

粉细砂地层柱洞法下穿 市政道路中跨扣拱工序优化研究

李小雷¹, 朱正国², 李振源²

(1. 中国中铁航空港建设集团有限公司, 北京 100093; 2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:对深孔注浆地层固结体物理力学参数进行直剪试验及三轴试验等室内试验, 得到固结体的各物理力学指标, 且认为三轴试验所得各指标更为真实、可靠。在此基础上, 对粉细砂地层浅埋暗挖车站柱洞法中跨扣拱工序进行了数值模拟, 对比分析了地表沉降和结构应力特征, 提出了合理施工工序建议。研究结果为石家庄地铁平安大街站提供了技术支持, 也可供类似工程参考。

关键词:试验; 粉细砂地层; 车站; 柱洞法; 施工工序

中图分类号: TU94.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2018)02-0015-07

0 引言

随着地铁建设的快速发展, 暗挖车站施工工法日渐完善, 特别是超大断面的暗挖施工, 柱洞法得到了广泛应用, 柱洞法施工工序较多, 不同的柱洞法施工工序对围岩应力和支护结构荷载变化的影响不同, 这直接影响隧道施工的安全进行。因此, 优化柱洞法施工工序对提高地铁车站施工安全、缩短工期和降低工程造价具有重要的意义。但在施工工序选择过程中, 仍以工程类比法为主, 理论分析较少^[1-8], 特别是在粉细砂地层下穿城市主干道且地层中管线众多的复杂环境下, 更应利用三维数值计算软件模拟各施工工序的详细施工过程, 选取适合此复杂条件下粉细砂地层浅埋暗挖车站施工工序。

以石家庄地铁平安大街站为工程背景, 采用 FLAC3D 有限差分软件模拟不同的中跨扣拱工序下沉降及变形规律。

1 深孔注浆地层固结体的物理力学特性

深孔注浆施工采用的浆液为超细水泥—水玻璃浆液, 超细水泥浆与水玻璃浆配比控制在 1:1~1:0.6, 并经试验确定。注浆完成后, 在现场进行随机开挖取样, 加工成 $d=50\text{ mm}$ ($h/d=2\sim 2.25$, $h/d=1\sim 1.5$) 圆柱形试件进行常规三轴试验及物理力学指标的试验。通过室内试验得到的深孔注浆地层固结体的物理指标及力学特性试验结果见表 1。

由表 1 可知, 固结体的泊松比平均值为 0.21, 变异性较小; 变形模量较大, 且变异性较大。直剪试验和三轴试验得到的固结体粘聚力基本相近, 而直剪试验得到的内摩擦角比三轴试验得到的内摩擦角小 12.2%; 这主要是因三轴试验的剪切破坏面不是人为固定的, 而直剪试验的剪切面是由人为固定的, 所以可认为三轴试验的实验结果更接近真实情况, 这样数值模拟中注浆固结体的计算参数按三轴试验结果取值。

收稿日期: 2016-12-06 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2018.02.04

基金项目: 国家自然科学基金(51478277); 河北省自然科学基金(E2016210018); 河北省高校百名创新人才支持计划(Ⅲ)(SLRC2017054)

通讯作者: 朱正国(1977—), 男, 教授, 主要从事于隧道与地下工程的教学和科研工作。E-mail: myztx@163.com

作者简介: 李小雷(1979—), 男, 工程师, 主要从事于隧道施工及管理工作。E-mail: 437090292@qq.com

李小雷, 朱正国, 李振源. 粉细砂地层柱洞法下穿市政道路中跨扣拱工序优化研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2018, 31(2): 15-20.

表 1 深孔注浆地层固结体的物理指标及力学特性试验结果

项目	物理指标			常规试验			三轴压缩试验			
	饱和容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	干燥容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	孔隙率/ %	单轴抗压 强度/kPa	变形模量/ MPa	泊松比	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)
最大值	20.11	17.67	48.4	95.56	217.68	0.23	—	—	—	—
最小值	16.90	12.59	27.7	46.78	158.79	0.19	—	—	—	—
平均值	19.49	15.79	38.8	71.28	188.31	0.21	20.5	28.1	20.0	32.0
变异系数/%	8.91	3.79	3.40	6.99	10.31	3.49	—	—	—	—

2 计算工况及计算模型

2.1 计算工况

柱洞法原设计施工过程:先开挖中间立柱位置的两个小导洞,完全贯通后施作底梁、柱、顶梁。施作完成后进行中跨三台阶部分开挖,施作横撑(扣拱、底板),然后对称开挖左右侧导洞,贯通后施作二衬,边作二衬边拆除临时支撑。

原设计中跨上、中、下三台阶施工顺序为全部开挖完成后才进行扣拱混凝土的施工,因顶板施工前需切割柱洞格栅,受力体系发生转换,柱洞初期支护发生偏压,对控制沉降和钢管柱变形产生影响。为最大限度减小变形,优化施工顺序:先只开挖中跨上台阶,上台阶贯通且沉降监测稳定后,就施工中跨顶板。待顶板混凝土强度达到设计要求,再进行中跨中部和下部的开挖。

为了更好地研究柱洞法施工对车站结构受力和地层的沉降产生的影响,变换柱洞法的中跨扣拱施工工序,通过数值模拟进行开挖计算,与原设计柱洞法施工工序进行比较分析。

工序一(中跨扣拱先扣):中跨先施工,但中跨先只开挖完上台阶就扣拱,再进行中跨中部和下部的开挖,中跨施工完再施工侧导洞。

工序二(侧导洞先施工,但中跨扣拱也先扣):左右侧导洞先施工,再进行中跨施工,但中跨施工工序同工序一,即中跨先只开挖上台阶后扣完拱再进行中跨中部和下部的开挖。

工序三(原设计工序,中跨后扣拱):中跨先施工,但中跨上、中、下三台阶先开挖完才扣拱,中跨施工完再施工侧导洞。

2.2 计算模型

计算模型在 X(横断面)、Y(车站轴线)、Z(竖向)3 个方向尺寸为 $80 \text{ m} \times 48 \text{ m} \times 38.97 \text{ m}$ (埋深 9.1 m),模型上面自由边界,其它方向边界施加法向约束。计算模型见图 1。

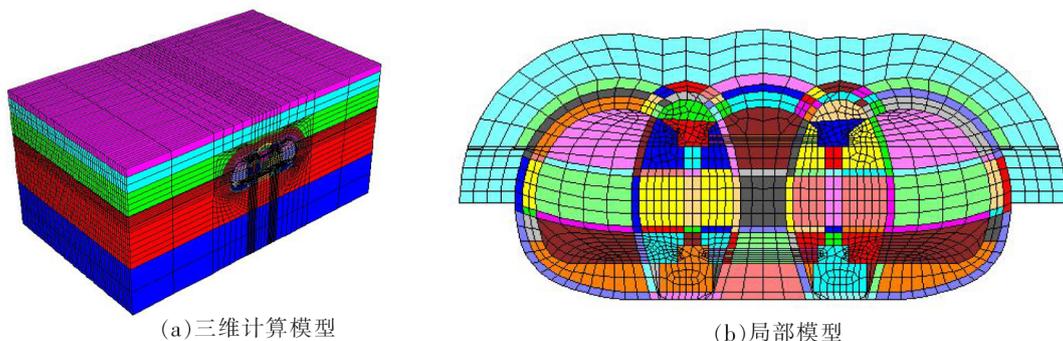


图 1 三维计算模型及局部模型

2.3 计算参数

初期支护中格栅间距为 0.5 m ,厚度为 35 cm 。从地表到上导洞顶土层依次为素填土、黄土状粉土、粉细

砂,上导洞部分土层为粉细砂,距上导洞底 1.34 m 及以下车站部分的土层为粉质黏土,粉质黏土以下的土层为中粗砂(含卵石),地层计算参数参考设计勘察资料及室内试验选取,各材料的物理力学指标见表 2。

表 2 地层及支护物理力学参数

材料类型	容重/(kN · m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
素填土	16.0	4.5	0.35	8	10
黄土状粉土	18.6	10.8	0.25	18	28
粉细砂	19.5	15.0	0.30	8	28
粉质黏土	19.5	26.7	0.30	28	19
中粗砂	21.0	95.0	0.28	8	35
深孔注浆固结体	19.5	188.3	0.21	20	32
初期支护	25.0	28 000	0.20	—	—
二衬	26.0	32 500	0.20	—	—
钢管柱	25.0	66 600	0.20	—	—
梁	25.0	30 000	0.20	—	—
横撑	26.0	65 160	0.20	—	—

注:钢管柱、梁、横撑等弹性模量需按等效刚度原则经转换计算求得。

3 模型计算及分析

3.1 地表沉降分析

3 种施工工序地表沉降与开挖步关系见图 2,地表沉降槽见图 3。

从图 2 和图 3 可以看出,变换柱洞法的施工工序,对地表沉降产生一定的影响,工序一(中跨扣拱先扣)相对于工序二(侧导洞先施工,但中跨扣拱也先扣)在控制地表沉降方面作用不是特别明显,但相对于工序三(原设计工序,中跨后扣拱)来说,对地表沉降有一定的控制作用,即中跨先扣拱效果较好。

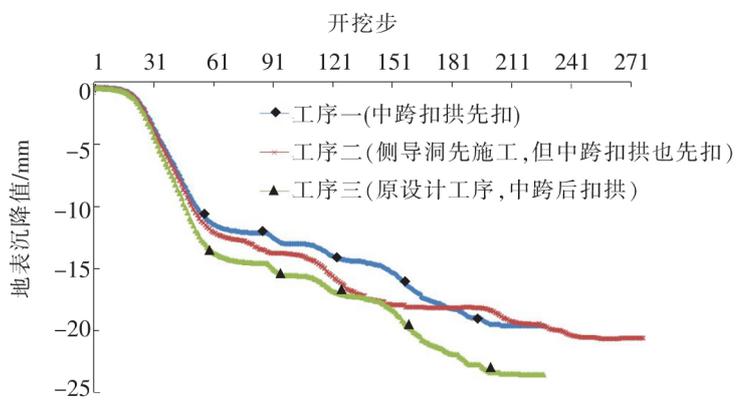


图 2 3 种施工工序的地表沉降与开挖步关系曲线

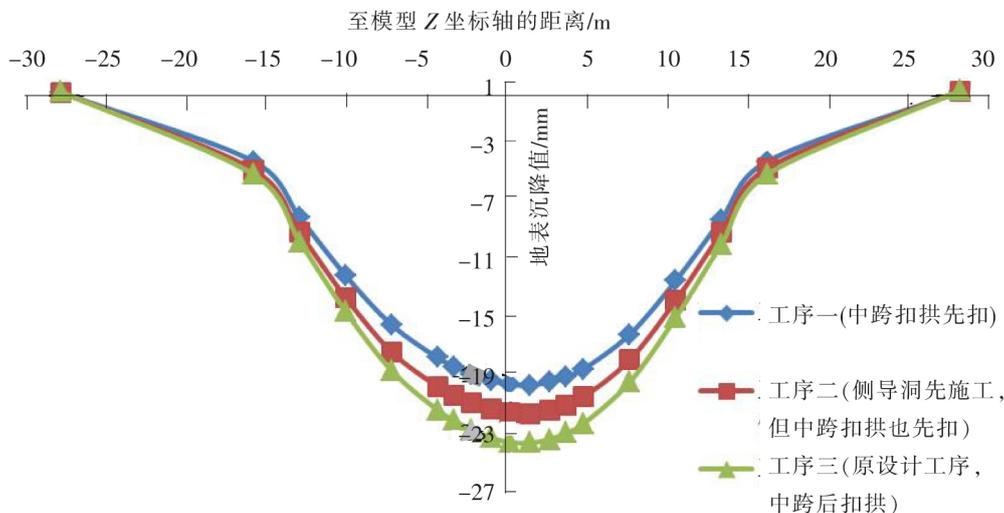


图 3 车站施工结束时不同工序地表沉降槽

3.2 结构应力分析

暗挖车站主体结构施工结束后工序一(中跨扣拱先扣)车站结构的最大主应力和最小主应力分别见图 4 和图 5(其它 2 种工序图略),3 种工序车站结构的最大、最小主应力的差值见表 3。

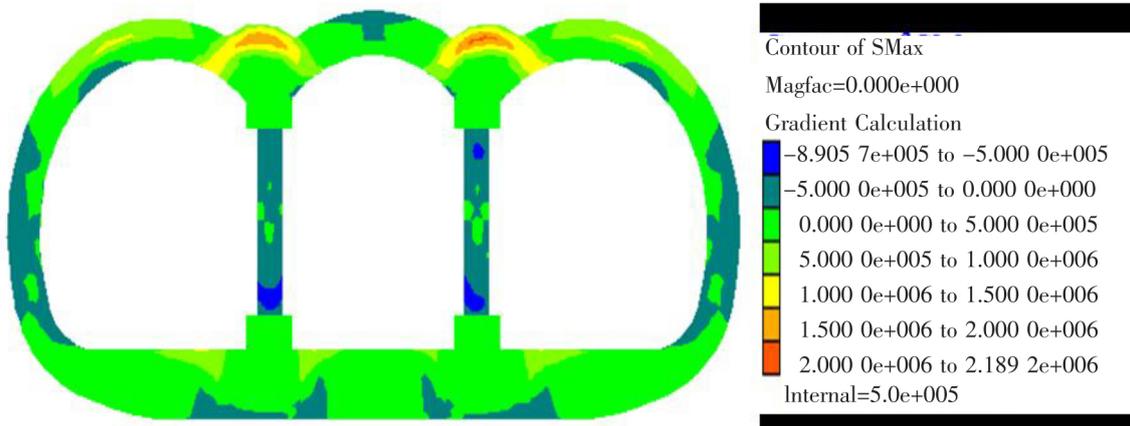


图 4 工序一(中跨扣拱先扣)施工结束后车站结构的最大主应力图

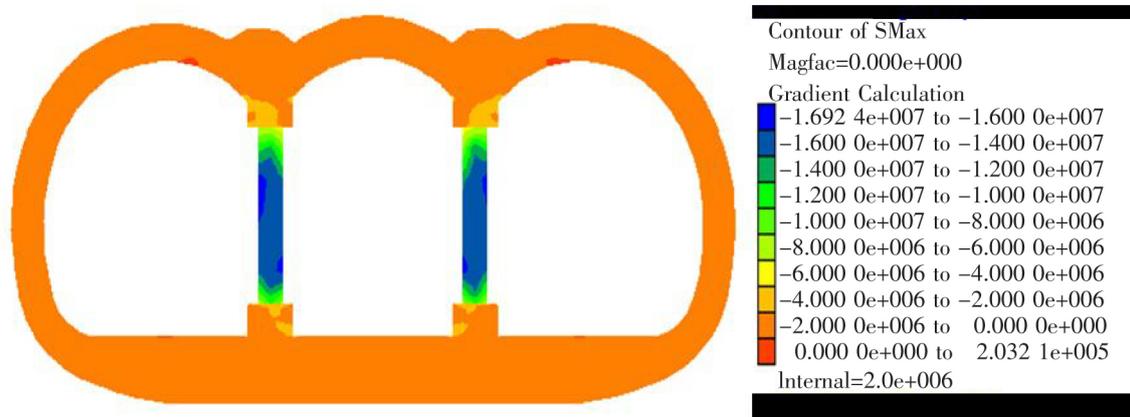


图 5 工序一(中跨扣拱先扣)施工结束后车站结构的最小主应力图

表 3 不同工序下车站施工结束后车站结构应力图

工序	最大拉应力	最大压应力
工序一(中跨扣拱先扣)	2.19	16.9
工序二(侧导洞先施工,但中跨扣拱也先扣)	2.40	16.9
工序三(原设计工序,中跨后扣拱)	2.44	17.1

由图 4、图 5、表 3 和计算结果得,3 种工序施工完成后,最大拉应力主要发生拱顶部位,工序一(中跨扣拱先扣)、工序二(侧导洞先施工,但中跨扣拱也先扣)和工序三(原设计工序,中跨后扣拱)施工产生的最大拉应力依次为 2.19 MPa、2.40 MPa 和 2.44 MPa,在结构安全范围之内,工序一(中跨扣拱先扣)施工产生的最大拉应力最小,其次为工序二,原设计工序最大。最大压应力主要发生在钢管柱上,工序一(中跨扣拱先扣)、工序二(侧导洞先施工,但中跨扣拱也先扣)和工序三(原设计工序,中跨后扣拱)施工产生的最大压应力依次为 16.9 MPa、16.9 MPa 和 17.1 MPa,在结构的安全范围之内,也是原设计工序最大。工序一(中跨扣拱先扣)开挖结束后车站结构的主应力有所减少,使车站结构受力更加合理,减少了车站结构破坏,使结构整体更加安全。

4 临时支撑选取和扣拱混凝土施工方法

4.1 临时支撑选取

原设计在两顶梁间设置 $\Phi 400$ 钢管临时支撑, 钢管支撑长度 5.0 m, 中跨在临时支撑处净宽 3 m, 5.0 m 长的钢管支撑质量约 480 kg, 整根钢支撑安装困难, 若分段安装, 钢管件的焊接质量无法达到母材强度。为此, 将原顶纵梁间距 3 m、 $\Phi 400 \times 10$ mm 的钢管支撑变更为间距 2.4 m 的 I28a 工字钢支撑, 工字钢支撑设在顶梁的钢管柱节点、跨中 1/3 和跨中 2/3 处, 共 19 道。此支撑在施工阶段以承受拉力为主, 工字钢和顶梁预埋钢板焊接牢固, 若工字钢分段安装, 则在工字钢腹板及翼板处绑上钢板进行围焊。

为掌握临时支撑的应力变化, 在出现较大拉力时能及时采取措施, 防止顶梁位移、扣拱混凝土出现裂缝, 在临时支撑上装设应变计, 监测应力变化。现场监测结果表明, 大部分钢支撑都呈现拉力, 最大拉力达 126.32 MPa, 而钢材的抗拉强度为 210 MPa, 所以, 钢支撑本身不会拉坏, 只可能钢支撑与两端接头的地方出问题, 现场确实也存在这样的情况, 因两侧接头不牢固出现拉裂现象, 施工中通过优化中跨扣拱工序来调整结构受力。



图 6 中跨开挖完成



图 7 临时支撑

4.2 扣拱混凝土施工方法

原设计扣拱顺序和优化后的扣拱顺序分别见图 8 和图 9。

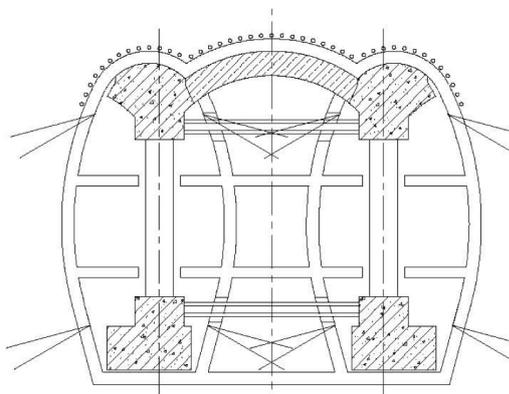


图 8 原设计扣拱顺序

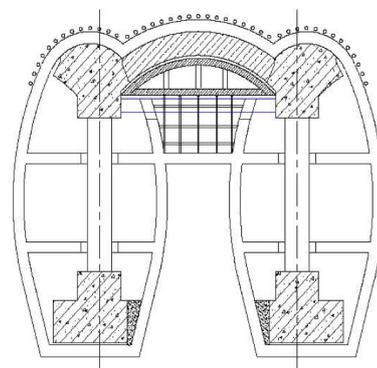


图 9 优化后的扣拱顺序

中跨上台阶开挖完成后拆除临时格栅, 施工扣拱混凝土。在上台阶内搭设满堂支架平台, 扣拱模板采用加工的定型钢模板。扣拱混凝土分段浇筑长度 6~8 m, 模板在支架平台上移动, 便于施工操作。现场施工照片见图 10~图 13。



图 10 扣拱混凝土施工前



图 11 分段凿除临时支撑



图 12 扣拱模板



图 13 扣拱混凝土完成

通过计算分析,得知工序一(中跨扣拱先扣)对地表沉降控制作用好,在暗挖车站开挖施工过程中结构产生的应力最小,结合 BT 项目业主对设计变更的相关条款,本着利于施工、减小风险等原则,经与设计、监理、业主等单位沟通,按优化后工序一(中跨扣拱先扣)的施工工序进行施工,且本工程现场按推荐的工序已施工完成,取得较好效果,施工安全。

5 结论

(1)比较不同试验方式得出的深孔注浆地层固结体的物理力学性能指标,揭示固体的力学特性,认为三轴试验的结果更为可靠。

(2)中跨扣拱先扣对地表沉降有一定的控制作用,且开挖结束后车站结构的主应力有所减少,使车站结构受力更加合理,减少了车站结构破坏,使结构整体更加安全,即中跨扣拱先扣有利于施工和减小风险。

参 考 文 献

- [1]朱正国,孙星亮.干燥粉细砂隧道超前预加固与施工研究[J].岩石力学与工程学报,2013,33(9):1909-1916.
- [2]王文胜.浅埋大跨黄土隧道下穿公路方案比选[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2016,29(2):45-49+55.
- [3]陈智慧.大跨隧道下穿建筑物施工方案对比分析及施工技术[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2015,28(2):50-56.
- [4]李永珑.南京地铁小净距隧道施工力学及工序优化研究[J].铁道建筑,2012(1):54-58.
- [5]石熊,张家生,刘宝琛.大断面浅埋偏压隧道 CRD 法施工工序研究[J].现代隧道技术,2015,52(3):193-199.
- [6]刘建波.浅埋偏压连拱隧道施工工序优化研究[J].施工技术,2015,44(15):118-122.

(下转第 34 页)

- [4] 杨宏印, 陈志军, 彭旭民. 基于子区间的车-线-桥振动不平顺影响分析[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版, 2016, 29(2): 6-11.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [6] 罗志刚. 路基与粒料层动态模量参数研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

Estimation of Dynamic Resilient Modulus on the Top of Monolithic Track-bed Subgrade of the New Tram

Wang Shuo

(Hebei Branch of China Development Bank, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Based on the layered elastic theory and resilient modulus estimation of each type of the subgrade materials, this article proposed an equivalent resilient modulus estimation method based on the equivalent principle of subgrade roof bending. The estimation method was verified through an engineering case. The results indicated that the deviation of this estimation method was less than 10% compared with the field test.

Key words: tram; subgrade with monolithic track-bed; estimation of dynamic resilient modulus; equivalent of deflection; field test

(上接第 20 页)

- [7] 施成华, 彭立敏, 黄娟. 隧道施工工序对地层变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1303-1308.
- [8] 陆伟, 陈皓, 李小青. 小净距隧道施工工序的数值模拟分析[J]. 公路, 2014(10): 291-296.

Study on Medium-span Supporting Arch Process Optimization of Fine Silt Sand Ground of Column Hole Method Under Municipal Roads

Li Xiaolei¹, Zhu Zhengguo², Li Zhenyuan²

(1. China Railway Airport Construction Group Co. Ltd, Beijing 100093, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Direct shear test and triaxial test and other laboratory tests are carried out on physical and mechanical parameters of deep hole grouting stratum concretion body. The physical and mechanical indexes of concretion body are obtained, and the index of triaxial test is considered to be more realistic and reliable. Based on this, the numerical simulation of medium-span supporting arch procedure of fine silt sand ground of the shallow-buried excavated station column hole method is carried out. Comparative analysis of surface subsidence and characteristic of structure stress are accomplished, and then reasonable construction procedure suggestions are put forward. Research results provide technical support for the peace street subway station of Shijiazhuang city, and afford reference for the similar projects.

Key words: experiment; fine silt sand ground; station; column hole method; construction procedure