



振动法加固松软土地基能力分析

张广彪^{1,2}, 赵增欣², 张晓红², 臧成新^{1,2}

(1. 中电建振冲建设工程股份有限公司, 北京 100102; 2. 北京振冲工程机械有限公司, 北京 101118)

摘要: 针对松散砂土、粉土、黏性土等软土地基, 研究提高地基承载能力和减少沉降的措施。振冲挤密法适用于松散砂土层; 振冲碎石桩适用于处理粉土和一般黏性土及软黏土(淤泥、淤泥质土); 振冲粉喷碎石桩适用于粉土和黏性土层(不排水抗剪强度 $c_u > 15 \text{ kPa}$)。介绍振冲粉喷碎石桩的制备材料配合比, 通过试验得到立方体抗压强度, 在施工中可采用干法底部出料工艺。结果表明, 振冲粉喷碎石桩较振冲碎石桩在同等设计条件下可提高地基承载力约 1.3 倍, 并减少地基沉降, 具有广阔的市场前景。

关键词: 振冲挤密法; 适用土层; 振冲粉喷碎石桩; 干法底部出料工艺

中图分类号: TU 472; U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0205-05

Ability of strengthening soft soil foundation by vibroflotation method

ZHANG Guangbiao^{1,2}, ZHAO Zengxin², ZHANG Xiaohong², ZANG Chengxin^{1,2}

(1. Power China Vibroflotation Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China;

2. Beijing Vibroflotation Engineering Machinery Co., Ltd., Beijing 101118, China)

Abstract: For soft soil foundation such as loose sand, silt and clay, we study the measures to improve the bearing capacity and reduce the settlement. The usable soil layer of vibro-compaction method is loose sand. The vibro-replacement stone column method is used to treat silt, general clay and soft clay (silt, silty soil). The usable soil layers of vibro-powder sprayed stone column are silt and clays (the undrained shear strength $c_u > 15 \text{ kPa}$). We introduce the material mix ratio of vibro-powder sprayed stone column, obtain the cube compressive strength through test, and use dry bottom discharging technology in construction. The results show that compared with vibro-replacement stone column, vibro-powder sprayed stone column can increase the bearing capacity of the foundation by about 1.3 times and reduce the settlement of the foundation, which has a broad market prospect.

Keywords: vibro-compaction method; applicable soil layer; vibro-powder sprayed stone column; dry bottom discharge process

目前国内外均在填海造地, 拓展空间, 开发港口建设, 推动经贸发展。在这样的需求下, 满足我国及国外沿海等经济发展较迅速地区大规模海(陆)相软黏土与人工吹填砂质地基加固处理工程的需要成为重点研发领域^[1]。因此可以确定在松散砂土及黏性土(含水率 $\omega > \omega_L$, 孔隙比 $e \geq 1.0$)的地基加固中, 振冲施工有很大的应用

空间。

振冲法地基处理技术在松散砂土、粉土、粉质黏土、素填土等各类软土地基中^[2]得到了广泛的应用。

在地震地面运动过程中, 饱和砂性土孔隙水压力增加引起的抗剪强度或刚度降低及明显的永久性位移, 甚至使土的有效应力趋近于零, 应看

作是液化。采用振冲挤密法或振冲碎石桩等振冲法可加固地基^[3]，消除地基液化引起的不利影响如地面震陷、喷砂冒水^[4]。

在地震震动作用下，饱和砂土发生液化必备2个条件：1)振动强度足以使土体结构破坏；2)土体结构破坏后，振动孔隙水压力随应力循环次数的增加而逐渐上升，其大小最终足以使饱和砂土出现局部或全部消失抗剪能力。

1 振冲挤密法处理液化

振冲挤密法适用的土类一般为无黏聚性的砂类土及碎(卵)石土，黏粒含量(粒径小于0.06 mm)应控制在10%以下。振冲挤密法处理后的相对密实度相同的砂土地基，其抗液化能力显著提高。振冲挤密法常用水平向振动振冲器，依靠电机带动纵向布置的偏心块产生水平向振动力作用于土体。

振冲器筒体工作时的振动加速度可以达到10g以上。对于松散砂土地基的预振效果极为显著，起到了良好的预振效应。

30 kW 振冲器在距振冲器中心1.0 m以内的单孔挤密效果最好；群孔振冲比单孔振冲的挤密效果更好。

振冲挤密法可分为填料振冲挤密法和无填料振冲挤密法，振冲桩(点)基本布置方法一般为三角形、网格形两种形式。振冲器按照驱动方式的不同可分为电动振冲器和液压振冲器。电动振冲器较液压振冲器应用广泛。液压振冲器具有高频、变频的机械特性，因此在适用性上好于电动振冲器。液压振冲器具有较强的穿透能力，采取加大频率的措施，在原状土硬度大、土层结构组成复杂的软基处理中，效果较明显。两者对比见表1。

表1 电动振冲器与液压振冲器对比

振冲器类型	驱动方式	结构	加工制造	转速/(r·min ⁻¹)	频率/Hz	设备投入	施工人员体感
液压振冲器	液压	结构简单，内部只有液压发动机	较简单，只需要安装液压发动机	0~3 500	0~58.3(可调)	较高	振动影响小
电动振冲器	电力	结构复杂，需要考虑冷却、绝缘等	较复杂，电机需要水套冷却	1 500	50	较高	振动影响大
振冲器类型	使用方法	操作控制	激振力		应用地区	适用地层	适用性
液压振冲器	工作时变转速、变频率	控制压力	随着转速的提高而增大，从而增强振冲器对土层的穿透力		国外	一种规格可适用于多种地质环境，复合土层	与多种工程机械配合使用
电动振冲器	工作时定转速，用可变频电机	控制电流	转速恒定，激振力为定值		国内	不同规格对应不同土层	目前需要有独立的电源接口

2 振冲碎石桩

振冲碎石桩是指通过振冲器的水平振动和高压水冲(气冲)的共同作用造孔，向孔内填碎石或其他粗粒料后形成加强桩体，此加强桩体与原地基土形成人工复合地基后提高原地基的承载力和抗变形能力^[5]。单桩单位截面积承载力一般为600 kPa。振冲碎石桩有较强的透水性能，广泛作为排水减压抗液化的措施^[6]。

地震时剪切波由下卧岩土层向上传播，并在土体中引起交变应力，从而产生振动孔隙水压力，这是饱和的砂土或粉土液化的主要原因^[7]。振冲碎石

桩柱体具有高渗透性(渗透系数k约为0.1 cm/s)，是周边土体数百倍甚至数千倍，为桩间土地震时超孔隙水压力的消散提供了排水通道，加速地震超孔隙水压力的消散^[8]。

振冲碎石桩按照施工工艺分为湿法孔口填料、干法底喂料工艺^[9]。东帝汶Tibar港工程位于帝汶岛^[10]。根据现场地勘报告揭露，码头后方回填陆域地基处理范围内为绞吸吹填层，初始状态为松散-中密的珊瑚礁砂砾层，原地层③为局部中密状态珊瑚礁石砂砾层。工程采用底部出料振冲器(图1)，为正三角形布桩。



图1 底部出料法施工的东帝汶 Tibar 港工程现场

3 振冲粉喷碎石桩

振冲粉喷碎石桩是振冲置换法的一种桩类型,它是采用振冲器在地面造孔达到设定深度,振冲器下料管中的填充料(碎石、水泥等固化剂)从下端的下料管口落入孔中,并将该设定长度的桩孔中的填充料密实成桩,从而形成由增强体与原地基土组成的复合地基。振冲粉喷碎石桩类似于不加筋的混凝土桩,一般忽略它对周围土壤性质的改进及其潜在的优点。

振冲粉喷碎石桩适用于黏粒含量大于10%的粉土、黏性土(不排水抗剪强度 $c_u > 15 \text{ kPa}$)等地基。振冲粉喷碎石桩的工作负荷范围为900~1 200 kPa,在陆域和近海岸的桩深均可达25 m。

振冲粉喷碎石桩是类似于一系列相连通的孔隙和实体混凝土部分骨架组成的具有透水性的多孔结构的混凝土,在施工中主要靠包裹在集料表面的胶结材料将集料颗粒胶结在一起,碎石硬结后具有整体性、水稳定性和较高的强度。

振冲粉喷碎石桩与振冲碎石桩对比,具有以下不同:1)振冲粉喷碎石桩中包括水泥等具有黏结强度的材料;2)振冲碎石桩按散体材料增强体复合地基计算地基承载力,而振冲粉喷碎石桩按有黏结强度增强体复合地基计算地基承载力。

振冲粉喷碎石桩结合粉喷工艺后使粉喷材料与集料充分结合形成整体的单桩,以提高桩基的单桩承载力和压缩模量,减少单位面积内的制桩

数量,减少刚性制桩的成本,增加制桩施工的经济效益。

3.1 试验

3.1.1 原材料

采用具有良好级配的碎石,粒径控制在20~50 mm,含泥量不大于5%,堆积密度为 1.65 t/m^3 。采用强度等级不低于42.5级的硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥。拌合用水应符合现行行业标准的规定。

制作边长300 mm立方体试块后进行标准养护,1#试块的强度等级为C10,2#试块的强度等级为C5,见表2。制作试块的过程为:1)按照强度要求,分别称取一定质量的材料;2)搅拌机中先投放石子,添加水后启动;3)搅拌机转动1~2 min后再添加水泥;4)材料投放完成后搅拌3~4 min,材料搅拌最佳状态为表面有光泽且无浆体流出,见图2。

表2 边长300 mm立方体试块的材料用量

试块	强度等级	水泥/kg	石子/kg	水/kg
1#	C10	8.08	44.56	3.52
2#	C5	4.04	44.56	1.76



图2 碎石集料拌合物

3.1.2 主要技术参数

振冲碎石桩的桩身单位截面积承载力约为600 kPa;相比较C5的振冲粉喷碎石桩(桩身单位截面积承载力约为5 MPa),单桩单位截面积承载力提高约9倍。复合地基承载力提高近3倍。

振冲碎石桩为散体材料复合地基增强体,可提高原桩间土压缩模量 ζ 倍:

$$\zeta = 1 + m(n-1) \quad (1)$$

式中: m 为面积置换率; n 为桩土应力比。相比较 C10 的振冲粉喷碎石桩(弹性模量约 20 GPa), 振冲碎石桩提高原桩间土压缩模量较大。

振冲碎石桩体的渗透系数 k 为 0.1 cm/s 左右; 振冲粉喷碎石桩的桩体渗透系数控制在 0.1 cm/s 左右, 基本保持不变。

拌合物的塌落度在 5~50 mm; 初凝时间不少于 2 h; 包裹均匀, 手攥成团, 有金属光泽; 抗冻融循环一般不低于 100 次。

3.1.3 试验结果

对振冲粉喷碎石桩的 1#、2#试块进行单轴抗压强度试验, 试验仪器为电液伺服万能试验机 UH-F1000KNX, 见图 3。设定加载速度为 20.25 kN/s, 1#试块的最大荷载为 1 153.2 kN, 则强度为 12.8 MPa; 2#试块的最大荷载为 521.9 kN, 则强度为 5.8 MPa。1#和 2#试块的抗压试验曲线见图 4, 试块的破坏基本符合规律。



图 3 碎石集料拌合物 28 d 龄期的试块抗压强度试验

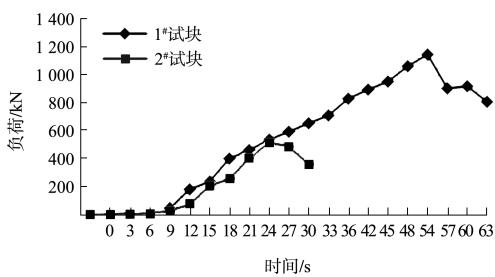


图 4 1#与 2#试块的单轴抗压强度试验曲线

3.2 复合地基承载力计算

3.2.1 计算依据

复合地基承载力按《建筑地基处理技术规范》的第 7 章内容进行计算。

对有黏结强度增强体复合地基承载力特征值按下式计算:

$$f_{spk} = \lambda m \cdot \frac{R_a}{A_p} + \beta(1-m)f_{sk} \quad (2)$$

式中: λ 为单桩承载力发挥系数, 可按地区经验取值; m 为面积置换率; A_p 为桩的截面积, m^2 ; β 为桩间土承载力发挥系数, 可按地区经验取值; f_{sk} 为处理后桩间土承载力特征值, kPa; R_a 为增强体单桩竖向承载力特征值, kN, 可按下式计算:

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n (q_{si} l_{pi}) + \alpha_p q_p A_p \quad (3)$$

式中: u_p 为桩的周长, m; q_{si} 为桩周第 i 层土的侧阻力特征值, kPa, 可按地区经验确定; l_{pi} 为桩长范围内第 i 层土的厚度, m; α_p 为桩端端阻力发挥系数, 应按地区经验确定; q_p 为桩端端阻力特征值, kPa, 可按地区经验确定, 对于振冲粉喷碎石桩可取未经修正的桩端地基土承载力特征值。

有黏结强度复合地基增强体桩身强度应满足 $f_{eu} \geq 4\lambda R_a / A_p$, f_{eu} 为边长 150 mm 立方体的桩体试块标准养护 28 d 的抗压强度平均值, kPa, 本文采用边长 300 mm 立方体试块, 应乘以相应的转换系数。

3.2.2 实例计算

桩径为 1 m, 桩间距 2 m, 桩间土承载力为 200 kPa, 计算中采用的桩侧阻力为 20 kPa, 桩端阻力为 600 kPa, 桩长为 6 m。

复合地基承载力计算中: 置换率为 0.227, 单桩承载力特征值为 1 020 kN, 桩端承载力的计算结果为 300 kPa, 是桩侧承载力(150 kPa)的 2 倍。复合地基承载力为 450 kPa。

振冲粉喷桩的桩体试块标准养护 28 d 的立方体抗压强度平均值为 5 MPa。

3.2.3 方案对比分析

在相同条件下, 振冲粉喷桩的复合地基和振冲碎石桩的复合地基在不同桩间距和桩径下的承载力计算结果见表3。

表3 振冲粉喷碎石桩复合地基和振冲碎石桩复合地基的承载力计算结果

复合地基	布置方案 (正三角形)	桩直径/ mm	置换率/ m	桩土 应力	单桩 承载力/ kN	复合地基 承载力/ kPa
振冲粉喷 碎石桩	桩间距 2.0 m	1 000	0.227	—	980	438
		1 000	0.145	—	980	352
		1 100	0.176	—	1 187	384
	桩间距 2.5 m	1 200	0.209	—	1 413	419
		1 000	0.227	4	—	336
		1 000	0.145	4	—	287
振冲 碎石桩	桩间距 2.0 m	1 000	0.145	3	—	258
		1 100	0.176	4	—	305
		1 100	0.176	3	—	270
	桩间距 2.5 m	1 200	0.209	4	—	325
		1 200	0.209	—	—	—
		1 200	0.209	—	—	—

可以看出, 振冲粉喷碎石桩较振冲碎石桩可大幅提高地基承载力, 提高系数的影响因素为桩直径、桩土应力比和桩间距, 提高系数的数值约为1.3。地基经过振冲粉喷碎石桩处理后较振冲碎石桩能降低地基沉降量, 具有广阔的市场应用前景。

振冲粉喷碎石桩的适用土层和方法限制条件为^[11]: 在浇筑和固化时, 桩身需要侧面土体提供支撑。对于具有触变性的土这点必须严格限制, 因为这类土在振冲施工时容易暂时失去强度; 对于具有蠕变性的土应格外养护, 因为土体的蠕变性将增加桩身的负摩擦力和额外的垂直力。另外, 相邻桩在施工时对桩身也有影响, 应限制最小桩间距和土体强度最小值。

4 结论

1) 振冲挤密法对松散中粗砂的挤密具有很好的效果。

2) 振冲粉喷碎石桩在降低孔隙水压力、提高土体的抗液化能力方面具有很强的优势, 应加大其在工程中的应用。

3) 随着底部出料法在东帝汶 Tibar 港工程的成功应用, 加大振冲粉喷碎石桩可行性研究的投入, 进一步推广其应用。

参考文献:

- [1] 于洪治, 张志伟, 王文鹏, 等. 水利水电工程施工技术全书: 第一卷 地基与基础 第五册 振冲工程 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [2] 北京振冲工程股份有限公司. 水电水利工程振冲法地基处理技术规范: DL/T 5214—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [3] 林宗元. 岩土工程治理手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [4] 常士骠, 张苏民. 工程地质手册 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [5] 何广讷. 振冲碎石桩复合地基 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [6] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [7] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [8] 张广彪, 卢鹏云, 朱晓勇. 底部出料振冲法在地基处理工程中的应用 [J]. 地基处理, 2020, 2(3): 245-254.
- [9] 卢鹏云, 张广彪, 贤成新. 实时过程数据在振冲碎石桩全过程质量控制中的应用 [J]. 地基处理, 2020, 2(5): 404-413.
- [10] 伍琪琳, 王四根, 林佑高. 基于排水抗液化理论的碎石桩在某港口工程的应用 [J]. 水运工程, 2022 (1): 198-203.
- [11] KIRSCH K, KIRSCH F. Ground improvement by deep vibratory methods [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

(本文编辑 王璁)