

地铁暗挖隧道下穿电缆隧道扰动影响及安全距离研究

Research on the Disturbance Influence Law and Safety Distance of the Cable Tunnel
Induced by the Construction of the Underground Subway Tunnel

王泽朋¹, 马耀坛², 刘浩², 韩现民², 李乾³

(1. 中建八局检测科技有限公司, 北京 102488; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;
3. 国网河北省电力有限公司 石家庄供电分公司, 河北 石家庄 050000)

摘要: 针对地铁暗挖隧道垂直、斜下45°平行侧穿电缆隧道两种常见工况, 采用数值模拟仿真手段, 研究了不同净距下, 地铁隧道施工对不同截面尺寸电缆隧道变形与受力扰动影响规律。在此基础上, 通过对电缆隧道环、纵向安全系数的检算, 得到两隧道净距与电缆隧道二次衬砌结构最小安全系数关系曲线, 并依据二次衬砌安全系数控制指标, 确定相应安全保护距离。结果表明: 垂直下穿引起电缆隧道结构的沉降和拉应力值要高于斜下侧穿工况; 两种下穿工况下, 隧道净距与电缆隧道二次衬砌最小安全系数皆近似呈线性增加关系; 相同计算条件下垂直下穿的安全净距大于斜下45°平行侧穿工况。

关键词: 电缆隧道; 暗挖隧道; 数值模拟; 安全系数; 安全距离

中图分类号: U231.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249(2024)06-0089-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.017

WANG Zepeng¹, MA Yaotian², LIU Hao², HAN Xianmin², LI Qian³

(1. China Construction Eighth Bureau Testing Technology Co., Ltd., Beijing 102488, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Shijiazhuang Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In this paper, the influence of subway tunnel construction on the deformation and stress disturbance of cable tunnel with different section sizes is studied by means of numerical simulation for two common working conditions of underground tunnel with vertical and 45° down slope. On this basis, the relationship curve between the distance between two tunnels and the minimum safety factor of the secondary lining structure of the cable tunnel is obtained by checking the ring and longitudinal safety factor of the cable tunnel, and the corresponding safety protection distance is determined according to the control index of the secondary lining safety factor. The results show that the settlement and tensile stress of the cable tunnel structure caused by vertical underpass are higher than those under inclined underpass condition. The distance between the tunnel and the minimum safety factor of the secondary lining of the cable tunnel are linearly increased under both conditions. Under the same calculation conditions, the safety distance of vertical underpass is greater than that of parallel underpass 45°.

Keywords: cable tunnel; underground tunnel; numerical simulation; safety factor; safety distance

0 引言

作者简介: 王泽朋 (1997—), 硕士研究生, 研究方向: 隧道工程。

收稿日期: 2023-11-01

轨道交通的修建大大缓解了城区的交通压力, 但其周边建筑设施和地下管线分布密布, 在施工过程中难免会对周边环境产生扰动影响。

岩土力学

Byun 等^[1-2]通过大规模模型试验、现场试验等手段,得出了新建隧道对临近既有隧道的衬砌应力、穿越过程中隧道的变形以及沉降曲线区域分布等结果;包德勇等^[3-5]通过有限元程序模拟了新建隧道下穿既有隧道的施工过程,得到了既有结构内力、位移随新建隧道施工推进的变化规律;王占生等^[6-7]通过有限元程序模拟了新建隧道下穿既有隧道的施工过程,得到了既有结构内力、位移随新建隧道施工推进的变化规律;廖少明等^[8-10]通过数值模拟与现场监测,提出施工穿越不同次序对既有隧道的影响和位移、变形规律;汪从敏等^[11-13]根据管土相互作用弹性连续解与 Peck 公式的理论提出了地层被扰动作用下新建盾构隧道施工对地下管线的安全评估方法,分析了内部、外部荷载共同作用下盾构法施工的电缆隧道结构内力分布规律和计算模式,依据有限元分析得到的电缆隧道变形量,确定了其保护范围。国内外学者通过力学行为分析、模型试验和数值模拟等方法对城区隧道施工对地下工程结构扰动问题做了大量分析研究。但研究工作着重对隧道变形控制标准及其安全性评估进行研究,而对隧道安全保护距离的研究较少,且目前暗挖隧道施工的相关规范对施工过程中与电缆隧道的安全距离等方面未有明确规定。

本文采用三维有限差分软件,针对地铁暗挖隧道垂直下穿和斜下 45°平行侧穿既有电缆隧道情况,研究不同净距下,地铁隧道施工对不同截面尺寸电缆隧道的力学扰动影响。通过对电缆隧道的环向、纵向安全系数的验算,得到两种工况下不同截面尺寸电缆隧道二次衬砌结构最小安全系数与净距的关系曲线;进而依据二次衬砌安全系数控制指标,得到两种工况下的安全保护距离。

1 地层参数统计分析

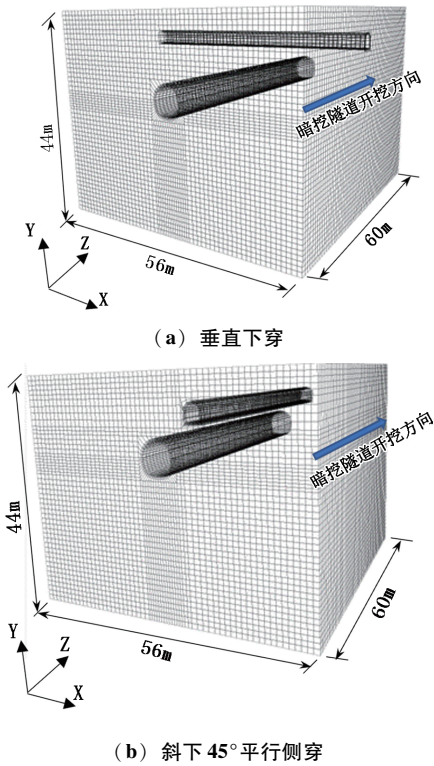
石家庄市地铁 1~6 号线在中心城区内涉及冲、洪积倾斜平原(Ⅲ),地层由上至下为填土层、黄土状粉质黏土、黄土状粉土、粉土、粉质黏土、粉细砂和中粗砂。调查表明,电缆隧道主要穿越粘质黄土层,地铁隧道主要穿越砂土层,部分地层物理力学参数见表 1。

表 1 地层物理力学参数					
Table 1 Physical and mechanical parameters of strata					
土层名称	密度 ρ /(g/cm^3)	弹性模量 E/MPa	泊松比 u	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
杂填土	1.80	8	0.32	8.0	27.0
黄土状粉土	1.94	10	0.32	17.0	24.0
黄土状粉质黏土	1.99	15	0.25	30.8	21.4
粉细砂	1.59	25	0.23	2.0	25.0
中粗砂	1.61	28	0.28	1.0	30.0

2 隧道下穿扰动数值模型

2.1 三维数值模型

根据地下洞室开挖影响范围的经验判定,计算模型大小一般可以定在 3~5 倍的洞室开挖宽度(或高度)。模型的计算边界取横向长度为 56 m,竖向长度为 44 m,纵向长度 60 m;垂直下穿工况模型共 205 848 个单元,215 874 个节点,数值模型如图 1(a)所示;斜下 45°平行侧穿工况共 205 440 个单元,214 232 个节点数值模型如图 1(b)所示。



(b) 斜下 45°平行侧穿

图 1 三维数值模型图

Fig. 1 3D numerical model diagram

2.2 隧道支护参数及断面尺寸

电缆隧道采用复合式衬砌,初期支护采用 0.25 m 厚的 C25 喷射混凝土,并设置 18 号工字形格栅钢架

(纵向净距 0.6 m)，将格栅钢架的弹性模量进行折算，根据结果得到统一的初支弹性模量；二次衬砌采用 0.25 m 厚 C30 钢筋混凝土，电缆隧道横断面如图 2 所示。地铁暗挖隧道初支厚度为 0.25 m，材料为 C25 钢筋混凝土，断面图如图 3 所示。

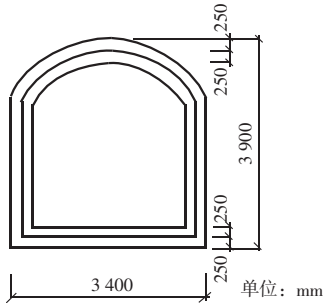


图 2 电缆隧道横断面图

Fig. 2 Dimensional drawing of cable tunnel section

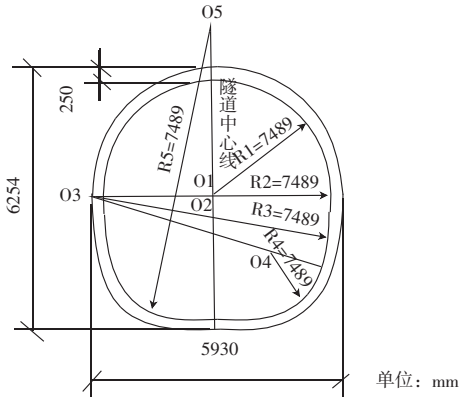


图 3 地铁暗挖隧道横断面图

Fig. 3 Sectional view of underground tunnel in subway

2.3 本构模型及计算参数

土体采用摩尔 - 库仑本构模型，力学参数见表 1。电缆隧道初支（壳单元）和二衬（实体单元）为线弹性本构关系。为研究暗挖隧道施工过程中对上部既有结构扰动影响，暗挖隧道只模拟初支，采用实体单元，按线弹性材料考虑，超前小导管注浆支护效果按等效原则处理，将其简化为厚度为 0.3 m 的拱形加固圈，材料参数取值见表 2。

表 2 数值计算中采用物理力学指标表

Table 2 Physical and mechanical indexes used in numerical calculation

材料	密度 ρ / (g/cm^3)	弹性模量 E /MPa	泊松比 μ	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ / ($^\circ$)
电缆隧道初支	2.50	25 000	0.20	—	—
电缆隧道二衬	2.50	33 500	0.20	—	—
加固圈	1.59	25	0.23	2.60	25
地铁暗挖隧道初支	2.50	25 000	0.20	—	—

2.4 施工过程模拟及监测点布置

电缆隧道施工模拟：采用全断面开挖，循环进尺为 2 m，支护滞后于开挖一个循环步，直至施工结束，最后一次性浇筑二衬混凝土。

暗挖地铁隧道模拟：采用环形开挖预留核心土法施工，以图 4 编号次序依次开挖，以 1 m 为一个开挖步，循环开挖，支护滞后于开挖一个循环步，直至施工结束，开挖示意图如图 4 所示。

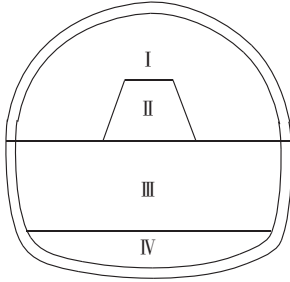


图 4 地铁暗挖隧道断面开挖示意图

Fig. 4 Schematic diagram of section excavation of underground excavated subway tunnel

电缆隧道断面对称，且应力集中位置易发生受压或受拉破坏。当地铁暗挖隧道垂直下穿电缆隧道时，隧道纵向受力对称，对隧道断面六个位置实施监测（1~6）；斜下 45° 水平侧穿时，隧道纵向受力不对称，对隧道断面 10 个位置实施监测（1~10），监测布置点如图 5 所示。

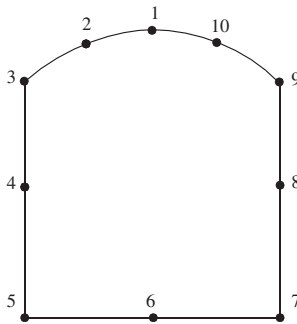


图 5 电缆隧道监测点布置图

Fig. 5 Layout of monitoring points in cable tunnels

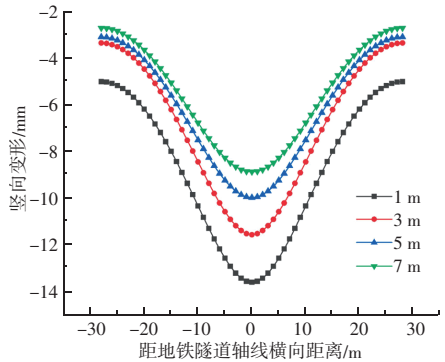
3 力学响应分析

为揭示地铁暗挖隧道垂直下穿和斜下侧穿施工对既有电缆隧道（埋深 5 m）的扰动影响规律，选取 1、3、5、7 m 四种隧道净距（垂直下穿为垂直净距，斜下侧穿为斜向净距），1.5 m × 2.3 m、2.0 m × 2.3 m、2.4 m × 2.9 m、2.6 m × 2.9 m 四种典型电缆隧道内净空尺寸，对电缆隧道结构受力变形进行对比分析。

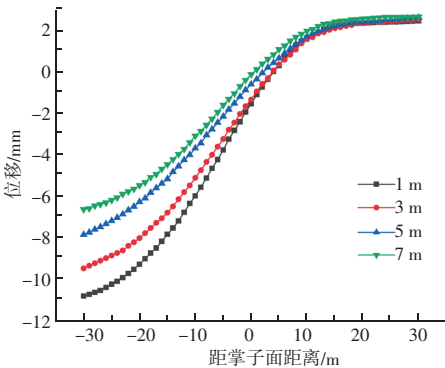
岩土力学

3.1 净距对电缆隧道变形影响

地铁暗挖隧道垂直下穿电缆隧道最不利阶段为穿越完成后，穿越结束后电缆隧道竖向变形曲线如图 5 (a) 所示；斜下侧穿电缆隧道最不利阶段为穿越到中间位置，数值计算中穿越到模型中间时电缆隧道水平向与竖向位移曲线如图 5 (b) 所示。鉴于计算工况较多，仅列出地铁暗挖隧道与 2.4 m × 2.9 m 电缆隧道在不同净距下的竖向扰动变形曲线。



(a) 垂直下穿

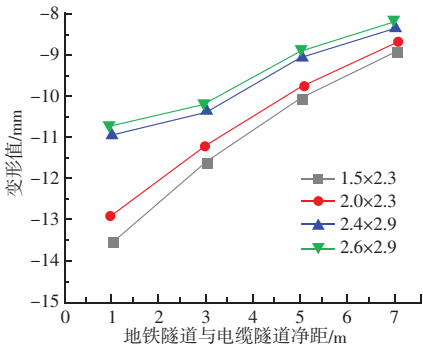


(b) 斜下侧穿

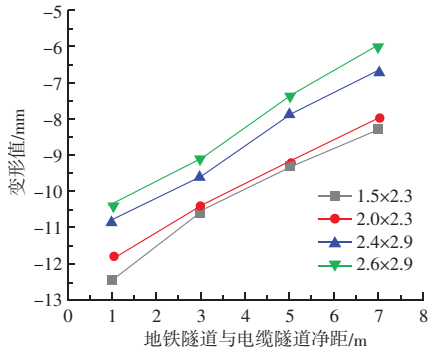
图 5 电缆隧道竖向变形曲线

Fig. 5 Vertical deformation curve of cable tunnel

不同截面尺寸的电缆隧道在不同净距下最大扰动变形值对应关系如图 6 所示。随着净距不断减小，



(a) 垂直下穿

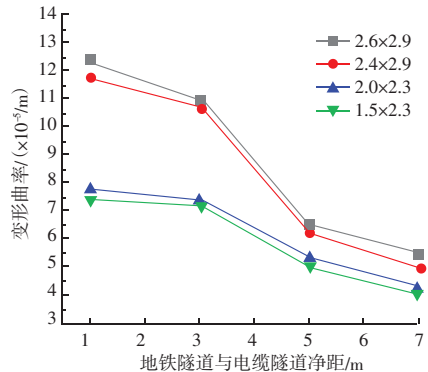


(b) 斜下侧穿

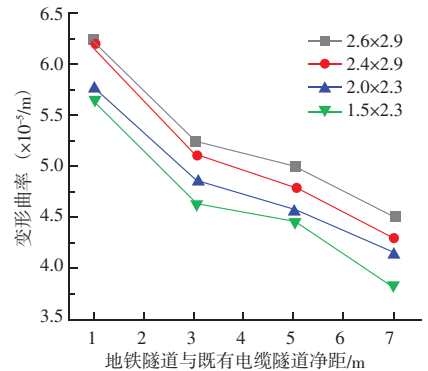
图 6 电缆隧道最大变形值与不同净距关系曲线
Fig. 6 Relation curve between maximum deformation value and clear distance of cable tunnel

电缆隧道最大变形量基本呈线性增大，电缆隧道更易于破损。随着电缆隧道截面尺寸增大，其截面抵抗矩增大，电缆隧道本身抵抗变形的能力增强，变形值反而减小。不同净距下，垂直下穿对既有电缆隧道扰动影响大于斜下侧穿工况。

不同尺寸电缆隧道最大变形曲率与净距关系曲线如图 7 所示。



(a) 垂直下穿



(b) 斜下侧穿

图 7 最大变形曲率与净距关系曲线
Fig. 7 Relationship between maximum deformation curvature and clear distance

既有电缆隧道尺寸越大，其既有结构最大变形曲率越大；随着净距增大，最大变形曲率呈减小趋势；垂直下穿工况引起隧道的最大变形曲率远大于斜下侧穿。

3.2 净距对电缆隧道受力影响

地铁隧道穿越既有电缆隧道时，相较于扰动引起的结构横截面受力，其纵向应力更大^[14]，其中净距为1 m时的2.4 m×2.9 m既有电缆隧道纵向应力分布云图如图8所示。在此仅列出净距为1 m时的2.4 m×2.9 m既有电缆隧道纵向应力，其他云图不一一列出。

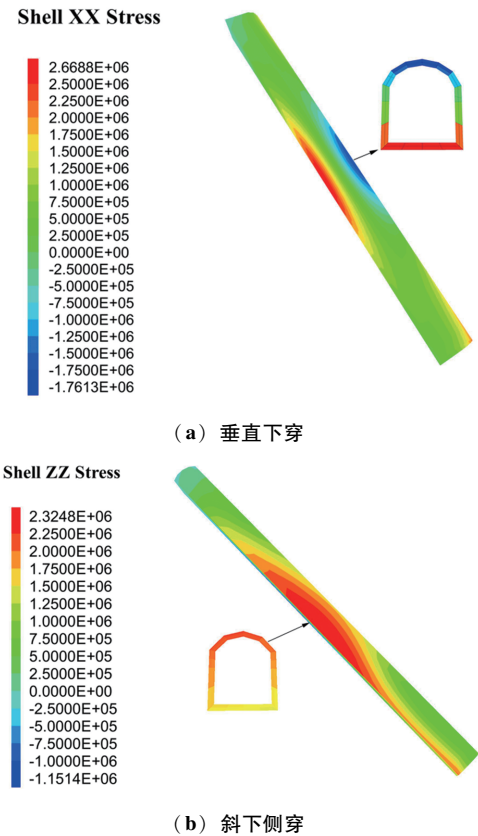


图8 净距1 m时既有结构纵向应力云图
Fig. 8 Longitudinal stress nephogram of the existing structure when the distance is 1 m

垂直下穿工况下，地铁隧道施工对临近既有电缆隧道纵向应力分布有较大影响，沿轴线方向纵向应力分布呈现“中间大、两端小”的特点。位于地铁隧道正上方的电缆隧道部分纵向应力值最大，且底部拉应力值最大。斜下侧穿工况下，位于地铁隧道掌子面前方1倍洞径处既有电缆隧道纵向应力值最大，电缆隧道顶部拉应力值最大。

此外，由计算结果可知：上述两种工况下，随着净距减小，电缆隧道结构纵向应力、最大主应力逐渐增大，暗挖隧道施工对电缆隧道影响增强；电缆隧道截面尺寸逐渐增大时，抗弯刚度也随之变大，扰动引起隧道结构纵向应力、最大主应力增大。

不同净距暗挖隧道下穿不同截面尺寸电缆隧道结构最大拉应力变化规律如图9所示。

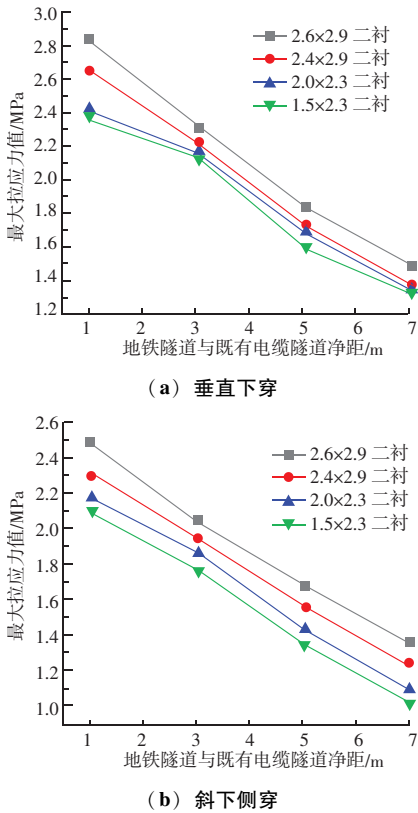


图9 最大拉应力与净距之间关系
Fig. 9 Relationship between maximum tensile stress and clear distance

两种工况，结构最大拉应力有相同变化规律，即随着净距减小，既有电缆隧道结构最大主应力（拉应力）逐渐增大；截面尺寸增大，抗弯刚度变大，既有电缆隧道结构纵向应力、最大主应力（拉应力）依次增大。垂直下穿工况，当两隧道净距小于3 m时，不同截面尺寸的电 缆隧道间最大拉应力差异增大；斜下侧穿工况，不同截面尺寸的电 缆隧道间最大拉应力差异较小。从结构受力来看，垂直下穿对电缆隧道影响程度大于斜下侧穿。

4 安全性研究

对于垂直下穿和斜下平行侧穿两种工况，选取

岩土力学

电缆隧道结构变形曲率最大截面，即受力最大部位，参考铁路隧道设计规范^[15]中钢筋混凝土结构偏心受压、偏心受拉构件安全性计算公式，分别计算 1、3、5、7 m 四种不同净距下电缆隧道二衬对应的环向安全系数、纵向安全系数。

其中，不同穿越形式下净距为 1 m 时，尺寸为 2.4 m×2.9 m 电缆隧道衬砌结构环、纵向安全系数分别见表 3，鉴于文章篇幅限值，其他净距计算结果不再一一列出。

表 3 垂直、斜下 45° 平行侧穿工况下二衬安全系数表

Table 3 Safety factor table of secondary lining under the condition of vertical working and 45° parallel side penetration

工况	位置	环向安全系数			纵向安全系数		
		轴力 /kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	轴力 /kN	弯矩/(kN·m)	安全系数
垂直	1	-53.69	-2.24	84.96	-134.84	-5.62	31.75
	2	-42.48	-1.77	107.38	-38.17	-1.59	112.16
	3	-26.51	-1.10	172.07	-264.83	-11.03	16.17
	4	92.79	3.87	6.95	156.16	6.51	7.49
	5	130.32	5.43	4.95	617.84	28.33	1.83
	6	108.00	4.50	5.97	553.21	23.05	2.11
斜下 45° 平行侧穿	1	10.20	0.42	63.21	44.82	1.87	26.09
	2	17.78	0.74	36.26	68.61	2.86	17.05
	3	-10.85	-0.45	420.28	124.80	5.20	9.37
	4	-30.18	-1.26	151.12	-179.08	-7.46	23.91
	5	-40.97	-1.71	111.32	-506.45	-21.10	8.45
	6	5.05	0.21	127.62	-260.11	-10.84	16.46
	7	0.63	0.11	1 332.18	569.42	23.73	2.05
	8	-1.22	-0.05	3 724.71	426.40	17.77	2.74
	9	-8.87	-0.37	514.42	51.42	2.14	22.74
	10	-24.35	-1.01	187.35	-85.29	-3.55	50.20

结构纵向安全系数普遍小于环向安全系数。垂直下穿时结构底板纵向安全系数最小，斜下平行侧穿时结构拱顶处纵向安全系数最小。

两种工况下，不同净距、不同尺寸电缆隧道二衬最小安全系数曲线如图 10 所示。既有电缆隧道截

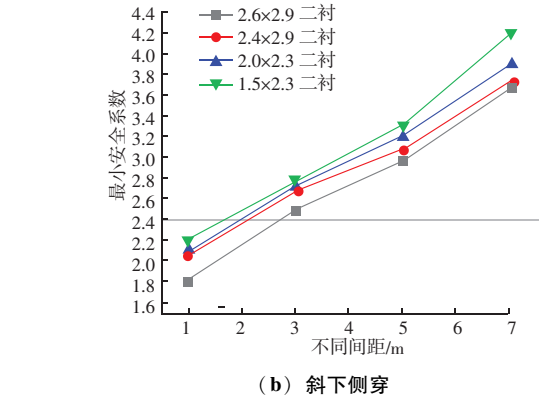
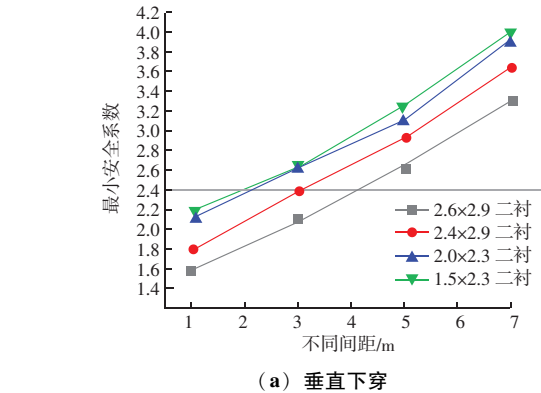


图 10 不同净距、不同尺寸电缆隧道最小安全系数曲线
Fig. 10 Minimum safety factor curve for cable tunnels with different spacings and sizes

面尺寸一定时，净距越大，其安全系数越大，呈线性增大趋势；同净距下，截面尺寸增大，最大拉应力增大，安全性较低，其最小安全系数减小。

对于受拉破坏结构，按照安全系数进行控制，得到埋深 5 m、不同尺寸电缆隧道二衬安全保护距离，见表 5。

表 5 不同空间位置典型尺寸下二衬的安全距离

Table 5 Safety distance of the second liner under typical dimensions at different spatial locations

电缆隧道尺寸 / (m×m)	垂直下穿 /m	斜下侧穿 /m
1.5×2.3	1.91 (1.27B ₁)	1.64 (1.09B ₁)
2.0×2.3	2.09 (1.05B ₂)	1.98 (0.99B ₂)
2.4×2.9	3.00 (1.25B ₃)	2.10 (0.88B ₃)
2.6×2.9	4.03 (1.53B ₄)	2.72 (1.05B ₄)

注：B₁、B₂、B₃、B₄ 分别为 1.5 m、2.0 m、2.4 m、2.6 m 的电缆隧道洞宽。

两种下穿工况，不同尺寸电缆隧道二衬的安全距离略有不同。出于安全考虑，在地铁暗挖隧道垂直下穿既有电缆隧道（埋深 5 m）时，建议电缆隧道的安全保护距离建议大于 1.6 倍的电缆隧道洞宽，斜下 45° 平行侧穿建议大于 1.1 倍的电缆隧道洞宽。

5 结论

对地铁暗挖隧道垂直、斜下 45° 平行侧穿电缆隧道两种常见工况，研究不同隧道净距下，不同截面尺寸电缆隧道扰动影响规律，并确定了电缆隧道安全施工距离。通过对比分析，得出以下结论：

(1) 既有电缆隧道力学响应规律：① 变形：随着两隧道净距减小，既有电缆隧道沉降值增大；截面尺寸越大，沉降越小；垂直下穿产生的沉降值高

于斜下侧穿的沉降值。②受力：相较于环向受力，结构受到的纵向扰动应力最大；净距减小，纵向拉应力增大；当截面尺寸依次增大时，既有电缆隧道产生的纵向拉应力依次增大；垂直下穿产生的拉应力值高于斜下侧穿产生的拉应力值。

(2) 既有电缆隧道安全性影响规律：随着两隧道净距缩短，既有结构的最小安全系数变小；当既有结构的截面尺寸依次增大时，既有结构的最小安全系数依次减小。垂直下穿产生的最小安全系数低于斜下侧穿产生的最小安全系数。

(3) 在地铁暗挖隧道垂直下穿既有电缆隧道（埋深 5m）时，建议电缆隧道的安全保护距离建议为大于 1.6 倍的电缆隧道洞宽，斜下 45°平行侧穿建议为大于 1.1 倍的电缆隧道洞宽。

(4) 空间位置关系、截面尺寸、净距对既有电缆隧道结构安全性的影响规律为：垂直下穿高于水平斜下 45°侧穿，既有电缆隧道断面尺寸越大，受扰动影响程度越大，隧道净距越小，影响程度越大。

参 考 文 献

- [1] BYUN G W, KIM D G, LEE S D. Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21 (1): 1-6.
- [2] KASPER. T, MESCHKE G A. 3D finite element simulation model for TBM tunneling in soft ground [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28: 1441-1460.
- [3] 包德勇. 近距离交叠隧道施工影响的数值模拟 [J]. 地下空间

与工程学报, 2011, 7 (1): 127-132.

- [4] 李俊光, 黄鑫, 杨小礼. 城市隧道下穿电缆隧道时的数值计算分析及变形沉降预测 [J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5 (1): 68-71.
- [5] 崔光耀, 戴艾蒙, 克旭, 等. 复合地层双线矩形隧道近接下穿高铁三维影响分区及应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43 (增刊 2): 3609-3620.
- [6] 王占生, 张顶立. 浅埋暗挖隧道近距下穿既有地铁的关键技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (增刊 2): 4208-4214.
- [7] 郑光辉, 李结元, 王攀, 等. 盾构近距离下穿既有隧道掘进参数试验研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52 (19): 122-127, 144.
- [8] 廖少明, 杨宁恒. 盾构上下夹穿运营地铁的变形控制与实测分析 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (5): 812-818.
- [9] 代光辉, 周学, 李清泽, 等. 新建隧道近接下穿地铁区间的沉降影响分析 [J]. 路基工程, 2023 (4): 150-153.
- [10] 麻凤海, 董博, 宋帅, 等. 大跨度人防隧道工程下穿施工对既有地铁隧道区间结构稳定性的影响 [J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27 (4): 33-39.
- [11] 汪从敏, 程国开, 王志勇, 等. 新建隧道对既有电缆隧道的影响规律及保护区范围分析 [J]. 地下工程与隧道, 2016 (3): 15-18.
- [12] 向卫国, 徐玉胜, 江辉煌, 等. 隧道施工引起地下管线变形的安全评估 [J]. 铁道建筑, 2010 (7): 70-73.
- [13] 冯慧君. 新建地铁隧道近距离下穿运营地铁线路施工及安全管控 [J]. 现代隧道技术, 2022, 59 (2): 220-226.
- [14] 李友武, 张基伟, 江潮, 等. 下穿既有铁路隧道施工安全技术分析 [J]. 重庆建筑, 2024, 23 (增刊 1): 102-104.
- [15] 于磊. 电缆隧道施工对邻近地下管线的影响研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
- [16] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003-2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.

(上接第 83 页)

- International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2018, 19: 1-4.
- [12] 郑刚, 衣凡, 黄天明, 等. 超挖引起双排桩支护基坑倾覆型连续破坏机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (8): 1373-1381.

- [13] 刘青松, 矫伟刚, 盛志战. 双排桩冠梁刚度分析及抗倾覆优化计算 [J]. 工程勘察, 2020, 48 (6): 19-23.
- [14] 宫凤梧, 刘晨, 郭文娟, 等. 双排桩双梁组合支护刚度计算的改进与位移分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49 (1): 109-116.