

# 浅埋大跨度顶管隧道下穿公路的地表沉降分析

邓开鸿

深圳市特区建发海洋产业发展有限公司

DOI:10.12238/btr.v7i4.4476

**[摘要]** 超浅埋大断面矩形顶管隧道下穿高速公路施工过程中,因顶管施工循环顶进对地层的重复扰动作用和相邻隧道的相互影响,极易造成高速公路路面累积变形过大导致工程灾害和安全事故。为此,本文结合某下穿高速矩形顶管隧道工程,通过现场监测和数值模拟,探讨了矩形顶管顶进施工过程中高速公路路面的沉降变形规律。该案例地表沉降的研究结果可为类似工程施工设计提供参考。

**[关键词]** 矩形顶管; 隧道施工; 数值模拟; 地表沉降

**中图分类号:** U455 **文献标识码:** A

Shallow-buried long-span pipe jacking tunnel under highway Surface subsidence analysis

Kaihong Deng

Shenzhen SEZ Jianfa Marine Industry Development Co.,Ltd

**[Abstract]** During the construction of ultra-shallow rectangular pipe jacking tunnel with large cross-section passing through expressway, due to the repeated disturbance of stratum caused by cyclic jacking of pipe jacking construction and the mutual influence of adjacent tunnels, it is easy to cause excessive accumulated deformation of expressway pavement, leading to engineering disasters and safety accidents. Therefore, combining with a high-speed rectangular pipe jacking tunnel project, through field monitoring and numerical simulation, this paper discusses the settlement and deformation law of expressway pavement during rectangular pipe jacking construction. The research results of surface subsidence in this case can provide reference for similar engineering construction design.

**[Key words]** rectangular pipe jacking; Tunnel construction; Numerical simulation; Surface subsidence

## 引言

城市化的高水平发展对城市交通基础设施提出了更高的要求,发展城市地下空间已成为了必然选择。城市隧道施工过程中为减小对地表环境的影响,一般采用暗挖法施工,暗挖法包括浅埋暗挖法、盾构法、顶管法等非开挖施工方法。与传统的开挖方法相比,顶管法不需要开挖地面就能穿越道路、地上建筑等障碍物。此外,顶管法不需要进行大开挖破坏环境,能有效节约资源和降低碳排放。再者,顶管法的土体切削也较为容易,施工控制简单,但其施工对土体的扰动会更大。各类工程实例表明,顶管顶进过程中不可避免地对周围土体产生不同程度的扰动,极易出现顶力过大、土体应力集中<sup>[1]</sup>及土体变形超限<sup>[2]</sup>等施工安全问题。尽管矩形顶管技术已经相对成熟,但是在 大断面、浅覆土的条件下使用矩形顶管技术修建既有高速公路的地下隧道或通道的实例和研究相对较少。因此,亟需对超浅埋大跨度矩形顶管隧道施工引起的一系列环境效应进行深入研究。

针对矩形顶管隧道施工的环境效应中的地表变形问题,许多学者对矩形顶管隧道变形的原因进行了深入的探究,主要有地质

条件<sup>[1]</sup>、隧道埋深、隧道间距和地层损失等影响因素,而地层损失是矩形顶管施工导致地层变形的关键因素<sup>[2-4]</sup>。现有的矩形顶管隧道施工引起土体变形的研究方法主要有:经验公式法<sup>[5]</sup>、解析理论法<sup>[6]</sup>、模型试验法<sup>[7]</sup>、人工智能法<sup>[8]</sup>和数值模拟法<sup>[9]</sup>。数值模拟法虽然在一定程度上简化了繁杂的施工过程,在本构模型参数的选取上也存在一定困难。但是,数值模拟方法不仅考虑了土体性质、顶管与土体之间的相互作用等因素,还考虑了施工对周围环境的影响,分析预测地表变形的可信度较高。为减少矩形顶管顶进施工过程对地层的扰动,提高分析预测的可信度,国内外学者运用数值模拟方法进行了一些有益的探索<sup>[10-11]</sup>。

本文在充分考虑地质条件和施工步骤的基础上,运用有限元数值模拟方法,对某超浅埋大跨度矩形顶管隧道的施工过程进行数值模拟。同时,结合现场监测数据对地层变形进行对比研究,探讨地表沉降的变化规律,以期以后类似的工程提供参考。

## 1 工程概况

本项目采用2孔净跨径18.2m×6.2m的矩形顶管,以斜交角63.881°顶进下穿高速公路。

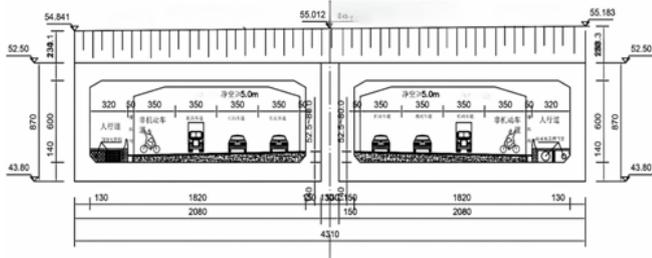


图1 矩形顶管截面图

为便于顶进作业,顶管分为12、13、13、13m四节预制,并在顶管各段之间设置一个中继间。为保证顶管前后接对齐接顺,矩形顶管顶板及侧墙上设对正插销。此外,为了最大程度上减少对公路运营的影响,本工程采用矩形顶管顶进法,该方法将矩形顶管顶进和盾构法的原理相结合。同时为了减少摩擦,钢盾构的宽度在两侧比顶管宽。本项目的准备工作与矩形顶管顶进的一般施工基本相同,包括开挖和加固工作坑、后墙、滑道、顶管施工,以及顶进装置的安装。

### 2 变形监测结果分析

#### 2.1 监测方案

为确保矩形顶管顶进就位后标高及中线偏差均达到规范指标的优良标准以及在顶进施工中不发生规范不容许的裂缝,因此,在顶管顶进过程中进行了十分严格的施工监测和控制,并将测点布置在两侧应急车道护栏边缘处以及中间分隔带处,布置3~4个测试断面。主要监测点的位置如下图2所示。

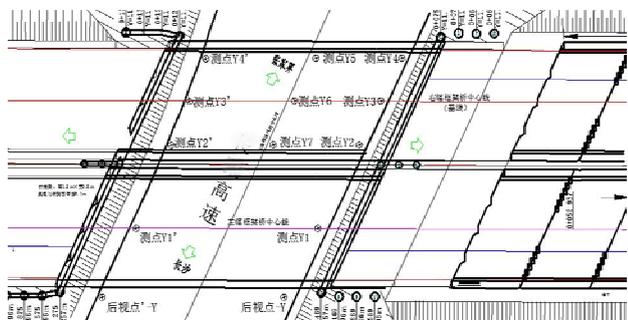


图2 路面变形观测点布置图

#### 2.2 监测结果

监测结果分析下图显示了公路轴线监测点Y2、Y3、Y4、Z1、Z2和Z3的监测结果和模拟结果,以上监测点分布在矩形顶管顶进边缘线,可以监测到比较完整的矩形顶管顶进过程,具有一定的代表性。从图中可以总结出以下几点:

(1)在顶进过程中,右幅监测点的沉降值大于左幅监测点的沉降值,且右幅监测点最大的沉降值为78.07mm;

(2)随着矩形顶管的顶进,沉降量经历了三个变化阶段,第一阶段为沉降量缓慢变化,第二阶段为沉降量快速增加,第三阶段为沉降量逐步减少并趋于稳定;

(3)根据对监测值与模拟值的相关性分析(如表1所示)可知,监测值与模拟值之间存在较大的物质,但其趋势大致保持一致。

此外,右幅监测值与模拟值的拟合度比左幅监测值与模拟值的拟合度低。

表1 监测点监测值与模拟值相关性分析

	Y2	Y3	Y4	Z1	Z2	Z3
均方根	10.100	18.931	9.612	11.694	9.651	11.210
相关系数	0.797	0.570	0.937	0.839	0.902	0.739
平均误差	-27.649	-42.378	-41.624	-31.753	-38.611	-14.559

#### 2.3 误差分析

(1)本次施工左幅、右幅顶管并非同时顶进,而是右幅先行顶进完成后,左幅开始顶进。因此,在左幅顶进时,不可避免地对右幅造成一定程度上的土体扰动,进而影响其沉降值。所以右幅监测点的累计沉降值大于左幅监测点的累计沉降值。此外,由于在进行数值模拟时,并未能充分考虑实际施工中一些注浆参数等影响因素,进而造成了右幅监测值与模拟值的拟合度比左幅低。虽然并未充分考虑影响土体沉降的因素,但左幅与右幅的监测值和模拟值的变化趋势基本保持一致,数值模拟预测分析的可信度较高,对类似工程施工具有一定的指导意义;

(2)由于此次施工不中断既有公路的交通,监测点只能布设在应急车道内且监测点数量有限。因此,无法获得全面的监测数据。此外,根据模拟值可知沉降最大值出现在路面边缘。但是,路面边缘并未布设监测点。

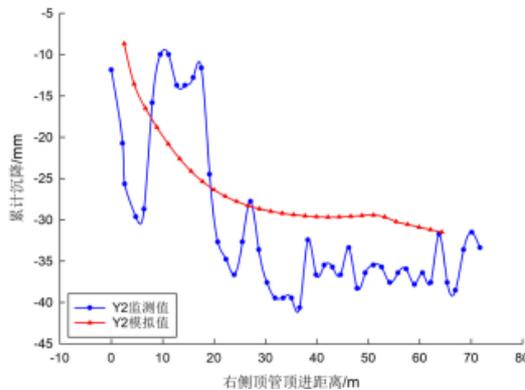


图3 Y2监测点监测值与模拟值对比图

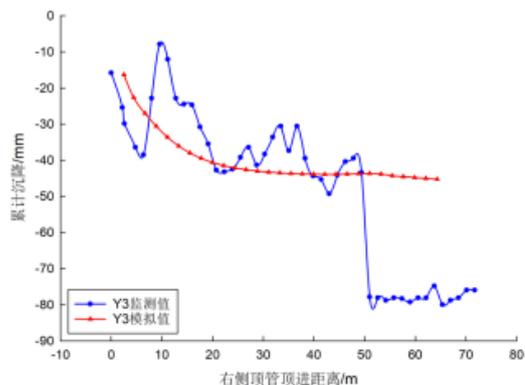


图4 Y3监测点监测值与模拟值对比图

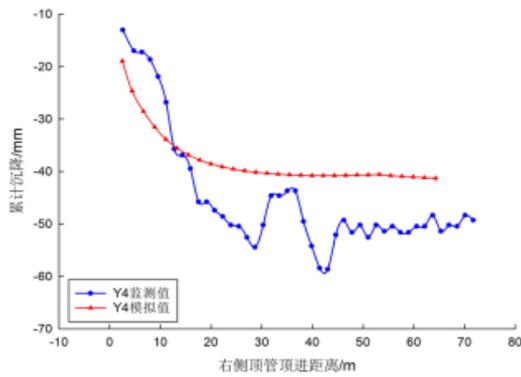


图5 Y4监测点监测值与模拟值对比图

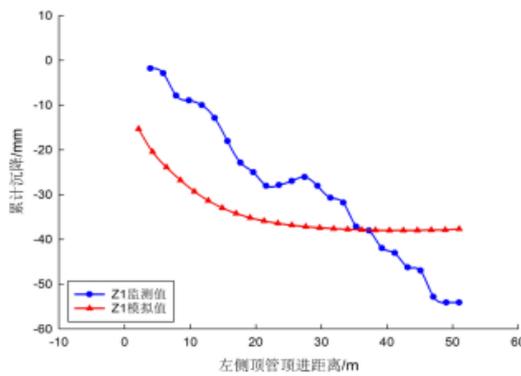


图6 Z1监测点监测值与模拟值对比图

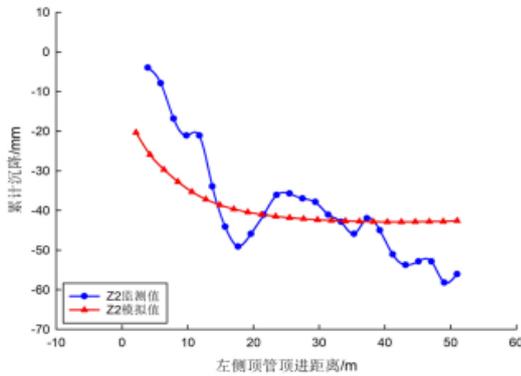


图7 Z2监测点监测值与模拟值对比图

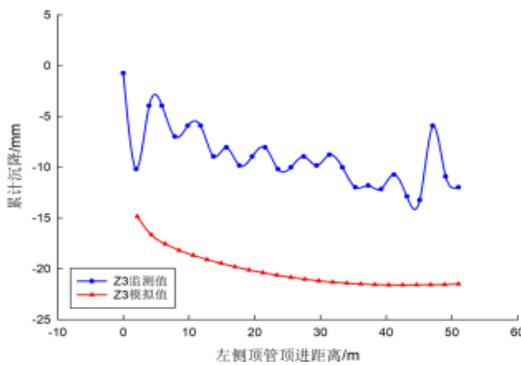


图8 Z3监测点监测值模拟值对比图

### 3 数值模型

#### 3.1 数值模拟方法

为模拟完整的施工过程,进一步考虑土体之间的相互作用,利用Midas GTS-NX程序建立了地面尺寸纵向上为171.85m,横向上为86.2m,垂直方向上为25.91m的矩形顶管隧道的三维数值模型如下图9所示。此外,由于弹性模量不能直接从试验中获取数据,土层的初始弹性模量值以及其他土体参数来自设计文件和工程经验,顶管和钢盾构的结构参数从设计文件中获取,如下表2和表3所示。

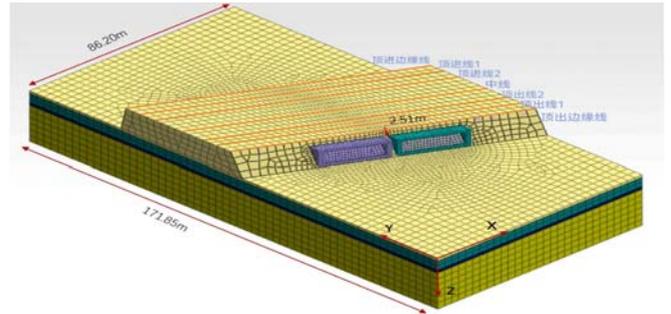


图9 三维数值建模模型图

表2 模型土体物理参数

土	容重 (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 (MPa)	泊松 比	黏聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
填筑土	18	100	0.35	25	25
粉质粘土	20	24	0.33	23	13
强风化泥质粉砂岩	24	500	0.23	50	30
中风化泥质粉砂岩	25	4000	0.18	175	35

表3 模型结构参数

结构	容重(kN/m <sup>3</sup> )	泊松比	弹性模量(MPa)
隧道管节	25	0.28	32500
钢盾构	78	0.3	20000

#### 3.2 数值模拟结果

图10~17等显示了不同顶进阶段的公路沉降槽曲线。在矩形顶管顶进过程中,高速公路路面逐渐下沉,且高速公路沉降集中在顶进口附近区域。数值模拟结果显示,本次工程施工引起的竖向位移沉降槽稳定在轴线两边30~40m范围内,在中心轴线处沉降较小。此外,在左幅顶管顶进15m后,沉降曲线大致沿坐标轴对称,最终竖向变形趋于稳定。

数值模拟得到公路的最大沉降量为96.25mm,且出现在高速公路的西部路缘。由此可得出结论:距离入口越远,沉降越小。造成这种现象的主要原因为:(1)入口一侧的路堤经历了一个包括准备阶段和顶进阶段的完整的顶进施工过程。因此,在顶管顶进的起点和终点之间将存在中间沉降值;(2)在顶进开始时,顶管周围土体难以建立平衡状态。

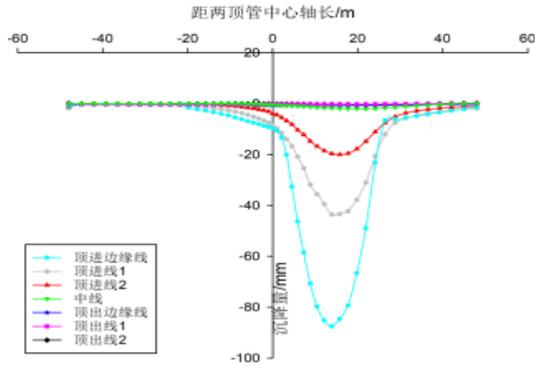


图10 右幅顶进20m沉降图

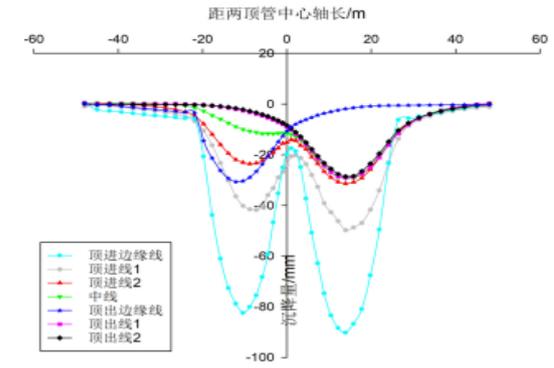


图14 左幅顶进26m沉降图

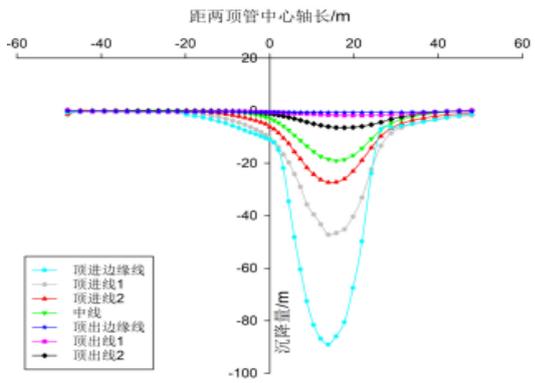


图11 右幅顶进33m沉降图

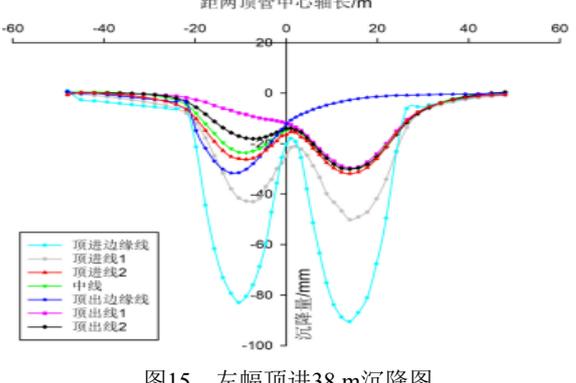


图15 左幅顶进38m沉降图

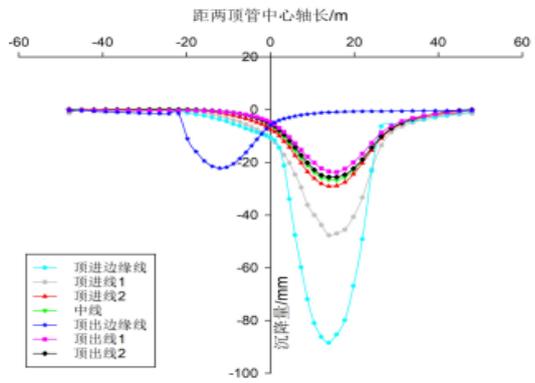


图12 右幅顶进51m沉降图

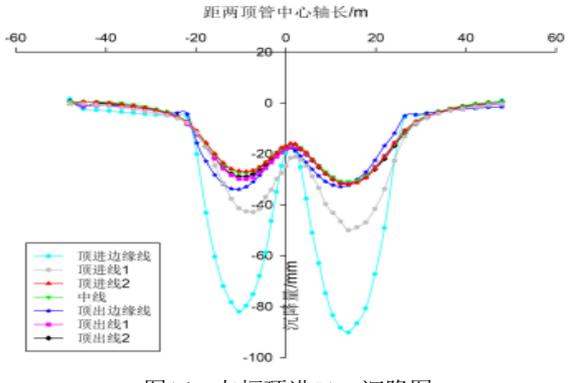


图16 左幅顶进51m沉降图

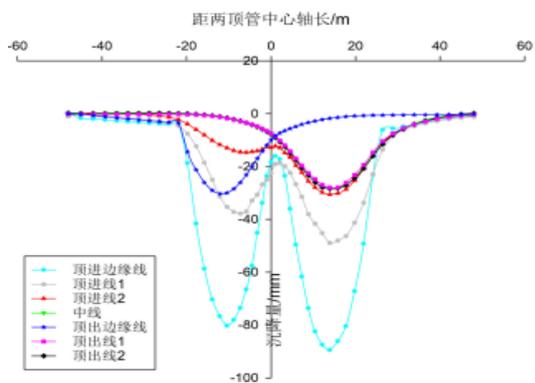


图13 左幅顶进15m沉降图

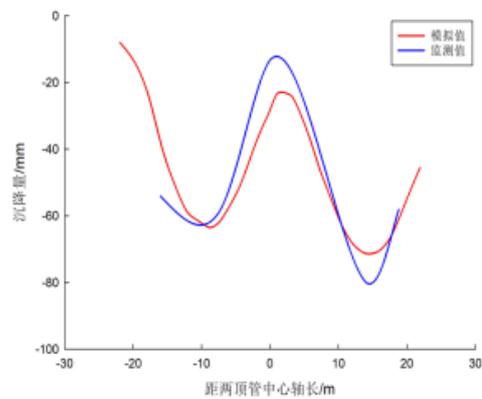


图17 数值模拟值与监测值对比图

由图17可知,由于模型的简化和实际施工的复杂性,监测数

据与数值模拟数据有一定的差异。但是两条沉降槽曲线遵循相同的趋势并相互接近,这表明本次数值模拟数据可以反映工程实际中的沉降行为的主要特征,对今后类似工程具有一定的指导意义。

#### 4 结论

本文介绍了一个超浅埋双孔大跨度矩形顶管隧道下穿高速公路的工程(总长51m,宽42.6m,高8.7m),详细地讨论了施工方案、监测方案以及顶进过程中的三维数值模拟,并将监测结果与数值模拟结果进行比较分析,总结如下:

(1)顶管初步顶进时沉降变形较小,顶进10m左右沉降猛增,后保持稳定增长水平。直至顶进30m左右,沉降速度减小,沉降趋向平稳。

(2)顶管起点的竖向位移均大于终点,其最大竖向位移发生在滞后顶进区域,其沉降槽曲线稳定在轴线两边30~40m范围内。此外,先行顶进的矩形顶管(右幅)比后一个顶进的矩形顶管(左幅)在公路上引起土体扰动造成了更大的沉降。

(3)通过对比分析竖向位移的监测值和模拟值并结合相关性分析可知,尽管监测数据与模拟数据存在一定的误差,但是两条沉降槽曲线遵循相同的趋势并相互接近。因此,本次研究对超浅埋大跨度矩形顶管隧道施工产生的一系列地表沉降的分析预测的可信度较高,可为类似工程的施工设计提供参考。

#### [参考文献]

[1]覃卫民,楚斌,大断面箱涵下穿高速公路过程的施工监测分析[J].岩石力学与工程学报,2009,28(09):1790-1797.

[2]王晓睿,周峰,张振,等,超大断面矩形顶管隧道施工动态变形规律[J].地球科学,2016,41(11):1959-1965.

[3]周小淇,史培新,刘维,等,富水软弱地层矩形混凝土顶管

施工地表沉降研究[J].北京交通大学学报,2021,45(03):69-76.

[4]朱健,复杂环境下大断面矩形顶管地层损失控制措施研究[J].现代隧道技术,2020,57(S1):1015-1021.

[5]K. Shou, F. Chang, Analysis of pipe-soil interaction for a miniature pipejacking, Journal of Mechanics 22(3)(2006)213-220.

[6]尹荣申,杨伟超,张平平,等,多孔大断面矩形顶管施工的地层变形特征及演化规律[J].铁道科学与工程学报,2018,15(10):2597-2605.

[7]甄亮,潘羽擎,李晓军,大断面矩形顶管同步注浆可视化试验[J].现代隧道技术,2021,58(S1):387-393.

[8]M.Cheng,Y.Lu,Developing a risk assessment method for complex pipe jacking construction projects, Automation in Construction58(2015)48-59.

[9]丁万涛,王中荣,郭晓炜,等,大直径矩形顶管开挖面极限支护力计算方法[J].科学技术与工程,2021,21(22):9563-9569.

[10]M.Karakouzian,M.Karami,M.Nazari-Sharabian,S. Ahmad, Flow-induced stresses and displacements in jointed concrete pipes installed by pipe jacking method,Fluids4(1)(2019)34.

[11]K.Wen,H.Shimada, W.Zeng,T.Sasaoka,D.Qian, Frictional analysis of pipe-slurry-soil interaction and jacking force prediction of rectangular pipe jacking,European Journal of Environmental and Civil Engineering24(6)(2020)814-832.

#### 作者简介:

邓开鸿(1985--),男,侗族,湖南芷江人,硕士研究生,工程师,岩土工程。