

考虑桩端土体加固效果的挤密砂石桩 间距计算方法

应宏伟¹, 杨晓刚^{1, 2}, 谢康和¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 杭州市建筑企业管理站, 浙江 杭州 310015)

摘要: 若干砂性土地上采用振动挤密砂石桩处理的工程实测资料表明, 沉桩施工对桩端以下一定深度土体的加固效果也相当明显。考虑此影响, 提出桩端加固影响深度的概念, 并基于土颗粒体积在地基处理前后保持不变的前提对振动挤密砂石桩桩间距的理论计算公式进行推导。在已有研究的基础上, 进一步提出同时考虑细颗粒含量影响, 并用标准贯入击数表达的桩间距实用计算式, 通过在实际工程的应用及与现有计算方法的比较, 验证该计算方法的合理性。

关键词: 桩基工程; 挤密砂石桩; 桩间距; 砂性土地基; 桩端加固影响深度; 标准贯入击数; 细颗粒含量

中图分类号: TU 472.3

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 4248 - 06

A METHOD TO CALCULATE SAND-STONE COMPACTION PILE SPACING CONSIDERING REINFORCEMENT EFFECTS OF SOIL AT PILE TIP

YING Hongwei¹, YANG Xiaogang^{1, 2}, XIE Kanghe¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2. Building Industry Administrative Station of Hangzhou, Hangzhou, Zhejiang 310015, China)

Abstract: In order to put forward a theoretical formula to calculate the spacing of the sand-stone compaction piles on sandy ground, some previous engineering practices and field tests on the composite foundation with sand-stone compaction piles are studied. As the reinforcement effects of soil at the pile tip and around the pile shaft are noticed. A new concept, reinforcement depth at the pile tip, is put forward. Based on the constant volume of soil grain before and after the foundation reinforcement, a new method is theoretically investigated to estimate the piles spacing taking both the lateral and vertical compaction and vibration effects at the pile tip into account. The method correlated the calculation of pile spacing with standard penetration test(SPT) blow counts as well as the fine-grained content to facilitate its use in engineering practice and design. By comparing the results of a case gained by previous and present methods respectively, the reasonability of the method is testified.

Key words: pile foundation engineering; sand-stone compaction pile; pile spacing; sandy ground; reinforcement depth below pile tip; standard penetration test(SPT) blow count; fine-grained content

1 引言

砂石桩法于 19 世纪 30 年代起源于欧洲, 发展

到今天已成为一种常用的地基处理方法, 适用于处理松散砂土、粉土、黏性土、杂填土等地基。当采用振动沉管法施工来处理可液化地基时, 其具有振密、挤密、抗液化等作用, 而且施工简单、速度快、

收稿日期: 2005 - 10 - 31; **修回日期:** 2006 - 01 - 18

作者简介: 应宏伟(1971 -), 男, 博士, 1992 年毕业于浙江大学建筑工程学院岩土工程专业, 现任副教授、硕士生导师, 主要从事软黏土力学与地基处理、土工数值分析、基坑工程方面的教学与研究工作。E-mail: ice898@zju.edu.cn, yinghw@vip.sina.com

成本低,在处理松散砂性土(包括粉细砂土及部分粉土)地基方面尤其得到了广泛的应用。砂石桩处理效果受地层、土质、施工机械、施工方法、砂石桩间距、填砂石的性质和数量等多种因素影响,其中砂石桩间距的确定就是一个重要的环节,直接影响到加固地基的效果。目前国内外大多数研究成果是针对软土中设置挤密砂石桩所引起的土体应力和土中孔隙水压力的变化而展开的^[1],或者是以研究砂石桩对土体抗液化效果为主^[2],有关砂石桩桩距确定的相关文献则较为少见。

目前砂石桩间距的确定多以经验为主,一般控制在3.0~4.5倍桩径。《建筑地基处理技术规范》(JGJ 79-2002)^[3](以下简称为“地基处理规范”)假定地层均匀挤密,根据挤密前后土的固体颗粒体积不变,并引入考虑振动下沉密实作用的修正系数,提出了一个桩间距的理论估算公式。张吉占^[4]通过对多组粉细砂土的 e_{max} 和 e_{min} 的实测值的相关分析,归一化并假定加固后地面平均下沉量与砂石桩桩长之比 $h/H=0.03$,得到了砂石桩间距经验公式,该公式同样考虑了由于振密作用而引起的地面下沉。黎运葵^[5]根据土体平衡条件提出了考虑地面沉降和砂土流失的振冲桩间距的计算公式,砂土流失比 $\alpha=0$ 时,该式也可用于计算振动挤密砂石桩间距。以上3种方法的不足之处在于均忽略了沉桩施工对桩端土体的加固作用。

2 桩端加固影响深度

图1为工程A——广东茂名石油化工公司大型油罐地基采用振动挤密砂石桩处理前和处理后15d的地层标准贯入试验结果对比^[6]。该工程地表至18m深度范围内为松散~中密状态的粉砂、细砂或中砂,18m以下为砂质黏性土(残积土),具体土层分布和土的物理力学性质见后文,砂石桩设计桩长15m。从图1可见,桩端以下地基土的标准贯入击数仍有提高,而18m深度黏性土层顶面处标准贯入击数基本不变,说明沉桩施工对桩端以下的影响深度可达3m。

图2为工程B——浙江绍兴一油罐地基采用振动挤密砂石桩处理前、后15d的地层标准贯入试验结果对比。该工程地表至20m深度范围内,自上而下土层依次为稍密状态的砂质粉土、中密状态的粉

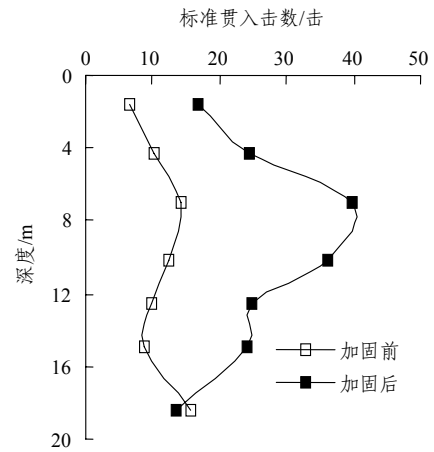


图1 工程A地基加固前、后的标准贯入试验结果比较
Fig.1 Comparison of results of standard penetration test(SPT) before and after reinforcement of foundation in project A

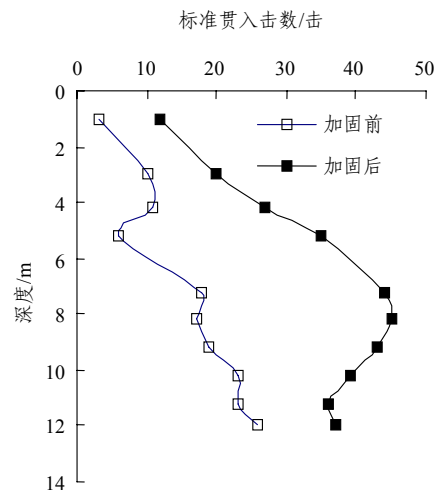


图2 工程B地基加固前后的标准贯入试验结果比较
Fig.2 Comparison of results of SPT before and after reinforcement of foundation in project B

砂夹砂质粉土,以下为淤泥质黏土和黏土,砂石桩设计桩长为9m,主要处理稍密状态的砂质粉土层。由于桩端以下为厚约10m的粉砂夹砂质粉土,从图2可见,加固后桩端以下3m处的标准贯入击数提高仍然比较明显(桩端3m以下未做标准贯入试验对比)。

从上述2个地基处理工程加固前、后的现场标准贯入试验对比结果可以发现,对于深厚的砂性土或粉土地基,振动挤密法沉桩施工对地基的加固效果不仅反映在桩长范围以内,在桩端以下一定深度内也相当明显,其桩端以下的加固机制可以理解为竖向挤密和振密的综合作用。这里定义该深度为砂石桩桩端加固显著影响深度(简称桩端加固影响深

度), 以 h_1 来表示, 即在 h_1 至桩顶之间, 地基被有效加固。工程 A 由于下卧黏性土层层顶距离桩端较近, 桩端加固影响深度大致可取 2.0 m, 与桩长之比为 2/15; 而工程 B 桩端以下为厚度较大的粉砂, 容易被挤密和振密, 其桩端加固影响深度与桩长之比大于 1/3。可见, h_1 的大小不仅受桩长范围内的土质、施工机械、施工方法等因素影响, 还与桩端以下砂性土层的厚度、性质密切相关, 要精确计算难度很大, 可根据类似工程的标准贯入试验等实测资料确定。

对于设计桩长以下仍存在松散砂土或粉土的情况, 在确定砂石桩的合理间距时, 不仅要考虑桩周土体的挤密和振密作用, 同时还需考虑桩底以下一定深度范围内的土体加固效果。

3 桩间距理论计算公式

如图 3 所示, 图中 H 为砂石桩桩长, h 为打桩完成后地面平均下沉量, h_1 为桩端加固影响深度。假设土体在加固范围内为均质, 加固前、后的土体孔隙比分别为 e_0, e_1 。

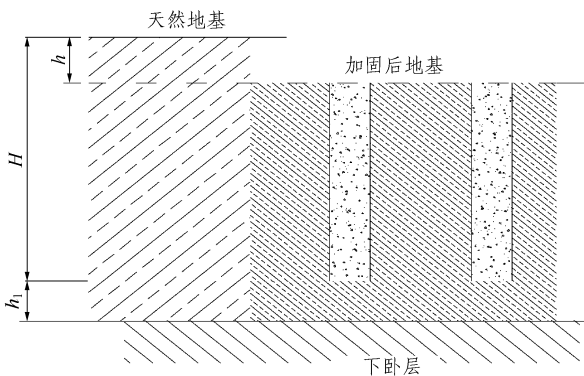


图 3 加固前、后地基剖面对比

Fig.3 Comparison of foundation profiles before and after reinforcement

对于砂石桩平面采用正三角形布置的情况, 单根桩所处理的范围为正六边形(即图 4 中阴影部分), 设 l 为桩中心间距, 加固处理后的土体体积应变为

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \quad (1)$$

单桩处理范围内土体的初始体积 V_0 为

$$V_0 = \frac{\sqrt{3}}{2} l^2 (H + h_1) \quad (2)$$

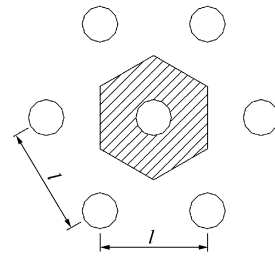


图 4 砂石桩正三角形布置及其影响范围

Fig.4 Regular triangular arrangement of sand-stone compaction piles and its influential range

加固后单桩影响范围内的体积减小值 ΔV 为

$$\Delta V = \varepsilon_v V_0 = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \frac{\sqrt{3}}{2} l^2 (H + h_1) \quad (3)$$

同时, ΔV 又等于砂石桩向侧向挤排土和 $H + h_1$ 深度范围土层在振动作用下发生的竖向振密变形引起的体积减小之和, 即

$$\Delta V = \frac{\pi}{4} d^2 (H - h) + \frac{\sqrt{3}}{2} l^2 h \quad (4)$$

式中: d 为砂石桩桩径。当打桩后地面下沉时, h 取正值, 反之取负值。

由式(3)和(4)可得

$$l = 0.95d \sqrt{\frac{H - h}{\frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} (H + h_1) - h}} \quad (5)$$

同理, 可得砂石桩平面采用正方形布桩时, 桩间距计算公式:

$$l = 0.89d \sqrt{\frac{H - h}{\frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} (H + h_1) - h}} \quad (6)$$

令式(5)和(6)中的 $h_1 = 0$, 则桩间距理论计算式与张吉占^[4]给出的理论公式相同; 如同时令 $h_1 = 0$ 和 $h = 0$, 则式(5)和(6)退回到相关规范^[5]不考虑振动下沉密实作用(修正系数 $\xi = 1.0$)时的计算式。因此, 地基处理规范^[3]方法和张吉占^[4]给出的公式都可视为本文理论公式的特例。

4 用标准贯入击数相关表达的桩间距实用计算式

式(5)和(6)中地基加固前的初始孔隙比 e_0 一般取原状土样通过试验确定, 但由于砂土原状取样困难, e_0 和加固后地基要求达到的孔隙比 e_1 一般可采

用下式计算:

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= e_{\max} - D_{r0}(e_{\max} - e_{\min}) \\ e_1 &= e_{\max} - D_{r1}(e_{\max} - e_{\min}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: e_{\max} , e_{\min} 分别为最大、最小孔隙比, 即砂土分别处于最松散和最密实状态的孔隙比; D_{r0} 为处理前地基的相对密实度; D_{r1} 为处理后地基的相对密实度, 一般取值为 0.70~0.85。

e_{\max} 和 e_{\min} 可以通过土工试验得到, 如无可靠的试验数据时, 也可以根据砂土中小于 0.074 mm 的细颗粒含量 F_c 由经验式^[7]得到:

$$\left. \begin{aligned} e_{\max} &= 0.02F_c + 1.0 \\ e_{\min} &= 0.012F_c + 0.6 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

实际工程中直接按式(7)仍较难确定 e_0 , e_1 , 我国规范^[8]判断地基液化与否及液化严重程度, 是根据地基临界标准贯入击数 N_{cr} 而不是根据土体孔隙比, 因此, 为便于与规范液化判别方法统一, 需借助相对密实度 D_r 与标准贯入击数 N 的关系, 通过标准贯入击数 N 进行换算来得到 e_0 , e_1 值。

本文采用国内应用较多的由铁道第一勘察设计院提出的 D_r 与我国标准贯入试验设备实测的标准贯入击数 N 的关系式^[9]:

$$D_r = \sqrt{N/(52.2\sigma'_v)} \quad (9)$$

式中: σ'_v 为土层的有效上覆压力。

国内外相关研究指出, 砂土中细颗粒含量 F_c 的大小对砂石桩的挤密效应有显著影响。水野恭男等^[10]用加固效果下降率 β 定量描述细颗粒对处理效果的影响:

$$\beta = \frac{\Delta N}{\Delta N'} = \frac{N_1 - N_0}{N'_1 - N_0} \quad (10)$$

式中: N_0 为原地基的实测标准贯入击数, N_1 为加固后不考虑细颗粒影响的桩间土标准贯入击数, N'_1 为加固后考虑细颗粒影响的桩间土标准贯入击数, ΔN 为加固后不考虑细颗粒影响的标准贯入击数增量, $\Delta N'$ 为加固后考虑细颗粒影响的标准贯入击数增量。

由式(10)可得

$$N'_1 = (N_1 - N_0)/\beta + N_0 \quad (11)$$

水野恭男等^[10]同时经过大量的实测数据的统计分析得到了砂土中粒径小于 0.074 mm 的细粒含量 F_c 与加固效果下降率 β 的相关关系:

$$\beta = 1.05 - 0.511gF_c \quad (12)$$

将式(9)和(11)代入式(7)可得处理前、后土的孔隙比 e_0 和 e_1 :

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= e_{\max} - \sqrt{\frac{N_0}{52.2\sigma'_v}}(e_{\max} - e_{\min}) \\ e_1 &= e_{\max} - \sqrt{\frac{N'_1}{52.2\sigma'_v}}(e_{\max} - e_{\min}) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

分别将上式代入式(5)和(6), 即可得到既可同时考虑桩侧和桩端以下挤密、振密作用, 又能反映细颗粒含量影响, 并用标准贯入击数 N 表达的砂石桩间距的实用表达式:

$$l = kd \cdot$$

$$\sqrt{\frac{H-h}{(\sqrt{N'_1} - \sqrt{N_0})(e_{\max} - e_{\min})}} \cdot \frac{(H+h_1) - h}{(1+e_{\max})\sqrt{52.2\sigma'_v} - \sqrt{N_0}(e_{\max} - e_{\min})} \quad (14)$$

式中: k 为参数, 对于正方形布桩取 0.89, 对于三角形布桩取 0.95, 其余符号意义同前。

5 工程应用

5.1 工程概况

中国石化茂名石油化工公司北山岭罐区位于广东省茂名市电白县爵山镇, 场地南面临海, 新建了 2 个目前国内容量最大的油罐(13[#]和 14[#]油罐, 罐容均为 125 000 m³)。场地岩土工程条件属中等偏复杂类型, 勘察报告提供的各土层的物理力学指标见表 1, 其中地基浅部中砂、细砂层大多呈松散~稍密状, 局部有轻微液化趋势。勘察期间地下水位在地面以下约 7.0 m。经技术经济比较后, 采用振动挤密砂石桩法对地基进行处理, 形成复合地基, 以承担油罐荷载。

5.2 桩间距计算

挤密砂石桩桩径为 0.48 m, 平面采用正三角形布置, 在油罐环墙以内范围桩长采用 15.0 m, 环墙以外扩大加固范围, 设 5 排砂石桩, 桩长 10.0 m。桩间距的计算采用 4 种方法对比, 即地基处理规范^[3]算法(方法 1)、张吉占^[4]考虑施工过程中土层竖向密实作用的半经验公式(方法 2)、黎运葵^[5]考虑多因素的挤密砂石桩间距公式(方法 3)及本文提出的同时考虑桩侧和桩端挤密、振密作用的桩间距实用计算式(式(14))。

表 1 各土层物理力学指标
Table 1 Physico-mechanical parameters of each soil layer

层号	名称	状态	平均厚度 /m	γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	w /%	E_s /MPa	F_c /%	d_{10} /mm	N_0 /击
①	中砂	松散	3.1	17.1	5.3	29.40	4.2	0.171	6.55
②	中砂细砂	松散~稍密	2.5	18.7	12.5	23.30	10.9	0.071	10.10
③	细砂中砂	稍密~中密	2.9	18.7	13.8	24.00	12.0	0.055	14.30
④	细砂	稍密~中密	3.3	19.4	18.8	23.70	12.7	0.057	12.50
⑤	粉砂	稍密	2.6	19.5	23.1	18.30	26.9	0.018	9.75
⑥	粉砂	稍密~松散	3.0	19.4	23.6	12.50	27.6	0.014	8.60
⑦	砂质黏性土	硬塑~坚硬	11.0	19.2	23.1	4.54	46.3	0.005	15.60
⑧	花岗岩	强风化	5.2						
⑨	花岗岩	中~微风化	0.7						

其中打桩完成后地面平均下沉量与桩长之比取 $h/H = 0.02$; 参考附近类似工程的地基处理前、后实测标准贯入击数对比及图 1, 取桩端加固影响深度 $h_1 = 2.0 \text{ m}$, 砂土的最大、最小孔隙比根据各层土的细颗粒含量由式(8)计算得到, 地基处理后要求不考虑细粒土影响的标准贯入击数 N_1 达到 25 击, 计算过程采用考虑细颗粒影响的 N_1' 。

各个土层对应的桩间距计算结果见表 2。由方法 1~3 及本文方法得到的桩间距平均值分别为 1.64, 1.46, 1.65 和 1.57 m。综合考虑地基初始条件等因素后, 对 13#油罐地基采用 1.60 m 的设计桩间距进行挤密砂石桩施工。

表 2 桩间距计算结果
Table 2 Calculated results of pile spacing

层号	状态	N_0 /击	N_1 /击	桩间距/m		
				方法 1	方法 2	方法 3
①	松散	6.55	20	1.25	1.03	1.26
②	松散~稍密	10.10	25	1.47	1.27	1.48
③	稍密~中密	14.30	25	2.13	1.88	2.15
④	稍密~中密	12.50	25	2.08	1.85	2.10
⑤	稍密	9.75	25	1.46	1.36	1.48
⑥	稍密~松散	8.60	25	1.43	1.34	1.45

5.3 应用效果

罐体建造完成后, 为了研究挤密砂石桩复合地基在油罐实际荷载作用下的工作情况, 在基础施工和充水试压期间对 13#油罐地基基础进行了现场观

测^[6]。

在最大试压荷载(试水高度 20.2 m)下罐体边缘环墙各测点的最大沉降值为 75 mm, 罐体周边最大差异沉降仅为 22 mm, 试压荷载卸除后最大回弹量仅为 15 mm。2 个油罐进油投产已近 2 a, 运行状况良好, 说明地基处理是成功的, 也验证了本文提出的砂石桩间距计算方法的合理性。

6 结 论

(1) 对于深厚的砂性土或粉土地基, 振动挤密法沉桩施工对地基的加固效果不仅反映在桩长范围以内, 在桩端以下一定深度也相当明显, 其桩端以下的加固机制可以理解为竖向挤密和振密的综合作用。

(2) 在计算模型中考虑桩端加固效果, 推导得到了砂石桩间距的理论计算公式, 现有方法均为本文方法的特例。

(3) 在前人研究的基础上, 得到了既可同时考虑桩侧和桩端以下挤密、振密作用, 又能反映细颗粒含量影响, 并用标准贯入击数 N 表达的砂石桩间距的实用表达式, 通过实际工程应用, 验证了该实用计算式的合理性。

参考文献(References):

[1] Lee F H, Juneja A, Tan T S. Stress and pore pressure changes due to sand compaction pile installation in soft clay[J]. Geotechnique, 2004, 54(1): 1 - 16.

- [2] Okamura M, Ishihara M, Oshita T. Liquefaction resistance of sand deposit improved with sand compaction piles[J]. Soils and Foundations, 2003, 43(5): 175 - 187.
- [3] 中华人民共和国行业标准编写组. 建筑地基处理技术规范(JGJ79 - 2002)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings(JGJ79 - 2002)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [4] 张吉占. 确定砂基上抗液化振动挤密桩间距的新方法[J]. 工程勘察, 1991, (2): 5 - 9.(Zhang Jizhan. A new method to estimate the spacing of vibro-compaction piles on potentially liquefiable sand foundation[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1991, (2): 5 - 9.(in Chinese))
- [5] 黎运菜. 粉细砂地基上振冲桩的填料量和桩距的计算方法[J]. 岩土工程师, 1990, 2(4): 39 - 43.(Li Yunfen. Calculation method of pile spacing and stuffing quantity for vibro-flotation on the silt and fine sand[J]. Geotechnical Engineer, 1990, 2(4): 39 - 43.(in Chinese))
- [6] 应宏伟, 杨晓刚, 卞守中, 等. 大型油罐地基现场试验分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 157 - 161.(Ying Hongwei, Yang Xiaogang, Bian Shouzhong, et al. Analysis of field test on the foundation of a large oil tank[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 157 - 161.(in Chinese))
- [7] 蒋军. 挤密砂石桩复合地基性状分析[硕士学位论文][D]. 杭州: 浙江大学, 1996.(Jiang Jun. Behavior of composite foundation improved by sandstone compaction piles[M. S. Thesis][D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1996.(in Chinese))
- [8] 中华人民共和国国家标准编写组. 建筑抗震设计规范(GB50011 - 2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. Code for Seismic Design of Buildings(GB50011 - 2001)[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.(in Chinese))
- [9] 符圣聪, 江静贝. 两个典型场地的液化和动力反应分析[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(4): 45 - 53.(Fu Shengcong, Jiang Jingbei. Liquefaction and dynamic response analysis at two typical sites[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(4): 45 - 53.(in Chinese))
- [10] 水野恭男, 末松直幹, 奥山一典. 細粒分を含む砂質地盤におけるサンドコンパクションパイル工法の設計法[J]. 土と基礎, 1987, 35(5): 21 - 26.(in Japanese))