

# 单层洞桩法暗挖车站边桩结构受力及变形特征研究

孙玉辉 张子真 陈昌彦 王金明

(北京市勘察设计研究院有限公司, 100038, 北京//第一作者, 高级工程师)

**摘要** 以某单层洞桩法暗挖车站为例, 介绍了边桩顶应力、边桩钢筋内力、边桩混凝土应变、边桩顶竖向变形及边桩侧向水平位移等监测方案设计, 并通过对监测数据进行总结分析, 得出单层洞桩法暗挖车站边桩结构受力特征。在主体土体开挖期间, 边桩土方开挖段侧向摩阻力急剧减少, 受力状态发生显著变化, 为受力最不利的状态。建议设计时根据计算结果对边桩强度进行验算, 施工时对底板以下边桩侧向及桩端进行后注浆, 以便有利于提高桩基承载力。总结出了边桩变形特点及影响因素, 并提出了边桩的结构受力及变形特征符合摩擦桩的特点。建议设计时仅取底板以下土体提供的桩侧阻力和桩端力, 按照摩擦端承桩进行设计。

**关键词** 地铁车站; 单层洞桩法; 边桩; 结构受力; 变形

**中图分类号** TU714.2; U231.4

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2021.09.007

## Study on Stress and Deformation Characteristics of Side Pile Structure of Station Excavated by Single-storey Hole-pile Method

SUN Yuhui, ZHANG Zizhen, CHEN Changyan, WANG Jinming

**Abstract** Taking a single-storey tunnel excavation station as example, the monitoring scheme design of side pile top stress, side pile rebar internal force, side pile concrete strain, side pile top vertical deformation, side pile lateral horizontal displacement are introduced. By summarizing and analyzing the monitoring data, stress characteristics of the side-pile structure of single-storey hole-pile underground excavation station is obtained. During the excavation of main soil body, the lateral friction of the side-pile excavation section sharply decreases, and the state of the force changes significantly, to the most unfavorable state. It is recommended to check the strength of the side piles according to the calculation results during design. Post-grouting the side piles below the bottom plate and the pile ends during construction is helpful to improving the bearing capacity of pile foundation. The deformation characteristics and influencing factors of side piles are summarized. It is also proposed that the structural stress and deformation characteristics of the side piles are in line with the characteristics of friction

piles. It is recommended that only the pile side resistance and pile end force provided by the soil below the floor shall be taken into account in the design, and the design should be based on friction-end bearing piles.

**Key words** metro station; single-storey hole-pile method; side pile; structure stress; deformation

**Author's address** BGI Engineering Consultants Ltd., 100038, Beijing, China

目前, 对于传统洞桩法(双层导洞)暗挖车站, 一般采用理论分析和经验类比相结合的设计方法, 而对于新型单层洞桩法车站结构受力体系, 几乎未见相关研究。边桩作为单层洞桩法暗挖车站施工期间(在车站主体拱、墙、板完成之后就不再将其作为受力构件考虑)承担竖向荷载及侧向土压力的构件, 是该施工方法的重要组成部分, 对于其结构受力体系及变形特征, 缺乏理论研究和现场实测验证。基于此, 在单层洞桩法暗挖施工中, 对边桩桩顶压力、钢筋应力、混凝土应变, 以及边桩顶竖向位移、桩身水平位移等进行监测, 通过数据分析并结合理论分析总结出单层洞桩法施工过程中边桩的结构受力体系, 为设计、理论研究提供参考及真实数据支撑。

## 1 工程概况

北京地铁某地铁车站暗挖段为地下二层双柱三跨连拱直墙结构, 采用暗挖洞桩法施工, 结构覆土厚度为 14.00 m, 结构总高度为 17.12 m。边桩直径为 1.00 m, 桩中心距为 1.25 m; 中柱桩基直径为 1.80 m, 桩中心距为 7.00 m。车站底板以下为卵石⑨层, 边桩和中柱桩基嵌固深度分别为 12.00 m、17.80 m。

地层以人工填土层、粉质黏土、黏质粉土等交互地层为主, 拱顶为砂卵地层, 局部为粉细砂地层, 车站结构范围内为砂卵地层, 存在层间潜水, 底板位于砂卵地层、隔水层以上。具体车站结构断面及地层如图 1 所示。

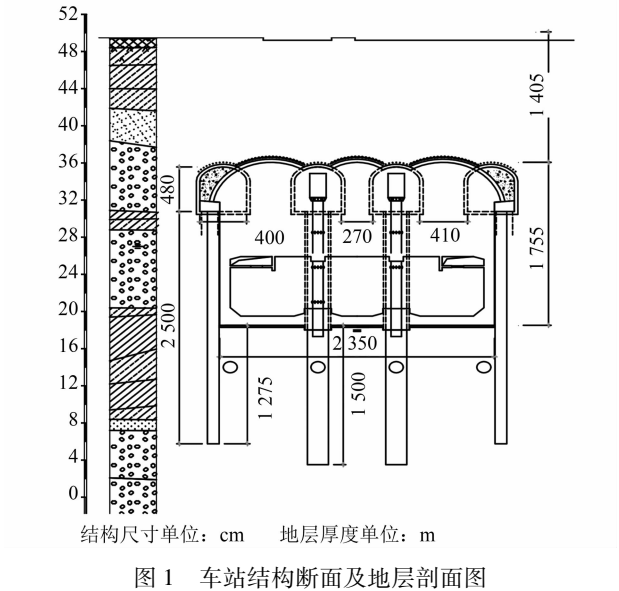


图 1 车站结构断面及地层剖面图

2 监测方案设计

本次监测项目主要为边桩顶压力、边桩钢筋应力、边桩混凝土应变、边桩顶竖向位移、边桩水平位移等。各监测项目尽量布设在同一断面上,便于各种监测数据的综合分析 with 相互验证。具体监测点布设位置如图 2 所示。监测方法及仪器精度如表 1 所示。

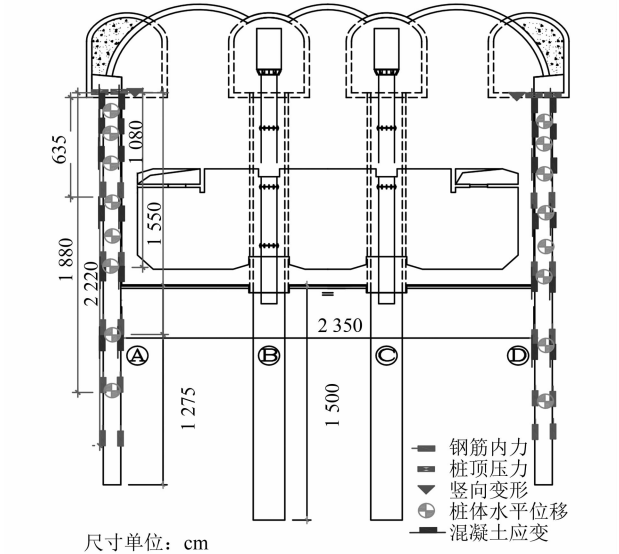


图 2 监测布设位置剖面图

3 结构受力及变形特征

3.1 边桩顶压力

共对 6 根边桩布设了桩顶压力监测装置,监测数据总结分析如表 2 所示。特殊监测点变形时程曲线如图 3 所示。

表 1 监测方法、仪器精度及测点布设统计表

监测项目	监测仪器	仪器精度	监测点布设
竖向位移	水准仪	0.5 mm	边桩顶冠梁侧方
水平位移	固定式测斜仪频率读数仪	0.15%F·S	桩内安装测斜管
桩顶压力	振弦式频率读数仪, 光纤光栅式压力计、光纤解调器	0.15%F·S	浮浆凿除后的桩顶位置
钢筋内力	钢筋计频率读数仪	0.15%F·S	绑焊桩的迎土侧及背土侧主筋上
混凝土应变	应变计频率读数仪	0.15%F·S	绑扎桩的迎土侧及背土侧主筋上

注:F·S 为传感器最大的测量值。

表 2 不同边桩各施工阶段的桩顶压力监测值

边桩	各施工阶段边桩桩顶压力/MPa					
	扣拱开挖	初支凿除完成	二衬扣拱	站厅层土方开挖	中板浇筑完成	站台层土方开挖
A1	0.21	0.31	0.34	0.69	0.75	0.68
A4	0.29	0.40	0.57	0.77	0.75	0.76
D1	0.32	0.37	0.40	0.61	0.72	0.48
D2	0.33	0.45	0.51	1.06	1.14	0.95
D3	0.26	0.34	0.50	0.68	0.68	0.71
D5	0.26	0.33	0.42	0.64	0.70	0.48
均值	0.28	0.37	0.46	0.74	0.79	0.68

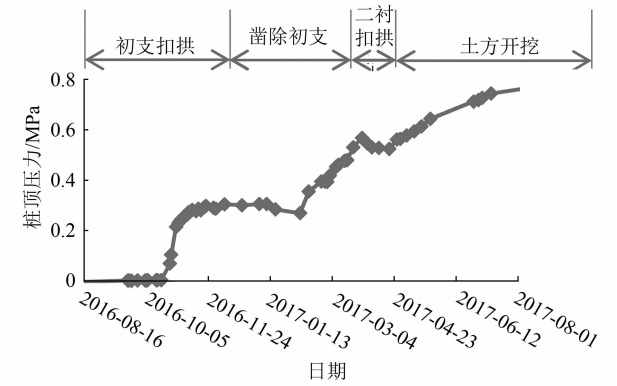


图 3 不同施工阶段 A4 边桩桩顶压力变形时程曲线

由表 2 和图 3 可看出:

1) 桩顶压力变形主要发生在初支扣拱、二衬扣拱、站厅层土方开挖阶段,各施工阶段桩顶压力变形量占总变形量的比例分别为 35%、22%、36%。桩顶压力最大值出现在站厅层土方开挖完成后,范围为 0.68~1.14 MPa 之间,平均值为 0.79 MPa,根据边桩直径换算成荷载为 620.15 kN。

边桩顶部荷载  $q$  计算公式为:

$$q = (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2) LB \tag{1}$$

式中:

$\gamma_1$ ——顶板以上土层重度加权平均值,根据地层参数计算,其值为 19.50 kN/m<sup>3</sup>;

$\gamma_2$ ——结构所在土层重度加权平均值,根据地

层及结构参数计算,其值为  $20.70\text{ kN/m}^3$ ;

$L$ ——边桩影响的长度,根据地层及结构参数计算,其值为  $1.25\text{ m}$ ;

$B$ ——边桩影响的宽度,根据地层及结构参数计算,其值为  $6.00\text{ m}$ ;

$h$ ——边桩影响的高度,根据地层及结构参数计算, $h_1$ 、 $h_2$  取值均为  $6.00\text{ m}$ 。

根据式(1),理论计算中板完成后边桩顶荷载为  $3\,553.43\text{ kN}$ (按照全土柱法,覆土厚度为  $14\text{ m}$ ,如果根据拱顶压力监测数据反推的松散围岩高度为  $3.5\text{ m}$ ,则计算荷载为  $2\,017.8\text{ kN}$ )。理论计算值远大于现场实测值  $620.15\text{ kN}$ (根据实测边桩桩顶压力及边桩直径换算所得),可解释为荷载由边桩背后土体及导洞初支分担。

2) 边桩压力变形规律原因分析。

(1) 冠梁及假拱施做期间对桩顶压力影响较小,荷载沿小导洞初支直接向下传递到导洞底板地层处,桩顶及冠梁在导洞初支底板之上,受力较小。

(2) 初支扣拱期间,扣拱导洞土方开挖后围岩应力作用在格栅上,并随着开挖掌子面的推进,拱顶受覆土压力开始向两边传递到拱脚并由边桩承担。

(3) 二衬扣拱期间,初支凿除后原拱顶荷载由导洞及大拱初支共同承担,变为由初支大拱单独承担并沿格栅传递拱脚,最终由边桩承担。

(4) 站厅站台土方开挖过程中,侧墙及中板结构自重均有边桩承担,直到二衬框架结构完全完成。

3) 扣拱掌子面与边桩距离对边桩顶压力变形的影响范围如图 4 所示。从图 4 中可以看出:边桩距离扣拱掌子面前  $10\text{ m}$ ,桩顶压力开始出现增长变化;扣拱掌子面通过该桩  $30\text{ m}$  后,桩顶压力出现平稳趋势。扣拱开挖对边桩顶压力的影响范围

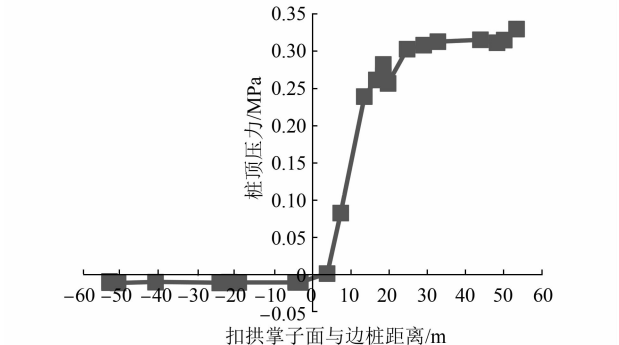


图 4 扣拱掌子面与边桩距离对边桩顶压力变形的影响范围

是  $-10\text{ m}\sim 30\text{ m}$ 。

3.2 边桩钢筋内力

各工序节点边桩钢筋内力值统计如表 3 所示。典型测点时程曲线如图 5~6 所示。

工序节点	各施工阶段边桩钢筋内力/MPa					
	假拱回填	初支扣拱	初支凿除	二衬扣拱	中板完成	站台层土方开挖
迎 6.35	-0.02	-0.64	0	-0.81	-5.50	-7.14
迎 10.8	-0.09	-1.94	-2.29	-2.97	-5.21	-6.87
迎 15.1	-0.12	0.39	0.53	0.33	-2.17	-2.26
迎 18.8						
迎 22.2						
背 6.35	0.05	2.38	2.98	3.85		
背 10.8	-0.13	2.15	2.74	2.56	-2.37	-1.50
背 15.1	-0.10	0.28	0.48	0.40	-1.36	-2.33
背 18.8	-0.11	0.31	0.45	0.43		
背 22.2						

注:“迎”表示迎土侧;“背”表示背土侧。“迎”和“背”后面的数字表示距离边桩顶的深度数值。

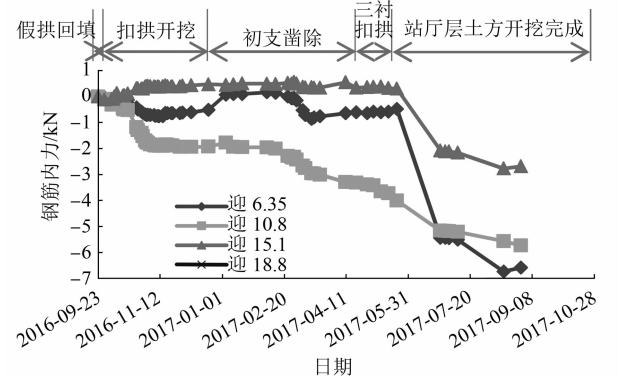


图 5 不同施工阶段迎土侧边桩钢筋内力时程曲线

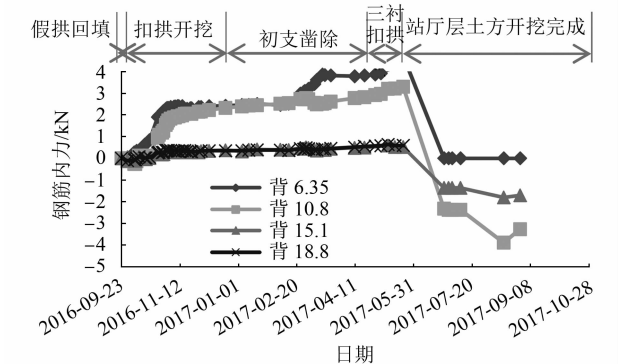


图 6 不同施工阶段背土侧边桩钢筋内力时程曲线

由表 3 及图 5~6 可得:

1) 钢筋内力变形主要发生在初支扣拱、二衬扣拱、土方开挖三个阶段。其中:初支扣拱和二衬扣拱阶段变形规律同桩顶压力变形规律;土方开挖阶

段由于迎土侧土侧压力造成桩身向车站侧发生变形,钢筋应力也急剧增加,并且均呈受压状态。

2) 由于土方开挖边桩侧摩阻力减少,致使桩轴力向下传递更深(桩深部的轴力急剧增加),增加的轴力由底板以下桩侧阻力承担。

3.3 边桩混凝土应变

各工序节点边桩混凝土应变值统计如表 4 所示。典型测点时程曲线如图 7~8 所示。

表 4 各工序节点不同施工阶段边桩混凝土应变值

工序节点	各施工阶段边桩混凝土应变/ $\mu\epsilon$				
	初支扣拱	初支凿除	二衬扣拱	站厅层土方开挖	站台层土方开挖
迎 0.5	-172.79	-232.41	-259.12	-287.83	-275.84
迎 1.75	19.50	46.43	52.08	58.98	
迎 3.55					
迎 7.55	-33.29	-40.73	-48.83	-65.69	-197.69
迎 10.72	-22.26	-32.60	-39.03	-53.58	-56.99
迎 15.55	-23.92	-26.19	-30.79	-45.80	-137.96
背 0.5	33.38	44.42	42.03	21.13	
背 1.75	-161.03	-219.62	-245.22	-283.18	-345.02
背 3.55	-26.18	-17.76	-14.98	-3.30	
背 7.55	-101.65	-125.32	-138.50	-154.37	
背 10.72	-12.60	-26.60	-36.40	-56.92	
背 15.55	-16.75	-24.85	-28.97	-51.20	

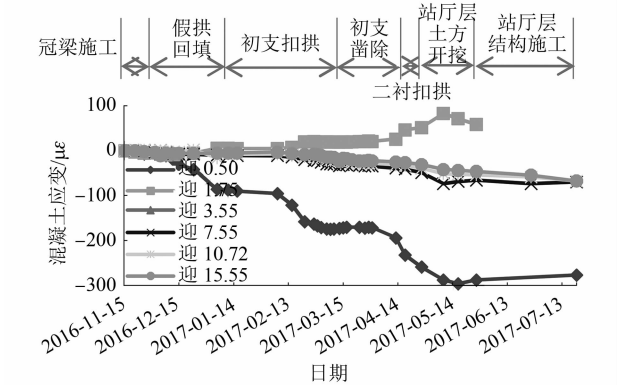


图 7 不同施工阶段迎土侧边桩混凝土应变时程曲线

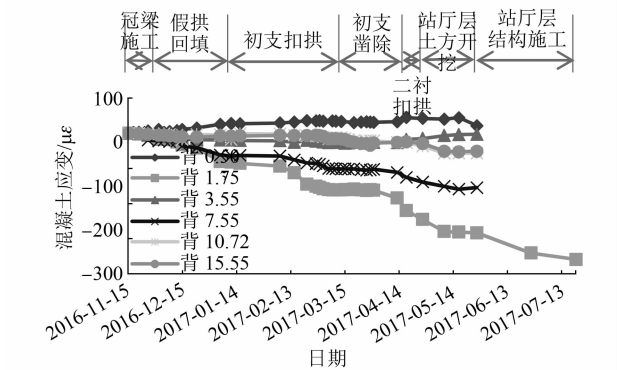


图 8 不同施工阶段背土侧边桩混凝土应变时程曲线

由表 4 及图 7~8 可知,边桩混凝土应变变化规律与边桩钢筋内力的相同。

边桩轴力  $F$  计算公式为:

$$\epsilon_{\text{轴}} = (\epsilon_{\text{迎土侧}} + \epsilon_{\text{背土侧}}) / 2 \tag{2}$$

$$F = E_c A \epsilon_{\text{轴}} \tag{3}$$

式中:

$\epsilon_{\text{轴}}$ ——边桩混凝土应变;

$\epsilon_{\text{迎土侧}}$ ——边桩混凝土迎土侧应变;

$\epsilon_{\text{背土侧}}$ ——边桩混凝土背土侧应变;

$E_c$ ——混凝土强度(C30 取值 30 000 N/mm<sup>2</sup>);

$A$ ——边桩截面积。

不同边桩深度的轴力计算结果如表 5 所示。

表 5 不同边桩深度各施工阶段轴力值

边桩深度/m	各施工阶段轴力/kN				
	假拱回填	初支扣拱	初支凿除	二衬扣拱	站厅层土方开挖
0.50	-712.84	-1 642.42	-2 214.74	-2 557.51	-3 142.00
1.75	-895.93	-1 667.32	-2 040.32	-2 275.41	-2 641.32
7.55	-886.44	-1 589.78	-1 956.25	-2 206.92	-2 592.47
10.72	-298.99	-410.63	-697.44	-888.65	-1301.86
15.55	-150.19	-479.14	-601.29	-704.08	-1142.73

边桩侧摩阻力  $q_s$  计算公式为:

$$q_s = \Delta F_N / (l_i \mu_p) \tag{4}$$

式中:

$\Delta F_N$ ——相邻两个监测点轴力差;

$l_i$ ——相邻两个监测点距离;

$\mu_p$ ——桩截面周长。

不同边桩深度的侧摩阻力计算结果如表 6 所示。

表 6 不同边桩深度各施工阶段侧摩阻力值

边桩深度/m	各施工阶段侧摩阻力/kPa				
	假拱回填	初支扣拱	初支凿除	二衬扣拱	站厅层土方开挖
0.50~1.75	-46.62	-6.34	44.42	71.84	127.50
1.75~7.55	0.52	4.26	4.61	3.76	2.68
7.55~10.72	58.99	118.40	126.40	132.37	129.59
10.72~15.55	9.81	-4.51	6.34	12.16	10.49

由表 5~6 可知:

1) 桩身混凝土应变整体呈受压状态,根据式(2)、式(3)和式(4),利用桩身应变可计算桩身轴力和边桩侧摩阻力。根据计算结果可知:边桩的轴力均为压力,且随施工进行,压力逐渐增大。边桩在 0.50~1.75 m 深度范围内,在扣拱开挖完成之前,出现了负摩阻力,经综合分析可能与后注浆施工有关。

2) 边桩同一深度处,迎土侧和背土侧的应变是不一样的,如图 7~8 所示。桩顶和桩端的差别明

显,桩身中部的差别小,此规律符合圣维南原理。

### 3.4 边桩顶竖向位移

各监测点的边桩顶竖向累计变形量统计如表 7 所示。

表 7 各监测点边桩顶竖向变形统计表 单位:mm					
测点	变形量	测点	变形量	测点	变形量
A01	-3.48	A07	-4.69	D04	-6.97
A02	-4.19	A08	-9.39	D05	-4.36
A03	-3.46	A09	-5.75	D06	-6.66
A04	-6.94	D01	-6.17	D07	-4.31
A05	-4.50	D02	-7.48	D08	-8.73
A06	-8.57	D03	-3.61	D09	-5.09

注:各监测点边桩顶竖向变形量均值为-5.80 mm。

根据监测数据,边桩桩顶沉降的平均值为-5.80 mm。边桩顶的竖向位移与边桩承担的竖向荷载、边桩施工质量(桩侧泥皮、桩底沉渣、钻孔塌孔等)、桩身弹性压缩、桩端地层压缩变形、边桩的侧向水平位移等有关。

### 3.5 边桩桩身水平位移

各传感器的桩体水平变形统计如表 8 所示。桩体水平变形时程曲线如图 9 所示。

表 8 不同边桩深度各施工阶段桩体水平变形值			
不同边桩深度/m	各施工阶段桩体水平变形值/mm		
	扣拱完成	二衬完成	站厅层土方开挖
0.5	0	6.45	10.02
2.5	0	6.58	11.81
4.5	0	5.81	11.81
6.5	0	5.18	10.16
8.5	0	4.54	8.62
16.5	0	0.45	0.45
17.5	0	0	0

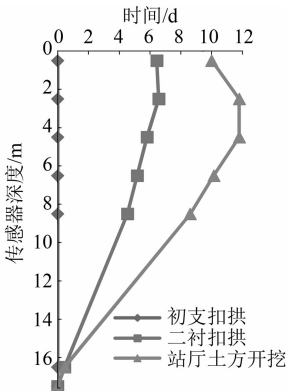


图 9 边桩桩体水平变形图

从图 9 和表 8 可以看出:

1) 桩体水平位移均向车站内变形,主要发生在站厅层土方开挖期间和二衬扣拱施工期间。边桩主要受侧向水土压力作用产生侧向变形,初支扣拱

前其边桩所受的边拱推力将与边导洞的侧向土压力平衡;二衬扣拱完成后进行主体土方开挖,边桩承受未开挖土体侧的水土压力,桩身发生侧向水平位移,但是桩顶部因已施工二衬结构可视为一道抵抗侧向变形的水平支撑,因此桩顶侧向位移受到控制。

2) 二衬扣拱完成后,桩体水平位移最大为 6.58 mm,发生在深度为 0.5 m 和 2.5 m 处;站厅层土方开挖完成后,最大水平位移增加至 11.81 mm,发生在深度为 2.5 m 和 4.5 m 的测点上,出现了鼓肚形现象。

## 4 结论

1) 总结出边桩在洞桩法暗挖车站施工过程中的三个受力阶段:第 1 阶段为初支扣拱期间。初支扣拱包括边跨扣拱和中跨扣拱,边跨扣拱初支结构一端直撑在边桩冠梁上并通过边桩承载受力;初支扣拱完成后,建立车站第二种稳定的结构体系,即土压力作用在初支拱上,通过纵梁和边桩冠梁向中桩及边桩传力。第 2 阶段为二衬扣拱期间。二衬扣拱需拆除中隔壁,应力重新分布。二衬扣拱完成后,土压力作用在初支上与二衬拱共同受力,通过纵梁和边桩冠梁向中桩及边桩传力。第 3 阶段为土方开挖阶段。随着车站土方的开挖,边桩作为围护结构,抵抗主体土方开挖产生的侧向土压力。

2) 边桩在主体土方开挖后桩侧摩阻力减少,轴力急剧向下传递,致使底板以下桩侧摩阻力和桩端力由桩基承担。因此在底板以下桩侧及桩端进行后压浆辅助措施有利于提高桩基承载力。

3) 根据边桩结构受力分析,主体土体开挖期间边桩受力状态发生显著变化,受力处于最不利的状态,建议设计时根据计算结果对边桩强度进行验算。

4) 边桩变形包括竖向变形和侧向水平变形。竖向变形包括荷载造成的桩身竖向变形及桩身自身压缩变形,施工中应重点控制边桩与中柱的差异沉降。边桩侧向变形主要发生在主体土方开挖后,边桩承受未开挖土体侧的水土压力,桩身发生侧向水平位移,但是桩顶部因已施工的二衬结构可视为一道抵抗侧向变形的水平支撑,因此桩顶侧向位移受到控制。

5) 根据本文监测数据分析,桩顶压力偏小,与理论计算荷载相差较大。建议用边桩混凝土应变

(下转 38 页)

间。经统计,青岛市的轨道交通站点核心区规划平均容积率约为 2.15,低于《导则》和 TOD 发展成熟地区的经验值。建议在后续城市规划中,划分城市密度分区,适度提高站点周边土地开发强度。

### 3.4 促进多元公共交通方式融合,提升城市轨道交通吸引力

城市轨道交通与小汽车交通的竞争体现在全出行链的总耗时上。由于城市轨道交通站点覆盖面积有限,因此两端衔接时间较长。通过对全国多个城市轨道交通接驳调查数据分析发现,城市轨道交通两端接驳时间占到总出行时间的 40% 左右。为充分利用城市轨道交通资源,应有效推进多网融合,压缩两端接驳时间。

1) 制定多网融合发展政策。出台促进城市轨道交通与道路公交一体化实施意见,建立城市轨道交通接驳设施“三同时”机制,理顺规划、建设、报批和验收等程序。

2) 组建多网融合协调机构。组建城市轨道交通运营企业和道路公交运营企业一体化综合协调机构,研究通过收购、参股形式实现大公交公司之间的互通融合,远期朝大交通管理体制方向推进。

3) 制定多网融合实施方案。优化城市轨道交通沿线道路公交线路,实现网络融合;构建无缝衔接、高效换乘的城市轨道交通枢纽体系,实现设施融合;建立基于里程的公共交通联网票价、整合各种公共交通时刻表等措施,实现运营融合。

### 3.5 提高城市轨道交通自身规划、建设和运营管理水平

硬件方面,适度增加车站出入口数量,加强与

周边建筑连通,延伸地下空间,通畅车站内部人行流线,完善功能性设施,避免“快线不快,断在外围”(如 11 号线),减少人为换乘次数;软件方面,对行车间隔、引导信息、安检、购票、运营组织等方面给予必要完善。

## 4 结语

追本溯源,城市轨道交通建设的目的是解决人的交通出行问题,因此应以客流效益作为线网规划、近期建设规划的关键核心要素。土地利用决定了人口岗位,直接影响着城市轨道交通全生命周期的客流规模。青岛市拥有全国独一无二的大尺度、海湾型、离散式的城市空间结构,不具有“饼状”城市人口岗位集聚的优势,所以在土地存量时代更应将增量用地优先向城市轨道交通沿线布局,并适当提高开发强度。在青岛市三期城市轨道交通建设规划线路建成后,青岛市运营的轨道交通线路里程将超过 500 km,迫切需要打破政策“壁垒”,促进多元融合,提升换乘能力,缩短全出行链总耗时,实现城市轨道交通客运总量和客运强度的稳步增长。

## 参考文献

- [1] 交科院技术咨询(北京)有限公司. 青岛市轨道交通与常规公交融合发展关系研究[R]. 青岛:青岛市交通运输局,2020.
- [2] 张安锋. 上海城市轨道交通网络规划实施评估[J]. 城市轨道交通研究,2015(6): 5.
- [3] 吴南华. TOD 模式下地铁站点周边土地开发研究[J]. 建筑学研究前沿,2019(1): 17.

(收稿日期:2021-03-22)

(上接第 34 页)

数据进行反推边桩轴力计侧摩阻力,与理论计算荷载符合性较好。

6) 边桩的结构受力及变形特征符合摩擦桩的特点。不同之处在于主体土方开挖后,底板以上桩侧摩阻力减少,桩身发生侧向水平位移。设计时,建议仅取底板以下土体提供的桩侧阻力和桩端力,按照摩擦-端承桩进行设计。

## 参考文献

- [1] 杨秋鸣. 组合荷载作用下桩基承载力试验及数值模拟研究[J]. 施工技术,2018(21): 27.

- [2] 皇甫明,王幼青,王梦恕. 水平力对竖直桩沉降和承载力影响的研究[J]. 岩土工程学报,2003(4): 511.
- [3] 苏栋,赵鹏,高翔,等. 考虑泊松效应影响的弹塑性荷载传递模型[J]. 岩土力学,2015(10): 2799.
- [4] 周红波,陈竹昌. 施工工艺对桩基桩端效应的影响研究与应用[J]. 地下空间与工程学报,2005(7): 1087.
- [5] 孙玉辉,陈昌彦,白朝旭,等. 地下工程风险管控第三方监测关键技术探讨[J]. 现代城市轨道交通,2012(2): 43.
- [6] 孙玉辉,孙增伟,白朝旭,等. 基坑围护桩侵限成因分析与处理[J]. 工程勘察,2014(3): 20.
- [7] 孙玉辉,贺涛涛,王金明,等. 地下连续墙基坑突变和坑底涌水原因分析及应对措施探讨[J]. 工程勘察,2019(2): 26.

(收稿日期:2019-12-24)