

一个振冲碎石桩单桩承载力的经验公式

An empirical formula for bearing capacity of vibro replacement stone column

王剑平¹, 李景林¹, 曹国兴², 金伟光³

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210024; 2. 绍兴污水处理有限公司, 浙江 绍兴 312000; 3. 浙江环宇建设集团有限公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 通过振冲碎石桩单桩静载荷试验与其桩体高压静力触探试验的对比, 建立了粉土地基的振冲碎石桩单桩承载力与静力触探锥尖阻力之间的经验公式。经验公式的相关系数为 0.8, 公式可以在工程中试用, 从而简化振冲碎石桩的检测方法。

关键词: 振冲碎石桩; 单桩承载力; 静力触探; 锥尖阻力; 经验公式

中图分类号: TU 472.35 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2002)04-0496-03

作者简介: 王剑平(1958-), 男, 江苏南通人, 南京水利科学研究所高级工程师, 主要从事软土地基处理研究工作。

WANG Jian-ping¹, LI Jing-lin¹, CAO Guo-xing², JIN Wei-guang³

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. Shaoxing Waste Water Treatment Company, Shaoxing 312000, China; 3. Zhejiang HuanYu Construction Company, Shaoxing 312000, China)

Abstract: On the basis of comparing the static loading test of single pile of vibroreplacement stone column and its static cone penetration test, an empirical relation between pile capacity and static point resistance are established. The correlation coefficient of the formula is 0.8. The empirical formula can be tried in practical project to simplify the testing method for vibro replacement stone column.

Key word: vibro replacement stone column; pile capacity; static sounding; static point resistance; empirical formula

1 前言*

振动水冲法是一种处理软弱地基的好方法^[1]。振动水冲法有振动水冲挤密法和振动水冲置换法。前者对地基土进行振冲挤密, 通过提高地基土的密实度来加固地基, 一般用于松散砂土地基的处理; 后者对地基土进行振冲置换, 形成碎石桩或砂桩复合地基, 一般用于粉土地基和粘性土地基的处理, 而且以振冲碎石桩加固地基为多^[2]。振冲碎石桩的质量检测通常有静载荷试验和重型动力触探二种方法, 前者用于检测其承载力, 后者用于检测碎石桩的密实度。静载荷试验需要耗费大量的人力、物力和财力, 试验的时间长, 以至于建设方很难承受; 重型动力触探试验由于试验数据的影响因数多而使测试精度难以满足要求。因此, 人们希望能够有一个简便、实用、经济、可靠的振冲碎石桩测试手段和方法。南京水利科学研究所在这方面进行了许多年的探索, 研制了振冲碎石桩质量检测仪, 并进行了大量的试验研究。笔者通过近年来若干工程试验的实践, 对所得到的试验资料进行整理分析, 提出了一个振冲碎石桩单桩承载力的经验公式, 作为采用简便、实用、经济、可靠的振冲碎石桩测试手段和方法的依据。

2 单桩静载荷试验与高压静力触探试验

为得到振冲碎石桩的承载力指标, 一般进行静载荷试验。静载荷试验分为单桩或多桩的复合地基静载

荷试验和单桩静载荷试验。复合地基静载荷试验直接得到复合地基的承载力; 单桩静载荷试验得到单桩承载力, 然后用复合地基理论计算复合地基的承载力。工程实践中, 用后者居多。

本项研究采用单桩静载荷试验和高压静力触探对比试验的方法, 建立二种试验之间的对应关系, 试图用后者的试验结果推算单桩承载力。

2.1 单桩静载荷试验

单桩静载荷试验采用慢速维持荷载法。加载装置为油压千斤顶, 千斤顶反力为压重平台, 压重 1500 kN。荷载板采用圆形钢压板, 压板直径为设计的桩径。压板沉降采用百分表测量, 在其 2 个正交直径方向对称安置 4 只百分表, 压板沉降量取 4 点的平均沉降量。终止加荷条件为: ①沉降急剧增大, 桩间土被挤出或压板周围出现明显裂缝; ②累计沉降量已大于压板直径的 10%; ③总加载量已为设计要求值的 2 倍以上。承载力基本值的确定依次采用: ①当 $P-S$ 曲线上有明显比例极限时, 取该比例极限所对应的荷载; ②当极限荷载能确定时, 而其值又小于对应比例极限荷载值的 1.5 倍时, 取极限荷载的一半; ③按相对变形值确定, 取沉降 S 等于荷载板宽度 B_c (或直径 d_c) 的 0.015 或 0.02 倍所对应的荷载^[3]。

2.2 高压静力触探试验

高压静力触探试验采用南京水利科学研究所研制

* 收稿日期: 2001-12-03

的 NHRI 型“碎石桩质量检测仪”进行, 高压静力触探仪可以产生很大的贯入压力, 将探杆和探头压入碎石桩中, 其特制的探头外形尺寸与普通的单桥探头一样, 但能够适应致密的碎石介质^[4]。高压静力触探试验的方法与一般静力触探试验的方法相同, 试验可测得碎石桩体不同深度处的锥尖阻力, 即桩身的密实状况。

3 若干试验实例

为了探求单桩承载力与高压静力触探锥尖阻力之间的关系, 笔者结合实际工程进行了 21 组对比试验。试验时先进行高压静力触探试验, 得到锥尖阻力与深度的关系曲线, 然后进行单桩静载荷试验, 得到荷载与压板沉降的关系曲线, 典型的锥尖阻力与深度的关系曲线和静载荷试验曲线如图 1 和图 2。

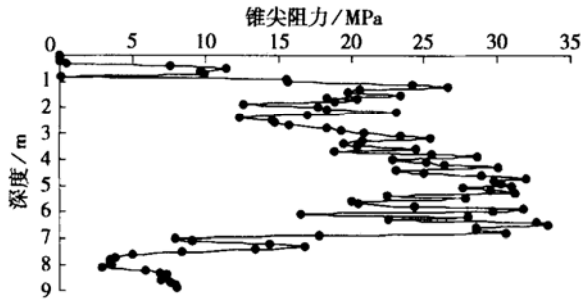


图 1 桩的静力触探曲线
Fig. 1 Curve of static sounding test

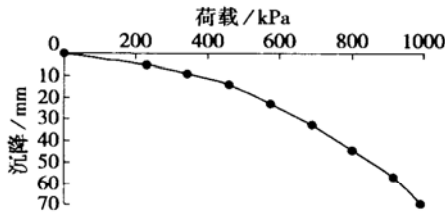


图 2 单桩静载荷试验曲线
Fig. 2 Curve of static loading test of single pile

对比试验的振冲碎石桩采用 75 kW 振冲器施工, 被加固的地基土为粉土。碎石桩的设计桩径为 1.0 m。单桩静载荷试验的压板直径与设计的桩径相同。试验面选择在建筑物基础底面的高程上。采用相对变形法确定单桩承载力, 取沉降等于压板直径的 0.015 倍所对应的荷载为单桩承载力基本值。

高压静力触探试验的锥尖阻力取静载荷试验面以下 3.0 m 范围内的分层平均值, 分层的厚度为 1.0 m。现将 21 组对比试验的资料汇总于表 1。

分析表 1 可知, 振冲碎石桩单桩承载力与压板下 3 m 范围内的静力触探锥尖阻力密切相关, 总的来说, 锥尖阻力与单桩承载力成正比的关系, 不同深度分层的锥尖阻力对单桩承载力的影响是不同的。下面我们将具体分析锥尖阻力与单桩承载力的关系, 并试

图建立二者之间的经验关系式。

表 1 单桩静载试验与高压静力触探试验资料汇总表
Table 1 Summary of static loading test of single pile and static cone penetration test

试验编号	单桩承载力 f_k / kPa	压板下桩体锥尖阻力均值/MPa		
		q_{s1} (0~ 1.0 m)	q_{s2} (1.0~ 2.0 m)	q_{s3} (2.0~ 3.0 m)
1	700	21.9	19.2	16.8
2	400	13.7	10.8	13.5
3	500	16.8	9.9	16.0
4	508	16.7	17.2	17.9
5	300	11.9	10.8	4.5
6	660	20.5	19.8	18.9
7	760	25.0	21.2	20.5
8	420	11.6	7.6	18.9
9	595	16.3	19.3	22.7
10	580	18.8	25.1	10.2
11	565	24.8	14.2	7.9
12	580	19.8	14.9	22.0
13	450	12.6	8.4	13.6
14	485	20.2	17.4	22.9
15	510	21.5	14.9	16.9
16	420	13.1	6.4	11.6
17	525	23.1	11.3	15.3
18	425	30.0	13.7	9.8
19	390	25.9	13.1	9.9
20	219	7.3	4.7	5.0
21	450	13.1	10.1	7.3

4 经验公式的推求

我们将分层锥尖阻力 q_s 用三种方法与单桩承载力 f_k 建立关系, 考察其相关系数。一是压板下第一层桩体锥尖阻力平均值; 二是三层桩体锥尖阻力平均值; 三是三层桩体锥尖阻力加权平均值, 其三层桩体的锥尖阻力平均值 q_{s1} 、 q_{s2} 和 q_{s3} 的权值分别为 h_1/h_1 , $h_2/(h_1 + h_2)$, $h_3/(h_1 + h_2 + h_3)$, 而 h_1 , h_2 及 h_3 均为 1.0 m, 分别为压板下第 1, 2, 3 层的分层厚度, 当 $q_{s1} \geq 2q_{s2}$ 时, 令第一层的权值为 $h_2/(h_1 + h_2)$, 第二层的权值为 h_1/h_1 , 而各层的锥尖阻力平均值不变, 这种权值的设置主要考虑压板的应力扩散和相对不密实层对单桩承载力的影响作用。

假定单桩承载力 f_k 与锥尖阻力 q_s 的关系符合线性方程 $f_k = mq_s + b$, m 和 b 为方程的斜率和截距, 用 $R^2 = 1 - SSE/SST$ 作为一个决定系数, 其中: $SSE = \sum (f_{kj} - \bar{f}_{kj})^2$, $SST = (\sum f_{kj}^2) - (\sum f_{kj})^2/n$, 它说明方程的估计值与实际数据之间的拟合程度, 当 R^2 等于或接近于 1 时, 方程式最可靠。

将三种方法统计的锥尖阻力与单桩承载力的关系绘于图 3、图 4 和图 5。并求出单桩承载力 f_k 与锥尖阻力

q_s 的关系式。三种情况的 R^2 值明显不同, 单桩承载力与压板下 1.0 m 的锥尖阻力平均值的 R^2 值为 0.29, 与压板下 3.0 m 的锥尖阻力平均值的 R^2 值为 0.72, 与压板下 3.0 m 的分层锥尖阻力加权平均值的 R^2 值为 0.8。

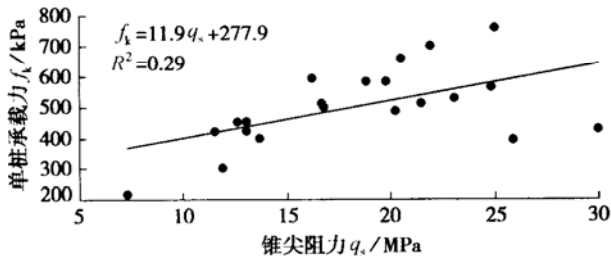


图3 单桩承载力 f_k 与锥尖阻力 q_s (压板下 1 m 平均值) 关系曲线

Fig. 3 Relationship of pile capacity f_k with static point resistance q_s (average values at 1 m below loading plate)

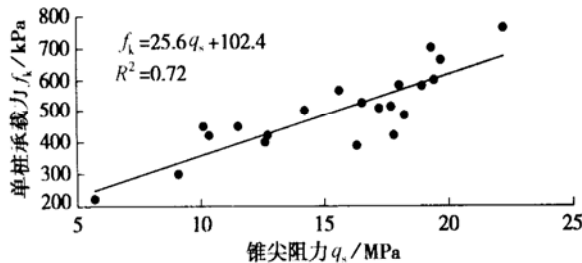


图4 单桩承载力 f_k 与锥尖阻力 q_s (压板下 3 m 分层平均值) 关系曲线

Fig. 4 Relationship of pile capacity f_k with static point resistance q_s (average values at 3 m below loading plate)

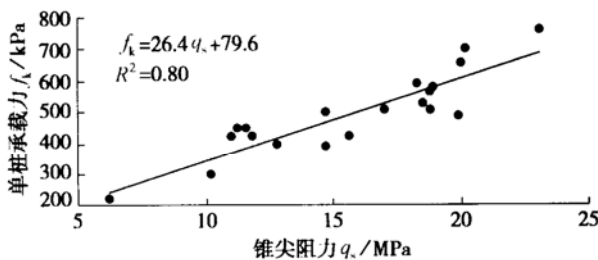


图5 单桩承载力 f_k 与锥尖阻力 q_s (压板下 3 m 分层加权平均值) 关系曲线

Fig. 5 Relationship of pile capacity f_k with static point resistance q_s (weighted average values at 3 m below loading plate)

由此可见, 单桩承载力与压板下 3.0 m 的分层锥尖阻力加权平均值的相关性良好^[5], 其关系式为 $f_k = 26.4q_s + 79.6$ (q_s 的单位为 MPa, f_k 的单位为 kPa), 可以在实际工程中试用。

5 振冲碎石桩的简便检测方法

我们知道, 对于一定的地基土, 振冲碎石桩桩体碎石的密实度是桩和桩间土综合力学性能的反映, 同时也综合反映了振冲碎石桩的施工质量, 而桩体的锥尖阻力则是桩体碎石密实度的定量参数指标。通过上述大量

的对比试验, 并建立了单桩承载力与锥尖阻力的经验公式, 为我们简化振冲碎石桩的检测方法提供了可能。

我们可以用单桥静力触探试验的方法, 测得振冲碎石桩桩体的锥尖阻力, 根据上述经验公式推求振冲碎石桩的单桩承载力, 对振冲碎石桩的施工质量作出评价。也可以结合地基土的其他力学性指标, 用复合地基的理论对振冲碎石桩复合地基进行评价。

6 结 语

(1) 振冲碎石桩桩体碎石的密实度是桩和桩间土综合力学性能的反映, 对振冲碎石桩桩体进行静力触探试验所得到的桩体的锥尖阻力则是桩体碎石密实度的定量参数指标, 通过静力触探和单桩静载荷的对比试验, 可以建立锥尖阻力与单桩承载力的对应关系。

(2) 承压板下 3.0 m 范围内的分层锥尖阻力的加权平均值与振冲碎石桩单桩承载力有良好的线性关系。通过 21 组试验数据的回归分析, 得到振冲碎石桩单桩承载力与分层锥尖阻力的加权平均值之间的经验公式为: $f_k = 26.4q_s + 79.6$ (q_s 的单位为 MPa, f_k 的单位为 kPa), 其决定系数为 0.80, 相关性良好, 可以在实际工程中试用。

(3) 利用上述经验公式, 在类似的工程中, 可以用简便的静力触探试验对振冲碎石桩进行检测。但上述经验公式是以粉土地基对比试验结果为基础, 对于其他地基应进行对比试验, 积累资料后建立相应的经验公式或验证上述经验公式的适应性。

(4) 本文仅仅对粉土地基振冲碎石桩单桩承载力和分层锥尖阻力的关系进行了研究, 没有涉及其变形模量与分层锥尖阻力的关系, 它们之间的关系以及复合地基的变形预测和验证是我们下一步所要研究的, 通过静载试验的结果, 确定变形模量, 并用原型观测资料进行修正, 再建立与分层锥尖阻力的关系是我们的设想。

参考文献:

- [1] 南京水利科学研究院. 软基加固新技术——振动水冲法 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [2] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.
- [3] JGJ 79-91, 建筑地基处理技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1992.
- [4] 谢道铨, 等. 碎石桩质量检测仪研制 [R]. 南京: 南京水利科学研究院土工研究所, 1992.
- [5] 高大钊. 土力学可靠性原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.