

地道桥下穿高速公路动态施工过程数值模拟

陈孝轩

(中国建材地勘中心广东总队,广东 广州 510403)

摘要:地道桥顶推下穿是一种高效且经济的解决路线交叉问题的施工方案,明确施工时地道桥的受力机理有助于优化设计,因此有必要对地道桥下穿过程进行模拟研究。文章以湖南省某公路地道桥下穿 G4 高速为例,基于有限差分法,对下穿顶推施工过程进行了数值模拟分析,研究得出地道桥盾构法动态施工过程应力场与位移场变化的规律。研究表明:随着顶推的进行,掌子面后方土层应力变化明显,影响范围在掌子面后 6 m 左右。同时,摩阻力系数与地层条件特别是土质情况联系密切,顶推施工时,箱涵底部产生的摩阻力占比超过总摩阻力的 70%,计算结果明确了地道桥顶推过程中的受力特征与作用机理,能为类似的地道桥下穿施工提供合理的借鉴与参考。

关键词:顶推地道桥; 动态施工; 极限摩阻力; 极限顶力; 数值模拟

中图分类号: U445.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)04-0025-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.04.046

Numerical simulation on the dynamic construction process of underpass bridges crossing highways

CHEN Xiaoxuan

(Guangdong Brigade of China Geological Survey Center of Building
Materials Industry, Guangzhou 510403, Guangdong, China)

Abstract: The top pushing underpass of an underpass bridge is an efficient and economical construction plan to solve the problem of route intersection. Clarifying the stress mechanism of the underpass bridge during construction can help optimize the design. Therefore, it is necessary to conduct simulation research on the underpass process of the underpass bridge. A highway underpass bridge in Hunan Province was taken as an example, and based on the finite difference method, numerical simulation analysis is carried out on the underpass top pushing construction process. The law of stress field and displacement field changes during the dynamic construction process of the underpass bridge shield tunneling method is studied. The research results indicate that as the top push progresses, the stress in the soil layer behind the palm face changes significantly, with an impact range of about 6 meters behind the palm face. At the same time, the friction coefficient is closely related to the geological conditions, especially the soil conditions. During the top pushing construction, the friction generated at the bottom of the box culvert accounts for more than 70% of the total friction. The calculation results clarify the stress characteristics and mechanism of the underpass bridge during the top pushing process, which can provide reasonable reference and guidance for similar underpass bridge construction.

Key words: top pushing of underpass bridge; dynamic construction; ultimate side friction; ultimate jacking force; numerical simulation

顶推地道桥是一种在不中断既有道路交通的前提下,采用机械设备将预制好的地道桥箱涵顶

收稿日期: 2023-03-13

作者简介: 陈孝轩(1983—),男,高级工程师,从事岩土工程、地质灾害、生态修复等施工技术和管理工作的。

入既有道路下方土层,从而完成地下通道施工的地道桥施工技术。此工法适用于穿越公路、铁路、河流、建筑物、街道的各种桥涵、地道、地下管道的施工^[1-2]。

国内的地道桥顶进技术起步相对较晚,地道桥顶推施工造成的公路病害问题始终困扰着工程技术人员^[3-6]。地道桥与周围土层相互作用的传力机理对顶推力设计计算起到决定性作用。学者们对此开展了大量研究,黄勇军等^[7]基于有限差分法研究了周围土层对地道桥顶推力的影响。潘世强等^[8]采用极限分析法推导了“滑梁一体”结构的极限顶推力上下限解。巢万里等^[9]基于理论推导与现场实测研究了斜角角度与地道桥顶推力大小之间的关系,给出了考虑斜角角度的地道桥顶推力计算方法。周利金^[10]采用有限元分析软件研究了桥式盾构体在施工中的结构动力响应及变形特性。

但是,此前对地道桥结构受力的研究均是基于静态假定进行的。而地道桥受顶推力作用沿路线方向前进地道桥与其周围土层相互作用是一个连续的动态过程,基于结构力学的静力结构计算难以考虑顶推动态过程的影响。设计时,通常对顶推力设计值乘以修正系数(修正系数取值与土层类别与界面粗糙程度相关,黏土层一般取 1.2 来考虑动态施工对结构受力的影响^[11])。上述处理是一种等效近似的方法,未考虑周围土层与地道桥箱涵之间的相互作用,其计算结果不能反映界面性状对顶推力的影响。

基于上述考虑,文章拟采用有限差分法基于大变形理论,考虑土层与地道桥箱涵相互作用,对地道桥顶推动态施工过程进行数值模拟,探究界面摩阻系数与顶推力之间的关系,以期可为地道桥顶力设计提供参考。

1 基于有限差分法的地道桥顶推过程模拟分析

1.1 框架与土体接触界面传力机理

有限元计算中,通常是通过计算地道桥箱涵与周围土层界面间的绝对法向位移、相对法向速度,并通过界面的本构关系计算得到接触界面的应力状态^[11],接触界面的传力原理如图 1 所示。

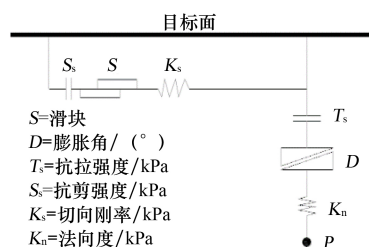


图 1 接触本构模型

数值模拟中一般采用无厚度单元模拟框架与周围土层界面的相互作用^[12],地道桥箱涵与土层界面通过计算节点进行连接,而界面上节点间将形成计算网格。界面单元为三角形网格单元,每个网格单元含 3 个计算节点,网格面积根据节点平均分配,四边形网格由两个三角形网格单元组成,如图 2 所示。

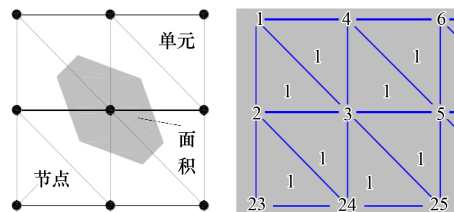


图 2 接触面及其编号

与实体网格间力的传递类似,接触面上的力仅在界面节点上进行传递。界面的剪切强度通过弹簧-滑块系统进行表达,地道桥在顶推力的作用下与周围土层产生相对位移而产生剪切力,这个过程在数值模拟计算中通过剪切刚度表达^[12]。详见式(1)、(2)。

$$F_s = Lk_s \Delta u \quad (1)$$

$$F_s = Lcs_{coh} + \sigma_c \times \tan(cs_{fric}) \times DL \quad (2)$$

式中: σ_c 为有效侧向应力, kPa; F_s 为剪切力, kN; L 为单元长度, m; D 为单元的暴露周长, m; Δu 为桩土间相对位移, m; K_s 为剪切刚度, kPa; CS_{coh} 为剪切弹簧的黏结强度, kPa; CS_{fric} 为剪切弹簧摩擦角, (°)。

桩土交界面上的法向力主要是由界面上的黏结作用产生^[12],其黏结强度是由法向刚度表达的详见式(3)、(4)。

$$F_n = Lk_n \Delta u \quad (3)$$

$$F_n = Lcs_{noh} + \sigma_c \times \tan(cs_{nfric}) \times DL \quad (4)$$

式中: F_n 为法向力, kN; K_n 为法向刚度, kPa; CS_{noh} 为法向弹簧的黏结强度, kPa; CS_{nfric} 为法向弹簧摩擦角, (°)。

1.2 接触面建立

接触面及周围土层模型如图 3 所示，相关计算参数如表 1 所示。

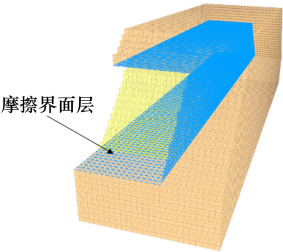


图 3 框架结构与路基土体接触面

1.3 地道桥盾构法下穿高速公路动态过程的数值模型的建立

地道桥框架下穿路基三维模型如图 4 所示，模型尺寸、数值计算参数根据下穿某高速互通交叉工程施工图及地质勘察报告确定。具体尺寸如下：地道桥框架结构净宽度为 13 m，净高度为 5.2 m。计算时不考虑支座的尺寸及路面厚度，计算横断面方向为 14 m，模型计算总高度 6.3 m，地道桥最大埋深 2.47 m，计算最大覆土深度按 2.50 m 考虑，地道桥顶推距离为 14.5 m，每次顶级长度确定为 2 m。具体计算参数如表 1 所示。

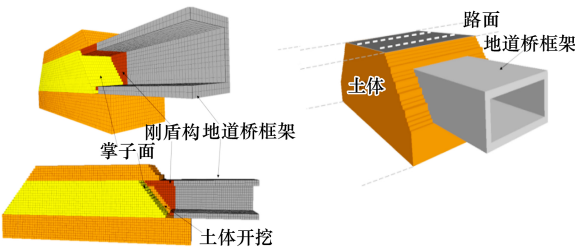


图 4 地道桥下穿高速三维模型

地道桥顶推方向为 X 方向，路基横断面方向为 Y 方向，竖直方向为 Z 方向。模型顶面自由，底面竖向约束，左、右边界约束横断面方向位移，前、后边界方向进行法向约束。地道桥箱体与周围土层通过接触面联系，地道桥箱涵整体保持自由，不再设置额外约束。模型土层采用摩尔 - 库伦强度准则，地道桥箱涵采用弹性准则，地道桥 - 土体接触界面采用摩擦界面单元，数值模型及边界设置情况如图 5 所示。

2 计算结果分析

2.1 土层压力变化分析

当地道桥顶推开始时，箱涵顶部土压力略高于初始时的土压力，这是由于土层开挖引起了掌子面上土压力跌落。随着顶推的进行，掌子面不断向顶进方向移动，掌子面后方土层应力变化明显，影响范围在开挖面后 6 m 左右，按静止土压力对地道桥进行结构受力计算是合理的^[13]。计算过程中，在地道桥顶部与接触面上设置了监测线，监测结果如图 6 所示。

由图 6 可知，土压力峰值位置随着顶推的进行不断向前发展，峰值增幅比例不超过 10%。同时，随着顶推进行，掌子面后方土压力将进入重新平衡状态，其值与初始土压力相差不超过 2%，说明地道桥箱涵承担了绝大部分土压力，土层自身基本没有支撑能力，无法承担开挖后土层应承担的土层压力。

表 1 材料参数

项目	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	法向刚度/ ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)
路基土体	22	50	30	50	0.3	—	—
地道桥	24	—	—	100 000	0.2	—	—
顶面接触	—	0	11	—	—	10^9	10^9
侧面接触	—	0	11	—	—	10^9	10^9
底面接触	—	0	35	—	—	10^9	10^9

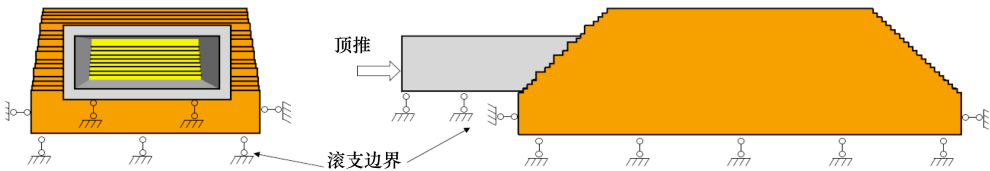


图 5 模型边界条件

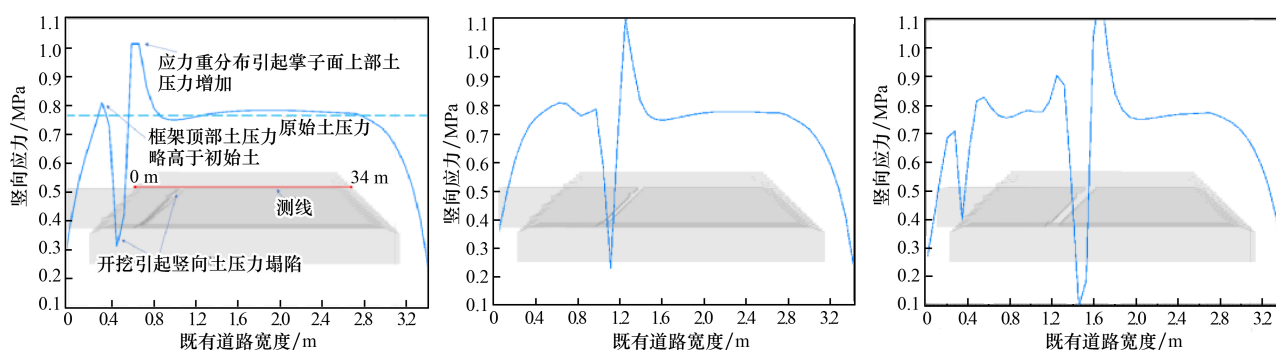


图 6 箱涵顶部土压力分布 (1、5、13 m)

2.2 界面摩擦力变化分析

摩阻系数反映的是箱涵与周围土层界面粗糙程度对结构受力影响的力学参数。工程实践中,地道桥顶推作用距离、顶进方向偏转、周围土层性质等,都将对界面的参数确定产生影响。摩阻系数的确定需要根据实际情况与理论计算综合确定。通过计算地道桥顶进过程中结构与土体接触面上的最大剪应力可以预估地道桥实际顶推过程中所需要克服的最大摩阻力^[14]。

图 7 为地道桥-土层接触界面摩阻力分布。由图可知,地道桥上最大摩阻力出现在地道桥箱涵底面,最大摩阻力约 160 kPa。对比不同状态下摩阻力分布图可知,越靠近掌子面摩阻力越大,顶推过程中地道桥箱涵应力集中多发生于地道桥底部边角处,发生应力集中区域,其摩阻力大于周边平均水平。

选取典型断面监控顶板、底板以及侧边上的摩阻力,每个边界设置 8 个测点,摩阻力监测点

布置图如图 8 所示,其中顶面摩擦系数 μ_1 为 0.15,侧面摩擦系数 μ_2 为 0.16 ~ 1.0,底面摩擦系数 μ_3 为 0.16 ~ 1.0。

不同摩阻系数下摩阻力分布云图如图 9 所示,按图 9 中所示监测点顺序将不同摩擦系数条件下顶部、侧边、底部摩擦力提取,提取结果如图 10 所示。

由图 10 可知,箱涵底部产生的摩阻力占比超过总摩阻力的 70%,在地道桥箱涵转角局部摩阻力有较大提高,但分布范围不大。在施工过程中宜对底部进行减阻处理,降低底面摩阻力。

将数值计算摩阻力在地道桥接触面积上进行积分可以获得不同摩阻力系数情况下地道桥最大顶进推力。图 11 为不同摩阻力系数顶进单节地道桥(长度为 10 m)所需要的最大顶推力。设计人员可根据相关摩擦系数资料通过该数值计算结果乘以相应安全系数之后与力量计算结果进行对比,确定设计最大顶推力。

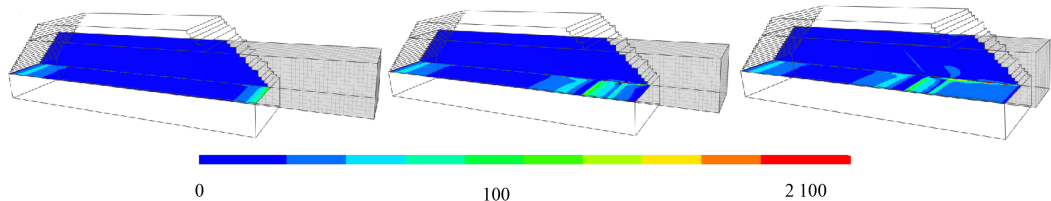


图 7 地道桥-土层接触界面摩阻力分布 (1、5、13 m)

kPa

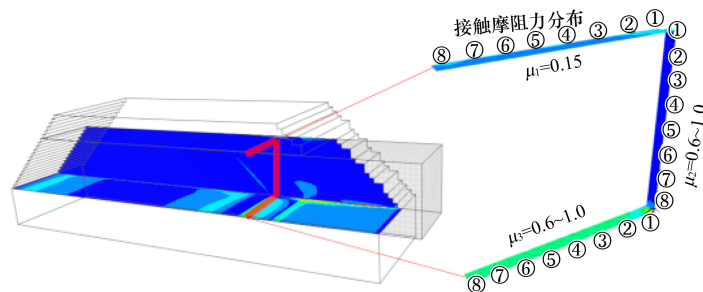


图 8 监测点布置

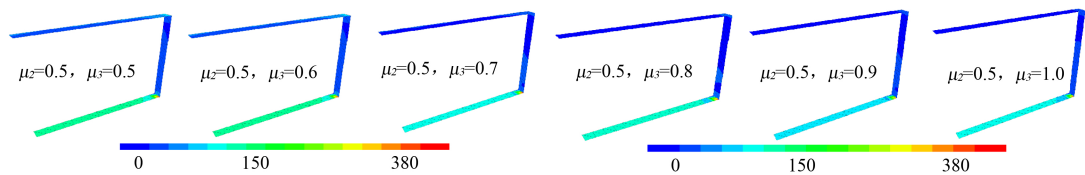
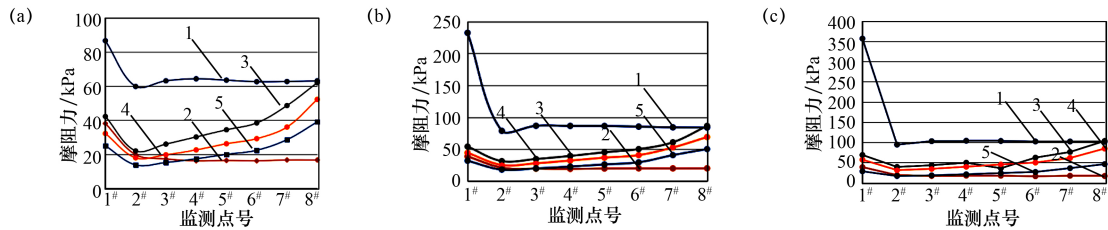


图 9 不同摩擦系数下摩阻力分布云图



(a) 顶部 $\mu_1=0.15$ ，底部 $\mu_3=0.6$ ；(b) 顶部 $\mu_1=0.15$ ，底部 $\mu_3=0.8$ ；(c) 顶部 $\mu_1=0.15$ ，底部 $\mu_3=1.0$
1—底部；2—顶部；3—侧边 $\mu_2=1.0$ ；4—侧边 $\mu_2=0.8$ ；5—侧边 $\mu_2=0.6$ 。

图 10 数值模型中的摩阻力分布

表 2 地道桥下穿高速公路顶推力统计数据

编号	项目名称	埋深/m	地道桥尺寸/m			首节重量/t	地质情况	最大顶力/t
			外皮高	外皮宽	首节长度			
1	新东楼下穿某高速公路(G4-1)	2.6	8.1	15.0	13.0	1 504.1	粉质黏土	2 571.6
2	某大道下穿某高速公路(G4-2)	2.2	7.6	17.2	15.0	2 036.5	填土	3 500.2
3	某厂区通道下穿某高速公路(G4-3)	1.5	10.3	13.0	11.0	1 174.3	泥质粉砂岩	2 262.4
4	某物流大道下穿某高速公路(G4-4)	2.0	9.0	18.7	13.5	2 120.0	中风化板岩	4 666.2
5	某互通匝道下穿某高速公路(G60-1)	3.5	8.3	17.7	16	2 283.8	泥质粉砂岩	5 260.0
6.0	某连接线下穿某高速公路(G60-2)	2.5	8.3	17.2	15.0	2 096.6	泥质粉砂岩	4 510.6
7	某县道下穿某高速公路(G72-1)	2.2	9.3	15.5	13.5	1 575.2	泥质粉砂岩	3 959.2

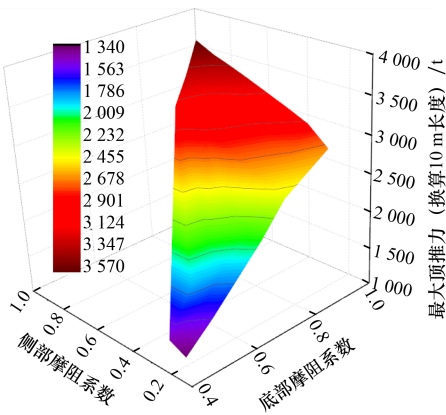


图 11 最大顶推力

根据数值计算的结果，选取表 2 中部分与本项目类似埋深的地道桥实际顶推力进行对比，根据反分析摩阻力系数分布，可以发现出摩阻力系数与地层条件特别是土质情况联系密切。

反分析结果如图 12 所示。

由图可知，填土－粉质黏土类型土层的底部

摩阻力系数取 0.5~0.7 较为合适，泥质粉砂岩底部摩阻力系数取 0.8~0.9，而中风化板岩摩阻力系数较高在 0.9~1.0 之间；由于侧土压力可能与计算值有差距，侧部摩阻力系数一般低于底部摩阻力系数。

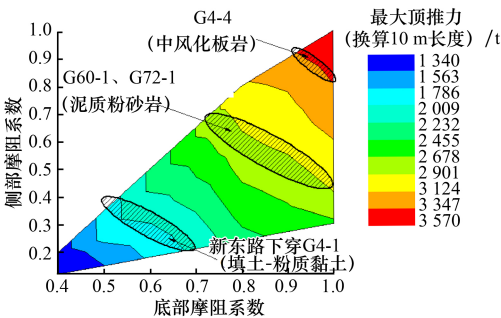


图 12 顶推力计算结果

3 结 论

地道桥在顶进的过程中，路堤的应力场会产生一定变化，随着顶推的进行，掌子面不断向顶

进方向移动,掌子面后方土层应力变化明显,影响范围在开挖面后 6 m 左右。

地道桥顶推施工时,箱涵底部产生的摩阻力占比超过总摩阻力的 70%,在施工过程中宜及时对底部进行减阻处理,降低底面摩阻力。

根据数值计算的结果,反分析摩阻力系数分布可知,可以发现摩阻力系数与地层条件特别是土质情况联系密切。填土-粉质黏土类型土层的底部摩阻力系数取 0.5~0.7 较合适,泥质粉砂岩底部摩阻力系数取 0.8~0.9,而中风化板岩摩阻力系数在 0.9~1.0 之间;

由于侧土压力可能与计算值有差距,侧部摩阻力系数一般低于底部摩阻力系数。

参考文献:

- [1] 谈军,杨涛,辛亚兵,等.下穿高速公路斜交地道桥顶进施工分析[J].土木工程与管理学报,2023,40(3):77-81.
- [2] 刘颖,张明亮,辛亚兵等.浅覆土大交角箱涵斜交顶进关键施工技术[J].工程建设,2022,54(1):46-49;62.
- [3] 黄国发,杨佳春,田帅等.城市道路下穿既有高速公路的实施方案比选[J].工程建设,2020,52(2):35-42.
- [4] 楚兴华.双向变截面钢箱梁顶推工法的应用[J].工程建设,2017,49(8):65-68.
- [5] KASPER T,MESCHKE G.A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground[J].International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics,2010,28(14):1441-1460.
- [6] HUO J,HOU N,SUN W,et al. Analyses of dynamic characteristics and structure optimization of tunnel boring machine cutter system with multi-joint surface[J]. Nonlinear Dynamics,2017(87):237-254.
- [7] 黄勇军.地道桥顶推施工对周边土体影响的数值模拟研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(7):1757-1764.
- [8] 潘世强.顶进地道桥“滑梁一体”结构的极限顶力分析与应用研究[J].湖南交通科技,2018,44(3):105-109.
- [9] 巢万里,黄勇军,等.斜交地道桥下穿高速公路顶进过程中的偏位分析[J].公路工程,2022,47(3):57-62.
- [10] 周利金.基于 ANSYS 的桥式盾构受力及变形特征研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(4):787-793.
- [11] 潘世强,巢万里,胡富贵.超浅埋大角度斜交下穿高速公路顶推地道桥监测技术及成果分析[J].施工技术(中英文),2022,51(6):27-30;65.
- [12] 彭文斌.FLAC 3D 实用教程[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [13] 王建省,李泽洲,陈晓强.斜交角对带翼墙框架式地道桥受力性能影响[J].铁道勘察,2021,1(1):1-8.
- [14] 楚海英,荣杰.天津市宁河县光明路蓟运河大桥钢箱梁顶推施工技术[J].工程建设,2015,47(4):52-55.