

大粒径碎石桩在饱和超软土地基中的应用

张福海¹, 王保田¹, 王炳奇², 钟金良³

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098 2. 广东省航道勘测设计科学研究所, 广东 广州 510150;
3. 中国化学工程南京岩土工程公司, 江苏 南京 210044)

摘要 对广东省西江下游航道整治工程中不排水抗剪强度 7~15 kPa 的淤泥土地基进行了碎石桩现场试验, 得出了采用大粒径碎石桩加固不排水抗剪强度小于 20 kPa 软土地基的合理施工控制参数: 碎石填料主要粒径为 5~15 cm, 充盈系数为 1.4~1.6, 密实电流大于 50 A, 留振时间为 5~15 s. 现场桩径检测、动力触探试验和复合地基大型直剪试验结果表明, 采用大粒径碎石桩加固超软土地基是可行的, 大粒径碎石桩对增强地基土的抗剪强度和提高了软土地基承载力十分有效.

关键词 大粒径碎石桩; 超软土地基; 复合地基; 直剪试验; 抗剪强度

中图分类号 :TU472 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2006)04-0430-05

振冲碎石桩法是一种迅速而有效的软土地基处理方法. 一般认为, 在不排水抗剪强度低于 20 kPa 的软黏土中不宜采用振冲碎石桩^[1-3]. 如 JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》^[4]规定, 振冲法适用于处理地基土不排水抗剪强度 c_u 不小于 20 kPa 的黏性土、粉土、饱和黄土和人工填土等地基. 然而, 国内外有许多工程在地基土体的不排水抗剪强度低于 20 kPa 时采用碎石桩法处理地基都取得了成功. 如在 Juran 等统计的 24 项工程中, 有 75% 的工程加固的地基是软黏土和粉土, 而 $c_u < 20$ kPa 的情况占 54% (其中 $c_u < 10$ kPa 的占 12%, $10 \text{ kPa} < c_u < 15 \text{ kPa}$ 的占 15%, $15 \text{ kPa} < c_u < 20 \text{ kPa}$ 的占 27%)^[2]. 我国也有几个成功的工程实例, 其地基土的 $c_u < 20$ kPa. 笔者在地基土不排水抗剪强度只有 7~15 kPa 的广东西江下游做了碎石桩现场试验, 并获得了成功. 结果已应用于广东西江下游航道整治工程. 本文主要介绍该次现场试验成果, 并对大粒径碎石桩在超软土地基中应用的可行性进行分析.

1 现场碎石桩试验

1.1 工程背景

虎跳门水道横坑裁弯工程是世界银行贷款项目——广东西江水道整治工程的组成部分, 裁弯人工开挖河道设计断面底宽 110 m、河底高程 -9.5 m、堤顶高程 4.0 m、坡高 13.5 m, 两岸均采用 1:3 的边坡.

1.1.1 场地地层资料

横坑裁弯工程区域地面以下涉及工程稳定性的土层有 3 层:

第 1 层 0.0~ -2.3 m 淤泥质黏土, 抗剪强度指标均值为 $c = 18.9 \text{ kPa}$, $\varphi = 5.5^\circ$;

第 2 层: -2.3~ -15.0 m 淤泥, 抗剪强度指标均值为 $c = 7.89 \text{ kPa}$, $\varphi = 4.5^\circ$;

第 3 层: -15.0~ -21.0 m 粉质黏土, 抗剪强度指标均值为 $c = 20.2 \text{ kPa}$, $\varphi = 12.1^\circ$.

1.1.2 可能存在的工程问题

在淤泥和淤泥质土层中开挖坡比为 1:3 的人工河道, 可能存在边坡稳定问题. 为了大幅度提高复合地基的抗剪强度, 保证河堤的稳定性, 设计中采用桩径 1.0 m、桩间距 2.0 m 的碎石桩加固淤泥和淤泥质土层.

1.2 试验目的

通过碎石桩现场试桩和效果检测, 提出大粒径碎石桩的施工工艺参数和工艺流程, 并将其作为后续施工的依据.

1.3 试验要获得的控制参数

1.3.1 碎石填料级配

根据 GBJ202—83《地基与基础施工及验收规范》^[1]规定,振冲碎石桩法所用碎石粒径应为 2~5 cm.但是,试验场地地基土的强度较低,主要处理土层的强度还不到 8 kPa,采用小粒径的碎石难以成桩.因为碎石桩是依靠桩间土的侧限阻力来成桩的,与桩间土的侧限阻力直接关联的是桩间土的不排水抗剪强度 c_u 和碎石填料粒径.在试验桩施工初期,为了确定最优碎石级配,进行了 4 组(每组 3 根碎石桩)不同级配的碎石成桩试验.现场试桩结果表明,使用粒径小于 5 cm 的碎石含量最高的第 1 组级配的碎石料,不能成桩;使用粒径小于 5 cm 的碎石含量较高的第 2 组和第 3 组级配的碎石料,能成功制桩,但成桩困难,而且形成的碎石桩桩径偏大,桩体密实度较低(表 1).因此,将粗粒组最多的第 4 组作为正式施工碎石桩的碎石级配.

表 1 碎石桩的碎石级配与成桩情况

Table 1 Crushed stone gradation in gravel piles and situation of piling					
组 别	粒组含量/%				成桩情况
	< 5 cm	5 ~ 10 cm	10 ~ 15 cm	> 15 cm	
第 1 组	33.0	56.1	10.9	0	充盈系数大于 2,密实电流小于 50 A
第 2 组	26.6	57.8	12.2	3.4	制桩成功,但充盈系数为 2 左右时密实电流才达到 50 A
第 3 组	18.1	64.6	17.3	0	制桩成功,但充盈系数为 1.8 左右时密实电流才达到 50 A
第 4 组	5.9	72.8	18.8	2.5	制桩成功

1.3.2 水压控制

造孔水压过大,容易使孔壁冲垮;造孔水压过小,则振冲器难以贯入.制桩水压过大,容易将下段已振密的碎石冲松或冲垮孔壁造成桩体夹泥,从而会影响制桩密实度.制桩水压过小,则下料困难,制桩时间延长,也会影响桩的密实性^[5].根据该工程的实际情况,将造孔水压控制在 0.5 MPa 左右,水量控制在 30 m³/h 以上,以保证孔内淤泥返出地面,保证填料的顺畅,提高施工效率.为保证成孔质量,终孔后必须清孔一两遍;同时,将制桩水压控制在 0.3 MPa 左右,以保证桩体对桩间土体的排水固结所起的排水通道作用不因桩体含泥量大而受影响.

1.3.3 护壁及填料方式

在强度很低的软土地基中施工,由于地基土体的强度很低,必须先进行护壁,否则很容易塌孔,使塌孔处产生卡料现象,振冲器无法沉入到预定位置,产生断桩或桩体不密实现象.本试验在试制第 1 根试验桩时未采取“先护壁,后制桩”方法,振冲器下沉过程中激振电流随下沉深度和填料量的增加发生了如图 1 所示的变化.由图 1 可见,深度 9 m 处产生了卡料现象,导致振冲器激振电流达到额定电流 60 A 时仍然无法向下贯入.为此,在后续试验施工中采用了“先护壁,后制桩”方法.即在开孔时,不是一下子到达加固深度,而是先到达第 1 层软弱层,再加些碎石料进行初步挤振,让这些填料挤入孔壁,加强此段孔壁以防塌孔,然后将振冲器下降至下一段软土中并用同样方法加料护壁.如此重复进行,直到设计深度.孔壁护好后,就可开始填料制桩了.

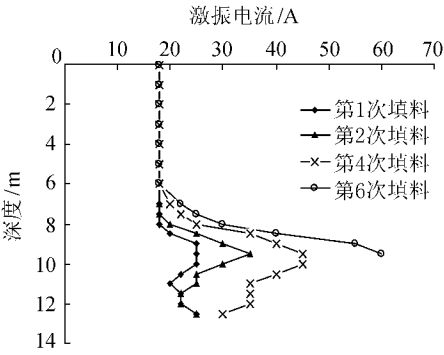


图 1 填料过程中激振电流随深度的变化
Fig.1 Variation of excitation current with depth during filling process

填料方式,先把振冲器提出孔口,往孔内倒入约 1 m 堆高的填料,然后再放下振冲器使孔口的碎石填料落到先前振密的碎石顶部或孔底,当振冲器达到碎石充填的位置时,振冲电流增加,开始对碎石填料产生振密作用.每次加料均重复以上步骤.

施工过程中让振冲器在孔内不停地上、下串动,以避免饱和软土振冲碎石桩施工中发生“卡管”和“断桩”事故,保证桩体的连续性和密实度^[2,6].

1.3.4 充盈系数的确定

充盈系数定义为每根碎石桩实际灌入碎石量与根据设计桩径和桩长计算的理论碎石桩体积的比值.根据 JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》^[4]的建议,碎石桩的充盈系数为 1.1~1.2.通过现场碎石桩施工过程中较精确的碎石计量和施工后的现场开挖实测碎石桩直径,统计出了 10 根碎石桩实测桩径与实测充盈系数的关系,如图 2 所示.由图 2 可见,当设计碎石桩的桩径为 1.0 m 时,要保证碎石桩桩径大于 1.0 m,充盈系数

应为 1.5 左右,远大于 JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》^[1]所建议的数值.这是因为在超软弱地基中,要形成密实度较高的碎石桩,必须在桩底形成强度较高的葫芦状桩头,桩身区也有部分碎石挤入到四周土中.

1.3.5 密实电流和留振时间

现场试验中,使用 30 kW 振冲器,密实电流控制在 50 A 以上.留振时间是指打桩过程中,某段碎石桩施工时,密实电流达到控制值后振冲器基本不下沉而能够保持密实电流的振动时间.在超软黏土中,留振时间一般较短,时间过长会破坏侧壁土体,给制桩造成困难.现场试验中,留振时间控制在 5~15 s 之间.现场试验表明,留振时间对桩径和桩身密度有重要影响.

2 碎石桩的质量检测

2.1 桩径检测

2.1.1 浅部桩径检测

为现场试验服务的 82 根试验桩制桩完成后,开挖检测了其中 15 根碎石桩的桩径,开挖深度为 2.5 m,15 根被检测桩的直径均大于 1.0 m,检测结果见表 2.

表 2 浅部桩径检测结果
Table 2 Diameter inspection for piles at shallow layers

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
桩径/m	1.23	1.03	1.10	1.10	1.04	1.10	1.10	1.02	1.05	1.10	1.02	1.05	1.10	1.02	1.10

2.1.2 深层桩径检测

现场试验结束后,利用地质雷达对 3 根试验桩的桩径和桩长进行了检测,检测结果见表 3.

表 3 中编号为 A 的试验桩为现场试验的第 1 根试桩,由于未采用“先护壁,后制桩”方法,深度 9.5~10.0 m 处孔壁发生坍塌,制桩过程中出现卡料现象,致使 10.5 m 以下桩体桩径明显不足.

2.2 桩体的动力触探测试

为了检测碎石桩桩体的密实度,制桩完成后对 27 根桩进行了重(Ⅱ)型动力触探测试,结果见表 4.由表 4 可知,在抽检的 27 根试验桩中, $N_{63.5}>10$ 击的有 18 根,占 67%;7 击 $<N_{63.5}<10$ 击的有 9 根,占 33%.图 3 是编号为 M-5 的碎石桩的动力触探试验结果.

表 4 碎石桩体的动力触探测试结果

Table 4 Dynamic penetration inspection for gravel piles

桩号	$N_{63.5}$ 平均值/击	桩号	$N_{63.5}$ 平均值/击	桩号	$N_{63.5}$ 平均值/击
F-3	14.86	I-4	8.76	L-2	10.42
F-6	12.03	I-6	13.39	L-5	9.74
F-8	13.35	I-8	12.04	L-6	9.90
G-2	10.28	J-5	8.52	L-7	11.73
G-5	11.05	J-7	10.24	M-5	9.97
H-3	10.41	J-8	10.60	N-0	9.57
H-6	17.41	J-9	9.57	N-1	12.08
H-7	16.57	K-1	10.67	N-5	13.56
I-2	7.55	K-4	8.97	N-8	11.72

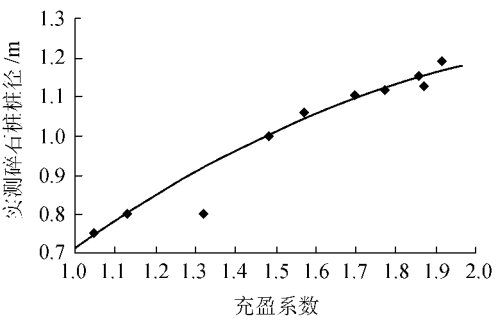


图 2 实测碎石桩桩径与充盈系数的关系
Fig.2 Relationship between diameter of gravel piles and over-charged coefficient

表 3 深层桩径检测结果

Table 3 Diameter inspection for piles at deep layers

编号	平均桩径/m	桩长/m	桩身质量评价
A	0.90	12.5	0~10.5 m 成桩质量较好, 10.5~12.5 m 处碎石量不足
B	0.95	12.0	成桩质量较好
C	1.05	12.5	成桩质量较好

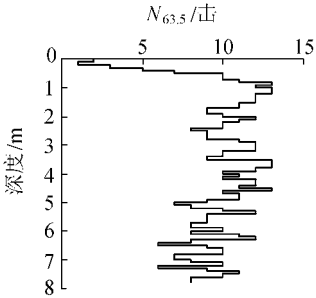


图 3 桩号为 M-5 的试验桩
 $N_{63.5}$ 动力触探结果
Fig.3 Result of dynamic penetration inspection with $N_{63.5}$ for pile M-5

2.3 大粒径碎石桩现场直剪试验

现场大型直接剪切试验原理、试验仪器和操作方法见文献[7,8]。单桩直剪试验试样直径同设计桩径,复合地基试样的直径根据每根桩的控制范围来确定(如:桩距 2.0 m 正三角形布置时,试样直径为 2.0 m;桩距 1.5 m 正三角形布置时,试样直径也是 1.5 m)。

现场碎石桩单桩和复合地基的直接剪切试验结果如图 4、图 5 所示。淤泥土层天然地基现场十字板试验得到的不排水抗剪强度指标 c_u 只有 7.5~12 kPa。经过碎石桩处理后,复合地基的抗剪强度有了大幅度的提高。因此,大粒径碎石桩对于天然地基强度很低的淤泥和淤泥质土具有良好的处理效果。

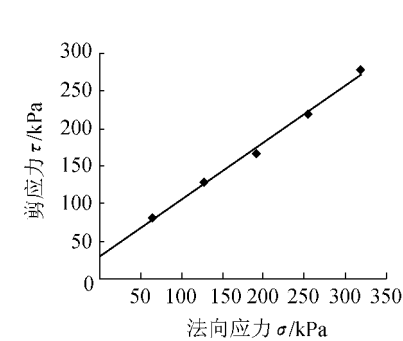
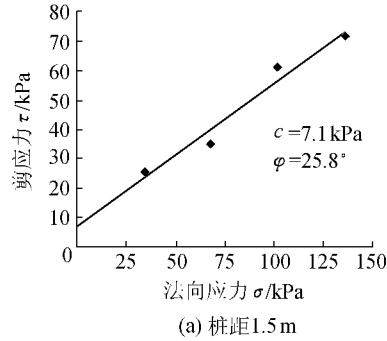
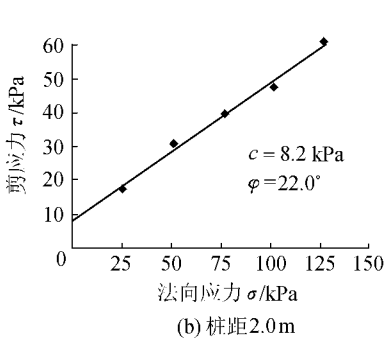


图 4 单桩抗剪强度线

Fig.4 Shear strength line of single pile



(a) 桩距1.5 m



(b) 桩距2.0 m

图 5 复合地基抗剪强度线

Fig.5 Shear strength line of composite foundation

用现场试验获得的桩径 1.0 m、桩间距 2.0 m 碎石桩复合地基的抗剪强度指标 $c = 8.2 \text{ kPa}$, $\varphi = 22.0^\circ$ 验算虎跳门水道横坑裁弯工程人工开挖河道的边坡稳定性,计算方法采用瑞典条分法,得到的边坡安全系数为 1.20,满足 GB 50286—98《堤防工程设计规范》[9]规定的安全系数大于 1.15 的要求。

3 结 论

- a. 大粒径碎石桩适合于加固不排水抗剪强度大于 5 kPa 的超软土地基。桩体填料应采用级配碎石填料,碎石最大粒径控制在桩径的 1/5 以内。
- b. 大粒径碎石桩应用于不排水抗剪强度大于 5 kPa 的超软土地基时,其制桩工艺与常规的振动水冲法有一定区别,必须先造孔护壁后填料,填料时将振冲器提出孔口,然后放下振冲器使孔口的碎石填料落到先前成桩部位或孔底。
- c. 大粒径碎石桩加固超软土地基时充盈系数的取值范围应为 1.4~1.6,而 JGJ 79—2002《建筑地基处理技术规范》中规定的碎石桩的充盈系数的取值范围为 1.1~1.2[4]。
- d. 密实电流和留振时间需通过现场试验确定。本次现场试验结果表明,当密实电流控制在 50 A 以上、留振时间控制在 5~15 s 范围内时,能使碎石桩桩径满足设计要求。

参考文献:

[1] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. GBJ 202—83 地基与基础施工及验收规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
[2] 叶书麟, 叶观宝. 地基处理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999: 40-106.
[3] 王保田, 张福海, 王炳奇. 碎石桩复合地基及其在水利工程中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(4): 56-58.
[4] 中华人民共和国建设部. JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
[5] 蓝冰, 邓新德. 振冲碎石桩在饱和软土地基处理中的应用研究[J]. 岩土工程界, 2002, 5(11): 37-40.
[6] 贺光耀. 振冲碎石桩施工中常遇到的问题及其处理方法[J]. 勘察科学技术, 1994(6): 39-41.
[7] 《工程地质手册》编写组. 工程地质手册[K]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 180-215.
[8] 王保田, 王盛源. 碎石桩复合地基现场大型直剪试验设计[J]. 大坝观测与土工测试, 1995, 19(2): 37-40.
[9] 中华人民共和国水利部. GB 50286—98 堤防工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1998.

Application of large grain-size gravel piles to strengthening saturated super-soft ground

ZHANG Fu-hai¹, WANG Bao-tian¹, WANG Bing-qi², ZHONG Jin-liang³

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Guangdong Design and Research Institute for Navigation Channel, Guangzhou 510150, China;

3. Nanjing Geotechnical Company of Sino Chemical Engineering Group, Nanjing 210044, China)

Abstract Based on field experiments on large grain-size gravel piles used for strengthening muddy ground with undrained strength 7-15kPa in the navigation channel regulation project on the lower Xijiang River of Guangdong Province, some reasonable construction parameters for soft ground strengthened with large grain-size gravel piles with undrained strength less than 20kPa were obtained, i.e. the grain-size ranging from 5 cm to 15 cm, over-charged coefficient ranging from 1.4 to 1.6, electrical current being greater than 50 A during compaction of gravel piles, and vibration time for compaction being 5-15s. Results of pile diameter inspection, drop penetration inspection, and large-scale direct shear experiments in situ show that it is feasible for strengthening of super-soft ground with large grain-size gravel piles, and that the gravel piles are much effective to intensify the shear strength of soil and improve the bearing capacity of ground.

Key words large grain-size gravel pile; super-soft ground; composite foundation; direct shear experiment; shear strength

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊 全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊 《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244, CN32-1439/TV, ISSN1006-7647, 双月刊)

《水利水电科技进展》主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文, 设有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目, 适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读。

《水利水电科技进展》由邮局发行, 邮发代号 28-244, 2007 年每期定价 8 元, 全年 6 期共计 48 元。读者亦可直接向编辑部订阅。欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单。编辑部地址: 210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部。联系电话: 025-83786335, E-mail: jz@hhu.edu.cn, http://kkb.hhu.edu.cn。汇款时务请注明“订水利水电科技进展”。