

# 浅埋超大矩形顶管小净距下穿既有箱涵的变形特性分析

周文朋<sup>1</sup>,王开军<sup>1</sup>,冯宏朝<sup>1</sup>,高 梁<sup>2</sup>,窦保洋<sup>3</sup>,徐荣超<sup>3</sup>

(1.中国水利水电第十一工程局有限公司,河南郑州 450001;2.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西西安 710065;3.华北水利水电大学,地球科学与工程学院,河南郑州 450046)

**[摘要]**大断面顶管施工不可避免地会引起临近既有结构物的变形,准确分析与预测其变形规律是采取针对性保护措施的前提。本研究基于三维数值模拟,分析浅埋超大矩形顶管左右密贴顶进小净距下穿既有箱涵变形特性的影响规律。结果表明:(1)箱涵变形随着顶管的顶进呈现出先隆起后沉降的变化趋势;顶管顶进对箱涵造成3次明显扰动,分别对应顶管头部位于箱涵前部、箱涵中部、箱涵后部三个位置。(2)左线顶管穿越后,箱涵整体沉降呈V字型的分布规律;右线顶管施工会造成箱涵二次沉降,最大沉降变形由9.33 mm增至11.18 mm。(3)箱涵水平位移整体呈中间大、两头小的倒V字型分布,最大水平位移为15.7 mm;且既有箱涵水平位移大于竖向沉降变形。(4)顶管顶进过程中,箱涵迎土面土压力呈现先增加后减少,再趋于稳定的变化趋势。(5)参数敏感性分析表明,与管土摩擦系数相比,掌子面支护比对箱涵变形的影响效应更显著。

**[关键词]** 矩形顶管 数值模拟 下穿箱涵 箱涵位移 箱涵土压力

**[中图分类号]** P642.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2025)01-0185-10

Zhou Wenpeng, Wang Kaijun, Feng Hongchao, Gao Liang, Dou Baoyang, Xu Rongchao. Deformation characteristics of existing box culverts due to the underpass of extra-large rectangular top pipe under the condition of shallow burial and low clearance[J]. *Geology and Exploration*, 2025, 61(1): 0185-0194.

## 0 引言

近年来,暗挖工法在地下工程中的应用越来越广泛,与明挖法相比其具有不阻碍交通、环境污染较小、不需要大量改迁管线、工期短等优点(彭立敏等,2015;许有俊等,2018;韩仲慧和王梅,2024;王开军等,2024)。顶管工法作为暗挖工法中的一种,以其非开挖穿越地层的技术,且相较于圆形顶管,其内部使用效率高而被广泛应用于各种地下空间施工中(邓长茂等,2016;贾连辉,2016;洪开荣,2017)。

矩形顶管技术在城市地下施工中已经取得了显著进展(荣亮和杨红军,2015;王晓睿等,2016;洪

开荣和冯欢欢,2021)。通过采用自动化施工设备和智能监测系统,提高了施工精度和效率;采用数值模拟和动态响应分析,提升了矩形顶管技术在复杂地质条件下的适应性(喻军和龚晓南,2014;吴勇等,2017;李辉等,2019)。

矩形顶管施工过程中由于地层损失和“背土效应”势必会对工程周围土体和既有建筑物造成影响(李方楠等,2012;郑永光等,2018;李志南等,2020)。尤其在软弱土层地质条件下,一旦造成原有结构物的破坏,往往造成较大的安全隐患和难以估计的财产损失(郭延辉等,2021;王浩等,2021;张林,2021)。因此,顶管施工对既有结构影响效应的

**[收稿日期]** 2024-02-06; **[改回日期]** 2024-10-20; **[责任编辑]** 郝情情。

**[基金项目]** 河南省科技攻关项目(编号:222102320141)资助。

**[第一作者]** 周文朋(1988年-),男,2016年毕业于内蒙古科技大学,土木工程专业,获硕士学位,工程师,主要从事隧道及地下空间开发方面工作与研究。E-mail: 15764959457@139.com。

**[通讯作者]** 徐荣超(1988年-),男,2015年毕业于中国科学院武汉岩土力学研究所,岩土工程专业,获博士学位,副教授,博士生导师,主要从事地下工程灾害防控方面的工作。E-mail: rexirsm@126.com。

研究得到了越来越多的学者及工程师们的重视(刘敬亮等,2020;吴至帆,2021)。

从已有研究成果来看,受到工程地质条件、施工方法与技术等的影响,下穿施工对既有隧道(许斌锋等,2019;项婉等,2019;马浴阳,2023)、既有铁路(高鹏,2022)、既有市政管道(陈家财等,2022)的影响规律差异显著。尽管有学者针对矩形顶管施工对既有箱涵的影响效应开展了相关研究(张海洋,2023;丁传松,2023),但是目前针对超大矩形顶管左右密贴顶进施工,且小净距下穿既有箱涵方面未见相关成果报道。

为了确保在顶管顶进过程中既有箱涵的稳定性,本研究以目前国内外断面最大的矩形顶管项目深圳地铁12号线沙三站为工程背景,基于三维数值仿真计算,研究浅埋超大矩形顶管左右密贴顶进施工对既有箱涵变形特性的影响规律;同时考虑施工因素影响,结合掌子面支护比、管土摩擦系数分析其对既有箱涵的变形影响规律。

## 1 工程概况

沙三站是深圳地铁12号线二期工程的第3个车站,前接西环路站,后连步涌站。车站位于沙井大街与帝堂路交叉口处,沿沙井大街敷设。采用矩形顶管顶进,断面 $11.275\text{ m}\times 13.53\text{ m}$ ,尺寸超大,断面高宽比小于1。单线顶进长度70 m,左、右线累计为140 m。单线管节断面尺寸 $11.275\text{ m}\times 13.53\text{ m}$ ,整体成型管节断面尺寸为 $22.6\text{ m}\times 13.53\text{ m}$ ,且管节为多块组合拼装成环、井下平移就位。顶管覆土厚度6.5 m,地层由上至下分别为素填土、淤泥层(局部)、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、砂质黏性土。

既有箱涵截面尺寸为 $11.5\text{ m}\times 3.6\text{ m}$ ,箱涵顶部距离地表仅0.3 m,顶管顶部距离箱涵仅2.5 m,如图1所示。顶管行进过程中极易对既有箱涵造成较大影响。因此,施工现场对既有箱涵实施了相应的加固方案,如图2所示。加固方案为既有箱涵两侧采用钢筋混凝土灌注桩,桩直径1.2 m,长度13.8 m,当顶管开始始发前,拔出相应位置加固桩,孔洞顶管范围内填充采用7%水泥拌合土,其余采用C20混凝土填充。

## 2 数值计算方案

### 2.1 计算方案、模型及参数的确定

模型整体范围 $X\times Y\times Z=80\text{ m}\times 70\text{ m}\times 24\text{ m}$ ,模

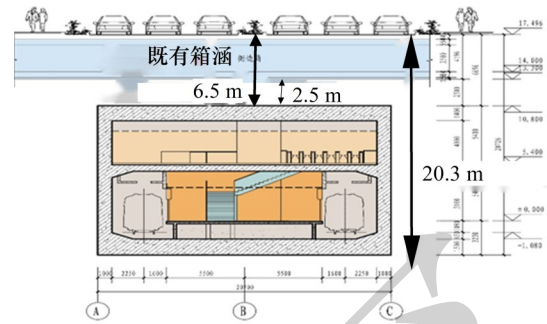


图1 顶管与既有箱涵位置关系图

Fig. 1 Diagram of the relationship between top pipe and existing box culvert

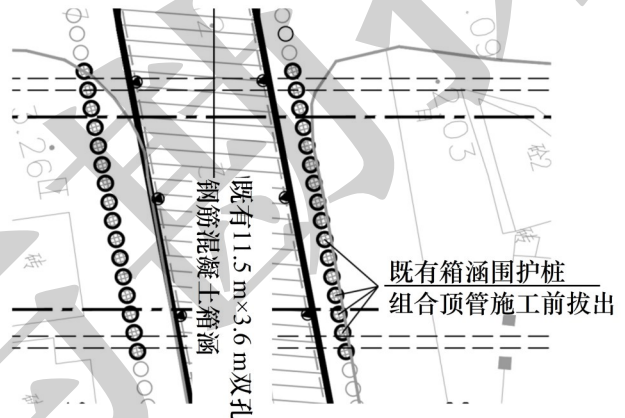


图2 既有箱涵加固桩示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reinforcement piles for existing box culvert

型四周约束其法向位移,底部约束其竖向位移,顶部为自由界面,可自由变形,如图3a、3b所示。模型对土体进行简化,土体由上至下依次为素填土、淤泥层、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、砂质黏性土,相应参数见表1。土体本构采取Mohr-Coulomb模型,模型共生成187434个单元,313281个节点。顶管机本体采用板单元进行模型,型钢板撑采用梁单元进行模拟,相应参数见表2。土体始发端的加固方案为SMW工法桩+三轴搅拌桩8 m,箱涵本体采用C35混凝土,既有箱涵加固桩顶管范围内7%水泥拌合土的力学参数根据相应的拟合曲线(陈晓静等,2021)求得,其余范围内填充C20混凝土,加固桩位置由图3测量得出,具体参数见表3。同时,为了更好地分析掌子面支护力对既有箱涵的影响,在计算模拟过程中引入掌子面支护比 $\lambda$ 概念(秦建设等,2007),定义见式(1):

$$\lambda = \frac{\sigma_s}{\sigma_0} \quad (1)$$

式中： $\sigma_s$ 为掌子面中心处的支护压力，kPa； $\sigma_0$ 为掌子面中心处的静止土压力，kPa。

根据现场施工方案，本研究提出 5 种不同的方

案，见表 4，对比分析不同施工参数对既有箱涵的影响，其中，工况一是根据现场施工方案计算而来的。需要指出的是，当实际工程没有采用减摩措施时，管土摩擦系数一般为 0.3，因此选取 0.1、0.2 和 0.3 三种管土摩擦系数探究其对箱涵变形的影响规律。

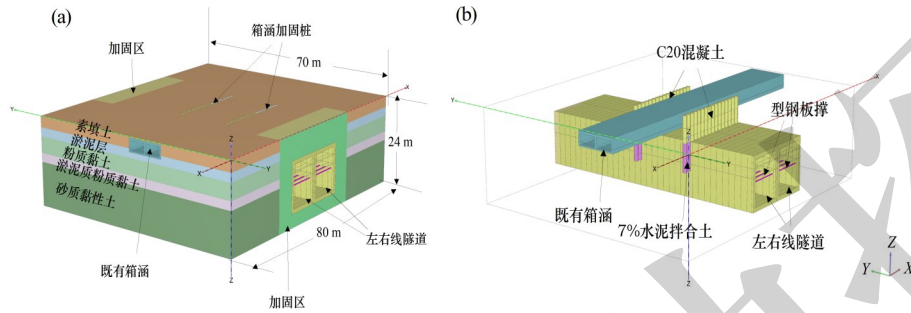


图 3 计算模型

Fig. 3 Computation models

a-计算整体模型；b-既有箱涵加固示意图

a-overall calculation model； b-schematic diagram of reinforcement of existing box culvert

表 1 土体物理力学参数表

地层	容重 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模量 $E$ (MPa)	泊松比 $\nu$	粘聚力 $c$ (kPa)	内摩擦角 $\varphi$ (°)
素填土	17.8	6.0	0.40	15.0	12.0
淤泥层	17.3	3.0	0.40	10.0	2.5
粉质粘土	19.0	5.5	0.30	25.0	12.0
淤泥质粉质粘土	17.3	3.0	0.40	13.5	5.5
砂质粘性土	18.5	25.0	0.28	25.0	22.5

表 2 单元材料参数

参数	容重 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 $E$ (MPa)	泊松比 $\nu$	$D$ (m)	$G$ (kN/m <sup>2</sup> )
顶管机	25.0	200e6	0.15	0.17	100e6
型钢板撑	25.0	200e6	0.15	/	/

表 3 加固区物理力学参数表

地层	容重 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模量 $E$ (MPa)	泊松比 $\nu$	粘聚力 $c$ (kPa)	摩擦角 $\varphi$ (°)
SMW 挡墙 (线弹性)	25.0	2.25E+03	0.25	/	/
三轴搅拌桩	25.0	100.0	0.25	200	30
7% 水泥拌合土	18.0	16.6	0.30	37	10

表 4 计算工况

方案	管土摩擦系数 $\mu$	掌子面支护比 $\lambda$
工况一	0.1	1.0
工况二	0.2	1.0
工况三	0.3	1.0
工况四	0.1	0.8
工况五	0.1	1.2

具体计算步骤如下：

(1)计算原状土体在自重作用下产生的初始位移，认为自重作用下形成的初始应力场即为原始应力场，随之把相应位移清零。

(2)激活相应位置处的箱涵，然后再次计算模型在自重作用下的相应位移，随之把相应位移清零，此时箱涵高出周围地表大约 5 cm，这与相应工程地质报告基本一致。

(3)激活相应位置土体加固区、箱涵加固桩，激活掌子面梯形支护力，同时顶管推进一环。

(4)重复第(3)步，推进至第 4 环(8 m)。此时激活第 4 环相应部分的注浆压力。

(5)推进至第 5 环(10 m)，此时顶管管尾脱出管片，激活相应位置的型钢板撑。

(6)重复上述步骤(3)至(5)，直到左线完成顶管穿越。

(7)左线完成穿越后,右线开始相应始发,同样重复上述步骤(3)至(5),直到右线完成顶管穿越。

### 2.2 计算结果合理性分析

为验证数值模拟结果的合理性,将现场监测结果和数值模拟结果进行对比。选择顶管左线正上方箱涵中心处监测点GX1进行分析。图4为监测点GX1竖向位移随左线顶管顶进距离的变化图,模拟结果与实测结果基本一致,但在顶管机顶进前20 m范围内,实测结果表现为沉降,这是由于在箱涵上方有较多车辆经过,在车辆动荷载反复作用下监测点表现为沉降。当顶管机掌子面接近箱涵时,箱涵表现为隆起状态,当顶管机经过箱涵后,箱涵由隆起状态变为沉降,且随着顶近距离的增加,沉降量也逐渐增加。

通过将现场监测数据与模拟结果对监测点随顶进长度变化情况可知,所选取各项参数合理,可进行顶管顶进过程模拟以及研究顶管顶进过程中箱涵变形情况。

## 3 计算结果分析

### 3.1 既有箱涵竖向沉降

图5分别为左线和右线依次穿越既有箱涵的

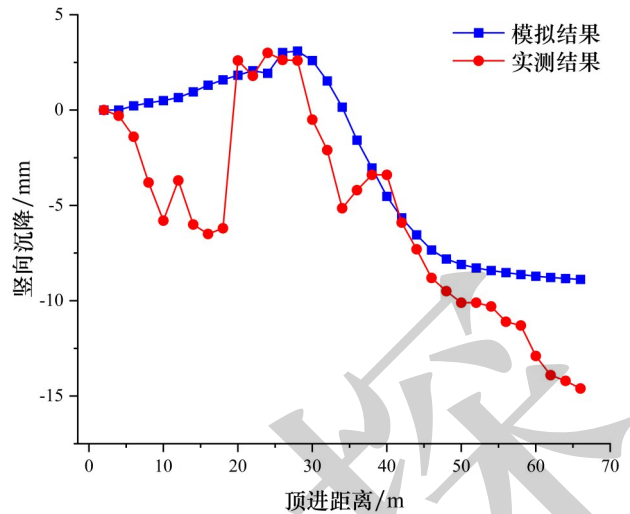


图4 箱涵监测点模拟与实测结果对比图

Fig. 4 Comparison between simulation and actual measurement results of box culvert monitoring points

竖向沉降位移云图。从图5a中可看出,当左线穿越后,左侧发生了较大幅度的沉降,最大沉降位置发生在左侧加固桩起始处。从图5b中可以看出,当右线穿越后,最大沉降位置发生了相应的改变,从左侧加固桩起始处转移右侧加固桩尾部。

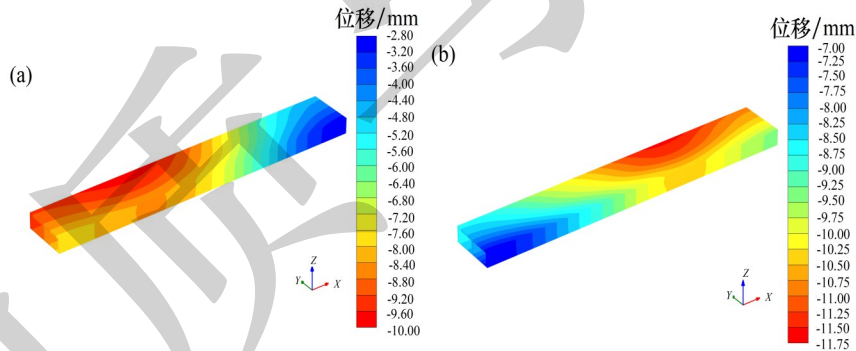


图5 竖向沉降云图

Fig. 5 Vertical settlement cloud maps

a-左线穿越后既有箱涵竖向沉降;b-右线穿越后既有箱涵竖向沉降

a-vertical settlement of existing box culvert after crossing the left line; b-vertical settlement of existing box culvert after crossing the right line

图6进一步绘制了既有箱涵纵向切面竖向位移沉降曲线。从图6可以看出,当左线穿越后,箱涵沉降整体呈现出左大右小的勺型分布,最大沉降为9.33 mm,最大沉降发生在箱涵左侧加固桩的起始位置处;此时右侧待顶进顶管隧道中心位置处箱涵已经发生了大约7.5 mm沉降;当右线顶进穿越后,箱涵整体沉降呈现出V字型分布,最大沉降为11.18 mm,沉降最大位置位于右侧加固桩的结束位置处;此外,

右线隧道顶管影响范围内箱涵沉降整体进一步增大,发生了二次沉降现象。

为了进一步研究既有箱涵随着顶管顶进时的竖向沉降变化情况,选取左侧顶管隧道中心所对应箱涵截面上相应的监测点,如图7a,得到其随左、右侧顶管顶进过程中竖向沉降变形变化情况如图7b所示。从图中可以看到,三点均呈现先隆起后沉降的变化规律。当左线顶管开始顶进的时候,前方土

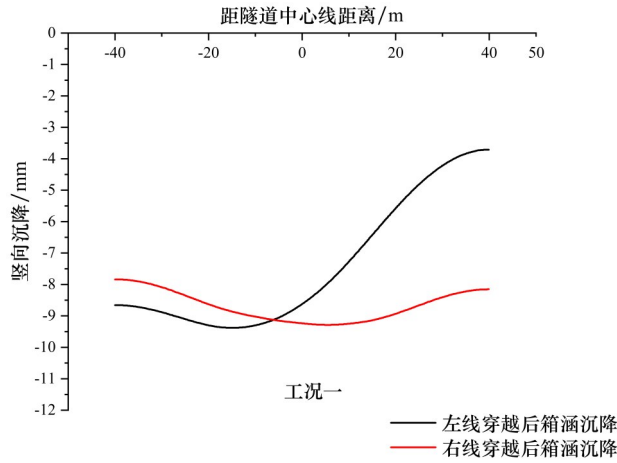


图 6 既有箱涵纵向剖面竖向位移沉降曲线

Fig. 6 Vertical displacement settlement curves of the existing box culvert longitudinal profile

体不断发生挤压,当顶进 24 m,此时顶管端部位于 A 点正下方,A 点隆起量达到最大,约为 4 mm;当顶进 28 m 时,B 和 C 点隆起量达到最大,约为 3 mm;由于顶管机依次穿越 A、B 及 C 三点,因此三点隆起变形不一致,这与顶管顶进方向密切相关。此外,从图中可以看出,当顶管机头顶进位置穿过三点时,该点变形由隆起迅速向沉降转变;当顶进至 42 m,箱涵在此时发生大幅度沉降,沉降量大约为 7.5 mm;随着顶管进一步顶进,箱涵沉降趋于稳定,最终最大沉降为 9.33 mm。当右线开始顶进的时候,箱涵同样是先发生隆起,隆起量约为 1 mm;当右线正下穿箱涵时,箱涵会再次发生沉降,随着右线顶管进一步顶进,箱涵沉降再次趋于稳定,最终沉降为 11.18 mm。可以发现,右线顶进后,会加大左线顶进造成沉降,大约增长 20%。

从图 7b 可以得出在顶管顶进过程中,既有箱涵发生了不均匀的沉降,为了更好的分析其沉降造成的影响,选取 A 和 C 两个监测点,通过对两点做差,能够更好的分析既有箱涵的不均匀沉降情况。由于右线顶进时和左线的变化规律相同,所以只绘制了左线顶进过程中的沉降差值曲线,如图 8 所示,其中正值代表 A 监测点高于 C 监测点。从图中可以看出,第一阶段是顶管下穿既有箱涵前,随着顶管不断的顶进,箱涵的不均匀沉降逐步增加,此阶段最大沉降差值为 3 mm。第二阶段起始段为顶管头部开始下穿箱涵,此时沉降差开始下降,至第二阶段末尾处沉降差达到最大,约为 4.4 mm,此时顶管头部位于箱涵中心正下方,此阶段箱涵发生较大的扭转,从 A 监测点高于 C 监测点扭转为 C 监测点高于 A 监测点。第三阶段是顶管全部位

于箱涵正下方,沉降差随着顶管顶进逐步增大,沉降差值增大至 2.1 mm 左右,此时箱涵再次发生了扭转,从 C 监测点高于 A 监测点扭转为 A 监测点高于 C 监测点。第四阶段为顶管完全下穿箱涵,箱涵整体为沉降状态,此阶段箱涵沉降差趋于稳定,最终的沉降差约为 2 mm。

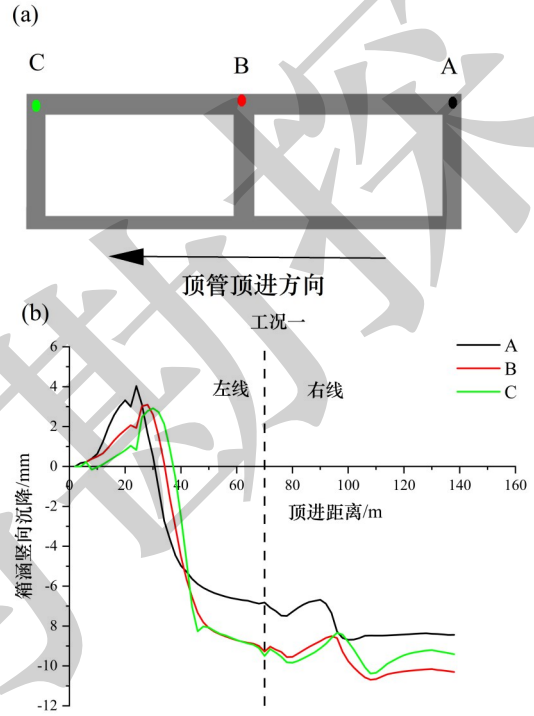


图 7 竖向沉降变化图

Fig. 7 Variation charts of vertical settlement

a-选取监测点示意图;b-监测点随计算阶段竖向沉降变化图  
a-selected monitoring points;b-vertical settlement variation of monitoring points with calculation stage

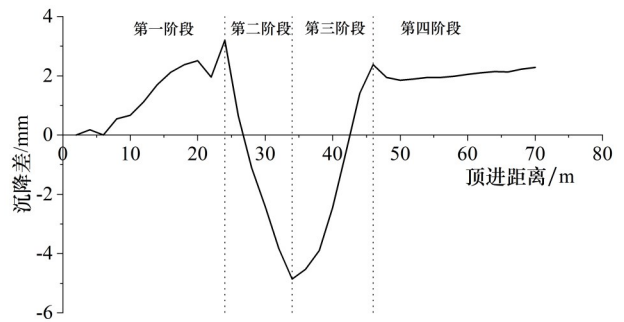


图 8 顶管顶进过程中不均匀沉降曲线

Fig. 8 Uneven settlement curve during pipe jacking process

图 7b 和图 8 的结果表明:左线顶管顶进过程中将对既有箱涵造成 3 次明显扰动(不均匀沉降

差值大):第一次为顶管下穿既有箱涵前,由于顶进前方土体不断挤压造成箱涵发生较大隆起;第二次为顶管头部行驶至箱涵中心正下方,此时箱涵开始沉降并经历第一次扭转;第三次为顶管完全穿越既有箱涵,此时箱涵沉降趋于稳定并经历第二次扭转。

### 3.2 既有箱涵水平位移

图9分别是左线和右线顶管穿越后既有箱涵的水平位移云图。从图9a可以看出左线穿越后,箱涵整体向接收井方向发生一定的水平位移,其左侧水平位移大于右侧水平位移。当右线穿越后,从图9b

可以看出箱涵最大水平位移从左侧转移到中部。图10进一步绘制了既有箱涵纵向剖面水平位移曲线,从图中可以看到,当左线穿越后(黑线),箱涵左侧整体发生大约11 mm的水平位移,而右侧随着距离的增大,其水平位移逐渐减小;当右线穿越后(红线),箱涵水平位移进一步增大,最大水平位移为15.70 mm。箱涵水平位移整体呈现出中间大两头小的倒V字型。

根据图5和图9可知,顶管顶进施工引起的既有箱涵水平位移要大于竖向沉降,最大水平位移为15.7 mm,而最大竖向沉降为11.18 mm。

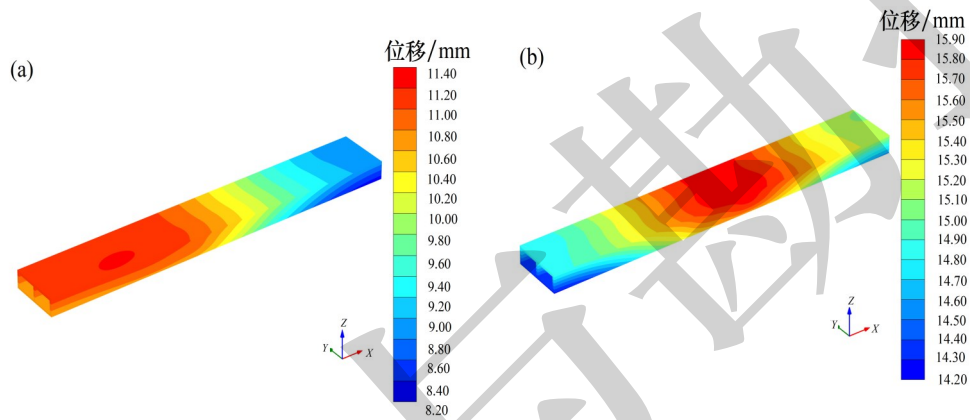


图9 水平位移云图

Fig. 9 Horizontal displacement cloud maps

a-左线穿越后既有箱涵水平位移云图;b-右线穿越后既有箱涵水平位移云图

a-vertical settlement of existing box culvert after crossing the left line; b-vertical settlement of existing box culvert after crossing the right line

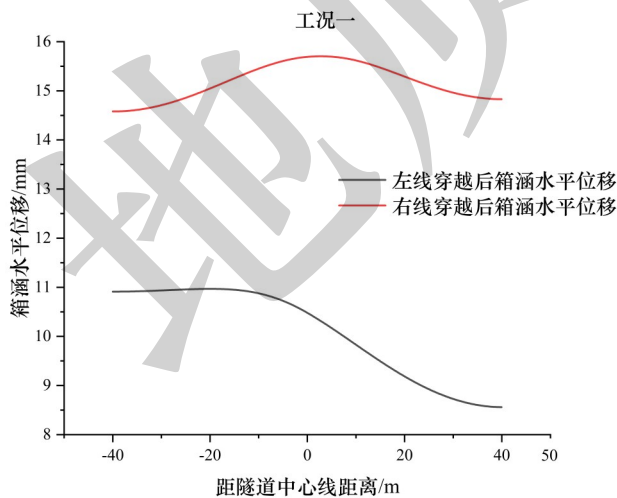


图10 既有箱涵纵向剖面水平位移曲线

Fig. 10 Horizontal displacement curves of existing box culvert longitudinal profile

### 3.3 既有箱涵土压力变化

图11绘制了迎土面土压力随顶进距离的变化曲线,D和E监测点分别为左侧隧道和右侧隧道中点正上方与箱涵迎土面中心点的交叉点。如图所示,当左侧顶管下穿箱涵前,由于挤土效应导致D点土压力不断增大,并且增速较快,最大土压力为68.21 kPa,同时E点的土压力也有一定幅度的增加;当左侧顶管下穿箱涵之后,由于此阶段的挤土效应有所降低,使得D点的土压力迅速下降,然后趋于稳定,土压力约为60 kPa,此时E点土压力基本保持不变。当左侧隧道贯通后,右侧顶管随之开始顶进,造成E点土压力激增;同时由于二次沉降,会使得部分左侧土体向右侧移动,使得D点土压力有所降低,此时土压力约为52 kPa;当右侧顶管下穿箱涵之后,由于挤土效应的进一步减少,使得D和E两点的土

压力进一步降低并趋于稳定和相等,此时两点土压力约为 48 kPa。

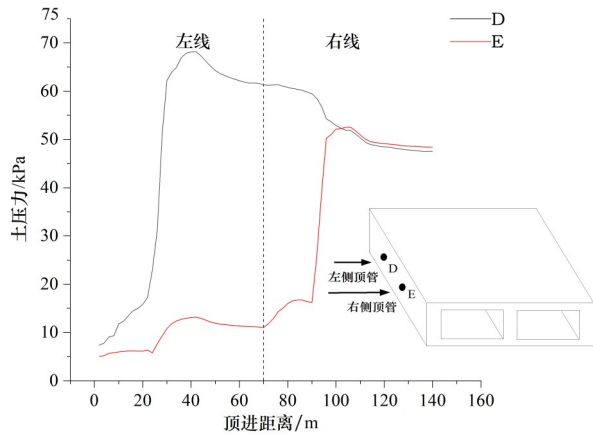


图 11 迎土面土压力变化曲线

Fig. 11 Variation curves of soil pressure on the soil facing surface

### 3.4 施工参数影响性分析

为更好分析既有箱涵变形特性对施工参数的敏感性,分别绘制了表 4 中五种工况下既有箱涵的竖向沉降及水平位移曲线,如图 12~14 所示。通过对比分析管土摩擦和掌子面支护力对于箱涵变形的影响规律,能够很好的指导现场顶进施工中参数的动态调整。

#### (1) 掌子面支护比

从图 12 中可以看出,当掌子面支护比增大时(黑色曲线 1.0~深蓝色曲线 1.2),既有箱涵的隆起量有所增大,最大隆起量从 3 mm 增大至 4.8 mm,但竖向沉降有所减少,最终沉降从 10.69 mm 减少至 6.9 mm;当掌子面支护比减少时(黑色曲线 1.0~绿色曲线 0.8),既有箱涵的隆起量有较大幅度的减少,从 3 mm 减少至 0.26 mm,但竖向沉降有所增大,最终沉降从 10.69 mm 增大至 16.55 mm。

从图 13 中可以看出,当掌子面支护比增大时(黑色曲线 1.0~深蓝色曲线 1.2),箱涵的最大沉降位置向右发生移动;而当掌子面支护比减少时(黑色曲线 1.0~绿色曲线 0.8),箱涵的最大沉降位置向左发生移动。说明随着掌子面支护比的减少,既有箱涵沉降位移越来越呈现出对称的 V 字型的特征,同时最大沉降位置也愈趋近于右侧隧道中心处。

从图 14 中可以看出,当掌子面支护比增大时(黑色曲线 1.0~深蓝色曲线 1.2),箱涵的最大水平位移从 15.7 mm 增大至 19.99 mm,增大了 27.3%,而当

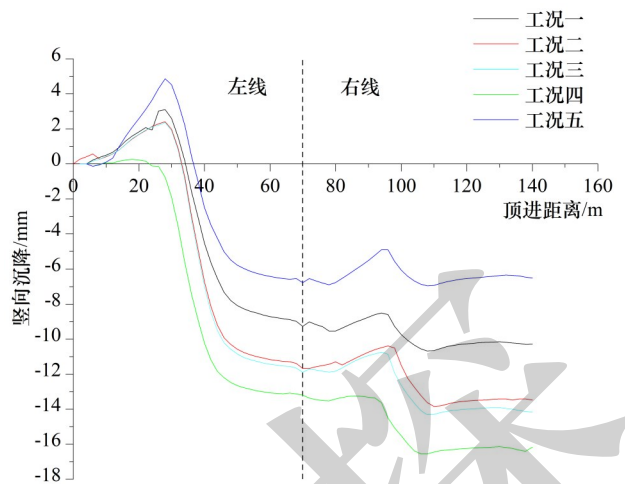


图 12 不同工况下竖向沉降随顶进距离的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of vertical settlement with jacking distance under different working conditions

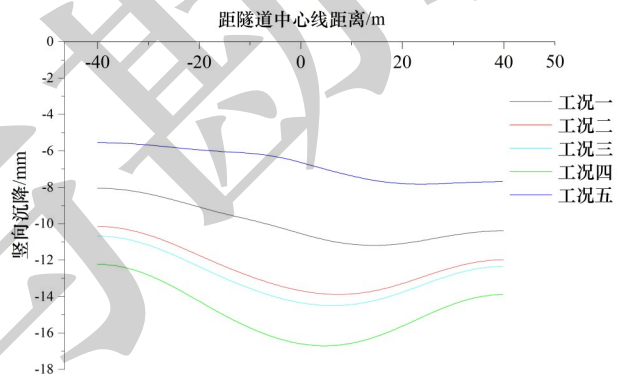


图 13 不同工况下箱涵纵向剖面竖向沉降曲线

Fig. 13 Vertical settlement curves of the longitudinal section of box culvert under different working conditions

掌子面支护比减少时(黑色曲线 1.0~绿色曲线 0.8),箱涵的最大水平位移从 15.7 mm 减少至 10.22 mm,减少了 34.9%。

#### (2) 管土摩擦系数

从图 12 中可以看出,当管土摩擦系数增大时(黑色 0.1~红色 0.2~青蓝色 0.3),既有箱涵隆起量基本相同,但竖向沉降有所增大。当管土摩擦从 0.1 增大至 0.2 时,最大沉降量从 10.69 mm 增大至 13.85 mm,增大了 29.56%,当管土摩擦从 0.2 增大至 0.3 时,最大沉降量从 13.85 mm 增大至 14.32 mm,增大了 3.4%。

从图 13 中可以看出,当管土摩擦系数增大时(黑色 0.1~红色 0.2~青蓝色 0.3),箱涵的最大沉降位置同样是向左侧偏移,从右侧加固桩尾部向右侧隧道中心处移动。而从图 14 可以看出,管土摩擦系数的增大对于箱涵的水平位移基本没有变化。

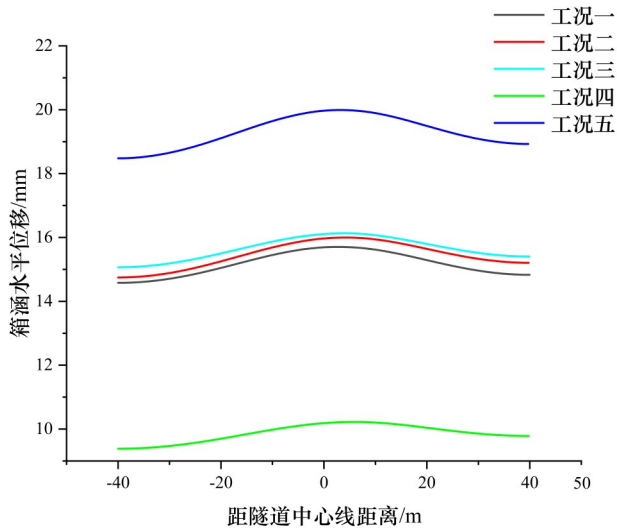


图 14 不同计算工况下箱涵纵向剖面水平位移曲线

Fig. 14 Horizontal displacement curves of the longitudinal profile of box culvert under different calculation conditions

#### 4 结论

本文以国内外断面最大的矩形顶管项目—深圳地铁 12 号线沙三站为工程背景,采用数值计算的方法研究了浅埋超大矩形顶管左右密贴顶进小净距下穿既有箱涵的变形特性。主要结论如下:

(1)在顶管顶进过程中,箱涵呈现出先隆起后沉降的变化趋势。左线穿越后,最大竖向沉降为 9.33 mm,最大水平位移为 11.18 mm;右线穿越后,最大竖向沉降为 11.00 mm,最大水平位移为 15.70 mm。

(2)左线顶管穿越后,箱涵整体沉降呈现出 V 字型的变化,最大沉降位于左线加固桩起始处;右线顶管穿越后,最大沉降位置位移右线加固桩结束处,并且右线顶管顶进过程中会造成左线原有位置的二次沉降。

(3)顶管顶进过程中对箱涵存在 3 次明显扰动,分别对应着顶管头部位于箱涵前部、箱涵中部、箱涵尾部三个位置。既有箱涵迎土面土压力随着顶管的顶进过程呈现出先增大后减小,再趋于稳定的变化趋势。

(4)参数敏感性分析表明,与管土摩擦系数相比,掌子面支护比对箱涵变形的影响更为显著,因此在施工中应该动态调整掌子面支护力,保证箱涵的稳定性。

#### [References]

Chen Jiakai, Zhao Weilei, Wang Qitao. 2022. Influence analysis of buried shield tunnel under existing urban pipeline [J]. *Shield Equipment & Project*, 43(12): 19-21 (in Chinese with English

abstract).

Chen Xiaojing, Wang Baotian, Zuo Jinyu, Li Wenwei. 2021. Study on compressive and shear strength of cement-mixed soil and correlation [J]. *Port & Waterway Engineering*, (8): 169-175 (in Chinese).

Deng Changmao, Peng Jimin, Shen Guohong. 2016. Discussion on control methods of ground surface settlement caused by rectangular pipe jacking construction in soft soils [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 12(4): 1002-1007 (in Chinese with English abstract).

Ding Chuansong. 2023. Deformation analyses of large section rectangular pipe jacking crossing underneath combined sewage culvert [J]. *Geotechnical Engineering Technique*, 37(1): 1-6 (in Chinese with English abstract).

Gao Peng. 2022. Influence of the Tianjin shield tunnel under-passing railway on the track settlement and control techniques [J]. *Modern Urban Transit*, (12): 63-68 (in Chinese with English abstract).

Guo Yanhui, Kong Zhijun, Li Sigui, He Jin. 2021. Research on the impact of natural gas pipeline culvert jacking on expressway [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 17(6): 1958-1964 (in Chinese with English abstract).

Han Zhonghui, Wang Mei. 2024. Assessing the effects of shallow-buried rectangular pipe jacking on nearby pipelines and ground surface stability [J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 37(1): 135-142 (in Chinese with English abstract).

Hong Kairong, Feng Huanhuan. 2021. Development and thinking of tunnels and underground engineering in China in recent 2 years (from 2019 to 2020) [J]. *Tunnel Construction*, 41(8): 1259-1280 (in Chinese with English abstract).

Hong Kairong. 2017. Development and prospects of tunnels and underground works in China in recent two years [J]. *Tunnel Construction*, 37(2): 123-134 (in Chinese with English abstract).

Jia Lianhui. 2016. Application of rectangular pipe jacking machine to urban underground space development and its prospects [J]. *Tunnel Construction*, 36(10): 1269-1276 (in Chinese with English abstract).

Li Fangnan, Shen Shuilong, Luo Chunyong. 2012. Prediction approach of ground deformation induced by pipe jacking construction considering grouting pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 33(1): 204-208 (in Chinese with English abstract).

Li Hui, Yang Guiyang, Song Zhanping, Niu Zelin, Hao Kaijie. 2019. Study on calculation method of soil delamination deformation caused by rectangular pipe jacking construction [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 15(5): 1482-1489 (in Chinese with English abstract).

Li Zhihan, Pan Ke, Wang Weiyong. 2020. Security analysis on existing shield tunnel upper traversed by paralleling rectangular pipe jacking [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 16(S2): 939-944, 975 (in Chinese with English abstract).

Liu Jingliang, Li Haisha, Qian Hui, Lin Si. 2020. Onsite measurement study on vertical deformation of sewage pipe caused by pipe



- jacking under close distance [J]. Scientific Research, 42 (8) : 1571-1573(in Chinese with English abstract).
- Ma Yuyang. 2023. Settlement rule and control application of existing tunnel under shield tunneling in multiple geological structure complex tunnels[J]. Construction Machinery, (5): 29-36,41(in Chinese).
- Peng Limin, Wang Zhe, Ye Yichao, Yang Weichao. 2015. Technological development and research status of rectangular pipe jacking method[J]. Tunnel Construction, 35(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Qin Jianshe, Yu Xingfu, Zhong Xiaochun, Zhu Wei. 2007. Numerical research on face movement and collapse of shield tunneling in silt ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 28 (S1) : 511-515 (in Chinese with English abstract).
- Rong Liang, Yang Hongjun. 2015. Settlement control technology for tunnel crossing underneath Zhongzhou Avenue in Zhengzhou constructed by super-large rectangular cross-section pipe-jacking machine [J]. Tunnel construction, 35 (12) : 1338-1344(in Chinese with English abstract).
- Wang Hao, Jiang Guangsheng, Wang Chongxu. 2021. Monitoring of the influence of pipe jacking under high speed railway bridge on pier deformation [J]. Shanxi Architecture, 47 (19) : 126-128 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kaijun, Zhang Wei, Wang Weipeng, Dou Baoyang, Xu Rongchao. 2024. Evaluation of surface settlement rule and reinforcement effect in construction of short distance double line of rectangular pipe jacking with large section of ultra-shallow soil cover[J]. Geology and Exploration, 60(1): 121-131 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaorui, Zhou Feng, Zhang Zhen, Guo Jia. 2016. Dynamic deformation of the oversized cross-section rectangular pipe-jacking tunnel [J]. Earth Science, 41 (11) : 1959-1965 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yong, Xu Riqing, Duan Jinchuan, Xu Xin, Zhu Yihong. 2017. Environmental effects caused by construction of rectangular jacking pipes with large section, small space and shallow overburden[J]. Modern Tunnelling Technology, 54 (5) : 78-85 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhifan. 2021. Analysis on safety impact of double pipe jacking construction under existing electric power square culvert [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, (5) : 226-228, 25 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Wan, Liu Yangpeng, Yan Yan, Shen Liwei, Dong Shumian. 2019. Analysis of the influence of pipe jacking under the existing thermal tunnel[J]. District Heating, (6):74-82 (in Chinese).
- Xu Bin Feng, Yu Hongbo, Liu Shenglin, Mao Jianghong, Zhang Jun, Luo Lin. 2019. Numerical simulation and analysis of large section rectangular jacking tube under power tunnel field monitoring[J]. Highway Traffic Technology (Applied Technology Edition), 15(2): 148-151(in Chinese).
- Xu Youjun, Wang Yajian, Feng Chao, Liu Zhiwei, Zhu Jian. 2018. Research on ground deformation caused by rectangular pipe jacking construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 14(1): 192-199(in Chinese with English abstract).
- Yu Jun, Gong Xiaonan. 2014. Numerical analysis of surface settlement control considering pipe jacking construction process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 33(1): 2605-2610(in Chinese with English abstract).
- Zhang Haiyang. 2023. Application of rectangular pipe jacking construction technology in the construction of underpassing existing rainwater tank culvert[J]. Jiangsu Architecture, (1): 69-72(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lin. 2021. Research on deformation laws of rectangular pipe jacking tunnel due to shield tunnelling beneath in close vicinity [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 17(S1): 375-381, 403(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongguang, Xue Guangji, Chen Jinbo, Pang Wenzhuo. 2018. Development, application and prospect of technology of special-shaped boring machine in China[J]. Tunnel Construction, 38(6): 1066-1078(in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 陈家财,赵为磊,王启涛. 2022. 浅埋隧道盾构下穿既有市政管道影响分析[J].建筑机械化, 43(12): 19-21.
- 陈晓静,王保田,左晋宇,李文炜. 2021. 水泥土抗压抗剪强度及相关性研究[J].水运工程, (8): 169-175.
- 邓长茂,彭基敏,沈国红. 2016. 软土地区矩形顶管施工地表变形控制措施探讨[J].地下空间与工程学报, 12(4): 1002-1007.
- 丁传松. 2023. 大断面矩形顶管下穿合流污水箱涵变形分析[J].岩土工程技术, 37(1): 1-6.
- 高鹏. 2022. 天津盾构隧道下穿铁路对股道沉降的影响及控制技术[J].现代城市轨道交通, (12): 63-68.
- 郭延辉,孔志军,李斯桂,何进. 2021. 天然气管涵顶管下穿对高速公路的影响研究[J].地下空间与工程学报, 17(6): 1958-1964.
- 韩仲慧,王梅. 2024. 浅埋矩形顶管施工对临近管线与地表的影响研究[J].都市快轨交通, 37(1): 135-142.
- 洪开荣,冯狄欢. 2021. 近2年我国隧道及地下工程发展与思考(2019-2020年)[J].隧道建设(中英文), 41(8): 1259-1280.
- 洪开荣. 2017. 我国隧道及地下工程近两年的发展与展望[J].隧道建设, 37(2): 123-134.
- 贾连辉. 2016. 矩形顶管在城市地下空间开发中的应用及前景[J].隧道建设, 36(10): 1269-1276.
- 李方楠,沈水龙,罗春泳. 2012. 考虑注浆压力的顶管施工引起土体变形计算方法[J].岩土力学, 33(1): 204-208.
- 李辉,杨贵阳,宋战平,牛泽林,郝凯杰. 2019. 矩形顶管施工引起土体分层变形计算方法研究[J].地下空间与工程学报, 15(5): 1482-1489.
- 李志南,潘珂,王位赢. 2020. 并行顶管近距离上穿既有盾构隧道的安全分析[J].地下空间与工程学报, 16(S2): 939-944,975.
- 刘敬亮,李海沙,钱晖,林思. 2020. 顶管近距离下穿对污水管竖向变形的现场实测研究[J].建筑施工, 42(8): 1571-1573.
- 马浴阳. 2023. 多重地质构造复杂型隧道盾构下穿既有隧道沉降规律及控制应用[J].建筑机械, (5): 29-36,41.
- 彭立敏,王哲,叶艺超,杨伟超. 2015. 矩形顶管技术发展与研究现状[J].隧道建设, 35(1): 1-8.

- 秦建设,虞兴福,钟小春,朱伟. 2007. 黏土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土力学, 28(S1): 511-515.
- 荣亮,杨红军. 2015. 郑州市下穿中州大道超大断面矩形顶管隧道施工沉降控制技术[J]. 隧道建设, 35(12): 1338-1344.
- 王浩,蒋广胜,王崇旭. 2021. 顶管下穿高铁桥梁对桥墩的变形影响监测[J]. 山西建筑, 47(19): 126-128.
- 王开军,张伟,王玮鹏,窦保洋,徐荣超. 2024. 超浅覆土大断面矩形顶管近距离双线施工地表沉降规律及加固效果评价[J]. 地质与勘探, 60(1): 121-131.
- 王晓睿,周峰,张振,郭佳. 2016. 超大断面矩形顶管隧道施工动态变形规律[J]. 地球科学, 41(11): 1959-1965.
- 吴勇,徐日庆,段景川,徐新,朱亦弘. 2017. 浅覆土大断面小间距矩形顶管施工的环境效应[J]. 现代隧道技术, 54(5): 78-85.
- 吴至帆. 2021. 双顶管施工下穿既有电力方涵的安全影响分析[J]. 城市道桥与防洪, (5): 226-228, 25.
- 项婉,刘仰鹏,阎岩,沈立伟,董淑棉. 2019. 顶管下穿既有热力隧道的的影响分析[J]. 区域供热, (6): 74-82.
- 许斌锋,于洪波,柳盛霖,毛江鸿,张军,罗林. 2019. 大断面矩形顶管下穿电力隧道的数值模拟及现场监测[J]. 公路交通科技(应用技术版), 15(2): 148-151.
- 许有俊,王雅建,冯超,刘志伟,朱剑. 2018. 矩形顶管施工引起的地面沉降变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 14(1): 192-199.
- 喻军,龚晓南. 2014. 考虑顶管施工过程的地面沉降控制数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 33(S1): 2605-2610.
- 张海洋. 2023. 矩形顶管施工技术在在下穿既有雨水箱涵施工中的应用[J]. 江苏建筑, (1): 69-72.
- 张林. 2021. 盾构近距离下穿矩形顶管隧道施工变形规律研究[J]. 地下空间与工程学报, 17(S1): 375-381, 403.
- 郑永光,薛广记,陈金波,庞文卓. 2018. 我国异形掘进机技术发展、应用及展望[J]. 隧道建设(中英文), 38(6): 1066-1078.

### Deformation Characteristics of Existing Box Culverts Due to the Underpass of Extra-Large Rectangular Top Pipe Under the Condition of Shallow Burial and Low Clearance

ZHOU Wenpeng<sup>1</sup>, WANG Kaijun<sup>1</sup>, FENG Hongchao<sup>1</sup>, GAO Liang<sup>2</sup>, DOU Baoyang<sup>3</sup>, XU Rongchao<sup>3</sup>

(1. Sino-Hydro Bureau 11 Co., Ltd, Zhengzhou, Henan 450001; 2. Powerchina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an, Shaanxi 710065; 3. College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Hennan 450046)

**Abstract:** Large-section pipe jacking construction will inevitably cause deformation of adjacent existing structures. Accurate analysis and prediction of its deformation patterns are prerequisite for taking targeted protective measures. Based on the results of three-dimensional numerical simulation, this paper studies the influence law of the deformation characteristics of the shallow buried large rectangular pipe jacking close to the existing structure under the small spacing crossing the existing box culvert. The results indicate that: (1) The deformation of box culvert shows a trend of first uplift and then settlement with the advance of the pipe jacking. The pipe jacking has caused three significant disturbances to box culvert, corresponding to the positions where the head of the pipe is located at the front, middle, and rear of box culvert. (2) After the left line pipe jacking crossing, the overall settlement of box culvert shows a V-shaped distribution pattern. The construction of the right line pipe jacking will cause a secondary settlement of box culvert, with the maximum settlement deformation increasing from 9.33 mm to 11.18 mm. (3) The horizontal displacement of box culvert shows an inverted V-shaped distribution with large displacement in the middle and small displacement at both ends, with a maximum horizontal displacement of 15.7 mm. In addition, the existing box culvert's horizontal displacement is greater than its vertical settlement deformation. (4) During the pipe jacking process, the soil pressure on the upwind side of box culvert shows a trend of first increasing, then decreasing, and finally stabilizing. (5) The parameter sensitivity analysis indicates that compared with the coefficient of soil-pipe friction, the influence of the face support ratio on the deformation of box culvert is more significant.

**Key words:** pipe jacking, numerical simulation, below crossing box culvert, displacement of box culvert, soil pressure at box culvert