

文章编号: 1674—8247(2019)05—0032—04
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.05.007

基于物质点法的顶管施工模拟分析

陈 涛

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:近年来,顶管施工方法因其扰动小、工期短等显著优势,逐渐应用于隧道工程中。鉴于其实用性,很多学者对开挖效应对管道及土体的影响规律进行了探究,目前的研究多采用有限元软件进行,而传统有限元方法无法完成大变形计算。针对这一问题,本文基于重庆某顶管工程,采用一种新的数值模拟方法物质点法进行了数值计算,该方法合理调整网格密度并同经验公式进行对比,验证可靠性之后,调整土层强度参数,探究不同土质下顶管施工对土体沉降量的影响规律,并据此研究顶管施工的适用性,可为工程建设提供参考。

关键词:顶管; 施工; 物质点法; 土性参数

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A

Simulation Analysis of Pipe Jacking Construction Based on Material Point Method

CHEN Tao

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: In recent years, pipe jacking construction method has been gradually applied in tunnel engineering because of its obvious advantages such as small disturbance and short construction period. In view of its practicability, many scholars have studied the influence law of excavation effect on pipeline and soil. At present, most of the studies are carried out by finite element software, but traditional finite element method cannot complete large deformation calculation. In order to solve this problem, a new numerical simulation method – material point method is adopted to carry out numerical calculation based on a pipe jacking project in Chongqing. This method adjusts the grid density reasonably and compares it with the empirical formula. After verifying the reliability, it adjusts the soil strength parameters and explores the influence rule of pipe jacking construction on settlement of soil under different soil conditions. According to above simulation calculation result, the applicability of pipe jacking construction is studied, which can provide reference for engineering construction.

Key words: pipe jacking; construction; material point method; soil parameters

近年来,顶管施工方法因其扰动小、工期短等显著优势,逐渐应用于隧道工程中。鉴于其实用性,很多学者针对开挖效应对管道及土体的影响规律进行了探究,取得了一系列进展与突破。魏纲^[1]等人通过现场

试验,探究了施工过程中管道的受力性能;房营光^[2]等人分别从理论和实测两方面研究了顶管施工扰动区的土体变形情况。同时,随着计算机计算效率的大幅提升和数值模拟软件的不断改进,很多学者尝试采用

收稿日期:2018-10-21

作者简介:陈涛(1980-),男,高级工程师。

引文格式:陈涛. 基于物质点法的顶管施工模拟分析[J]. 高速铁路技术,2019,10(5):32-35.

CHEN Tao. Simulation Analysis of Pipe Jacking Construction Based on Material Point Method [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(5): 32-35.

计算软件模拟顶管施工过程,也取得了很多有益的成果。冯海宁^[3]等人通过有限元计算模拟顶管施工,探讨了不同参数对结构受力和土体变形的影响;屠毓敏^[4]研究了长距离顶管穿越海堤时的堤面沉降,为工程建设提供了参考。目前的研究多是采用有限元软件进行的,但在分析顶管施工大变形问题时,有限元计算会发生网格畸变,甚至引起数值困难,造成计算难以进行。

针对这一问题,本文采用了一种新的数值计算方法——物质点法,该方法由 Sulsky^[5]提出,将连续体用一系列质点离散,质点携带了所有物质信息(称为物质点^[6]),其运动就代表了连续体的变形过程。物质点法能有效避免由于大变形导致的计算网格畸变问题,因此在模拟大变形破坏时具有独特优势^[7-8]。

本文基于广义插值物质点法对顶管施工进行了三维数值模拟,合理调整网格密度并同经验公式进行对比,验证可靠性之后,调整土层强度参数,探究不同土质下顶管施工对土体沉降量的影响规律,据此研究顶管施工的适用性,为工程建设提供参考。

1 物质点法

物质点法由 Sulsky 从流体力学中引入,采用拉格朗日质点和欧拉网格双重描述,将连续体离散成一系列质点,每个质点携带一块区域的所有信息,称为物质点,其集合就代表整个材料区域。计算网格仅用于动量方程的求解和空间网格的计算,不携带任何物质信息。在每个时间步时,质点和计算网格完全固连,完成动量方程的求解和空间导数的计算。求解后,将计算网格结点的运动量再映射到各质点上,得到这些质点在下一时刻的运动量。由于应力更新可在每个时间步开始时进行,也可在时间步结束时进行,因此根据更新时间不同,产生了两种相应的形式,分别为 USF(初始端应力更新形式)和 USL(结束端应力更新形式),对应的具体计算流程如图1所示。由于计算网格并不携带任何物质信息,因此,完成每个时间步计算后,会用全新的规则网格取代旧网格,从而有效避免了网格畸变问题。

在更新拉格朗日形式中,质点的特征函数 $\chi_b(x)$ 定义了质点所占据的空间区域,它是质点当前位置和变形状态的函数,即:

$$\sum_p \chi_b(x) = 1 \quad (1)$$

该特征函数确定了物理量在空间变化的光滑程度。类似地,计算体系的虚功方程可以表示为:

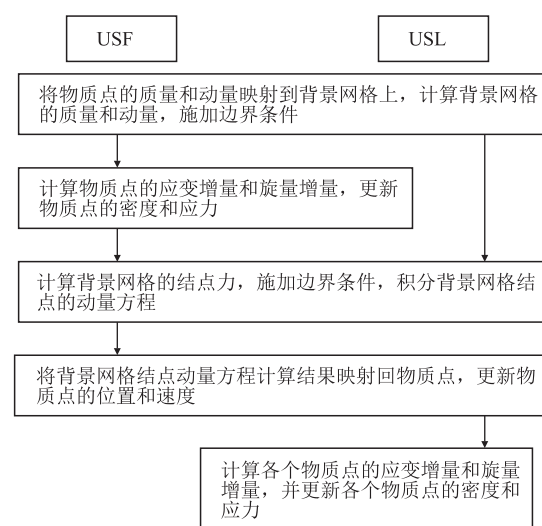


图1 物质点法计算流程图

$$\sum_p \int_{\Omega_p \cap \Omega} \frac{\dot{p}_{ip}}{V_p} \delta u_i dV + \sum_p \int_{\Omega_p \cap \Omega} \sigma_{ijp} \chi_p \delta u_{i,j} dV - \sum_p \int_{\Omega_p \cap \Omega} \rho_p b_{ip} \chi_p \delta u_i dV - \int_{\Gamma_t} \bar{t}_i \delta u_i dA = 0 \quad (2)$$

式中: Ω ——物体现时构型所占据的区域;

Ω_p ——质点 p 的特征函数在现时构型中的支撑域,或称为质点 p 在现时构型中所占据的区域。

质量守恒方程为:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla v = 0 \quad (3)$$

动量方程为:

$$\nabla \sigma + \rho b = \rho a \quad (4)$$

能量方程为:

$$\rho \dot{e} = \dot{\varepsilon}_{ij} \sigma_{ij} = s_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} - p \dot{\varepsilon}_{kk} \quad (5)$$

式中: ρ ——介质密度;

V ——速度;

a ——加速度;

σ ——对称的应力张量;

b ——物体所随的体力。

方程中的变量都是时间以及物质点空间位置的函数。

质点的特征函数 $\chi_b(x)$ 作为试探函数来近似描述系统的物理量,采用背景网格形函数 $N_i(x)$ 为测试函数,并将虚位移 δu_i 近似为:

$$\delta u_i = \sum_l \delta u_{il} N_l(x) \quad (6)$$

将式(5)代入式(2)中,并且考虑到 δu_{il} 在本质边界 Γ_u 上为0,可以得到:

$$\dot{p}_{il} = f_{il}^{int} + f_{il}^{ext}, x_l \notin \Gamma_u \quad (7)$$

求解时,首先将粒子状态插值到网格以形成 M_i , 通过该值获取网格速度 v_i , 网格节点速度 v_i 通过在网格节点上用形函数对周边粒子的动量进行插值, 然后通过网格节点质量 M_i 和动量加权得到:

$$v_i = \frac{\sum_p S_{ip} m_p v_p}{M_i}$$

(8)

颗粒的本构关系须与网格的变形一致。粒子应变速率 $\dot{\epsilon}_p$ 通过构造一个连续的网格速度近似计算得出:

$$\dot{\epsilon}_p = \sum_i \frac{1}{2} (\nabla S_{ip} v_i + v_i \nabla S_{ip})$$

(9)

将式(9)带入相应的本构方程中,可以计算得到质点的应力 σ_{ip} , 由此可进一步得到当前时刻系统的内力矩阵 f_i^{int} 。目前 MPM 通常采用显式格式求解, 由于质点随网格变形而发生移动, 其速度和空间位置可以表示为:

$$v_p(t + dt) = v_p(t) + \sum_i S_{ip} a_i dt$$

(10)

$$x_p(t + dt) = x_p(t) + \sum_i S_{ip} v_i dt$$

(11)

根据公式,更新质点信息,进行下一步计算。

2 顶管施工三维模拟

2.1 模型建立

由于土体具有弹塑性性质, 因此本构方程选用 Drucker-Prager 模型, 进行不排水条件下模拟开挖。顶管变形相对于土体来说很小, 可视为理想弹性体。考虑到模型边界的影响, 设置模型尺寸, 垂直顶进方向为 x 轴 (- 30 ~ 30 m), 平行顶进方向为 y 轴 (0 ~ 100 m), 土体厚度方向为 z 轴 (- 15 ~ 0 m)。顶管设置为圆角长方体, 外轮廓长 10 m, 宽 4 m, 高 3 m, 结构厚度 0.08 m, 中心埋深为 7.5 m。依据实际情况, 前后左右侧边界施加滑动约束, 上侧边界不施加约束, 设定为自由表面, 底部施加固定约束。选用长度为 0.1 m 的六面体单元进行网格划分, 模型如图 2 所示。

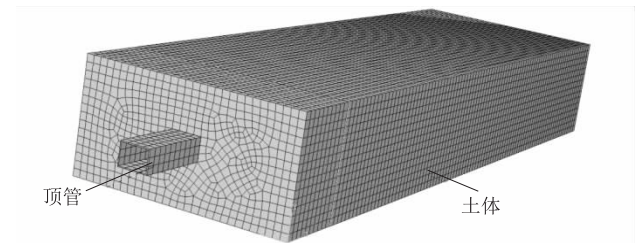


图2 模型示意图

为简化分析, 采用等效土层模拟, 开挖面泥水压力为 0.25 MPa, 不考虑注浆压力, 并将隧道周围土层与浆液的混合体等效为一种弱化土层。同时, 设置顶管

仅从第2层土中穿过, 未与其他土层接触, 各土层材料参数, 如表 1 所示。

表1 土层材料参数表

土层 / 层	厚度 / m	容重 / (kN/m³)	粘聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)	模量 / MPa
1	3	18	16	15	10
2	7	20	10	25	15
3	5	21	20	30	20

由于运动方程在背景网格上求解, 因此背景网格的密度将会对物质点法计算结果的准确性产生影响, 本文通过多组试算得出, 当计算网格结点数目不少于 10×10^4 时, 计算精度能够得到保证, 即进一步增加网格结点数目计算对计算结果无明显影响。兼顾精度和计算效率, 结点数目取为 10×10^4 个。

2.2 计算结果及分析

Peck 教授在对大量隧道开挖地表沉降实测数据进行分析的基础上, 系统地提出了地层损失的概念和估算隧道开挖地表下沉的实用方法, 称为 Peck 经验公式法。为验证物质点法计算的可靠性, 本文将一组结果 (顶管位于地表以下 30 m 横截面上的沉降量) 与 Peck 经验公式计算值进行对比, 如图 3 所示。从图中可以看出, 两者的数据基本一致, 吻合度较好。由此说明, 本模型可较好地反映顶管施工对土体扰动的基本规律。

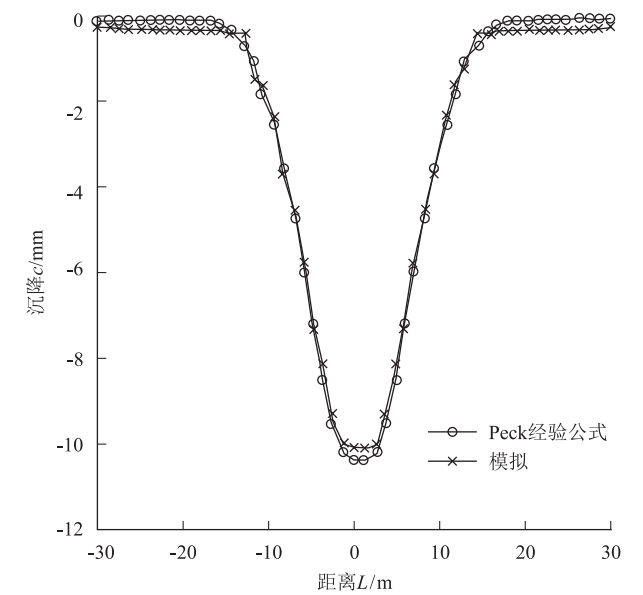


图3 y = 30 m 地表沉降对比

在模拟顶管掘进过程中, 以 $y = 30$ m 处横截面为参考面, 绘制顶管前进到不同位置时 $y = 30$ m 处的地表横向沉降曲线, 如图 4 所示。从图中可以看出, 顶管距离 $y = 30$ m 处 - 10 m 时, 前方土体开始微量隆起,

是由泥水压力作用引起的;当顶管距此处 -5 m 时,地表有轻微塌陷趋势,产生微量沉降;当顶管达到 $y=30\text{ m}$ 处时,地表产生明显沉降,最大沉降值约 5 mm ;当顶管超出 $y=30\text{ m}$ 处 5 m 时,地表沉降进一步加大,最大沉降值约 8 mm ;此后,随着顶管进一步远离,地表沉降变化不大,逐渐趋于稳定。从模拟结果还可以看出,地表横向受影响范围基本保持一致,约为 $-15\sim 15\text{ m}$,其中,顶管中轴位置沉降量最大,向两边逐渐减弱,且大致呈对称性关系。顶管掘进后的土体沉降更为明显,为掘进前沉降量的数倍。

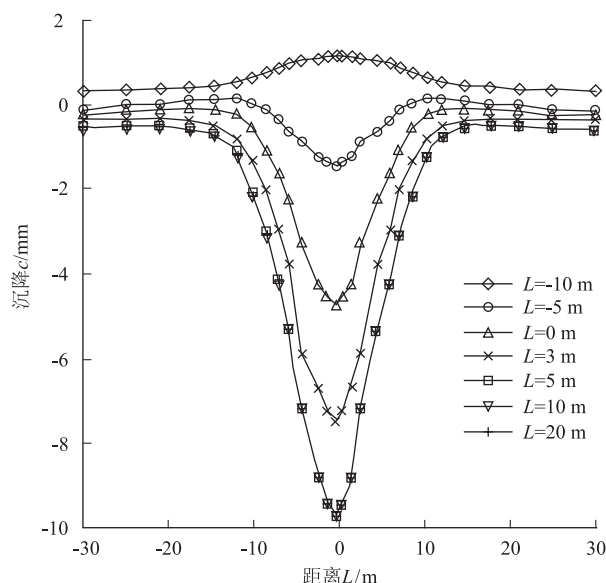


图4 顶管在不同位置 L 时 $y=30\text{ m}$ 处的沉降量

在实际施工过程中,遇到的土体一般都不是单一均质土层。考虑到这一实际情况,为更好地探究顶管施工的适用性,本文采用不同土质建立了4组新模型进行对比,顶管穿越土层的土质情况分别为全部黏土、全部砂土、上层黏土下层砂土和上层砂土下层黏土。模拟计算结果如图5所示。由模拟结果可知,在不考虑其他因素影响的条件下,相对于黏土而言,砂土沉降量更小,在顶管顶进过程中变形更容易控制。但穿越砂土所需顶推力较大。同时发现,在复合土层中穿越时,砂土层和黏土层的位置关系对整体沉降量影响较小。

综合模拟情况和实际施工情况分析可知,顶管在土质较好的砂土层中穿越时,控制沉降量较为容易,但所需顶推力较大;在土质较好的黏土层中穿越时,沉降量较大。在复合土层中穿越时,地表沉降量介于两种单一均质土层之间,且复合土层的位置关系对沉降量影响较小,同时顶推力也更易控制。若在土质较差的砂土层和黏土层中采用顶管施工,需提前根据当地环

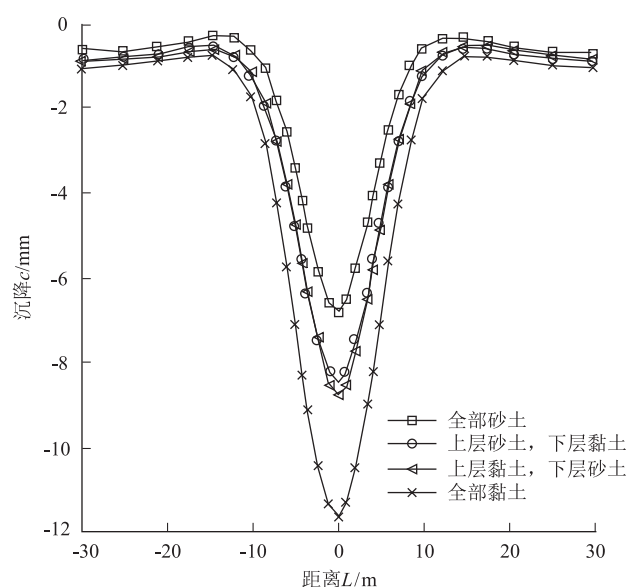


图5 穿越不同地层时横向地表沉降曲线

境保护要求和地质条件进行一定的地基加固处理措施,以确保施工安全。

另外,影响顶管适用性的因素还有注浆压力、顶推速度等,在实际工程中也需加以考虑。

3 结论

本文基于物质点法,对顶管施工过程进行模拟,得出了如下结论。

- (1) 顶管施工过程中,地表横向受影响范围约为 $-3.7D\sim 3.7D$ (D 为顶管长度)。
- (2) 针对每个横截面而言,顶管掘进的过程中,土层先因泥水压力而隆起,随后因土层扰动及损失而出现沉降,在顶管远离该截面后土层逐渐趋于稳定。
- (3) 在土质较好的复合土层中,若顶管穿越砂土层,则沉降控制更为容易,但所需顶推力较大,因此需综合考虑各方面条件,以衡量顶管施工的适用性。

参考文献:

- [1] 魏纲,徐日庆,余剑英,等. 顶管施工中管道受力性能的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1273-1277.
WEI Gang, XU Riqing, YU Jianying, et al. Site-based Experimental Study on Pipe Behavior during Pipe Jacking [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1273-1277.
- [2] 房营光,莫海鸿,张传英. 顶管施工扰动区土体变形的理论与实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(4): 601-605.
FANG Yingguang, MO Haihong, ZHANG Chuanying. Theoretic and Testing Analysis of Soil Deformation in the Area of Disturbance Caused by Pipe Jacking [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(4): 601-605.

(下转第51页)

高运行舒适性。

(2)执行设计－施工－维护一体化理念,通过设计中优化施工温度,施工中严控施工条件,减小收缩徐变荷载影响和轨道初始不平顺;通过选择恰当的维修养护时间,有效消除前期收缩徐变影响。

(3)设计中考考虑建立自动化监测系统进一步研究桥梁部件温差对变形的影响。

(4)运营中加强高温季节及温度突变情况下的养护维修检查工作。

参考文献:

[1] 安鹏. 跨京杭运河钢管砼拱桥施工安全技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
AN Peng. Research on Construction Safety Technology of the Concrete Filled Steel Tube Arch Bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[2] 崔军. 大跨度钢管混凝土拱桥受力性能分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
CUI Jun. Structural Characteristic Study on Large Span CFST Arch Bridge [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.

[3] 涂光亚,付瑶,颜东煌. 大跨度钢管混凝土拱桥钢管初应力的释放转移[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017,14(1): 54-60.

TU Guangya, FU Yao, YAN Donghuang. Initial Stress Release and Transfer of Steel Tube on large-span CFST Arch Bridge [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2017, 14 (1): 54-60.

[4] 陈杰. 大跨度钢管混凝土拱桥荷载试验评定[J]. 中国水运, 2015,15(3):218-219.
CHEN Jie. Load Test Evaluation of Large Span CFST Arch Bridge [J]. China Water Transport, 2015, 15 (3): 218-219.

[5] 杨孟刚,曹志光. 初应力对大跨度钢管混凝土拱桥极限承载力的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2010,7(4):6-10.
YANG Menggang, CAO Zhiguang. Influence of Initial Stress on the Ultimate Bearing Capacity of Long-span CFST Arch Bridges [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7 (4):6-10.

[6] 韩兴,菜子龙,李鑫,等. 高速铁路大跨度钢管混凝土拱桥车桥耦合振动仿真分析[J]. 铁道标准设计,2016,60(4):36-39.
HAN Xing, CAI Zilong, LI Xin, et al. Coupled Vibration Analysis of Vehicle-bridge System for Long-span Concrete Filled Steel Tube Arch Bridge on High Speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2016, 60 (4): 36-39.

[7] 魏晖,朱洪涛,殷华,等. 高铁轨道平顺性的150 m/300 m 校验及其快速测量[J]. 铁道工程学报,2015,32(1):44-48.
WEI Hui, ZHU Hongtao, YIN Hua, et al. 150 m /300 m Check for the Irregularities of HSR and Its Rapid Survey [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(1): 44-48.

(编辑:车晓娟 白雪)

(上接第 35 页)

[3] 冯海宁,龚晓南,徐日庆. 顶管施工环境影响的有限元计算分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(7):1159-1162.
FENG Haining, GONG Xiaonan, XU Riqing. Finite Element Analysis of Influence of Pipe-jacking Construction on Environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(7): 1159-1162.

[4] 屠毓敏. 长距离顶管穿越海堤时的堤面沉降分析[J]. 中国市政工程,2001,23(1):53-55.
TU Yumin. Surface Settlement from Long Distance Pipe Jacking Through An Embankment [J]. China Municipal Engineering, 2001, 23(1): 53-55.

[5] Sulsky D, Kaul A. Implicit Dynamics in The Material－Point Method [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2004, 193(12): 1137-1170.

[6] 廉艳平,张帆,刘岩,等. 物质点法的理论和应用[J]. 力学进展,

2013,43(2):237-264.
LIAN Yanping, ZHANG Fan, LIU Yan, et al. Theory and Application of Material Point Method [J]. Advances In Mechanics, 2013, 43(2): 237-264.

[7] 史卜涛,张云,张巍. 边坡稳定性分析的物质点强度折减法[J]. 岩土工程学报,2016,38(9):1678-1684.
SHI Butao, ZHANG Yun, ZHANG Wei. Strength Reduction Material Point Method for Slope Stability [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1678-1684.

[8] 孙玉进,宋二祥. 大位移滑坡形态的物质点法模拟[J]. 岩土工程学报,2015,37(7):1218-1225.
SUN Yujin, SONG Erxiang. Simulation of Large-displacement Landslide by Material Point Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1218-1225.

(编辑:赵立红 张红英)