

地铁车站软土地基变形计算及处理方法^{*}

李 智

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州//工程师)

摘 要 为掌握不同厚度软土地基车站加固前的变形特性, 为软土地基加固提供理论支撑, 利用回弹再压缩方法对基底变形进行了精确计算, 并对桩基+牛腿+三轴搅拌桩抽条、桩基+三轴搅拌桩抽条、三轴搅拌桩裙边+抽条以及桩基+三轴搅拌桩裙边+抽条等4个加固方案进行了技术经济对比。分析结果表明, 当基底以下存在软土时, 按回弹再压缩方法计算的变形约为基底软土厚度的0.015倍, 需加固至较好地层; 基底加固亦可有效减小基坑开挖变形及内力; 综合考虑造价及加固效果, 采用桩基+牛腿+三轴搅拌桩抽条方案较优。此方案已在佛山地铁3号线大墩站一期工程中成功应用。

关键词 地铁; 软土地基车站; 基底变形计算; 加固方案

中图分类号 TU433

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.05.024

Deformation Calculation and Treatment of Metro Station Soft Foundation

LI Zhi

Abstract In order to master the deformation characteristics of different soft foundation stations before reinforcement, so as to provide a theoretical support for soft foundation reinforcement, the rebound recompression method is used to accurately calculate the base deformation, at the same time, four reinforcement schemes are compared from technical and economic perspectives, including pile foundation + bracket + three-axis mixing pile pumping, pile foundation + three-axis mixing pile pumping, three-axis mixing pile + sprout and pile foundation + three-axis mixing pile skirt + sprout. The analysis results show that when the soft soil is under the basement, the deformation calculated by the rebound recompression method is about 0.015 times the thickness of the soft soil, then the soil needs to be strengthened to a better formation, because the base reinforcement can effectively reduce the excavation deformation and internal force of the foundation pit. Based on a comprehensive consideration of the cost and reinforcement effect, the scheme of pile foundation + bracket + three-axis mixing pile

is recommended, which has been successfully applied in the first phase of Dadun Station project on metro Line 3 in Foshan City.

Key words metro; soft foundation station; deformation calculation; reinforcement scheme

Author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China

目前, 对地铁车辆段软土地基(以下简为“软基”)加固^[1-2]及地铁区间隧道软土地基加固^[3-5]的相关研究已较多, 亦有对车站主体结构基底加固的相关文献^[6-11], 但这些研究仅注重于施工技术^[6,10-11]、数值分析^[7]以及基坑控制^[8-9]等方面, 对基底承载力及变形的计算未见论述。实际设计时, 车站基底加固一般根据经验, 综合考虑基底承载、变形及基坑开挖因素, 由相关权威专家拍定加固方案。

本文依托佛山地铁3号线大墩站一期工程, 首先对软基加固必要性进行了深度分析; 其次对目前常见的几种软基处理方案进行综合比选, 提出了不考虑施工因素时的较优处理方案, 并成功应用; 最后根据目前行业状态、施工效果及软基车站位置, 提出了地铁软基加固更加合理化的相关建议。

1 工程概况及水文地质条件

佛山地铁3号线大墩站位于现状荷岳路与规划文华南路交叉口, 沿规划文华南路呈南北向布置。车站总长473.6 m, 共设4个出入口及2组风亭, 周边以鱼塘及空地为主。

本站分两期施工。一期基坑位于荷岳路路中以北区域, 长86.75 m; 二期基坑为荷岳路路中以南区域, 长386.85 m。其中, 一期基坑标准段宽19.7 m, 深约16.6 m, 采用800 mm厚地下连续墙+3道支撑。标准段第一、二道为混凝土支撑, 第三道为

^{*} 广州地铁设计研究院股份有限公司科研项目(KY-2019-006)

双拼钢支撑,两端均采用 3 道混凝土支撑。基坑开挖范围内主要为鱼塘回填土、素填土、粉质黏土、淤泥质粉细砂、淤泥质土。基底主要位于淤泥质土层中,基底下软土厚度约 6~11 m,如图 1 所示。软土层相关参数如表 1 所示^[12]。

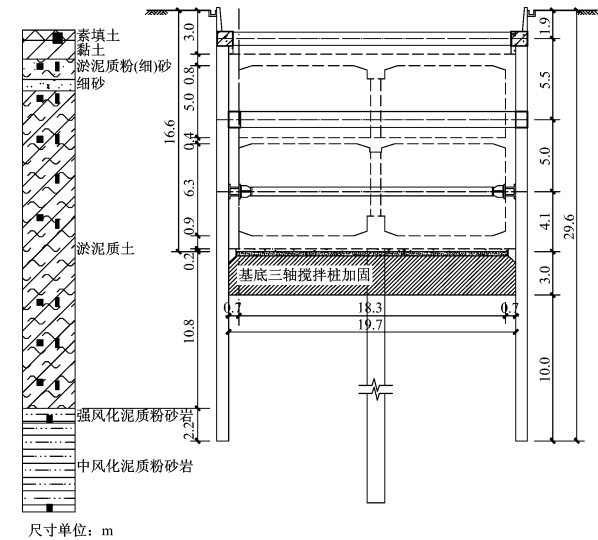


图 1 大墩站基坑标准段横剖面图

表 1 大墩站基底软土层主要物理力学参数				
土层	重度/ (kN/m ³)	承载力特 征值/kPa	弹性模量/ MPa	孔隙比
淤泥	16.9	45	2.46	1.554
淤泥质土	17.4	60	3.09	1.247
淤泥质粉细砂	19.3	80	4.51	0.953

2 加固必要性分析

对地铁车站而言,普通两层站埋深均在 15 m 以上,软基以淤泥、淤泥质土及淤泥质粉细砂为主。地铁结构对地基承载力及变形控制要求较高,尤其是车站主体,沉降较大时将影响行车安全,需重点控制。

地铁车站修建完成后,地铁车站结构(空心)替换了同等体积的原状土,减轻了基底的压力,且水位恢复至地面后,地铁车站结构尚需采取抗浮措施,因此,许多业内人士认为不必计算基底承载力及变形。但地铁车站施工不是瞬时完成的,车站基坑开挖后,坑底竖向荷载变为零,相当于卸载,此时坑内土体会回弹,主体结构施工及覆土时,在基底上加载,基底被压缩。整个车站施工过程中,基底变形为先回弹,再压缩,其回弹再压缩变形不能忽略,尤其是软基车站更不能忽略。本文从地基承

力、变形及基坑计算等方面进行分析。

2.1 地基承载力

图 1 所示的是普通标准两层地铁车站,埋深 3 m,顶、中、底板及侧墙厚度分别取 0.8 m、0.4 m、0.9 m 及 0.7 m,顶、中、底板梁尺寸分别取 1.2 m×1.8 m、0.8 m×1.0 m、1.2 m×2.0 m。覆土重度取 20 kN/m³,混凝土重度取 25 kN/m³。经计算,施工期间(覆土完成,水位未上升时)覆土荷载为 60 kPa,顶板自重荷载为 20 kPa,中板自重荷载为 10 kPa,底板自重荷载为 22.5 kPa,侧墙自重荷载为 20 kPa,梁自重荷载为 3.8 kPa,则覆土后基底压力 $p_k = 136.3$ kPa。

基底淤泥质土经深度修正后的地基承载力特征值^[13]为:

$$f_a = f_{ak} + \eta_b r(b - 3) + \eta_d r_m(d - 0.5) \quad (1)$$

式中:

- f_a ——修正后的地基承载力特征值,kPa;
- f_{ak} ——地基承载力特征值,取勘察报告值(60 kPa);

η_b, η_d ——分别为底板宽度和深度地基承载力修正系数,对淤泥质土, $\eta_b = 0, \eta_d = 1$;

r ——底板以下土的重度,取浮重度,对淤泥质土, $r = 7.4$ kN/m³;

b ——基础底面宽度, $b = 3 \sim 6$ m;

r_m ——底板以上土的有效加权平均重度,考虑基坑开挖前降水,取 $r_m = 17.4$ kN/m³;

d ——车站底板埋深, $d = 16.38$ m。

计算可得, $f_a = 336$ kPa。修正后的地基承载力远大于基底压力,地基承载力满足要求。

上述计算仅考虑了结构本身所需的承载力,施工期间,施工机械所需的承载力与机械型号及施工方式有关,未加固时可能存在机械陷入基坑情况,此时,应做好开挖前的排水固结等相关措施。

2.2 基底变形

普通民建的上部结构变形主要由附加荷载引起,计算时一般忽略基础开挖期间土层的回弹再压缩变形。与地上结构不同,地铁车站全部埋置于地下,其变形主要为回弹再压缩变形。针对图 1 所示断面,对未采取软基处理时的变形进行分析。为简化计算,近似取基底以上土层平均重度为 17 kN/m³,基底以下淤泥质土层厚度取 11 m。

2.2.1 地基回弹变形计算

地基回弹变形量计算式为:

$$s_c = \psi_c \sum_{i=1}^n \frac{p_c}{E_{ci}} (z_i \alpha_i - z_{i-1} \alpha_{i-1}) \quad (2)$$

其中

$$p_c = r_c d \quad (3)$$

$$E_{ci} = e_0 E_s (0.003 \, 2 p_c + 1.5) \quad (4)$$

式中:

- s_c ——地基的回弹变形量,mm;
 - ψ_c ——回弹量计算的系数,取 1.0;
 - α_i, α_{i-1} ——分别为基础底面计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数,按《建筑地基基础设计规范》^[13] 附录 K 取值;
 - z_i, z_{i-1} ——分别为基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离,本文中 $z_i = 11 \text{ m}$, $z_{i-1} = 0$;
 - p_c ——基底承受过的历史最大压力,按开挖前基底以上土层质量计算,kPa;
 - r_c ——基底以上土层平均重度,考虑基坑开挖前降水,取 $r_c = 17 \text{ kN/m}^3$;
 - E_{ci} ——土的回弹模量,根据文献[14]计算,kPa;
 - e_0 ——基底以下软弱土层孔隙比;
 - E_s ——基底以下软土层压缩模量,MPa。
- 将参数代入式(2)~(4),计算可得: $p_c = 278.46 \text{ kPa}$, $E_{ci} = 9.213 \text{ MPa}$, $s_c = 309 \text{ mm}$ 。

2.2.2 回弹再压缩变形量计算

文献[12]中无软土临界再压缩比例及临界再加载比例,本文近似按线性比例进行计算:

$$s'_c = s_c \frac{p_k}{p_c} = 151 \text{ mm} \quad (5)$$

式中:

- s'_c ——回弹再压缩变形量,mm。
- 根据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[15] 要求,地铁结构竖向位移控制值为 20 mm,故上述软基需进行处理。
- 2.2.3 不考虑底板荷载的回弹再压缩变形量计算
- 当变形发生在中板施工之前时,可通过增加轨道高度及调整中板标高的方式处理。实际计算变形时,可在卸载及再加载中扣除底板自重荷载 22.5 kPa,即:
- $$p_c = 255.96 \text{ kPa} \quad (6)$$
- $$p_k = 113.8 \text{ kPa} \quad (7)$$
- 将式(6)和式(7)代入式(5),算得回弹再压缩变形量为 137 mm,仍不满足要求。

2.2.4 基底不同软土厚度回弹再压缩变形量计算

大墩站一期基坑基底软土厚 11 m,计算变形较大,需采取加固措施,但具体软土多厚时需进行加固,目前尚无相关理论。本文对普通地铁车站不同软基厚度变形量进行了计算(见表 2),结果表明,基底变形约为软土厚度的 0.015 倍,基底存在软土时均需处理。

表 2 地铁车站不同软基厚度变形量

软基厚度/m	L/B	z/B	α	s_c/mm	s'_c/mm
1	10	0.1	0.249 9	30	15
2	10	0.2	0.249 8	60	30
4	10	0.4	0.248 5	120	59
6	10	0.6	0.245 6	178	87
8	10	0.8	0.241 0	233	114

注:L 为车站长度;B 为车站宽度;z 为计算点离车站底面垂直距离

2.3 基坑开挖验算

利用里正深基坑软件对图 1 断面进行计算,计算结果如表 3 所示。

表 3 大墩站基坑计算结果

加固情况	位移/mm	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	被动区土压力状况
未加固	37.50	1 593	945	不满足
加固后	27.94	1 326	715	满足

由表 3 可知,加固后基坑能有效减小围护结构变形和连续墙内力,并能加大被动区的土压力。在基坑周边存在重要建(构)筑物时,加固作用明显。

3 软基处理方案

3.1 常用软基处理方案

- 目前,常用的地铁车站地基处理方案主要有钻孔桩、堆载预压排水固结法、强夯或强夯置换法、高压旋喷桩、三轴搅拌桩^[1-11]等。各方案的优劣如下:
- (1) 钻孔桩:是一项成熟的地基处理方案,近年来较多应用到地铁车站结构,其优点在于受力明确,工程造价相对较低,缺点是不能有效减小基坑开挖期间的变形,一般需与其余加固方案联合使用。
- (2) 三轴搅拌桩:目前我国华东、华南地区较多采用三轴搅拌桩加固,其施工工艺已较成熟,但造价相对较高。

(3) 堆载预压排水固结法:该法造价较低、技术简单,但施工周期长,在地铁工程中一般用于需大面积软基处理的车辆段及停车场等。

(4) 强夯或强夯置换法:此法造价最低,但置换增加了基坑深度,增加了基坑开挖风险,一般应用于局部基底软土较薄区域。

3.2 方案比选

大墩站一期施工段基坑总长 86.75 m,长度较小,不适宜采用堆载预压排水法;基底软土厚 6~11 m,不适宜采用强夯或强夯置换法。参考广州、宁波、上海等地做法,通过设计总体组统筹分析,形成图 2 所示的 4 个软基处理方案并进行比选。

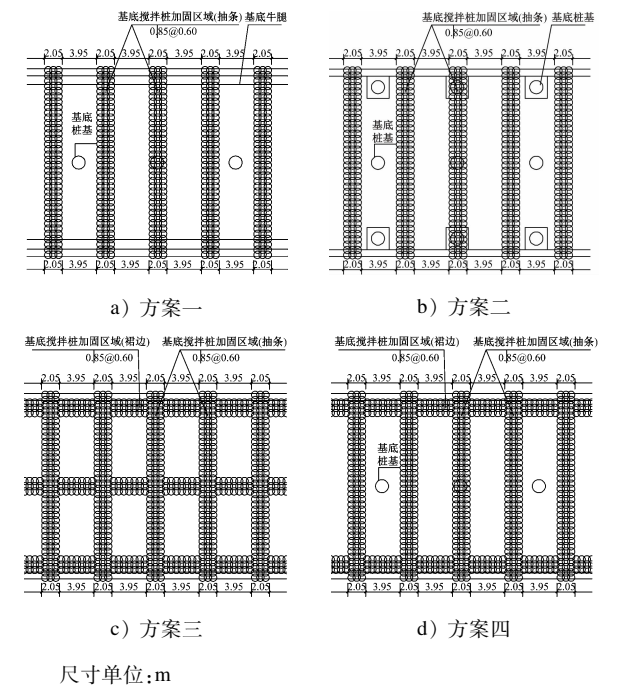


图 2 大墩站软基加固方案

3.2.1 方案一:桩基+牛腿+三轴搅拌桩抽条

三轴搅拌桩抽条:由于软土基坑开挖期间外侧土压力较大,内侧软土能提供的被动土压力有限,在不加固的情况下,变形不受控,因此,考虑在连续墙接头部位进行抽条加固。抽条加固宽度 2.05 m,横向间距 6 m(连续墙宽度),加固至基底以下 4 m,相当于一道支撑作用在连续墙上,减小连续墙竖向及横向跨度,减小基坑开挖期间变形。

桩基:承担柱子向下传递的竖向力。
牛腿:承担侧墙向下传递的竖向力。
本方案受力明确,造价较低(每延米约 4.7 万元),但对牛腿预埋件要求较高,受控于施工方。

3.2.2 方案二:桩基+三轴搅拌桩抽条

三轴搅拌桩抽条及中部桩基作用同方案一,两侧采用桩基替换方案一中的牛腿。其优点在于质量可控,缺点是承台施工周期长,不利于快速封底,且改变了两侧墙结构受力状态,使结构受力复杂。本方案对防水施工影响最大,造价约为每延米 5.0 万元。

3.2.3 方案三:三轴搅拌桩裙边+抽条

横向抽条除有类似方案一中的支撑作用外,与中部纵向抽条、两侧裙边共同形成复合地基。中部抽条、裙边与方案一中桩基、牛腿的作用相同。本方案仅采用一种加固手段,施工方便,且裙边对基坑开挖变形控制有利,基坑开挖风险更低,但其造价相对较高。按加固至基底以下 11 m 时计算,造价约为每延米 9.2 万元,接近方案一加固费用的 2 倍。

3.2.4 方案四:桩基+三轴搅拌桩裙边+抽条

桩、抽条与裙边的组合,中间一排桩替换方案三中的中部纵向抽条。此方案中桩、三轴搅拌桩优劣同上,造价高于方案一和方案二,略低于方案三。

3.2.5 综合比选

综合上述分析,各方案优缺点见表 4。大墩站主要从造价和施工风险方面考虑。方案一与方案二造价相对较低,但方案一未改变主体结构受力状态,风险较方案二低。方案一比方案三、方案四风险稍大,但方案三、方案四造价接近方案一的 2 倍。综合考虑上述方案优劣及佛山地铁 3 号线相关情况,本站加固方案选择方案一。

表 4 大墩站软基加固方案比选

方案	优点	缺点
方案一	造价低	施工作业要求高
方案二	质量可控,造价较低	施工风险较大,主体结构受力不利
方案三	质量较高,施工风险低	造价高
方案四	质量可控	造价较高

4 施工情况

目前,大墩站一期已施工完毕,基底承载力及沉降经复核满足要求。施工期间,图 1 中断面基坑两侧连续墙实测位移与计算位移如表 5 所示。

由表 5 可知:① 计算与实测位移在开挖期间增长较快,回筑阶段变化较小,最大监测位移大于最大计算位移;② 开挖第二层土时,设计工况(加固及

不加固)计算位移均大于监测位移,之后监测位移均大于计算位移(这是因为第三道钢支撑架设不及时,导致第二、三层土同时开挖,连续墙位移发生突变,同时牛腿钢筋接驳器预埋位置不准,导致大量植筋,延长了工期,加大了变形;③东、西两侧监测点扣除超挖变形影响后,最终变形分别为29.7 mm、28.8 mm,与设计变形最大值27.94 mm接近,说明加固效果与设计吻合。

表5 大墩站一期施工各工况连续墙位移对比 mm				
工况	计算位移		监测位移	
	不加固	加固后	东侧	西侧
开挖零层土	4.44	4.45	2.00	2.00
开挖一层土	15.59	15.80	3.75	3.44
开挖二层土	26.55	23.09	17.50	20.70
加第三道支撑	25.20	22.06	30.40	50.60
开挖三层土	37.47	23.83	41.70	58.40
拆除第三道支撑	37.50	27.94	42.70	58.40
拆除第二道支撑	37.07	26.93	42.60	58.70
拆除第一道支撑	37.09	27.02	42.60	58.70

注:未架设第三道支撑便开挖第三层土,导致东、西侧连续墙突变分别为13 mm和29.9 mm

5 结论与展望

5.1 结论

- (1) 软基车站结构基底承载力满足要求,施工期间需做好排水固结或采取有效措施保证机械施工安全。
- (2) 无上盖地铁车站基底变形可按回弹再压缩进行计算,基底存在软弱土层时,需采取加固措施,以满足竖向变形要求。
- (3) 加固对基坑开挖变形及内力控制作用明显,周边存在重要建(构)筑物时,需按加固控制。
- (4) 牛腿+桩基+三轴搅拌桩抽条加固方案费用最低,但需严控施工质量,否则将影响牛腿质量及加大基坑开挖风险。
- (5) 不考虑费用时,三轴搅拌桩裙边+抽条方案最优,但目前无加固后回弹试验作为支撑,其具体加固效果尚有待研究。

5.2 展望

- (1) 建议地铁软基勘察报告提供基底回弹、再压缩等相关参数,为相关设计提供依据。
- (2) 针对城市建成区软土基坑,可对方案三进

行局部加固研究,提出最小加固厚度比,并考虑人工费等,与其余方案进行比选。对处于未建成区的软土基坑,考虑周边基坑开挖进行主动保护设计,提出加固要求。

(3) 有条件时,可对不同加固方案的基底最终沉降量进行监测,并与理论计算进行对比分析,从控制变形角度评判加固方案的优劣性。

参考文献

[1] 王鹏. 地铁车辆段软土地基沉降控制方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.

[2] 宋绪国,隋孝民. 深圳地铁南头车辆段软基处理设计[J]. 铁道标准设计,2006(4):24.

[3] 许军,张开顺. 软弱砂层下的地铁隧道穿越建筑物的加固技术及注浆控制效果分析[J]. 城市轨道交通研究,2017(5):122.

[4] 龚彦峰,王爱武,周坤,等. 软土盾构隧道基底加固对长期沉降的影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2017(10):19.

[5] 李彦涛,范欣荣,高岗荣,等. 地铁联络通道软基加固施工与监测[J]. 煤炭科学技术,2001(10):20.

[6] 张涛. 浅谈西安地铁施工软基处理施工技术应用[J]. 科技创新导报,2017,14(24):77.

[7] 朱志祥,刘少炜,刘新荣,等. 某地铁车站软土深基坑加固效果研究[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(3):716.

[8] 刘雪珠,张艳书,顾蒙娜,等. 坑底加固置换率对杭州地铁湘湖站深基坑安全的影响分析[J]. 岩土工程学报,2016,38(增刊2):136.

[9] 李卓峰,林伟岸,朱瑶宏,等. 坑底加固控制地铁基坑开挖引起土体位移的现场测试与分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2017,51(8):1475.

[10] 汪清河. 地铁车站软土深基坑水泥搅拌桩加固施工技术[J]. 工程与建设,2015,29(3):396.

[11] 汤翔宇,仇志斌. 邻近拟建地铁深基坑的现有基坑加固与改造设计[J]. 建筑结构,2013,43(增刊1):898.

[12] 游思琴,陈启军,董如意,等. 佛山市城市轨道交通3号线工程大墩站详细勘察阶段岩土工程勘察报告(第一版)[R]. 佛山:中水珠江规划勘测设计有限公司,2016.

[13] 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,2011:22-23,137-139.

[14] 周秋娟. 不同卸荷路径下软土变形特性试验研究[J]. 工程勘察,2013,41(10):17.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构安全保护技术规范:CJJ/T 202—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013:24.

(收稿日期:2018-07-26)