

排桩基坑施工对暗挖电缆隧道的扰动影响研究*

Study on the Influence of Pile Discharge Foundation Pit Construction on Concealed Cable Tunnel

张凯翔, 周成龙, 杜少华, 李文江, 韩现民

(石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 通过三维有限差分仿真计算, 分析了排桩基坑水平变形与地表沉降、邻近电缆隧道的变形和受力影响, 在此基础上研究了坑隧间距对电缆隧道的变形及安全性的影响。研究表明: 基坑开挖后有隧道一侧地表沉降小于无隧道一侧; 电缆隧道结构的纵向受力是影响结构安全的主要因素, 纵向拉应力最大位置位于远离基坑侧墙脚; 坑隧间距与电缆隧道安全系数呈非线性递增关系。

关键词: 排桩基坑; 暗挖电缆隧道; 数值模拟; 力学效应

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 02-0080-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.015

ZHANG Kaixuan, ZHOU Chenglong, DU Shaohua, LI Wenjiang, HAN Xianmin

(College of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Based on the influence of the horizontal deformation and surface settlement, the deformation and force of the adjacent cable tunnel are analyzed, and the deformation and safety of the cable tunnel are studied. The research results show that after the excavation, the foundation pit is less than the tunnel side; the longitudinal force of the cable tunnel structure is the main factor affecting the safety of the structure, and the maximum longitudinal tensile stress is away from the wall of the foundation pit; the tunnel distance and the cable tunnel safety factor.

Keywords: pile discharge foundation pit; concealed excavation of cable tunnel; numerical simulation; mechanical effect

0 引言

近年来, 随着我国城镇化建设的脚步加快, 城市用地越来越紧张, 邻近隧道的基坑工程也越来越多。基坑施工极易造成周围土体扰动, 导致邻近隧道产生较大附加变形和内力, 继而引发隧道开裂、

渗透漏水等危害, 造成较大的经济损失和社会影响。

目前, 桩隧相互作用问题分为两类: 第一类是隧道建设对基坑施工的影响; 第二类是基坑施工对既有隧道的影响^[1]。国内外关于第一类问题的研究成果较为丰富^[2], 而有关第二类问题的研究则相对较少。李大勇等^[3]利用 Winkler 弹性地基梁理论, 建立了受基坑开挖影响的电缆隧道竖向位移与水平位移方程; 贺雷等^[4]通过有限元模拟和离心机模型试验研究了软土地区基坑开挖对邻近土体与既有电缆隧道的影响, 对电缆隧道周围进行了安全区划分; 田海洋^[5]、杨平等^[6]、郑刚等^[7]通过现场实测, 研究了基坑施工对地层位移场和邻近既有隧道结构变形的影响规律, 为后续类似工程施工提供了技术参考;

* 基金项目: 国家电网河北电力公司科技项目 (KJ2020-003)。

作者简介: 张凯翔 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 隧道工程衬砌病害研究。

通信作者: 李文江 (1971—), 男, 教授, 主要研究方向: 隧道工程稳定性理论、地下工程环境控制及新技术方面研究。

收稿日期: 2023-10-10

冯龙飞^[8]、朱姣利^[9]、李连祥等^[10]、沈国政等^[11]利用 PLAXIS 3D 有限元软件进行分析,拟合得到最大水平变形位移与基坑宽度、水平距离的关系公式。为了全面了解基坑开挖对既有隧道影响的研究进展,丁智等^[12]从理论研究、模型试验、数值模拟和实测分析 4 个方面分别阐述了基坑邻近施工问题的研究现状,得出基坑开挖必然会改变土体的原始应力场和位移场,继而引起邻近既有隧道附加变形和内力。

以上研究成果虽然就排桩基坑施工对邻近隧道开挖的影响进行了分析,但针对基坑开挖对邻近电缆暗挖隧道研究目前还较少,因此,以石家庄某工程为案例,采用三维有限差分仿真软件,分析排桩维护结构形式的基坑施工过程中排桩的水平变形和

地表沉降的发展规律,并分析了邻近电缆隧道的变形和受力情况,最后分析了基坑与电缆隧道间距对既有隧道的变形及安全性影响。

1 工程地质特征

河北省石家庄市地层为太行山山前冲洪积平原,次一级地貌单元为滹沱河Ⅱ级阶地。根据石家庄地区地层分布特征,将该地区从上到下依次分为:耕植土层、黄土状粉土层、黄土状粉质黏土层、细砂层、粉质黏土层、细砂层、中砂层。结合地质勘察报告资料以及相关文献^[13-14]的参数取值范围情况与参数取值理论依据,确定地层土体力学参数,见表 1。

表 1 数值计算中采用的土体物理力学指标
Table 1 Physical and mechanical indexes of soil used in the numerical calculation

土层	密度/(kg·m ⁻³)	c'/kPa	K ₀	φ/°	m	p ^{ref} /kPa	ν _{ur}	E ₅₀ ^{ref} /MPa	E _{ur} ^{ref} /MPa	E _{oed} ^{ref} /MPa	R _f
耕植土	1810	3.0	0.43	0.4	0.7	100	0.30	8	24	6.0	0.9
黄土状粉土	1900	3.5	0.47	0.4	0.6	100	0.23	10	30	8.4	0.9
黄土状黏土	1990	5.0	0.55	0	0.9	100	0.25	15	45	13.0	0.9
细砂	1590	1.0	0.5	1.0	0.5	100	0.20	25	75	25.0	0.9
中砂	1610	1.0	0.50	1.0	0.5	100	0.20	25	75	25.0	0.9

2 模型的建立

石家庄地区及相似地层地区的基坑围护结构普遍为钻孔灌注桩,而地铁车站基坑开挖深度一般为 14~19 m,基坑宽度约为 19~22 m,长约 200 m。考虑到基坑长度较大,为了提高计算效率,采用对称模型,即将模型简化为原模型的 1/2,基坑开挖的长度为 60 m,宽为 20 m。三维数值模型尺寸为 120 m×70 m×37 m。数值计算采用三维有限差分软件,基坑开挖对既有电缆暗挖隧道影响的三维计算模型如图 1 所示。明挖基坑与既有电缆隧道间距 5 m,电缆隧道覆土深度 4.5 m,电缆隧道断面形状采用设计规范中直墙圆拱平地板型,既有电缆暗挖隧道断面图如图 2 所示。

土体采用实体单元模拟,本构关系选用硬化土模型(HS model),基坑排桩采用 liner 单元模拟;横撑为钢管撑,采用 beam 单元模拟,选用线弹性本构;二衬采用实体单元,选用线弹性本构关系,相关结构物理力学指标见表 2。

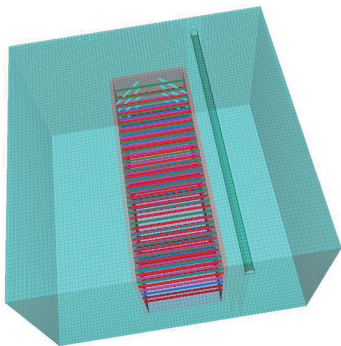


图 1 三维数值模型
Fig. 1 3D numerical model diagram

表 2 数值计算中采用物理力学指标
Table 2 Table of physical and mechanical indicators used in the numerical calculation

材料	密度 ρ/(kg·m ⁻³)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	截面面积/m ²	关于 y 轴的惯性矩/m ⁴	关于 z 轴的惯性矩/m ⁴
电缆隧道二衬	2 500	27	0.2			
排桩	2 500	30	0.2			
横撑	7 850	210	0.3	0.1746	2.619×10 ³	2.619×10 ³
腰梁	7 850	210	0.3	2.355×10 ⁻²	2.01×10 ⁻³	1.08×10 ⁻⁴

模拟过程:电缆隧道采用两台阶式开挖施工。

岩土力学

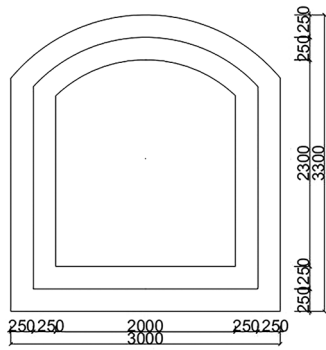


图 2 既有电缆暗挖隧道断面
Fig. 2 Section dimension of existing cables

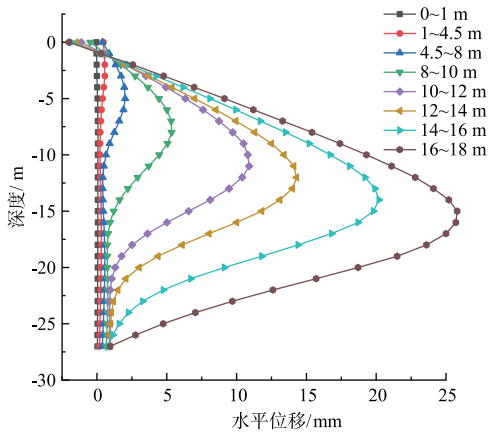
转换本构模型并进行位移清零。基坑开挖深度为 18 m,先期施作围护结构为 1.5 倍基坑开挖深度的排桩,之后进行基坑开挖。由上到下依次开挖深度为 0~1、1~4.5、4.5~8、8~10、10~12、12~14、14~16 和 16~18 m,第一层土开挖完成后(1 m),开挖第二层土,同时施作顶部横撑以及端部斜撑,第一道横撑距地表 1 m,第一道和第二道横撑相距 3.5 m,其余横撑竖向间距皆为 4 m,水平横撑沿基坑轴线方向水平间距为 3 m。

3 排桩基坑开挖对电缆暗挖隧道影响研究

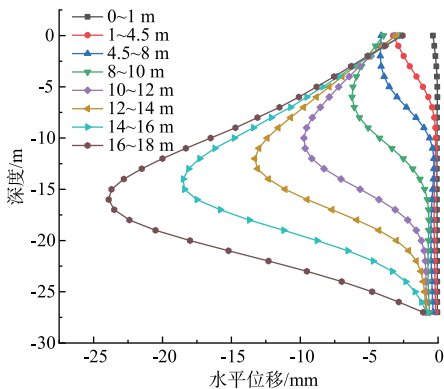
3.1 排桩水平变形与地表沉降特征

3.1.1 基坑开挖过程中排桩水平变形规律

选取距离基坑端头 40 m 处基坑两侧排桩作为研究对象进行对比分析,在基坑施工每一步开挖后排桩水平变形特征曲线如图 3 所示。



(a) 远电缆隧道侧



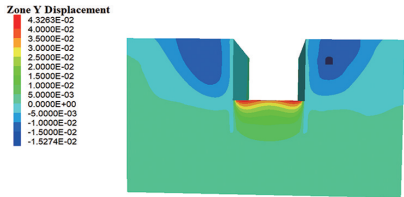
(b) 近电缆隧道侧

图 3 基坑排桩水平变形特征曲线
Fig. 3 Horizontal deformation characteristics curve of retaining piles in pit

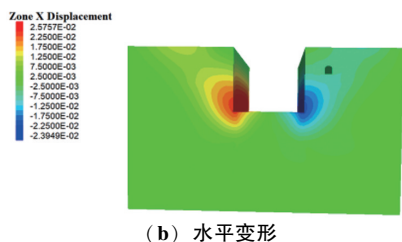
由图可知,随着基坑施工,基坑两侧排桩围护结构产生向基坑内部方向的水平向变形,变形值随开挖深度增加而增大。随着基坑开挖深度的增加,排桩最大水平变形位置受内支撑作用从排桩的顶端逐渐向下移动,在开挖深度为 0~10 m 时,同一开挖深度有电缆隧道一侧比无电缆隧道一侧位移稍大,且两侧排桩最大变形位置略有差异;在基坑开挖 10~18 m 时,同一开挖步数内有电缆隧道一侧比无电缆隧道一侧排桩水平位移略小,但排桩最大变形位置基本一致。基坑施工结束后,远离电缆隧道一侧排桩最大水平变形值大于邻近电缆暗挖隧道侧水平变形值,其最大水平位移比近基坑侧大 8.4%。

3.1.2 基坑开挖过程对地表变形影响

基坑开挖阶段,随着开挖深度的增加,地层应力场发生改变,土体开挖卸荷作用越发明显,出现向坑内变化的趋势。当基坑开挖至一定深度后,在内支撑的作用下,排桩中部水平位移比顶部更大,使坑外土体发生不同程度的扰动影响。由于开挖卸荷作用使得基底土体隆起,坑外土体在坑内土体开挖卸荷和排桩底端滑移作用的影响下发生变形,基坑开挖 18 m 坑外土体沉降或隆起变化规律如图 4~图 5 所示。



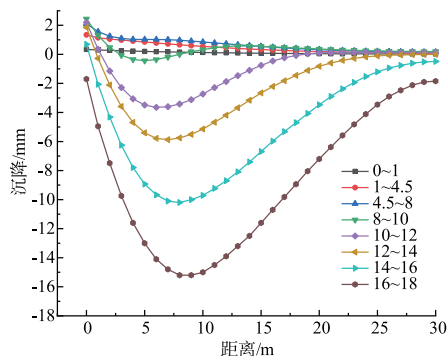
(a) 沉降变形



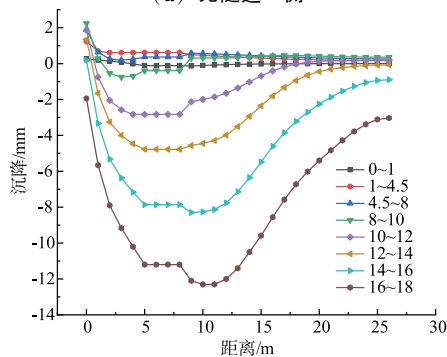
(b) 水平变形

图 4 基坑开挖 18 m 坑外土体变形

Fig. 4 Deformation of 18 m soil body in foundation pit excavation



(a) 无隧道一侧



(b) 有隧道一侧

图 5 基坑地表沉降曲线

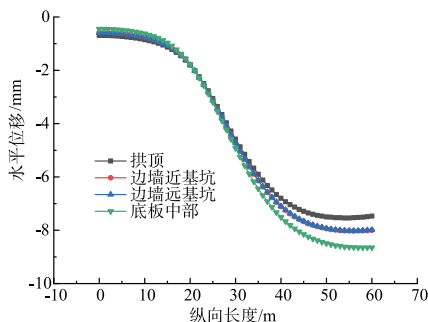
Fig. 5 Surface settlement curve of the excavation pit

对计算结果进行分析: 在基坑施工过程中, 坑外土体出现了先隆起后沉降且沉降逐渐增大的变化规律; 基坑施工结束后, 坑外两侧土体出现了三角沉降槽, 坑外土体被扰动后形成的倒三角形区域随着开挖深度的增加而扩大, 而且基坑无电缆隧道一侧比有电缆隧道一侧的倒三角形状更加明显; 无电缆隧道一侧的地表沉降值 (15.8 mm) 比有电缆一侧地表沉降值 (12.3 mm) 更大, 这是由于既有隧道结构刚度较大, 在土体中相当于一纵向梁, 阻碍了土体的沉降变形; 受既有电缆暗挖隧道存在的影响, 隧道附近土体沉降变形呈现出不连续变形的特点, 且基坑开挖深度越大, 影响越明显; 电缆隧道初支与二衬的存在, 对地表沉降量和土体变形规律产生了显著影响。

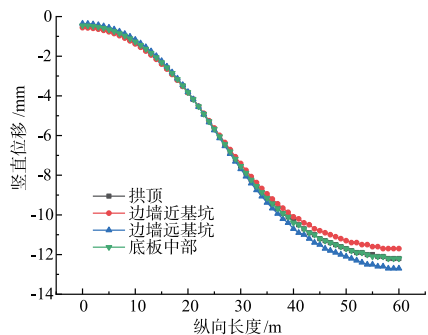
3.2 电缆隧道变形与受力分析

3.2.1 基坑开挖后电缆隧道变形特征

取电缆隧道纵向长度 0~60 m, 基坑端头位于电缆隧道纵向长度 20 m 处, 提取基坑开挖 18 m 后电缆隧道拱顶、近基坑侧墙中、远基坑侧墙中在平底板中部纵向水平位移和竖向位移曲线如图 6 所示。



(a) 水平位移



(b) 竖向位移

图 6 电缆隧道变形曲线

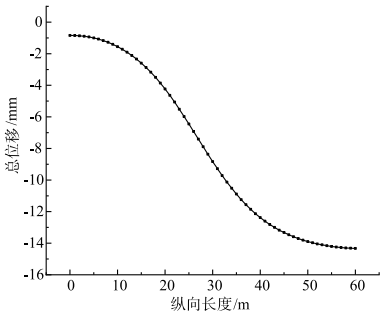
Fig. 6 Deformation curve of the cable tunnel

基坑开挖完成后, 电缆隧道中部出现向基坑靠拢的变形趋势, 电缆隧道各个测点水平位移与竖向位移变化趋势相同。既有电缆暗挖隧道的水平位移随着隧道纵向长度而增加, 基坑在开挖时, 沿隧道纵轴方向距离基坑端头 10 m 外, 基坑开挖对既有电缆暗挖隧道没有太大的影响; 在 10~50 m 内水平位移发生显著变化, 电缆暗挖隧道逐渐靠近基坑一侧; 50 m 后, 电缆暗挖隧道水平位移和竖向位移逐渐趋于水平; 在 60 m 处最大水平位移出现在平底板 (8.65 mm), 最大竖向沉降位于墙中近基坑侧 (12.7 mm), 由此判断隧道发生轻微扭转变形。基坑开挖区域对既有电缆隧道沿纵向的总位移、水平位移和竖向位移的变形趋势影响较大, 基坑长度范围内的隧道变形值较大、曲线变化曲率较大, 基坑长度范围外变形较小、曲线变化曲率较小。

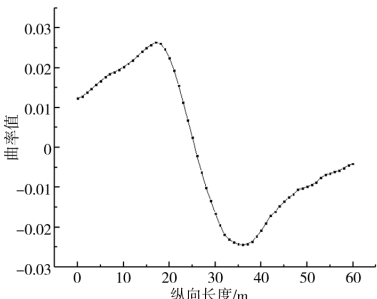
岩土力学

3.2.2 基坑开挖后电缆隧道受力分析

最容易发生破坏的电缆隧道截面应为隧道结构应力最大的位置，该截面位置应是总位移变化曲线的反弯点，即斜率变化最大的截面位置。电缆隧道总位移曲线图和电缆隧道曲率图如图 7 所示。



(a) 电缆隧道总位移曲线图



(b) 电缆隧道总位移曲率图

图 7 电缆隧道总变形曲线
Fig.7 Total deformation curve of the cable tunnel

由图可以看出，电缆隧道最容易发生破坏的截面位置有 2 个，分别是电缆隧道纵向长 20 m（基坑端头处）和 37 m 的截面位置，基坑施工完成后中既有电缆暗挖隧道结构受力变化特征见表 3。

表 3 基坑施工完成后中邻近既有电缆暗挖隧道结构受力变化特征表

Table 3 Characteristics of force changes of existing existing cables after the completion of foundation pit construction

电缆隧道结构	水平向应力 σ_{xx} /MPa		竖向向应力 σ_{yy} /MPa		纵向应力 σ_{zz} /MPa	
	σ_{xxc} /位置	σ_{xxl} /位置	σ_{yyc} /位置	σ_{yyt} /位置	σ_{zxc} /位置	σ_{ztl} /位置
二衬初始状态	-0.31/拱顶底板	—	-0.34/边墙上半部	—	-0.14/拱顶两侧	—
20 m 受扰动后二衬状态	-0.24/拱顶底板	—	-0.32/两边墙上侧	—	-0.83/左墙脚	+1.59/右拱顶
37 m 受扰动后二衬状态	-0.37/拱顶	—	-0.40/右上边墙	—	-1.60/拱顶右侧	+0.98/左下墙脚

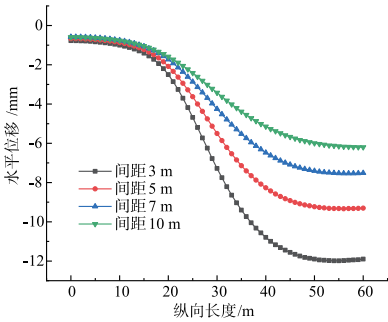
注：表中 σ_c 表示压应力值； σ_t 表示拉应力值

从计算结果可以得出，基坑施工完成后对临近既有电缆暗挖隧道二衬支护结构的水平、竖向及纵向受力产生了一定影响；基坑开挖完成后，电缆隧道二衬在水平向压应力相比初始水平应力变化不大。竖向应力在隧道纵向长度 20 m 位置二衬略有减小 (0.02 MPa)，应力位置大致不变；电缆暗挖隧道纵向应力出现较为明显的变化，基坑开挖完成后在 20 m 位置，电缆隧道受压侧均近基坑，拉应力最大位置在拱顶远离基坑侧；在 37 m 位置时与 20 m 位置相反，纵向拉应力最大位置为靠近基坑边墙墙脚，纵向压应力最大位置在拱顶远离基坑一侧。

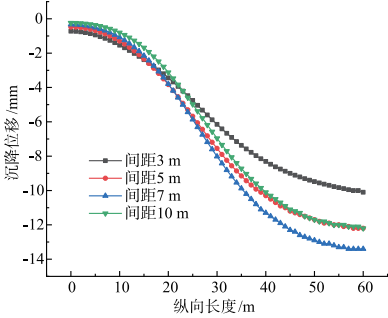
4 排桩基坑开挖不同坑隧间距对邻近电缆隧道的影响

4.1 间距对电缆隧道位移的影响

参阅徐则民^[15]提出的隧道埋深划分确定该电缆隧道埋深为 4.5 m，基坑开挖 18 m 时，基坑与电缆隧道在不同净间距条件下既有电缆暗挖隧道沿轴线方向的水平向和竖直向变形曲线如图 8 所示，在此只列出间距 3、5、7、10 m 时电缆隧道变形曲线，其他不一一列出。



(a) 水平位移



(b) 沉降位移

图 8 不同间距电缆隧道变形曲线
Fig.8 Deformation curves of cable tunnels with varying spacing

从计算结果可知，坑外电缆隧道不同位置受基坑开挖扰动影响程度不同，沿电缆隧道轴线方向出

现了水平向不均匀变形；基坑与既有电缆隧道间距增大，水平侧向变形逐渐减小，竖向沉降先增大后减小；随着间距增大电缆隧道受基坑施工扰动影响减小，电缆隧道不均匀沉降变形现象也随之减弱。

4.2 不同间距对电缆隧道二衬安全性影响

电缆隧道位于纵向长度 20 m 和 37 m 左右的位置为隧道反弯点，这 2 个位置最先且容易发生破坏，基坑施工结束后，坑外隧道纵向长度 20 m 处，间距为 10 m 的电缆隧道二次衬砌纵向受力如图 9 所示。

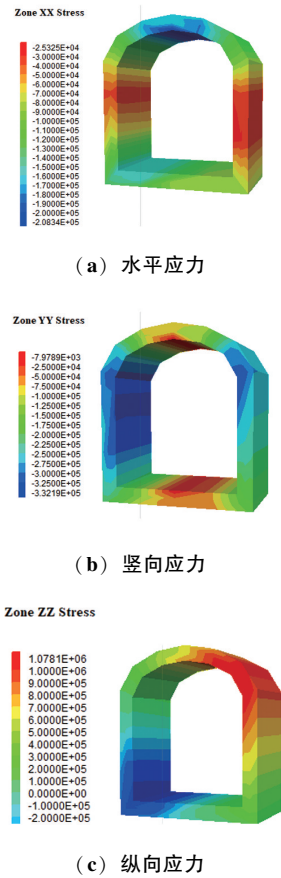


图 9 间距 10 m 隧道纵向长度 20 m 位置应力云图
Fig. 9 Stress cloud diagram of 10 m tunnel 20 m

由应力云图可知，电缆隧道结构的纵向受力是影响结构安全的主要因素，因此重点分析基坑工程与既有电缆暗挖隧道在不同间距时，基坑施工结束后坑外隧道纵向长度 20 m 处受力状态和纵向受拉安全系数变化。由于二衬采用的实体单元，不可直接得到截面的弯矩与轴力，因此参阅姚长春^[16]提出的衬砌弯矩、轴力的计算方法求出截面的弯矩、轴力。二衬纵向受拉安全系数见表 4 净距与安全系数关系曲线如图 10 所示。

表 4 电缆隧道 20 m 二衬纵向受拉安全系数
Table 4 Vertical tensile safety factor of 20 m cable tunnel

基坑与隧道间距/m	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数
3	415.0	1.26	2.62
5	399.0	1.20	2.72
7	333.7	1.09	3.25
10	269.5	0.92	4.01

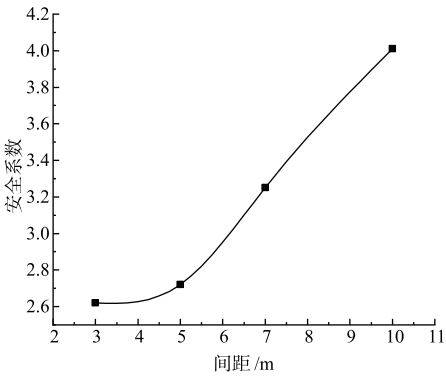


图 10 8 m 基坑 2.0×2.3 m 净距与安全系数关系曲线
Fig. 10 Relationship curve between 2.0×2.3 m clear distance of 8 m foundation pit and safety factor

由计算结果可知，新建基坑与电缆暗挖隧道间距从 3 m 增加到 10 m，轴力减小 35%，安全系数增大 53%；基坑与电缆暗挖隧道不同间距对隧道二衬纵向受力安全性产生了一定的影响，二者间距越小，电缆隧道二衬结构纵向受力越大，安全性也就越低；电缆隧道二衬纵向受压区最大位置始终位于靠近基坑侧隧道边墙与平底板连接处，纵向受拉区最大位置始终位于远离基坑侧拱顶与边墙连接位置；基坑与电缆暗挖隧道不同间距对电缆隧道安全系数为非线性递增曲线关系。

5 结论

以石家庄工程为案例，采用三维有限差分仿真计算，研究排桩基坑施工对暗挖电缆隧道的扰动影响，得出以下结论

- (1) 基坑开挖既有电缆隧道一侧地表沉降小于无隧道一侧。隧道刚度大于土体，隧道在土中相当于一段加固隔离体，部分隔绝了由于开挖引起的地表竖直位移的传递，隧道的存在减少了地表沉降。
- (2) 既有电缆隧道沿纵向的总位移、水平位移和竖向位移的变形趋势受基坑开挖区域影响较大，基坑长度范围内的隧道变形值较大，基坑长度范围外变形较小。
- (3) 电缆隧道结构的纵向受力是影响结构安全

岩土力学

的主要因素,电缆隧道最容易发生破坏的截面位置为基坑端头处,电缆隧道二衬纵向压应力最大位置始终位于靠近基坑侧墙脚处,纵向拉应力最大位置始终位于远离基坑侧墙脚位置。

(4) 由于坑外电缆隧道不同位置受基坑开挖扰动影响程度不同,沿电缆隧道轴线方向出现了水平向不均匀变形,基坑开挖深度相同时,基坑与既有电缆隧道间距越大,隧道被扰动竖向位移越明显,隧道水平位移相较于竖向位移变化较小,间距越大,邻近电缆隧道被扰动安全性影响越小。

(5) 基坑与电缆暗挖隧道不同间距对电缆隧道安全系数为非线性曲线关系。随着间距的增大,安全系数增加的斜率变大。

考虑到隧道埋深也是造成既有隧道位移和衬砌结构内力的改变的主要因素,后续研究中会补充对此问题的分析。

参 考 文 献

- [1] 邓旭.深基坑开挖对坑外深层土体及邻近隧道的影响研究[D].天津:天津大学,2014.
- [2] 朱逢斌,杨平,林水仙.盾构隧道施工对邻近承载桩基影响研究[J].岩土力学,2010,31(12):3894-3900.
- [3] 李大勇,张士乔,龚晓南.深基坑开挖引起临近地下管线的位移分析[J].工业建筑,1999,29(11):36-40.
- [4] 贺雷,张亚楠,曹明洋,等.软土区基坑开挖对邻近电缆隧道的影响研究[J].建筑结构,2020,50(增刊1):1032-1037.

- [5] 田海洋.深基坑施工对既有变形运营隧道影响实测分析[J].地下空间与工程学报,2014,10(3):663-667.
- [6] 杨平,周志良,黄晓东,等.钻孔灌注桩施工对邻近既有隧道影响数值分析[J].沈阳建筑大学学报,2020.
- [7] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等.基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J].岩土工程学报,2016,38(4):599-612.
- [8] 冯龙飞.基坑开挖对邻近地铁盾构隧道的变形影响及控制措施研究[S].铁道标准设计,2014.
- [9] 朱姣利,潘健.某基坑开挖对临近地下隧道影响的有限元分析[J].广东土木与建筑,2007(5):13-14.
- [10] 李连祥,张强,石锦江,等.基坑开挖邻近隧道水平形变位移规律[J].山东大学学报(工学版),2021,51(1):46-52,59.
- [11] 沈国政,赵宏华,赵凯,等.深基坑开挖引起隧道纵向位移的 Hermite 差分法[J].地下空间与工程学报,2020,16(增刊2):841-848.
- [12] 丁智,张霄,梁发云,等.软土基坑开挖对邻近既有隧道影响研究及展望[J].中国公路学报,2021,34(3):50-70.
- [13] 顾晓强,吴瑞拓,梁发云,等.上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J].岩土力学,2021,42(3):833-845.
- [14] 庞晋.基坑开挖对邻近既有地铁隧道影响的研究[D].杭州:浙江科技学院,2017.
- [15] 徐则民,黄润秋,王士天.隧道的埋深划分[D].成都:成都理工学院工程地质研究所,2000.
- [16] 姚长春,于海龙,张洋.基于 FLAC 3D 软件求解衬砌强度安全系数的方法[J].四川建筑,2007,27(2):115-116.

(上接第 79 页)

参 考 文 献

- [1] 路林海,王国富,徐前卫,等.复合立柱桩支承下深基坑围护结构变形性状[J].铁道工程学报,2019,36(1):93-98.
- [2] 储晓芳,李大华,孟源,等.临河区域深基坑工程变形监测与模拟研究[J].建筑技术,2020,51(11):1319-1322.
- [3] 齐朋,张宇奇,王宁.深基坑围护结构横向位移监测和数值模拟分析[J].中外公路,2022,42(1):38-42.
- [4] 赵斌.混合支护下深基坑开挖引起的近接建筑物稳定性分析[J].人民长江,2021,52(增刊1):281-286,308.
- [5] 胡静.深基坑支护结构稳定性计算及数值模拟研究[J].建筑

结构,2021,51(增刊2):1523-1527.

- [6] 吴刚,李军委,同飞,等.荣民金融中心深基坑支护设计及数值模拟分析[J].建筑结构,2019,49(增刊2):906-909.
- [7] 罗正东,吴鹏,黄河,等.富水砂卵石地层深基坑开挖变形监测与数值分析[J].建筑结构,2020,50(23):128-133.
- [8] 董建华,庄超.深基坑框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护结构力学特性分析[J].岩石力学与工程学报,2019,38(3):619-633.
- [9] 张超,宋卫东,李腾,等.破碎岩体应力-渗流耦合模型及数值模拟研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(6):1220-1230.