

多跨地铁车站洞桩法施工及控制技术研究

张耀军

(中铁十七局集团有限公司,266555,太原//高级工程师)

摘要 以石家庄轨道交通3号线三教堂站多跨洞桩法施工为例,采用现场调研与数值模拟相结合的方法,研究了车站开挖过程中自身结构受力状态及对周围环境的影响规律,并提出适宜的控制技术。结果表明:采取措施后,地表沉降量在影响最大的两个阶段得到控制,同时管线累计沉降量减小,且车站主体结构受力状态得到较大改善,表明了控制技术的有效性。

关键词 地铁车站;洞桩法;施工;控制技术

中图分类号 U455.49

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.034

Pile-Beam-Arch Construction Method at Multi-span Subway Station and the Control Technology

ZHANG Yaojun

Abstract Relying on the multi-span pile-beam-arch (PBA) construction method at Sanjiaotang Station on Shijiazhuang rail transit Line 3, and combining field investigation and numerical simulation, the stress state of the station structure itself during excavation and the law of its impact on the surrounding environment are studied, appropriate control techniques are proposed. The research shows that after adopting the targeted measures, the surface settlement is controlled in the two most influential stages respectively, and the cumulative settlement of the pipeline is reduced, the stress state of the main station structure is greatly improved. All this verifies the effectiveness of the control technology.

Key words subway station; PBA method; construction; control technology

Author's address China Railway 17th Bureau Group Co., Ltd., 266555, Taiyuan, China

洞桩法作为目前地铁车站暗挖施工的主流工法,具有扰动小、安全性高、适应地层能力强等特点^[1-2]。但由于城市轨道交通网的不断扩大,其施工过程势必会引起周围土体的变形以及稳定性的改变,影响邻近建(构)筑物;同时,地铁施工多位于

城市主干道,开挖时会对周边管线造成扰动效应,严重影响周围城市居民生活。

文献[3]依托新疆地铁1号线王家梁站,对洞桩法施工进行数值模拟,分析了施工对既有快速公交车站基础的影响;文献[4]基于某地铁工程,采用有限元分析法,对复杂环境下暗挖隧道穿越富水砂层的地表沉降进行了研究;文献[5]以西安地铁4号线某车站基坑为工程背景,对迁移并改造后的管线沉降进行现场监测分析,得出了管线沉降随时间的变化规律;文献[6]总结了市政暗挖工程在不良地质条件下下穿既有大型污水管道施工时进行风险控制的技术措施;文献[7]采用试验与有限元模拟相结合的方法,来确定地铁工程穿越施工中热力管线的变形规律及其对管道自身强度的影响;文献[8]通过数值试验,对比分析了在不同等级围岩段及不同开挖方法下,隧道施工引起的位移场、应力场及塑性区的变化规律。上述已有研究都针对施工环节对周围环境的影响。本文以石家庄轨道交通3号线三教堂站为例,通过现场调研和数值模拟相结合的方式,分析多跨洞桩法施工过程中对自身结构和周围管线的影响,并对控制技术的效果展开研究,同时提出了针对性应急措施,以保障整个施工过程的安全。

1 工程概况

石家庄轨道交通3号线一期工程三教堂站,位于石家庄市塔北路与东二环南路交口处,沿东西方向布置,设2座风道和4个出入口。车站暗挖段为地下两层结构,里程为DK19+191.428—DK19+263.328,全长71.9 m。综合考虑工程特点,最后选定采用洞桩法施工,以尽量降低对地层的扰动。导洞超前支护采用 $\phi 42\text{ mm} \times 3.25\text{ mm}$ 小导管预注浆;管棚与小导管注浆浆液均采用水灰比为1:1的水泥浆;导洞初期支护采用250 mm厚C25早强网喷混凝土+钢筋格栅;边桩采用 $\phi 1\ 000\text{ mm} @ 1\ 500$

mm 围护桩,桩长为 18.63 m,并喷射 C25 早强混凝土。暗挖段拱顶覆土厚度均较浅,约为8.215 m,且地质条件较差。车站基本位于第四系地层(自上而下主要为:①素填土,②杂填土,③粉质黏土,④粉细砂,⑤粉土,⑥砂层,⑦粉土,⑧粉质黏土)。暗挖段拱顶上方地下管线众多。土体的大幅度移动将会引起管线的破损^[9],故施工风险等级较高。3 号线三教堂站周围管线布置如图 1。

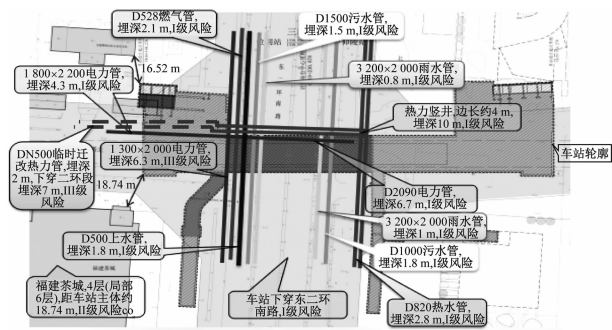


图 1 三教堂站周围管线布置图

2 洞桩法施工模拟

2.1 模型建立

利用有限差分软件 FLAC3D 进行分析,依据相关施工图纸及文件建立模型。因车站周边地层连续均匀、无断层,故模型宽取线路纵向单位长度 1 m;同时充分考虑圣维南原理,消除模型边界影响,模型尺寸定为 140 m×1 m×60 m(长×宽×高)。模型四周采用水平位移约束,底面完全约束,地表为自由边界。模型建立时,不同开挖步骤的划分对应于不同的组,且仅考虑自重应力场的作用,不考虑地下水对工程的影响^[10]。为分析多跨洞桩法施工中地层变形以及对周围管线的影响情况,在地表布置了一系列沉降监测点,同时在风险等级较高的管线处布置位移监测点(如图 2 所示,其中,G1 和 G2 为热力管线,G3 为煤气管线,G4 为雨水管线)。

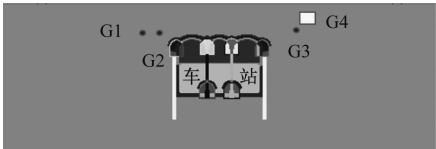


图 2 计算模型

2.2 既定施工过程模拟

参考《石家庄市城市轨道交通 3 号线三教堂站工程岩土工程勘察报告》,将计算模型划分为不同

土层。有关计算参数见表 1。

表 1 主要计算参数

名称	重度/ (kN/m ³)	弹性模量/ MPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
素填土	16.00	4.50	0.35	8.00	10.00
黄土状粉质黏土	18.60	10.80	0.25	18.00	28.00
粉细砂	19.50	15.00	0.30	8.00	28.00
粉土	19.00	12.00	0.24	17.20	28.00
中砂	21.00	95.00	0.28	8.00	25.00
粉质黏土	19.50	26.00	0.40	29.00	18.00
中细砂	19.00	35.00	0.20	8.00	30.00
初期支护	25.00	30 000.00	0.20		
二次衬砌	25.00	33 500.00	0.25		
边桩	25.00	20 000.00	0.20		
中柱	25.00	33 500.00	0.25		
中板	25.00	33 500.00	0.25		
冠梁	25.00	31 500.00	0.20		
注浆区	22.00	300.00	0.30	300.00	35.00

土体本构模型设置为 Mohr—Coulomb 弹塑性,支护结构采用理想线弹性模型。车站两侧边桩采用 pile 单元,其他结构均为实体单元。考虑等效原理,将导洞超前支护范围内的土体参数提高 50%^[11]。施工模拟前进行自重应力平衡和初始位移场清零,地层土体开挖与马头门破除采用 null 模型。施工过程包括:开挖上导洞,开挖下导洞,桩梁施作,顶部扣拱;最后进行内部土体开挖。主要施工顺序如图 3。

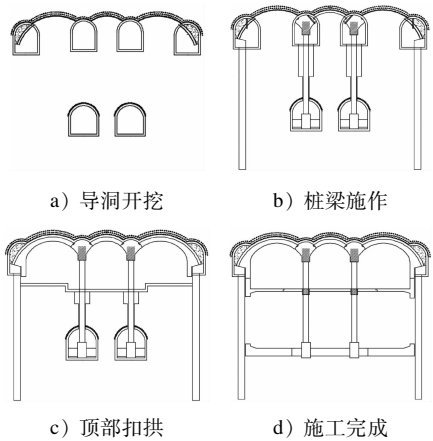


图 3 施工顺序

3 数值模拟结果分析

3.1 地表沉降规律

图 4 为不同施工阶段完成后的地表沉降曲线。由图 4 可以看出,沉降曲线以车站中线为中轴表现出对称性,形成较为标准的“沉降槽”。其中:施工对中线处的地表影响最大,横向影响范围大约在 20

~25 m 之间;上导洞开挖引起的地表沉降为 7.5 mm,占累计沉降量的 45.2%;顶部扣拱引起的地表沉降为 4.46 mm,占累计沉降量的 26.9%;桩梁施作阶段沉降变化量较小,仅为 0.55 mm,占累计沉降量的 3.3%。其中,上导沿开挖及顶部扣拱两个阶段地表受影响最为明显,需针对其采取必要的土体加固措施。

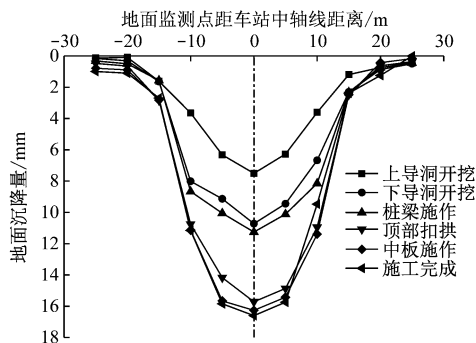


图4 地表沉降曲线

由于暗挖施工对车站中轴线处的地表影响最为明显,故提取该中轴线上某点在整个施工过程中的沉降曲线(如图5所示)予以分析。由图5可见,其沉降的总体趋势为:急速增长→缓慢发展→急速增长→稳定平缓4个部分。在上导洞开挖过程中,沉降曲线斜率较大,地层受扰动明显,同时各导洞间存在群洞效应,故此阶段沉降量快速增加。下导洞开挖时地表沉降速率得到缓解,因为上导洞土体的开挖已经卸掉部分荷载,故此阶段沉降增量降低。桩梁施作过程中,沉降曲线总体趋势进一步变缓,因为此阶段桩梁可以作为支撑结构控制土体的应力释放,改善应力重分布状态。顶部扣拱阶段,地表沉降急剧减少,沉降速率达到最大,因为此时土体开挖量不断增长,扣拱施作过程对周围土体受扰动的范围不断扩大。在车站结构内部土体开挖完成后,地表沉降出现减少趋势,因为此阶段车站围护结构主体基本完成,故能降低土体开挖所带来

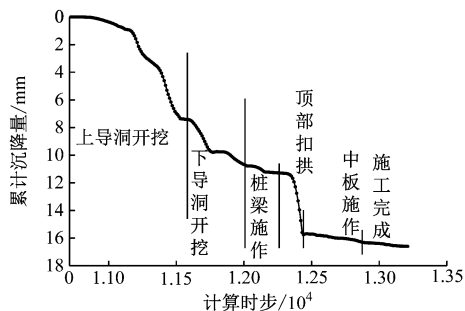


图5 车站中轴线上地表某点沉降曲线

的影响,且土体具有一定的回弹特性。但地表最终累计沉降值还是达到了 16.6 mm,故还需进一步控制地表沉降。

3.2 施工对管线沉降影响

在地铁车站建设中,车站主体开挖会打破原有初始应力场,致使应力重新分布,导致土体发生竖向变形。而该变形会直接影响既有管线,使其发生变形,若变形过大则会造成管线破坏。为探明施工步序对管线的影响,以便确定更加有针对性的措施,需对不同管线位置沉降规律展开分析。图6为各管线位置在整个施工过程中的沉降曲线。

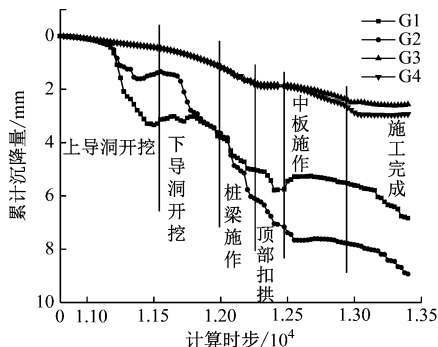


图6 管线沉降曲线

由图6可见,热力管线 G1 和 G2 位置的沉降变化相对更为明显,并在桩梁施作阶段前呈现出波动现象。这说明在此过程中地层土体自身进行着不断的应力调整,管线附近土体即将发生不可逆转的位移。G2 距离导洞拱顶更近,受群洞效应影响最为严重,在下导洞开挖完成后 G2 沉降迅速超过 G1 点;最终 G1 累计沉降量为 6.83 mm, G2 累计沉降量为 8.93 mm(已经接近沉降控制值 10 mm)。由此可以判断得出 G2 的风险等级较高。G3(煤气管线)和 G4(雨水管线)位置的沉降整体趋势较为平缓,在中板施作后可达到基本稳定状态;此阶段沉降值可以忽略不计,且两个位置最终沉降量基本相同,为 2.8 mm 左右。三教堂站周围主要为有压管线,必要时可选择采用深孔注浆等加固方式来降低管线的危险程度。

3.3 结构内力分析

为了更好地了解多跨洞桩法施工对三教堂车站本身受力状态的影响,特对如图7所示的车站主要结构应力分布情况予以分析。从图7a)可看出,拱顶外侧主要承受拉应力,拉应力值可达 1.34 MPa;结构最大拉应力为 3.28 MPa,出现在中板位

置。这是因为车站跨度较大,不利于中板受力。从图 7 b)可见,中柱和边柱作为主要承载结构呈现出完全受压的状态,其最大压应力(约为 4.74 MPa)出现在中柱的下半部;整个结构最大压应力为 8.44 MPa,出现在中板与中柱接触位置(此部分容易发生应力集中现象,必要时需要加强支护)。从车站结构的受力状态可见,其拉应力和压应力均较大;特别是结构受拉已经超出材料容许应力,必需采取控制措施。

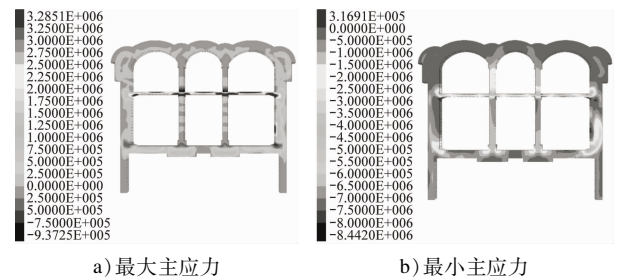


图 7 车站主要结构主应力云图

4 施工过程控制及效果分析

基于既定施工方案,优化开挖顺序,即同层导洞采用交错开挖的方式;同时进一步加强拱顶超前支护,以提高注浆加固区对应土体的弹性模量和黏聚力等。土体加固具体位置见图 8。

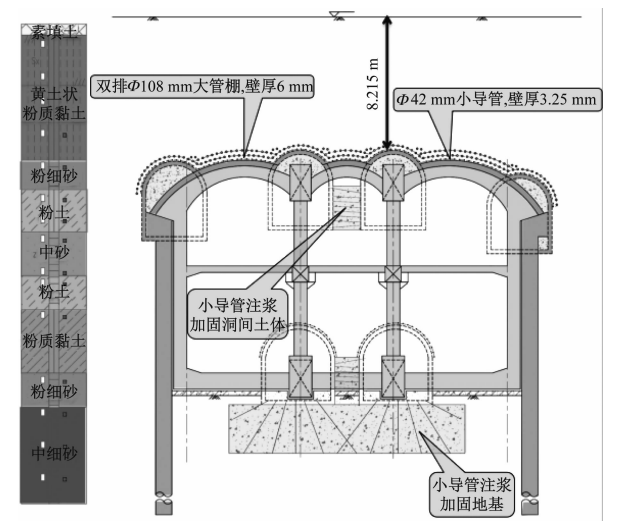


表 2 为采取地表沉降控制措施前后累计沉降量的对比分析。可以看出,当采用上述控制措施后,地表沉降可以得到有效抑制,累计沉降量为 8.43 mm。受施工影响较大的上导洞开挖阶段,沉降增量为 1.79 mm,顶部扣拱阶段增量为 1.03 mm,相比

之前分别降低了 76.1% 和 76.9%。这说明在上导洞拱顶加强超前支护的控制技术达到了预期效果;但对于下导洞开挖和桩梁施作两个阶段基本没有起到控制作用,因为这两个阶段在无控制措施下沉降增量就相对较小。

施工阶段	累计沉降量/mm		阶段沉降增量/mm	
	无措施	有措施	无措施	有措施
上导洞开挖	7.50	1.79	7.50	1.79
下导洞开挖	10.71	5.81	3.21	4.02
桩梁施工	11.26	6.45	0.55	0.64
顶部扣拱	15.72	7.48	4.46	1.03
中板施作	16.26	8.18	0.54	0.70
施工完成	16.60	8.43	0.34	0.25

图 9 为采取措施前后管线沉降量对比情况。可见采取适当的措施后,所有监测管线的沉降都得到显著控制。特别是 G1 和 G2 位置处的热力管线,累计沉降量分别可以降低 52.6% 和 56.8%。这是因为这两个管线距离车站拱顶更近,当加强超前支护并增加小导管和大管棚设置密度后,拱顶土体加固影响范围扩大至管线位置附近,其周围土体变得更加稳定。同时,通过改变导洞施工顺序,采用上层导洞交错开挖,下层导洞间隔进洞的方式,能够一定程度上抑制群洞效应,降低对土体的扰动。

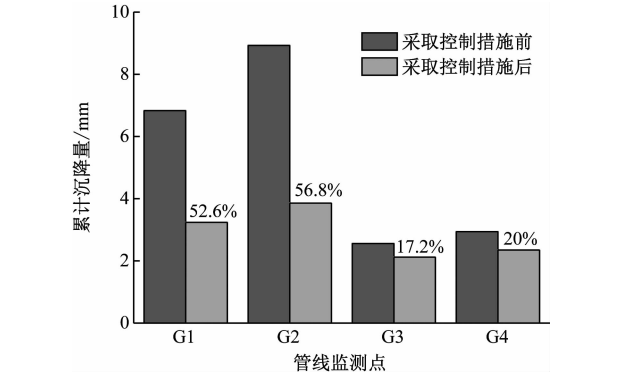


图 10 为车站主要结构的应力分布情况。从图 10 a)可看出,结构最大拉应力为 2.12 MPa,相对未采取控制措施时降低 35.4%。这是因为车站底部土体的注浆加固相当于增强了地基承载力,使中柱的受力状态得到了改善。从图 10 b)可看出,整个结构最大压应力为 5.43 MPa,出现在边柱与地板的接触位置,相对未采取控制措施时降低 35.7%。这是因为车站在开挖前对内部土体进行注浆加固,可在施工初期降低中柱所承受的荷载,进而影响中板的受力情况。

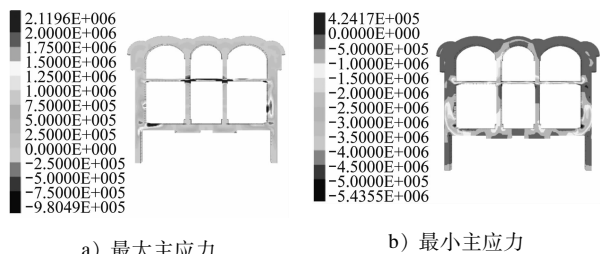


图 10 采取措施后车站主要结构主应力云图

5 施工控制技术

车站在采用洞桩法施工过程中,若采用既定方案,会带来对周围环境影响过大且自身受力状态较差等风险。通过对上述两种施工方案模拟结果的分析,并结合施工现场实际情况,经综合考虑提出以下控制技术措施:

(1)暗挖段拱顶采用双排大管棚加小导管的支护形式作为超前支护手段,适当增强支护,增加小导管和大管棚布设密度,防止地层沉降。

(2)增强导洞内初期支护,对拱部和中跨导洞间进行注浆加固;加固后的土体应有良好的均匀性和自立性,其抗压强度应不小于 0.5 MPa,以减少应力释放。由于下导洞底部处于粉细砂层,地基承载力较弱,故也需采用注浆加固;同时需控制注浆压力,避免注浆中造成地下管线变形过大,并应及时进行衬砌以及地层之间的填充。

(3)考虑群洞效应,同层导洞交错开挖,相邻下导洞施工滞后一定时间进洞。小导洞建议采用台阶法开挖,台阶长度控制在 3~5 m;开挖时需预留核心土,且长度不小于 2 m。

(4)加强各导洞内超前地质勘探,根据掌子面地质和含水率情况,确定是否采用喷射混凝土封闭掌子面,以减少围岩暴露时间。

(5)提高现场监测频率,根据反馈信息随时调整施工步距及支护参数。应严格执行“管超前、严注浆、短开挖、强支护、早封闭、勤量测”的原则。

6 结论

(1)采用既定方案施工,地表沉降曲线表现出对称性,两侧影响范围为 20~25 m,上导洞开挖阶段对土体的扰动最为明显,顶部扣拱阶段地表沉降

速率最大,地表最终累计沉降值为 16.6 mm。车站施工完成后,主体结构最大拉应力为 3.28 MPa,最大压应力可达 8.44 MPa。

(2)在未采取控制措施时,更靠近车站的热力管线沉降量相对较大,最大沉降值为 8.93 mm;其中桩梁施作和顶部扣拱两个阶段对管线的影响最大,中板施作后各管线沉降可达到稳定状态。

(3)针对施工过程的影响规律,提出了增强超前支护、对拱部和内部地层进行注浆加固、提高地基承载力、同层导洞交错开挖、相邻下导洞施工滞后一定时间进洞等关键控制措施。

(4)采取措施后,地表沉降量在影响最大的两个阶段得到明显控制,管线沉降量也明显减少,且车站主体结构受力状态得到较大改善,表明了控制技术的有效性。

参考文献

- [1] 袁扬,刘维宁,丁德云,等.洞桩法施工地铁车站导洞开挖方案优化分析[J].地下空间与工程学报,2011,7(增刊2):1692.
- [2] 刘泉维,王梦恕,扈世民.采用洞桩法建造地铁车站时围岩位移的控制措施[J].中国铁道科学,2013,34(6):61.
- [3] 刘加柱,孙礼超,张壮,等.地铁车站 PBA 洞桩法施工力学效应研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(增刊1):240.
- [4] 周诚华,周俊.复杂环境下暗挖隧道穿越富水砂层的地表沉降分析[J].公路工程,2018,43(6):263.
- [5] 邹森,吴禄源,王磊.某地铁车站深基坑开挖对临近管线的影响分析[J].铁道标准设计,2016,60(3):106.
- [6] 黄建军.PBA 车站下穿污水管线施工技术[J].隧道建设,2012,32(增刊2):147.
- [7] 刘军,南志领,金鑫,等.地铁工程穿越施工中热力管线变形及控制研究[J].施工技术,2017,46(增刊2):1053.
- [8] 谢富东.浅埋暗挖大跨度地铁车站施工稳定性分析与风险评估[D].济南:山东大学,2015.
- [9] ARIMAN T, MULESKE G E. A review of the response of the response of buried pipelines under seismic excitations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1981 (9):133.
- [10] 贾少春.北京地铁 7 号线双井站 PBA 工法数值分析[J].铁道建筑,2013(5):80.
- [11] 王峥峥,郭翔宇.地铁车站洞桩法施工对地层沉降影响研究[J].大连理工大学学报,2016,56(3):257.

(收稿日期:2019-02-15)