

DOI: 10.11779/CJGE2021S2060

基坑开挖对临近既有地铁隧道的影响研究进展

刘 波¹, 范雪辉², 王园园², 张嘉宝², 范智博²

(1. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 211189; 2. 中交第三公路工程局有限公司, 北京 100011)

摘 要: 基坑开挖卸荷会扰动周围岩土体, 进而对临近既有地铁隧道产生不良影响。针对隧道位于基坑外侧和下方两种方位, 分别从基坑开挖对既有隧道的影响机制、基坑开挖引起隧道变形的影响区、隧道受基坑开挖影响变形预测方法以及基坑开挖对隧道影响控制方法 4 个方面综述当前最新研究成果, 探讨有待解决的主要问题以及未来重点研究方向。

关键词: 基坑; 既有隧道; 影响区; 预测方法; 控制方法

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2021)S2-0253-06

作者简介: 刘 波(1989—), 男, 博士后, 主要从事静动力作用下地下结构灾变机制及其防控研究工作。E-mail: boliu@seu.edu.cn。

Influences of excavation on adjacent existing metro tunnels: a review

LIU Bo¹, FAN Xue-hui², WANG Yuan-yuan², ZHANG Jia-bao², FAN Zhi-bo²

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. CCCC Third Highway Engineering CO., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: The excavation-induced unloading will disturb the surrounding rock and soil mass, and then have a negative effect on the adjacent existing metro tunnels. For the two positions of a tunnel outside and below the foundation pit, the state-of-the-art achievements are summarized from the following four aspects: the influence mechanism of deep excavation on the existing tunnels, the influenced zone for tunnel deformation induced by excavation, the prediction methods for tunnel deformation and the control methods for tunnel deformation. Finally, the main problems to be solved and the key research directions in the future are discussed.

Key words: excavation; existing tunnel; influenced zone; prediction method; controlling method

0 引 言

近年来, 中国地铁建设取得了快速发展。据统计, 截至 2020 年底, 中国大陆地区共 38 个城市开通地铁, 累计线路总长 6280.8 km^[1]。地铁建成后, 为了方便大众出行, 越来越多的基坑工程, 如高层建筑地下室、地下商业中心等临近既有的地铁线施工。基坑施工不可避免地破坏地基中原有平衡的应力和位移场, 进而对埋置其中的既有地铁隧道产生不良影响。目前, 中国地铁隧道多采用盾构法施工, 隧道结构由预制管片通过螺栓组合拼装而成, 具有接缝多、完整性弱、整体刚度低等特点。工程上, 已有不少基坑施工导致临近地铁隧道产生过量位移、变形、管片破损乃至工程事故的案例^[2-5]。

为确保地铁隧道运营安全, 相关规范对外界施工引起的隧道变形提出了严格的控制要求。如:《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》^[6]指出, 各种加、卸载施工活动引起的地铁结构设施绝对

沉降量及水平位移量不能超过 20 mm。《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)^[7]分别给出了隧道水平位移和竖向位移 10 mm 的预警值和 20 mm 的控制值。《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911—2013)^[8]则要求隧道结构沉降控制在 3~10 mm、隧道结构上浮控制在 5 mm、隧道结构水平位移控制在 3~5 mm。上述严格的隧道变形控制标准对合理预测、评估隧道变形以及采取控制措施提出了更高要求。

本文针对隧道位于基坑侧方和下方两种方位, 从基坑开挖对既有隧道的影响机制、基坑开挖引起隧道变形的影响区、隧道受基坑开挖影响变形预测方法以及基坑开挖对隧道影响控制方法几方面综述当前最新

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0805500); 中国博士后科学基金项目(2021M690624); 江苏省博士后科研计划项目(2021K146B)

收稿日期: 2021-08-17

研究成果,探讨有待解决的主要问题和未来研究方向。

1 基坑开挖对既有隧道影响机制

1.1 对侧方隧道影响机制

隧道位于基坑侧方时,基坑开挖前隧道收到周围水土压力和自重的作用处于受力平衡状态,隧道不会发生平动位移;基坑土方开挖后,土体应力释放,基坑围护结构产生向坑内的位移,导致隧道靠近基坑一侧的水平侧向压力减小,使隧道受到一个向坑内的水平附加力,进而使隧道产生向坑内的水平位移。

基坑开挖对隧道竖向位移的影响比水平位移复杂的多。根据基坑开挖深度的不同,隧道可能出现沉降或隆起两种变形特征。当基坑开挖深度较浅、小于某临界深度时,基坑开挖卸荷会使隧道产生一个向上的附加力,进而使隧道产生隆起变形;当基坑开挖深度较深、大于某临界深度时,基坑开挖会使隧道产生一个向下的附加力,进而使隧道产生沉降变形;当基坑开挖深度位于两个临界深度之间时,隧道受坑底以下土体卸荷回弹和坑底以上土体卸荷沉降的共同影响,可能出现隆起变形或沉降变形。

基坑开挖对隧道收敛变形的影响为:基坑开挖前,隧道处于受力平衡状态,由于土的侧压力系数 $K_0 < 1$,隧道顶部受到的竖向应力要大于拱腰处的水平向应力,隧道发生“水平拉伸、竖向压缩”变形;基坑开挖后,隧道竖向压力不变,而靠近基坑一侧的水平压力减少,使隧道“水平拉伸、竖向压缩”变形进一步发展。

1.2 对下卧隧道影响机制

基坑开挖对下卧隧道的影响机制比侧方隧道简单的多。基坑开挖前,隧道处于受力平衡状态,隧道不会发生平动位移;基坑开挖后,坑底土体应力释放,隧道顶部压力减小,隧道受到一个向上的附加应力,使隧道产生竖向隆起,而隧道水平向受力基本保持平衡,水平位移较小。

基坑开挖对隧道收敛变形的影响为:基坑开挖前,隧道产生“水平向拉伸、竖向压缩”的变形;基坑开挖后,隧道顶部压力减小,而水平向压力不变,从而导致隧道收敛变形由“水平向拉伸、竖向压缩”向“水平向压缩、竖向拉伸”转变。

2 基坑开挖影响区

2.1 基坑开挖引起侧方隧道变形的影响区

基坑工程施工对周围岩土体的扰动范围、扰动程度是不同的,这一受施工扰动的范围称之为影响区。

《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911

—2013)[8]给出了基坑开挖侧向影响分区。该方法形式上简单易懂,但不同影响分区划分的唯一依据是基坑开挖深度 H ,未考虑不同基坑开挖条件、不同支护结构变形形式、变形大小等因素的影响,且以基坑底为分区基点,更适用于采用柔性桩支护且基本不需插入深度的传统浅基坑。

丁勇春[9]根据基坑坑外地层变形规律,提出了基坑开挖对环境影响的简化分区图。与规范[8]中的三角形影响区范围不同,该影响区范围被简化为直角梯形,且以围护结构底端为分区基点,然而水平方向上影响区范围并未给出明确确定方法。

鉴于上述规范方法存在的局限,郑刚等[10]以常见的地下车站或建筑三至四层地下室基坑为原型,采用有限元方法分析基坑开挖对坑外地铁隧道变形影响规律,然后根据数值计算结果绘制坑外隧道变形等值线图,并参考规范[6-8]分别选定20, 10, 5 mm作为隧道变形控制标准,将影响区划分为:主要影响区(I)、次要影响区(II)、一般影响区(III)、微弱影响区(IV),如图1所示。其中,影响区范围被简化为直角梯形形状,隧道变形等值线被简化为折线。

笔者[11]在郑刚等[10]的研究基础上,设置不同基坑开挖深度(H_e)、不同围护结构最大侧移(δ_{hm})以及坑外不同隧道位置(L_t , H_t),采用考虑土体小应变刚度特性的有限元方法分析了基坑开挖对侧方隧道变形特性的影响规律;然后通过变形等值线分析,结合3级隧道变形控制标准(20, 10, 5 mm),划分了不同 H_e 和 δ_{hm} 条件下3级隧道变形控制标准对应的影响区范围;接着分析了 H_e 和 δ_{hm} 对影响区范围的影响规律,给出了任一 H_e 和 δ_{hm} 条件下侧方隧道变形影响区范围预测方法。

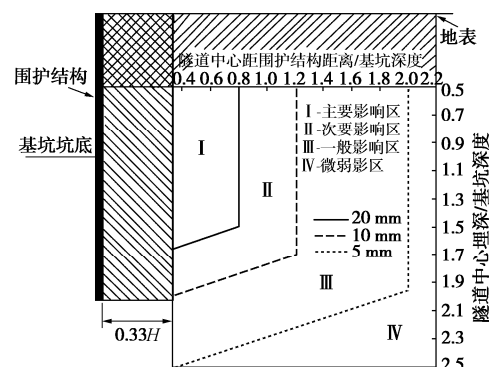


图1 基坑开挖引起侧方隧道变形的影响区^[10]

Fig. 1 Influenced zones for lateral tunnel deformation induced by excavation

2.2 开挖引起下卧隧道变形的影响区

笔者[11]考虑隧道位于坑底以下的工况,设置不同

基坑开挖深度 (H_e)、不同隧道空间位置 (L_t , H_t), 采用考虑土体小应变刚度特性的有限元方法分析基坑开挖对下卧隧道变形特性的影响规律; 在此基础上通过变形等值线分析, 结合 3 级隧道变形控制标准 (20, 10, 5 mm), 划分了不同变形控制标准对应的影响区范围, 如图 2 所示; 根据影响区特征, 把影响区简化为直角梯形, 隧道变形等值线简化为直线, 通过定义直线上两点坐标: 影响区深度系数 N_1 , N_2 , 实现了影响区范围的简易化描述; 接着分析了基坑开挖深度 H_e 对隧道变形影响区范围的影响规律, 给出了任一开挖深度条件下隧道变形影响区范围预测方法。

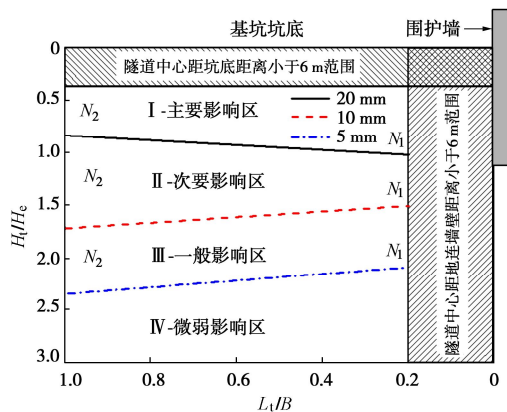


图 2 基坑开挖引起下卧隧道变形的影响区

Fig. 2 Influenced zones for underlying tunnel deformation induced by excavation

3 基坑开挖引起既有隧道变形预测方法

3.1 经验公式法

(1) 侧方既有隧道变形经验预公式

魏纲等^[12]等基于 11 个有实测数据的基坑开挖对侧方既有隧道影响的工程实例, 通过统计分析, 发现隧道与基坑之间的净距离 (S) 是影响隧道水平位移 (U) 的一个重要因素, 两者之间呈幂函数关系:

$$U = 69.211 \times S^{-1.2809}, \quad (1)$$

然而, 该关系只考虑了基坑与隧道之间净距单一因素的影响, 未考虑其他因素, 且该关系是基于上海软土地区极其有限的拟合得到的。

针对上述公式存在的不足, 魏纲等^[13]等在考虑隧道与基坑净距离的基础上, 补充考虑了基坑沿隧道轴向的开挖尺寸 (B) 的影响, 对式 (1) 进行了修正。通过对多组实测数据的拟合, 发现隧道最大水平位移 (U_{\max}) 与参数 B/S 呈指数关系:

$$U_{\max} = 2.993 \times \exp(0.1856B/S), \quad (2)$$

然而, 该式也仅仅考虑了两个因素的影响, 从影响机

理上说还存在局限性。

笔者^[11]基于 42 个基坑开挖对侧方既有盾构隧道影响的工程案例统计分析结果, 采用工程地质条件、基坑开挖深度 (H_e)、基坑与隧道边缘水平间距 (L'_t)、基坑沿隧道纵向开挖宽度 (b) 作为隧道水平位移 (ζ_{hm}) 预测参数, 提出采用 bH_e/L'_t 作为隧道水平位移综合预测指标, 建立了隧道水平位移经验预测模型:

$$\zeta_{\text{hm}} = f_1 \times bH_e/L'_t + f_2, \quad (3)$$

式中, f_1 , f_2 为与施工控制条件有关的变量, 可通过实测数据拟合得到。经拟合, 分别给出了软黏土地层, 粉土、粉砂性地层, 砂卵石、风化岩地层条件下实用的隧道水平位移预测公式。

(2) 下卧既有隧道变形经验预公式

魏纲^[14]认为基坑开挖引起的下卧隧道隆起主要与两方面有关: 一方面与基坑开挖深度 h 、隧道顶部初始覆土厚度 H 有关, 并定义了卸载率 $a=h/H$ 来表征卸荷程度; 另一方面, 与基坑开挖暴露的隧道长度 B 有关, 沿隧道纵向暴露的长度越长卸荷影响程度越大。综合这两方面影响, 给出了隧道最大隆起变形预测模型:

$$S_{\max} = f_1 \ln(Bh/H) + f_2, \quad (4)$$

式中, f_1 , f_2 为与施工控制条件有关的变量, 可通过工程实例拟合得到。然而该模型是在总结上海软黏土层案例的基础上得到的, 未考虑其他地层条件的影响。

郭鹏飞等^[15]在考虑卸载率 (N) 的基础上, 通过对基坑开挖面积 A 取对数 ($\lg A$) 来考虑基坑面积的影响, 并引入形状因子 α ($\alpha = 2\sqrt{ab}/(a+b)$) (a , b 分别为基坑的长和宽) 来考虑基坑形状的影响。综合各影响因素, 给出了隧道最大隆起变形 S_{\max} 的预测模型:

$$S_{\max} = f_1 \lg(A)\alpha N + f_2, \quad (5)$$

式中, f_1 , f_2 为与施工控制条件有关的变量, 可通过工程实例拟合得到。该模型的形式与式 (4) 基本一致, 但将隧道暴露长度 B 的影响变更为基坑开挖面积 A 的影响, 在考虑卸载率 N 的基础上补充考虑了基坑形状的影响, 考虑的影响因素为 3 个。然而 3 个影响因素均为基坑方面的因素, 未考虑隧道方面的因素。

笔者^[11]基于 33 个基坑开挖对下卧盾构隧道影响的工程案例统计分析结果, 采用工程地质条件、基坑开挖卸载率 (H_e/H)、隧道穿越基坑长度 (l) 作为隧道最大隆起 (S_{\max}) 位移预测参数, 提出采用 lH_e/H 作为隧道竖向隆起位移综合预测指标, 建立了隧道水平位移经验预测模型:

$$S_{\max} = f_1 \times lH_e/H + f_2, \quad (6)$$

式中, f_1 , f_2 为与施工控制条件有关的变量, 可通过工程实例拟合得到。经拟合, 分别给出了软黏土地层,

粉土、粉砂性地层,砂卵石、风化岩地层条件下实用的隧道竖向隆起位移预测公式。

3.2 理论解析法

张治国等^[16]提出了临近基坑开挖对既有隧道影响的两阶段分析方法,即首先基于 Mindlin 解计算基坑开挖作用引起的隧道轴线处附加应力,然后将隧道视为 Winkler 弹性地基上的无限长梁,将土体附加应力施加到隧道上,建立土体附加应力对隧道影响的控制微分方程,进而得到隧道纵向位移和内力计算表达式。然而,该方法在考虑开挖卸荷时仅考虑了坑底卸荷作用。姜兆华等^[17]在考虑坑底卸荷的基础上补充考虑了临近隧道一侧坑壁卸荷作用,坑壁卸荷应力假设为三角形分布,采用两阶段分析法求得了隧道纵向位移解析解。张治国等^[18]对前期研究进行了改进,补充考虑了四周侧壁卸荷作用,得到了坑底和侧壁卸荷共同作用下,隧道纵向内力、变形表达式。张俊峰等^[19]采用考虑变形时间效应的软土流变模型,将隧道简化为弹性直梁,推导了基坑开挖引起的下卧隧道隆起。

上述理论解析方法有着严密的推理过程,但也存在一定局限性,如:理论建立和推导过程中做了很多简化和假设,因此成果的可靠性还有待检验;该方法理论性较强,对于使用者的知识水平要求较高。

3.3 数值模拟法

Doležalová^[20]建立二维有限元模型预测了捷克布拉格市中心某办公大楼深基坑开挖引起的下卧隧道变形和应力,并把预测结果与监测结果进行了对比分析。郑刚等^[21]以天津粉质黏土层中某围护墙+内撑式基坑为背景,通过二维有限元数值模拟,研究了4种围护结构变形模式下坑外不同距离、不同深度处隧道的变形特点及位移影响范围。张治国等^[22]以上海淤泥质粉质黏土层中某大型深基坑工程为依托,采用二维有限元数值模拟方法研究了基坑降水及加固等措施对基坑开挖过程中地下连续墙水平侧移、坑外地层以及临近既有隧道变形的影响规律。

虽然数值模拟方法是当前应用较为广泛的隧道变形预测方法,但模拟中材料模型参数,尤其是岩土体非线性本构模型及参数的选取仍然是一个问题。

4 基坑开挖对既有隧道影响控制方法

4.1 增加支护结构刚度

常用的基坑围护结构主要有地下连续墙、型钢水泥土搅拌墙(SMW工法桩)、钻孔灌注桩排桩+止水帷幕、钻孔咬合桩等。近年来,“两墙合一”的地下连续墙因刚度大、变形小、施工工艺成熟等优点,在工程中运用日趋增多。围护结构在距离隧道较近一侧的厚度和嵌入深度可以比其他侧有所增加。

支撑结构一般根据基坑开挖深度和规模选择一道或多道支撑。第1道支撑一般采用刚度较大的钢筋混凝土支撑,其可以充分发挥混凝土材料强度大、抗压承载力高、变形小的特点,对减小围护结构变形有重要作用。考虑到钢筋混凝土支撑达到设计强度耗时久且不能施加预加轴力,对于长条形基坑或块状基坑划分的窄条形基坑,除第1道支撑采用钢筋混凝土支撑外,其余支撑可以采用钢管支撑,且可以在支撑两端安装自动轴力补偿系统,随时给钢管支撑补偿损失的轴力^[23]。

4.2 土体加固

通常可以针对基坑内被动区加固和基坑外主动区进行加固。常用的被动区地基加固形式有双轴或三轴水泥土搅拌桩、高压旋喷桩、MJS高压喷射注浆等,加固形式可以采用满堂加固、格栅加固、抽条加固、墩式加固等。坑外主动区的加固可以采用水泥土搅拌桩、高压旋喷桩、注浆等。

文献[24]指出,对于侧方隧道受基坑开挖影响的工程,可以根据隧道与基坑的水平距离(s)、基坑开挖深度(H)以及隧道直径(D)三者的关系确定土体加固的形式和范围;对于下卧隧道受基坑开挖影响的工程,可以根据隧道拱顶与坑底的竖向距离(t)、基坑开挖深度(H)以及隧道直径(D)三者的关系确定土体加固的形式和范围。

4.3 分层分区块施工

对于侧方隧道受基坑开挖影响的工程,可根据基坑开挖规模、开挖深度等因素,采用分隔墙(桩)将大基坑划分为多个基坑进行分块施工,先施工距隧道较远的基坑,待地下结构施工至地表后再施工与隧道较近的基坑,与隧道较近的基坑可用分隔墙(桩)进一步划分成若干小基坑,采用从两边向中间对称开挖;或者用分隔墙(桩)将大基坑划分成若干与隧道轴向垂直的长条形基坑,采用从两边向中间对称开挖。

对于下卧隧道受基坑开挖影响的工程,当隧道正交下穿基坑时,可在隧道两侧设置地连墙、排桩墙等挡土结构,将基坑划分为多个小型基坑,先施工隧道两侧的基坑,待两侧基坑回填后,再施工隧道上方的基坑。当隧道以小角度倾斜下穿基坑时,可沿隧道纵向,用分割墙将基坑划分成一系列独立小基坑,采用“弹弓式”跳仓开挖。

4.4 隔离桩或抗拔桩

对于侧方隧道受基坑开挖影响的工程,若基坑开挖深度较深且隧道距离基坑较近,可在隧道与基坑围护结构之间增设隔离桩,阻隔侧向卸荷应力的传播,以减少对隧道的影响。隔离桩桩型一般采用钻孔灌注桩。郑刚等^[25]研究表明,隔离桩在控制侧方隧道水平

位移的过程中除了存在隔离作用还存在牵引作用, 而牵引作用对隧道变形控制不利。为了有效减小牵引作用、扩大隔离作用, 建议采用“埋入式”的隔离桩, 即桩顶与地表保持一定距离。若工程中未采取“埋入式”隔离桩而采用传统“全长式”隔离桩, 建议通过钢筋混凝土梁或钢筋混凝土板带, 将隔离桩顶与基坑围护桩(墙)连接在一起, 形成类似于双排桩的形式, 以增加抗侧刚度、减小对隧道的影响。

对于下卧隧道受基坑开挖影响的工程, 若基坑开挖深度较深, 且隧道顶距坑底较近, 在采取土体加固还不足以控制隧道隆起变形、保证隧道安全时, 可在隧道两侧设置抗拔桩。抗拔桩可以采用钻孔灌注桩、SMW 工法桩、水泥土搅拌桩等。抗拔桩顶部与基础底板或垫层连接在一起, 形成“门式框架”或“板凳桩”, 以提高抗拔能力。对于一些岩质地层中的案例, 由于土质较好, 也可以采用锚杆代替抗拔桩, 锚杆顶部与基础底板或垫层连接在一起, 形成板锚结构。

5 结论与建议

(1) 基坑开挖对侧方隧道的影响较复杂, 对于该类影响问题, 应同时重视隧道水平和竖向位移; 基坑开挖对下卧隧道的影响机制要比对侧方隧道的影响机制简单的多, 对于该类影响问题, 应重点关注隧道竖向位移。

(2) 基坑开挖引起临近既有隧道变形的影响区与地质条件、基坑条件、隧道条件三方面有关, 当前影响区研究经历了从单因素到多因素、从粗糙到精细的逐步发展过程, 然而仍有许多因素尚未考虑。今后, 仍需继续加强相关影响因素的研究, 充实、丰富当前影响区研究成果。

(3) 隧道受基坑开挖影响变形经验预测公式是基于有限工程案例得到的, 其可靠性还有待更多的工程检验。随着大数据、人工智能等前沿技术在基坑和隧道工程中的迅速发展, 将会为相关案例及数据获取带来极大便利, 因此基于大数据分析, 考虑多种复杂因素影响的隧道变形预测研究将是今后一个重要研究方向。

(4) 隧道 mm 级的变形控制标准对临近基坑开挖环境影响提出了更高要求。目前基坑开挖对既有隧道影响变形控制方法、工艺、装备等基本能够满足工程要求, 但具体实施方案多数根据工程经验确定, 缺乏定量的分析。今后需加强控制方法的控制效果定量评价, 以优化控制方案。

参考文献:

- [1] 侯秀芳, 梅建萍, 左 超, 等. 2020 年城市轨道交通线路统计分析[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(3): 1 - 9. (HOU Xiu-fang, MEI Jian-ping, ZUO Chao, et al. Statistics and analysis of urban rail transit in 2020[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(3): 1 - 9. (in Chinese))
- [2] CHANG C T, SUN C W, DUANN S W, et al. Response of a Taipei Rapid Transit System (TRTS) tunnel to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 151 - 158.
- [3] CHANG C T, WANG M J, CHANG C T, et al. Repair of displaced shield tunnel of the Taipei rapid transit system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 167 - 173.
- [4] 刘庭金, 夏文字. 桩锚深基坑诱发地铁盾构隧道病害的成因分析[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(1): 109 - 115. (LIU Ting-jin, XIA Wen-yu. Cause analysis on damage of adjacent metro shield tunnel due to deep pit excavation with pile-anchor retaining[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(1): 109 - 115. (in Chinese))
- [5] 郦 亮. 某软土地区盾构隧道抢险监护研究[J]. 施工技术, 2018, 47(23): 98 - 101. (LI Liang. Study on emergency control of a shield tunnel in soft clay area[J]. Construction Technology, 2018, 47(23): 98 - 101. (in Chinese))
- [6] 上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定: 沪市政法(94)第 854 号[S]. 1994. (Provisional Prescription on Protecting Techniques of Metro: (No. 854 of Shanghai Municipal Statute (94))[S]. 1994. (in Chinese))
- [7] 城市轨道交通结构安全保护技术规范 CJJ/T 202—2013[S]. 2014. (Technical Code for Protection Structures of Urban Rail Transit: CJJ/T 202—2013[S]. 2014. (in Chinese))
- [8] 城市轨道交通工程监测技术规范: GB 50911—2013[S]. 2014. (Code for Monitoring Measurement of Urban Rail Transit Engineering: GB 50911—2013[S]. 2014. (in Chinese))
- [9] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (DING Yong-chun. Excavation-Induced Deformation and Control in Soft Deposits[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009. (in Chinese))
- [10] 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. (ZHENG Gang, DU Yi-ming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 599 - 612. (in Chinese))
- [11] 刘 波. 软弱地层中基坑开挖卸荷引起临近既有地铁盾构隧道变形及控制方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 147 - 148. (LIU Bo. Deformation and Its Control of Existing Shield Tunnel Induced by Unloading of Adjacent Foundation

- Pit Excavation in Weak Stratum[D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 147 - 148. (in Chinese))
- [12] 魏 纲, 赵城丽, 蔡吕路. 基坑开挖对临近既有盾构隧道影响的机理研究[J]. 市政技术, 2013, **31**(6): 141 - 146. (WEI Gang, ZHAO Cheng-li, CAI Lü-lu. Mechanism of foundation pit excavation impact on existing nearby shield tunnel[J]. Municipal Engineering Technology, 2013, **31**(6): 141 - 146. (in Chinese))
- [13] 魏 纲, 厉 京, 宣海力, 等. 大型深基坑开挖对旁边地铁盾构隧道影响的实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, **15**(3): 718 - 726. (WEI Gang, LI Jing, XUAN Haili, et al. Monitoring data analysis on the influence of large deep foundation pit excavation on nearby metro shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, **15**(3): 718 - 726. (in Chinese))
- [14] 魏 纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, **34**(5): 1421 - 1428. (WEI Gang. Measurement and analysis of impact of foundation pit excavation on below existed shield tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(5): 1421 - 1428. (in Chinese))
- [15] 郭鹏飞, 杨龙才, 周顺华, 等. 基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J]. 岩土力学, 2016, **37**(增刊 2): 613 - 621. (GUO Peng-fei, YANG Long-cai, ZHOU Shun-hua, et al. Measurement data analyses of heave deformation of shield tunnels due to overlying pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(S2): 613 - 621. (in Chinese))
- [16] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学, 2009, **30**(5): 1373 - 1380. (ZHANG Zhi-guo, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong. Responses of existing tunnels induced by adjacent excavation in soft soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(5): 1373 - 1380. (in Chinese))
- [17] 姜兆华, 张永兴. 基坑开挖对邻近隧道纵向位移影响的计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, **35**(1): 7 - 11. (JIANG Zhao-hua, ZHANG Yong-xing. Calculation of influence on longitudinal deformation of adjacent tunnels due to excavation[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, **35**(1): 7 - 11. (in Chinese))
- [18] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7): 2085 - 2092. (ZHANG Zhi-guo, ZHANG Meng-xi, WANG Wei-dong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(7): 2085 - 2092. (in Chinese))
- [19] 张俊峰, 王建华, 温锁林. 软土基坑引起下卧隧道隆起的非线性流变[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, **34**(3): 10 - 15. (ZHANG Jun-feng, WANG Jian-hua, WEN Suo-lin. Nonlinear rheological analysis on tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft clay[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, **34**(3): 10 - 15. (in Chinese))
- [20] DOLEŽALOVÁ M. Tunnel complex unloaded by a deep excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2001, **28**(6): 469 - 493.
- [21] 郑 刚, 王 琦, 邓 旭, 等. 不同围护结构变形模式对坑外既有隧道变形影响的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1181 - 1194. (ZHENG Gang, WANG Qi, DENG Xu, et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on deformation of existing tunnels outside excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1181 - 1194. (in Chinese))
- [22] 张治国, 徐 晨, 刘 明, 等. 考虑基坑降水开挖影响的运营隧道变形分析[J]. 中国矿业大学学报, 2015, **44**(2): 241 - 248. (ZHANG Zhi-guo, XU Chen, LIU Ming, et al. Deformation analysis of metro tunnels considering impacts of dewatering excavation in foundation pit engineering[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, **44**(2): 241 - 248. (in Chinese))
- [23] 胡立海. 钢支撑轴力自动补偿系统在基坑围护工程中的应用[J]. 建筑施工, 2013, **35**(8): 693 - 694. (HU Li-hai. Automatic compensation system of steel support axial force applied to foundation pit excavation support engineering[J]. Building Construction, 2013, **35**(8): 693 - 694. (in Chinese))
- [24] 朱 令. 基坑工程对轨道交通区间隧道的影响与保护[J]. 地下工程与隧道, 2016(3): 36 - 40. (ZHU Ling. Effect of excavation on rail transit interval tunnel and protection measures[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2016(3): 36 - 40. (in Chinese))
- [25] 郑 刚, 杜一鸣, 刁 钰. 隔离桩对基坑外既有隧道变形控制的优化分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(增刊 1): 3499 - 3509. (ZHENG Gang, DU Yi-ming, DIAO Yu. Optimization analysis of efficiency of isolation piles in controlling the deformation of existing tunnels adjacent to deep excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(S1): 3499 - 3509. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)