潮间带软土地基加固效果载荷测试及探讨

刘德渊
（厦门建筑科学研究所，厦门，361004）

提　要　软土地基的加固效果如何，直接关系到建筑物上部结构的安全。本文结合工程中潮间带软土地基加固效果的载荷试验结果，对几种加固方法进行分析比较，得出一些看法。

一　引　言

我国沿海地区和江河冲积平原地区大量分布着粉性土、砂性土、粘性土、人工填土等软弱地基土，目前常用强夯、碎石桩来加固该类地基并取得了较好的效果。碎石桩主要有两种施工方法：振冲碎石桩法和干振碎石桩法。为了比较强夯、振冲碎石桩和干振碎石桩在软弱地基土的加固效果，本文结合工程实例，进行探讨。

二　强夯和碎石桩加固地基机理

强夯：主要是靠强大的夯击能量在地基中产生强烈的冲击波和动应力对土体的作用来实现的。在夯锤夯击过程中，土体中因含有可压缩的微气泡而立即沉降几十厘米；土中产生瞬间液化后，使土的结构破坏，土的强度下降到最小值；随后在夯击点周围出现径向裂隙，它成为加速孔隙水压力消散的主要通道；因粘性土具有触变的特性，使土体的强度得到恢复和增强[1]。砂性土振动加密也可提高地基承载力。

碎石桩：软弱地基土经碎石桩加固后，形成复合地基。由于桩的压缩模量大于桩间土的压缩模量，桩、土在等量变形时各自按应力比例共同承担荷载，从而提高地基承载力，降低土层的压缩性。如果软弱土层厚度不大，则桩体直达相对硬层，此时碎石桩对地基的加固作用主要是应力集中作用。如果软弱土层较厚，则桩体可不贯穿整个软弱土层，此时复合地基主要起垫层作用；垫层将荷载引起的应力向周围及深部扩散而提高地基承载力，减小沉降量。碎石桩还起到排水降压的作用，加速软土的排水固结。干振碎石桩在成桩过程中对桩周土还能起到挤密作用，使桩周土层的孔隙比减小，密度增大，承载力提高。

三　工程概况

工程场地位于九龙江入海口的北岸，地形地貌以海蚀阶地为主，场地地形起伏变化大。据设计要求进行回填，回填最厚处达 15m，工程的一部分建筑物将坐落于回填地基上。地

质勘察结果表明，回填土由凝灰岩残积砂质粉质粘土组成，回填方式为机械化大面积回填，未经分层碾压，密实程度较差。回填地基下仍有 0.5~1.5m 厚的淤泥存在。为此设计要求处理后的地基须满足承载力标准值 $f_k \geq 150kPa$。根据地基土的特性，工程场地采用强夯、振冲碎石桩(桩径 800mm)和干振碎石桩(桩径 500mm)加固潮间带回填土地基。

为确保经过处理后的地基能满足建筑物对承载力和变形要求，在地基处理施工图设计之前，对拟定的地基处理方法进行实体试验，以确定地基处理施工图设计的合理参数，和能保证工程质量的施工工艺及有关质量标准，使地基处理工程能取得最佳的技术效果。

四　试验内容及布置

试验区场地选择填土厚度大于 12m，对不均匀沉降相对不太敏感的建筑物地基：

强夯：选用夯锤重 140kN，落距 18.5m。夯锤底面直径为 2m。夯点为正方形布置，夯点中心距为 4m。

干振碎石桩：设计桩长 12m，桩径 ϕ=500mm，桩距 1.3m，置换率 0.193，按等边三角形布置。

振冲碎石桩：设计桩长 12m，桩径 ϕ=800mm，桩距 1.7m，置换率 0.193，按等边三角形布置。

三种加固方式试验区面积合计约 600m²。其中强夯区 400m²，干振碎石桩和振冲碎石桩区各 100m²。

五　载荷试验测试与结果的探讨

1. 载荷测试方法

地基处理效果鉴定主要采用载荷压板试验，载荷试验的反力采用堆载法，其压重平台由钢梁组合而成，由千斤顶采用慢速维持荷载法分级加荷，用电阻应变式荷载传感器量测压力。在压板对称位置安置 2 个机械百分表(精度 0.01mm，量程 50mm)量测压板的沉降。试验的有关技术要求参照《建筑地基基础设计规范》GBJ7-89 及《建筑地基处理技术规范》JGJ79-91 中有关地基土载荷试验方法的规定进行。

此次压板静载试验共选取强夯试验点 2 处，天然状态下回填土 2 处，干振碎石桩和振冲碎石桩的试验点 8 处，具体选取点如下：

三遍强夯 1 处，压板尺寸 1500mm×1500mm，埋深 1.0m；

一遍强夯 1 处，压板尺寸 500mm×500mm，埋深 1.5m

天然状态下回填土 2 处，压板尺寸 500mm×500mm，埋深 1.5m；

干振碎石桩(单桩) 2 处，压板尺寸 500mm×500mm，埋深 1.5m；

干振碎石桩桩间土 1 处，压板尺寸 500mm×500mm，埋深 1.5m；

干振碎石桩单桩复合地基 1 处，压板尺寸 1000mm×1000mm，埋深 1.5m；

振冲碎石桩(单桩) 2 处，压板尺寸 800 mm×800 mm ，埋深 1.5m；

振冲碎石桩桩间土 1 处，压板尺寸 500mm×500mm，埋深 1.5m；

振冲碎石桩单桩复合地基 1 处，压板尺寸 1600mm×1600mm，埋深 1.0m。

2. 载荷结果探讨

通过对 12 个试验点静荷试验，得出各试验点的 Q-S 曲线（图 1~图 4），

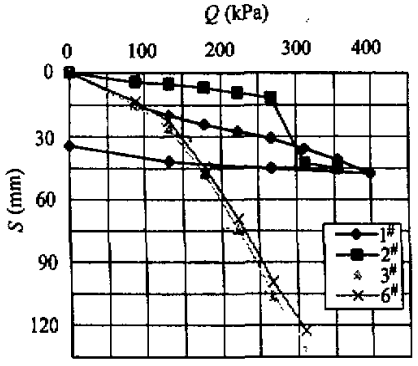


图1 天然地基、强夯 Q-S 曲线

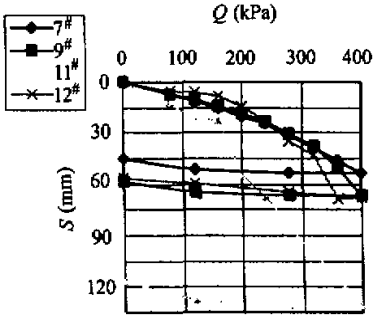


图2 桩间土、复合地基 Q-S 曲线

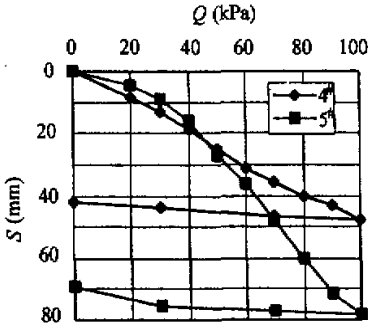


图3 干振桩体 Q-S 曲线

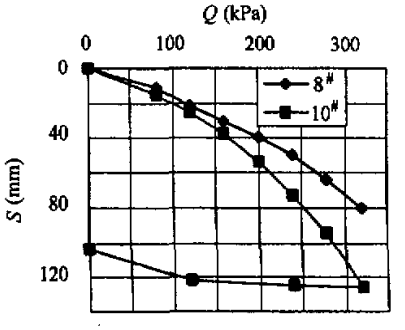


图4 振冲桩体 Q-S 曲线

从 Q-S 曲线分析，大部分曲线属缓变型，无明显的比例极限和极限荷载可取，为使各试验点容易进行比较，按照《建筑地基处理技术规范》JGJ79-91 相对变形控制，对地基土和复合地基，取 s/b =0.02 所对应荷载作为承载力的基本值；对于单桩桩体试验，取 s/b =0.06 所对应荷载为其极限荷载，取其极限荷载除以 2.0 为其承载力基本值。其中图 12#试点(一遍强夯)在荷载为 280kPa 时出现拐点，故取其极限荷载 240kPa 的一半为承载力基本值。各点所取值见表 1、表 2。

从表 1 所取基本值可求得干振碎石桩单桩承载能力为 153kPa 和 138kPa，振冲碎石桩单桩承载力为 169kPa 和 139kPa，显示振冲碎石桩单桩承载能力略大于干振碎石桩，但单桩承载能力都不高。

表 1　桩体取值

试点编号	试点名称	所取基本值/kN
	干振	30
5#	干振	27
8#	振冲	85
10#	振冲	70

表 2　地基土及复合地基取值

试点编号	试点名称	所取基本值/kN
1#	三遍强夯	250
2#	一遍强夯	120
3#	天然地基	50
6#	天然地基	60
7#	干振桩间土	110
9#	干振复合地基	210
11#	振冲桩间土	70
12#	振冲复合地基	270

从表 2 所取基本值可以看出，天然地基土经强夯加固后，承载能力大大提高，从约 55 kPa 提高至一遍强夯 120kPa，三遍强夯 250kPa，加固效果明显。虽然干振碎石桩和振冲碎石桩单桩承载能力不高，而经其加固后形成的复合地基承载能力提高到 210kPa 和 270 kPa，加固效果也比较理想。这是因为碎石桩是散性桩，而复合地基桩土共同作用，桩周土对桩身产生约束力，所以复合地基承载能力更优于碎石桩单桩承载能力，但振冲碎石桩桩间土承载能力不高，只达到 70kPa。干振碎石桩因为在成孔过程中，对周围土体的挤密效应，桩间土挤密作用明显，承载能力达 110kPa。

由于各种条件所限，以上地基土及各种加固方式的静载荷试验点的点数均未满足规范所规定的最少数量，所以无法得到地基土及各种加固方式的承载力标准值。但从试验结果可以看出三遍强夯后的地基和干振碎石桩、振冲碎石桩的复合地基承载力基本值均大于设计要求的承载力标准值 f_k=150kPa，能满足设计要求。但如碎石桩根据规范公式：

$$f_{SP.0}=\mathrm{m}f_{P.0}+(1-m)f_{S.0} \tag{1}$$

表 3　碎石桩承载力计算值

试点	桩体承载力基本值 $f_{P.0}$ /kPa	桩间土承载力基本 $f_{S.0}$ 值/kPa	复合地基承载力值 $f_{SP.0}$ /kPa
4#(干振)	153	110	118
5#(干振)	138	110	115
8#(振冲)	169	70	89
10#(振冲)	139	70	83

计算复合地基承载力，得到的取值(见表 3)均无法满足设计要求。

对于载荷试验的结果，设计及有关人员认为，岩土工程学的理论公式是以实践为基础，复合地基载荷试验能满足设计要求，就可以采用。于是经过造价比较，决定该工程地基一部分采用三遍强夯，一部分采用干振碎石桩处理，同时进行，以便缩短工期。另外在上部建筑物预埋观测点，以便在施工中和竣工后进行观测。该工程总体已在 1994 年竣工，现已使用多年，经过观测，使用效果良好。

六 结束语

(1)通过载荷测试可知，采用强夯、振冲碎石桩和干振碎石桩对于密实程度较差，由凝灰岩残积砂质粉质粘土组成的潮间带回填土软弱地基进行加固，效果是明显的；通过该工程使用效果证明，采用强夯和干振碎石桩是成功的。

(2)岩土工程学的试验结果离散性大，条件稍有差别，试验结果相差很大，理论公式是以实践为基础的。在实际工程应用中，如用碎石桩复合地基载荷试验确定的承载力标准值 $f_{SP.k}$，与根据规范公式：

$$f_{SP.k}=m f_{P.k}+(1-m) f_{S.k} \tag{2}$$

确定出的复合地基承载力标准值 $f_{SP.k}$ 差值较大时，本文认为应以载荷试验确定的承载力标准值为准。

(3)静载荷试验是目前测试复合地基承载力及变形最直接可靠的手段，尚无别的方法可代替。

参考文献

[1] 陈仲颐、叶书麟主编：《基础工程学》，北京，中国建筑工业出版社，1991。