

上海某地铁车站室内模型试验降水沉降分析

唐益群^{1,2}, 栾长青²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:随着城市地下空间的开发利用,深基坑工程越来越受到人们的关注,尤其是软土地区毗邻已运营地铁段的深基坑开挖更是一项高难度的工程。通过对上海地铁某站的室内降水实验,并在整理和分析了降水井水位和流量、孔隙水压力、分层沉降量、地表沉降量等各种监测数据的基础上,总结出了降水时影响沉降因素之间的关系,为之后的工程降水提供较好的设计经验和改善方案,确保了该地铁基坑工程施工的安全性和围护结构的整体稳定性。

关键词:地铁;室内模型试验;降水;渗透性;隔水层;孔隙水压力

中图分类号:TU94⁺3.1 文献标志码:A 文章编号:1006-7329(2008)04-0068-06

Settlement Analysis of a Laboratory Model Test of Dewatering of a Metro Station in Shanghai

TANG Yi-qun^{1, 2}, LUAN Chang-qing²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092 P. R. China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 P. R. China)

Abstract: With the exploitation of urban underground spaces, deep foundation pit constructions increasingly are evaluated. Pits in soft soil areas adjacent to operating subway are especially difficult to excavate. After indoor testing of water drainage for a station on the Shanghai Metro line 9, and on the basis of treatment and analysis of water level drain hole and flux monitoring data, pore water pressure, layered settlement and surface soil settlement, we summarize the relationship between factors influencing settlement during water drainage. This research offers design experience and blueprints for water drainage and ensures the safety of metro pit construction and enclosure structure stability.

Key words: metro; laboratory model test; water drainage; permeability; water-resistant layer; pore water pressure

长江三角洲是我国经济最为发达的地区,也是城市化程度最高的地区之一。近年来,随着城市地下空间的开发利用,在城市建设过程中遇到越来越多的深基坑工程。特别是在沿海经济发达的软土地区,深基坑已经成为一项投资高,风险较大的工程。在文献^[1-2]中提出当前城市地下工程活动中的20个最为突出的困难场合,其中将深基坑毗邻已运营地铁段的开挖列为难度最为突出的工程。主要是因为基坑开挖或降水等工序造地面沉降对周边环境的影响^[3-5],因此研究降水对各地层及地表产生的沉降规律和对周边环境的影响具有重要的意义。

1 工程概况

上海某地铁车站,西起中山西路,东至凯旋路,偏东西走向。车站主体结构外包尺寸长285.80 m,标准段宽21.2 m,站台宽10 m,是地下四层岛式车站。本车站主要由南北的端头井、标准段、南侧的小基坑三个部分组成,支护方案均采用1.2 m地下墙和沿基坑深度方向设置九道支撑,分别采用钢筋混凝土和Φ609单拼或双拼钢管互相间隔支撑。车站主体基坑开挖深度标准段最深为27.855 m,端头井最深为29.718 m,为目前上海开挖最深的地铁车站。

* 收稿日期:2008-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(40372124)

作者简介:唐益群(1952-),男,博士生导师,主要从事工程地质与水文地质等方面科研与教学工作。(E-mail)kaobo2005@163.com
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

该场地工程地质条件比较复杂,本车站区域有④1层灰色淤泥质粘土,层厚约 10.00~11.50 m,第⑥层暗绿色粘性土(硬土层)缺失。地下水位埋深为0.50~1.50 m,微承压含水层分布于第④2层土中,其水位埋深一般在 3~6 m;第一承压含水层主要分布于第⑦层土中,水位埋深 4~12 m。

该车站周边环境复杂,东侧有运营的 3 号线高架轻轨,建成的 4 号线地铁车站,基坑的南侧有上海七建装潢总汇,北侧有家饰佳精品装饰城、金银岛等建筑,基坑的西侧有中山西路高架道路,周边环境要求非常严格(如图 1)。而轻轨 3 号线高架,沉降控制要求最高,控制变形要求为 3 mm^[6-7]。所以,通过室内降水模型实验的实验结果如降水对地面沉降的影响及空隙水压力随时间的规律等,可以找出验证设计方案是否合理及对现场降水施工指导作用。

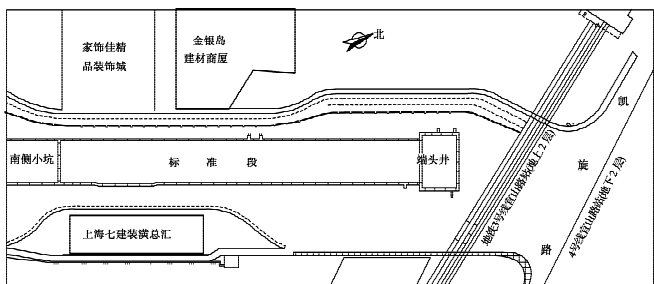


图 1 地铁车站平面图

2 室内模型实验

2.1 室内模型实验试验设计

本次室内大型模型试验是以上海某地铁车站的端头井段为原型的,端头井深入第⑦2层土。位置特殊,紧邻轻轨三号线,最近仅为 11 m,沉降控制要求高(在 3 mm 之内)。此次试验中端头井缩小比例为现场大小的 1/25。根据现场施工设计端头井段基坑开挖时,需要在第⑦层中降承压水,降水位置比轻轨的桩基还要深,也就是在轻轨桩基以下的范围内降水,必然会引起第⑦层和第⑦层以上的土层沉降。所以改变最初的

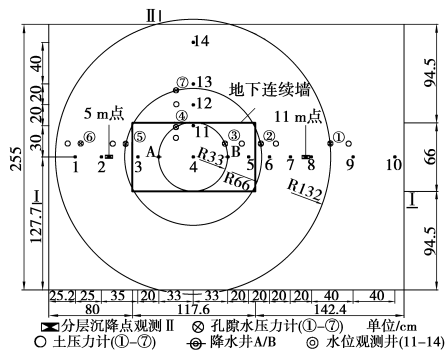


图 2 模型箱及井点位置图

端头井基坑连续墙设计深度 52 m 为 62 m 以控制土层的沉降。因此本次试验对不同深度的连续墙下基坑降水进行了模型试验,从实验的基础上来阐释墙深对基坑降水的影响。

试验所用的是由钢板焊接成的密封矩形(3.4 m×2.55 m×1.25 m)。模型地基中,土层自上而下分别为表土层,淤泥质粘土层、薄砂质粉土层(仅 2 cm)、粉质粘土层、粉细砂层,概化后为原地层厚度的 1/100。在粉细砂层底部沿四壁每隔 1.2 m 设有注水孔、泄水孔,粉细砂层上部设有测水孔,测水孔接测压管用于观察边界水头的变化。在模型箱内侧,注水孔、泄水孔用打孔 PVC 管连接,确保注水、泄水时土层中水均匀渗透,粉细砂层四周水位保持均衡。同时按照现场端头井连续墙(由无缝无底矩形钢箱代替)位置大小与连续墙深度及其内粉细砂层降水井原型(A 和 B)缩小相应比例到模型箱内,进行降水试验,之后提升连续墙(即由深度 62 cm 到 52 cm),稳定后再进行降水试验。

在模型箱与降水井连线纵横中轴线上,布置不同位置的水位观测井来观测降水过程中水位变化规律,同时为了考察不同土层中土压力、孔隙水压力的变化特性,按现场试验和工程需要埋设了体积小、灵敏度高的土压计和水压计(图 2、图 3 和图 4)。在端头井外纵横中轴线上,由于地基土表面上的不同位置处摆放了百分表用于观测地面沉降变化规律,考察不同土层的变形情况,在特殊考察位置还进行了分层沉降的观测。

2.2 室内模型实验试验步骤

以某地铁车站工程地质条件为背景,根据现场的土层厚度、土的类型以及埋置深度,模拟概化为等层厚、缩小比例的模型试验土层,其物理力学性质介绍如表 1^[8],同时埋设土压力计、水压力计及 PVC 管,并采用应力应变转换器—YE2539 高速静态应变测试系统以确保数据转换的精度和速度。根据现场的土层顺序填土完毕后,进水固结,土层自重作用固结 60 d 后,根据土层表面的百分表不再动,表明土层基本自重固结完成,具备了降水的条件。

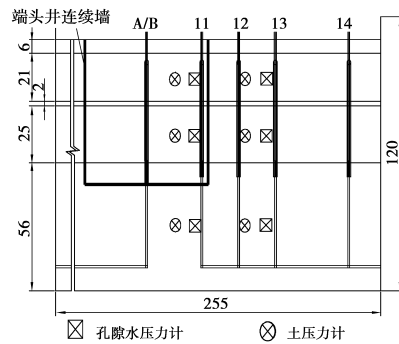


图 3 模型箱的 II—II 剖面图

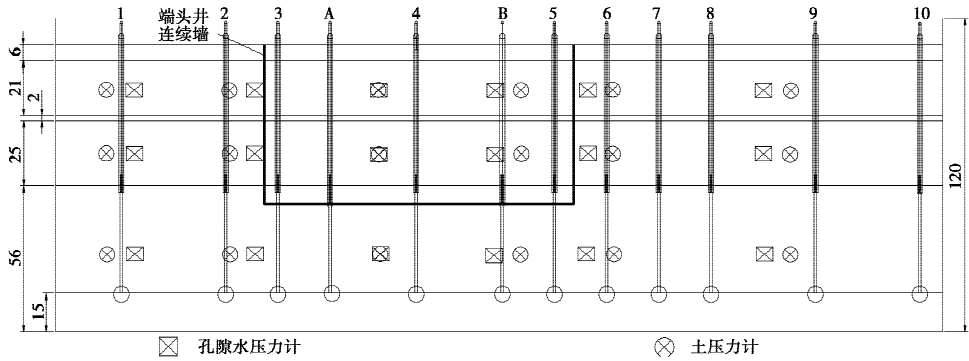


图 4 模型箱的 I—I 剖面图

表 1 模型箱内填土的力学性质

土层名称	厚度/cm	含水量/%	重度/g	孔隙比	粘聚力/KPa	内摩擦角/°	压缩模量/MPa
粘土	6	33.4	18.4	0.95	19	14	
淤泥质粘土	21	41.2	16.1	1.15	13	8.5	1.98
砂质粉土	2	24.7	17.8	0.69	0	28	
粉质粘土	25	20.4	19.4	0.61	34	18.5	3.53
粉细砂	56	20.6	18.4	0.61	0	27.5	12.5

本次室内模型降水试验分两种情况进行,第 1 种模型箱中端头井连续墙深为 62 cm(现场连续墙为 62 m)既连续墙进入粉细砂层土时进行试验,第 2 种,使用千斤顶将模型箱将端头井连续墙钢箱从原先深 62 cm 分数次平稳提升至 52 cm,使连续墙进入粉质粘土层,提升完毕后保养恢复土体数日,然后进行降水试验。

3 室内模型实验数据分析

3.1 水量分析

根据试验要求,A、B 降水井在端头井在 62 cm 处的水量也与现场的出水量大致相仿,其中第 2 组在稳定后略小于第 1 组两降水井出水量(见图 5 和图 6)。

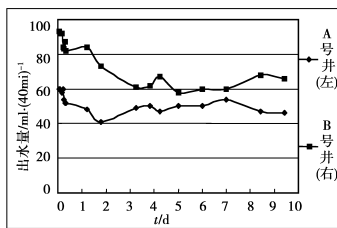


图 5 第 1 组水量与时间的关系曲线

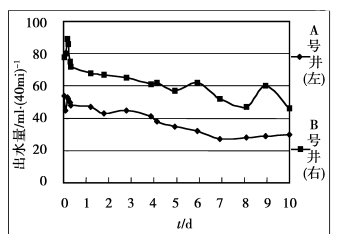


图 6 第 2 组水量与时间的关系曲线

降趋势,第 1 组出水量在前 3 d 急剧下降,之后基本稳定,而第 2 组则在 3 d 后仍有小幅度下降,这可能与第 2 组试验后期有少量时间供水压力不十分稳定有关。与现场降水试验类似,可以知道在降水的 3 d 后,降水井供水一出水基本达到稳定,也即流场保持相对稳定。

3.2 沉降分析

选取模型内相应于现场场地与轻轨三号线距离端头井的最近点位“11 m”分层沉降点来分析(图 7 和图 8)。可以发现:两组试验中粉细砂层的沉降在降水开始的 3 d 内处于急剧沉降期,主固结基本完成,沉降值占总沉降量的 70%~90%。3 天后进入沉降稳定期,沉降值随时间只是略有减小。容易看出,粉细砂层的急剧沉降期与两降水井出水量达到稳定的时间基本一致,说明流场的变化直接影响粉细砂层沉降变化,这可以认为粉细砂层弹性释水发生沉降是其沉降的主要因素。

粉质粘土层作为粉细砂层的上覆地层,但因为紧邻直接降水层,在降水过程中产生较大的垂直水力梯度,土层中孔隙水释放进入降水层引起的该层变形沉降较大,在图 7 和图 8 中明显地看到,粉质粘土层由于降水引起的沉降量超过了粉细砂层,成为分层沉降总量中的重要因子。在两组试验中,粉质粘土层在开始降水后的 7 d 内沉降曲线下降幅度很大,之后下降趋势明显放缓,其中 1~3 d 内受粉细砂层急剧沉降的影响,曲线斜率最大,在粉细砂层稳定后由于垂向失水作用引起的粘土层主固结已占其沉降主导因素,故下降趋势依然明显,这一过程完成后其沉降量已占粉质粘土层总沉降量的 80%左右。

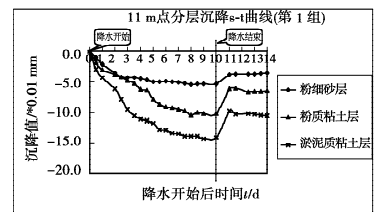


图 7 第一组“11 m”点分层沉降历时曲线

分析两组曲线可以发现,降水井出水量总体呈下

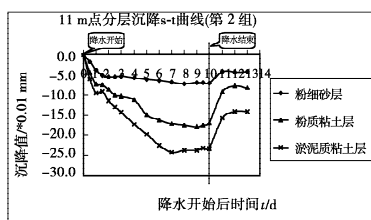


图 8 第二组“11 m”点分层沉降历时曲线

将地层层顶沉降稳定值减去各地层层顶沉降稳定值得到这一地层单层绝对变形量,粉细砂层作为主要降水层,但是由于它的压缩模量大,变形能力弱,所以它的沉降变形往往会小于粘土层,在总分层沉降中所占比例为 30%~40%左右。粉质粘土层对总分层沉降较大,占总沉降值的 35%~45%左右。对比第 1、2 组分层沉降图发现第 2 组粉质粘土层的沉降明显大于第 1 组,这应该与连续墙深入粉细砂层较多,限制了连续墙以外粉细砂层水位下降对粉质粘土层垂向失水作用的影响有关。现场 52 m 连续墙状态降水中各层沉降贡献值与第 2 组 52 cm 连续墙状态降水试验中得到的结果接近,同样地,现场粉质粘土层沉降贡献值大于第 1 组 62 cm 连续墙降水试验结果,进一步应证了前述观点。

3.3 现场试降水沉降分析

选取部分控制点,降水开始后西 80、西 20、中、东 20、东 80 分层沉降监测孔各分层沉降值随时间变化分别如图 9~13。分析各曲线可以知道各分层沉降值在

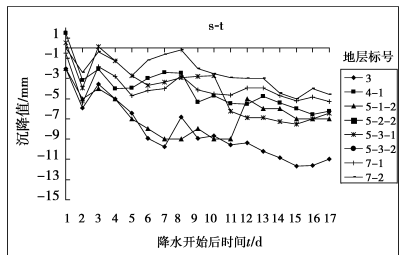


图 10 西 80 点分层沉降历时曲线

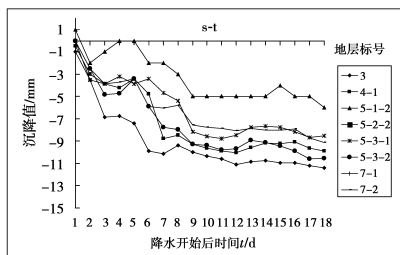


图 11 西 20 点分层沉降历时曲线

10 d 后进入稳定沉降阶段,这与砂性土层快速沉降、稳定以及主要粘性土层失水固结基本完成有关,可以作为分层沉降稳定值加以分析。三口降水井在第 7 层中,在开始降水初期的 2~3 d 里,承压水层由于瞬间弹性释水,将有一个明显的沉降急增过程。而且各地层受降水沉降层的影响,发生随动效应,沉降亦急剧增

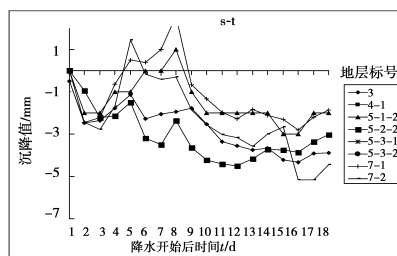


图 11 东 80 点分层沉降历时曲线

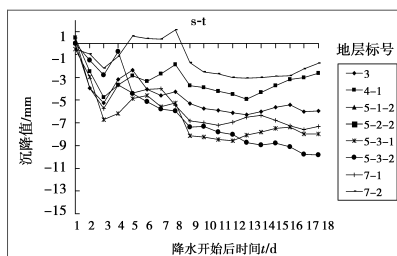


图 12 东 20 点分层沉降历时曲线

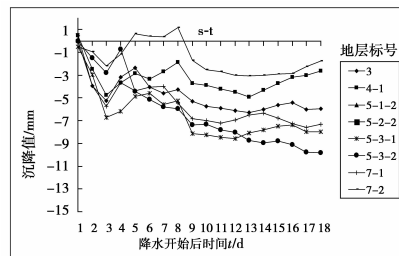


图 13 中点分层沉降历时曲线

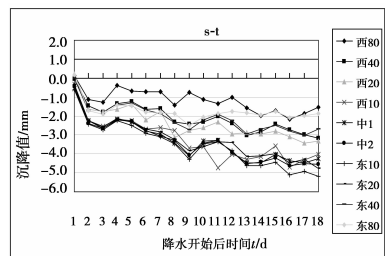


图 14 地面沉降变化历时曲线

加。除图 12 不是很明显外,在降水过程中,曲线显示土层有沉降一回弹反复变化,这可能与前期弹性释水后汇水造成承压水层弹性释水—贮水过程反复进行但还没有达到平衡有关,虽有反复,但整体沉降趋于增加。由于第 5-3-2 层粉质粘土与其下第 7 层砂性土在降水时存在较大的垂直水力梯度,粘性土层中孔隙水在此水力梯度作用下进入降水层,造成第 5-3-2 层粉质粘土的变形大于第 7-1 层砂性土的变形值,而且第 5-3-2 与第 5-3-1 层及以上软土层沉降变形曲线变化值随动效应更加明显。东 80 点第 5-2-2 层砂质粉土沉降变化值较其它层最大,除随第 7 层土随动外,这与存在垂向水力联系发生弹性释水加剧其沉降变化有关。

图 14 显示了对应各分层沉降孔位的地面沉降值

变化。对比各分层沉降孔点沉降值变化,很容易发现地面各点明显受地层随动效应影响,但其趋势更加缓和,变化值在 0 mm~ -5 mm 之间,同样也有沉降回弹反复变化,但沉降曲线总体亦趋向于变大;降水中心区域偏东地面沉降值较西地面沉降值大,与分层沉降值基本一致;由于主固结过程时间较短,降水的第 1 到第 3 天地面沉降均有急增现象,这与分层沉降变化具有相同的规律。

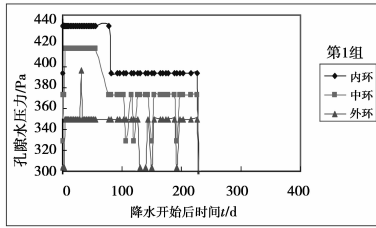


图 14 第一组粉细砂层孔隙水压力变化线

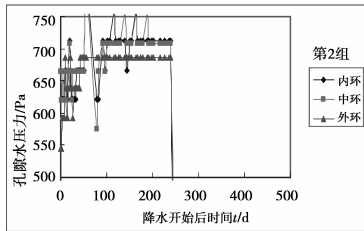


图 16 第二组粉细砂层孔隙水压力变化线

3.4 室内实验孔隙水压力的分析

图 15 和图 16 分析知道,粉细砂层中弹性变形占其变形的比重较大,通过这两组图形可以得到很好的解释,在开始降水后的前几分钟,各环线点即达到一定应力水平,说明产生了即时的弹性释水,土体中孔隙水压力的迅速减小将加速转变为有效应力的增加,这也就是降水开始后粉细砂层土体发生急剧沉降的根本原因。各环线点孔隙水压力变化曲线均为较好的矩形图线,开始降水和结束降水后都迅速攀升或者回归到零点,反映灵敏,说明弹性释水或弹性贮水引起的弹性变形是其地层变化的主要原因。

可以发现,第一组各环线点孔隙水压力小于第 2 组相应点较多,最终使得第 2 组的水位降落值大于第 1 组的现象。这说明连续墙的加深有效地减弱了由于降水而引起的孔隙水压力改变。

4 结 论

1)在两组实验条件下粉细砂层在降水实验开始的前 3 d,两组试验中粉细砂层处于急剧沉降期,主固结基本完成,沉降值占总沉降量的 70%~90%。粉质粘

土层作为粉细砂层的上覆地层,受到粉细砂层沉降的影响,其本身沉降占自身总沉降量的 80%左右,整个地层的总沉降量由粉细砂层和粉质粘土层产生的沉降最多。

2)第⑦2层承压水层渗透性非常好,对降水反应敏感,但降水漏斗的形状分布与相邻地层分布有关,⑦1层对抽水贡献比较大,且与其自身的层厚和埋深有关,但渗透性不及第⑦2层。

3)第⑤3-2层并非为完全隔水层,因下覆土层的水压下降,引起本土层孔隙水流失造成土体相对较大的固结沉降;第⑤2-2层虽远离降水中心,但其本身具备的良好渗透性和降水补给范围的扩大疏通,同样会引起孔隙水压下降

参考文献:

- [1] 孙钧. 城市地下工程活动的环境土工学问题(上)[M]. 地下工程与隧道,1999.
- [2] 孙钧. 城市地下工程活动的环境土工学问题(下)[M]. 地下工程与隧道,2000.
- [3] 朱瑞钧,王吉光,齐干. 杭州某商业楼基坑变形分析[J]. 重庆建筑大学学报,2004,(2):54-56.
ZHU Rui-jin, WANG Ji-guang, QI Gan. Analysis on foundation pit deformation of a commercial building in Hangzhou[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004,(2):54-56.
- [4] 潘晓丽. 大型基坑土方工程量计算探误及其算法推荐[J]. 重庆建筑大学学报,2000,(4):124-126.
PAN Xiao-li. Probing into error in calculating the volume of large earthmoving work and algorithm for pit[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University,2000,(4):124-126.
- [5] 朱瑞钧,高谦,齐干. 深基坑支护桩周边建筑物沉降分析[J]. 重庆建筑大学学报,2006,(2):52-55.
Zhu Rui-jun, Gao Qian, Qi Gan. settlement analysis on building near retaining pile of deep foundation pit[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006,(2):52-55.
- [6] 上海市工程建设规范《基坑工程设计规范》(DGJ08-61-1997)[S]. 上海:上海勘察设计协会,1997.
- [7] 《上海市地铁基坑工程施工规范》(SZ-08-2000)[M]. 上海:上海勘察设计协会,2000.
- [8] 赵志缙等. 简明深基坑工程施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.

(编辑 胡 玲)