

# 复杂地质条件下盾构切削建筑物桩基群影响分析

吴东亮<sup>1,2</sup>

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

2. 陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 710043, 西安//工程师)

**摘要** 结合广州地铁盾构隧道切削桩基下穿办公楼的工程实例,采用三维模型对复杂地质条件下盾构切桩前、切桩过程、下穿完成全过程办公楼沉降及变形响应进行有限元分析,并对比盾构下穿全过程现场实测数据。结果表明:盾构切桩下穿办公楼过程沉降及变形在规范允许范围内,不会影响建筑物的正常使用;在盾构下穿过程后,建筑物会持续沉降约 20 天,沉降值较小。建议管片设计计算桩端荷载时考虑桩侧摩阻力受盾构影响的损失,以保证管片结构及建筑物的安全。

**关键词** 盾构隧道;复杂地质;切桩;下穿高层建筑;钢管片

**中图分类号** U231+.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.05.025

## Analysis of Influence of Shield Tunnel Cutting Building Pile Foundation Groups under Complicated Geological Conditions

WU Dongliang

**Abstract** With the engineering example of the cutting pile foundation of the Guangzhou Metro shield tunnel passing through office building, three-dimensional models are adopted to conduct finite element analysis on the settlement and deformation responses of the office building during the whole process of the shield cutting pile (before, during and after pile cutting) under complex geological conditions, and the results are then compared with the field test data. Research results indicate that, the settlement and deformation of the shield cutting piles under the office building are within the allowable range, which will not affect the normal use of the buildings. After the shield tunneling is completed, the settlement of the building will last for about 20 days, with small settlement value. It is suggested that the loss of pile side friction affected by shield should be taken into account when calculating the pile end load in the segment design, in order to ensure the safety of both segment structures and buildings.

**Key words** shield tunnel; complex geology; cutting pile; passing through high-rise building; steel segment

**Author's address** China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., 710043, Xi'an, China

近年来,城市地下空间资源逐渐减小,隧道建设位置受到的制约因素越来越多,多数隧道必须从桩基群中通过,甚至必须切除既有桩基<sup>[1]</sup>。根据国内外类似工程处理措施,对于侵入隧道的桩基多采用线路调整平面、纵向主动避让桩基、拆除建筑物、地面主动托换、暗挖洞内托换等方案<sup>[2]</sup>。这些处理措施存在如下问题:建筑物拆迁难度大,费用高;线路站位无法改移,且部分车站为既有车站;地面主动托换受控地面空间及借地影响,成本高,难度较大。因此,在特定条件下为保证工程快速推进,可采用盾构直接切桩或暗挖洞内托换通过的方案,这对于加快工程建设,节约工程投资等具有重要意义<sup>[3-5]</sup>。

本文依托广州市轨道交通 13 号线二期工程白马岗站—天河公园站区间下穿办公楼工程,结合盾构法施工特点,探讨盾构法切桩对办公楼受力及变形影响,以期指导后续类似工程。

## 1 工程概况

广州市轨道交通 13 号线白马岗站—天河公园站区间自天河公园站西端头引出后,以曲线半径  $R=500\text{ m}$  (右线  $R=600\text{ m}$ ) 的右转弯,先以 2‰ 坡度再以 25‰ 坡度下坡向西敷设,区间左线 42.9 m、右线 16.2 m 下穿某办公楼地下室,下穿范围平面布置如图 1 所示。

该办公楼建设于 1998 年,框架结构,柱跨为 5.55~9.00 m,地上结构 3~11 层,层高 3.4 m。主体结构范围地下室为 2 层,隧道下穿区域为 1 层地下室,地下室结构高度 4.75 m。办公楼基础形式采

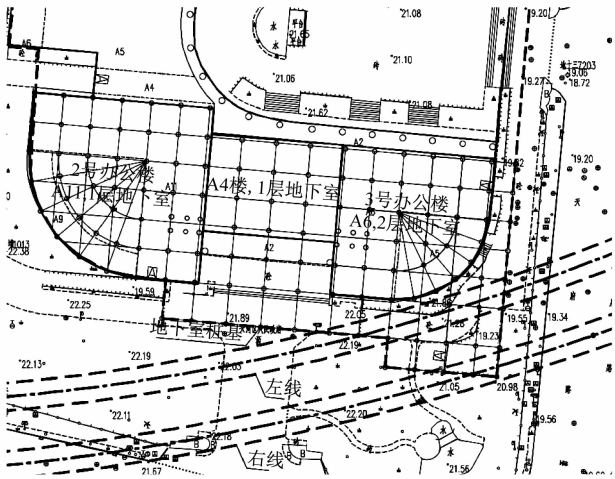


图1 地铁区间线路下穿办公楼平面布置图

用人工挖孔灌注桩基础,桩径1 000 mm,桩长约16.8~25.0 m,为摩擦端承桩,桩身混凝土强度等级为C25。隧道侧穿3号办公楼下方桩基,水平距离约1.39 m,位置关系如图2所示。

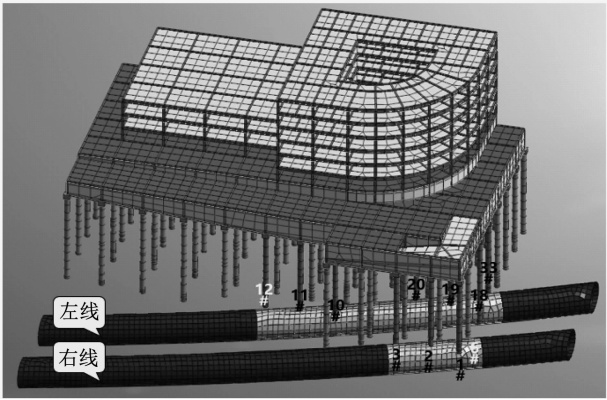
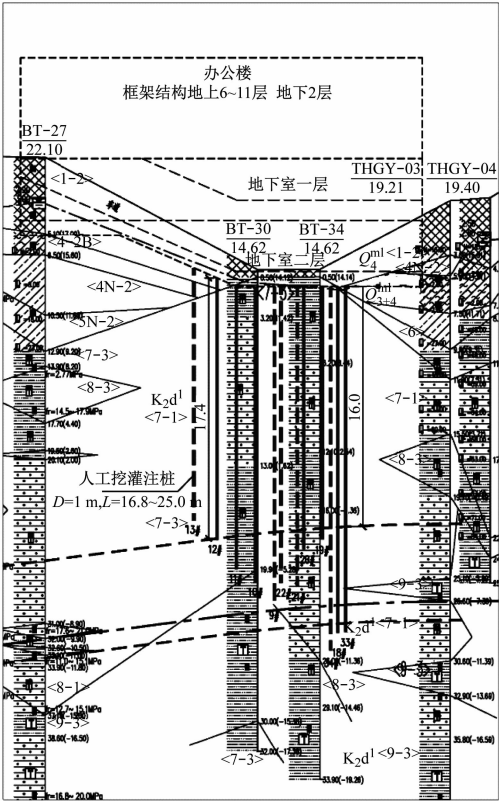
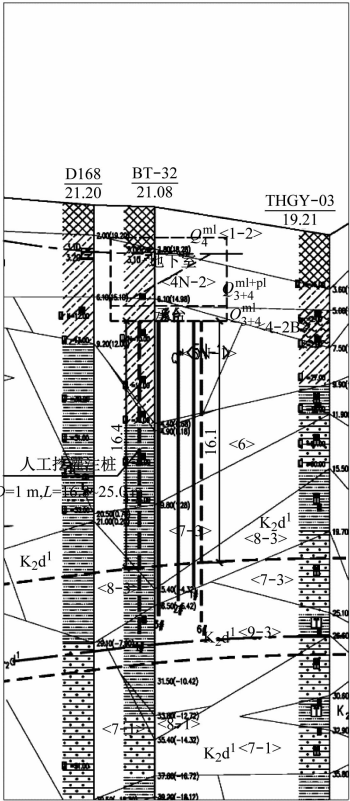


图2 地铁区间线路下穿办公楼区域3D关系图

下穿办公楼区域的地铁隧道埋深约为23~24 m,下穿范围地质纵断面如图3所示。主要穿越白垩系强风化砾岩<7-1>、强风化泥质粉砂岩<7-3>、微风化砾岩<9-1>以及微风化泥质粉砂岩<9-3>。地下水主要为覆存在第四系松散层孔隙水及基岩裂隙水,稳定水位埋深为0.20~6.80 m。



a) 左线地质纵断面图



b) 右线地质纵断面图

图3 地铁区间线路下穿办公楼区域地质纵断面图

区间线路平面及纵断面设计受车站站位影响无法调整,办公楼部分桩基侵入隧道,具体情况如

表1所示。本文以隧道正上方桩基(含侵入桩基)及上部结构及地表沉降为研究对象进行受力及变

形分析。

表 1 侵入隧道桩基统计表

| 线路 | 桩号 | 桩长/m  | 侵入隧道长度/m |
|----|----|-------|----------|
| 右线 | 1  | 17.6  | 1.15     |
|    | 2  | 18.79 | 2.55     |
|    | 3  | 19.6  | 2.93     |
| 左线 | 10 | 19.7  | 2.91     |
|    | 11 | 18.79 | 2.31     |
|    | 18 | 19.7  | 3.00     |
|    | 19 | 16.8  | 0.76     |
|    | 20 | 17.47 | 1.34     |

2 盾构下穿高层全过程的结构受力及变形规律分析

2.1 模型建立

采用 MIDAS-GTX/NX 软件建立三维计算模型仿真,模型采用位移边界,底部为固定约束,限制水平向和竖向位移,模型周边限制水平向位移。根据盾构施工对隧道周围土体桩基影响大小不同,对模型中各地层网格划分为疏密程度不同的结构单元。三维计算模型如图 2 所示。

土假定为弹塑性材料,选择修正的摩尔库伦准

则作为土层的本构。建筑物地下室及上部结构、管片结构均假定为弹性材料。结合详勘地质资料及收集到建筑物基础资料并结合相关规范,在三维模拟计算中,所需的物理力学参数如表 2 所示。三维计算过程中模型选取如下:① 建筑物梁、柱、承台、桩基采用 1D 线单元;② 结构板、车道板、地下室侧墙、车道壁、盾构管片采用 2D 单元,地层结构采用 3D 实体单元;③ 模拟盾构法掘进过程,在隧道开挖阶段及支护阶段分别定义应力释放系数,根据工程经验应力释放系数取 0.3;④ 盾构推力结合现场情况,取 500 t;⑤ 模拟过程不考虑地下水渗透影响。

2.2 施工过程模拟

本工程右线下穿办公楼距离较短,左线距离较长,为降低盾构施工期间对办公楼的影响,施工过程坚持信息化施工原则,拟定右线先行通过,左线再施工。计算过程步骤如下:

- 步骤 1:右线盾构推进至办公楼前 2 m;
- 步骤 2:右线盾构推进通过办公楼区域;
- 步骤 3:右线盾构推进离开办公楼影响区;
- 步骤 4:左线盾构推进至办公楼前 2 m;
- 步骤 5:左线盾构推进通过办公楼区域;
- 步骤 6:左线盾构推进离开办公楼影响区。

表 2 各土层力学参数表

| 岩土分层   | 岩土名称   | 天然密度/<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 黏聚力/<br>kPa | 内摩擦角/<br>(°) | 变形模量/<br>MPa | 渗透系数/<br>(m/d) | 泊松比  |
|--------|--------|-------------------------------|-------------|--------------|--------------|----------------|------|
| 〈1〉    | 填土     | 1.95                          | 13          | 15           |              | 0.50           | 0.42 |
| 〈4N-1〉 | 软塑粉质黏土 | 1.80                          | 12          | 13           | 8            | 0.01           | 0.20 |
| 〈4-2B〉 | 淤泥质土   | 1.59                          | 6           | 7            | 2            | 0.01           | 0.42 |
| 〈5N-2〉 | 硬塑残积土  | 2.03                          | 34          | 23           | 40           | 0.01           | 0.26 |
| 〈6〉    | 全风化碎屑岩 | 2.05                          | 36          | 26           | 70           | 0.01           | 0.25 |
| 〈7-1〉  | 强风化砾岩  | 2.10                          | 45          | 30           | 100          | 1.00           | 0.25 |
| 〈8-3〉  | 中风化粉砂岩 | 2.56                          | 200         | 32           | 200          | 0.80           | 0.20 |
| 〈9-3〉  | 微风化粉砂岩 | 2.60                          | 300         | 35           | 300          | 0.05           | 0.15 |

2.3 盾构下穿及切桩过程建筑物沉降及变形响应

结合办公楼桩基与隧道平面关系(见图 4),采用三维仿真模型对盾构下穿前、切桩过程、通过后三阶段进行模拟,并提取主要影响范围桩基沉降及变形值进行分析。

2.3.1 盾构下穿及切桩过程地表、桩基沉降与变形分析

按拟定施工步骤分别对左右线下穿前、切桩过

程、下穿后的地下室桩基沉降、地表沉降进行分析。经分析在下穿前桩基及地表沉降及变形近乎为零,沉降及变形主要发生在切桩过程和下穿后,计算结果如表 3 所示。

分析计算结果,得出如下结论:

- 1) 右线先行开挖后,先后对 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>桩基进行截桩,右线上方地面沉降较大,最大沉降发生于 1<sup>#</sup>桩基位置,最大沉降量 9 mm,该位置桩基最大沉降

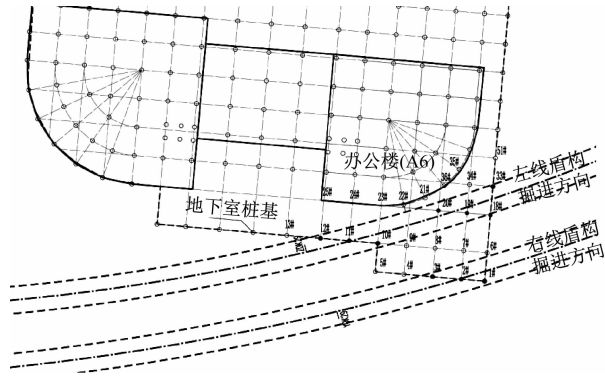


图4 办公楼桩基与隧道平面关系图

表3 盾构下穿全过程地下室桩基最大沉降表 mm

| 项目         | 各桩基最大沉降量 |      |     |      |     |     |     |
|------------|----------|------|-----|------|-----|-----|-----|
|            | 1#       | 3#   | 6#  | 10#  | 18# | 19# | 33# |
| 右线施工过程地表沉降 | 9.0      | 8.1  | 6.5 | 3.9  | 3.8 | 3.3 | 3.5 |
| 右线施工过程桩基沉降 | 10.1     | 9.3  | 7.8 | 0.8  | 3.7 | 3.5 | 3.5 |
| 左线施工过程地表沉降 | 10.3     | 10.2 | 8.9 | 10.7 | 7.9 | 7.6 | 7.5 |
| 左线施工过程桩基沉降 | 11.1     | 11.3 | 9.8 | 11.8 | 8.8 | 8.7 | 9.7 |

10.1 mm。右线先行对左线上方沉降影响较小,沉降值约 3.3~4.0 mm。

2) 左线开挖后,先后对 33#、18#、19#、10#、11# 桩基进行截桩,近距离正穿 12# 桩基,左线盾构施工最大沉降发生于 10# 桩基位置,最大沉降量 10.7 mm,该位置桩基最大沉降 11.8 mm。左线施工对右线上方沉降产生的影响较小,左线盾构施工期间右线地表沉降值约 1.3~2.1 mm。

2.3.2 盾构下穿过程建筑物沉降及位移分析

采用三维仿真模型对盾构下穿全过程进行了分析,提取了下穿办公楼全过程的办公楼沉降、变形、倾斜值的最大值,结果如图 5~图 7 所示。

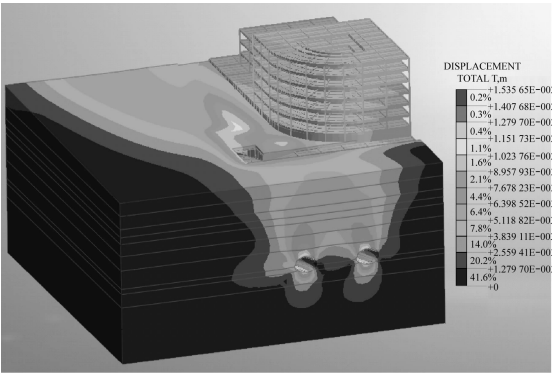


图5 下穿后地面建筑与地下室沉降云图

分析可知:相邻桩基最大沉降差为 5.8 mm,柱间距为 9 m;框架结构相邻柱基础沉降差率为 5.8

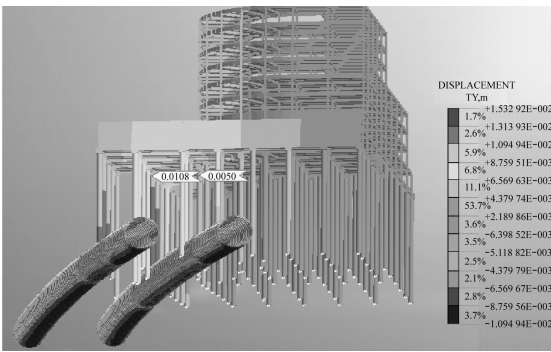


图6 桩基竖向沉降云图

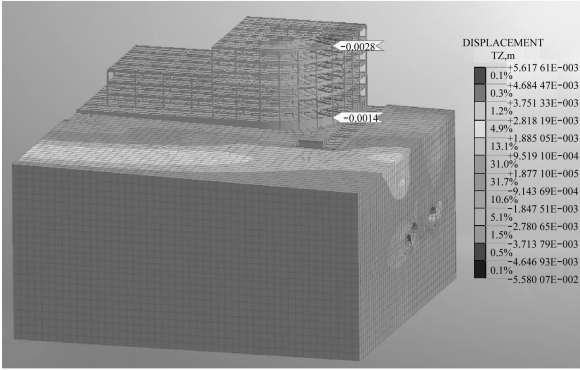


图7 建筑物倾斜变形云图

mm/9 000 mm=0.000 64<0.002,满足规范要求。

办公楼倾斜最大位置处,最上层监测点水平变形约 2.8 mm,±0.000 处水平变形约 1.4 mm,变形差 1.4 mm,建筑物倾斜值为 1.4 mm/23 800 mm(办公楼高度)=0.000 6<0.004,满足规范要求。因此,盾构下穿办公楼全过程办公楼结构处于安全状态。

3 盾构下穿办公楼过程变形规律实测分析

3.1 施工工筹安排

根据盾构下穿办公楼全过程的三维分析结果,盾构施工过程按右线试验段、右线掘进段、右线掘进完成、左线试验段、左线掘进段、左线掘进完成共 6 个阶段进行。

3.2 盾构施工过程办公楼变形规律实测分析

盾构施工过程中,结合现场实施条件,对盾构施工全过程隧道影响范围内的办公楼结构柱进行沉降及变形监测,结构柱沉降变形趋势如图 8 和图 9 所示。

分析现场实测结果可以得出如下结论:

1) 右线盾构下穿后盾构正上方结构柱最大沉降 7.5 mm,相邻柱子沉降差小于 5 mm,左线盾构下穿过程地下室柱子最大沉降 7.67 mm,相邻柱子沉降差小于 5 mm,与数值计算结果基本相符。框

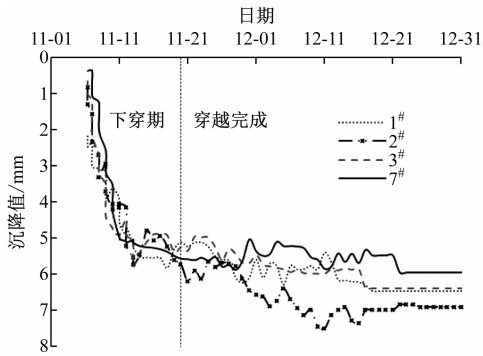


图8 右线施工期间结构柱沉降变形趋势

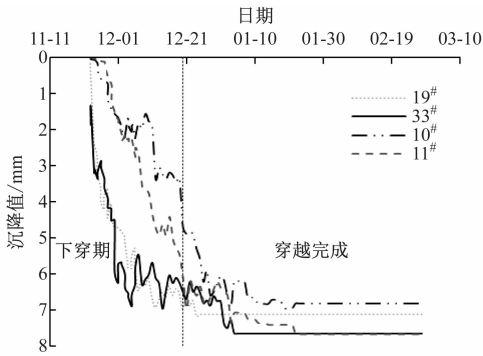


图9 左线施工期间结构柱沉降变形趋势

架结构相邻柱基础沉降差 $<0.002L$ ( $L$ 为相邻柱的中心间距),建筑物在盾构下穿过程安全可控<sup>[6]</sup>。

- 2) 建筑物在下穿及切桩过程沉降速率较大。
- 3) 由于同步及二次注浆浆液凝结需一定时间,建筑物在盾构通过后仍呈现缓慢下沉趋势。

4 管片结构受力分析

隧道管片作为永久受力构件,在承受水土压力的同时需承担上部桩基传递给管片的附加荷载。管片结构设计时需合理选择上部荷载,以保证施工及运营阶段建筑物及隧道的安全。

4.1 荷载取值

管片荷载计算时水土压力、地面恒载及活载按规范取值,本文重点对盾构切桩范围桩端荷载、残余荷载取值进行分析。

为保证上部结构及管片安全,计算过程桩端荷载=上部结构荷载-桩侧摩阻力。桩侧摩阻力计算时应考虑盾构管片对侧阻力影响,本文分析时考虑1倍盾构直径范围桩侧摩阻力损失。

4.2 受力分析

以10#桩基为例,隧道与桩基关系如图10所示。

计算结果表明,桩端剩余集中力为1 011.5 kN(如表4所示),该部分力考虑由管片承担。混凝土管片的受力计算如表5所示。

表4 桩端集中力计算分析表

| 桩号  | 桩端荷载/<br>kN | 桩基剩余<br>摩阻力/kN | 桩端集中力/<br>kN | 安全系数 |
|-----|-------------|----------------|--------------|------|
| 10# | 2 513.9     | 1 502.4        | 1 011.5      | 0.6  |

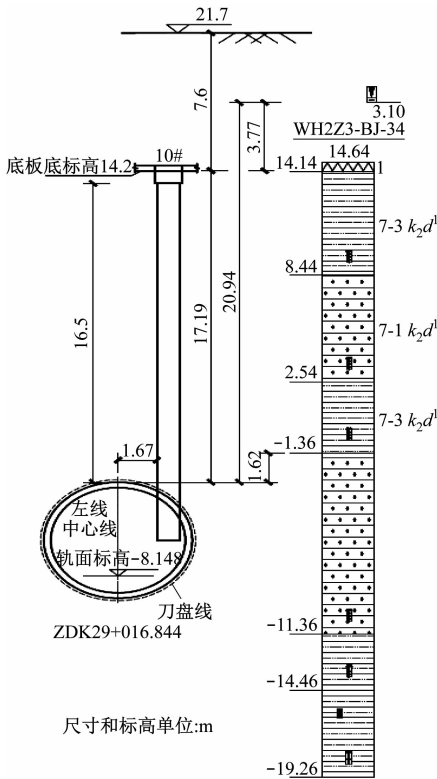


图10 隧道与10#桩基关系图

表5 内力计算统计表

| 组合形式 | 弯矩/(kN·m) | 剪力/kN | 轴力/kN |
|------|-----------|-------|-------|
| 基本组合 | 289       | 191   | 3 660 |
| 标准组合 | 219       | 143   | 2 798 |

通过验算,采用混凝土管片时结构受力无法满足要求<sup>[7]</sup>,故将10#桩基范围管片调整为钢管片。

5 结语

本文采用三维仿真模型对盾构下穿高层建筑全过程进行数值模拟,计算得出盾构下穿全过程的沉降及变形数据,并与现场实测数据进行对比,得出以下结论:

- 1) 本工程盾构切桩下穿高层建筑建筑物变形及差异沉降小于规范允许值,建筑物可正常使用。

2) 在盾构下穿完成后,受同步及二次注浆凝结时间影响,建筑物仍持续沉降一段时间,但沉降值占总沉降量比例较低。

3) 对于敏感建筑物建议改良同步注浆及二次注浆材料,以缩短凝结时间,保证浆液快速达到设计强度。

4) 切桩范围盾构管片荷载计算时应合理考虑桩端残余荷载,建议结合地质条件至少考虑桩端 1 倍管片直径范围的摩阻力损失。

5) 盾构直接切桩下穿建筑物施工方案,在地质条件较好,且管片结构、盾构机外壳受力满足要求时为安全可靠的施工方案。

参考文献

[1] 杨记芳.大直径盾构隧道施工时高层建筑基桩基影响数值分



(上接第 120 页)

在满足施工需要时,隔离桩的设置应尽量靠近施工隧道。

5) 隔离桩设置深度宜取隧道底部以下 1~3 m,效果最优。隔离桩长度再增大,作用效果不明显。隔离桩设置在隧道底以下 1 m 与设置在盾构中心处相比,引起的桥墩承台变形减少,效果明显。

参考文献

[1] 温法庆,贾璐,李亚军.土压平衡盾构施工风险管控与案例分析[M].武汉:武汉大学出版社,2017.  
[2] 周文涛,张鹏,吴薪柳.北京地铁 14 号线侧穿京津城际铁路桥桩地基预加固技术分析[J].城市轨道交通研究,2019(4):86.  
[3] 柳厚祥,任志勇,陈思宇.隧道不同位置下穿施工引起临近建筑物的变形分析[J].土木工程学报,2014(8):128.  
[4] 靳宝成.兰新二线西宁隧道长距离浅埋下穿城区方案研究

析[J].太原理工大学学报,2017(5):772.

[2] 刘涛,杨克形,姜磊,等.极限近距侧穿桩基盾构隧道开挖过程扰动效应[J].隧道与地下工程灾害防治,2020(1):61.  
[3] 庞星,杨双锁,杨欢欢,等.河漫滩地区盾构隧道对临近桩基础建筑物的影响研究[J].公路,2020(11):259.  
[4] 郭亮.盾构下穿高层结构相互影响及方案优化研究[J].现代城市轨道交通,2020(6):62.  
[5] 张亚洲,温竹茵,由广明,等.上软下硬复合地层盾构隧道设计施工难点及对策研究[J].隧道建设(中英文),2019(4):152.  
[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基基础设计规范:GB 50007—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.  
[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范(2015 年版):GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.

(收稿日期:2020-12-09)

[J].铁道建筑,2018(1):103.

[5] 李荡,高睿.盾构隧道侧穿高层建筑物时隔离桩的作用研究[J].铁道建筑,2017(12):55.  
[6] 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(4):599.  
[7] 刘金山.隧道开挖方法对邻近既有桥梁影响的数值分析[J].铁道建筑,2016(3):73.  
[8] 沈建文,刘力.盾构隧道施工对临近桥桩影响数值及现场监测研究[J].岩土力学,2015(增刊2):709.  
[9] 孙雪兵.盾构隧道下穿施工对临近铁路桥梁的影响分析[J].铁道建筑,2018(4):42.  
[10] 李方明,陈国兴.地铁隧道盾构施工对桩箱建筑物影响研究[J].铁道标准设计,2018(2):128.  
[11] 曾晓鑫,丁文湘,彭玲,等.隔离桩桩径对基坑开挖引起既有地铁隧道位移的影响[J].铁道建筑,2017(6):95.  
[12] 王国富,赵凯迪,路林海,等.隔离桩对盾构侧穿建筑物时基础变形的影响分析[J].城市轨道交通研究,2017(3):25.

(收稿日期:2019-07-23)



埃及发生严重火车出轨事故,32 人遇难

综合多家外媒报道,当地时间星期日(4 月 18 日),埃及盖卢比尤省发生了一起严重的火车出轨事故。俄罗斯卫星网援引埃及当地媒体的消息称,这起事故目前已有 32 人遇难,超过 100 人受伤。路透社报道称,埃及卫生部在一份声明中说,周日,开罗北部的盖卢比尤省的一列火车的部分车厢出轨,目前已造成 97 人受伤。埃及卫生部表示,事故发生后 50 多辆救护车迅速赶到现场,并将伤者转移到该省的 3 家医院。

卫星网表示,就在数周前,埃及索哈格省曾发生一起火车相撞事故,事故造成 19 人死亡、近 200 人受伤。而在本周早些时候,埃及沙尔基亚省发生了另一起火车脱轨事故,事故造成 10 余人受伤。

(摘自 2021 年 4 月 19 日《环球时报》网)