

目 次

论 文

组合型复合地基试验研究及承载力计算..... 高笑娟, 李跃辉, 杨晓斌(3)

强夯加固湿陷性黄土地基的平板载荷试验研究..... 郭伟 (10)

地基冻结技术在隧道盾构出洞加固中的应用..... 林海峰, 张立荣(16)

浅谈三轴水泥搅拌桩施工技术及其质量保证措施..... 千智光 (22)

基坑施工中的地下水处理及工程实例..... 周长清 (31)

静压法施工预应力混凝土管桩的质量管理..... 赵荣妹 (37)

南宁市四塘小学滑坡地质灾害治理施工实践..... 李月玲, 陆杰, 韦兴标(41)

CFG 桩在软弱地基加固处理中的应用..... 韦兴标 (47)

碎石桩在软土地基加固处理中的施工实践..... 韦兴标, 李月玲, 覃晓毅(52)

冲抓锥在钻(冲)孔灌注桩施工中的应用..... 廖培涛, 韦兴标 (57)

一 题 一 议

从应力说起..... 龚晓南 (61)

译 文

澳洲重制黑煤的力学特性  
**Mechanical Properties of Reconstituted Australian Black Coal**  
**D.Jasinge<sup>1</sup>; P. G. Ranjith<sup>2</sup>; S.K. Choi<sup>3</sup>; J. Kodikara<sup>4</sup>; M. Arthur<sup>5</sup> and H.Li<sup>6</sup>.....**  
 ..... 秦鹏飞 译; 高华东 校(63)

## 组合型复合地基试验研究及承载力计算\*

高笑娟<sup>1</sup> 李跃辉<sup>1</sup> 杨晓斌<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学建筑工程学院, 河南 洛阳 471003; 2. 机械工业部第四设计研究院, 河南 洛阳 471039)

**[摘要]** 结合静载荷试验结果, 利用经验方法计算了 CFG 桩和夯实水泥土桩的单桩及组合型复合地基的承载力, 并把试验结果与计算结果进行对比, 分析了产生误差的原因。

**[关键词]** CFG 桩; 夯实水泥土桩; 组合型复合地基; 静载荷试验

复合地基是指由天然地基土体(基体)和各种材料桩体(竖向增强体)或加筋材料(横向增强体等)组成的人工地基<sup>[1]</sup>。单一桩型的复合地基能够解决的地基问题比较有限, 近些年来, 又发明了由多种桩型组合的组合型复合地基。组合型复合地基有些称之为多元复合型地基<sup>[2]</sup>, 有些称之为多桩型复合地基<sup>[3]</sup>, 是指竖向增强体由两种或两种以上的桩体组成。组合型复合地基能够充分发挥各层土的承载能力, 满足工程需要, 具有显著的经济效益<sup>[4]</sup>, 用 CFG 桩和夯实水泥土桩组成的复合地基就是其中的一种。CFG 桩是由碎石、粉煤灰和水泥加水拌和, 按一定的比例混合制成的半刚性桩体; 夯实水泥土桩是将水泥和土料及水充分拌和, 然后再将拌和料逐层填入孔中并经外力机械夯实所成的桩。CFG 桩刚性大, 桩长相对较长, 能把上部荷载传到较深层的土体中去, 有效减小地基的沉降; 夯实水泥土桩桩身刚度小, 桩长相对较短, 能够较好加固上层土体。利用 CFG 桩和夯实水泥土桩组成的组合型复合地基, 既能提高地基的承载力, 又能有效减小地基的沉降, 不失为地基处理的一种有效方法。目前, 这两种桩型组成的复合地基用量较少, 能够查到的文献资料十分有限, 因此不易对此做详细、系统的研究。本文介绍了 CFG 桩和夯实水泥土桩组成的复合地基在某工程中应用, 利用经验性的公式对地基承载力进行了计算, 并与试验实测结果进行了对比。

### 工程概况及岩土工程条件

该工程为洛阳市某单位住宅楼, 全剪力墙结构, 西半部楼高 22 层, 东半部楼高 12 层, 1 层地下室, 采用筏板基础。西半部采用夯实水泥土桩和 CFG 桩组合桩型复合地基, 即先采用夯实水泥土桩对地基进行处理, 然后再在水泥土桩中心位置施工 CFG 桩; 东半部采用 CFG 桩复合地基。基础下两种桩型均呈正方形布置, 同类型桩的桩间距均为 1.50m。夯实水泥土桩桩径 0.50m, 有效桩长 7m; CFG 桩西半部桩径 0.50m, 东半部桩径 0.40m, 有效桩长均为

\* 收稿日期: 2009 年 12 月

15m。设计要求夯实水泥土桩处理后复合地基承载力特征值为 210kPa，夯实水泥土桩和 CFG 桩组合桩型处理后复合地基承载力特征值为 420kPa；东半部 CFG 桩处理后复合地基承载力特征值为 280kPa。地基土层分布及承载力特征值见表 1。

桩的侧阻力和端阻力特征值表

表 1

土层名	层厚 (m)	承载力特征值 $f_{ak}$ (kPa)	桩侧阻力特征值 $q_{sk}$ (kPa)	桩端阻力特征值 $q_{pk}$ (kPa)
①, 素填土	0.6-6.3	70	6	---
②, 黄土状粉土	0.9-2.2	90	13	---
② <sub>1</sub> , 细砂及粉砂	0.2-1.0	100	15	---
③, 黄土状粉土	0.8-4.2	100	18	---
④, 黄土状粉质粘土	3.2-4.2	110	20	---
④ <sub>1</sub> , 细砂	0.3-0.7	120	23	---
⑤, 黄土状粉质粘土	0.9-2.0	140	25	---
⑥, 黄土状粉土夹粉质粘土	4.1-6.0	150	25	350
⑥ <sub>1</sub> , 细砂及粉砂	0.2-1.4	160	28	400
⑥ <sub>2</sub> , 含圆砾、细砂	0.6-1.3	170	28	450
⑦, 黄土状粉质粘土	0.6-4.2	170	28	400
⑦ <sub>1</sub> , 素填土	0.9	50	7	---
⑧, 黄土状粉土夹砂	2.1-5.8	170	28	500
⑧ <sub>1</sub> , 中砂	0.4-4.9	180	32	500
⑧ <sub>2</sub> , 砾砂	0.4-1.1	250	45	---
⑨, 黄土状粉土夹砂	1.1	180	30	---
⑨ <sub>1</sub> , 卵石	最大揭露厚度 6.8m	650	60	2000

## 单桩和复合地基静载荷试验

### 1. 试桩区单桩复合地基静载试验

为了确定成桩的可行性，地基处理前先小范围试打，测出复合地基承载力后再大面积施工。试桩区位于本工程的西北部，共布置 28 根桩，分为 4 排 7 列，试桩区桩位布置见图 1。经有关方协商，仅对夯实水泥土桩单桩或单桩复合地基进行承载力检测。依据文献[5]的有关规定，试桩区夯实水泥土桩复合地基静载试验采用圆形承压板，承压板面积为单桩处理面积，承压板直径 1.50m，承压板底面下铺设约 50~150mm 厚中粗砂垫层。按照文献[6]相关条款规定对 1 根夯实水泥土桩进行了单桩竖向抗压承载力检测。试验时，荷载加载至 540kN 时，桩头出现明显裂纹，试验被迫终止，后改为夯实水泥土桩单桩复合地基静载试验。试验结束后，经开挖检查，1#点的桩头局部出现轻微裂纹，2#、3#点的桩头出现明显裂纹。试桩区 1#点单桩静载试验结果和 2#、3#、4#点夯实水泥土单桩及其复合地基的检测结果见表 2，P-s 曲线见图 2（图中 1#试验点对应的荷载单位为 kN）。

单桩及单桩复合地基静载试验结果表

表 2

编号	承压板直径 (m)	最大加载量 (kPa)	最大沉降量 (mm)	承载力特征值 (kPa)	承载力特征值对应的沉降 (mm)
1#	桩径 0.5	540kN	21.86	240kN	2.79
2#	1.50	424	23.56	212	6.39
3#	1.50	424	20.62	212	8.52
4#	1.50	424	27.44	212	7.32

根据检测结果, 结合其养护期及沉降综合判定本工程试桩区夯实水泥土桩单桩承载力特征值由桩身强度控制, 取 240kN, 复合地基承载力特征值为 212kPa, 该地基处理方案可达到预期目的。

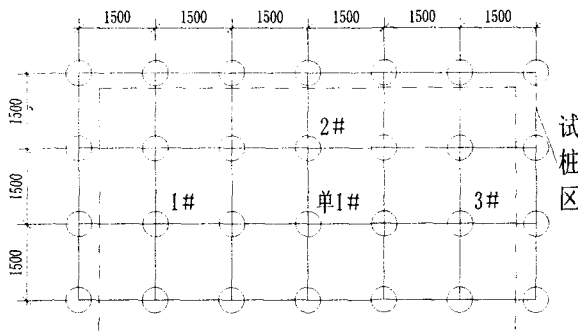


图 1 试桩区桩位布置示意图

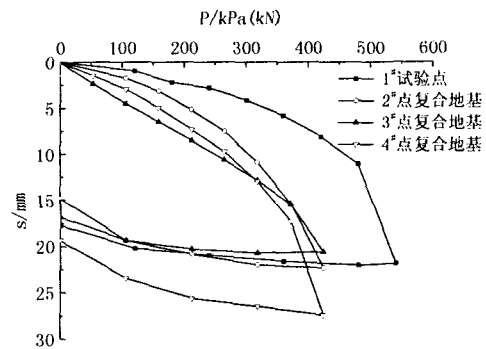


图 2 试桩区单桩及复合地基 P-s 曲线

### 2. 东半部 CFG 桩复合地基承载力

东半部 CFG 桩复合地基试验压板采用边长为 1.50m 的正方形承压板, 承压板面积为 1 根桩承担的处理面积, 即 2.25m<sup>2</sup>, 压板底面下铺设约 50~100mm 厚中粗砂垫层。

进行单桩复合地基静载试验 3 个点, 试验最大加载量均为 560kPa, 达到了设计要求单桩承载力特征值 280kPa 的两倍, 复合地基沉降量较小, 达到了终止加载的条件, 取本级荷载 560kPa 作为复合地基的极限承载力。检测结果见表 3, CFG 桩复合地基 P-s 曲线见图 4。

CFG 桩复合地基静载试验结果表

表 3

编号	承压板直径 (m)	最大加载量 (kPa)	最大沉降量 (mm)	设计要求承载力特征值 (kPa)	设计要求承载力特征值对应的沉降 (mm)
69#	1.50	560	7.96	280	4.96
110#	1.50	560	8.47	280	5.06
48#	1.50	560	8.39	280	5.14

检测结果表明, 本工程 CFG 桩单桩复合地基承载力满足特征值为 280kPa 的设计要求。

### 3. 西半部组合桩型复合地基承载力

依据文献[5],复合地基静载试验均采用慢速维持荷载法,西半部试验压板采用边长为2.12m的正方形承压板,压板面积为4根桩承担的处理面积,即4.50m<sup>2</sup>,压板底面下铺设约50~100mm厚中粗砂垫层。四桩复合地基承压板与桩的位置关系见图3。

进行四桩复合地基静载试验3个点,试验最大加载量均为840kPa,复合地基沉降量较小,达到了试验要求复合地基承载力设计特征值420kPa的两倍,符合终止加载条件,取本级荷载作为组合型复合地基的极限承载力,则复合地基承载力特征值为420kPa。检测结果见表4,复合地基P-s曲线见图5。

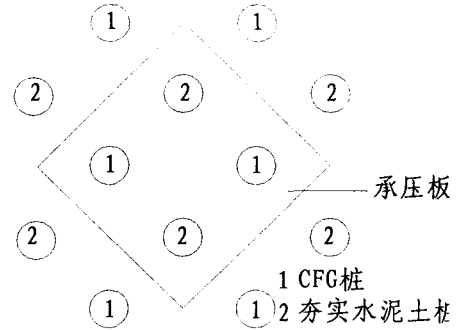


图3 四桩复合地基承压板布置示意图

组合型复合地基静载试验结果

表4

编号	承压板边长 (m)	最大加载量 (kPa)	最大沉降量 (mm)	设计要求承载力特征值 (kPa)	设计要求承载力特征值对应的沉降 (mm)
S <sub>1</sub> <sup>#</sup>	2.12	840	12.75	420	7.36
S <sub>2</sub> <sup>#</sup>	2.12	840	19.28	420	11.90
S <sub>3</sub> <sup>#</sup>	2.12	840	19.13	420	12.31

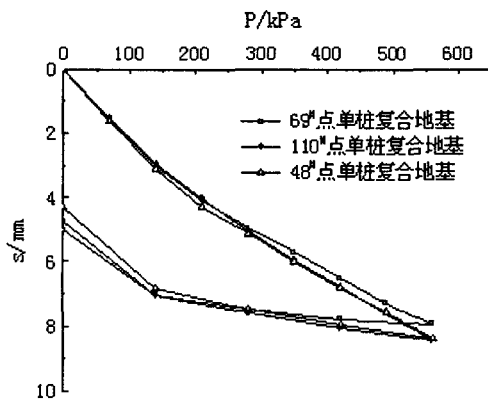


图4 东半部CFG桩复合地基P-s曲线

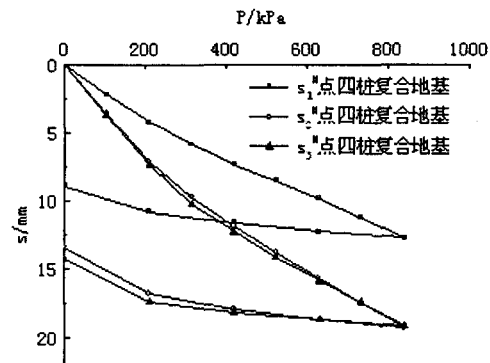


图5 西半部组合型复合地基P-s曲线

检测结果表明,本工程夯实水泥土桩和CFG桩组合桩型复合地基承载力满足特征值为420kPa的设计要求。

### 单桩及复合地基承载力计算

### 1. 夯实水泥土的承载力计算

夯实水泥土桩的承载力标准值可通过静载荷试验确定,初步设计时,可由下式计算<sup>[9]</sup>:

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} L_i + q_p A_p \quad (1)$$

式中  $u_p$  为桩的周长, m;  $n$  为桩长范围内所划分的土层数;  $q_{si}$ 、 $q_p$  分别为桩周第  $i$  层土的侧阻力、桩端端阻力特征值, kPa;  $L_i$  为第  $i$  层土的厚度;  $A_p$  为桩端截面积,  $m^2$ 。

利用公式(1)求得的夯实水泥土桩的承载力特征值为 247kN, 根据上述试验结果, 夯实水泥土单桩承载力特征值为 240kN, 两者相差不远, 说明用该公式初步估算夯实水泥土单桩的承载力在工程上是可行的。

### 2. 夯实水泥土桩复合地基承载力计算

夯实水泥土桩复合地基承载力计算公式:

$$f_1 = 1/A_1 [\alpha \beta f_k (A_1 - A_{p1}) + R_{k1}] \quad (2)$$

$f_1$  为夯实水泥土桩复合地基的承载力特征值, kPa;  $A_1$  为每根夯实水泥土桩分担的处理面积,  $m^2$ ;  $f_k$  为天然地基的承载力特征值, kPa;  $A_{p1}$  为夯实水泥土桩截面面积,  $m^2$ ;  $\alpha$  为桩间土强度提高系数, 取 1.0;  $\beta$  为桩间土强度发挥系数, 取 0.75;  $R_{k1}$  为夯实水泥土桩单桩承载力特征值, 取试验实测结果, kN。

计算所得夯实水泥土桩复合地基承载力特征值为 209kPa, 试验实测值为 212kPa, 说明公式(2)可以用来计算夯实水泥土桩复合地基的承载力。

### 3. 组合型复合地基承载力计算

对于刚度不同、长短桩复合地基承载力的计算参照同一刚度、同一桩长复合地基的计算方法<sup>[7]</sup>。首先计算短桩复合地基承载力, 然后视短桩复合地基为长短桩复合地基的桩间土, 再计算长短桩复合地基承载力。

CFG 桩和夯实水泥土桩组合型复合地基的承载力计算采用两步计算的方法, 第一步是利用公式(2)计算出夯实水泥土桩复合地基的承载力, 在此基础上利用公式(3)计算组合型复合地基的承载力。

$$f_2 = 1/A_2 [\alpha \beta f_1 (A_2 - A_{p2}) + \eta R_a] \quad (3)$$

$f_2$  为 CFG 桩和夯实水泥土桩组合型复合地基的承载力特征值, kPa;  $A_2$  为每根 CFG 桩分担的处理面积,  $m^2$ ;  $f_1$  为按(2)式计算所得的夯实水泥土桩复合地基承载力特征值, kPa;  $A_{p2}$  为 CFG 桩截面面积,  $m^2$ ;  $\eta$  为 CFG 桩的群桩效应系数, 取 0.8;  $R_a$  为按式(5)确定的 CFG 桩的单桩承载力特征值, kN;  $\alpha$ 、 $\beta$  的含义和取值同式(2)。

计算所得 CFG 桩与夯实水泥土桩复合地基承载力特征值为 313kPa, 试验实测值为 420kPa, 两者差别较大。这是因为 CFG 桩和夯实水泥土桩组成的复合地基施工时是先施工夯

实水泥土桩,然后在四根夯实水泥土桩的中心部位施工 CFG 桩。夯实水泥土桩对 CFG 桩的侧面起到约束作用,另外计算时没有考虑施工 CFG 桩时对土体的挤密效应,这是导致复合地基承载力提高的因素。由于桩间土与桩的相互作用,在 CFG 桩的桩顶附近区域将产生负摩阻力区,这是导致复合地基承载力降低的一个因素。在这些因素的共同作用下,有利因素对承载力的影响程度超过不利因素,计算所得承载力小于实测承载力。因此有必要对 CFG 桩和夯实水泥土桩复合地基的承载力计算公式进行修正,适当提高  $\alpha$ 、 $\beta$  或  $\eta$  的值来考虑这种有利因素,使复合地基承载力的计算值与实测值更加接近,当然需要更多的工程实测结果作为基础。

#### 4. CFG 桩复合地基承载力计算

CFG 桩复合地基的承载力特征值用下式估算<sup>[5]</sup>:

$$f_{spk} = m \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (4)$$

$f_{spk}$  为 CFG 桩复合地基的承载力特征值, kPa;  $f_{sk}$  为处理后桩间土承载力特征值宜按当地经验取值,如无经验时,可取天然地基承载力特征值, kPa;  $m$  为桩土面积置换率;  $d$  为桩身平均直径, m;  $d_e$  为一根桩分担的处理地基面积的等效圆直径,本工程 CFG 桩呈正方形布置,取  $d_e=1.13s$ ,  $s$  为 CFG 桩的间距, m;  $\beta$  为桩间土承载力折减系数,宜按地区经验取值,如无经验时,可取 0.75-0.95,天然地基承载力较大时取大值,本工程取 0.75;  $A_p$  为桩身截面积,  $m^2$ ;  $R_a$  为单桩竖向极限承载力特征值, kN; 当采用单桩载荷试验时,应将单桩竖向极限承载力除以安全系数 2, 当无单桩载荷试验资料时,可按下式估算:

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n q_{si} L_i + q_p A_p \quad (5)$$

式中参数同式(1),均改为 CFG 桩的相应值。计算所得 CFG 桩单桩承载力特征值为 478kN。CFG 桩复合地基承载力特征值 293kPa, 试验实测值 280kPa。在利用公式计算 CFG 桩复合地基承载力时,没有考虑由于桩间相互作用引起的桩顶附近产生的负摩阻力现象,导致计算结果略高于实测结果。这种结果是偏于不安全的,因此,应该通过更多的工程实测资料适当考虑这种不利因素的影响。

## 结论

通过本文的研究,可以得出如下结论:

1. CFG 桩和夯实水泥土桩组成的组合型复合地基能够较好发挥两种桩型各自的特点,提高地基的承载力,满足工程要求;

2. 夯实水泥土桩单桩及复合地基承载力计算结果与试验实测结果比较接近,可以用于工

程上初步估算;

3. CFG复合地基的承载力按现行计算公式所得结果大于试验实测结果,应对公式进行适当修正以考虑桩顶附近负摩阻力产生的不利影响;

4. CFG桩与夯实水泥土桩组合型复合地基承载力计算公式不成熟,计算结果大于实际结果,偏差较大,应对公式进行修正以考虑有利因素和不利因素的综合影响。

#### 参考文献

- [1] 龚晓南.复合地基设计和施工指南[M].北京:人民交通出版社,2003
- [2] 郑俊杰,区剑华.多元复合地基的理论与实践[J].岩土工程学报,2002,24(2):208-212
- [3] 阎明礼,张东刚.CFG桩复合地基技术及工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2001
- [4] 郭志强,张晓哲,刘丰军等.组合型复合地基的工程实例[J].工程勘察,2003,5:34-37
- [5] 中国建筑科学研究院.建筑地基处理技术规范(JGJ-2002)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002
- [6] 中华人民共和国建设部.建筑基桩检测技术规范(JGJ106-2003)[S].北京:中国建筑工业出版社,2003
- [7] 马骥,张东刚.长短桩复合地基设计计算[J].岩土工程技术,2001,2:86-91.

## Static Load Test Study and Bearing Capacity Calculation of Combined Composite Ground

GAO Xiao-juan<sup>1</sup>, LI Yue-hui<sup>1</sup>, YANG Xiao-bin<sup>2</sup>

( 1.Institute of Architecture Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, China 471003,  
2.Fourth Design and Research Institute, Ministry of Machine-Building Industry, Luoyang, China 471039)

**Abstract:** Combined with the static load test results, the bearing capacity of combined composite ground composed of CFG pile and rammed cement-soil pile is calculated. The reason of the error is studied based on the results of static load test and calculation.

**Keywords:** CFG pile; Rammed cement-soil pile; Combined composite ground; Static load test



## 强夯加固湿陷性黄土地基的平板载荷试验研究\*

郭伟

(上海港湾工程质量检测有限公司 上海 200032)

[摘要] 强夯法是一种经济高效的地基处理方法。本文对国内最大的黄土塬地区湿陷性黄土分别采用3000kN·m、8000kN·m、12000kN·m能级强夯进行加固,分别通过平板载荷试验对加固处理后的地基进行浸水载荷试验与不浸水载荷试验检测;采用了不同面积的载荷板进行试验,验证不同能级强夯加固后浅层地基承载力的设计值,对比分析得到一些有价值的参数和数据;并为大面积施工提供一些建议。

[关键词] 强夯法;湿陷性黄土;载荷板试验;浸水载荷试验。

### 引言

强夯法加固地基在湿陷性黄土地区已得到广泛的应用,同时也促进了高能级的强夯技术的发展和实践<sup>[1]</sup>。强夯加固后地基的承载力和变形必须要满足设计的要求,所以强夯后地基的检测必不可少,确定地基承载力最直接可靠的方法是现场平板载荷试验<sup>[2]</sup>。本文分别通过对3000kN·m、8000kN·m、12000kN·m三个不同能级加固后试夯区地基进行浸水与不浸水平板载荷试验,其中浸水试验为夯间的检测,验证设计承载力设计值,同时得到一些有价值的参数与数据,并为大面积的施工提供建议。

### 场地地层条件

本工程场地位于我国甘肃庆阳的董志塬,场地地形平坦、开阔,起伏较小,地面标高为1350m~1361m,最大黄土覆盖厚度可达200~300m。钻孔最大深度40m,揭示地层13层,第一层粉质粘土(黑垆土)为Q<sub>4</sub>,第二~四层粉质粘土(马兰黄土)为Q<sub>3</sub>。勘探场区,湿陷性黄土的湿陷程度由上向下逐渐减弱,一直渐变为非湿陷性黄土。湿陷性黄土的底界埋深16m左右,包含的地层为二、三、四、五层粉质粘土。场地黄土为自重湿陷性黄土,湿陷等级为II级。控制性钻孔均可见到地下水,地下水埋深一般为29.5m~33.5m左右,地下水以上近30m含水率小于20%。

### 地基处理要求

\* 收稿日期:2010年1月

本试验选择有代表性场地作为试夯区来进行试验性施工，考虑到场地不同的区域要求消除湿陷的深度不同（参见表1），采取不同能级的强夯在不同的试夯区分别施工。

地基处理设计要求

表1

指标 \ 能级	3000kN·m	8000kN·m	12000kN·m
承载力特征值 $f_{ak}$	$\geq 250\text{kPa}$	$\geq 250\text{kPa}$	$\geq 250\text{kPa}$
压缩模量 $E_s$	$\geq 20\text{MPa}$	$\geq 20\text{MPa}$	$\geq 20\text{MPa}$
有效加固深度	5.0m	11.0m	16.0m
收锤标准	$\leq 50\text{mm}$	$\leq 200\text{mm}$	$\leq 200\text{mm}$

### 强夯施工机械及工艺

本试验强夯施工机械：3000kN·m、8000kN·m、12000kN·m能级均选择德国生产的W200A/50t履带式强夯机，最大起重量为60t，配有自动脱钩装置，夯锤的参数参见表2。

强夯夯锤参数

表2

能级 \ 参数	锤重(t)	锤径(m)	锤高(m)	落距(m)
3000kN·m	22	2.6	0.7	13.64
8000kN·m	39.77	2.45	1.6	20.12
12000kN·m	51	2.4	1.65	23.6

施工方法采用格点间隔夯打法，先内后外，这样可以使夯击能量有效的传至深处，并可以较好的夯点之间挤密，达到夯后地基土的均匀性要求。

3000kN·m 能级试夯区面积为40m×40m，分4遍施工。第一、二遍采用3000kN·m能级点夯主夯点，主夯点间距为8.0m，其中第一遍每点8~10击（多为8击），第二遍6~8击（多为8击），主夯点各为50个；第三、四遍为1000kN·m能级满夯，每遍每点1击，平均夯印搭接1/4。3000kN·m能级夯点及平板载荷检测布置图如图1所示。

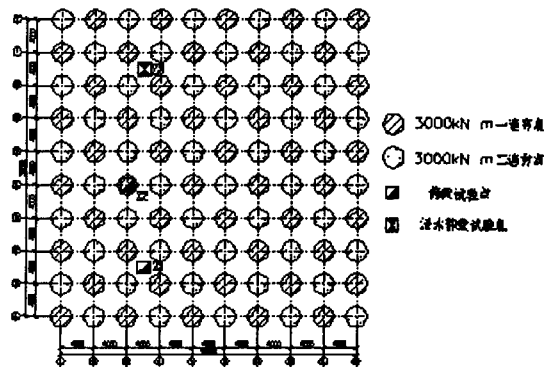


图1 3000kN·m能级夯点及平板载荷检测布置图

8000kN·m 试夯区面积为40m×40m，分5遍施工。第一、二遍采用8000kN·m能级点夯主夯点，间距为8.0m，其中第一遍每点8~10击（多为8击），第二遍6~8击（多为8击），主夯点各为25个；第三遍为3000kN·m能级加固点夯，在第一、二遍夯点之间插点，平均击数为6击，第四、五遍为2000kN·m能级满夯，每遍每点1击，平均夯印搭接1/4。3000kN·m

能级夯点及平板载荷检测布置图如图2所示。

12000kN·m 试夯区面积为 50m×50m, 分5遍施工。第一、二遍采用 12000kN·m 能级点夯主夯点, 间距为 10m, 其中第一遍每点 8~10 击 (多为 9 击), 第二遍 6~7 击 (多为 7 击), 主夯点各为 25 个; 第三遍为 8000kN·m 能级加固夯, 在一、二遍夯点之上和一、二遍夯点之间插点, 每点 4 击; 第四、五遍为 3000kN·m 能级满夯, 每点 1 击, 夯印搭接 1/4。12000kN·m 能级夯点及平板载荷检测布置图如图3所示。

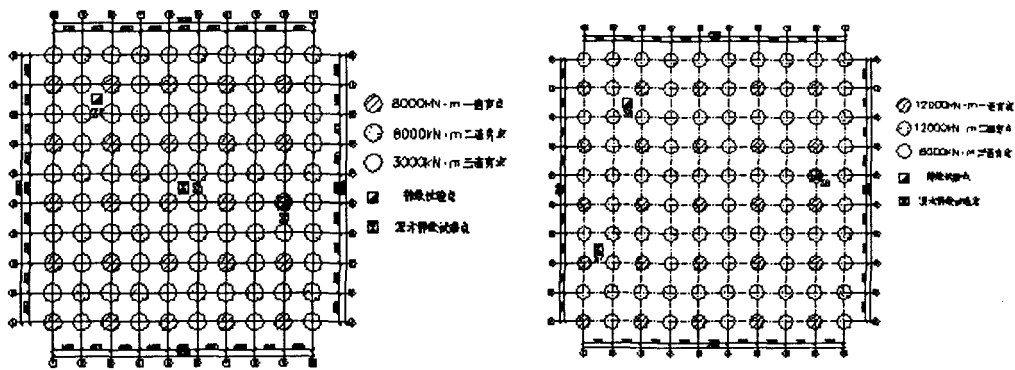


图2 8000kN·m 能级夯点及平板载荷检测布置图 图3 12000kN·m 能级夯点及静载荷检测布置示意图

## 现场平板载荷试验结果

按照规范<sup>[3]</sup>强夯完成 28 天后对强夯地基进行平板载荷试验, 确定夯后地基土的承载力和压缩模量, 分别进行了浸水与不浸水的平板载荷试验。由于强夯处理后地基土渗透系数显著减小, 因此在浸水平板载试验点四周打设 8 个深 4m、直径  $\phi$  为 130mm 的浸水孔, 内填小粒径卵石, 加速浸水, 浸水载荷试坑剖面示意图如图 4 所示。

本次夯后共进行 9 组平板载荷试验, 分夯间、夯点进行, 其中 3000kN·m 试夯区试点编号分别为 1# (夯间)、2# (一遍夯点)、3# (夯间, 浸水); 8000kN·m 试夯区试点编号分别为 4# (夯点)、5# (夯间)、6# (夯间, 浸水); 12000kN·m 试夯区试点编号分别为 7# (夯间)、8# (一遍夯点)、9# (夯间, 浸水)。3000kN·m 和 12000kN·m 试夯区采用 1.0m<sup>2</sup> (1.0m×1.0m) 荷载板, 8000kN·m 试夯区采用 0.5 m<sup>2</sup> (0.707m×0.707m) 荷载板。现场平板载荷试验结果参见图 5~图 7。

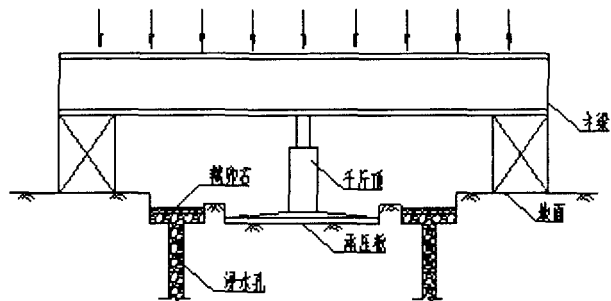


图4 浸水载荷试坑剖面示意图

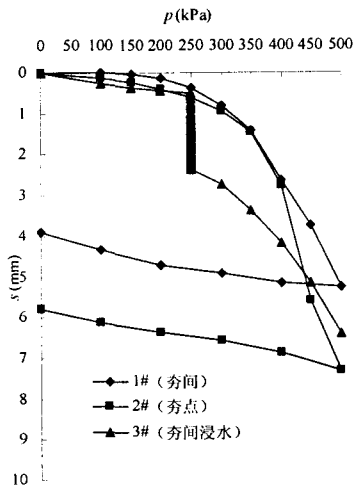


图 5 3000kN m 试夯区浸水与不浸水平板载荷对比曲线

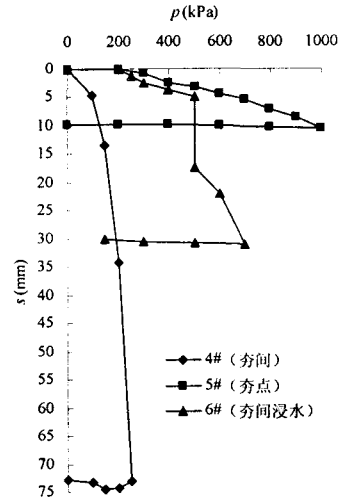


图 6 8000kN m 试夯区浸水与不浸水平板载荷对比曲线

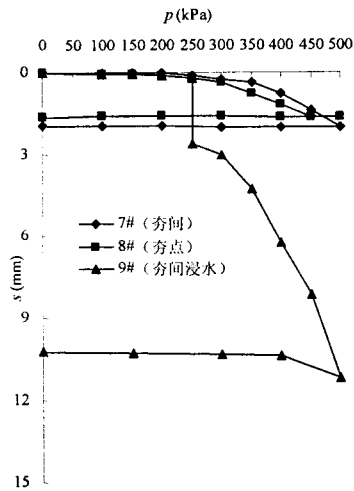


图 7 12000kN m 试夯区浸水与不浸水平板载荷对比曲线

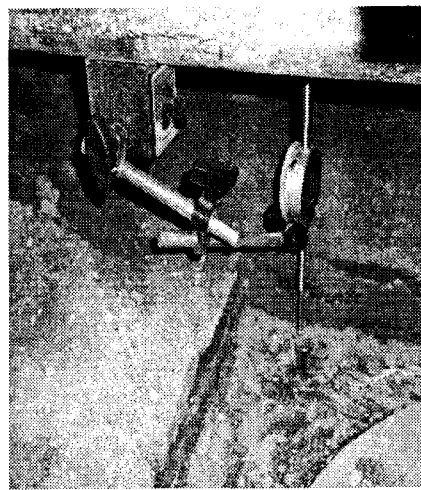


图 8 8000kN m 试夯区 4#点现场破坏图

按照  $s/b=0.010$  和相关规范<sup>[4]</sup>, 承载力特征值不超过最大加载量的一半; 地基土的变形模量  $E_0$  的公式可表示为式 (1):

$$E_0 = I_0(1-\mu^2) \frac{pd}{s} \tag{1}$$

式中  $\mu$ ——土的泊松比, 粘土取 0.42;  
 $d$ ——承压板直径或边长 (m);

$p$ —— $p$ - $s$  曲线上线性段的压力 (kPa);  
 $s$ ——与  $p$  相对应的沉降 (mm);  
 $I_0$ ——刚性承压板的形状系数, 方形板取 0.886。  
 压缩模量  $E_s$  与变形模量  $E_0$  的关系如下<sup>[5]</sup>:

$$E_s = \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} E_0 \quad (2)$$

则式 (2) 可变换为式 (3):

$$E_s = \frac{(1-\mu)^2 p d I_0}{(1-2\mu)s} \quad (3)$$

8000kN·m 试夯区的 4#点试坑受降雨影响过于潮湿, 且周围积水过多, 造成坑底周边地基土含水量过高而软化, 造成沉降量过大 (参见图 8), 不能真实反映夯后地基土的承载力。

浸水载荷试验: 3#和 9#点加载至 250kPa 后浸水 3 天达到稳定, 6#点加载至 500kPa 后浸水 3 天达到稳定。

由图 5~图 7 分析可知, 3000kN·m、8000kN·m、12000kN·m 三个不同能级试夯区试验点 (除 4#点外) 在最大荷载作用下均未破坏,  $p$ - $s$  曲线呈缓变形, 无陡降段。

由图 5~图 7 及规范<sup>[4]</sup>可知, 3000kN·m 试夯区 1#、2#、3#试验点的承载力特征值均为 250kPa, 满足设计要求。达到最大加载量的最终沉降分别为 5.25mm、7.29mm、8.89mm。由式 (3) 计算得到: 1#、2#、3#试验点的压缩模量分别为 88.7MPa、63.9MPa 和 52.4MPa, 满足设计要求。8000kN·m 试夯区的 6#点加载至 500kPa 后浸水 3 天达到稳定, 沉降量为 14.39mm, 加载至 700kPa 时, 载荷板周边隆起破坏; 确定 5#、6#试验点的承载力特征值分别为 500kPa 和 300kPa, 达到最大加载量的最终沉降分别为 10.59mm、30.93mm。由式 (3) 计算得到: 压缩模量分别为 88.0MPa 和 30.1MPa。12000kN·m 试夯区在施工期间遭受降雨影响, 因此平板载试验试坑挖深较大, 在 1.5~1.7m 之间。其中 9#浸水试验点在浅层 (0.5~0.8m) 开挖试坑时, 土体呈可塑状, 无法作为载荷试验的承压层, 因此在邻近处又重新开挖了试坑。土体过湿主要是因为夯坑受降雨影响未及时回填形成集水坑。确定 7#、8#、9#试验点的承载力特征值均大于 250kPa, 满足设计要求, 达到最大加载量的最终沉降分别为 1.98mm、1.62mm、11.22mm。由式 (3) 计算得到: 7#、8#、9#试验点的压缩模量分别为 235.2MPa、287.2MPa 和 41.6MPa, 满足设计要求。

综上所述, 各能级平板载荷结果分析可知, 强夯后地基承载力特征值不低于 250kPa, 且压缩模量也满足设计的要求。浸水后的沉降明显随时间的增加而增大, 也较不浸水时大很多, 所以建筑结构完成后应当加强防水措施。由不同能级的平板载荷曲线可知, 夯间和夯点的承载力相差不大, 表明夯后地基具有较好的均匀性。

## 结语

本文结合湿陷性黄土地基在不同能级强夯加固后的浸水与不浸水的平板载荷试验, 对强夯后浅层地基土的承载力与压缩模量进行了研究, 得到以下结论:

(1) 强夯处理后的湿陷性黄土地基, 浅层地基土的压缩模量、承载力提高显著, 地基承载力特征值不小于 250kPa。

(2) 由夯间与夯点的对比可知, 强夯后浅层地基具有较好的均匀性。同时宜采用减少建筑物不均匀沉降和使建筑物能适应地基局部湿陷变形的措施, 如选用适宜的上部结构和基础型式, 以加强结构的整体性和空间刚度; 使构件连接处有足够的支承长度; 以及使建筑物预留适应地基变形的净空以减少局部湿陷所造成的危害等。

(3) 根据浸水的平板静载荷试验可知, 浸水后的承载力明显低于未浸水的承载力, 且浸水后的沉降随时间的增加而增大, 所以在湿陷性黄土地区一定要注意防水, 必须要采取必要的防水措施。

施工期间加强天气预报观测, 强夯施工后的夯坑在降雨之前及时推平、回填, 避免降雨形成集水坑对夯坑浸泡; 遇降雨在坑内形成积水区域, 应挖出坑内软泥, 露出新鲜土层方可回填干燥土; 强夯施工在降雨过后, 至少必须经过 1 周的晾晒, 待浅层地基土干燥后方可继续进行施工, 以保证地基处理加固效果; 施工过程中应确保施工安全。

#### 参考文献

- [1] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 裴捷. 10000kN m 高能级强夯时的地面变形与孔压试验研究. 岩土工程学报[J], 2005, 27(7): 759-762.
- [2] 王铁宏主编. 新编全国重大工程项目地基处理工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [3] 《湿陷性黄土地区建筑规范》GB50025-2004[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.5.
- [4] 《岩土工程勘察规范》GB50021-2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.1.
- [5] 刘春泽, 郝庆芬, 赵俭斌. 土变形模量的研究与分析[J]. 岩土工程界. 2007, 10(12): 60-62.

## Plate loading test (PLT) research of collapsible loess foundation improved by dynamic compaction

Guo Wei

(Shanghai Harbor Quality Control & Testing Co., Ltd, Shanghai, 200032, China)

**Abstract:** Dynamic compaction has become a generally accepted ground improvement technique for its simplicity and cost-effectiveness. In this paper, series energy levels of experiment dynamic compaction (3000kN·m、8000kN·m、10000kN·m) are successfully put into practice on the Chinese biggest loess tableland. Water immersion PLT and PLT are carried out on collapsible loess foundation improved by dynamic compaction; different size of loading plates are applied, and shallow bearing capacity of design value are verified, some valuable parameters and data are obtained through comparative analysis and some suggestion are also provided for the construction with large area.

**Key words:** dynamic compaction; collapsible loess; plate loading test; water immersion plate loading test.

## 地基冻结技术在隧道盾构出洞加固中的应用\*

林海峰 张立荣

(上海宏波工程咨询管理有限公司 上海 200232)

### 前言

地下隧道盾构法施工时,一般均需在盾构机出动前对工作井洞门外地基进行加固,防止盾构机出洞时井外土体随着地下水一起涌入工作井内造成工程事故。本文将介绍用地基冻结技术对洞门外土体进行加固,确保盾构机安全出洞的成功应用情况,供同行参考。

### 盾构出动前洞门外地基加固的必要性

一般在含水地层中,建设地下隧道,均采用盾构法施工。盾构机先在地下工作井内进行组装调试验收,然后凿除工作井洞门,盾构机出洞进行隧道推进施工。

在凿除工作井洞门盾构机出洞时,由于工作井内外地下水位差的存在,洞门外的含水土体就会在地下水由高向低,由井外向井内流动时一起涌入工作井内。为了防止出现这个现象,就必须先对洞门外的部分土体进行加固,使其土颗粒之间的自由水被胶结(或被冻结或被抽除),对水位差造成流动的地下水断根除源,洞门外土体就会保持相对比较长时间的稳定状态,确保盾构机安全出洞。

因此,在含水地基中建造盾构法施工的地下隧道,必须先对工作井洞门外土体进行加固。加固的方法有多种,一种是用胶结材料(如水泥等)加固地基,一种是用冻结技术加固地基,再一种就是用井点抽水的方法抽除土颗粒之间的自由水来固结地基。

比较常用的方法是用胶结材料加固地基。如水泥土搅拌法(两轴机和三轴机均可)、注浆法(主要是压密注浆和劈裂注浆)和高压喷射注浆法(含单管、两重管和三重管)。

### 地基冻结法技术简介

所谓地基冻结加固,说的简单些,就是用冷冻方法使地基中土颗粒之间的自由水连同土颗粒一起冻结成固状土体。土颗粒之间的自由水结冰了,结冰的自由水又将土颗粒冰洁在周围,形成微胀的固结土体。这种被加固的土体,抗剪强度提高了,对外界施加的各个方向的

\* 收稿日期: 2009年11月

外力的承载能力也比原来提高了,同时,土颗粒之间的自由水被冻结了,流水通道被阻塞了,可以形成防水帷幕。

为使需要加固的土体冻结,要在土体中设置一定直径、长度和距离的冻结管(无缝钢管),在冻结管内置入供液管,向供液管输入氯化钙盐溶液冷媒剂,通过长时间的循环,使冻结管与周围含水土体发生热交换逐渐使含水土体冻结。这就是地基冻结加固基本原理。

冷媒剂氯化钙溶液由冻结站供应。冻结站内有制冷剂(氟利昂等)循环系统、冷媒(氯化钙盐水等)循环系统、冷却水循环系统及供电系统组成。

地基冻结技术包括地基冻结设计(冻结壁及制冷系统设计)、冻结站安装调试运转以及冻结效果检测与判断。

## 盾构出洞加固工程概况

上海某输水隧道采用盾构法施工。隧道内径 $\phi 5500$  mm,采用钢筋混凝土管片,管片壁厚450 mm环宽1500 mm,盾构机外壳直径 $\phi 6560$  mm。

盾构工作井平面尺寸为28.1 $\times$ 28.4m,围护结构采用1m厚地下连续墙,基坑开挖深度24.95m。工作井在东面墙上为盾构出洞预留开洞的直径为6900 mm。工程地处上海浦东长江口附近,地形较平坦。

工程地质剖面见右侧图1所示。

场地的地下水位埋深为0.40~2.30m,属潜水类型,受潮汐、降水等影响,承压含水层为⑤32及⑦层,两层相贯通承压水头埋深3.00m~11.00m,承压水位受季节性影响,呈周期性变化。

本工程隧道出洞位于④层灰色淤泥质粘土和⑤1层灰色粘土。

盾构出洞地基加固初拟在开洞的洞圈上、下、左、右各3m以内进行土体冻结,纵向加固厚度为2.60m。

## 冻结设计及相关计算

### 1. 洞门外冻结加固厚度的设计计算

洞门外地基加固区需一定厚度承受侧向水土压力。

侧向水土压力为主动土压力,一般按经验公式计算。

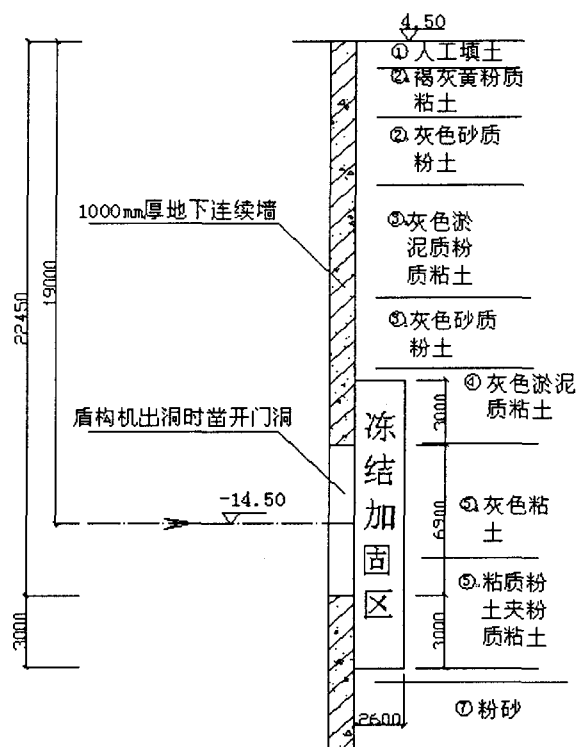


图1



$$P_s = K\gamma H$$

式中

$K$ —为侧压系数, 一般取 $K=0.7$

$r$ —加固区土体的平均重度, 一般取 $r=18\text{kN}/\text{M}^3$

$H$ —洞门下口埋置深度。

本工程见上图  $H=22.45\text{m}$

$$P_s = K\gamma H = 0.7 \times 18 \times 22.45 = 282.87\text{kPa} = 0.283\text{MPa}$$

假定洞外加固地基为一整体板块承受侧向水土压力, 运用日本冻结计算理论公式, 计算加固厚度。

$$h = \left[ \frac{k\beta P_s D^2}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中  $K$ —安全系数, 一般取  $K=2.0$

$\beta$ —经验系数, 一般取  $\beta=1.20$

$PS$ —侧向水土压力,  $PS=0.283\text{MPa}$

$D$ —洞外直径  $D=6.9\text{m}$

$\sigma$ —冻土弯拉强度值, 与冻土温度及土质有关, 冻土平均温度为 $-10^\circ$ 时, 一般较保守的取 $\sigma=1.8\text{MPa}$ 。

$$\text{经计算 } h = \left[ \frac{k\beta P_s D^2}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{2 \times 1.2 \times 0.283 \times 6.9^2}{4 \times 1.8} \right]^{\frac{1}{2}} = 2.12\text{m}$$

为更加安全, 确定  $h=2.60\text{m}$

剪切验算:

$$\text{公式: } \tau_{\max} = \frac{P_s D}{4h} = \frac{0.283 \times 6.9}{4 \times 2.6} = 0.188\text{MPa} < [\tau] = 1.5\text{MPa}$$

$[\tau]$ 取 $-10^\circ\text{C}$ 时一般冻土的允许抗剪强度值

$$K_r = [\tau] \div \tau_{\max} = 1.5 \div 0.188 = 7.98$$

说明通过验算, 抗剪切安全性很高。

## 2. 垂直冻结管的设计

本次盾构出洞地基冻结加固采用垂直局部冻结方案, 以利于减少地基冻结冻胀和融沉时对周围环境的影响。

为了使盾构机能安全顺利出洞, 有效达到防渗止漏目的, 拟在洞门地下连续墙外壁 $0.3\text{m}$ 打第一排冻结管, 共布置三排, 具体布置见下图(图2)所示。

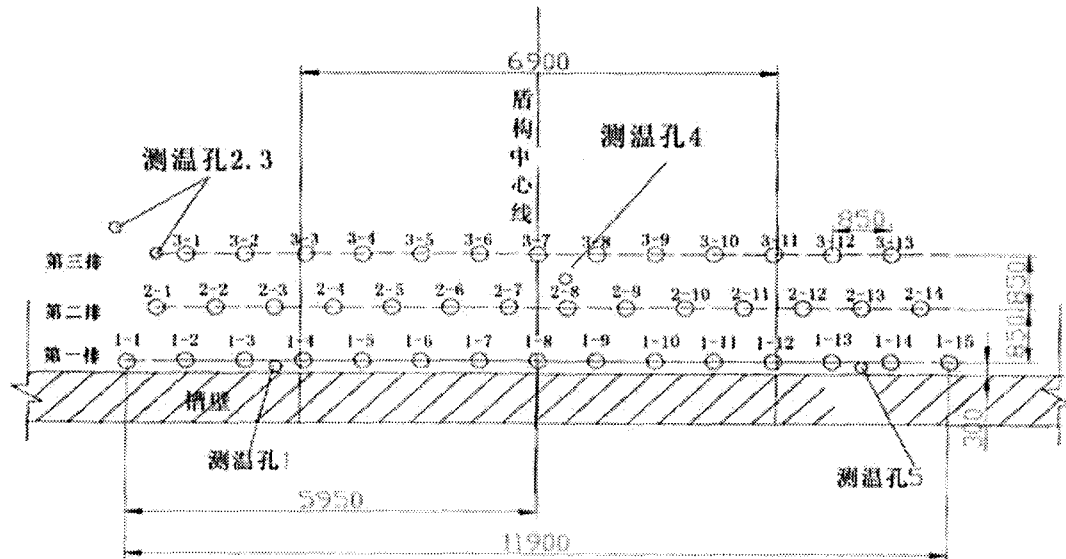


图2 盾构出洞冻结孔平面布置图

各排排距为 85 cm, 第一排布置 15 根, 第二排布置 14 根, 第三排布置 13 根, 共计 42 根, 为满足洞门上下左右各 3m 范围土体冻结的需要, 故每根垂直冻结管的长度为  $22.45+3=25.45\text{m}$  (见图 1 所示)。

测温孔共布置 5 个, 其中 4#测温孔深度为洞门上 0.5m, 其它四个与冻结管深度一致。

冻结管选用  $\phi 127 \times 4.5\text{mm}$  无缝钢管(20#低碳钢), 采用外管箍焊接连接, 供液管采用  $\phi 45 \times 3\text{mm}$  无缝钢管, 测温管采用  $\phi 50 \times 3\text{mm}$  无缝钢管。

采用垂直局部冻结方式, 故每根冻结管的有效长度  $L=6.9\text{m}+3\text{m} \times 2=12.9\text{m}$  (即洞门外冻结加固区的高度)。

### 3. 冷冻站设计

#### (1) 制冷系统

单个出洞需冷量  $Q=1.3 \cdot \pi \cdot d \cdot H \cdot K=7.025$  万大卡/ $h \cdot m^2$

式中:  $H$ —冻结总长度;  $H=12.9\text{m} \times 42=542\text{m}$

$d$ —冻结管直径;  $0.127\text{m}$

$K$ —冻结管散热系数;  $250\text{KcaI/h} \cdot \text{m}^2$

单台盾构出洞根据冷量计算选用 WYSLGF300 II 型螺杆机组 2 台套, 每台设备工况制冷量为 8.75 万大卡/小时, 根据盾构出洞的施工工期安排, 其中一台做为备用机。

#### (2) 冷却水系统

根据厂家提供的冷凝器和冷冻机型号说明书, 冷却水总需水量:  $W=120\text{m}^3/\text{h}$ , 选 I S-125-100 型水泵, 流量  $200\text{m}^3/\text{h}$ , 电机功率 22.5KW。设计冷却水进水温度  $+27^\circ\text{C}$ 。选用 4

台 NBL-50 型冷却水塔, 补充新鲜自来水  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  左右, 水温  $+21^\circ\text{C}$ 。

### (3) 盐水系统

①设计盐水比重  $1260 \text{ kg}/\text{m}^3$  ( $30^\circ\text{Be}$ ), 比热为  $0.665$ , 盐水凝固点  $-34.6^\circ\text{C}$ , 经计算盐水流量  $113 \text{ m}^3/\text{h}$ 。设计单孔盐水流量不小于  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

②盐水泵选用 IS-150 型水泵, 流量  $200 \text{ m}^3/\text{h}$ , 电机功率  $45\text{kW}$ 。

③冻结孔为每 2~3 孔一组串联安装。

④计算盐水干管, 则选用  $\phi 159 \times 6 \text{ mm}$  低碳钢无缝钢管供回液。

(4) 冻结站需 N-46 号冷冻机油  $1000 \text{ kg}$ , 首次充氟立昂  $800 \text{ kg}$ 。

(5) 用电负荷为  $250\text{kW}$ 。

## 冻结施工

### 1. 主要冻结施工参数的确定

①积极期盐水温度  $-25 \sim -30^\circ\text{C}$ ;

②冻结孔偏斜率  $\beta \leq 0.5\%$

③盾构出洞加固冻结孔最大终孔间距  $L_{\max} = 1m \times X + 2\beta H = 1.1\text{m}$ ;

④盾构出洞加固冻土平均发展速度  $V = 28 \text{ mm}/\text{d}$ ;

⑤盾构出洞加固冻土墙交圈时间  $T = L_{\max} / 2V = 20$  天;

⑥盾构出洞加固冻土墙达到设计强度的时间为 30 天;

⑦冷凝温度  $-35^\circ\text{C}$ 。

根据以上参数选定, 当冻结孔最大间距处交圈时, 冻土墙与井壁完全胶结。

### 2. 冻结孔施工

①钻孔工程量:

垂直冻结孔: 单个出洞总长  $1068.9\text{m}$ , 垂直测温孔总长  $122.5\text{m}$ 。

②冻结管、测温管和供液管规格

冻结管选用盾构出洞为  $\phi 127 \times 4.5 \text{ mm}$  20# 低碳钢无缝管, 采用外管箍焊接连接; 供液管采用  $\phi 45 \times 3 \text{ mm}$  无缝钢管; 测温管采用  $\phi 50 \times 3 \text{ mm}$  无缝钢管。

③打钻设备选型

打钻用 XY-2 型钻机 3 台, 电机功率  $22 \text{ kW}$ , 钻孔使用灯光测斜, 选用 BW-250/50 型泥浆泵 3 台, 电机功率  $14.5 \text{ kW}$ 。

### 3. 盾构机出洞工序及工期安排

①钻孔施工及冻结站安装 15 天;

②积极冻结 30 天;

③拔管 1 天;

④盾构机出洞 2 天;

从施工准备开始到单台盾构机出洞完成，需 48 天。

## 冻结效果

1. 冻结测温：共布置 5 个测温孔，其中 1#、2#、3#、5#四个测温孔各设 5 个测温点，分别在 25.45m、22.45m、19.45m、16.45m、13.45m，4#测温孔设二个测温点，深度分别为 12m 和 10m。测温频率为每二天一次，温度测量用热电偶测温器，精度为 0.5°，实测加固区冻土平均温度-10.8℃，低于设计-10℃要求。

2. 积极冻结期实际 35 天，实测盐水去路温度一直保持在-25℃~-30℃范围内，去回路温差 2℃内。

3. 实测盐水流量 120 m<sup>3</sup>/h，盐水箱无盐水减少现象。

4. 在盾构出洞洞门处地下连续墙上共打 9 个水平钻孔，孔深 1m，实测冻土墙表面温度-1.24℃。

5. 根据冻结测温计算冻结加固厚度已达 2.70m，大于设计 2.60m 的要求。

6. 经过盾构机出洞条件验收会专家一致意见，出洞冻结加固满足盾构机出洞安全要求，专家要求盾构机尽快出洞，控制破壁出洞时间在 2 天之内。

## 参考文献

1. 旁通道冻结技术规程 上海市工程建设规范 DG/TS08-902-2006[S].
2. 上海 QBZ-C2 标盾构出洞垂直冻结加固施工方案[R].

---

# 欢迎投稿!

---

## 浅谈三轴水泥搅拌桩施工技术及质量保证措施\*

千智光

(浙江省大成建设集团有限公司 杭州 310012)

**【摘要】** 通过很多工程的实践证明,在基坑围护方面,三轴水泥搅拌桩确实具有许多其他工艺所没有的优点。也正是因为这样,近几年来三轴搅拌桩已经越来越多的应用于基坑围护工程,并且也取得了很好的经济效益。本文详细的阐述了三轴搅拌桩施工原理和特点,工程的质量保证措施,以及采用此工艺进行基坑围护的经济效益。

**【关键词】** 三轴水泥搅拌桩; 施工技术; 质量保证措施; 经济效益

### 前言

随着现代化建筑物不断的向地下发展,对基坑围护的要求也越来越高。而目前的很多高层建筑物采用地下连续墙和咬合桩的形式进行基坑围护,不仅施工周期长,而且工程造价也很高,增加了整个工程的施工成本。三轴水泥搅拌桩作为一种新型的基坑围护结构形式,不仅占地面积小、挡水效果强、环境污染小、对周围地基影响小,又是多用途的省钱、省时的工艺。随着这种工艺不断从理论和概念上得到完善和成熟,在国内地下工程的施工中得到了越来越广泛的应用。

### 工法特点和工艺原理

#### 1. 工法特点

三轴工法与传统的深层搅拌桩施工的区别在于,深层搅拌桩是采用传统的双轴十字头搅拌钻机,施工时水泥浆液充填在原土间隙中;而三轴中空叶片螺旋式搅拌机则在充填水泥浆时加入高压空气,同时钻机对水泥土进行充分搅拌,并置换出大量原状土。由于采用的设备不同和成桩机理不同,三轴钻机成桩的桩体强度及桩身均匀性明显优于传统的双轴钻机,桩体的垂直性、桩与桩的平行性和搭接程度都十分良好,保证了优良可靠的防水性能。它与钢筋混凝土地下连续墙和钻孔灌注桩施工工艺相比,具有造价低、工期短、对周围环境影响小等特点,尤其在软土地基基础围护施工中优势更为明显。

#### 2. 工艺原理

\* 收稿日期: 2009年10月

三轴水泥搅拌桩也叫柱列式土壤水泥墙工艺，即利用多轴型长螺旋钻孔机在土壤中钻孔，达到预定深度后，边提钻边从钻头端部注入适合不同工程连续墙的水泥浆，将其与原土壤进行搅拌，在原位置上建成一段土壤水泥墙。然后再进行第二段墙施工，使相邻的土壤水泥墙彼此有重合段，连续重叠搭接施工即可做成地下连续墙。至水泥结硬，便形成一道具有一定强度、连续完整的、无接缝的地下墙体，作深开挖基础围护或止水之用。

三轴搅拌桩的搭接以及成型搅拌桩的垂直度补正是依靠搅拌桩单孔重复套钻来实现的，以确保搅拌桩的隔水帷幕作用。三轴搅拌桩一般采用跳槽式双孔全套复搅式施工，但在特殊情况下（如搅拌桩成转角施工或施工间断）也可采用单侧挤压式施工，如下图所示。

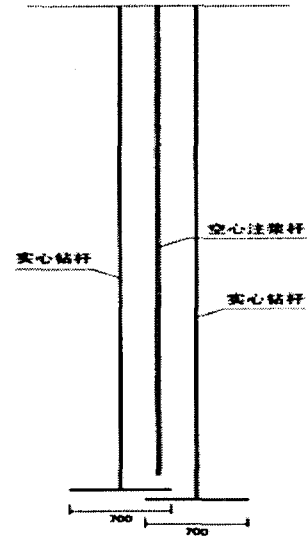


图1 中空三轴钻机原理图及效果图

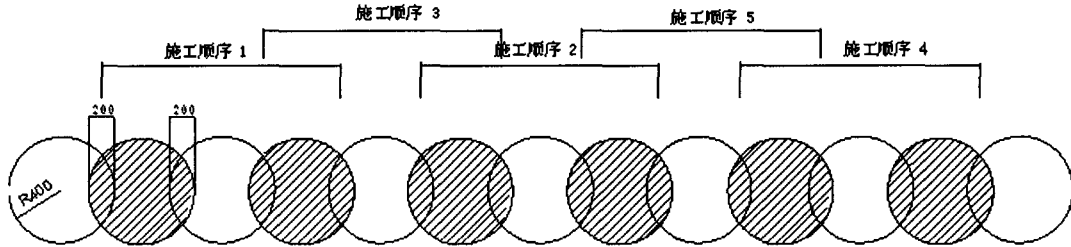


图2 三轴搅拌桩施工原理示意图

## 工艺流程及操作要点

### 1. 施工工艺流程

施工工艺流程见图3。

### 2. 操作要点

#### (1) 测量放线

根据测绘院提供的坐标基准点，遵照图纸制定的尺寸位置，以工程设计图中三轴围护体

的中心线为沟槽的中心线，在沟槽的两侧设置可以复原中心线的标桩，以便在开挖好沟槽的情况下，也能随时检查沟槽的走向中心线。

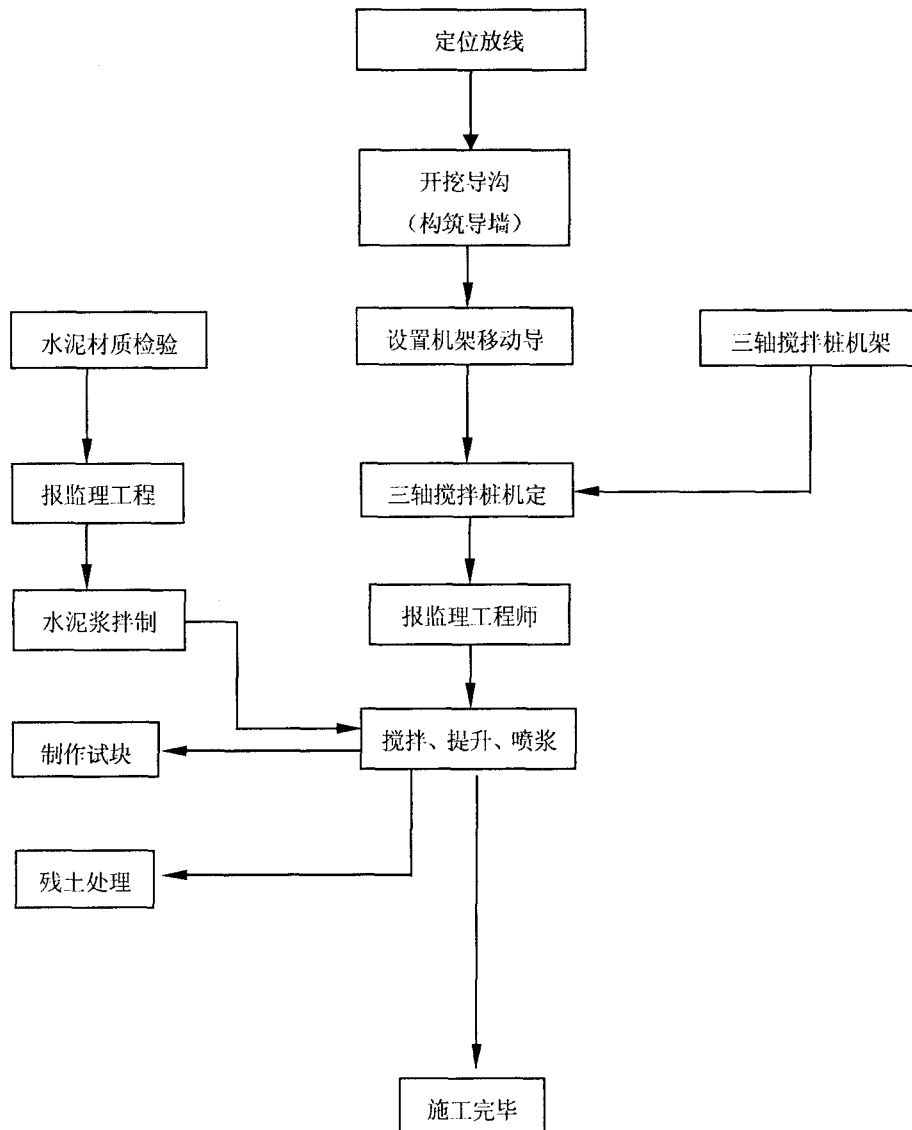


图 3 三轴搅拌桩施工工艺流程图

### (2) 开挖导沟

采用  $0.8\text{m}^3$  挖机开挖工作沟槽，沿围护内边控制线开挖，沟槽宽度约为  $1400\text{mm}$ ，深度

为900mm。遇有地下障碍物时,利用挖土机清障,清障后产生过大的空洞,用素土回填压实,重新开挖导沟以保证三轴施工顺利进行。开挖沟槽的余土应及时处理,以保证三轴工艺正常施工,并达到文明工地的要求。

### (3) 定位、移机

在开挖的工作沟槽外侧设置导向定位线,按设计要求在导向定位线上固定分幅点位置,操作人员根据确定的位置严格控制桩机定位,误差小于5cm,确保桩机控制钻杆下钻深度达到标高。标高控制:①先测量机台标高;②根据搅拌桩深度标定钻杆长度并做好记号。垂直度控制:①在铺设道轨枕木处要整平整实,使道轨枕木在同一水平线上;②在开孔之前用水平尺对桩机进行校对,以确保桩体的垂直度不大于1%;③两台全站仪对搅拌轴纵横向同时校正,确保搅拌轴垂直度满足要求;④施工过程中随机对机座四周标高进行复测,确保机械处于水平状态施工,同时用全站仪经常对搅拌轴进行垂直度复测。

桩机移位调整作业由机长统一指挥,使桩机正确移位并停稳,路基板下面须垫实垫平,使桩机的水平与垂直误差都符合施工要求。机械设备的移动,沿着基坑围护轴线,采用跳槽式双孔全套复搅式的施工顺序全断面套打,以此循环直至围护墙体成型。施工时不容许出现施工冷缝,如因特殊原因出现超过8小时施工接缝,须采用两孔套打的措施加以补强。

### (4) 拌浆

在施工现场搭建拌浆系统,在开机前应进行浆液的搅制,拌浆及注浆量以每钻的加固土体方量换算,浆液流量以浆液输送能力控制。拌制水泥浆液时应严格按设计要求,当加大水灰比时加放一定比例的膨润土;土体加固后,搅拌土体28天抗压强度不小于1.5Mpa。为使土层具有可塑性与流动性,防止出现第一次三轴搅机下沉搅拌后出现水泥土中的砂沉积埋钻现象,在第一次喷浆的浆液中减少水泥掺量(所减少的水泥量加在第二次喷浆的浆液中);按设计配合比充分拌和,贮浆池中的浆液应经常搅拌以防离析。每根桩做一组水泥试块,做抗压试验。

### (5) 钻孔注浆

桩机开钻前,检查桩机平稳性,桩架垂直度,并采用测量仪器进行校验,在确认满足规范要求的情况下,进行下一步的操作。根据设计所标深度,钻机在钻孔和提升全过程中,保持螺杆匀速转动,匀速下钻和匀速提升,同时根据下钻和提升二种不同的速度,注入不同掺量的搅拌均匀的水泥浆液,并注入压缩空气在孔内使水泥土翻搅,使水泥土搅拌桩在初凝前达到充分搅拌,水泥与土能充分拌和,确保搅拌桩的质量,并做好每次成桩的原始记录。并注意:

- a. 为使搅拌钻头容易切入土层,在搅拌钻头最下面一层的叶片上加焊了三角形齿板;
- b. 三轴深搅机下沉第一次喷浆搅拌的下沉速度不大于1m/min;
- c. 三轴深搅机提升第二次喷浆搅拌的提升速度,根据注浆量进行控制,且不大于0.5m/min;
- d. 三轴深搅机的工作电流控制在电机额定值内,否则,应降低三轴深搅机下沉或提升的速度;
- e. 当三轴深搅机下沉或提升施工时,如遇送浆中断,须及时通知前台停机,并在恢复



送浆前使深搅机提升或下降,保证停浆处的桩连续,严防断桩、空桩;

f. 每次下沉钻进时,须待钻头喷浆口出浆后方可钻进工作;

g. 根据确定的水泥浆液的配合比,用量具做好可行性的检测,严格控制水灰比,搅拌时间,浆液质量,注浆时控制注浆压力和注浆速度。

### 3. 劳动力组织

实现本工艺劳动力配置见表。

主要劳动力计划表

序号	工种	主要工作内容	人数	备注
1	司机	挖掘机、桩机、卡车	5	
2	起重工	起重吊放作业	3	
3	泥浆工	泥浆系统安装、泥浆生产循环全部内容	8	机电安装除外
4	电焊工	承担现场所有电焊工作	2	
5	机电工	现场电器设备安装等	2	
6	测量检验工	放样与施工监测等	1	专职
7	管理人员	现场、指挥、技术、质量、材料、生活管理	7	

注: 以上为一个台班所需人数,施工时根据实际情况合理增加

### 4. 材料与设备

本工艺无需特别说明的材料,采用的机具设备见表。

主要机具设备表

序号	设备名称	型号、规格	数量	备注
1	三轴搅拌机	ZKD85-3	1台	200KW
2	桩机	步履式重型桩机	1台	
3	自动搅拌系统	1 m <sup>3</sup>	1套	200KW
4	灰浆桶	0.6m <sup>3</sup>	5只	
5	存浆桶	6m <sup>3</sup>	1只	
6	压浆泵	200L/min	3台	1台备用
7	吊机	50t	1台	
8	全站仪	SET-210	2台	
9	水准仪	JSC	1台	
10	电焊机	BX1-500	2台	
11	路基箱板	2m×6m	12块	
12	挖土机	0.8m <sup>3</sup>	1台	
13	自卸卡车	4.5T	1台	土方内驳
14	空压机	9m <sup>3</sup>	1台	

## 工程质量的保证措施

### 1. 施工技术关键及保证措施

为达到设计图纸及施工验收规范规定的质量标准,除了在人、机、料、法、环各个影响质量的环节上进行全过程控制以外,具体还要注意以下几方面:

(1) 施工现场应先进行场地平整,清除施工区域的表层硬物和地下障碍物,遇明浜(塘)及低洼地时应抽水和清淤,回填粘性土(或置换土)并分层夯实,铺设路基箱,路基承载力应满足重型桩机平移、行走稳定的要求,确保搅拌桩垂直度达到设计要求。

(2) 水泥搅拌桩应按设计要求进行试成桩,确定在本工程中实际采用的水泥浆液水灰比、成桩工艺和施工步骤,试桩定为2-3组。

(3) 工程拟采用电脑计量的自动搅拌系统,以确保浆液质量的稳定,因故搁置超过2小时以上拌制浆液,应作废浆处理,严禁再用。

(4) 严格控制搅拌桩下沉速度和搅拌提升速度,并保持匀速下沉(提升),搅拌提升时不应使孔内产生负压造成堤坝周边地基沉降,在桩机筒身上做好明显标志,严格控制帷幕桩顶和桩底标高。

(5) 为提高围护桩的隔水质量,本工程采用三轴搅拌桩全断面重复套打搭接工序。桩与桩搭接时间超过24小时,应作为冷缝记录在案,采取在搭接处补做搅拌桩等技术措施,确保搅拌桩的搭接质量。

(6) 每台班(24小时)抽查1组三联(7.07cm×7.07cm×7.07cm)标准模水泥土试块,取样应有代表性,自然养护测定28天后试块无侧限抗压强度,应达到设计要求。

(7) 认真填写每班组水泥记录及相应报表备查。

(8) 施工过程中随时检查施工记录,并对照规定的施工工艺对每组桩和检验批进行质量评定,检查重点是:水泥用量、桩长、制桩过程中有否断桩现象、搅拌提升时间。

(9) 水泥土搅拌桩成桩后可以进行必要的质量跟踪检验,了解搅拌均匀程度、桩身强度,以及防渗止水效果,如出现个别不符合规定要求的桩身部位,应采取有效补救措施。

### 2. 成桩施工期的质量控制

(1) 认真做好各施工班组作业人员分层次技术交底,以及上岗前的培训工作,持证上岗,确保岗位工作质量。

(2) 确保使用设计强度等级的水泥,进场水泥及时送检,合格后方可使用。

(3) 施工机械性能良好,桩机和三轴搅拌机在进场前检修,施工时及时例保、检查;压浆泵及时维修、保养,并准备应急备用压浆泵一套,从而确保喷浆的均匀性和连续性。

(4) 施工前对桩机垂直度进行检查校正。

(5) 加强上述施工质量点的全面管理,项目部实现24小时岗位值班制度,做好施工过程质量控制记录。

(6) 施工过程中,由专人负责填写施工记录,施工记录表中详细记录桩位编号、桩长、

断面面积、下沉(提升)的时间及深度、水泥用量、水泥掺入比、水灰比。

### 3. 特殊情况处理措施

(1) 有异常时,如遇无法达到设计深度进行施工时,应及时上报甲方、监理,经各方研究后,采取补救措施。

(2) 在碰到地面沟或地下管线无法按设计走向施工时,宜与设计单位、业主、监理共同协商,确定解决办法。

(3) 施工过程中,如遇到停电或特殊情况造成停机导致成墙工艺中断时,均应将搅拌机下降至停浆点以下0.5m处,待恢复供浆时再喷浆钻搅,以防止出现不连续墙体;如因故停机时间较长,宜先拆卸输浆管路,妥为清洗,以防止浆液硬结堵管。

(4) 发现管道堵塞,应立即停泵处理。待处理结束后立即把搅拌钻具上提和下沉1.0m后方能继续注浆,等10~20秒恢复向上提升搅拌,以防断桩发生。

#### (5) 施工冷缝处理

施工过程中一旦出现冷缝则采取在冷缝处围护桩外侧补搅素桩方案,在围护桩达到一定强度后进行补桩,以防偏钻,保证补桩效果,素桩与围护桩搭接厚度约10cm。因处理冷缝而增加的工程量以实际施工量另计。

#### (6) 渗漏水处理

在整个基坑开挖阶段,应派人常驻工地并备好相应设备及材料,密切注视基坑开挖情况,一旦发现墙体有漏点,及时进行封堵。具体采用以下两种方法补漏。

引流管:在基坑渗水点插引流管,在引流管周围用速凝防水水泥砂浆封堵,待水泥砂浆达到强度后,再将引流管打结。

双液注浆:

- 1) 配制化学浆液。
- 2) 将配制拌合好的化学浆和水泥浆送入贮浆桶内备用。
- 3) 注浆时启动注浆泵,通过2台注浆泵2条管路同时接上Y型接头从出口混合注入孔底被加固的土体部位。
- 4) 注浆过程中应尽可能控制流量和压力,防止浆液流失。
- 5) 施工参数。

注浆压力: 0.3-0.8 Mpa

注浆流量: 25-35 l/min

注浆量: 0.375m<sup>3</sup>/延米

浆液配比: A液 水:水泥:膨润土:外掺剂=0.7:1:0.03:0.03

水泥选用普通硅酸盐水泥 标号为32.5级。

B液 水玻璃选用波宽度为35—40°bl

A液: B液 = 1: 1

初凝时间: 45秒

凝固强度: 3-4Mpa/2h

#### 4. 确保桩身强度和均匀性要求做到

(1) 水泥流量、注浆压力采用人工控制, 严格控制每桶搅拌桶的水泥用量及液面高度, 用水量采取总量控制, 并用比重仪随时检查水泥浆的比重。② 土体应充分搅拌, 严格控制钻孔下沉、提升速度, 使原状土充分破碎, 有利于水泥浆与土均匀拌和。

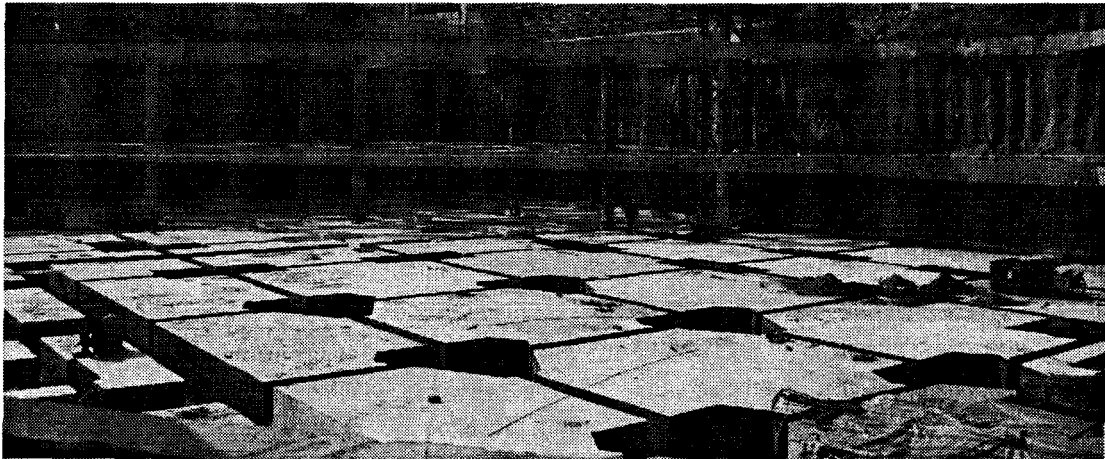
(2) 浆液不能发生离析, 水泥浆液应严格按预定配合比制作, 为防止灰浆离析, 放浆前必须搅拌 30 秒再倒入存浆桶。

(3) 压浆阶段输浆管道不能堵塞, 不允许发生断浆现象, 全桩须注浆均匀, 不得发生土浆夹心层。

(4) 发生管道堵塞, 应立即停泵处理。待处理结束后立即把搅拌钻具上提和下沉 1.0m 后方能继续注浆, 等 10~20 秒恢复向上提升搅拌, 以防断桩发生。

## 工程实例

杭州国际机场大厦工程位于杭州城东, 具体位于庆春广场东侧、新塘路西侧、庆春东路北侧, 与江干区政府相望。该拟建工程建筑面积为 9895m<sup>2</sup>。本工程采用钻孔灌注桩和三轴搅拌桩作为基坑挡土结构和止水帷幕, 三轴搅拌桩桩径为  $\Phi 850$ , 桩长为 17.0 米, 水泥掺量为 20%, 总桩数为 735 根, 本工程地质情况从上到下依次为人工填土、粉土、粉砂、粉质粘土, 桩底位于粉质粘土。本工程采用三轴水泥搅拌桩施工工艺作为基坑止水帷幕, 缩短了工期、降低了成本, 在材料消耗、环保、资源节约及社会效益方面均取得良好的效果。开挖后效果图如下。



## 结论和前景

### 1. 结论

通过对工程的施工成本和开挖后的止水效果分析可以得出, 采用三轴搅拌桩进行基坑围

护,施工成本明显低于地下连续和咬合桩,其成桩桩体的垂直性、桩与桩的平行性和搭接程度都十分良好,保证了优良可靠的防水性能。而且在整个施工过程中,产生残土少,无泥浆二次污染、环境污染小、对周围地基影响小,不失为一种经济合理,技术先进的基坑围护新工艺。

## 2. 前景

随着城市高层建筑的不不断发展及旧城改造中深基坑的开挖,三轴搅拌桩已被越来越多的应用于土建施工;不仅如此,在河流改造工程中作防水墙,在大坝下面防止河流水的渗入,埋设管道时作保护墙和基坑内部被动区土体加固和临时围护侧的止水帷幕等都可以用到三轴搅拌桩施工技术。现在杭州和很多其他城市都在修地铁,三轴搅拌桩施工技术也被广泛的应用于地铁、盾构隧道的加固及坝基帷幕等工程,随着其施工技术的不断完善,其前景应该会越来越好。

## 参考文献

- [1]《地基处理手册》[M].北京:中国建筑工业出版社,1988  
[2]《地基处理新技术》[M].陕西:陕西科学技术出版社,1997

## On the axis of cement mixing pile construction technology and quality assurance measures

Qian zhi guang

Zhejiang Dacheng Construction Group corporation

**Abstract:** Practice has proved that through a number of projects, in the foundation pit, the axis of cement mixing pile does have a number of other processes does not have advantages. Is precisely because of this, in recent years has been three-axis mixing pile more and more used in Foundation Pit Support Engineering, and also achieved good economic results. This detailed description of the three-axis mixing pile elements and features in complex environmental and geological conditions of quality assurance measures and the adoption of this technology of foundation pit economic benefits

**Keywords:** Axis mixing pile Construction Technology Quality assurance measures Economic

## 基坑施工中的地下水处理及工程实例\*

周长清

(中铁十九局集团公司第一工程有限公司 日照 276826)

**[摘要]** 地下水处理方法有止水法和排水法,止水法相对来说成本较高,施工难度较大;井点降水施工简便、操作技术易于掌握,是一种行之有效的现代化施工方法,已广泛应用。通过工程实例对井点降水法作一简要介绍。

**[关键词]** 地下水处理方法; 井点降水; 工程实例

### 前言

当基础深度在天然地下水位以下时,在基础施工中常常会遇到地下水的处理问题。一般认为,基坑开挖要具备以下的必要条件:

1. 首先保持基坑干燥状态,创造有利于施工的环境;

2. 其次是确保边坡稳定,做到安全施工,如果忽视这些必要条件,其后果是严重的。有的基坑积水或土质稀软,工人难以立足,无法施工;有的出现"流砂现象"导致边坡塌方,地质破坏;有的内部基坑土体发生较大的位移,影响邻近建筑物的安全。之所以会出现这些异常情况,都是由地下水引起的。所以,在基坑施工中应对地下水的处理给予应有的重视。

### 地下水处理方法简介

地下水的处理有多种可行的方法,从降水方式来说可总分为止水法和排水法两大类。止水法,即通过有效手段,在基坑周围形成止水帷幕,将地下水止于基坑之外,如沉井法、灌浆法、地下连续墙等;排水法是将基坑范围内地表水与地下水排除,如明沟排水、井点降水等。

止水法相对来说成本较高,施工难度较大;井点降水施工简便、操作技术易于掌握,是一种行之有效的现代化施工方法,已广泛应用。

井点降水法,它是在拟建工程的基坑周围设能渗水的井点管,配置一定的抽水设备,不间断地将地下水抽走,使基坑范围内的地下水降低至设计深度。井点法降水适用于具有不同几何形状的基坑,它有克服流砂、稳定边坡的作用。由于基坑内土方干燥,有利人工配合机

\* 收稿日期: 2009年11月

械化施工,缩短工期,保证工程质量与安全。

目前国内常用的井点降水法有轻型井点、深井井点、喷射井点、电渗井点。在我国,井点降水法是新中国成立后才逐步发展起来的。在工程的基坑<槽>附近埋设大量的渗水井点管,与此同时地面组装抽水管路系统,通过井群连续抽吸地下水,使基坑范围内的地下水位降低到基坑以下一定深度,以保持基坑干燥状态。通常把这一方法叫做井点降水法。

井点降水法具有下列优点:施工简便,操作技术易于掌握;适应性强,可用于不同几何图形的基坑;降水后土壤干燥,便于机械化施工和后续工作工序的操作;井点作用下土层固结,土层强度增加,边坡稳定性提高;地下水通过滤水管抽走,防止了流砂的危害;节省支撑材料,减少土方工程量等。井点降水法已成为目前在含水透水位土层实施的一种行之有效的方法。轻型井点降水法和深井井点降水法最为常见。

### 1. 轻型井点降水法

(1) 轻型井点抽水系真空作用抽水,除管路系统外,很大程度取决于抽水设备。目前常用的真空泵型、隔膜泵型配套抽水装置。

轻型井点井点管、过滤管、集水总管、主管、阀门等组成管路系统,并由抽水设备启动,在井点系统中形成真空,并在井点周围一定范围形成一个真空区,真空区通过砂井扩展到一定范围。在真空力的作用下,井点附近的地下水通过砂井,经过滤器被强制性吸入井点系统内而使井点附近的地下水位得到降低。在作业过程中,井点附近的地下水位与真空区外的地下水位之间,存在一个水头差,在该水头差作用下,真空区外的地下水是以重力方式流动的。所以常把轻型井点降水称真空强制抽水法,更确切地说应是真空-重力抽水法。只有在这两个力作用下,基坑地下水才会降低,并形成一定范围的降水的漏斗抛物线。

井点管与总管的联接可用钢管和透明塑料管,因受真空力的作用,塑料管内装有弹簧,以加强抗外部张力,保证地下水流畅通。

总管与总管的联接有法兰法和套箍法两种形式。

#### (2) 施工时应注意的问题

经过降低地下水位后,土壤会产生固结,也就会在抽水影响半径的范围内引起地面沉降,有时会给周围已有的建筑物带来一定程度的危害。在进行降低地下水位施工时,为避免引起周围建筑物产生过大的沉降,采用回灌井点是一种有力的措施。这种方法就是在抽水影响半径范围内建筑物的附近预先钻一排孔,在进行抽水降低地下水位之前,事先将钻孔内的水位勘查清楚,记录下来。当进行抽水降低地下水位时,为避免已有建筑物下面的地下水位下降,与降水的同时向钻孔内灌水,以保证原地下水位不变化,以此来防止地面产生沉降给已有的建筑物带来危害。

### 2. 深井井点降水法

深井井点降水是在深基坑周围埋置深于基底的井管,依靠深井泵或深井潜水泵将地下水从深井内扬升到地面排出,使地下水位降至坑底以下。

深井井点降水具有排水量大、降水深、不受吸程限制、井距大等优点。但其一次性投资

大,成孔质量要求高。深井井点降水适用于渗透系数较大(10~250m/d);土质为砂土、碎石如;地下水丰富、降水深(10~50m)、面积大的情况。

#### (1) 井点降水施工工艺程序

成孔 → 安设井管、填充滤料 → 洗井 → 安设水泵 → 抽水降水

#### (2) 井点设置与使用阶段的注意事项

- a. 基坑内井点应同时抽水,使水位差控制在要求范围内。
- b. 加强水位监测,特别是靠近已有建(构)筑物的深井井点,宜在建(构)筑物附近设观测井,水位差过大时,应立即采取补救措施,如设置回灌井点等。
- c. 排出的地下水应远离基坑,或设防渗漏措施,以防止排出的地下水回渗而流入基坑。
- d. 潜水泵在运行时要注意检查电缆线是否和井壁相碰,以防磨损后水沿电缆芯渗如电动机内。
- e. 位于基坑内的深井井点,由于井管较长,挖土至一定深度后,井管应于附近的支护结构支撑或立柱等连接,予以固定。
- f. 当基坑底部有不透水层时,为排除上层地下水,可采用砂井配合深井降水。

### 3. 渗水量计算

估计侵入基坑的水量,可用抽水试验法和直接计算法进行。前者是在试坑或钻孔中进行实地抽水求得,结果较为可靠,但后者简便。施工前为了估计抽水设备能力,可应用计算法。计算法只求基土含水层的渗水,水中基坑应向外估计围堰渗水量。

#### (1) 渗水系数的确定

渗水系数的确定一般有两种方法,即查表法和按颗粒成份计算。

①查表法:由《铁路工程施工技术手册-桥涵 上册》79页表2-6和表2-7可查得含水层的渗透系数。(表2-6中土壤分类与常用名称不同,使用时可以颗粒大小为准。用表2-7时应按细颗粒的多少、粘土粒含量、胶结情况、密实程度等,选择数字)

②按颗粒成份计算法:本法只适用于砂土类土壤。颗粒成份应取样由实验室决定,渗透系数可用下列任一公式求得。

$$K=C*11.56*d_H^2; \text{ 或 } K=3.76*d_M^2$$

式中:K——渗透系数(m/d);

$d_H$ ——颗粒有效直径(占总试样10%的颗粒直径,mm);

$d_M$ ——颗粒平均粒径(mm);

C——经验系数,其值在纯砂为1200,非均质砂及密实砂为400,均质密实砂为800。

#### (2) 渗水量

求得渗透系数后,可在下列公式中选用一式以求基坑总渗水量。

①干河床时用的计算式为



$$Q = \frac{1.36KH^2}{\lg(R+r_0) - \lg r_0} \quad (1)$$

式中:

Q——基坑总渗水量 (m<sup>3</sup>/d);

K——渗透系数 (m/d);

H——稳定水位至设计基底的深度 (m); 当基底以下为深厚透水层时, H 值可酌加 3~4m, 以保安全;

R——影响半径 (m), 其值见表 2;

r<sub>0</sub>——引用基坑半径 (m), 对于矩形基坑,

$$r_0 = \mu \frac{L+B}{4}$$

基坑形状不规则时,  $r_0 = \sqrt{F/\pi}$ , 其中 L 与 B 分别为基坑的长和宽; F 为基坑面积;  $\mu$  值如下:

B/F=0.1;0.2;0.3;0.4;0.6;1.0;

$\mu$ =1.0;1.0;1.12;1.16;1.18;1.18;

②基坑近河沿时用下式计算:

$$Q = \frac{1.36 KH^2}{\lg \frac{2D}{r_0}} \quad (2)$$

式中: D——基坑距河边线距离, 其余同上式

## 工程实例

中铁十九局集团公司承建的新建铁路胶州至新沂线 (简称胶新线) ZH-10 标段: 岫山站 (中心 DK127+000, 缓建) ~ 莒县站 (出站, DK139+650) 12.65km 地段的综合工程, 是国家重点铁路建设项目, 其中 DK132+218.35 18-32m 袁公河特大桥为本标段的重点工程。

### 1. 工程地质条件

袁公河河床及漫滩地层岩性为砂粘土、中砂、粗砂、圆砾土, 基底稳固; 地下水主要为第四系孔隙潜水, 含水层为中粗砂及砾石层, 含水丰富, 主要受大气降水及河流地下水补给, 一般埋深 4~5m, 年变幅 2m 左右。

### 2. 工程概况及降水方法

#### (1) 工程概况

袁公河特大桥, 全长为 599.9m, 13-32m 预应力混凝土普高梁。胶台、1#~7#桥墩、16#~17#桥墩和新台为扩大基基础, 8#~15#为钻孔桩基础。根据地质资料得知, 该桥处水文地质条件较为单一, 场地地下水属第四系孔隙潜水, 主要补给源为大气降水, 地下水受季节性影响较

大。场内地下水位在 0.3—1.73m 之间, 水位很高, 其含水层主要为中粗砂及圆砾土, 其渗透量很大。

### (2) 渗水量计算

#### ①对于 8#~14#桥墩, 按基坑近河计算:

根据上式 2 及由《铁路工程施工技术手册-桥涵 上册》79 页表 2-6 和表 2-7 可查得含水层的渗透系数。查表得:  $K=75 \text{ m/d}$  (粗砂夹砾石),  $H=6\text{m}$ ,  $D=7\text{m}$ ,  $r_0=1.18 \times (5+5)/4=2.95\text{m}$ , 渗水量为:

$$Q = \frac{1.36 \times 75 \times 6^2}{\lg(2 \times \frac{7}{2.5})} = 5010 \text{ m}^3/\text{d} = 209 \text{ m}^3/\text{h}$$

#### ②对于 1#~7#桥墩, 按干河时计算:

根据上式 1 及由《铁路工程施工技术手册-桥涵 上册》79 页表 2-6 和表 2-7 可查得含水层的渗透系数。查表得:  $K=75\text{m/d}$  (粗砂夹砾石),  $H=8\text{m}$ ,  $R=500\text{m}$ ,  $r_0=1.18 \times (9+7.5)/4=4.87\text{m}$ , 渗水量:

$$Q = \frac{1.36 \times 75 \times 8^2}{\lg(500 + 4.87) - \lg 4.87} = 3239 \text{ m}^3/\text{d} = 135 \text{ m}^3/\text{h}$$

③对于胶台、新台及 15#~17#桥墩, 设计基础底为圆砾土, 但以上为砂粘土, 故渗水量相对很小, 计算略。

### (3) 降水方法的选择

根据本工程的各个桥墩、台的实际地质情况, 拟采用三种降水方法:

①大口径深井点降水: 对于 8#~14#桥墩都在主河道内, 渗水量大 ( $209\text{m}^3/\text{h}$ )。故采用大口径深井降水方法。

首先, 沿桥墩承台基础周围设 8 眼降水井, 深水电泵进行抽水。考虑到降水深度大, 影响半径范围广, 在基础施工期间不间断抽水, 以保持施工工作面干燥, 故另备 4 台深水泵。降水井径大于 500mm, 孔深 6.0m,  $\phi 500\text{mm}$  混凝土渗水管外面包 2 层尼龙网布; 由于该地层为圆砾土或粗砂, 故渗水管四周不用砾石料填充作滤水层, 但原地下水位线以上用粘土回填, 并捣实。工程严格按照降水井施工规范要求埋设管井, 采用泥浆护壁钻孔法成孔。井孔钻孔后进行清孔, 随后安装井管。井管安装后, 开始在每口井内用深水泵抽水, 以保证工作面干燥, 便于施工。

②薄壁沉井支护降水方法: 对于 1#~7#桥墩基础扩大基础比较深, 渗水量较小 ( $135\text{m}^3/\text{h}$ ), 又因桥墩两侧地方林区施工面小。故采用薄壁沉井支护降水方法。

首先, 在桥墩基础周围用挖掘机挖至地下水位处, 然后按照桥墩最下一层基础的尺寸每边各加 80cm 现场预制薄壁沉井, 高度为地下水位至基础底。为了加快施工进度, 薄壁沉井砼加早强剂。待砼强度达到 90% 时, 开始沉井至设计标高, 并且在基础模板周围挖排水沟及集水井, 用 4 台深水泵抽水, 以保持工作面干燥。

③基坑抽水降水方法: 对于胶台、新台及 15#~17#桥墩, 由于渗水量小, 施工场地比较

大,故采用明挖基础基坑抽水降水方法。

### 3. 施工效果

本工程的三种降水方法都比较成功,特别是大口径深井点降水方法,水位得到控制,流砂的现象也仅有少量出现,改善了施工条件,三种降水方法同时施工,使施工进度加快,质量也同时得到了有效的控制,为使该特大桥创优质工程打下基础,同时取得了较好的经济效果。

### 参考文献

铁路工程施工技术手册--桥涵(上册)[M]. 铁道部第三工程局 中国铁道出版社

## 简 讯

### 第八届全国土动力学学术会议论文征集通知

第八届全国土动力学学术会议将于2010年12月24~26日在哈尔滨隆重召开。本届会议由中国振动工程学会土动力学专业委员会主办并得到相关学会的支持,中国地震局工程力学研究所承办,哈尔滨理工大学协办。

每四年召开一次的全国土动力学学术会议,已经成为我国土动力学领域规模最大,最有影响,最具特色的系列化学术会议。本届会议的主题是“创新,时间,安全”,立足于交流近年来我国土动力学领域最新研究成果,推动理论在工程实践中的应用,为从事土动力学研究和应用的科技工作者提供一个良好交流机会,为我国未来防灾减灾事业的发展提供重要的技术支持。

#### 论文议题

土的动力特性与本构关系;土工动力测试技术及其应用;岩土动力解析与数值方法;地面运动与场地效应;土体—结构动力相互作用分析;地震液化判别和危害性评价;土工结构与边坡工程抗震;减震隔振技术与环境岩土工程;基础和地下工程抗震;生命线工程抗震;海洋土动力特性与海洋岩土工程;爆炸及其它高速人工荷载下土体响应;土工震(振)灾检测技术;土工抗震加固技术;计算机技术应用;汶川地震岩土抗震问题;规范、政策议题及行业标准;工程实录。

#### 论文要求

论文应为未经发表的最新成果,学术委员会将组织专家对所提交的论文进行审查,精选一定数量的优秀论文在《地震工程与工程振动》专刊上正式发表,其余通过审查的论文将以论文集的形式印刷,采用无刊号方式出版。论文格式参考《地震工程与工程振动》,篇幅尽量控制在6页内,并通过电子邮件按时发大会论文提交邮箱 iemsr@163.com。

#### 重要日期

全文截止时间2010年6月30日;录用通知时间2010年7月31日;修改稿截止时间2010年9月30日。

#### 联系人

孙悦 0451-86673512, 13089707021

陈龙伟 0451-86652942, 15904609983

通信地址: 哈尔滨学府路29号中国地震局工程力学研究所

邮政编码: 150080

(大会秘书处供稿)

## 静压法施工预应力混凝土管桩的质量管理\*

赵荣妹

(广州市财贸建设开发监理有限公司 广州 510000)

[摘要] 预应力混凝土管桩采用静压法施工越来越普遍,其施工质量问题也倍受关注,现对其质量管理问题作

[关键词] 预应力混凝土管桩;静压法施工;质量管理

### 概述

预应力管桩由于其具有施工工期短、单位承载力及造价较低等优点,近几年来在珠江三角洲得到了迅猛发展及推广应用。预应力混凝土管桩的沉桩方法有锤击法与静压法等,在闹市区为减少噪音及废气等污染,普遍采用静力压桩方法,在其它地区为避免振动及噪音也常采用静压法。同时由于锤击法施工在环保等方面的缺点日益突出,故而静压法施工越来越普遍,由此而引发的许多关于静压管桩的质量问题也倍受人们的关注。

使用的液压静力压桩机应满足设计最大满载静压力的要求,一般桩机总配重至少2800~4800kN,并应有配套机具。由于静压桩机体积与重量大,压桩过程中的挤土效应不容忽视,而目前珠江三角洲地区预应力混凝土管桩预制生产工艺,即使是高强PHC桩,其横向抗剪能力与在轴力作用下所能承受的抗裂弯矩都是比较小的,在静压法管桩的应用中,质量事故时有发生,因而施工过程中的质量管理非常重要。

### 质量管理

#### 1. 压桩前的质量管理

(1) 桩机的选择。根据具体工程的地质资料和设计的单桩承载力要求,准确地选择压桩机。如果压桩机吨位过小,可能出现桩压不下的情况,因而无法达到设计承载力要求;反之,如果压桩机吨位过大,易发生陷机情况。所以应该合理地选择桩机,尽量采用超载施工。一般情况下,桩机的压桩力应不小于单桩竖向极限承载力标准值的1.2倍。

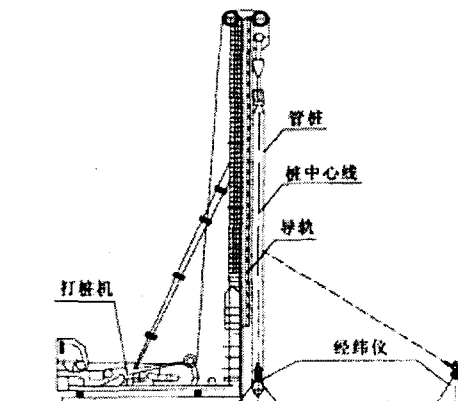


图1 控制桩机及管桩垂直度示意

\* 收稿日期: 2009年8月

(2) 施工放线与定桩位。由于放线的准确与否直接影响建筑物的位置是否符合“规划”要求,而桩位的准确与否又直接影响着整个工程的结构,因此这两个工序的重要性不容忽视。项目技术管理人员应该对已定好的轴线位进行复核,根据建筑物与结构桩位图逐位校核,发现不符合要求的及时纠正。

(3) 桩尖、桩身质量检查。首先对桩尖进行查验、测量,按照管桩有关规范对于桩尖的构造要求和设计图纸要求,对所有到场的桩尖进行测量,不满足设计和管桩规范要求的,责令其更换;对所有到场的管桩进行仔细认真地查验,测量管桩的外径、壁厚、桩身、长度、桩身弯曲度等有关尺寸,并详细记录。特别是管壁厚度,由于静压法施工中的夹持力较大,壁厚不够很容易把桩夹碎。同时应对桩身外观质量进行仔细地查验,检查桩身是否粘皮麻面、内外表面是否露筋、表面是否有裂缝、是否断头脱头、桩套箍是否凹陷、表面砼是否坍塌等情况,不符合管桩规范要求的,责令厂家退回。

## 2. 压桩过程的质量管理

(1) 底桩(第一节入土的桩)的定点。虽然在放线与定桩位时已经核查过,但是经验不足或技术水平不高的施工技术人员往往在放底桩时偏离原定的桩位,从而导致成桩的偏位。可在每个桩位处用石灰或贝灰以原定的桩心为圆心、以该桩的桩径为直径画一圆圈,压底桩时以此圆圈为准,控制桩不偏离该圆圈,使成桩的偏位尽可能减小。

(2) 桩身垂直度的控制。由于静压管桩桩机驾驶室内一般会悬挂一吊有重锤的绳线,由开机员以此线为准控制桩一个方向的垂直度,因另一方向的垂直度必须另外控制,方法就是在垂直于桩与此绳线连接的地方(即另一正交方向)另设一吊重锤的绳线(视线要通透),以这两条绳线来控制桩的垂直度,如图1所示。当桩在两个方向都已经垂直的情况下方允许压桩,而且在压桩过程中要经常检查桩身垂直度。

(3) 接桩及焊缝控制。接桩前,应保证上下两节桩的顺直,宜设置接桩导向箍使两桩心错位偏差不宜大于2mm。施工中主要采用焊接法接管桩,在焊接前应该把两节桩的端头板用钢刷清刷干净,直至坡口露出金属光泽,而且应该保证上节桩已经垂直后方能焊接。焊接时最好两个焊工同时进行,先在坡口圆周上对称点焊4-6点,焊接层数不少于2层,每层焊渣必须清理干净,保证焊缝连续饱满,自然冷却约8~10min。严禁用水冷却或焊完即压,防止高温的焊缝遇水变脆而被压坏。

(4) 施工记录。为了便于控制终止压桩,必须详细记录压桩过程的压力与桩入土深度,了解桩尖进入持力层深度是否满足设计要求以及桩穿过各土层时的压力值。

(5) 终压标准及控制。终压标准应该以质监部门、设计单位、施工单位、建设单位、勘察单位及监理单位等有关部门在试桩会议中根据试桩的实际情况确定为准则。一般情况下,除保证桩长及桩尖入持力层深度应该满足设计要求外,还要控制终压值 $Q$ 的大小。虽然终压值 $Q$ 与单桩竖向承载力标准值 $R_k$ 是两个不同的概念,但终压值 $Q$ 与单桩竖向承载力标准值 $R_k$ 存在着某种比例关系。笔者认为这种比例关系与工程地质构造情况关系较大,同时与桩的长度以及所选的持力层关系也不可忽视,总结珠江三角洲地区近几年静压管桩的工程实践经验,终压值 $Q$ 可以按以下原则来控制:当桩端持力层为粘土、粉质粘土时,主要控制桩端达到的设计深度,终压值 $Q=(0.6 \sim 1.3)R_k$ ;当桩端持力层为标贯击数较低、中密以下的粉细砂时,以控制桩端入持力层深度为主,终压值作参考, $Q=(1.6 \sim 2.0)R_k$ ;当桩端持力层为标贯

击数较高,中密以上的中粗砂、砾砂时,以控制终压值为主, $Q=(1.8\sim 2.5)R_k$ ,长桩取低值,短桩取高值;击数低取低值,击数高取高值。

### 3. 桩头填芯的质量控制

由于桩与上部结构的连接主要通过桩的承台,因此桩头嵌入承台的长度不宜太短,有关管桩技术规范规定不宜小于10cm。从日本桩基的典型震害实例调查中可知,有不少是由于桩嵌入承台长度不足,抗拔不够,因此在地震设防区有必要把桩嵌入承台的长度加长,且桩头的插筋长度也应加长及增加配筋量,桩头填芯砼的强度等级应满足规范要求和设计要求。这一环节的重要性显而易见,工程有关技术管理人员应该加强这一环节的质量控制。

## 成桩的质量检查

1. 桩身垂直度及桩身质量的检查。桩身的垂直度可以用垂球吊线的办法来量测,对不符合规范要求的,应及时报送设计单位,由设计单位提出补强修改意见。对于配置封口桩尖的工程桩,桩身质量的检查可以直观检查,即将低压电灯泡沉入桩内腔检查,正常情况下内腔应该是不进土和水的。若桩内腔完整干燥,说明桩身基本完好、焊接质量完好、桩尖无损坏,这种情况下可不采取其他方法另行检查;反之,应该采取其他方法另行检查。目前珠江三角洲地区主要依据有关规范规定,按桩总数的一定比例采取小应变动测的检测方法,对桩身的完整性进行检测。

2. 桩顶标高及偏位情况的检查。基础开挖后,应对桩顶标高及桩的偏位情况进行测量,并把记录资料完整地整理一份报送设计单位,由设计单位提出方案,解决那些桩顶标高低于设计标高以及桩偏位超过规范要求的情况。而对于那些桩顶标高高于设计标高的情况,施工单位应用电锯法截去多余的桩段,而不应该用人工敲打的办法把多余的桩段敲掉,那样很容易把成桩敲伤。

3. 单桩竖向承载力的检测。目前主要采用静荷载试验的方法来检测成桩的单桩竖向承载力,由设计单位、质监部门、施工单位、建设单位及监理单位等有关部门举行点桩会议,选取较具代表性的桩进行静荷载试验。静荷载检测时一般用慢速维持荷载法,并要求工程技术管理人员进行现场监督,详细记录最终沉降量和残余沉降量等。特别要注意检测桩机在进场、退场及移动过程中不要碰撞到任何工程桩基。

## 常见质量问题与处理

1. 桩倾斜,即插桩初压即有较大幅度的桩端走位和倾斜。碰到此种情况,很可能在地面下不远处有障碍物。处理的措施主要是在压桩施工前将地面下旧建筑物基础、块石等障碍物彻底清理干净。

2. 桩尖达不到设计深度。静压管桩施工时,若发生个别桩长达不到设计深度,其原因可

能是：桩尖碰到了局部的较厚夹层或其他硬层；中断沉桩时间过长(由于设备故障或其他特殊原因，致使沉桩过程突然中断，若延续时间过长，沉桩阻力增加，使桩无法沉到设计深度)；接桩时，桩尖停留在硬土层内，若时间拖长，很可能不能继续沉桩。发生管桩沉不下去时，应冷静分析原因，找出对策才能继续施工，切不要盲目加大压桩力，强行沉桩。

3. 基坑开挖不当引起大面积群桩倾斜。挖土引起基桩的倾斜，直接起因是挖土方法不当，将基坑挖得太深或将挖出的土堆放在基坑边坡附近，因而产生侧向压力；加上淤泥本身的流动性以及土体中未消散的超孔隙水压力乘机向开挖方向释放，加剧了淤泥向开挖方向流动，而管桩对水平力的抵抗能力小，于是随着土体的位移而向开挖方向倾斜，造成桩顶大量位移。发生这样的事故先要进行调查分析，弄清哪些桩报废，哪些桩还可以利用，哪些桩应折减其承载力，然后根据实际情况进行补桩。为防止此类工程事故的发生，应严禁边压桩边开挖；开挖宜在基桩全部完成并至少隔15天后进行，挖土宜逐层均匀进行，桩周土体高差不宜超过1m；注意保持基坑围护结构或边坡土体的稳定；基坑顶部周边不得堆土或堆放其他重物等。

4. 桩身上浮。当工程桩较短或较密集时，较容易发生桩身上浮的情况，此时采取复压是措施。所谓复压指的是已经压好的桩再进行静压的一种措施。

## 结语

静压管桩，由于施工时无噪音、无废气、无泥浆污染，抗震性能好，管桩又能形成规模生产，不仅广泛应用于建筑物的桩基础，还可作为加固利用于复合地基中。虽然目前静压管桩工程实践经验还不十分丰富，但随着静压管桩技术的广泛应用和发展，以及人们对静压管桩的理论研究和工程实践经验的不断积累，相信静压管桩技术应用水平将会不断地得到提高。

## 参考文献

- [1] 阮起楠编著《预应力砼管桩》[M]，中国建材工业出版社2000年2月第1版；
- [2] 广东省标准《预应力砼管桩基础技术规程》DBJ/T15-22-98[S]。

## Quantity Management for Static Pressure Method Construction Prepared Response Dint Concrete Tube Stake

ZhaoRongmei

(Guangzhou Caimao construction development manage limited company Guangzhou 510000)

**Abstract:** Prepared dint concrete tube stake adoption static pressure method construction more and more widespread, its construction quantity problem and also times suffer the concern, now as to it's quantity management the problem makes thiS text speaking about.

**Keywords:** prepared response dint concrete tube stake, statiC pressuremethod construction, quantity Management

## 南宁市四塘小学滑坡地质灾害治理施工实践\*

李月玲<sup>1</sup> 陆杰<sup>2</sup> 韦兴标<sup>1</sup>

(1 广西水文地质工程地质勘察院 柳州 545006);

(2 中国建筑西南勘察设计研究院有限公司重庆分公司 重庆 400015)

**[摘要]** 本文结合工程实际情况, 主要介绍南宁市四塘小学滑坡地质灾害治理工程中的抗滑桩、挡土板和连系梁等主要分项工程的施工技术; 该滑坡治理工程中, 抗滑桩既起抗滑作用, 同时又是学校围墙的基础, 节约建设投资, 缩短工期。

**[关键词]** 膨胀性泥岩; 滑坡地质灾害及治理; 抗滑桩; 施工工艺; 抗滑作用; 学校围墙基础 节约建设投资; 缩短工期

### 概述

受南宁市国土资源局委托, 我院承担南宁市四塘小学滑坡地质灾害治理工程的勘查设计与施工, 桂林地质矿产研究院承担该滑坡地质灾害治理工程的施工监理。前期施工于2008年4月结束; 但因地质条件复杂, 前期施工结束后又发现新的地质灾害点, 为彻底治理新的地质灾害, 业主委托我院进行施工图补充设计与施工, 该滑坡治理施工图补充设计于2008年5月完成并通过专家评审组评审, 设计采取“抗滑桩+连系梁+浆砌石挡土板+重力浆砌石挡土墙+排水沟+平整场地+围墙”等措施对该滑坡进行综合治理。我院2008年12月22日进场施工, 2009年6月30日完成该滑坡治理工程的后期施工任务。本期滑坡综合治理共完成抗滑桩31根, 桩长累计254.46m, 累计灌注混凝土约270m<sup>3</sup>, 钢筋笼制安19t; 现浇钢筋混凝土挡土板长120m、平均高2.67m及连系梁长120m、宽0.80m、厚0.30m; 高3.5~4.2m衡重式浆砌石挡土墙长约77m, 浆砌石约183m<sup>3</sup>; 浆砌石排水沟约210m, 浆砌石约110m<sup>3</sup>; 学校围墙约210m, 浆砌红砖砌体约287m<sup>3</sup>; 校园内客土回填夯实约2300m<sup>3</sup>等。该滑坡地质灾害经综合治理后得到有效控制, 该校教职工安心工作, 学生生活学习秩序良好。

### 滑坡区内的工程地质特征与水文地质条件

#### 1. 滑坡区内的工程地质特征

根据滑坡地质灾害勘查资料, 勘查区地层岩性为: 上覆第四系杂填土(Q<sup>ml</sup>)、种植土(Q<sup>pd</sup>)、

\* 收稿日期: 2009年11月



粘土及砾砂(Q<sup>d</sup>)、残积粘土(Q<sup>cl</sup>)、下伏基岩为第三系上新统上段(N<sub>2</sub><sup>3</sup>),内陆湖相沉积的半成岩-泥岩。各岩土层工程地质特征如下:

(1) 填土(Q<sup>ml</sup>第①层): 主要由灰褐色、褐黄色粘土混夹碎砖等建筑垃圾及少量生活垃圾组成, 硬质物含量约20%, 土质不均匀, 结构松散, 稍湿~湿, 层厚0.30~3.80m, 主要分布于滑坡体后缘。

(2) 种植土(Q<sup>pd</sup>第②层): 褐黄色、灰褐色, 土质不均匀, 结构松散, 由粘性土组成, 含植物根系, 稍湿~饱和。层厚0.40~1.10m, 顶面埋深0.00~0.30m, 该层除滑坡后缘部分地段缺失外, 其余地段均有分布。

(3) 硬塑状粘土(Q<sup>d</sup>第③层): 棕黄、褐黄色, 土质均匀, 结构致密, 摇振无反应, 干强度及韧性高, 稍湿~湿; 该层于滑坡中部部分地段有分布, 层厚0.40~1.40m, 顶面埋深0.70~1.60m。

(4) 可~软塑状粘土(Q<sup>d</sup>第④层): 棕黄、棕红色, 黄褐色等, 土质松软, 粘性较大, 摇振无反应, 干强度及韧性强。该层于滑坡中、后缘部分地段有分布, 层厚0.80~3.00m, 顶面埋深1.20~2.20m。

(5) 稍密状砾砂(Q<sup>d</sup>第⑤层): 灰白色, 粒径以2~20mm居多, 含量约45%, 呈亚圆状, 粒间充填黄色粘性土, 砾石成份以石英、硅质岩为主, 其次为燧石、砂岩等, 稍湿; 该层于滑坡中部部分地段有分布, 层厚0.80~2.10m, 顶面埋深0.70~4.10m。

(6) 可塑~软塑状粘土(Q<sup>cl</sup>第⑥层): 灰黄, 浅灰白色等, 粘性强, 呈可塑~软塑状, 结构松软。该层于滑坡中部部分地段有分布, 层厚0.80~1.30m, 顶面埋深2.60~3.30m。

(7) 强风化泥岩(N<sub>2</sub><sup>3</sup>第⑦层): 青灰、灰褐、灰黑色等, 泥质结构, 粘性强, 表层呈硬塑状, 往下呈硬塑状, 层理不明显。该岩为极软岩, 呈半成岩状, 岩体较完整。本次勘察钻入该层厚度为3.00~10.80m, 未揭穿。

## 2. 场地内水文地质条件

滑坡区内主要为上层滞水及第四系孔隙潜水, 其次为基岩裂隙水, 在滑坡后缘ZK1号孔北东侧及探井4的填土中分布带有线状地下水渗出, 流量约0.022~0.031l/s, 旧厕所的化粪池下(探井3旁)也有地下水呈泉状流出, 水量较小, 滑体与基岩面接触带土体湿润, 部分有地下水渗出, 水量较小, 且受降雨影响明显。下伏基岩为相对隔水层。勘探结果表明, 基岩均为泥岩, 滑体中赋存的地下水难以进入滑床。

根据水质分析结果, 该地下水和地表水SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量80.67mg/l, Mg<sup>2+</sup>含量8.77mg/l, 侵蚀性CO<sub>2</sub>含量29.45mg/l, PH值6.38, 呈弱酸性, 对混凝土及钢筋混凝土结构具弱腐蚀性。

## 设计技术要求

### 1. 设计技术要求

#### (1) 抗滑桩设计技术要求

根据《施工图补充设计》, 三塘镇四塘小学围墙位于滑坡体上, 该围墙基础设计采用31

根抗滑桩(人工挖孔灌注桩)对该滑坡进行治理,抗滑桩上部为连系梁和高2.50m的围墙。其中A4桩型 $\phi 800$  mm 7根,A1~A3桩型 $\phi 1000$  mm 20根,A5桩型 $\phi 800$  扩底 $\phi 1000$  mm 4根。

a. 各类型桩设计技术要求见表1。

各类型桩设计技术要求

表1

桩型	桩径 (mm)	桩数 (根)	设计桩 长(m)	入岩深 度(m)	桩身砼设 计强度等 级	钢筋笼				
						长主 筋	短主 筋	加强 筋	螺 旋 筋	保护层 (mm)
A1	$\phi 1000$	8	11.50	3.00	C25	13 $\Phi$ 20	7 $\Phi$ 20	$\Phi$ 16	$\phi$ 14	50
A2	$\phi 1000$	6	11.00	3.00	C25	13 $\Phi$ 20	7 $\Phi$ 20	$\Phi$ 16	$\phi$ 14	50
A3	$\phi 1000$	6	11.50	3.00	C25	13 $\Phi$ 22	7 $\Phi$ 22	$\Phi$ 16	$\phi$ 14	50
A4	$\phi 800$	7	8.00	2.50	C25	12 $\Phi$ 20	/	$\Phi$ 16	$\phi$ 12	50
A5	$\phi 800$	4	6.00	/	C25	10 $\Phi$ 20	/	$\Phi$ 16	$\phi$ 12	50
小计		31				通长	加密			

b. 桩端入岩深度要求:A1~A3型桩桩端入岩深度要求 $\geq 3.00$ m,A4型桩桩端入岩深度要求 $\geq 2.50$ m;A5桩型( $\phi 800$ 扩底 $\phi 1000$ mm)桩端入岩深度不作要求,但桩长必须 $\geq 6.00$ m。

c. 人工挖孔埋设钢筋混凝土护壁:护壁设计厚150mm,螺旋筋采用HPB235 $\phi 8@200$ ,纵向钢筋采用HPB235 $\phi 10@250$ ;混凝土强度等级设计C15。

d. 抗滑桩主筋:A1型桩长主筋为HRB335级13 $\Phi$ 20,短主筋为HRB335级7 $\Phi$ 20;A2型桩长主筋为HRB335级13 $\Phi$ 20,短主筋为HRB335级7 $\Phi$ 20;A3型桩长主筋为HRB335级13 $\Phi$ 22,短主筋为HRB335级7 $\Phi$ 22;A4型桩主筋为HRB335级12 $\Phi$ 20;A5型桩主筋为HRB335级10 $\Phi$ 20。加强筋为HRB335级 $\Phi 16@2000$ ,螺旋箍筋为HPB235级 $\phi 14@250$ 或 $\phi 12@250$ ,钢筋保护层厚度50mm。

e. 桩身混凝土设计强度等级为C25,地面下部桩身混凝土采用串筒下料,机械振动密实;地面以上部分设计采用圆模定型,脚手架固定,人工或机械提升混凝土浇灌,机械振动密实。

f. 桩顶上部主筋应当嵌入连系梁200mm,确保桩与连系梁的有效连接。

## (2) 挡土板设计技术要求

a. 抗滑桩前方挡土板基础设计为M7.5水泥砂浆浆砌石,其基底必须为硬塑状红粘土,要求基底必须进入硬塑状红粘土0.50m以上。M7.5水泥砂浆浆砌石设计规格:基础宽550mm,高1000mm。

b. 挡土板设计采用预制C25钢筋混凝土挡土板,纵向钢筋为HRB335级6根 $\Phi 14$ mm,两端设置6.25d的弯钩(d为钢筋直径);箍筋HPB235级 $\phi 8@200$ mm,两端设置5d的弯钩(d为钢筋直径);受力钢筋保护层厚35mm。单板挡土板为长4.00m,高0.50m。

c. 挡土板每隔2m设置 $\phi 50$ mm的泄水孔,泄水孔呈品字形布置。

### (3) 连系梁设计技术要求

- a. 抗滑桩上部连系梁设计规格: 宽 500 mm, 高 300 mm; 连系梁设计顶部标高 100.57m, 与校园地坪标高 (100.57m) 一致。
- b. 连系梁纵向钢筋为 HRB335 级 8 根  $\Phi 14@150$  mm, 均匀分布; 箍筋 HPB235 级  $\phi 8@200$  mm, 两端设置 5d 的弯钩 (d 为钢筋直径); 受力钢筋保护层厚 50 mm。
- c. 连系梁每隔 16m 设置伸缩缝, 伸缩缝设置部位为抗滑桩中心部位。
- d. 连系梁混凝土设计为 C25, 采用现场机械浇筑。

## 施工技术

### 1. 抗滑桩的施工技术

#### (1) 抗滑桩施工工艺流程

测量放线, 确定桩位 → 桩孔开挖, 浇筑砼护壁 → 终孔封底 → 钢筋笼制安 → 抽水、清除桩底杂物 → 浇灌桩身砼及养护 (地面以下部分) 搭设脚手架, 支模 → 浇灌桩身砼及养护 (地面以上部分)。

#### (2) 测量放线, 确定桩位

根据施工图补充设计图纸, 由测量工程技术人员采用徕卡全站仪测量放桩位和高程测量, 测量放孔桩位允许偏差控制在 20 mm 以内。经甲方和监理单位审查批准后, 方能进行桩孔开挖。

#### (3) 抗滑桩桩孔开挖

a. 土层开挖: 采用镐、锹自上而下逐层进行, 用提升架和提桶提土, 每挖深 1m 或 0.50m, 浇筑钢筋混凝土护壁。支模时用吊锤吊线校正钢模, 保证护壁中心与桩中心一致; 校正钢模后, 立即扎护壁钢筋、浇筑 C15 厚 150 mm 混凝土护壁; 浇筑钢筋混凝土护壁后, 继续开挖下一模, 直到设计深度。

b. 基岩的挖掘: 利用空压机提供动力, 风镐凿岩挖掘。每完成 1m 后, 应当支模浇灌桩混凝土护壁。

c. 桩孔开挖过程中, 及时进行地质编录, 做好“成孔施工记录”; 如发现地层情况与勘查报告不一致时, 及时通知原勘查单位对桩底岩石进行鉴别确认。

d. 桩孔开挖达到设计要求时, 及时通知甲方和监理单位对桩孔进行检查验收。验收合格后, 在“桩孔隐蔽工程检查验收记录”上签字确认, 方能进行下一工序施工。

#### (4) 钢筋笼加工制作与安装

a. 钢筋笼加工制作: 根据桩孔终孔深度, 确定钢筋笼的长度。钢筋笼加工制作时, 应综合考虑施工现场条件和吊车的有效起吊高度, 钢筋笼是否在桩地面进行整体加工制作。主筋搭接接头的设置: 在主筋下料前, 结合桩孔终孔深度和钢筋定长, 主筋搭接接头应当设置在桩顶 1~2m 范围内, 禁止在滑移面处设置接头, 即基岩面上下 2m 范围内。

b. 钢筋笼加工制作好后, 及时通知甲方和监理单位对钢筋进行检查验收。验收合格后, 在“钢筋笼隐蔽工程检查验收记录”上签字确认, 方能进行钢筋笼吊装与安放。

c. 钢筋笼吊装与固定: 在钢筋笼加工制作好后, 采用吊车整体起吊放入桩孔内, 并用砂

浆垫块固定好。

### (5) 桩身混凝土浇灌

本工程桩芯混凝土采用搅拌机现场搅拌,除水泥按袋装标明重量外,砂石料用磅称过磅,严格按试验室提供的配合比投料,用水量由定时供水器控制。混凝土搅拌均匀,和易性好。对于地面以下桩芯混凝土浇灌:采用串筒下料,串筒底部保持与桩底距离控制在2m以内,避免混凝土在下料过程中产生离析现象;随着桩芯混凝土的上升,逐节拆除串筒,直到桩芯混凝土浇灌满为止。对于地面以上桩芯混凝土浇灌:在完成搭设脚手架、支护桩芯圆模后,采用机械提升混凝土浇灌桩芯混凝土,直到桩芯混凝土满足设计要求为止。为确保桩身混凝土的密实,采用振动棒分层振捣密实,分层厚度控制在0.50~0.70m范围内;振动点布置:振动点呈品字形,间距50cm,排距30cm。上一层振动时,振动棒插入下一层10cm,保证上下层混凝土胶结良好。振动棒“快插慢拔”,保证混凝土的密实。

## 2. 挡土板的施工技术

### (1) 浆砌石挡土板基槽开挖

a. 沿抗滑桩前方拉线,用石灰粉或双飞粉洒线标定浆砌石挡土板基槽的轴线和开挖尺寸。

b. 浆砌石挡土板基槽开挖尺寸:宽550cm,高1000cm;基槽开挖:基底进入硬塑状红粘土0.50m以上。

c. 基槽开挖采用挖掘机开挖或人工开挖相结合,机械开挖深度控制在设计基槽底标高以上0.20~0.30m,其余部分采用人工开挖,以避免雨水浸泡。

d. 基槽开挖完后,及时通知原勘察设计单位、甲方和监理单位对基底进行检查验收。验收合格后,方能进行挡土板浆砌石基础的砌筑。

### (2) 挡土板浆砌石基础砌筑

a. 基槽验收合格后,及时铺设M7.5水泥砂浆垫层和砌筑M7.5浆砌石。

b. 砌筑材料:石料为武鸣县石材厂生产的、质地坚硬的灰岩或石灰岩;水泥为宾阳黎塘万星水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥(32.5MPa);砂为邕宁河中细砂。

c. 砌筑用M7.5水泥砂浆;水泥砂浆要求搅拌均匀,随拌随用,通常情况下3~4h用完,气温高(30~35℃)时,2~3h用完。

d. 砌筑要求:砌筑时大面朝下,上下错缝,砂浆均匀、饱满。

### (3) 挡土板钢筋绑扎与混凝土浇灌

因施工现场狭窄,原设计预制钢筋混凝土挡土板预制改为钢筋混凝土板。其施工顺序:先支外侧模板--绑扎钢筋--支内侧模板--现浇--浇筑混凝土--混凝土养护。

a. 完成外侧模板支护后,按设计要求,采用水准仪在外侧模板标明挡土板顶部标高,以控制钢筋绑扎和混凝土浇灌高度。

b. 钢筋绑扎严格按照设计要求和有关规范规定进行,横向钢筋:HRB335级 $\Phi 14@200$ ,均匀布置;纵向钢筋:HPB235级 $\phi 8@200$ ,均匀布置。

c. 钢筋绑扎完成后,及时通知甲方和监理单位进行检查验收;验收合格后,方能进行内

侧边模支护和浇筑混凝土。

d. 混凝土浇筑：采用搅拌机现场搅拌，除水泥按袋装标明重量外，砂石料用磅称过磅严格按试验室提供的配合比投料，用水量由定时供水器控制。混凝土搅拌均匀，和易性好。为确保混凝土的密实，采用振动棒分层振捣密实，分层厚度控制在 0.50 ~ 0.70m 范围内；振动点布置：振动点间距 50 cm。上一层振动时，振动棒插入下一层 10 cm，保证上下层混凝土胶结良好。振动棒采用“快插慢拔”，保证混凝土的密实。

e. 完成挡土板混凝土浇筑后，保持 14d 的浇水保养，确保挡土板混凝土强度的提高。

### 3. 连系梁施工技术

#### (1) 连系梁模板支护

模板支护：先支底模，后支侧模；因连系梁设计为宽 500 mm，高 300 mm，单板长度 4.0m，模板中部向上拱起 1/1000 ~ 3/1000；支护的模板有足够的承载能力。

#### (2) 连系梁钢筋绑扎

待模板支护完成后，进行钢筋绑扎。连系梁采用 8 根 HRB335 级  $\Phi 14$  mm 钢筋为受力钢筋，其间距 150 mm，均匀布置；HPB235 级  $\phi 8$  mm 钢筋为箍筋，其间距为 200 mm，均匀布置，保护层 50 mm。

#### (3) 连系梁混凝土浇筑

a. C25 混凝土浇筑：采用搅拌机现场搅拌，搅拌均匀，和易性好。为确保连系梁混凝土的密实，采取振动棒机械振动密实。

b. 每隔 16m 设置一道伸缩缝，伸缩缝内填充沥青。

c. 混凝土养护与拆除模板：混凝土浇筑后，保持 14d 浇水养护，并在 28 天后拆除模板。

## 结束语

1. 在遇水膨胀、失水干缩的膨胀性泥岩地区，抗滑桩有效抵抗滑坡体的下滑力，同时充分利用抗滑桩作为学校围墙的基础，节约建设投资，缩短施工工期。

2. 在该滑坡后期治理中，现浇钢筋混凝土挡土板和连系梁高 2 ~ 3m，需要在施工现场不平整的滑坡体上支护长 120m、高 2 ~ 3m 的模板，模板支撑困难；且混凝土浇灌时采取人工上料、分层振动密实，施工难度大。

3. 施工场地狭窄，材料二次搬运多，施工成本高。

## CFG桩在软弱地基加固处理中的应用\*

韦兴标

(广西水文地质工程地质勘察院 柳州 545006)

**[摘要]** 本文结合工程实际情况,介绍CFG桩在柳州市某高层建筑物地基加固处理,成功地将地基承载力特征值未能满足设计要求的地基土提高至450kPa的施工工艺,同时CFG桩具有工程材料节约、成本低、施工工期短等优点。

**[关键词]** CFG桩;施工工艺;地基承载力

### 前言

广西某房地产开发有限公司在柳州市投资兴建一高层建筑物,楼高25层,设一层地下室,埋深-5.90m,采用筏板基础,地基承载力特征值设计要求 $f_{ak} \geq 450\text{kPa}$ 。根据《岩土工程详细勘察报告》和土层浅层压板试验,第②层可塑状红粘土的承载力特征值 $f_{ak} = 150\text{kPa}$ ,未能满足设计要求,需要对其进行地基加固处理。针对该工程结构设计要求和场地岩土工程条件,结合我院现有技术装备,提出采用CFG桩对其进行加固处理。因CFG桩加固处理费用低,工期短等优点,且CFG桩加固处理技术可行,该房地产开发有限公司委托我院进行CFG桩加固处理。我院2009年5月20日进场施工,6月5日完成CFG桩加固处理,共完成330根CFG桩,成孔累计进尺约5590m,灌注C10混凝土(桩身混合料)约1290 $\text{m}^3$ 。CFG桩加固处理完成后,由甲方委托第三方有相应资质的检测单位采用浅层平板载荷试验的方法进行试验,三个试验点地基土承载力特征值分别为476kPa、470kPa和465kPa,满足设计要求。

### CFG桩的设计

#### 1. 场地内工程地质特征

根据《岩土工程详细勘察报告》,本场区内岩(土)体自上而下划分为8层,各岩土层特征分述如下:

(1) 第①层杂填土( $Q^m$ ): 灰褐、灰色,主要由碎石、碎砖块和灰渣等建筑垃圾混杂少量粘性土组成,含少量有机质,局部为混凝土基础或片石,土体结构松散。本层厚0.80~5.40m,分布均匀。该土层的地基承载力特征值为80kPa。

(2) 第②层可塑状红粘土( $Q^d$ ): 黄色、棕黄色,呈可塑状,无振摇反应,切口光滑,

\* 收稿日期: 2010年1月

高干强度,高韧性。层厚 12.70~20.20m,平均层厚 16.35m,属中等压缩性土。该土层的地基承载力特征值为 150kPa,极限侧阻力  $q_{sik}=25$  kPa。

(3)第②-1层硬塑状红粘土( $Q^{al}$ ):黄色、棕黄色,呈硬塑~坚硬状,含有较多铁锰钙质;无振摇反应,切口光滑,高干强度,高韧性。层厚 11.95~16.10m,平均层厚 13.95m,属中等压缩性土。该土层的地基承载力特征值为 200kPa,极限侧阻力  $q_{sik}=60$ kPa,极限端阻力  $q_{pk}=2000$ kPa。

(4)第③层粉质粘土( $Q^{al}$ ):棕红、棕黄色,硬塑,局部粉粒含量较高,呈粉土状,含铁锰钙质氧化物。无振摇反应,切口稍有光滑,中等干强度,高韧性。层厚 0.60~9.20m,平均层厚 3.25m,属中等压缩性土。该土层的地基承载力特征值为 190kPa,极限侧阻力  $q_{sik}=60$ kPa,极限端阻力  $q_{pk}=1800$ kPa。

(5)第④层稍密状园砾( $Q^{al}$ ):黄色,松散,局部中密,饱和,粒径为 1~15 cm不等,有粘性土及粉土充填。层厚 1.40~6.40m,平均层厚 4.18m。该土层的地基承载力特征值为 200kPa,极限侧阻力  $q_{sik}=80$ kPa,极限端阻力  $q_{pk}=2200$ kPa。

(6)第⑤层强风化白云岩( $C_2h$ ):灰白色,隐晶质结构,强风化,裂隙十分发育,岩体极其破碎,属软岩,岩体基本质量等级为IV级,钻机跳动,钻机干钻可钻进。

(7)第⑥-1层溶洞充填物:黄色、灰黄色,以软塑状粘性土、及粉土充填,夹杂有碎石块。

(8)第⑥层中风化白云岩( $C_2h$ ):灰白色,隐晶质结构,中风化,裂隙发育,局部裂隙为方解石充填,岩石较为完整,属硬岩,岩体基本质量等级为V级,钻机钻进较平稳,局部跳动,漏水。钻探未揭露穿该层,最大揭露厚度为 9.50m。该岩层极限端阻力  $q_{pk}=6000$ kPa。

## 2. CFG 桩设计要求

- (1)桩径设计要求:根据设计图纸,CFG 桩设计直径为 500 mm;
- (2)桩距的设计要求:根据设计图纸,桩间距为 100 cm;
- (3)桩长的设计要求:以白云岩岩面为 CFG 桩桩端持力层,设计桩长 $\geq 15.0$ m;
- (4)CFG 桩桩身混凝土设计要求:CFG 桩桩身混凝土设计强度等级为 C10;
- (5)褥垫层的设计要求:褥垫层的铺设厚度为 300 mm,夯填度不大于 0.87。

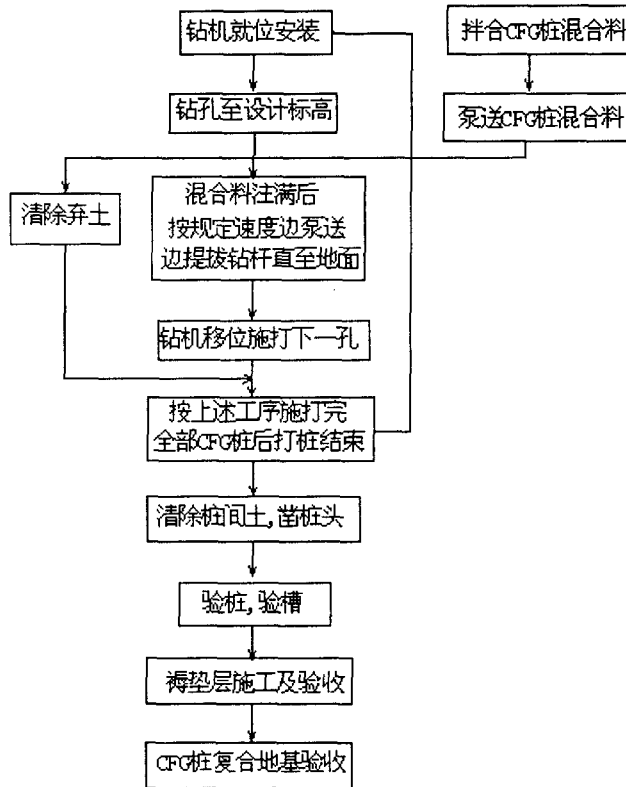
## CFG 桩的施工技术

### 1. CFG 桩加固处理机理

CFG 桩又称水泥粉煤灰碎石桩,是在碎石桩的基础上加入一些石屑、粉煤灰和少量水泥,加水搅拌和制成的一种具有一定粘结强度的桩。CFG 桩加固软弱地基,桩与桩间土在一起通过褥垫层的作用形成 CFG 桩复合地基,共同承担上部建筑物荷载。即 CFG 桩是高粘结强度桩,是通过褥垫层作用使桩与桩间土形成复合地基,加固软弱地基主要通过桩体作用、挤密作用和褥垫层作用,提高软弱地基的承载力。

## 2. 长螺旋钻孔泵压 CFG 桩施工工艺流程

长螺旋钻孔泵压 CFG 桩采用长螺旋钻机成孔，泵送混合料成桩技术，提钻与成桩同步进行，既加快施工进度，又能避免水下灌注混合料的缺点，其施工工艺流程图如下：



## 3. CFG 桩的成孔技术

### (1) CFG 桩成孔机械设备的选择

根据本工程特点和工期要求，结合我院现有技术装备，主要施工设备有：a. CFG 长螺旋钻机作为成孔机械设备；b. 1 台套 HBJ60C 型混凝土输送泵作为桩身混合料的输送设备；c. 1 台 350L 型混凝土搅拌机作为桩身混合料的拌合设备；d. 1 台套南方 355S 全站仪作为桩位测量定位的测量仪器。

### (2) CFG 桩成孔施工顺序

为避免因连续施打可能造成桩身混凝土缩径或桩身被挤偏等工程质量缺陷，本 CFG 桩加固处理工程采取间隔跳打。

### (3) CFG 桩加固处理范围

本次 CFG 桩加固处理范围：该高层建筑物基础范围内的可塑状红粘土、硬塑状红粘土、粉质粘土、稍密状圆砾、强风化白云岩及溶洞充填物，直到白云岩岩面。



#### (4) CFG 桩成孔施工工艺

a. 钻机就位安装时,应当调直桩架挺杆与地面的垂直度,对好桩位,保证桩位中心与钻具中心在同一直线上,且保证设备水平、周正、稳固,确保在成孔钻进过程中不发生移位或倾斜。桩架挺杆与地面的垂直度偏差应当不大于 1%。

b. 在钻架上应当设置控制钻孔深度的标尺,以利在成孔过程中进行观测或丈量;在成孔过程中,应当成孔记录,记录做到及时、准确。

c. 钻孔时应当启动钻机试钻 0.5~1.0m,检查钻机设备运转正常后,再继续钻进,土块随螺旋叶片上排出孔口;排出孔口的土应当及时清除,集中堆放。

d. 当钻孔达到设计深度后,长螺旋钻杆应当在原处保持空转排土,清除孔底残渣或余土,使孔底干净,然后提钻泵送 CFG 混合料。

e. 在流塑状土层成孔,桩距小于  $3.5d$  ( $d$  为桩径)且出现串孔时,应当采取间隔跳打,避免出现缩径等缺陷;间隔跳打出现的中间空出桩须待已打 CFG 桩完成后 7 天进行。

f. 在钻进过程中,如遇较大漂石或孤石时,应当及时通知设计单位,及时调整桩孔位置,或采取补桩措施。

g. 由于场地基岩面起伏较大,钻机钻至基岩面时,应当降低钻进速度,避免出现钻孔偏斜或卡钻事故。

#### 4. CFG 桩的成桩技术

(1) 当钻孔深度满足设计要求并空转清除桩底残渣或余土的同时,应当严格按照试验室提供的配合比进行投料搅拌,要求搅拌均匀,和易性好。当钻孔底部的残渣或余土清除干净后,应当及时泵料提钻,混合料自孔底而上自致密实成桩。

(2) 桩身混合料的搅拌严格按照试验室提供的配合比进行过磅投料,水泥为鱼峰牌普通硅酸盐水泥,强度等级 32.5MPa;碎石粒径 0.5~2.5 cm 柳州石场生产的碎石;粉煤灰为柳州电厂生产的二级粉煤灰;混合料坍落度为 160~220 mm。

(3) 灌注过程中,严禁先提钻后泵料。

(4) 灌注过程的连续性 混合料的供给要求均匀、充足,是保持灌注过程应当连续进行的基础。

(5) 提钻速度的控制 提钻速度要匀速控制,通常情况下,应当控制在 1.2~1.5m/min,如遇淤泥或淤泥质土,提钻速度应适当放慢,避免出现桩身缩径或断桩等现象。

(6) 保护桩长的控制:所谓的保护桩长是指成桩时预先设定加长的一段桩长,基础施工时将其剔除。保护桩长愈长,桩的施工质量愈容易控制,但材料浪费愈多。本工程 CFG 桩桩顶设计标高至地面标高的距离小于 1.0m,保护桩长控制在 50 cm 左右,上部用土封顶。

#### 5. CFG 桩褥垫层的施工技术

在完成 CFG 桩施工后,应当清除桩间土和凿除桩头;完成桩间土清除和凿除桩头后,应当及时进行验桩和验槽。CFG 桩复合地基承载力和地基基础开挖满足设计要求后,应当及时施工 CFG 桩褥垫层。垫层材料采用级配良好的碎石中粗砂按照 6:4 进行拌合。将拌合好的碎

石中粗砂进行摊铺,待摊铺完成后,采用平板振动器夯实至设计厚度(300 mm)。对较干的砂石料,摊铺时应当适当洒水再进行夯实。褥垫层的夯填度不大于0.87。

## CFG 桩复合地基承载力的确定

CFG 桩施工完成后,由甲方委托有相应检测资质的检测单位采用地基土浅层平板载荷试验的方法进行试验,确定该 CFG 桩复合地基土承载力。检测单位按照甲方要求随机选择 3 个试验点进行试验,试验土层采用中砂垫层,载荷板尺寸 1.0m×1.0m,最大试验荷载 800kPa;检测所用主要仪器为千斤顶、桩基静载荷测试分析仪。试验结果为:该土层的三个试验点实测地基承载力特征值分别为 476kPa、470kPa 和 465kPa,平均值为 470kPa,其极差不超过平均值的 30%,故取其平均值 470 kPa 为该土层的地基承载力特征值。3 个试验点载荷板试验结果详见表 1。

载荷板试验结果

表 1

试验点编号	最大试验荷载/kN	最大试验荷载作用下载荷板沉降量/mm	残余变形/mm	S=15 mm所对应的压力值/kPa	试验点地基土承载力特征值/kPa
1#	800	38.85	29.35	476	476
2#	800	40.19	28.54	470	470
3#	800	39.54	29.65	465	465

## 结束语

1. CFG 桩施工具有施工机械设备简单、操作可行等优点。
2. CFG 桩复合地基不仅仅由 CFG 桩来承担上部建筑物荷载,还可通过褥垫层的作用,由桩和桩间土形成的复合地基共同承担上部建筑物荷载。
3. 与钻孔灌注桩相比,CFG 桩在桩身混凝土中掺入大量的粉煤灰,且需要的水泥量少,桩身混凝土强度不很高,大大节约工程材料,工程成本低,桩孔直径小,成孔成桩效率高,施工工期短等优点。

## 参考文献

- 叶观宝著 2002年3月《地基加固新技术》[M]第二版。

## 碎石桩在软土地基加固处理中的施工实践\*

韦兴标<sup>1</sup> 李月玲<sup>1</sup> 覃晓毅<sup>2</sup>

(1. 广西水文地质工程地质勘察院 柳州 545006; 2. 广西河池水利水电勘查设计研究院 河池 547000)

**[摘要]** 结合柳州市雅儒馨苑 B 栋住宅楼软弱地基土加固处理实际情况, 介绍碎石桩在软土地基加固处理中应用及锤击法碎石桩施工工艺。

**[关键词]** 软土地基; 排土法碎石桩; 置换; 复合地基土承载力大幅度提高

### 前言

柳州市某房地产开发公司拟建的一栋商住楼, 楼高七层, 占地面积  $40.50 \times 12.0 \text{m}^2$ , 基础采用独立柱基础和条形基础(浅基础), 砖混结构, 该商住楼基础持力层为第③层可塑状粉质粘土, 其承载力特征值  $f_{ak}=180 \text{kPa}$  (设计值); 由柳州市城市规划设计研究院设计, 广西水文地质工程地质勘察院提供的《岩土工程详细勘察报告》。但该商住楼西段原为地势低洼的鱼塘, 后经人工回填, 结构松散, 该回填土平均厚度为  $3.0 \sim 5.0 \text{m}$ , 最大厚度约  $7.0 \text{m}$ ; 该楼基础持力层埋深在  $4.0 \sim 5.0 \text{m}$ , 但局部最大埋深达  $17 \text{m}$ 。为了节约工程成本, 缩短工期, 业主召集设计、勘察、施工等单位进行研讨, 提出如下两种方案: (1) 大开挖基础, 即采用土方施工机械进行挖掘至基础持力层, 对于局部持力层埋深大的范围, 采用钢筋混凝土结构(大开挖至  $5.0 \text{m}$  后), 采用钢筋混凝土或毛石混凝土回填至地面。但由于该拟建商住楼西面、南面距既有建筑物较近, 加上地表水水位浅, 其边坡自稳定性差, 基坑大开挖坑壁极易坍塌, 因此在基础大开挖前, 必须采取基坑支护结构。(2) 对原鱼塘范围内的基础底部以下、持力层以上的软弱地基土进行加固处理, 使其承载力特征值  $f_{ak} \geq 180 \text{kPa}$ , 以满足设计要求。经综合考虑工程造价和工期等因素, 业主决定选择第二种方案。我公司受业主委托, 承担了该楼软土地基加固处理施工任务。

我院 2008 年 9 月 10 日进场, 采用碎石桩对该软土地基进行加固处理, 受停水停电影响, 10 月 15 日完工, 共完成碎石桩 450 根, 桩孔累计进尺  $3024.20 \text{m}$ , 总的理论灌注量  $301.65 \text{m}^3$ , 实际灌注量  $588 \text{m}^3$ 。经检测, 碎石桩桩体承载力特征值  $f_{pk}=400 \text{kPa}$ , 处理后桩间土承载力特征值  $f_{sk}=180 \text{kPa}$ , 加固后形成的复合地基土承载力特征值  $f_{spk}=195.6 \text{kPa}$ , 满足设计及规范要求。

\* 收稿日期: 2009 年 11 月

## 工程概况

### 1. 施工场地基本情况

施工场地基本平整,但场地内堆放有较多建筑材料,且地下障碍物如旧基础等较多,给施工带来较大困难;施工场地南面 12.50m 处为一幢七层居民楼,西面 12.00m 处为一幢七层居民楼,与既有建筑物距离较近。

### 2. 场地工程地质条件

#### (1) 地形地貌

施工场地宏观地貌属柳江河二级阶地,地形呈北高南低,B 栋的西南角原为积水鱼塘,因建房平整回填后,场地相对平坦。

#### (2) 岩土工程地质特征

根据工程地质勘察资料,场地内各岩土层由上而下依次分述如下:

第①层杂填土(Q<sup>m</sup>):灰~灰黑色,主要由粘土、煤灰、煤渣、片石、砖块等建筑垃圾组成,结构松散。该层可分为上下两个亚层:上部主要由混凝土地板、煤渣、片石、砖块及粘土组成,呈软塑状,层厚 1.0~2.0m;下部主要由煤灰、淤泥、淤泥质粘土组成,呈流塑~软塑状,富含有机质土,具腥臭味;层厚 0.80~7.00m,厚度变化较大,堆填时间约 5~8 年,未完成自重固结,该亚层主要分布在原鱼塘范围内,其标准贯入试验实测锤击数为 1~2 击,其承载力特征值  $f_{ak}=60\sim 80\text{kPa}$ 。

第②层软塑状粉质粘土(Q<sup>al</sup>):灰黄、灰绿色,土质均匀,土体饱水、呈软塑状,岩芯变形,无摇振反应,干强度及韧性低。该层顶面埋深 7.00m,揭露厚度 2.00m。该层标准贯入试验实测锤击数为 5 击,其承载力特征值  $f_{ak}=130\text{kPa}$ 。

第③层可塑状粉质粘土(Q<sup>al</sup>):棕黄、灰黄色,呈可塑状,局部呈硬塑状;土体结构较致密,土质均匀,切口粗糙,手搓具轻微砂感,粉粒含量自上而下渐高,韧性及干强度中等,无摇振反应。顶面埋深 0.80~9.00m,揭露厚度 5.00~11.60m。该土层压缩系数( $a_{1-2}$ )为 0.31~0.24MPa<sup>-1</sup>,平均值为 0.28MPa<sup>-1</sup>,属中压缩性土,标准贯入试验实测锤击数为 6~15 击,其承载力特征值  $f_{ak}=180\text{kPa}$ 。

#### (3) 场地内水文地质条件

该场地内地下水主要为上层滞水,地下水初见水位埋深为 0.5~1.0m,稳定水位埋深为 1.20~1.50m,属上层滞水,水量小,主要接受大气降水和地表排污水的入渗补给。该地下水的水质类型为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Na<sup>+</sup>型,其 PH 值为 8.40,对混凝土结构无腐蚀性,对钢结构具弱腐蚀性。

## 碎石桩加固机理与桩间距、置换率等技术参数的确定

### 1. 碎石桩加固机理

碎石桩加固机理：本工程软土地基加固拟采用排土法碎石桩，即通过成桩机械将不良地基土强制排出，并采用碎石进行置换，而对桩间土挤密效果不明显，在地基中形成具有密实度高、直径大的碎石桩体，它与原地基土构成复合地基，共同承担上部荷载。

## 2. 桩间距、置换率等技术参数的确定

(1) 根据加固处理后复合地基承载力特征值  $f_{spk}=180\text{kPa}$  要求，结合以往施工经验，预计桩体承载力  $f_{pk}=450\text{kPa}$ ，参照振冲桩公式  $f_{spk}=mf_{pk}+(1-m)f_{sk}$  和  $m=d^2/de^2$  确定置换率。式中  $f_{spk}$ —振冲桩复合地基承载力特征值 (kPa)； $f_{pk}$ —桩体承载力特征值 (kPa)； $f_{sk}$ —处理后桩间土承载力特征值 (kPa)，取天然地基承载力特征值， $f_{sk}=60\text{kPa}$ ； $m$ —桩土面积置换率； $d$ —桩身平均直径 (m)，取 0.50m； $de$ —单桩分担的处理地基面积的等效圆直径 (m)。经计算， $m=30.8\%$ ， $de=0.90\text{m}$ 。

(2) 按等边三角形布桩，则桩间距  $s$  按公式  $de=1.05s$  计算得， $s=0.95\text{m}$ 。

## 碎石桩的施工技术

### 1. 加固范围的确定

根据有关规范要求，碎石桩加固范围应根据建筑物的重要性和场地条件及基础类型进行确定，本工程采用独立和条形基础，因此加固范围为基础外缘扩大1排。

### 2. 桩位布置与确定

桩位布置：因本工程基础采用独立和条形基础，故采用等腰三角形布置；桩位确定：根据甲方提供的拟建建筑物四个角点及各轴线位置，采用经纬仪和钢卷尺测放各轴线，采用钢卷尺测量放桩位，桩位测量允许偏差2cm。

### 3. 施工顺序

因该施工场地距既有建筑物较近，结合本工程实际情况，碎石桩施工顺序采用背离既有建筑物方向进行施工。

### 4. 加固深度

碎石桩加固深度：桩端进入持力层1.0m以上且桩长不小于4.0m。

### 5. 成孔技术

(1) 钻机就位安装：钻机就位安装时，保持取土器和沉管垂直于地面，对准桩位，桩位允许偏差控制在5cm范围内，设备安装水平、稳固、周正，并保证施工中不发生移位。

(2) 成孔方法：由于施工场地内上层滞水水位高、回填土厚度大，为确保成孔质量，采用冲击取土、跟管钻进方法成孔，桩孔直径不小于 $\Phi 500\text{mm}$ 。

(3) 成孔深度：根据工程地质勘察资料，桩端进入持力层1m以上，并保证桩长不小于

4m。施工过程中,桩端进入持力层后,由乙方通知勘察单位对取上岩(土)样进行现场鉴别与确认,确保桩端进入持力层深度满足设计要求。

(4)成孔质量检查验收:桩孔深度满足设计要求后,由现场工程技术人员对桩孔直径、深度、桩端进入持力层深度、垂直度等检查验收,其中桩孔垂直度允许偏差小于1%。

## 6. 成桩技术

(1)碎石挤密桩成桩材料:采用柳州市楼梯山采石场生产的2-4cm的碎石,含石粉或泥量 $\leq 5\%$ 。

(2)碎石挤密桩成桩方法:采用自下而上、分层夯实成桩的方法进行。为确保桩身碎石密实,每填充厚30~50cm的碎石,用夯锤(500kg)、落距5-8m进行夯实,锤击数8-12击。为确保桩身碎石桩不受桩外淤泥等杂质浸染,当下一桩段碎石夯实好后,在钢护壁管内再加碎石夯实0.8-1.0m方能将管往上拔0.5m,后进行上一段桩孔碎石的夯实,采用连续加料锤击夯实;当贯入碎石夯实成桩的高度超过钢护壁管的长度时,往管内再加入0.5m碎石后方可拆卸护壁管。同时在桩顶加夯实0.5~1.0m的碎石,防止因拔管造成密实碎石桩松动和缩径。

## 7. 施工注意事项

(1)为保证桩位的准确性,测量定孔位时应按有关规范要求进行,严格控制其允许偏差;同时在安装和施工过程中发现钻机移位或偏差时,应及时纠正。

(2)保证桩孔的垂直度,在安装和施工过程中经常检查钻机是否水平、周正;沉管时应校正是否垂直,严格控制桩孔垂直度偏差。

(3)桩端应进入持力层1.0m以上并保证桩长不小于4.0m,如遇桩端持力层岩性无法判别时,应及时通知勘察单位对其现场鉴别与确认。终孔验收时,应检查桩端入岩深度和桩长是否满足设计要求;桩孔深度在满足桩长和入岩要求时应尽可能少地破坏原状地基土。

(4)在碎石夯实成桩过程中,应采取分层夯实,通常情况每次灌入30-50cm碎石,夯击8~10锤;特殊情况下,每层最多灌入不得超过100cm,同时增加夯实锤击数。

(5)在碎石夯实成桩过程中,应尽量保持夯实成桩的连续性。

(6)夯实成桩过程中,套管内的碎石料应保持一定的高度;同时每段成桩不要过大,如发生排碎石不畅时可适当加大拔管高度。

(7)为确保桩顶桩身强度和因拔出沉管造成桩身松动或缩径,应超灌一定高度的碎石。

(8)碎石桩施工前期,应根据施工设计要求进行试桩,对设计技术参数进行验证,并根据试验结果及时调整设计参数,如桩间距增加或减少,以满足设计和经济合理性的要求。

(9)碎石桩施工过程中,还应适当抽检,并根据抽检结果及时调整施工技术或设计参数。

(10)当桩身缩径造成碎石灌入量未能达到设计灌入量时,应在该桩附近补1根桩。

## 碎石桩加固效果检测

据检测单位提供的检测报告,碎石挤密桩加固效果检测桩身采用重型圆锥动力触探原位测试手段进行,检测结果:碎石桩桩体承载力特征值  $f_{pk}=400\text{kPa}$ ;桩间土采用标贯、重型圆锥动力触探等原位测试手段进行,检测结果:承载力特征值  $f_{sk}=180\text{kPa}$ 。加固处理后形成的复合地基承载力大幅度提高,其承载力特征值  $f_{spk}=195.6\text{kPa}$ ,满足设计要求。

## 施工体会

1. 排土法碎石桩加固施工工艺简单,操作方便,工程成本低;但施工工期稍长些。若采用振冲挤密法碎石桩,可适当缩短工期。

2. 碎石桩在软弱地基土加固处理中的加固效果明显,由碎石桩及其周围的土体共同承担上部建筑物的载荷,但必须做好褥垫层。

## 参考文献

叶观宝著《地基加固新技术》[M]. 第二版, 2002年3月

## 简讯

### 第十届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会论文征集通知

第十届全国岩土力学数值分析与解析方法研讨会拟定于2010年11月在浙江温州召开。会议由中国力学学会岩土力学专业委员会主办,温州大学、浙江大学承办,协办单位为温州市建筑设计研究院、《岩土力学》编辑部。欢迎全国相关学科的专家、学者、科技工作者与工程技术人员踊跃撰稿、参加会议。

#### 会议主题:

- (1) 岩土本构模型与参数研究
- (2) 岩土工程重大工程案例
- (3) 岩土试验与测试技术
- (4) 岩土环境工程
- (5) 土动力学与土工抗震数值分析方法

#### 重要日期:

论文征稿截止日为2010年4月31日

2010年5月31日通知审稿专家修改意见和退稿意见

2010年6月30日前通知录用结果等事宜

论文格式与要求见《岩土力学》征稿启事。投稿范例请登录 <http://ytlx.chinajournal.net.cn> 下载。所有投稿稿件要求排好版后发至 [wzjgxy@wzu.edu.cn](mailto:wzjgxy@wzu.edu.cn)。论文将以《岩土力学》增刊形式出版, CSD 收录; 另外挑选约30篇左右优秀论文以《岩土力学》正刊出版, EI 收录。

秘书处地址: 浙江省温州市茶山高教园区温州大学建筑土木工程学院 325035。联系人: 孙林柱 (0577-86689687, 13706659656); 王军 (0577-86689687, 15968795938) 等

会议期间将组织工程考察和展览: 热忱欢迎从事岩土领域新材料、新技术、新设备的开发、生产和应用的相关单位踊跃报名参加工程考察和技术展览。

(大会秘书处 供稿)

## 冲抓锥在钻(冲)孔灌注桩施工中的应用\*

廖培涛 韦兴标

(广西水文地质工程地质勘察院 柳州 545006)

**[摘要]** 本文结合工程实例,介绍在柳钢技术改造项目中因回填土层含大量钢渣废铁等复杂地层,利用冲抓锥自重冲切土、快速提升桩外卸土等“直上直下”优点完成该钢渣废铁回填土层的机械成孔,提高机械成孔效率,缩短工期,降低工程成本;同时克服采取其他方法在该钢渣废铁回填土层施工的成孔效率低,成功解决回转钻机和冲击钻机在该回填层成孔效率低下的技术难题。

**[关键词]** 含钢渣废铁的回填土;冲抓锥“直上直下”;机械成孔;提高钻进效率;降低工程成本

### 前言

2002年以来广西柳州钢铁集团公司相继进行转炉厂、小热轧厂、6<sup>#</sup>和8<sup>#</sup>高炉及110m<sup>2</sup>烧结机工程等技术改造工作,而这些技术改造项目的基础多采用钻(冲)孔灌注桩基础,钻(冲)孔灌注桩直径多在 $\Phi 600 \sim \Phi 1800$  mm,桩端持力层为微风化白云岩,我院2003年2月~5月承担110m<sup>2</sup>烧结机工程180余根 $\Phi 600 \sim \Phi 1200$  mm钻(冲)孔灌注桩施工。因该施工现场大部分回填有厚3.00~8.00m钢渣废铁,尤其是以6<sup>#</sup>和8<sup>#</sup>高炉及110m<sup>2</sup>烧结机工程钻(冲)孔灌注桩施工现场回填钢渣废铁层厚大,单块体积大,厚达1.50m废钢渣。这些钢渣废铁严重影响钻(冲)孔灌注桩施工进度,造成冲击钻头崩刃和全面钻进钻头硬质合金崩刃,回转钻机整车严重,回转钻机转盘损坏。钻(冲)孔灌注桩施工初期,每当回转钻机整车严重或冲击钻机正常钻进无进尺时,用强力磁铁打捞因钻遇钢渣废铁造成钻头崩刃或脱落硬质合金及钢渣废铁后,继续钻进;钻进过程中如发现地面振动大,且钢丝绳摆动力幅度大,初步推断遇大钢渣废铁块,部分废钢渣已超过钻孔直径,只好回填。回填后采取人工挖孔,埋设混凝土护壁的方法,清除部分桩孔内大块废钢渣;若废钢渣确实太大,还必须采用挖掘机大开挖,清除大块废钢渣后重新回填施工钻(冲)孔灌注桩。因该场地内地下水呈弱酸性,造成部分人工挖孔作业人员皮肤灼伤。为克服钻(冲)孔遇钢渣废铁机械成孔效率低下、人工挖孔作业人员被灼伤的施工技术难题,在开孔钻进该回填钢渣废铁时,采用冲抓锥进行施工,利用其“直上直下”特点,大大提高机械成孔效率,尤其是遇大块废钢渣时,及时采用挖掘机进行大开挖,则可节约大量的时间,提高机械钻进效益,降低工程成本。

\* 收稿日期:2009年4月



## 场地内工程地质特征与水文地质条件

### 1. 场地内工程地质特征

根据工程地质勘察资料,场地内岩土层自上而下依次为人工堆填土及第四系溶余残留堆积的粘性土和中石炭统大埔组中厚层细晶白云岩,各岩土层岩性分述如下:

(1) 杂填土(第①层  $Q^m$ ): 杂色,主要由炉渣、矿渣、铁渣(块)、粘性土及建筑垃圾组成,硬质物极不均匀,结构松散;层厚 0.60~10.30m,场地内均有分布。该层地基土承载力标准值  $f_{sk}=140\text{kPa}$ ,桩的极限侧阻力标准值  $q_{sk}=20\text{kPa}$ 。

(2) 素填土(第②层  $Q^m$ ): 黄色、棕(褐)黄色,由粘性土组成,偶含矿渣及建筑垃圾,结构松散,稍湿,层厚 1.10~6.70m,顶面埋深 0.60~3.90m,不连续分布于场地中部北东侧。该层地基土承载力标准值  $f_{sk}=130\text{kPa}$ ,桩的极限侧阻力标准值  $q_{sk}=18\text{kPa}$ 。

(3) 可塑状粘土(第③层  $Q^d$ ): 棕黄、褐黄、灰绿色,结构较松软,呈可塑状,土湿,局部地段顶部夹矿渣、煤粉及有机质,属中偏高压缩性土,层厚 0.50~7.00m,顶部埋深 0.60~8.70m,部分地段缺失。该层地基土承载力标准值  $f_{sk}=140\text{kPa}$ ,桩的极限侧阻力标准值  $q_{sk}=20\text{kPa}$ 。

(4) 硬塑状粘土(第④层  $Q^d$ ): 黄、褐黄色,结构致密,土质均匀,呈硬塑状,属中压缩性土,层厚 0.70~7.70m,顶部埋深 2.70~9.50m,部分地段缺失。该层地基土承载力标准值  $f_{sk}=230\text{kPa}$ ,桩的极限侧阻力标准值  $q_{sk}=60\text{kPa}$ 。

(5) 可塑状粘土(第⑤层  $Q^d$ ): 黄、褐黄色,结构松软,呈可塑状,局部呈软塑状,属高压缩性土,层厚 0.50~1.60m,顶部埋深 8.00~12.50m,主要分布于基岩面附近。该层地基土承载力标准值  $f_{sk}=150\text{kPa}$ ,桩的极限侧阻力标准值  $q_{sk}=25\text{kPa}$ 。

(6) 中风化白云岩(第⑥层  $C_{2d}$ ): 灰色、浅灰色,细晶结构,岩石较坚硬,性脆,裂隙较发育,岩芯呈碎块状、砂状,断面新鲜,层厚 0.50~2.60m,顶部埋深 2.50~11.80m。该层地基土承载力标准值  $f_{sk}=2200\text{kPa}$ 。

(7) 风化白云岩(第⑦层  $C_{2d}$ ): 浅灰色,细晶结构,中厚层状构造,岩体完整性较好,岩石质硬性脆,岩芯呈短柱状、碎块状,断面新鲜,钻探揭露厚度 3.00~8.60m,顶部埋深 2.50~17.50m。该层地基土承载力标准值  $f_{sk}=6000\text{kPa}$ 。

### 2. 场地内水文地质条件

场地内主要地下水可分为上层滞水和岩溶裂隙水。其中上层滞水赋存于填土层及粘性土的空隙中,主要接受地表水及工业废水下渗补给,水量较小;岩溶裂隙水主要在地下岩溶发育地段,出水量约 30~50 $\text{m}^3/\text{h}$ 。根据水质分析结果,该场地内地下水 PH 值=8.15,呈弱碱性,对混凝土基础无腐蚀性,对钢结构具弱腐蚀性。

## 钻(冲)孔方法在回填钢渣废铁层的成孔技术

### 1. 回转钻机机械成孔方法

在该钢渣废铁回填层机械成孔中, 多家施工单位采用硬质合金钻头全面钻进回转钻机成孔, 因回填钢渣废铁极不均匀, 且单体钢渣达 1.50m 厚, 回转钻机整车或转盘损坏严重, 硬质合金钻头崩刃严重。通常情况下, 如遇小块钢渣废铁, 钻机跳动或整车, 纯钻效率在 0.3 ~ 0.5m/h; 如遇大块钢渣废铁, 钻机开始跳动或整车严重, 待钻出一个较完整的工作面, 钻机回转平稳, 但钻进效率极低, 纯钻效率多在 0.1 ~ 0.2m/台班。据不完全统计, 完成该层(通常 5 ~ 8m 厚)钻进, 需要 4 ~ 7 台班。

### 2. 冲孔钻机冲击成孔

在该钢渣废铁回填层机械成孔中, 采用冲孔钻机冲击成孔效率明显比回转钻机成孔效率高, 但同样因回填钢渣废铁极不均匀, 冲击成孔效率不高, 冲击锤头崩刃严重。通常情况下, 如遇小块钢渣废铁, 纯钻效率在 0.5 ~ 0.8m/h; 如遇单体钢渣宽度部分超过设计桩孔直径, 呈半边岩, 易造成冲孔偏斜, 发生卡钻夹钻事故。在遇满孔冲击成孔效率极低, 冲击锤头崩刃严重, 纯钻效率多在 0.3 ~ 0.5m/台班。据不完全统计, 完成该层(通常 5 ~ 8m 厚)钻进, 需要 3 ~ 5 台班。

## 其他施工方法穿越该钢渣废铁回填层

### 1. 人工挖孔方法

一些施工单位为提高在该钢渣废铁回填层成孔效率, 在施工机械进场施工前, 采取人工挖孔、埋设钢筋混凝土护壁的方法穿越该钢渣废铁回填层, 待挖至粘土层 0.50m 后, 采用回转钻机“机械成孔, 泥浆护壁”的方法完成土层和基岩的钻进成孔。但因该场地内地下水呈弱碱性, 挖孔作业人员出现皮肤灼伤, 影响施工进度。

### 2. 挖掘机大开挖方法

在遇满孔钢渣废铁的钻孔, 通常情况下采取挖掘机进行机械大开挖, 清除大块钢渣废铁, 后回填粘土, 重新测量放孔、成孔, 可提高机械成孔效率。

### 3. 冲抓锥的施工方法

为提高在该钢渣废铁回填层成孔效率, 我单位采取冲抓锥在该层进行机械成孔。利用冲抓锥自重冲切抓土, 利用其“直上直下”特点, 快速提土至桩外卸土, 提高机械成孔效率。一般情况下, 30min 可完成冲抓锥钻机安装, 50 ~ 70min 可完成该钢渣废铁回填层(通常 5 ~ 8m 厚)的机械成孔, 10min 可完成冲抓锥钻机退位, 钻(冲)孔钻机 30 ~ 50min 可完成钻机安装。机械成孔效率多在 6 ~ 8m/台班, 如遇满孔钢渣废铁, 可提前采取挖掘机进行大开挖清除, 减少因采用钻(冲)孔钻机试钻而浪费人力、物力、财力和时间, 降低工程施工成本。

#### (1) 冲抓锥的施工技术

a. 冲抓锥设备机械就位安装: 必须保持冲抓锥上的天车外缘、钢丝绳和桩位中心在同一

铅垂线上,设备安装应稳固、周正、水平,保证在施工作业过程中不发生移位或倾斜。清运冲抓锥抓上来的钢渣废铁等回填土时,应采取集料斗轻轨进行人工清运。

b. 冲抓锥干作业成孔:1人操作冲抓锥,2人孔口配合除土。卷扬机提升速度应当控制在 $0.1\sim 0.2\text{m/s}$ ,利用经压密实的自稳性,保持孔壁的稳定。

#### (2) 冲抓锥的施工注意事项

a. 冲抓锥在进行钢渣废铁回填层成孔过程中,如发生桩孔坍塌事故时,应当及时采用粘性土回填碾压密实,后再用冲抓锥成孔。

b. 冲抓锥在进行钢渣废铁回填层成孔过程中,如发现桩孔遇满孔钢渣废铁时,应当及时挖掘机大开挖清除,后采用粘性土回填碾压密实,后再用钻(冲)钻机成孔。

c. 冲抓锥在完成该钢渣废铁回填层机械成孔后,应当及时退位,冲击钻机或回转钻机及时对桩位进行余下的土层和基岩,采用“泥浆护壁、机械成孔”钻进,及时完成桩孔的施工。

## 结束语

1. 采用冲抓锥在钢渣废铁回填层中自重冲切抓土,利用其“直上直下”特点,快速提土至桩外卸土,其机械成孔效率比钻(冲)钻机在该钢渣废铁回填层成孔效率高。

2. 采用冲抓锥在钢渣废铁回填层中机械成孔,不仅可提高机械成孔效率,预防孔内事故,且可降低工程成本。

3. 采用冲抓锥在钢渣废铁回填层中机械成孔,属首次尝试,成功解决在该钢渣废铁回填层机械成孔效率低的施工技术难题。

### 简讯

2009年12月24日下午2点,新一期土木工程院士、专家系列讲座在北京交通大学成功举办。本次讲座由中国土木工程学会张雁秘书长主持,邀请我国著名建筑节能专家、中国工程院院士、清华大学江亿教授以“我国建筑节能现状、问题及解决途径”为主题,进行了精彩的报告。

江亿院士系统地介绍了世界各国的建筑能耗情况,指出我国建筑能耗与其他各国相比相对较低,因此不要盲信所谓发达国家的先进经验,应多从自身着手,降低建筑能耗。江亿院士分别就住宅采暖能耗、住宅非采暖能耗、非住宅能耗等几方面详细分析了我国建筑能耗情况,指出我国建筑节能还有很大的潜力可挖,重点应改变固有的思想观念,不过分追求生活舒适度,采用自然和谐的生活方式,在此基础上,加强技术创新与管理,努力实现我国的建筑节能目标。

江亿院士的精彩报告得到了到场100余位听众的热烈回应,报告结束后,听众踊跃提问,江亿院士也一一作答。原本计划2个小时的讲座不得不延长1小时,取得了很好的效果。

讲座期间,中国土木工程学会向前来参加会议的代表赠送了中国学术期刊电子杂志社(中国知识资源总库)上网卡。

“土木工程院士、专家系列讲座”将坚持面向科技工作者免费举办,请随时关注中国土木工程学会网站 [www.cces.net.cn](http://www.cces.net.cn)。

一题一议

## 从应力说起\*

主持人: 龚晓南

龚晓南

(浙江大学土木工程学系 杭州 310030)

对土木工程师而言,应力是一个常用的词。应力分析是土木工程师的基本功。应力是学习材料力学(国外称材料强度)时应掌握的一个非常有用的基本概念。近年来笔者在阅读、学习一些关于有效应力原理,摩尔-库伦理论,以及其它方面的“新发展”,“新理论”时,觉得有必要重新温习一下材料力学中这个非常有用的基本概念应力。

谈到应力不少人会想到:当物体受作用力时,应力 $\sigma$ 是作用在物体某截面内单位面积上的力。其实对应力 $\sigma$ 更确切的理解应是:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

当物体受作用力时,应力是作用在物体某截面内面积趋于零的微单元上的力与微单元面积之比的极限值。当微单元面积趋于零时,微单元面积上的力作用在一点上。点是没有大小的,因此在物体截面上每点都有应力。在材料力学中,当一圆柱体轴向均布受力时,其横截面上每点应力相等。材料力学的研究对象是抽象的连续均匀分布的弹塑性体,而工程应用中的研究对象是具体的钢材、混凝土、钢筋混凝土、岩土体等工程材料。将“一圆柱体轴向均布受力时,其横截面上每点应力相等”的结论应用到钢材、混凝土、钢筋混凝土、岩土体分析中,人们发现横截面上每点应力相等似乎值得怀疑。对钢材、混凝土、钢筋混凝土、岩石体,人们没有仔细思考,没有产生怀疑,但对三相土体圆柱体横截面上每点应力怎么会相等呢?应力是内力,难道此时三相土中固相、液相和气相上的内力会相等吗?实际上仔细想一想,钢材、混凝土、钢筋混凝土等物体也有具体的结构,与三相土一样在横截面上物质也不是连续均匀分布。任何具体材料截面上真实的内力都与物体的具体结构有关。事实上,应力是内力,但不是真实的物体内部各组成部分间的相互之间真实的作用力。应力是人们在工程分析中建立的一个概念,概念是人们为了相互交流而建立的,它有别于客观存在。横截面上应力分布从微观上与横截面上真实的内力分布差异很大,但从宏观上用于工程分析的可靠性极好。应力这个概念建立的非常好。上述提到的“横截面上每点应力相等”也只是一个概念,并不指横截面上每点作用的内力相等。事实上力学分析中的横截面是平面,而现实中的横截

---

\* 收稿日期: 2010年2月

面都是凸凹不平的面。力学分析中的平截面是理想的，客观上并不存在。

土力学中有效应力原理提到的总应力、有效应力和孔隙水压力都是应力，在工程分析中都是作用在截面上每一点的。或者说在工程分析中截面上每一点都传递应力，既传递总应力，也传递有效应力和孔隙水压力。在结构上三相土体在截面上有三相之分，但在应力分析中每点都是三相体，是连续均匀分布的三相体。材料力学中的钢筋拉伸试验和土力学中的一维压缩试验都是脱离具体结构测定物体中的应力，是用于力学分析中的应力。摩尔-库伦理论中抗剪强度表达式中的应力也是如此。若将三相土体中按相进行分析，材料力学中建立的应力这个概念就难以应用了。按相分析，不用应力这个概念，也就谈不上有效应力原理了。不少土力学教科书中对总应力、有效应力和孔隙水压力的传递机理的解释可能未说清楚，容易引起误解。

理论力学的研究对象是质点和刚体，没有质点和刚体这两个概念就建立不了理论力学这一基础体系。我们从理论力学中学习了力的平衡分析，结合材料力学中建立的应力、应变、平截面假设等概念，应用力的平衡分析使我们学会了应力分析。这些是土木工程师的基本功，近年来我常对我的学生说，如果理论力学和材料力学未学好，一定要补课，否则难以做一个合格的土木工程师，更不要说做一个优秀的土木工程师。

成文过程中曾与同事、学生反复讨论，意见也不是完全一致，现提出请同行指正。

---

## 《地基处理》创刊二十周年纪念专集征文通知

地基处理编辑部

《地基处理》刊物自1990年创刊以来已历经20个春秋。《地基处理》刊物服务、促进、伴随、见证了我国地基处理技术20年来长足的发展，已成为广大地基处理同行交流、学习地基处理新技术、新方法、新理论、新经验的平台。为了祝贺《地基处理》刊物创刊20周年，《地基处理》编辑部决定2010年第四期作为《地基处理》创刊二十周年纪念专集出版。纪念专集征文内容如下：

- (1) 地基处理技术发展综述类文章，包括单项技术、综合技术等。
- (2) 地基处理技术发展展望类文章，包括单项技术、综合技术等。
- (3) 地基处理新技术、新方法、新理论、新机械。
- (4) 与《地基处理》刊物发展有关的纪念文章。

来稿请注明《地基处理》创刊二十周年纪念专集应征稿件，其它同《地基处理》稿件要求。

译文

## 澳洲重制黑煤的力学特性\*

Mechanical Properties of Reconstituted Australian Black Coal

D. Jasinge<sup>1</sup>; P. G. Ranjith<sup>2</sup>; S. K. Choi<sup>3</sup>; J. Kodikara<sup>4</sup>; M. Arthur<sup>5</sup>; and H. Li<sup>6</sup>

秦鹏飞译; 高华东校

译自: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, July, 2009, Vol. 135, No. 7, P980-985

**[摘要]** 煤通常是高度不均质的。即便是取自相距很近的同一煤层或同一矿芯的煤样其特性也存在很大的差异,这使得很难确定煤的单轴抗压强度(UCS)与点荷载指标之间的关系。为克服这一难题,建立了一种为实验室试验而制做再生煤试样的方法。煤试样是由压碎的煤粒混合水泥和水等碎粒压实而制成的。试样制成后养护4天。通过单轴抗压强度试验和点荷载试验检验这些再生煤试样的地质力学特性。养护4天后发现平均单轴抗压强度约为4Mpa。这篇技术摘记概述了一些已经完成的用以预测再生黑煤试样力学特性的试验结果及相互关系的分析。用压碎的煤粒重制试样,我们希望它保留煤原有重要的力学和物理化学特性,其中包括膨胀性、流动性和煤的气体吸附性等。目的是制得可以高度类比的性能均匀的煤试样。这些再生煤试样可以用在一些与煤有关的研究领域,如在煤层中长期储存CO<sub>2</sub>等。

**[关键词]** 煤; 澳洲; 力学特性

### 前言

将人类活动排放的二氧化碳注入到不可开采的煤层中是减少温室气体排放的一种方法。在过去的十年里世界上很多国家对这种地质隔离技术的方法进行了研究。因为煤吸附CO<sub>2</sub>的能力比吸附甲烷的能力强,注入CO<sub>2</sub>后就可以促使煤层中的甲烷释放出来。这个过程被称作“煤层甲烷复原的增强”。将CO<sub>2</sub>隔离在不可开采的煤层中具有由产生出的甲烷来部分补偿隔离的代价的优势。

尽管地质隔离技术的方法很有吸引力,但也需要考虑长期储存静态CO<sub>2</sub>带来的一些风险(Viete和Ranjith 2006, 2007)。认识到煤层在冠岩整体性和断层活动性方面的地质力学特性的重要性是很重要的。然而煤是高度不均质的,所以很难确定能代表整个煤层特性的性质。取自同一矿芯或是同一煤层的煤样其特性就存在着极大的差异。

这就使得很难在不同的力学特性如单轴抗压强度(UCS)和点荷载指标间确定出有用的

\* 收稿日期: 2009年8月

关系式。重制试样可以解决这一难题。建立了一种为实验室试验而制做再生煤试样的方法。初步研究将集中在重制煤的地质力学特性上,将来的研究将会深入到膨胀性、流动性和气体吸附性能上等。

这篇技术摘记运用单轴抗压强度(UCS)试验和点荷载试验(PLT)探讨了重制煤试样的力学特性。实验室研究的目的是确定重制煤的力学和变形特性并建立单轴抗压强度(UCS)与点荷载指标( $I_{SS0}$ )间的相互关系。

## 前有的单轴抗压强度(UCS)和点荷载试验(PLT)研究

一些科研人员已经研究了许多不同岩石的单轴抗压强度(UCS)与点荷载指标间的关系。Cargill和Shakoor(1990)的研究指出点荷载试验和单轴压缩试验这两种沿平面表面破坏的形式是一致的,继而指出这种经验式的关系是岩石独有的特性,像密度一样。一些研究人员研究发现的单轴抗压强度(UCS)与点荷载指标( $I_{SS0}$ )间的关系如表1所示,从中可以看出即便是同一类型的岩石也没有一个统一的公式。原因是即便是同种类型的岩石其性质也不均或差别很大。因此,从均质试样比如重制煤试样试验得到的关系式呈现出相近于天然煤质的地质力学特性,可以对单轴抗压强度(UCS)与点荷载指标( $I_{SS0}$ )之间的关系提供一些有用的见解。

表1给出了相关研究的详细资料。D'Andrea et al.(1964)通过对49个地方岩石的测试确定出了9种岩石的特性。运用了多元线性回归分析并得到了几个预测抗压强度的经验公式。然而D'Andrea et al.(1964)的研究没有考虑试样尺寸的影响。用作试验的试样尺寸为25mm,尺寸校正需要用到它们的相互关系。Broch和Franklin(1972)的研究工作采用的是25, 38和54mm的试样。他们运用了径向试验、轴向试验和四角棱柱体试验等方法。通过对不同长径比和不规则煤块试样的测试研究了尺寸和形状的影响。直径实验的结果离散性较小。他们得到了一幅点荷载强度试验的尺寸校正表并提出了一套50mm直径试样点荷载指标的标准计算方法。观测到的相关系数同Bieniawski(1975)所得到的相似。

研究人员所发现的单轴抗压强度(UCS)与点荷载指标( $I_{SS0}$ )之间的相互关系 表1

	参考文献	岩石类型	所得公式		
D'Andrea	et	al.	(1964)	多样的	$q_u=15.3I_{SS0}+16.3$
Broch	and	Franklin	(1972)	多样的	$q_u=24I_{SS0}$
Bieniawski	(1975)	砂岩	$q_u=24I_{SS4}$		
Hassani	et	al.	(1980)	沉积岩	$q_u=29I_{SS0}$
Read	et	al.	(1980)	沉积岩	$q_u=16I_{SS0}$
		玄武岩	$q_u=20I_{SS0}$		
Forster	(1983)	各样的	$q_u=14.5I_{SS0}$		
Gunsallus	和	Kulhawy	(1984)	各样的	$q_u=16.5I_{SS0}+51.0$
ISRM	(1985)	各样的	$q_u=(20-25)I_{SS0}$		
Cargill	和	Shakoor	(1990)	砂岩为主	$q_u=23I_{SS4}+13.0$
Chau	和	Wong	(1996)	各样的	$q_u=12.5I_{SS0}$
Grasso	et	al.	(1992)	各样的	$q_u=9.3I_{SS4}+20.04$

Carter	和	Sneddon	(1977)	煤系	$q_u=(21-22)I_{SS0}$
Jermy	和	Bell	(1991)	煤系	$q_u=14.1I_{SS0}$
Rusnak	(1998)	煤系	$q_u=21I_{SS0}$		
Singh	和	Singh	(1993)	石英岩	$q_u=23.4I_{SS0}$
Das	(1985)	粉砂岩	$q_u=14.7I_{SS0}$		
	砂岩	$q_u=18I_{SS0}$			
	页岩	$q_u=12.6I_{SS0}$			
Kahraman	(2001)	煤系	$q_u=23.62I_{SS0}-2.69$		
	其它岩石	$q_u=8.41I_{SS0}+9.51$			

注:  $q_u$ 和 $I_{SS}$ 均为Mpa

Bieniawski (1975) 开展了一些径向、轴向和不规则煤块的点荷载试验。他总结指出使用径向点荷载试验是最简便和可靠的。他也检测了点荷载指标与单轴抗压强度 (UCS) 间的关系及在此相关系数下受测试样尺寸的影响。Bieniawski (1975) 指出点荷载指标试样的标准尺寸应该不超过芯部尺寸 (直径54mm) 并且不建议使用任何尺寸校正。Hassani et al. (1980)

研究了芯部直径对点荷载指标数值的影响。试样的各向异性现象对试验结果有极大的影响 (Read et al.1980)。他们在墨尔本地区开展了沉积岩和玄武岩的试验并提出比例系数分别是 16 和 20。Gunsallus 和 Kulhawy (1984) 对取自美国东北部的沉积岩开展了断裂韧度、单轴压缩、点荷载指标和巴西式张拉等试验。研究使用了径向点荷载试验, 这也是 4 种试验中唯一一种破裂面与地层面相平行

的试验。Gunsallus和Kulhawy (1984) 解释到这可能是比例系数变化的原因并建议平均值取16.5。Cargill和Shakoor (1990) 对砂岩、石灰岩、白云岩、大理石、黑花岗石片麻岩试样进行了研究并发现从标准单轴抗压强度 (UCS) 试验得到的抗压强度数值与相应的点荷载试验 (PLT) 的结果有很强的相互关系。所开展的试验试样直径是54mm, 若公式写为 $y=mx$  直线比例的形式则这些试验结果同Broch和Franklin (1972) 的结果一致。Singh和Singh (1993) 用不超过芯部尺寸的石英岩试样测定了点荷载指标 (PLT) 与单轴抗压强度 (UCS) 之间的关系。他们观察到了一个同Broch和Franklin (1972) 和Bieniawski (1975) 相似的结果。从表1可以看出比例系数从9变化到25。然而对大多数岩石这个系数可从20变化到25, 像国际岩石力学学会ISRM (1985) 指出的那样。

## 实验工作 试样制备

用颚式粉碎机将天然煤矿样压碎成粉 (100—1000  $\mu m$  大小)。通过压实碎煤粒拌合水泥的碎屑物质制得重构煤样。试样被养护凝固, 目的是使它能够各向均匀。需要强调指出的是试样的强度受混合物中原料类型、不同组分的数量和压制方式的直接影响。颗粒大小的分布也影响到重制煤试样的力学特性。确定出达到最大干密度所需的合适的用水量也很重要, 它将影响到试样最终的单轴抗压强度。

单轴抗压强度试验所制备的样本长度至少是直径的两倍 (ISRM 1981)。点荷载试验所取



的长径比应大于1 (ISRM 1985)。为制得合适的圆柱试样,在试验中还制造了特殊的圆筒钢模。圆筒的一端是敞开的,另一端是可移除的“盖”。这使荷载能够施加在试样上,试样产生压缩后就能从模子中挤出。在煤粉混合物放进圆筒之前,先在模子内壁上涂一层润滑油。这样就减小了接触面上的摩擦力并使得脱模变得容易。所使用的模子直径为44.8mm,长度为110mm。压实的试样第二天用液压千斤顶挤出,在室温下养护4天。

为了获得煤块间相当强的粘结力,决定加入了一些水和水泥。试验中使用了足量的水泥以保证组分间的粘结力能够使实验室试验有效进行。最佳水泥用量是通过反复的试验得出的。用在实验研究中混合物各组分比例请见表2。水泥含量一直增加直至样本能够经受所有预定的实验(如挤出、处置)。此外,尝试不同的水泥含量可以估算出水泥对样本强度的影响。另一个需考虑的因素是水灰比。试样可能会因为缺水而溃碎。因此需调整水灰比以达到最佳效果。从最大干密度中找出了达到最大压实的最优含水量,发现水泥和煤混合物的最佳水灰比是0.75。

重制试样在试验研究中所使用的混合比

表2

试验	水泥/煤灰	水/水泥	层数
I	0.05	0.5	3
II	0.15	0.5	3
III	0.30	0.5	3
IV	0.45	0.65	3
V	0.20	0.7	3
VI	0.25	0.7	3
VII	0.20	0.75	3
VIII	0.25	0.75	3
IX	0.30	0.75	3
X	0.35	1	3
XI	0.15	2	3

压缩过程共有3个压缩层,每一压缩层的底面是毛糙的,这样利于粘结。粗糙的过程是利用小铲轻缓的翻动表面实现的。第二层被压实后,接下来其它层经受的是同样的过程。每层施加9KN的压缩荷载5分钟以保证这持续的压力能施加在每一层上。制作试样的压缩过程请见图1。

把试样从模子中拔取出来必须用到液压机。液压机在试样的上端部施加一个小的荷载,这样就能把试样从模子的敞口底端挤压出来。在挤出的试样上粘附竖向和水平向应变仪以测量单轴压缩试验的轴向和侧向变形。制好的试样在通风条件下养护4天。

## 结果与讨论

### 煤样选取

制作一个满意的试样需要尝试好几次才能找出所需的水泥和水的用量。第1次试验中使用了5%的水泥量。在拔取过程中有好多试样因粘结力不足而溃碎。所以,如表2中所示,水泥和煤灰的(重量)比从0.05增加到0.45以保证得到较高的粘结强度。另外,水灰比从0.5增加

到2以适度地水化增加的水泥。若含水量达到0.75以上在压缩试样过程中会观察到水分出流现象。开展了一些实验以确定重制煤试样的强度。发现试验样品 VIII，水泥—煤灰比为0.25，水灰比为0.75是最合适的比例。选择这个比例的原因是这个试样有足够的强度，同时养护了4天需水泥量最小，压缩过程中也没看到出流现象。水泥含量低点能更好的代表天然煤的特性。实验研究中所使用的水泥—煤灰—水分的比是表2中试样 VIII 的比例。

### 点荷载试验

对所有试样均实施了径向点荷载试验以估算它们的强度。在选择过程中使用这些试验以确定哪些试样最适合于做进一步的研究(表3)。试样IV, VII, VIII和IX点荷载试验的结果是相同的,而其它试样的结果不同。试样IV和IX与试样VIII相比其水泥含量更高(表2)。试样VII在试验过程中难于操控因为其水泥含量不足难于成块。因此,试样VIII被认为是最理想的试样。在试样VIII上又额外做了10个试验。这些试验中4个试样的屈服点荷载是0.30kN,6个是0.35kN。因此,重制煤养护4天后其点荷载试验强度的算术平均值约是0.33kN。

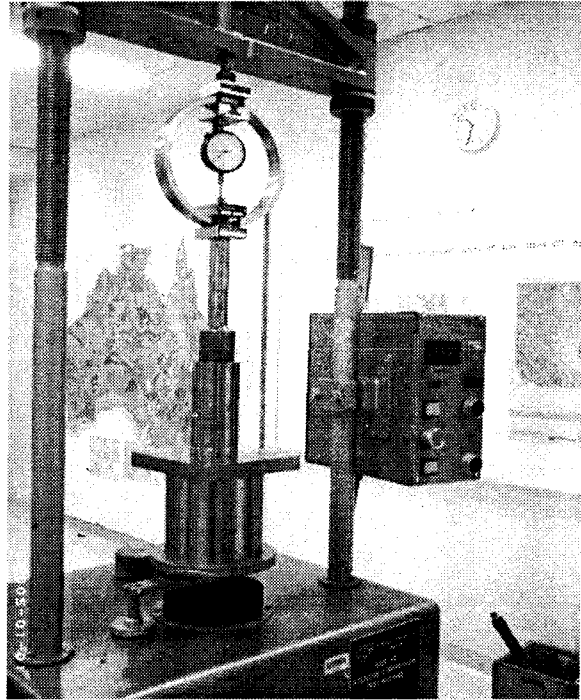


图1 压制过程

选择过程中重制试样的点荷载试验(PLT)结果表

表3

试验	第一次点荷载试验(kN)	第二次点荷载试验(kN)
I	Crumbled	0
II	Crumbled	0
III	0.2	0
IV	0.4	0.4
V	0.35	0.25
VI	0.25	0.30
VII	0.30	0.30
VIII	0.35	0.35
IX	0.45	0.45
X	0.3	0.3
XI	0.125	0.2

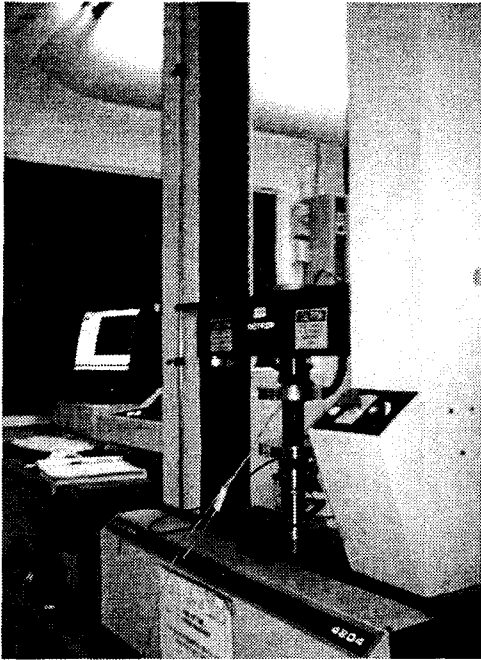


图2 单轴抗压强度试验



图3 重制试样的典型破坏

### 单轴压缩试验

单轴压缩试验共有12个试验以确定重制煤的峰值强度。如表2所示,按照试样8的混合比例设计制备试样。两个应变仪,一个竖直一个水平粘附在试样上用以确定重制煤样块的应力应变特性。试验用图2所示的英斯特朗机来做。所有实验的荷载加载速率都为0.125mm/min,试验结果如表4。试样的典型破坏形式如图3,是一个剪切破坏。所有的试样都是脆性破坏,但这种脆度比天然煤要小。图4用图表的形式展示了单轴抗压强度试验的数值。它说明所得的数据分散在3.68至4.45Mpa之间,标准方差为0.24Mpa。

单轴抗压强度试验结果

表4

试样	单轴抗压强度 (MPa)
I	4.08
II	4.18
III	4.01
IV	3.78
V	4.45
VI	3.68
VII	3.89
VIII	4.20
IX	4.50
X	3.88
XI	4.08
XII	3.87

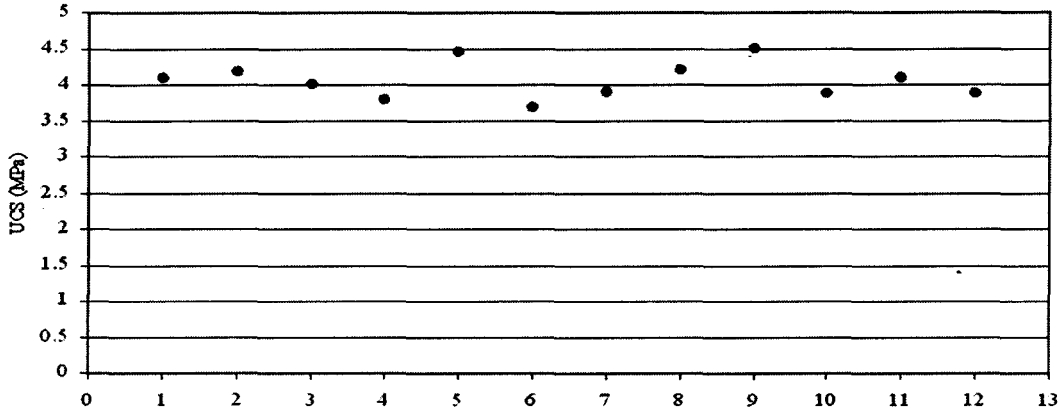


图4 重制试样的单轴抗压强度试验结果

这样就可以建立起重制煤试样点荷载指标与单轴抗压强度间的相关关系。单轴抗压强度的算术平均值是4.05Mpa，点荷载试验的是0.33KN。通过对试验结果的分析可以得出如下关系： $q_u = 26.1I_{S50}$

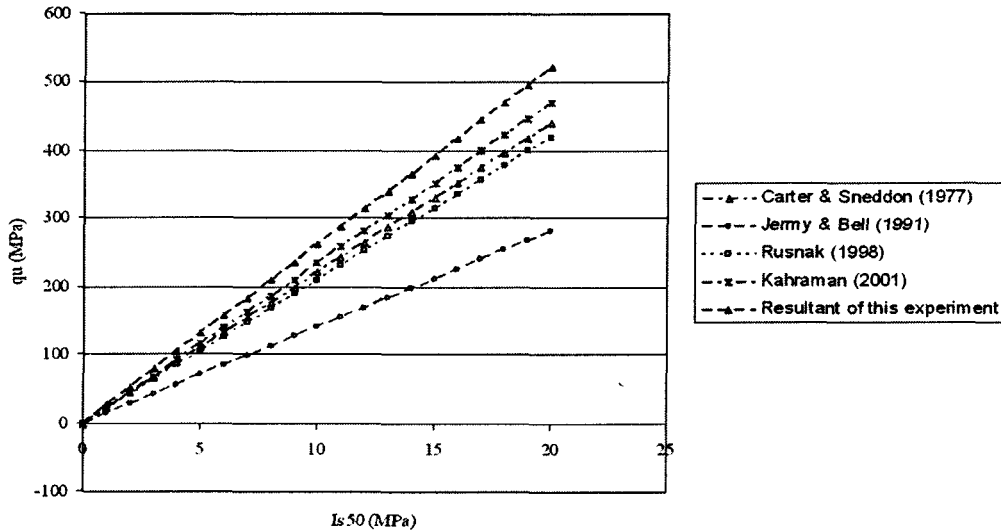


图5 相互关系的比较

其中 $q_u$ 是单轴抗压强度； $I_{S50}$ 是试样直径等于50mm的点荷载指标。这个公式可同第一部分所讨论的其他研究人员所得到的关系式相比较。图5展示了其他研究者对煤系岩石研究所得的关系式和这套试验中的关系式。所得到重制煤的关系式其斜率同Kahraman (2001) 所得的公式斜率很接近。所得的比例系数为26.1，这同ISRM (1985) 所建议的范围稍微有所偏离。然而，ISRM(1985)也指出非均质岩的比例系数能从15变化到50。可以认为消除各向异性现象可以使重制煤试样的比例系数更接近于ISRM所建议的20-25。Carter和Sneddon (1977) 与Rusnak (1998) 得到了煤系岩石试验的比例系数，同重制煤观测到的比例系数更为接近。单

轴抗压强度试验的标准偏差为0.24MPa,点荷载试验的标准偏差为0.02MPa,这些数值均较低说明了试验结果的离散性小,其中点荷载试验的离散性更小。这同Broch和Franklin(1972)对砂岩所做实验的比较是一致的。上述标准偏差比有关文献中天然煤试样的标准偏差要小得多。单轴抗压强度试验所施加的荷载沿准备重制试样中所使用的压缩方向,与试样点荷载试验压缩的方向垂直。这同天然煤试样单轴抗压强度试验方向垂直于地层面而点荷载试验方向平行于地层面的情况类似。有了压缩仪所记录得到的数据就可以绘出重制煤的应力应变特性。图6绘制了一副重制煤试样典型的应力与轴向和侧向变形的关系图。观测所得试样弹性模量的平均值为0.71GPa。

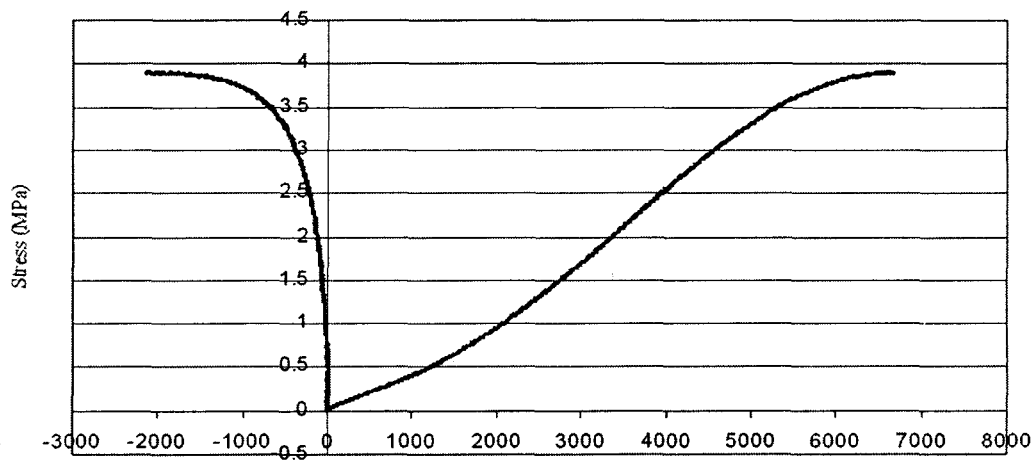


图6 典型重制煤样的应力与轴向和侧向变形

## 结论

开展了单轴压缩试验和点荷载试验用来研究重制煤试样的地质力学特性。测试得到了不同试验的单轴抗压强度关系。重制煤试样试验中所使用的水泥/煤灰比为0.25,水/水泥比为0.75。试样经4天养护后的平均单轴抗压强度是4.05MPa。结果表明重制试样是各向同性的,其力学特性是可类推的。这对重制煤试样作为一种岩土材料用在与煤有关的研究方面很重要,比如研究CO<sub>2</sub>对煤性质的影响等。更深入的研究正在开展,用以检测重制煤与天然黑煤在一系列相关特性上的性能比较。

参考文献略