

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.010

深基坑开挖施工对邻近地铁结构受力性状的影响

陈涛, 黄亚德, 李更召, 翟超, 范鹏程

(天津市勘察院, 天津 300191)

摘要: 以天津市某邻近深基坑工程的既有地铁线路为例, 结合现场实测数据, 采用荷载-结构法建立地铁隧道结构三维有限元模型, 对地铁隧道结构设计状态与当前状态下的受力情况进行模拟, 分析隧道结构、螺栓、钢筋受力状态。研究表明, 工况1、工况2下, 最大拉应力为: 隧道拱顶内侧混凝土分别为2.43 MPa、2.98 MPa, 隧道拱腰外侧混凝土分别为2.42 MPa、2.45 MPa, 小于混凝土极限抗拉强度3.1 MPa, 未受拉破坏; 环向螺栓分别为216.8 MPa、238.4 MPa, 纵向螺栓分别为68.3 MPa、65.3 MPa, 均小于螺栓的屈服应力400 MPa, 未发生屈服; 钢筋分别为236.0 MPa、275.6 MPa, 均小于钢筋的屈服应力335 MPa, 未发生屈服。

关键词: 既有地铁结构; 基坑开挖; 检测; 受力性状; 数值模拟

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)03-0054-06

Influence of Deep Foundation Pit Excavation on the Mechanical Behavior of the Adjacent Metro Structure

CHEN Tao, HUANG Yade, LI Gengzhao, ZHAI Chao, FAN Pengcheng

(Tianjin Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Tianjin, 300191, China)

Abstract: The construction of deep foundation pit may cause the deformation of its adjacent existing metro structure, to a certain extent, affect the mechanical properties, then it may have some impacts on the normal operation of the metro lines. By taking one existing metro line which adjacent the deep foundation pit in Tianjin as an example, the load-structure method is adopted to establish a three-dimensional finite element model of the metro tunnel structure to simulate the stress condition under the design state and the current state, the stress state of the tunnel structure, bolt and steel bar are analyzed. The results show that the maximum tensile stress of the inner concrete of tunnel vault is 2.43 MPa and 2.98 MPa, the tunnel arch waist concrete is 2.42 MPa and 2.45 MPa, less than the ultimate tensile strength of concrete 3.1 MPa, there is no tensile failure of the concrete, the maximum tensile stress of the circumferential bolt is 216.8 MPa and 238.4 MPa, and the longitudinal bolt is 68.3 MPa and 65.3 MPa, all of them are less than the yield stress of the bolt 400 MPa, the maximum tensile stress of the steel bar is 236.0 MPa and 275.6 MPa, they are less than the yield stress 335 MPa, and they don't yield.

Keywords: existing metro structure; foundation pit excavation; detection; mechanical properties; numerical simulation

目前,我国很多城市已建成地铁线路并投入使用,随着地铁运营里程的不断增加,新建工程与既有地铁结构相邻近的情况时常出现^[1-3],作为现代城市重要的交通工具,地铁结构的安全性倍受关注。基坑开挖、堆载等因素可能导致邻近地铁结构产生

变形,从一定程度上影响地铁线路的安全运营^[4-9]。

现有已运营地铁结构多采用预制混凝土管片和高强度螺栓连接的盾构隧道,对变形要求非常严格。过大的变形可能会导致隧道管片结构裂缝、渗漏水、道床脱空、错台等病害^[10-12],进而可能产生管片的

异常变形而造成损坏,改变其受力状况。

针对基坑开挖施工对运营地铁线路安全性的影响,国内外诸多学者进行了相关研究。王立峰等^[13]考虑基坑分块开挖的时间效应的影响,通过建立基坑和隧道位移拟合公式,对邻近地铁隧道的水平、竖向位移进行分析。孙超等^[14]利用 MIDAS/GTS NX 有限元软件对基坑开挖后地铁隧道的变形进行数值模拟,并分析隧道管片的受力状态,对隧道的稳定性和安全性进行研究。郑刚等^[15]利用深基坑监测实测资料,对邻近地铁隧道结构的变形规律进行研究,总结建立了坑外隧道变形影响区。徐长节等^[16]采用 ABAQUS 数值模拟法和规范角点法对新建基坑下卧隧道的变形及应力进行对比分析,以评价对隧道结构的影响。

本文以天津某邻近新建深基坑工程的既有地铁结构为背景,结合现场检测数据,利用 ABAQUS 有限元数值模拟分析法,对隧道设计状态与当前状态的受力情况进行模拟,通过反演分析隧道结构、螺栓及钢筋的受力分布状况,分析邻近施工对地铁结构健康状态影响程度,能够对后期施工提出合理建议。

1 工程概况

项目位于天津市,处于南侧既有地铁线路的保护区范围内,基坑面积约 88 000 m²,周长 1 280 m,为了控制基坑围护结构变形及保护既有地铁结构,基坑采用分区开挖的施工方式,分一、二、三期进行开挖施工,其中,二、三期距离地铁结构较近,其地下室距离地铁结构最近距离分别约为 17.8 m、9.0 m,地下为整体两层地下室(局部四层地下室),开挖深度约 15.95 m,基坑周边环境复杂,东、南、西三侧邻近市政道路,北侧紧邻既有地铁线路,基坑与地铁结构平面、剖面位置关系见图 1、图 2。

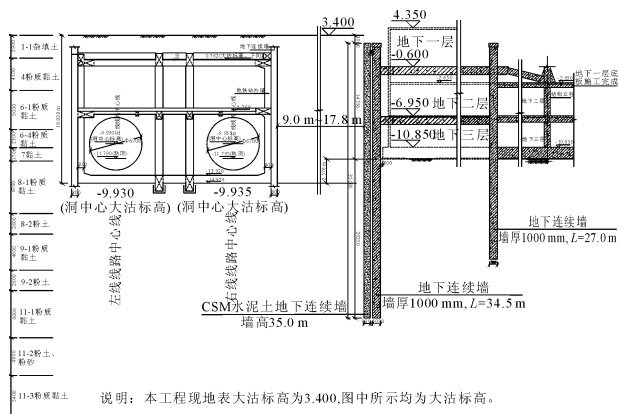


图 2 基坑与地铁结构剖面位置关系图

基坑北侧距离地铁结构较近的地段采用地下连续墙进行支护,其余三侧采用钻孔灌注桩结合止水帷幕的围护形式。由于本工程属超大面积深基坑,止水帷幕需隔断深部承压水,因此围护结构外侧整体采用水泥土地下连续墙作为止水帷幕。一期地下室采用两道水平钢筋混凝土支撑体系,二期和三期地下室距离地铁站及线路相对较近,均采用三道水平钢筋混凝土支撑体系。由于三期距离地铁结构较近,必要时考虑注浆纠偏。目前,一、二期工程已施工完毕,三期工程第一步土方开挖施工完毕,此时,邻近基坑的地铁结构出现渗漏水、裂缝、错台等病害,考虑到对地铁结构安全性的影响,此时现场停止施工,结合现场检测数据对地铁结构安全状况进行评估,以指导后续施工。

2 管片变形检测

断面轮廓下行线、上行线各选取 10 组断面进行检测,轮廓水平最大距离和检测实际值对比情况见表 1。

由表 1 可以看出,下行线管片 835 号到 885 号范围内隧道断面最大水平距离相对较大,相对设计值外扩量均超过 2 cm,最大值出现于管片 885 号位置,超出设计值 2.296 cm。上行线管片 835 号到 875 号范围内隧道断面最大水平距离相对较大,相对设计值外扩量均超过 1 cm,最大值出现于管片 865 号位置,超出设计值 1.958 cm。下行线、上行线轮廓水平最大距离和检测实际值对比情况分别见图 3、图 4。

3 区间隧道结构、螺栓、钢筋受力有限元数值模拟分析

采用 ABAQUS 有限元数值方法,结合现场实测

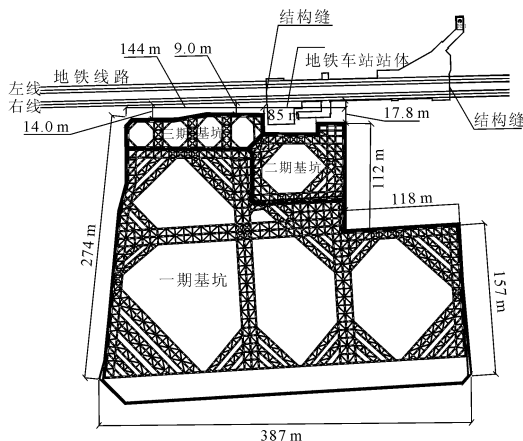


图 1 基坑与地铁结构平面位置关系图

数据,模拟隧道设计状态与当前状态下的受力情况,对隧道结构、螺栓、钢筋受力状态进行分析。

表 1 隧道断面轮廓水平最大距离与实际值对比表

管片编号	水平最大距离设计值/cm		水平最大距离实测值/cm		收敛值/cm		直径变形率/‰	
	下行	上行	下行	上行	下行	上行	下行	上行
835	550	550	552.264	551.825	2.264	1.825	4.12	3.32
845	550	550	552.097	551.954	2.097	1.954	3.81	3.55
855	550	550	552.273	551.769	2.273	1.769	4.13	3.22
865	550	550	552.079	551.958	2.079	1.958	3.78	3.56
875	550	550	552.112	551.432	2.112	1.432	3.84	2.60
885	550	550	552.296	550.848	2.296	0.848	4.17	1.51
895	550	550	550.078	550.898	0.078	0.898	0.14	1.63
905	550	550	551.674	550.566	1.674	0.566	3.04	1.03
915	550	550	551.637	550.355	1.637	0.355	2.98	0.65
925	550	550	549.852	550.084	-0.148	0.084	-0.27	0.15

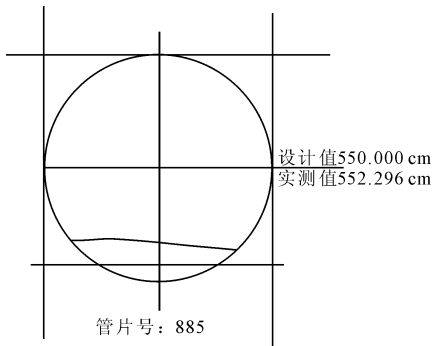


图 3 下行线隧道断面轮廓最大水平距离与设计值对比图

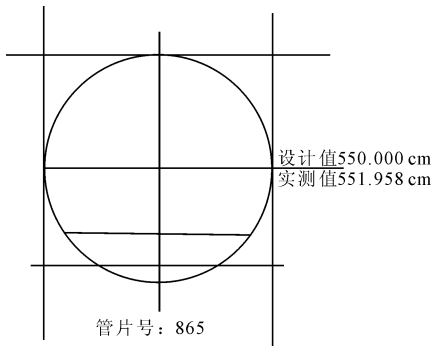


图 4 上行线隧道断面轮廓最大水平距离与设计值对比图

3.1 计算模型

(1) 模型建立。采用荷载-结构法建立三维有限元模型见图 5。隧道管片考虑 5 环,环宽 1.2 m,约束模型前后两端纵向位移。隧道结构采用六面体实体单元模拟,螺栓与钢筋采用梁单元模拟。管片之间采用摩擦接触,通过螺栓连接,并采用地层弹簧模拟地层抗力。

隧道管片采用 ABAQUS 提供的混凝土损伤模型,隧道管片、螺栓及钢筋参数见表 2。管片间螺栓

为 M30、5.8 级高强螺栓,钢筋型号为 HRB335,考虑塑性阶段,施加在隧道结构的荷载见图 6。

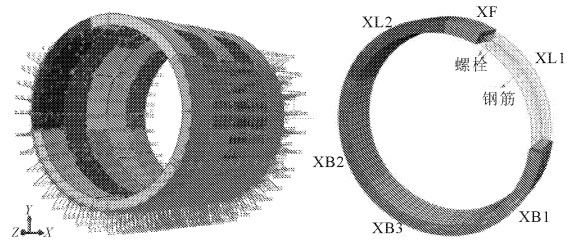


图 5 隧道模型

表 2 材料参数表

材料	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	屈服应力 /MPa
管片	2500	35.5	0.17	2.6
螺栓	1579	210.0	0.30	400.0
钢筋	1579	210.0	0.30	335.0

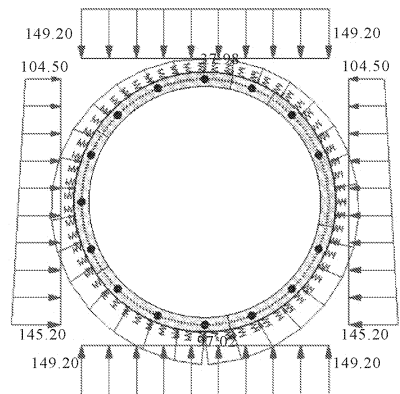


图 6 施加荷载

(2) 计算工况。① 工况 1:当前状态(水平外扩 2.296 cm)下隧道结构、钢筋、螺栓受力分析。根据

现场检测,相对于设计值,隧道外扩最大值出现在 885 号管片,超出设计值 2.296 cm。通过调节地层弹簧参数,进行参数反演,使得隧道水平外扩量为 2.296 cm,分析此时隧道结构受力、钢筋、螺栓受力情况。② 工况 2:根据现场检测情况,由于隧道左右侧壁水平位移不同,导致隧道有外扩现象,外扩量最大为 0.404 cm。因此在工况 1 的基础上,通过释放隧道两侧荷载以模拟隧道水平位移,计算外扩量为 0.404 cm 时隧道结构受力、钢筋、螺栓受力情况。

(3) 参数反演。图 7(a)是通过调整地层弹簧参数得到的工况 1 情况下的隧道水平方向位移,两侧位移分别是 +1.22 cm 和 -1.09 cm,水平向收敛为 2.31 cm。图 7(b)中两侧位移分别是 +1.54 cm 和 -1.21 cm,水平向收敛 2.75 cm。

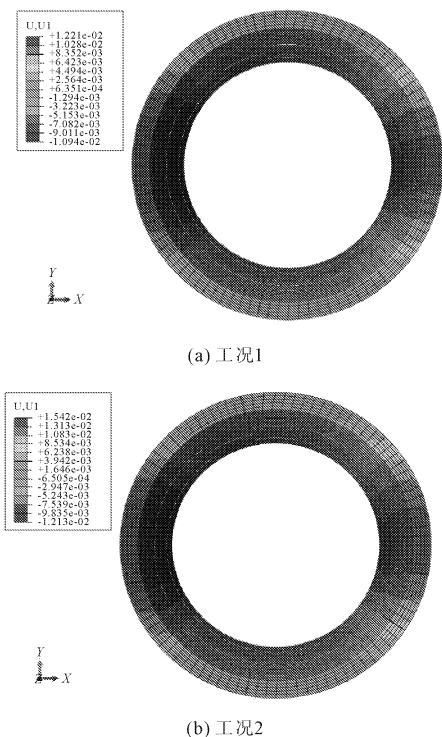


图 7 水平位移计算值

表 3 给出了数值模拟分析与现场检测对比,可见数值模拟与现场实测吻合较好。通过反演得到的地层弹簧参数为法向弹簧刚度 1.2×10^5 N/m,切向弹簧刚度 1.5×10^5 N/m。

3.2 结果分析

(1) 隧道结构受力分析。图 8 为隧道拱顶内侧最大主应力分布。由图 8 可见,由于隧道发生竖向收敛变形,拱顶内侧混凝土受拉应力,工况 1 拱顶内侧最大拉应力为 2.43 MPa,小于 C50 混凝土抗拉强度极限值 3.1 MPa,混凝土不会发生受拉破坏;工况

2 拱顶内侧最大拉应力 2.98 MPa,同样小于混凝土抗拉强度极限值,混凝土不会发生受拉破坏。

表 3 数值模拟分析与现场检测对比表

数据类型	相对设计状态 水平外扩/cm	相对工况 1 外扩/cm
数值模拟分析	2.310	0.440
现场检测	2.296	0.404
模拟与现场检测 对比偏差/%	0.6	8.2

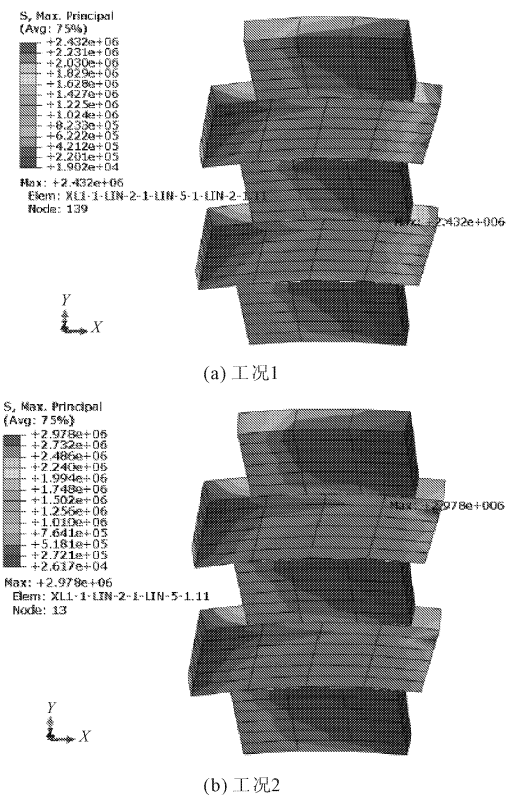
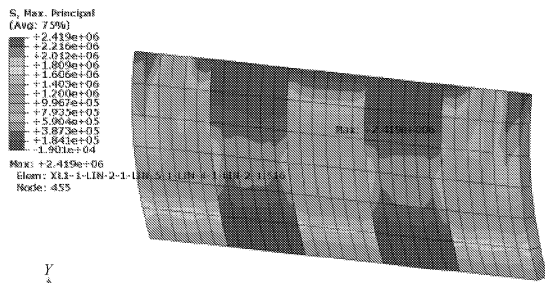


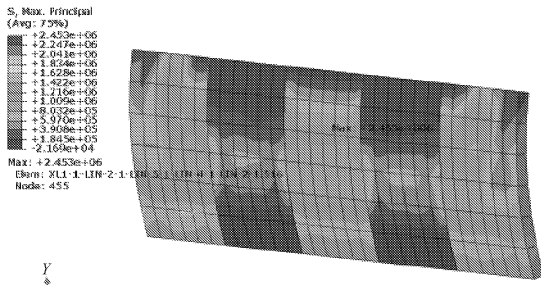
图 8 拱顶内侧最大主应力

图 9 为隧道拱腰外侧最大主应力分布。由图 9 可见,工况 1 拱腰外侧混凝土最大拉应力为 2.42 MPa,工况 2 拱腰外侧混凝土最大拉应力为 2.45 MPa,两种工况下混凝土最大拉应力均小于极限抗拉强度,混凝土不会受拉破坏。

(2) 螺栓受力分析。图 10 和图 11 分别为环向螺栓和纵向螺栓轴向应力分布图。管片间环向螺栓为 M30、5.8 级高强螺栓,屈服应力 400 MPa。由图 10 可见,工况 1 环向螺栓最大拉应力为 216.8 MPa,工况 2 环向螺栓最大拉应力为 238.4 MPa,均小于螺栓的屈服强度,未发生屈服。由于工况 1 水平方向外扩量为监测区域内外扩量最大的情况,说明监测区域内环向螺栓均未进入屈服状态。



(a) 工况 1

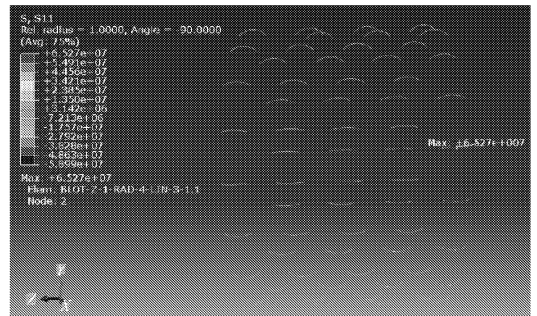


(b) 工况 2

图 9 拱腰外侧最大主应力



(a) 工况 1

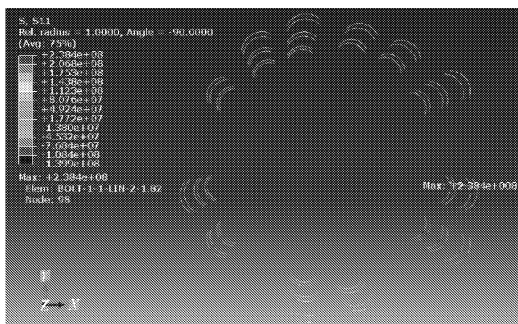


(b) 工况 2

图 11 纵向螺栓应力分布



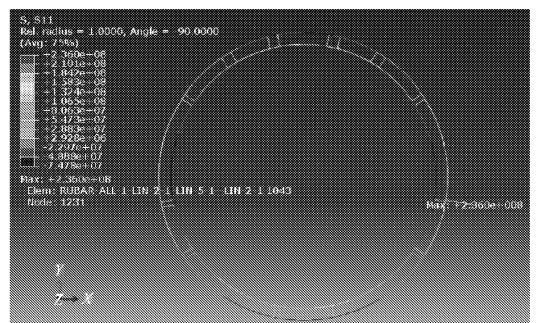
(a) 工况 1



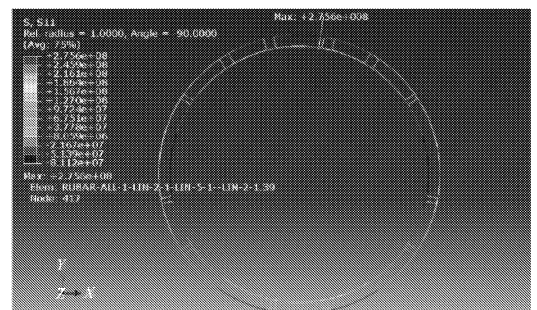
(b) 工况 2

图 10 环向螺栓应力分布

(3) 钢筋受力分析。图 12 为管片内钢筋最大主应力分布。管片内钢筋型号为 HRB335, 屈服应力为 335 MPa, 由 12 可见, 工况 1 钢筋最大拉应力为 236.0 MPa, 工况 2 钢筋最大拉应力为 275.6 MPa, 两种工况钢筋受力均小于屈服应力, 两种工况下钢筋均未发生屈服。



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图 12 钢筋应力分布

管片间纵向螺栓为 M30、5.8 级高强螺栓, 屈服应力 400 MPa。由图 11 可见, 工况 1 纵向螺栓最大拉应力为 68.3 MPa, 工况 2 环向螺栓最大拉应力为 65.3 MPa, 均小于螺栓的屈服强度。由于工况 1 水平方向外扩量为监测区域内外扩量最大的情况, 说明监测区域内纵向螺栓均未进入屈服状态。

结合以上分析,隧道目前状态为:混凝土拉应力小于极限抗拉强度不会受拉破坏,环向螺栓和纵向螺栓均未发生屈服,钢筋也未发生屈服。

4 结论

本文以天津某邻近基坑工程的既有地铁线路为例,采用 ABAQUS 有限元分析方法,对隧道结构、螺栓及钢筋受力状态进行数值模拟分析,研究隧道结构的受力变化情况,从而对地铁结构的安全状况进行评估,得出以下结论:

(1) 需根据现场检测数据,同时考虑隧道左右侧壁水平位移的不同,按照不同的隧道断面轮廓相对设计值外扩量分为不同工况对区间隧道结构受力性状进行分析研究。

(2) 隧道拱顶内侧、拱腰外侧混凝土拉应力、环向及纵向螺栓轴向应力、钢筋受力因隧道断面轮廓水平最大距离相对设计值外扩量的不同而不同,两种工况下混凝土拉应力均小于极限抗拉强度,混凝土不会受拉破坏,螺栓未进入屈服状态,钢筋也未发生屈服。

(3) 邻近基坑的施工导致既有地铁结构发生位移,并且随着施工的进行,地铁结构由于位移的变化可能会出现渗漏水、错台等病害,一定重视现场实测数据,及时对地铁结构安全状况进行评估,对基坑施工及时作出调整,对地铁病害进行相应处理,以确保邻近地铁线路的正常运营。

参考文献:

- [1] 宋艺. 地铁一侧项目施工对已建地铁结构的安全影响研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(S1): 59-66.
- [2] 丁毅, 邢艳如. 超长、超大基坑开挖对邻近地铁结构安全影响的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 170-175.
- [3] 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(S2): 613-621.

- [4] 张剑涛, 姚爱军, 郭海峰, 等. 邻近基坑卸荷一加载对既有软土盾构隧道影响分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(11): 1348-1355.
- [5] 蔡武林. 深基坑开挖对临近地铁车站及区间影响的数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(6): 222-226.
- [6] 戚长军, 刘争宏, 余武术, 等. 基坑开挖对既有盾构隧道与地层的影响分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 142-146.
- [7] 陈甦, 孙斌彬, 顾凤祥, 等. 基坑工程施工对邻近地铁结构影响研究现状与展望[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2018, 39(1): 108-114.
- [8] 陈仁朋, 王诚杰, 鲁立, 等. 开挖对地铁盾构隧道影响及控制措施[J]. 工程力学, 2017, 34(12): 1-13.
- [9] 龙宏德, 刘俊景, 王定军, 等. 地铁隧道上方长距离并行基坑开挖的施工影响及变形控制[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(1): 106-112.
- [10] 毕景佩. 堆土导致的地铁盾构隧道病害及处治对策分析[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 180-183.
- [11] 刘鹏. 天津地铁1号线区间隧道结构病害治理[J]. 中国建筑防水, 2015(12): 18-20, 25.
- [12] 鞠凤萍, 孙宪春, 万力. 北京某地铁隧道错台变形治理研究[J]. 施工技术, 2016, 45(S2): 122-126.
- [13] 王立峰, 庞晋, 徐云福, 等. 基坑开挖对近邻运营地铁隧道影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2004-2010.
- [14] 孙超, 许成杰. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的数值分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2017, 34(5): 33-36.
- [15] 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.
- [16] 徐长节, 王伊丽, 徐芫蕾, 等. 新建工程基坑开挖及结构施工对既建下卧隧道的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3201-3209.