

碎石桩复合地基及其在水利工程中的应用

王保田¹, 张福海¹, 王炳奇²

(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)

摘要: 分析碎石桩加固软弱地基的机理, 重点介绍大粒径碎石桩处理超软弱地基河道岸坡的实用性. 对大粒径碎石桩的施工机械、控制参数、质量检验等通过现场试验, 提出了合适的数值. 碎石桩的充盈系数在 1.4 到 1.5 以上, 密实电流 50 ~ 55 A, 留振时间 5 ~ 15 s. 现场试验表明, 振冲碎石桩施工简便, 速度快, 价格较低, 质量易于控制. 大粒径碎石桩现场级配分析成果、剪切试验成果和载荷试验成果说明, 大粒径碎石桩对于增强地基土的抗剪强度十分有效.

关键词: 大粒径碎石桩, 复合地基, 抗剪强度, 承载力

中图分类号: TU472.3+5

文献标识码: B

文章编号: 1006-764X(2001)04-0056-03

碎石桩复合地基指用各种施工方法, 将碎石灌入地基中, 形成碎石桩体, 在上部荷载作用下, 碎石桩与地基土共同作用, 形成复合地基. 现在, 将碎石桩复合地基定义为将碎石成柱状置入地基, 碎石桩与地基土共同承担荷载作用的一种人工地基形式, 而不管形成碎石桩的施工工艺.

我国以振动水冲法形成碎石桩的施工工艺最为普遍, 称作振冲碎石桩法. 1977 年国内开始进行振动水冲法的现场试验工作. 20 世纪 80 年代以来, 振动水冲法在坝基、道路、桥涵、工业与民用建筑等地基处理中得到了广泛应用. 江苏省江阴市振冲器厂已经形成了定型的序列振冲器.

一般认为, 碎石桩法只适用于天然土的不排水强度 c_u 大于 20 kPa 的情况, 并将这一限制写入了规范^[1]. 据文献[2]中的资料, 振冲碎石桩法可适用于不排水强度 $c_u = 15 \sim 50$ kPa 的地基土. Juran 在统计 24 项振冲碎石桩工程后指出, 有 75% 的加固工程地基土是软粘土和粉土, 而 $c_u < 20$ kPa 的情况占 54% (其中 $c_u < 10$ kPa 占 12%, 10 ~ 15 kPa 占 15%, 15 ~ 20 kPa 占 27%). 国内也有多项工程成功地用振冲碎石桩法处理了 $c_u < 20$ kPa 的饱和软粘土地基^[2,3].

1 碎石桩的加固机理

1.1 对松散砂土地基的加固机理

砂土是单粒结构. 密实的砂土接近稳定状态, 在荷载作用下不再产生大的变形. 松的砂土颗粒间的孔隙较大, 颗粒位置不稳定, 在静载或动载作用下容易产生

位移, 因而产生大的变形. 特别是在振动荷载作用下, 松砂土位移后使孔隙水应力上升, 极易产生液化现象, 发生大的变形, 抗剪强度急剧减小. 砂土地基加固主要目的是提高地基土承载力, 减小变形, 增强抗液化性. 振冲碎石桩对地基的加固表现在以下三个方面^[4]:

a. 挤密效应. 振冲法施工过程中, 饱和砂土在高频强迫振动力作用下发生液化, 重新排列成致密状态. 冲孔中填入大量碎石后, 在水平振动力作用下, 碎石向周围土体挤压, 使砂土的相对密实度增加. 碎石桩体排水能力比砂土地基强. 因此, 复合地基的承载力大幅度提高, 抗液化能力增强. 如我国开滦钱家营矿水塔工程, 天然细砂地基相对密实度为 70%, 不能满足抗 9 度地震的要求, 采用振冲碎石桩法加固后, 地基的相对密实度达到 90% 以上, 承载力达到 200 ~ 300 kPa, 满足了设计要求.

b. 排水效应. 对于松砂地基, 在循环剪应力作用下, 发生体积减小趋势, 在不排水条件下, 孔隙水应力急剧上升而发生液化. 碎石桩体极好的排水特性提高了复合地基的排水能力, 使复合地基在地震时产生的孔隙水应力能够及时消散, 从而防止液化. 如官厅水库大坝下游坝基中的细砂层位于 8 度地震区, $e_0 = 0.615$, $n = 12$, $D_r = 53\%$, 经分析 8 度地震时将发生液化. 采用孔距 2 m 的振冲碎石桩加固后, $e_0 < 0.5$, $n = 34 \sim 37$, $D_r > 80\%$, 经分析 8 度地震产生的孔隙水应力比天然地基降低 66%.

c. 预震效应. Seed 等^[5]的试验研究表明, 砂土的液化特性, 除了与土的相对密实度有关外, 还与其

振动应变史有关。一种砂土试样经过预震后,与预震前孔隙比相同时,振动液化剪应力提高了 46%。振冲法施工时,振冲器以较高的频率和大的水平激振力使填料和地基土在挤密的同时获得了强烈的预震作用,增强了复合地基的抗液化能力。

1.2 对粘性土地基的加固机理

对于粘性土地基,特别是饱和软粘土地基,由于土的粘粒含量高,渗透性低,在振冲水流作用下,粘土随循环水流出,所以碎石桩的作用不是使地基土挤密,而是置换一定比例的地基土,由性能良好的碎石代替强度低的软弱地基土。

振冲碎石桩施工时,振冲器借助自重下沉,由水平振动力和高压水的作用使粘土变成泥浆排出孔外,形成略大于振冲器直径的孔,再向孔中灌入碎石,由振冲器的水平激振力作用将碎石挤入周围土体中,形成高密度、大直径的桩体,它与天然土构成复合地基共同承担荷载。现场试验表明,复合地基的桩土应力比一般为 2~6(天然土越软,桩土应力比越大)。

在制桩过程中,由于振动、挤压和扰动作用,使桩间土的不排水强度有较大降低。现场实测资料表明,灵敏度较高的海相淤泥和淤泥质土在制桩刚完成时,地基土的不排水强度降低 20%~50%。随着时间推移,地基土的强度不断增加,甚至超过天然土的强度。这一方面是由于地基土结构强度的恢复,另一方面是由于碎石桩的排水作用使地基土的孔隙比减小,有效应力增加。

由于碎石桩由散粒体组成,承受荷载作用时,产生侧向变形,并引起周围土体产生被动抗力。若粘性土的强度过低,不能对桩体提供有效的抗力,桩体就会产生鼓胀破坏,碎石桩的作用不大。这是碎石桩不能加固不排水强度过低的软粘土地基的原因。

若软土层厚度过大,碎石桩也可以设计成不穿过软土层的悬挂形式,在碎石桩加固范围内,起到垫层的作用,形成双层地基,从而提高整个地基的承载力和减小基底沉降。

1.3 提高天然土的抗剪强度机理

碎石桩复合地基承载力的提高和抗剪强度的提高是相互关联的。对于砂性土地基,由于挤密作用和排水作用使天然土的密度增加,抗剪强度提高。桩体部分因为由密实的粗颗粒碎石组成,其抗剪强度比地基土高,桩体的置换作用使复合地基的抗剪强度进一步提高。对于粘性土地基,特别是灵敏度较高的软粘土和淤泥质土地基,由于碎石桩施工过程中的扰动,碎石桩刚打入后地基土的不排水抗剪强度较原状土有较大的降低,但随着时间的增长,由于排水作用和上部荷载的压密作用,地基土的强度缓慢增

长,达到甚至超过原状土的抗剪强度。由于碎石桩的抗剪强度较粘性土的抗剪强度高得多,粘性土碎石桩复合地基的抗剪强度主要受桩体抗剪强度和置换率控制。桩体的抗剪强度与碎石大小和密度有关,当天然土很软时,对桩体约束较小,不易形成桩体或桩体密实程度较差。因此,有关规范认为碎石桩处理方法不适用于不排水强度小于 20 kPa 的地基。

20 世纪 90 年代初开始,我国针对不排水强度低于 15 kPa,甚至在 5 kPa 左右的珠江三角洲地区的超软粘土地基,进行了多项工程的振冲碎石桩处理的尝试,并开始进行了现场碎石桩成桩试验和各种力学性质的现场测试,取得了用大粒径(主导粒径 10~15 cm,最大粒径 20 cm)碎石制桩的成功经验。级配较好的大粒径碎石桩桩体内颗粒间咬合力较大,桩外侧的大颗粒碎石不易挤入粘土中,桩体中心部分在振冲力作用下密实度较高。因此,大粒径碎石桩的桩径设计大一些为好(一般 1.0~1.2 m)。同时,软粘土碎石桩复合地基的置换率大一些为宜(一般置换率大于 25%)。在剪应力作用下,复合地基中的剪应力向碎石桩集中。由于碎石桩刚性较大,破坏剪应变较软粘土小,因此,复合地基的破坏先从碎石桩开始。这样,复合地基的抗剪强度主要受碎石桩和置换率控制,软粘土的贡献较小。

2 软粘土地基中大粒径碎石桩的施工

2.1 软粘土中碎石桩施工设备

通过两次软粘土地基(天然土的不排水强度 5~8 kPa)河堤碎石桩加固工程的现场试验,软粘土中的碎石桩设计桩径较大为宜,这是因为较大桩径的碎石桩密度也较大,相应抗剪强度较高。对于设计直径 1.0 m 的碎石桩,用江阴振冲器厂生产的 ZCQ30 型振冲器施工为宜,激振力更高的振冲器形成的桩体密度较低。施工时,采用定位性能好的井架式设备比吊车施工好,后者由于定位精度较差,振冲器导向杆在密实电流较大时经常处于漂浮状态,形成倾斜的孔位和桩体,容易造成串孔现象,造成塌孔和使先前制成的碎石桩变松甚至垮塌。

2.2 碎石桩施工中的制桩工艺

施工过程宜采用较高水压成孔和清孔,振冲器上下往复 2 次或 3 次形成较稳定的桩孔后,将振冲器提出孔外,向孔内沿平面上各向均匀倒碎石,用较低水压制桩。碎石添加过程,要求采取“少吃多餐”的形式,每一段为 50 cm 向上制桩。制桩密实电流控制在 50~55 A 的范围为宜,留振时间以 5~15 s 为宜。对于土层较复杂的情况,控制单位长度碎石桩的进料量最为重要。越软的土层,单位长度的进料量越

大.现场试验表明,粒径 10~15 cm 的主导粒径碎石小于 30%,即粒径小于 10 cm 的碎石较多时,形成的碎石桩需要碎石量较大,同时,碎石桩的抗剪强度较低,桩体较松.粒径 10~15 mm 的主导粒径在 40%~65% 的范围时,碎石桩的密实程度最好,抗剪强度最高.10~15 mm 的碎石含量高于 70% 时,桩体的级配不好,碎石桩的抗剪强度降低.

2.3 软粘土地基中碎石桩的充盈系数

定义每根桩实际碎石用量与用设计碎石桩桩径计算的理论桩体积的比值为充盈系数 K_c .软粘土中的粗粒径碎石桩的充盈系数较大.通过两次现场试验碎石桩的实测资料,充盈系数要求达到 1.4 到 1.5,才能保证实测碎石桩的桩径不小于设计桩径,碎石桩的密度较大,抗剪强度较高.

3 软粘土河堤碎石桩加固工程现场试验

3.1 软粘土河堤碎石桩复合地基受力方式

河堤工程与建筑物地基的受力条件不同,它主要受边坡土体自重产生的向下作用力,发生沿一定滑面的滑动变形,因此,我们重点研究边坡的抗滑稳定问题.控制边坡稳定的主要因素是组成河堤边坡土体的抗剪强度.由于大粒径碎石桩抗剪强度很高,在河堤加固中有广泛的应用前景.现场试验研究的两项河堤碎石桩加固工程,河堤高度 13~15 m,天然河堤边坡度约 1:6,通过用碎石桩加固边坡的方法,设计成 1:3 的边坡,要求加固后的边坡稳定性能满足规范要求.已经建成的天马港码头边坡自 1994 年工作到现在,稳定性非常好.西江水道横坑裁弯取直工程现已开工,试验工作已经结束,试验结果用于施工设计.

3.2 大粒径碎石桩复合地基的现场试验

横坑裁弯工程使用碎石粒径分析成果见表 1.现场制桩试验表明,粗粒含量高的第三组和第四组成桩好.而第一组制桩密实电流达不到 50 A,充盈系数很大,因此认为不适宜制桩.最后确定第四组碎石级配为推荐大粒径碎石桩碎石级配.

表 1 碎石级配分析成果

粒径范围/cm	粒组含量/%			
	第一组	第二组	第三组	第四组
<5	33	26.6	18.1	5.9
5~10	56.1	57.8	64.6	72.8
10~15	10.9	12.2	17.3	18.8
>15	0	3.4	0	2.5

现场大直径的碎石桩和复合地基的直接剪切试验成果见表 2.淤泥土层天然地基的快剪强度指标为 $c=2.0\text{ kPa}$, $\varphi=3.0^\circ$.现场十字板试验得到的不排水强度指标为 $c_u=7.5\sim12\text{ kPa}$,本工程快剪试验时,试样受到的法向应力分别为 50 kPa,100 kPa,150

kPa,200 kPa,偏大,使强度指标可能偏小.由表 2 可见,经过碎石桩处理后复合地基的抗剪强度有大幅度提高.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处理具有良好的效果.现场碎石桩施工时,为使制桩设备能够进场施工,先在地面设置十字型排水沟,然后在地表铺设 50~80 cm 的土质垫层,再进行碎石桩施工.

表 2 大粒径碎石桩单桩和复合地基的抗剪强度

设计桩径/m	实测桩径/m	试样直径/m	设计桩间距/m	试样内置换率/%	抗剪强度指标	
					凝聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
1.0	0.8	1.0	2.0	58.0	12.5	22.9
1.0	0.8	2.0	2.0	14.5	5.7	16.6
1.0	1.1	1.0	2.0	100	29.1	37.2
1.0	1.1	2.0	2.0	27.4	8.2	22.0
1.0	1.1	1.5	1.5	48.8	10.0	24.5

横坑裁弯取直工程碎石桩现场载荷试验成果见表 3.表 3 中天然地基承载力是在试验场地附近现场实测的结果.由表 3 可见,碎石桩复合地基承载力也有较大提高.因此,大粒径碎石桩对于处理软粘土地基,以提高地基承载力也是一种好的方法.事实上,我国在高等级公路建设中,已经引入了大粒径碎石桩地基处理方法.承载力设计主要依靠现场试验获得.

表 3 天然地基和大粒径碎石桩复合地基承载力

项 目	实测桩径/m	桩间距/m	承载板直径/m	实测极限荷载/kN	容许承载力/kPa		变形模量/kPa
					$S/b=0.5\%$	$k=2$	
天然地基			1.0	49	12.5	31.2	190
单 桩	1.1	2.0	1.0	360	357	229	6250
复合地基	1.1	1.5	1.5	440	114	124	1506
复合地基	1.1	2.0	2.0	550	105	88	1329

软粘土用大粒径碎石桩处理后,地基土变形特性发生了明显变化.在外力作用下,天然地基表现出在极小的荷载作用时开始出现塑性变形,荷载较大时,出现塑性流动,产生大的沉降.大粒径碎石桩复合地基在较低的外力作用时,主要由碎石桩承担外载,沉降量很小.荷载达到极限值附近时,变形才开始大量增加.碎石桩出现刺入破坏或鼓状破坏的破坏型式.

参考文献：

[1] GBJ202-83 地基与基础工程施工及验收规范[S].
[2] 叶书麟.地基处理工程实例应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1998.110~146.
[3] 王保田.碎石桩复合地基原位试验研究[A].廖济川.第三界华东地区岩土力学学术讨论会论文集[C].武汉:华中理工大学出版社,1995.81~87.
[4] 《工程地质手册》编写委员会.工程地质手册[M].第三版.北京:中国建筑工业出版社,1992.877~880.
[5] Seed H B et al. Dynamic analysis of the slide in the lower San Fernando Dam during the earthquake of Ferury 9, 1971[J]. Proc ASCE, 1975, 11(GT9): 870~879.

(收稿日期 2000-01-08 编辑 熊水斌)