

文章编号:1671-8879(2017)06-0083-09

# 盾构隧道临近河流始发及过电塔掘进技术

胡长明,张延杰,袁一力,梅 源,张文萃

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

**摘 要:**为研究多因素状态下,不同类型的风险源相邻时在盾构开挖施工中的相互影响,解决相邻风险源工况下的盾构始发风险问题,以成都地铁 3 号线盾构隧道工程为背景,总结已穿越地段的沉降数据,分析不同类型的施工风险并确定风险响应措施。采用三维数值方法模拟地铁盾构穿越高压电塔掘进施工工况,通过改变前方开挖土体的性质来模拟渣土改良的过程和地面加固措施,通过改变材料属性来模拟注浆材料强度随时间的变化过程,分析渣土改良、洞内注浆和地面注浆措施对盾构隧道穿越建筑物的影响,并进行数值计算假设的可行性和参数取值的合理性验证。研究结果表明:在盾构始发前需进行地面降水、河流防水铺砌与河堤加固等措施,在盾构始发后至下穿河流掘进前需进行洞门密封、渣土改良和土仓置换等措施,在穿越河流后应及时进行电塔的洞内注浆、地面加固和掘进参数的优化调整等措施,一系列针对相邻风险源施工的辅助措施,证明了该盾构掘进技术成果的可行性;在下穿建筑物施工时应关注已开挖环处的地表沉降,并加强管片脱出盾尾时所在断面的地表沉降趋势的监控;在渣土改良和有效优化掘进参数的基础上,采用洞内施工措施和地面加固均可有效控制地层沉降,但洞内注浆等措施优于地面加固效果。提出的盾构临近河流始发及下穿电塔建筑物的施工措施和综合掘进技术,可为多风险源下临近的盾构施工提供理论依据和指导措施。

**关键词:**隧道工程;盾构施工;数值模拟;砂卵石地层;风险管理

**中图分类号:**U455.43

**文献标志码:**A

## Excavation technique of shield launching crossing adjacent river and under-passing voltage tower

HU Chang-ming, ZHANG Yan-jie, YUAN Yi-li, MEI Yuan, ZHANG Wen-cui

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to study the interaction between different kind of adjacent risk sources under multi-factors, and solve the risk problem of shield launching under the condition of adjacent risk sources, on the basis of the shield tunneling of Chengdu Metro Line 3, settlement data of the excavated section were summarized. Different types of construction risk were analyzed and the risk response measures were also determined. Moreover, a three-dimensional numerical simulation of the metro shield tunneling construction was conducted, in which the soil improvement and ground reinforcement were simulated by changing the property of soil in front of the TBM, and the variation of the strength of grouting material

收稿日期:2017-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51408463);陕西省教育厅专项科研项目(15JK1413);

西安建筑科技大学科技项目(QN1409,RC1375)

作者简介:胡长明(1963-),男,河南信阳人,教授,博士研究生导师,E-mail:hu\_tm@163.com。

along with time was simulated by changing the material properties. Influence of soil improvement, grouting in tunnel, and ground grouting on shield tunneling crossing constructions was analyzed. Calculation result verified the feasibility of the numerical calculation hypothesis and the rationality of the selected parameters. A series of auxiliary measures for the construction of adjacent risk sources proved the feasibility of the shield tunneling technological achievements. The specific measures included surface precipitation, waterproof paving of river and embankment reinforcement before shield launching, hole sealing, soil improvement and soil replacement of warehouse before crossing the river and after shield launching, the underground grouting of electric tower, ground reinforcement and optimization of tunneling parameters after crossing the river. The results show that attention should be paid to ground settlement of the excavated rings in the construction of shield tunneling under buildings and the monitoring of the trend of ground settlement in the section where the segments are coming off the shield tail should be enhanced. Based on the soil improvement and effective excavation parameters, underground construction measures and ground reinforcement both can effectively control the ground settlement, while the underground grouting and other measures have better effect than the ground reinforcement. It can provide the theoretical basis and guidance for the construction of shield near the multi-hazard sources like crossing adjacent river and under-passing voltage tower by construction measures and comprehensive excavation technology of the research. 3 tabs, 8 figs, 25 refs.

**Key words:** tunnel engineering; shield construction; numerical simulation; sand gravel stratum; risk management

## 0 引言

在城市隧道施工过程中,始发往往是盾构施工成败的关键环节之一,根据施工现场的困难点,选择合理的始发方案尤为重要<sup>[1-4]</sup>。城市的地铁隧道通常穿越已有的建(构)筑物,已受到众多研究者关注<sup>[5]</sup>。田世文等针对北京地铁 10 号线盾构下穿既有建筑物,详细介绍了其沉降产生的原因,以及采取的技术措施<sup>[6]</sup>;张登雨等考虑全方位高压旋喷注浆(MJS)桩加固及建筑物存在对地表长期沉降的影响,采用数值计算和现场实测相结合的方法,对盾构穿越邻近古建筑的地表长期沉降进行预测和分析<sup>[7-9]</sup>;Xu 等将桩支撑技术应用于地基基础改造,保障了盾构隧道穿越路桥的施工安全<sup>[10]</sup>;Bai 等研究了在外滩隧道施工期间保护附近建筑物的几种技术(包括截流墙和注浆加固)的有效性<sup>[11]</sup>;Chen 等指出合理的隧道开挖步骤比土体改良更有效<sup>[12]</sup>;陈周斌以杭州某盾构隧道穿越建筑群为背景,通过理论分析和数值模拟,得出穿越段土仓压力、推进速度和同步注浆率的控制范围<sup>[13]</sup>。合理的施工参数配以相关辅助措施,能够保证穿越工程的安全<sup>[14-16]</sup>。吴全立等研究了盾构在 2 个相邻风险源下的施工技术,但仅提供了施工技术措施的参考<sup>[17]</sup>。综上,已有隧道施工穿越风险源分析研究多集中在单一类型

或 2 个以内风险源的下穿工况,且与盾构始发相关的研究也多停留在施工措施方面。

对于盾构隧道临近河流始发并随即下穿沙河及电塔建筑物的工程实例,由于存在多种不同类型的风险源,相邻风险源现场距离近并在盾构开挖施工中相互影响,已有研究中的单一类型风险源分析是否适用,且其对相邻工况下的风险源施工需进行怎样的辅助措施。为此,本文针对以上问题展开探讨,通过总结已穿越地段的沉降数据,分析不同类型的施工风险并确定风险响应措施,利用 ABAQUS 模拟不同保护措施下的土层反应,结合实际施工数据,对不同保护措施的有效性机制进行解释,研究盾构隧道临近河流始发及过高压电塔的有效掘进技术。

## 1 工程概况

成都地铁 3 号线(驷马桥北站—马鞍北路站)属于砂卵石地层土压平衡盾构掘进。本文以驷马桥北站—驷马桥站区间、驷马桥站—李家沱站区间 2 个盾构区间(简称驷—驷区间、驷—李区间)隧道工程为背景。线路左、右线起讫里程分别为 Z34+611.6~Z32+227、Y34+611.6~Y31+984.8,为双孔圆形隧道,线间距 11~16 m,区间隧道顶面最大埋深 17.5 m,最小埋深 8.3 m,最大曲线半径 3 000 m,最小曲线半径 400 m,最小坡度 0.2%,最大坡度 2.6%。

1.1 沙河及高压电塔概况

盾构隧道在驷一李区间始发后的左线 10~29 环、右线 17~35 环下穿沙河,如图 1 所示。盾构穿越沙河宽度约为 27 m,深度为 5~7 m,隧道拱顶距河底约 8.96 m。左线端头距河堤上下沿的距离分别为 6 和 15.9 m;右线端头距河堤上下沿的距离分别为 14.3 和 23.9 m。

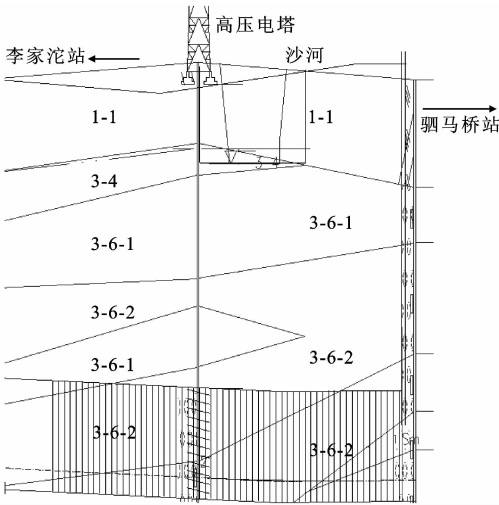


图 1 盾构下穿沙河及高压电塔地质纵断面  
Fig. 1 Longitudinal geological profile of sand river and high voltage tower tunneled by shield

盾构隧道在里程 Z33+682.783~Z33+676.934

处有 1 座高压电塔(拐角杆),电塔在左线隧道上方,穿越长度约为 5.85 m,均处于缓和曲线上,纵断面处于最大曲线半径为 3 000 m 的竖曲线及 0.2% 的纵坡上。电塔基础为 4 个独立基础,埋深 5 m,其中心尺寸 5.3 m×5.3 m,基础钢材重 1.152 t,混凝土重 107.04 t,塔身高度 21 m,重 6 t。

1.2 盾构穿越沙河及高压电塔地质情况

驷一李区间盾构穿越沙河及高压电塔主要地层及其特征如表 1 所示。该隧道区段所穿越地层主要为稍密卵石和中密卵石,其间夹杂少量的密实卵石土层。勘察期间为平水期,地下水位埋深为 4.9~10.3 m。

2 施工风险分析

2.1 盾构临近河流始发

盾构始发主要存在反力架失稳风险、端头地表沉陷风险、盾构姿态偏差风险、洞口渗漏水以及涌水涌砂风险;盾构下穿沙河存在的河底垮塌风险使得河水进入掌子面,产生涌水事故的风险。

2.2 盾构下穿高压电塔

盾构掘进过程中对电塔基础持力层造成扰动,电塔底部产生不均匀沉降可能引起电塔倾斜,导致输电线路中断,影响相关单位及市民的生产生活,且可能造成人身安全伤害。

表 1 穿越地层特性

Tab. 1 Characteristics of strata being crossed

地层编号	土层类型	与区间关系	地质特性
1-1	杂填土	分布于地表下方	杂色,松散,稍湿。
3-4	细砂	分布于杂填土下方	饱和,松散为主,一般砂质较纯,局部夹少量卵石、圆石
3-6-1	松散卵石	位于细砂下方	以亚圆形为主,充填中砂、砾石和少量粘性土,整体表现为松散。
3-6-2	稍密卵石	位于盾构隧道上方	以亚圆形为主,分选性差,充填物主要为细砂及圆砾,整体表现为稍密。
3-6-3	中密卵石	盾构穿越主要地层	以亚圆形为主,分选性差,充填物主要为细砂及圆砾,整体表现为中密。
3-6-4	密实卵石	大部分位于隧道下方,小部分处于盾构穿越区域	以亚圆形为主,分选性差,充填物主要为细砂及圆砾。整体表现为密实。
5-2	强风化泥岩	位于密实卵石下方	泥质结构,裂隙较发育,岩芯多呈碎块状、短柱状,岩质软,为极软岩,岩芯碎块手可折断。

盾构始发、下穿沙河以及下穿高压电塔均存在重大风险,并且由于工况的接连出现,加大了施工风险和施工难度。

3 施工风险对策

3.1 已穿越地段沉降分析

选取驷一驷区间的已施工地段进行分析。自盾构始发起,各地面沉降均控制在允许范围内,其区间始发最大最终沉降值和穿越建筑物最大最终沉降值如下页图 2 所示。

3.1.1 始发段地面沉降分析

驷马桥北站始发段隧道顶部埋深 8~8.5 m,主要下穿稍密砂卵石与中密砂卵石地层,与驷马桥始发段下穿地层较为相似。从图 2 可以看出,盾构始发段前 25 m 范围内(测点 1~10)地表最终沉降值较大。沉降值较大的原因:掘进至该测点位置时土仓内粗颗粒堆积较多,土仓内环境差,进行一次清仓后,造成此处最终沉降量较大;该段盾构机处于刚进洞阶段,无法及时通过同步注浆及二次注浆对开挖后产生的空隙进行填补;此问题可通过后期注浆加固等措施解决,该处沉降在盾尾通过该测点 1 周后

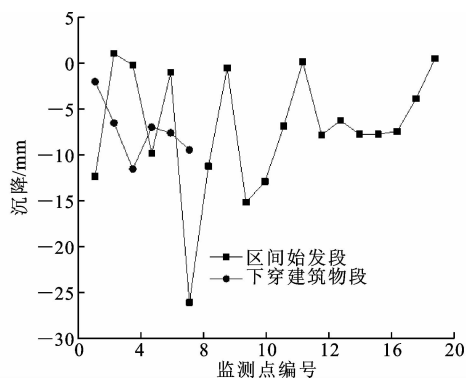


图2 驷—驷区间最终沉降值

Fig. 2 Final settlement of Simaqaobei to Simaqiao interval

趋于稳定,该范围内其他测点监测数据整体变化稳定。后期施工过程中在控制出碴量的基础上,重点控制渣土改良和同步注浆,施工效果较好。

### 3.1.2 过建筑物段地面沉降分析

在穿越区间建筑物的过程中,盾构土仓压力、出土量、推进速度、同步注浆量等施工参数基本一致,区别在于衬砌背后跟踪二次注浆的时机、注浆量及注浆压力。由于驷马康城为已穿越区间段中下穿房屋最高的建筑,也为独立基础,其下穿施工风险措施具有很好的代表性,并且右线盾构属于正穿建筑物,隧道埋深约 15.76 m,对下穿高压电塔施工具有较好的参考价值,现以盾构下穿驷马康城为例进行分析。

盾构在穿越过程中采取了跟踪二次注浆措施。首先在推进过程中利用注浆系统进行正常同步注浆,然后对脱离盾尾后的第 1 环管片进行跟踪二次注浆。跟踪注浆每隔 3 环进行 1 次,跟踪注浆材料与同步注浆一样,注浆压力控制在 0.40 MPa 左右。通过上述措施,驷马康城的沉降变化基本可控,单日沉降速率均未超过 3 mm。但盾构通过后的后续沉降稳定时间较长,最终最大沉降为 11.58 mm,为规定允许值的 38.6%,该处沉降控制情况比较理想。

## 3.2 风险响应

### 3.2.1 盾构始发控制措施

盾构临近河流始发应具备的条件主要有:盾构端头加固、联系测量、始发托架定位与安装、洞门密封装置安装、反力架定位与安装、盾构机连接调试、起吊设备与地面设施就位、地面监测点埋深与取值确定、试掘进措施与应急预案以及下穿河流控制措施。下文对部分关键措施作进一步的介绍与补充。

(1)端头加固:为防止始发端头的地层加固长度或范围不够,对始发段进行加长的管棚注浆加固,使用 21 根 15 m 长的  $\Phi 108$  管棚沿环向 360 mm 中心

间距进行布置,并设置 800 mm $\times$ 2 000 mm 的管棚导向墙;从管棚施工阶段就开始留意河水是否与地层贯通,并通过降水井观察洞门的渗流情况,以便确定是否还需要采取其他措施。

(2)端头降水:在驷马桥站始发段靠近沙河位置布设 3 口降水井,始发前至少将水位降至隧道底以下 1 m。

(3)沙河防水铺砌:防水铺砌采用防水板,宽度为 6 m,长度为 40 m(河床宽度 32 m,两侧各 4 m 的防护高度),铺设总面积 6 900 m<sup>2</sup>。河底采用软处理,材料采用 1.5 mm 的 HDPE 土工膜。防水板已在车站施工过程中铺设完毕,铺设形式如图 3 所示。

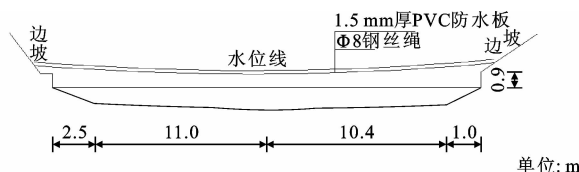


图3 防水板铺设立面

Fig. 3 Elevation of waterproof plate laying

(4)盾构始发掘进控制:当刀盘在洞口圈即将进入开挖面时,由于刀盘缺乏支撑,在自重作用下极易发生“磕头”,故应保证轨面标高、坡度与盾构基座一致,盾构机稍作“抬头”始发;始发后,推进速度不宜过快,并在推进时按工况条件调整泡沫剂注入比例,以改良掌子面的土体,施工过程中根据地层变形量等信息反馈,对土压力设定值、推进速度等施工参数及时调整。

(5)洞门封固:为使盾构保压掘进始发,采用洞门延伸环及双密封装置进行保压,橡胶帘布加折页压板安装在洞门延伸环外侧作为第 1 道密封,在延伸环内侧至洞门钢环板位置安装 3 mm 厚弹簧钢板作为第 2 道密封;延伸环与双密封装置安装完成后,使用 20 cm $\times$ 20 cm 海绵条贴在 2 道密封之间,同时密封结构间采用盾尾油脂填充密实,以减小洞门涌水涌沙,降低盾构始发风险;始发前在刀头和密封装置上涂抹黄油,避免刀盘上刀头损坏洞口密封装置;待盾尾完全已进入沿伸环后,立即封堵洞圈。

(6)沙河加固:在沙河河堤外轮廓线 5 m 范围打 1 排注浆管进行预注浆,注浆管间距为 2 m,注浆孔与地面夹角为 45°。注浆孔的布置应避免地下管线和构筑物,并应根据试注浆效果进行调整。

(7)渣土改良和土仓置换:盾构始发掘进时由于多出渣等现象引起地层损失,因此盾构刀盘通过磨

桩区后,利用管棚加固区的作用将土仓内的混凝土块和玻璃纤维筋清理,然后注入膨润土泥浆置换土仓,为下一步掘进和防止刀盘结泥饼打下基础,并确保始发后的渣土改良效果。

(8)河道监测:除在河道两侧的盾构掘进线路中心布置监测点外,还应观察盾构掘进过程中对应位置河面是否出现浑浊、漩涡和泡沫等杂物,若出现上述现象则说明掘进面与河底存在透水通道,必须立即采取停机、止水等措施。

3.2.2 下穿高压电塔控制措施

(1)地面预加固

地面预注浆孔(编号 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>)沿线路 30~40 环方向分别布设于距电塔 4 个基础外侧 2.5 m 处及左线 35 环线路中心处,加固角度 70°,加固深度 6 m,斜向孔深 6.2 m,注浆孔可以达到电塔基础下 0.6 m 处,注浆孔布置如图 4 所示。锚杆加固沿 1<sup>#</sup>和 3<sup>#</sup>注浆孔对角线布设于 3<sup>#</sup>注浆孔外侧 4.28 m 处,打设 3 根锚杆进行基础加固,锚杆间距 1 m,加固角度 50°,加固深度 7.49 m,锚杆长度 9.77 m,锚杆可以达到电塔基础下 4.29 m 处。

(2)设置揽风绳

左线盾构正穿高压电塔,下穿过程中电塔基础

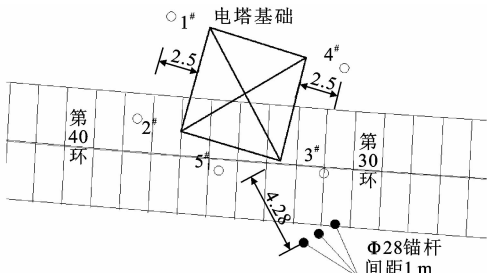


图 4 电塔处地面加固平面图

Fig. 4 Ground reinforcement plan near voltage tower

土体受到扰动,将造成高压电塔的不均匀沉降,为避免电塔因不均匀沉降发生倾斜,在电塔的中心呈圆周均匀设置 3 道揽风绳。使用 GJ-120 镀锌钢绞线作为揽风绳材料,揽风绳地面固定为埋设揽风绳盘,其埋深不小于 2.5m,绑扎固定后用 UT 形可调式线夹与揽风绳连接。

3.2.3 掘进参数设定与优化

(1)掘进参数设定

通过上述对驷一驷区间的掘进情况分析,得出盾构在不同掘进工况下的掘进参数建议值,如表 2 所示。下穿沙河及高压电塔段掘进过程的参数调整与优化见下页图 5。

表 2 盾构始发段掘进参数

Tab. 2 Tunneling parameters of shield launching section

掘进工况	扭矩/(kN·m)	推力/t	掘进速度/(mm·min <sup>-1</sup> )	刀盘转速/(r·min <sup>-1</sup> )	土仓压力/MPa	同步注浆量/m <sup>3</sup>
始发段	3 500~4 000	800~1 300	25~35	1.1~1.4	0.11~0.12	≥6
临近建筑物段	4 500~5 000	1 300~1 500	45~55	1.1~1.4	0.11~0.12	≥6

(2)渣土改良

盾构施工时掘进控制是关键,渣土改良是核心。因本标段穿越地层含泥量稍多,有些地段达到 10%,故主要采用泡沫改良,其原液质量比为 3%,穿越风险源施工段需用泡沫膨胀 10~14 倍,不同于空地的 18~25 倍的膨胀率。通过加大原液比例,降低空气流量,提高土仓的实土压比例,可有效改善风险段的开挖环境。

(3)出土量控制

出土量控制是盾构掘进的根本,是保证控制地层损失率的最直接、最有效手段。掘进过程中采用体积、重量双控的措施严格控制出土量。

(4)两步注浆模式

采用两步注浆模式确保建筑物沉降趋势平缓、沉降速率可控、后续沉降快速稳定。步骤如下:在推进过程中正常进行盾尾同步注浆;在沙河及电塔范围内,出现出土量超过控制值 5%、地表沉降过大等

异常情况时,对异常区域进行洞内二次注浆,其余地段采用常规注浆施工方式。

4 风险控制效果评价

4.1 掘进后评价

驷一李区间 1~50 环沿线各监测点的最终沉降值如下页图 6 所示,其中最大最终沉降值左线发生在 Z33+720 监测点,沉降量为 11.41 mm;右线发生在 Y33+720 监测点,沉降量为 9.06 mm,电塔基础沉降量基本无变化,均满足要求。

根据对驷一李区间始发及下穿高压电塔的情况分析可见,在盾构施工前建立切实有效的加固方案,在盾构施工过程中建立匹配的掘进参数及渣土改良措施,并通过跟踪二次注浆和地面注浆的及时执行,沉降速率及最终沉降量均可以控制在较理想的范围内。

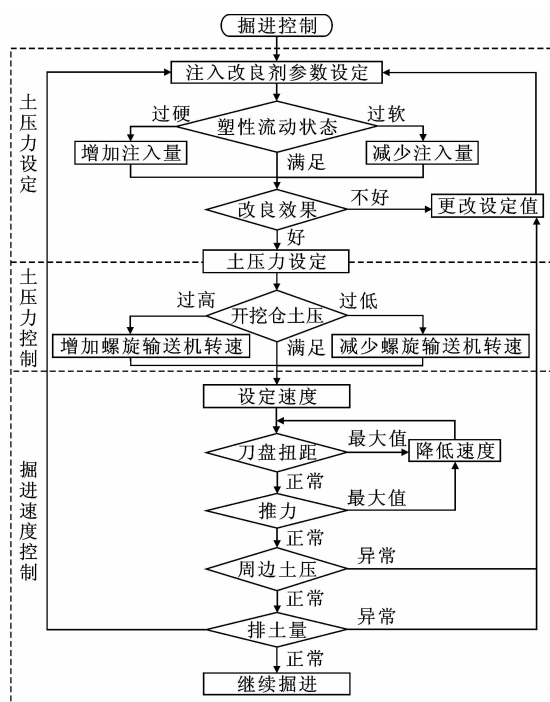


图5 掘进参数优化流程

Fig. 5 Optimization flow of tunneling parameters

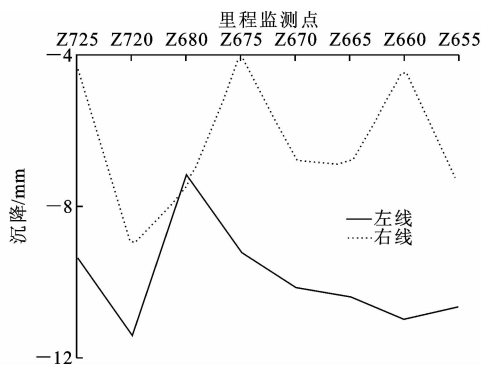


图6 监测点最终沉降

Fig. 6 Final settlement of monitoring points

## 4.2 数值分析

使用离散元软件模拟三维隧道开挖,建立三维模型计算量极大。本文使用 ABAQUS 有限元软件,建立其三维模型进行数值模拟<sup>[18-19]</sup>,可有效解决地铁开挖的非线性问题,模拟地下工程中复杂的施工过程。

### 4.2.1 模型假设与施工工况

土压平衡盾构施工过程的模拟步骤可大致概括为:开挖前方土体、管片拼装和盾尾注浆等。开挖土体和管片拼装依次循环交替进行,从而使整个隧道贯通<sup>[20]</sup>。本文通过改变盾构机前方开挖土体的性质(模拟过程中,对开挖前方土体通过注入泡沫、膨润土等改良剂使得开挖土体强度降低)来模拟渣土

改良过程,即每次开挖前均要改变即将开挖土体的参数,将开挖土体的摩擦角降低 $5^\circ$ ;通过改变材料的属性来模拟注浆材料强度随时间的变化过程,即注浆材料从最初液体状态到最终凝固状态,共持续推进4环长度的时间,即推进第1环时,浆液未凝固,弹性模量约为凝固混凝土的1%,随后越来越大,直到第4环时浆液凝固,将材料弹性模量改为该材质的最终值0.9 GPa。

(1)初始地应力平衡后<sup>[21-22]</sup>,开挖前方土体。由于盾构机的开挖是一步步阶段性向前掘进的,并且盾构开挖后的4环内,围岩一直由盾壳来支撑,管片还未脱出盾尾或管片还未安装。因此,对此阶段进行如下简化模拟<sup>[23-24]</sup>:对前方土体开挖,开挖长度为5个衬砌单元长度,即为7.5 m长的土体,使整个盾体都进入土体;激活盾壳约束,同时在盾构前方开挖面施加一法向面压力,用来模拟土舱压力。

(2)管片的拼装:盾构机完全进入土体后继续向前推进,每次推进长度为1.5 m,同时激活盾壳约束;然后去除第1环的盾壳约束,同时激活起始端的管片材料单元。

(3)盾尾注浆:当盾构完全进入土体后,盾构每向前推进一步,都会同时拼装1环管片。假设同步注浆过程可以完全填充管片与围岩之间的间隙,即激活注浆部位并改变材料的属性。

### 4.2.2 模型建立与参数选取

以驷一李区间左线28~42环为背景建立计算模型,共模拟15环管片长度的隧道,盾构中线埋深17 m,地下水位-7 m。土层物理力学参数见下页表3。土体采用 Drucker-Prager 本构模型<sup>[25]</sup>,其中管片材料为钢筋混凝土(混凝土等级为C50),采用线弹性模型,弹性模量取3.45 GPa,电塔基础为钢筋混凝土(混凝土等级为C20),采用线弹性模型;地面加固措施简化为将电塔4个基础外侧3 m、深度6 m范围内土层的弹性模量调至8 MPa。边界条件为:上表面为自由面,4个侧面约束法向位移,底面为固定约束。计算采用的模型宽60 m、高59 m、纵深22.5 m,共建立57 000个单元,61 504个节点。

### 4.2.3 数值计算与实测结果对比

数值计算结果表明,桩基所在断面的隧道管片在开始承受地应力荷载之前,开挖环处沉降值小于距离开挖环后纵向6 m、横向6 m处的沉降值。从下页图7(a)、下页图8(a)的沉降计算结果可以看出:地表沉降在隧道开挖初始有微量的隆起,自开挖起始至第13步开挖工况的数据分析结果表明,桩4

表 3 土层物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanical parameters of soil strata

地层编号	地质名称	天然密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	黏聚力 $c_d/\text{kPa}$	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	变形模量 $E_0/\text{MPa}$	泊松比 $\lambda$	层厚/m
1-1	杂填土	1.80	9	12.5	4.0	0.35	5
3-4	细砂	1.75	2	21.0	5.5	0.26	2
3-6-1	松散卵石	2.00	2	29.0	17.7	0.26	6
3-6-2	稍密卵石	2.05	2	34.0	20.7	0.23	8
3-6-3	中密卵石	2.15	2	39.0	22.0	0.20	6
3-6-4	密实卵石	2.25	2	43.5	39.5	0.17	4
5-2	强风化泥岩	2.15	65	29.0	40.0	0.32	28

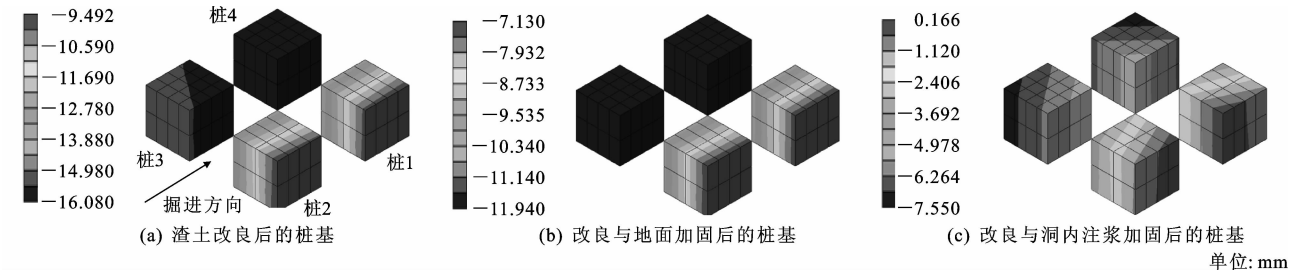


图 7 桩基的最终沉降计算结果

Fig. 7 Calculation results of final settlement of pile foundations

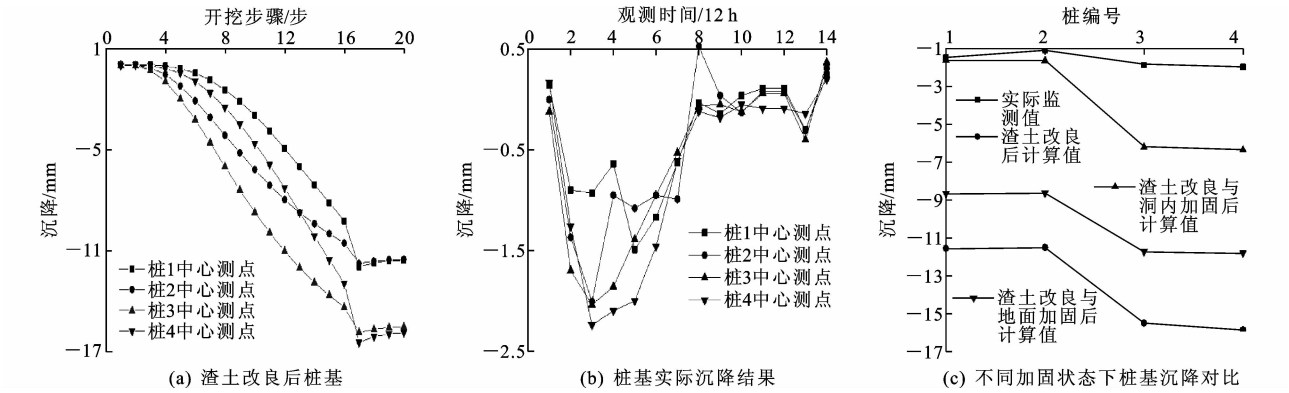


图 8 桩基沉降结果对比

Fig. 8 Comparisons of pile foundations settlement

的中心监测点沉降量一直低于桩 2 的中心监测点沉降量;从第 9 环管片脱出盾尾时,即桩 4 位置所在断面处的管片开始直接承受地应力荷载后,桩 4 的中心监测点沉降量开始大于桩 2 的中心监测点沉降量,最后达到各桩基的最大沉降。因此要重点关注已开挖环处的地表沉降,并加强管片脱出盾尾时所在断面地表沉降趋势的监控。

通过图 7 的数值计算结果与图 8(b)、图 8(c)的实测数据对比可知:在下穿建筑物隧道开挖施工中,只通过渣土改良措施得出建筑物基础稳定后的最小沉降为 $-11.53\text{ mm}$ ,发生在桩 2 中心监测点位置;最大沉降为 $-15.89\text{ mm}$ ,发生在桩 4 中心监测点位置;计算得出建筑物的最大倾斜量为 $0.073\%$ 。在渣土改良的基础上进行地面加固后,建筑物基础稳定

后的最小沉降为 $-8.66\text{ mm}$ ,最大沉降为 $-11.82\text{ mm}$ ,沉降量较改良前均减少了 $25\%$ 左右,计算得出建筑物的最大倾斜量也减少为 $0.053\%$ 。在渣土改良的基础上进行洞内加固后,建筑物基础稳定后的最小沉降为 $-2.64\text{ mm}$ ,最大沉降为 $-6.38\text{ mm}$ ,沉降量减少了 $59\%$ 以上。以上数据显示,建筑物沉降最终值未超过控制基准值 $20\text{ mm}$ ,建筑物倾斜也控制在基准值 $0.18\%$ 以内。采用洞内施工措施和地面加固均可以有效控制地层沉降,但在渣土改良、有效掘进参数的基础上,采用洞内注浆等施工措施比地面加固措施效果要好。

从建筑物的实际沉降数据可知:4 个桩基的监测数据均较小,且差距不大;而数值计算结果均显示距隧道中心轴线近处的地表沉降要大于距隧道中心

轴线远处的地表沉降,其原因在于数值分析时未考虑揽风绳加固措施对建筑物地表沉降的影响。建筑物设置揽风绳措施对建筑物的不均匀沉降具有很好的约束作用。

## 5 结 语

(1)通过总结施工经验和数值计算结果,针对性地提出盾构临近河流始发及下穿电塔建筑物的施工措施和相邻风险源工况下的辅助措施等综合掘进技术。采取地面降水、河流防水铺砌、河堤加固、渣土改良以及土仓置换等措施,保障盾构临近河流始发安全;采取洞内注浆、地面加固,再辅以渣土改良以及掘进参数优化等措施,应对盾构下穿高压电塔的风险。实际施工效果较好,研究成果可为类似工程提供参考依据。

(2)采用 ABAQUS 有限元软件模拟盾构施工,通过改变前方开挖土体的性质来模拟渣土改良过程和地面加固措施,通过改变材料属性来模拟注浆材料强度随时间的变化过程,分析渣土改良、洞内注浆和地面注浆措施对盾构隧道穿越建筑物的影响,数值计算结果验证了本文假设的可行性和参数取值的合理性。

(3)在下穿建筑物施工时应关注已开挖环处的地表沉降,并留意管片脱出盾尾所在断面的地表沉降趋势;采用洞内施工和地面加固措施均可以有效控制地层沉降,但在渣土改良、有效掘进参数的基础上,洞内注浆等措施的效果优于地面加固措施。

(4)今后进一步研究将重点模拟风险源处盾构施工的流固耦合问题,试图找到加固、掘进方案的优化措施;另外本文仅从宏观判定了对建(构)筑物设置揽风绳可有效控制其不均匀沉降,下一步可对使用揽风绳的工程加装监测设备,结合数值模拟方法,论证该结论的正确性。

## 参考文献:

## References:

[1] 王 杰,杨 平,王许诺,等.盾构始发水泥土加固后水平冻结温度实测研究[J].现代隧道技术,2011,48(6):99-104.  
WANG Jie,YANG Ping,WANG Xu-nuo,et al. Measurement and research of the horizontal freezing temperature after cement soil reinforcement in a shield launch shaft[J]. Modern Tunnelling Technology, 2011,48(6):99-104.

[2] 黄威然,米晋生,竺维彬.盾构工程钢筋混凝土箱体辅助始发技术[J].现代隧道技术,2012,49(3):

171-175.

HUANG Wei-ran,MI Jin-sheng,ZHU Wei-bin. Auxiliary launching technology with the reinforced concrete box in shield tunnelling[J]. Modern Tunnelling Technology,2012,49(3):171-175.

[3] 李 涛,刘 波,江玉生,等.盾构始发负环管片和反力架拆除时机的影响因素分析[J].中国铁道科学,2012,33(2):48-53.

LI Tao,LIU Bo,JIANG Yu-sheng,et al. Analysis on the influence factors of the demolition timing for negative ring segments and reaction frame during shield originating[J]. China Railway Science,2012,33(2):48-53.

[4] 鲍永亮,郑七振,唐建忠.上海软土地层盾构始发施工技术[J].铁道工程学报,2010(3):118-122.

BAO Yong-liang,ZHENG Qi-zhen,TANG Jian-zhong. Technology for originating construction of shield tunnel in soft soil stratum in Shanghai[J]. Journal of Railway Engineering Society,2010(3):118-122.

[5] LIU J F,QI T Y,WU Z R,et al. Analysis of ground movement due to metro station driven with enlarging shield tunnels under building and its parameter sensitivity analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2012,28:287-296.

[6] 田世文,杜新飞,张 柏.北京地铁10号线盾构下穿既有建筑物的控制措施[J].铁道标准设计,2008(12):148-151.

TIAN Shi-wen,DU Xin-fei,ZHANG Bai. Control measures of shield in Beijing Metro 10<sup>#</sup> Line under-going through existing buildings[J]. Railway Standard Design,2008,(12):148-151.

[7] 张登雨,张子新,吴昌将.盾构侧穿邻近古建筑地表长期沉降预测与分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(10):2143-2150.

ZHANG Deng-yu,ZHANG Zi-xin,WU Chang-jiang. Prediction and analysis of long-term surface settlement caused by shield tunneling side-crossing adjacent ancient buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(10):2143-2150.

[8] 孙宇坤,关富玲.盾构隧道掘进对砌体结构建筑物沉降的影响[J].中国铁道科学,2012,33(4):38-44.

SUN Yu-kun,GUAN Fu-ling. Shield tunnel construction induced influence on the settlement of masonry buildings[J]. China Railway Science,2012,33(4):38-44.

[9] 陆进文.软弱地层盾构斜穿既有建筑物沉降控制技术[J].现代隧道技术,2010,47(2):78-81.

LU Jin-wen. Settlement-control technology for a shield obliquely under-passing existing buildings in soft ground[J]. Modern Tunnelling Technology,



- 2010,47(2):78-81.
- [10] XU Q W,ZHU H H,MA X F,et al. A case history of shield tunnel crossing through group pile foundation of a road bridge with pile underpinning technologies in Shanghai[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2015,45:20-33.
- [11] BAI Y,YANG Z H,JIANG Z W. Key protection techniques adopted and analysis of influence on adjacent buildings due to the Bund Tunnel construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2014,41:24-34.
- [12] CHEN R P,MENG F Y,LI Z C,et al. Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large excavation and protective measures in soft soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,58:224-235.
- [13] 陈周斌. 土压平衡式盾构穿越建筑群施工控制技术[J]. 城市轨道交通研究,2010,13(11):69-73.
- CHEN Zhou-bin. Technology of earth pressure balance shield crossing under buildings[J]. Urban Mass Transit,2010,13(11):69-73.
- [14] 陈福全,李大勇,王 晖. 地铁盾构机掘进对周围环境影响的现场测试研究[J]. 铁道工程学报,2007(9):46-50.
- CHEN Fu-quan,LI Da-yong,WANG Hui. Research on impact of shield tunnelling on surrounding environment of tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society,2007(9):46-50.
- [15] 吴为义,孙宇坤,张士乔. 盾构隧道施工对邻近地下管线影响分析[J]. 中国铁道科学,2008,29(3):58-62.
- WU Wei-yi,SUN Yu-kun,ZHANG Shi-qiao. Analysis of the effects on the adjacent underground pipelines by shield tunnelling construction[J]. China Railway Science,2008,29(3):58-62.
- [16] 杨广武,关 龙,刘 军,等. 盾构法隧道下穿既有结构三维数值模拟分析[J]. 中国铁道科学,2009,30(6):54-60.
- YANG Guang-wu,GUAN Long,LIU Jun,et al. Three-dimensional numerical simulation analysis of the shield-driven tunnel crossing under the existing structure[J]. China Railway Science,2009,30(6):54-60.
- [17] 吴全立,王梦恕,朱 磊,等. 盾构近始发端头下穿既有地铁线路的综合施工技术研究[J]. 现代隧道技术,2016,53(4):134-142.
- WU Quan-li,WANG Meng-shu,ZHU Lei,et al. Construction technology for the shield tunnel passing under the existing metro line at the launching end[J]. Modern Tunneling Technology,2016,53(4):134-142.
- [18] 韩日美,宋战平,谢永利,等. 土压平衡盾构土仓压力对地表沉降的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(1):59-62,99.
- HAN Ri-mei,SONG Zhan-ping,XIE Yong-li,et al. Affection of soil warehouses pressure of EPB shield on ground settlement[J]. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2010,30(1):59-62,99.
- [19] 夏毅敏,薛 静,周喜温. 软岩切削过程的三维数值模拟[J]. 长安大学学报:自然科学版,2010,30(4):102-106.
- XIA Yi-min,XUE Jing,ZHOU Xi-wen. 3-D dimensional numerical simulation of soft rock cutting process[J]. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition,2010,30(4):102-106.
- [20] 张文萃. 土压平衡式盾构穿越含砂土层渣土改良试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2013.
- ZHANG Wen-cui. Study on ground conditioning in EPB shield tunneling through sandy stratum[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2013.
- [21] 张志强,何 川,余才高. 南京地铁盾构掘进施工的三维有限元仿真分析[J]. 铁道学报,2005,27(1):84-89.
- ZHANG Zhi-qiang,HE Chuan,SHE Cai-gao. Three dimensional finite element modeling of excavation and advancement processes of shield tunnel construction in Nanjing Metro[J]. Journal of the China Railway Society,2005,27(1):84-89.
- [22] 刘洪洲,孙 钧. 软土隧道盾构推进中地面沉降影响因素的数值法研究[J]. 现代隧道技术,2001,38(6):24-28.
- LIU Hong-zhou,SUN Jun. Study on numerical simulation of factors of ground settlement during shield driving in soft ground[J]. Modern Tunnelling Technology,2001,38(6):24-28.
- [23] 徐俊杰. 土压平衡盾构施工引起的地表沉降分析[D]. 成都:西南交通大学,2004.
- XU Jun-jie. Analysis of ground surface settlement due to the tunnel construction with EPB shield[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2004.
- [24] 刘红兵. 土压平衡盾构隧道施工引起的地表沉降三维数值模拟[D]. 长沙:中南大学,2007.
- LIU Hong-bing. Three dimensional numerical simulation for ground surface settlement due to the tunnel construction with EPB shield[D]. Changsha:Central South University,2007.
- [25] 赵旭伟. 砂卵石地层土压平衡盾构掘进引起的土体变形及控制方法[D]. 长春:吉林建筑工程学院,2010.
- ZHAO Xu-wei. Soil deformation caused by EPB shield tunnelling in sandy cobble stratum and control measures[D]. Changchun:Jilin Architecture and Civil Engineering Institute,2010.