスには120m, 偏位量 $x=r$ の場合には100mで破壊接近度が1となった。これは、曲線推進時の推進力伝達軸心の偏位に伴い、ボックスカルバートに偏圧が作用し、局所的な集中応力が発生したことに起因する。その際の強度の低下率としては、許容推進延長から判断すると、直線推進時(推進力伝達軸心偏心無し)と比較して40～50%程度低下すると想定される。このことから、曲線施工時には、直線施工時よりも大きなボックスカルバート耐力を必要とするため、十分な検討が必要となる。また、直線施工時にも可能な限りボックスカルバート芯を通る推進力の伝達を行うことで、上記の影響を極力低減しながら推進施工を行う必要があると考えられる。

7. おわりに

本報告では、推進工法によりボックスカルバートを布設した場合におけるボックスカルバート形状等が許容推進延長に与える影響について、3次元数値解析により検討した。その結果、ボックスカルバート肉厚の増大により、強度特性が向上し、許容推進延長の長距離化が可能になるほか、曲線推進時には、推進力伝達軸心の管芯からの偏位に伴う偏圧により、推進管の許容耐荷力が40～50%程度低下することが判明した。また、ボックスカルバート推進時の摩擦抵抗を低減することで、許容推進延長の長距離化が可能になることが分かった。これらの結果から、各現場において必要なボックスカルバート規模(寸法や布設延長、路線条件)から必要な肉厚について検討を行うことで、最適なボックスカルバート形状を設定する必要があると考えられる。

一方で、今後の検討課題として、以下の点が挙げられる。まず、推進工法に対応可能なボックスカルバートに必要な特性として水密性が考えられるが、これまで十分な検討が行われていない。したがって、継手部分の水密性については今後の検討課題である。また、今回の検討において推進力伝達の軸心をボックスカルバート芯から偏位させて検討したが、曲線推進の場合にはこの偏位の影響だけではなく管端部に地盤反力も受けることになる。その際のボックスカルバートの耐久性についても今後の検討課題である。

参考文献

- 1) 森田他：資源・素材学会秋季大会2009(札幌)論文・講演集, 2009.
- 2) 森田他：資源・素材学会秋季大会2008(仙台)論文・講演集, pp.4-7, 2008.
- 3) 社団法人日本下水道協会：下水道用設計積算要領—管路施設(推進工法)編一, pp.237, 2008.
- 4) 全国ボックスカルバート協会：プレキャストボックスカルバート設計・施工マニュアル, pp.7-95, 2005.
- 5) 株式会社地層科学研究所：3D-σ User's Manual
- 6) 森田他：第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会, pp.114-119, 2009.

NUMERICAL STUDY ABOUT THE TRANSMISSION OF THRUST FORCE IN RECTANGULAR PIPE JACKING

Tomo MORITA, Hideki SHIMADA, Takashi SASAOKA, Kikuo MATSUI,
Fumihiko MATSUMOTO and Ejji SAKAI

The progress of recent no-dig technology is remarkable and, not only the shield method but also pipe jacking method can construct the rectangular pipe line. On the other hand, the present soil conditions in pipe jacking construction is shifting from weak soil layer to the Japanese country special composition ground such as big cobble and rock layer. So it is expected that construction situation becomes severe as for thrust force.

This report shows the result of numerical analysis about the influence of the increased thrust force for Box Culvert in rectangular pipe jacking.