

某抛石填海造陆工程异形锤 高能级强夯置换试验研究

詹金林, 水伟厚, 何立军

(现代建筑设计集团上海申元岩土工程有限公司, 上海 200011)

摘要: 对抛石填海造陆工程采用 8 000 kN·m 能级异形锤强夯置换试验研究, 通过三遍 8 000 kN·m 能级异形锤强夯置换对地基进行加固, 通过孔压监测两遍施工间隔时间, 采用重型动力触探试验、多道瞬态面波试验、钻孔测试、地质雷达综合检测置换墩及周围地基土的加固效果, 经过加固后置换墩及周围地基土能够显著提高数倍承载力和较高密实度。试验后开挖实测置换墩, 同地质雷达及其他检测结果进行验证比较。

关键词: 地基处理; 高能级强夯; 异形锤; 强夯置换

作者简介: 詹金林(1977—), 男, 硕士, 工程师, 从事基础工程与软基处理研究、设计、检测工作。

0 概 况

强夯置换是利用强夯法处理软弱地基的一种方法, 其原理是利用强夯的巨大动能将碎石或其他坚硬稳定粒料打入软弱土层, 形成碎石桩体(碎石墩), 将软土特别是淤泥挤到桩体之间的空隙, 使土体与碎石构成复合地基, 用以提高天然地基的承载力。要点是碎石级配要合理, 夯击能量要充足, 具体设计施工参数一般要通过试夯确定。为了增加加固深度, 常常采用增加强夯置换能级和减小夯锤直径的方法, 目前受强夯机械制约, 国内强夯置换最高能级为 8 000 kN·m, 常用夯锤为 1.1~1.3 m 的柱形夯锤。

本试验区位于广西壮族自治区钦州市钦州港经济技术开发区。场地主要是抛石填海造地而成, 上部填土厚度大且均匀性差, 粒径大小不均, 下覆海陆混合相淤泥质土沉积层, 地基处理难度大, 经过各方面技术经济对比分析采用 8 000 kN·m 异形锤(柱锤)进行强夯置换处理, 试验场地面积为 20 m×20 m。柱锤直径 1.2 m, 重 36.4 t, 锤高约 4.5 m(含吊钩)。

1 工程地质

根据勘察报告揭露的地层情况, 并结合本次试验监测孔隙水压力计埋设钻孔资料, 试验区地质情况如下:

(1) 素填土: 杂色, 主要由山体挖方区的全风化-中等风化的砂岩、泥岩、页岩组成, 局部覆盖粉土。岩性不均匀, 呈稍密-密实、稍湿-饱和状态, 岩石直径由几厘米至近 1 m, 呈棱角状, 砂岩的块体较大, 泥岩和页岩较为破碎, 层厚 8.90~10.20 m。

(2) 淤泥质土: 为海陆混合相沉积层, 黑色、灰黑色, 软塑状, 饱和, 有腥臭味, 岩性不均匀, 局部含砾砂及角砾, 见少量未完全腐化木屑, 层厚变化较大, 层厚 2.60~4.60 m。

(3) 全风化页岩、泥岩: 黄色-灰黄色, 已蚀变成土状, 结构构造基本破坏, 但层理、片理尚可辨认, 局部含少量石英颗粒, 用手可捏碎, 用锹易挖掘。

(4) 全风化砂岩: 灰黄-灰白, 已蚀变成土状, 含有较多石英颗粒及砂岩碎块, 用手可捏碎。

(5) 强风化页岩、泥岩: 黄色-灰色-灰黑色-黑色, 结构构造已大部分破坏, 岩体破碎, 完整性极

差,被切割成碎块状,碎块干时用手易折断,遇水软化。

(6) 强风化砂岩:黄色-黄灰色,灰-深灰色,结构及构造大部分破坏,岩体破碎,完整性极差,被切割成碎块状,碎块用手可折断。岩体破碎,岩芯采取率低。

(7) 中风化页岩、泥岩:黄灰色-灰色-灰黑色-深灰色,结构、构造部分破坏,层理清晰,岩体裂隙发育;锤击可碎,用镐难挖掘。岩芯采取率低,RQD差。

(8) 中风化砂岩:黄色-黄灰色,灰-深灰色,结构、构造部分破坏,层理清晰,岩体裂隙发育;岩心呈短柱状或块状,锤击可碎,用镐难挖掘;岩芯采取率低,RQD差。

场地地下水位较高,为地面下 2~3 m。

2 地基处理试验

2.1 设计要求

根据填土厚度、下覆淤泥层厚度及加固深度要求,本试验区采用 8 000 kN·m 能级进行强夯置换挤密加固处理。强夯置换处理分 3 遍进行。第 1、2、3 遍为夯击能为 8 000 kN·m 点夯,要求异形锤直径为 1.2 m,点夯间距 10 m,呈正方形布置。夯点的夯击次数,由现场的试施工确定,夯点的收锤标准,以最后两击的平均夯击沉降量小于 200 mm 控制。

设计要求加固处理后的地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 200$ kPa,压缩模量 $E_s \geq 20$ MPa。

试验区夯点布置示意图如图 1 所示。

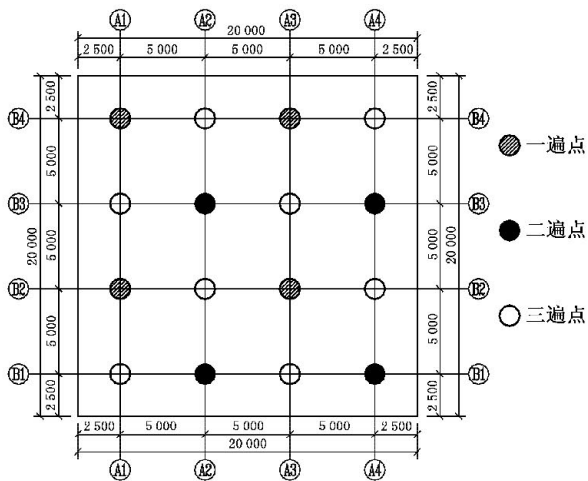


图 1 夯点布置示意图

2.2 强夯置换施工

第一遍 4 个点夯:夯点间距 5.0 m,夯击能 8 000 kN·m,单点夯击次数在 10~15 击,最后两击平均夯沉量 190~225 mm,累计夯沉量 4.72~7.16 m,累计填料量 30~46 m³,回填料为花岗岩块块石。

第二遍 4 个点夯:夯点间距 5.0 m,夯击能 8 000 kN·m,单点夯击次数在 13~14 击,最后两击平均夯沉量 160~185 mm,累计夯沉量 9.15~17.26 m,累计填料量 36~62 m³,回填料为花岗岩块块石。

第三遍 8 个点夯:夯点间距 5.0 m,夯击能 8 000 kN·m,单点夯击次数在 10~13 击,最后两击平均夯沉量 165~190 mm,累计夯沉量 4.40~8.05 m,累计填料量 28~34 m³,回填料为花岗岩块块石。

整个试验施工历时 15 天,一、二遍强夯置换间歇 9 天,二、三遍强夯置换间歇 5 天,间歇时间具体根据孔压监测确定。

3 孔隙水压力监测

由于强夯时地基土体受到冲击荷载发生瞬时的压缩和挤密,孔隙减少,孔隙水压力升高,随着超孔隙水压力消散,土的有效应力增加。在强夯冲击产生的超孔隙水压力未消散情况下连续施工就易形成橡皮土。通过孔隙水压力观测,及时了解强夯加固效果,调整确定最大夯击能,两个夯点之间的间距以及前后两夯击遍数之间的间隔时间,确定最佳夯击数等施工参数。

在本试验场地共埋设 3 组,每组 3 个孔隙水压力计。第一组孔压计埋设深度为 4.5 m、9.0 m、11.0 m;第二组孔压计埋设深度为 5.0 m、7.5 m、10.5 m;第三组孔压计埋设深度为 5.5 m、8.0 m、11.4 m。在施工期间及施工后定时进行孔隙水压力监测。

现场 9 个孔隙水压力计的观测历时曲线如图 2 所示。从超孔隙水压力变化历时曲线可得:一遍强夯置换超孔隙水压力消散需 8~9 天;二遍强夯置换间超孔隙水压力消散需 5~6 天;三遍强夯置换间超孔隙水压力消散需 5~7 天。由此可得一、二遍强夯置换技术间歇时间为 9 天,二、三遍强夯置换技术间歇为 5 天。

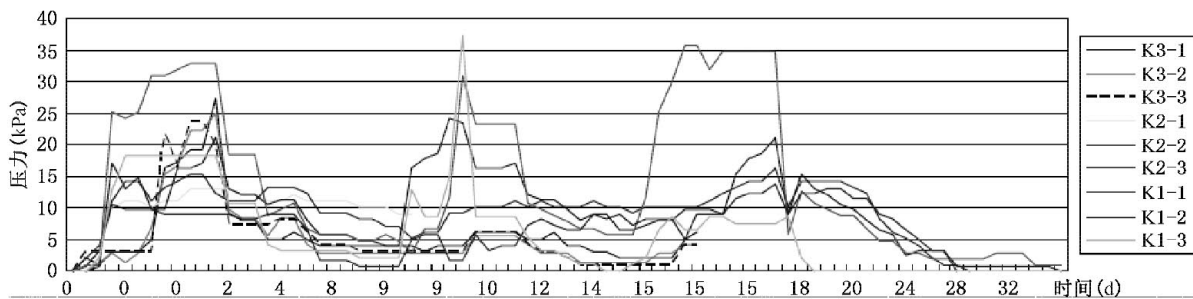


图2 超孔隙水压力历时曲线

4 地基处理检测

本试验地块工程地质条件复杂,填土粒径不均,采取多种检测手段进行综合测试,通过夯前夯后处理效果的对比,对加固效果进行综合评价,为后期大面积地基处理设计提供依据。

本次检测内容包括重型动力触探试验、多道瞬态面波试验、钻孔测试、地质雷达测试,试验块检测工作量如表1所示。

表1 检测工作量统计表

检测项目	检测阶段	检测数量
重型动力触探	夯前	2个点 27.1 m
	夯后	10个点 115.9 m
多道瞬态面波	夯前	9个点
	夯后	9个点
钻孔测试	夯后	2个点 14.0 m
地质雷达	夯前	50 MHz 16条测线共 480点
	夯后	100 MHz 4条测线共 24 m

4.1 重型动力触探加固效果分析

为夯前、夯后具有可对比性,在重型动力触探试验前在试验场地做了2个孔的重型动力触探,在夯后试验区做了10个孔的重型动力触探。图3为典型强夯置换墩的重型动探对比曲线,通过动探对比曲线可以看出置换墩的深度可达6~8 m。

表2为置换墩周围土层密实度分层统计表,通过表2分层统计结果表明,置换墩周边土经强夯挤密后,重型动力触探击数提高明显,除浅层承载力稍低外,基本满足设计要求。

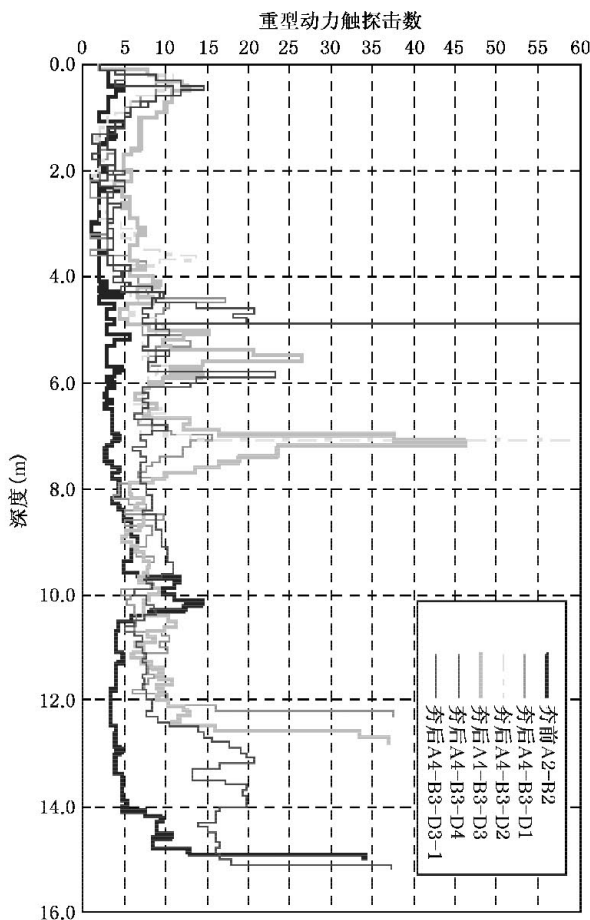


图3 典型置换墩重型动力触探对比曲线

表2 置换墩周边土密实度分层表

深度范围 (m)	夯前 ($N_{63.5}$)		夯后 ($N_{63.5}$)		承载力特征值 f_{ak} (kPa)	压缩模量 (MPa)
	平均击数	密实度	平均击数	密实度		
0~1	3.9	松散	5.8	稍密	190	17
1~4	2.6	松散	4.8	松散	160	14
4~8	3.6	松散	9.1	稍密	250	22
8~12	5.9	稍密	7.2	稍密	210	18
12~15	8.3	稍密	10.5	中密	270	24

4.2 多道瞬态面波加固效果分析

表 3 为试验场地夯前、夯后的面波波速对比曲线,可以看出经过强夯置换处理后波速大幅度提高,加固效果非常明显,有效加固深度可达 7~8 m。

表 3 面波波速夯前夯后对比表

深度范围 (m)	夯前 平均值(m/s)	夯后 平均值(m/s)	提高 (%)
0~1	200.22	224.00	11.9
1~2	199.89	238.22	19.2
2~3	192.09	234.33	22.0
3~4	191.67	228.22	19.1
4~5	201.11	224.56	11.7
5~6	201.44	223.78	11.1
6~7	206.70	224.78	8.7
7~8	219.00	231.56	5.7
8~9	232.44	236.67	1.8
9~10	232.56	243.78	4.8

4.3 地质雷达测试置换墩加固效果分析

地质雷达(探地雷达 Ground Penetrating Radar,简称 GPR)是一种用于确定地下介质分布的广谱(1 MHz~1 GHz)电磁技术。地质雷达利用一个天线发射高频宽频带电磁波,另一个天线接收来自地下介质界面的反射波。电磁波在介质中传播时,其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态而变化。因此,根据接收到的反射波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度与波形资料,可以推断介质的结构。

由于本次检测主要目的为检验置换墩着底情况和扩径大小,根据现场的实地条件(置换墩中心准确位置)和考虑地质雷达检测的技术特点(边点的地层背景好),选取编号为 A1-B2、A1-B4、A4-B1、A4-B3 等 4 个置换墩为地质雷达检测对象。图 4 为地质雷达检测置换墩剖面图,表 4 为用地质雷达对置换墩深度及上下墩体直径的检测结果。

表 4 地质雷达置换墩检测结果

置换墩 编号	墩体上部平 均直径(m)	墩体扩径点 深度(m)	扩径平均 直径(m)	墩底埋深 (m)
A1-B2	1.9	4	2.4	6.5
A1-B4	2	3.8	2.6	7.3
A4-B1	2	5.5	2.3	7.5
A4-B3	2.1	6	2.4	7.3

4.4 置换墩钻探及开挖验证

为了对地质雷达检测的墩体置换深度进行验

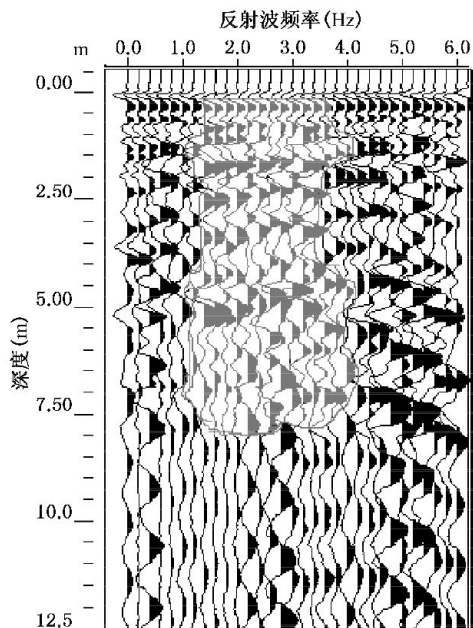


图 4 A1-B4 置换墩地质雷达测试结果

证,确切判定强夯置换实际深度和加固影响深度,采用特殊的钻探工艺、专用的钻探器具,选取 A1-B2、A1-B4 置换墩体进行钻孔验证。钻探验证结果表明置换墩 A1-B2、A1-B4 的长度分别为 6.5 m 和 7.3 m,实际埋深与地质雷达判读结果基本吻合。

表 5 为置换墩密实度分层表,可以看出强夯置换墩的承载力特征值及压缩模量大大增加,但是置换墩均匀性并不是非常均匀。

表 5 置换墩密实度分层表

深度 范围 (m)	夯后(N_{120})				均匀性 评价
	平均重 型动探 击数	密实度	承载力 特征值 f_{ak} (kPa)	压缩 模量 (MPa)	
0~1.5	15.2	中 密	350	30	不均匀
1.5~5.0	25.2	密 实	520	36	
5.0 以下	13.5	中 密	320	28	



图 5 A4-B1 置换墩顶部形态

图5为现场开挖出的A4-B1置换墩顶部形态,墩顶直径同地质雷达测试结果较为接近。

5 结 论

(1) 高能级强夯置换法适合加固抛石填海造陆地基,有效加固深度和承载力能够满足一般地基处理要求。

(2) 经过强夯置换加固后,置换墩体可以达到较高的密实度和承载力,置换墩周围土体均能够得到有效挤密加固。

(3) 类似抛石填海造陆区域,对于夯锤直径1.2 m, 8 000 kN·m能级强夯置换处理后,强夯置换碎石墩体墩底埋深6.0~7.5 m,强夯置换的有效加固深度为7~8 m。

(4) 地质雷达(GPR)是检测置换墩的一种有效手段,能够有效地检测出强夯置换墩深度与直径。

(5) 经过强夯置换加固后的地基土承载力特征值可提高数倍,地基土承载力不再是主要问题,主要问题是如何有效增加加固深度。

(6) 对于强夯置换地基属于复合地基范畴,可

通过置换墩承载力与墩周土承载力复合计算得出,类似巨型碎石桩的设计计算方法。

参 考 文 献

- [1] 王铁宏. 全国重大工程项目地基处理工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] 工程地质手册[M]. 4版. 中国建筑工业出版社, 2007.
- [3] GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S].
- [4] GB 50300—2001 建筑工程施工质量验收统一标准[S].
- [5] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 等. 10 000 kN·m 高能级强夯地面变形与孔压试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 759~762.
- [6] 王铁宏, 水伟厚, 等. 高填方碎石土地基 160 000 kN·m 能级强夯试验研究[C]. 第十届土力学及岩土工程学术会议论文集(下册). 2007, 43~48.
- [7] JG J79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 王铁宏, 水伟厚, 王亚凌, 等. 强夯法有效加固深度的确定方法与判定标准[J]. 工程建设标准化, 2005(3): 27~38.