

瑞雷波检测 10 000kN[·]m 高能级强夯地基^{*}

水伟厚¹⁾ 王铁宏²⁾ 王亚凌³⁾

[提要] 采用瑞雷波法对强夯地基进行大面积普查,既能降低成本、扩大检测面,又能提高检测速度和精度。通过对广东惠州某沿海碎石土回填地基上成功实施的国内首次 10 000kN[·]m 高能级强夯系列试验前后瑞雷波检测结果的对比分析,得到了碎石土地基上 10 000kN[·]m 强夯的地基承载力等。瑞雷波法检测得到的结论可指导强夯地基处理的检测工作。

[关键词] 地基处理 高能级强夯 10 000kN[·]m 瑞雷波检测

Application of Rayleigh Wave to Testing the Ground Treated with 10 000kN[·]m High Energy Level Dynamic Compaction/Shui Weihou¹, Wang Tiehong², Wang Yaling³ (1 Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200011, China; 2 Ministry of Construction P. R. China, Beijing 100835, China; 3 China Zhonghua Geotechnical Engineering Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract: The Rayleigh wave method is applied to test the ground treated with the Dynamic Compaction (DC in short) site, and its advantages of simplicity, economy, rapidness and accuracy are also brought into full play. Series energy levels of experiment DC are successfully put in practice of a rubble fills site in coastal area, for the first time in China. The testing results of Rayleigh wave were analyzed and compared before and after 10 000kN[·]m high energy level DC. The construction parameters and characteristics of bearing capacity of a rubble fills site treated with 10 000kN[·]m DC were acquired. The test can provide the parameters for the Code's revision and development.

Keywords: foundation; treatment; high energy level dynamic compaction; Rayleigh wave test

0 引言

目前国家标准《建筑地基处理技术规范》(JGJ79—2002)中关于强夯能级的最高范围限于试验和工程经验,仅提出了 8 000kN[·]m 以内能级的参考值,亟待对更高能级(10 000~16 000kN[·]m)强夯的试验和工程进行专题研究^[1,2],以期在近年工程实践和本课题大量试验研究的基础上,为地基处理规范中强夯部分的修订和发展提供实用参数,进而指导今后高能级强夯地基处理的工程实践^[3-5]。

瑞雷波法用于大面积软土地基处理效果的检测,具有效率高、费用低、分辨率高的优点,可以取得良好的效果。根据对试验前后瑞雷波检测结果的对比分析,得到了碎石土地基上 10 000kN[·]m 能级强夯的地基承载力和变形模量等。

1 工程地质概况

场地主要由低山残丘和山前冲积平原两个地貌单元组成,最大填土厚度为 11~14m。采用开山石爆破后直接回填,故不同深度夹有较多大块开山石,最大粒径在 50cm 以上,个别达 1.2~2.0m。试验区通过夯前探验揭露,地层可分为 5 层,如图 1 为 T2 钻孔柱状图。

层①素填土:以回填块石为主,含较多碎石(主要成分为砾岩和砂砾岩),少量粘性土,土的颗粒级配极

差。层②粉土:上部含草根有机物,土质较软。下部混较多粉细砂,低塑性。平均指标:含水量 24.3%,液性指数 0.83,孔隙比 0.698,压缩系数 0.30MPa⁻¹,压缩模量 4.80~7.38MPa,属中等压缩性土。层③粉质粘土:含少量粉细砂及少许褐斑。平均指标:含水量 29.9%,液性指数 0.39,孔隙比 0.84,压缩系数 0.44MPa⁻¹,压缩模量为 2.79~7.53MPa,平均为 4.52MPa,属中等压缩性。层④粉质粘土:接近残积土。局部为灰白色粘土,夹淤泥薄层,呈硬塑状。平均指标:含水量 22.8%,孔隙比 0.76,液性指数 0.30,压缩系数 0.40MPa⁻¹,压缩模量 4.19MPa,中等压缩性土。层⑤砾岩、砂砾岩:原岩结构较清晰,岩芯呈半岩半土状,局部夹薄层中风化岩层。下部为中风化砂砾岩。

2 施工工艺

10 000kN[·]m 能级第一遍、第二遍夯点间距 10m×10m,停夯标准为最后 2 击的平均夯沉量不大于 10cm,夯击次数约为 16 击;然后采用 3 000kN[·]m 能级强夯一遍,停夯标准为最后 2 击的平均夯沉量不大于 5cm,夯

1)上海现代建筑设计集团申元岩土工程有限公司,200011;2)建设部,北京,100835;3)中化岩土工程有限公司,北京,102600

*国家建设部科研攻关基金资助项目“高能级强夯地基加固机理工法研究与专用机械研制”(04-2-016)。

强夯前,ZK2钻孔					强夯后,ZK2钻孔				
岩土名称	地层描述	柱状图	厚度(m)	深度(m)	岩土名称	地层描述	柱状图	厚度(m)	深度(m)
①素填土	黄、红褐色,块石大小不一,钻进困难,为人工回填,较密实。		8.20	8.20	①素填土	黄、红褐色,块石大小不一,钻进困难,为人工回填,较密实。		8.20	8.20
②粉土	上部为黄褐色,含少量中粗砂、砾砂,中塑性,下部为黑灰色,含大量腐植物。		2.60	11.0	②粉土	上部为黄褐色,含少量中粗砂、砾砂,中塑性,下部为黑灰色,含大量腐植物。		10.5	10.5
③粉质粘土	黄褐色,含少量中粗砂、砾砂,中塑性		2.00	13.0	③粉质粘土	黄褐色,含少量中粗砂、砾砂,中塑性		1.00	11.5
④粉质粘土	红褐色,含少量中粗砂、砾砂,中塑性		2.30	15.3	④粉质粘土	红褐色,含少量中粗砂、砾砂,中塑性		1.50	13.0
⑤强风化岩	红褐色,为强风化砂页岩。		1.90	17.2	⑤强风化岩	红褐色,为强风化砂页岩,底部Z1.2-Z2.3为中风化岩。		2.50	15.5

图1 ZK2在强夯前后的钻孔柱状图

击次数 8 击左右, 3 000kN·m 夯点布置是在第一、二遍相邻两个主夯点中间插点, 其中第一、二遍夯点亦是 3 000kN·m 夯点; 满夯 1 000kN·m, 夯击次数 2 击, 要求夯印彼此搭接 1/3, 夯点布置见图 2。10 000kN·m 强夯的功效在于处理更大深度地基, 3 000kN·m 强夯的功效在于处理夯间土地基。

3 监测与检测

对此次系列试验进行了较为详尽的监测和检测, 其中 10 000kN·m 具体监测和检测项目见表 1。地面变形监测、孔压测试、地下水位观测孔、钻探、载荷试验、瑞雷波测试点具体位置详见图 2。

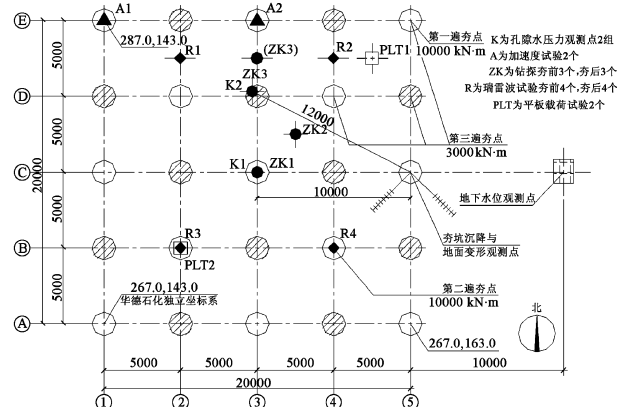


图2 10 000kN·m 夯点位置及监测与检测点布置(mm)

系列试验监测与检测项目及工作量 表 1

项目	静载荷试验	瑞雷波试验	孔隙水压力测试	钻探与原位土孔	标准贯入试验	地面变形观测	振动加速度测试	地下水位监测
工作量	2组	2次	2组每组2-3个测头	前后各3个孔	前后各3个孔	1组每个方向埋10个测桩	2点	1个孔深6m

限于篇幅, 论述以 10 000kN·m 能级强夯前后瑞雷波检测结果为主, 各能级试验的其它监测与检测结果将另文进行阐述。

4 瑞雷波检测

地基承载力在强夯加固地基的检测中十分重要。平板载荷试验相对可靠, 但它仅反映承压板下 1.5~2.0 倍承压板宽度范围内地基土的强度和变形特性, 影响深度较小。深部土层性质还必须通过瑞雷波等其他方法进行测试。

瑞雷波法是一种利用瑞雷波的运动学和动力学特征, 进行工程质量检测及工程地质勘察的地球物理勘探方法, 是一种新兴的岩土原位测试勘探方法。它根据瑞雷波沿地层传播时在非均匀介质中具有频散特性, 即波速 v_R 随频率变化而变化, 同一频率的 v_R 在水平方向的变化反映地质条件的横向不均匀性, 不同频率的 v_R 变化则反映地质条件在深度方向的不均匀性。利用瑞雷波频散特性的变化情况与岩土物理力学性质的相关性可以了解各土层情况, 确定夯击加固深度、加固范围及夯后地基的设计参数, 也可对场地的整体性以及承载力、压缩模量等指标进行较为全面的评价。

瑞雷波检测使用仪器为美国 GeomekN rics 公司生产的四十八道 R48 浅震仪。所用检波器为 CDJ-Z2.5 型低频检波器, 其固定频率为 2.5Hz。在检测工作开展之前, 先进行了检波器的一致性试验。现场检测中采用的参数为: 道间距 1m, 偏移距 5~25m, 采样间隔为 0.25ms, 记录长度为 512~1 024ms, 小锤重 8.2kg, 大锤重 400kg。每排列 12 道, 一个排列计算一个面波检测点, 野外共采集 55 张原始记录。

据瑞雷波的测试结果, 可绘制瑞雷波速等值线图, 进一步换算为剪切波速等值线图、标贯击数 $N_{63.5}$ 等值线图。如在广东地区通过大量与静载试验等的对比, 总结出如下经验公式^[9]:

$$N_{63.5} = 1.779 \times 10^{-3} v_R \quad (1)$$

$$f_{ik} = 2.777 v_R^{0.796} \quad (2)$$

$$E_0 = 9.43 \times 10^{-5} v_R^{2.284} \quad (3)$$

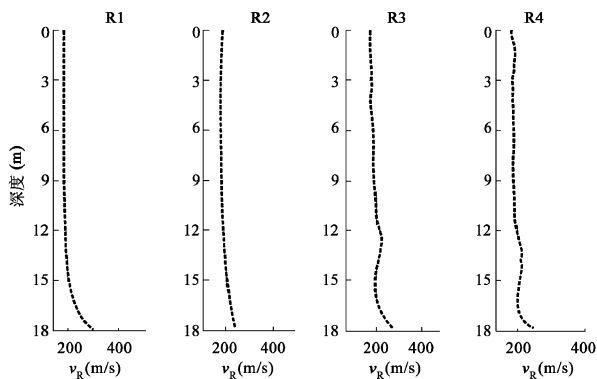
式中 f_{ik} 为地基承载力特征值 (kPa), E_0 为地基变形模量 (MPa)。

整个强夯试验区夯前、夯后共完成 8 个面波检测点的对比, 设置了 2 条面波检测测线, 每一条测线检测两个测点, 其频散图见图 3, 各检测点试夯前、后的面波计算结果见表 2。从频散曲线看, 各计算点频散曲线规则, 形状相似性较好, 偏离度较小, 曲线拐点较为明显。图 3(a) 为试夯前各测点的频散曲线, 各测点均显示了在 15.0m 左右有一明显拐点, 结合钻孔资料, 此拐点即为风化岩的层顶深度。图 3(b) 为试夯后各

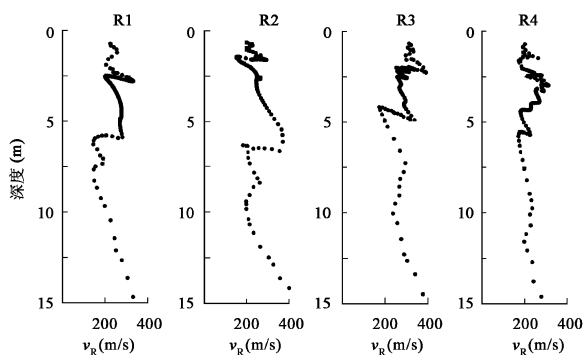
测点的频散曲线,其显示了在6.0~7.0m左右有一明显拐点,结合钻孔资料和孔压资料,此深度以上加固效果最好。

10 000kN·m 试验区强夯前后面波检测结果表 表 2

检测点号	岩土层名称	土层厚度(m)		剪切波速度 v_s (m/s)			推荐承载力特征值 f_{ak} (kPa)		
		夯前	夯后	夯前	夯后	提高(%)	夯前	夯后	提高(%)
R1	回填碎石土	9.0	10.6	185	227	22.7	150	260	73.3
R2	回填碎石土	8.10	10.3	190	230	21.1	163	280	71.8
R3	回填碎石土	9.30	10.4	175	254	45.1	126	300	138.1
R4	回填碎石土	8.50	11.0	185	215	16.2	150	260	73.3



(a) 夯前



(b) 夯后

图3 试验区瑞雷波频散图

强夯施工过程中试验区共填料1 270m³(其中第一、二遍的10 000kN·m 夯坑回填 230m³,场地补设计标高回填 0.85m 厚,第三遍的3 000kN·m 夯坑回填 100m³,满夯前场地回填 0.7m 厚),所以与强夯前相比,平均整个场地填高了近 3.2m。满夯完成后的地面平均标高与夯前相比,又降低了 0.207m,换句话说,2 遍主夯、1 遍加固夯和满夯的强夯施工使试验区场地填土压密,地表下沉了 3.4m 左右。这与表 2 瑞雷波检测结果“夯后碎石回填土厚度比夯前平均增加了 2~3m”是一致的。

从表 2 可以看出:夯后回填土的剪切波速度由夯前的 175~190m/s 提高到夯后的 215~254m/s,较夯前的平均值提高了 26.3%,承载力特征值由夯前的 126~163kPa 提高到夯后的 260~300kPa,平均为 275kPa,较夯前的平均值提高了 89.1%,提高幅度较大,说明采用强夯法处理本地基加固效果较明显。

5 结论

通过该场地的瑞雷波检测的试验过程及其结果,可得到以下结论:

(1)瑞雷波不仅可以检测大范围地基加固效果,而且根据地区经验可以间接提供地基承载力和变形模量等反映强夯加固效果的参数。

(2)瑞雷波检测结果表明,该场地在10 000kN·m 强夯后碎石回填土厚度比夯前平均增加了 2~3m,这与现场填料施工情况是一致的。

(3)瑞雷波试验结果表明,夯后回填土的场地的剪切波速较夯前的平均提高了 26.3%,承载力特征值较夯前平均提高了 89.1%,场地均匀性显著改善。

(4)对碎石回填、抛石填海地基,瑞雷波法是一种经济、快速、有效的大面积普查检测方法。

参 考 文 献

1. 王铁宏等.新编全国重大工程项目地基处理工程实录.北京:中国建筑工业出版社,2005.
2. 中国建筑科学研究院.建筑地基处理技术规范(JGJ79—2002).北京:中国建筑工业出版社,2002.
3. 水伟厚.冲击应力与10 000kN·m 高能级强夯系列试验研究.博士学位论文,同济大学,2004.
4. 王铁宏,水伟厚,高广运等.高能级强夯工程应用与发展述评.见:第九届土力学与岩土工程学术会议论文集,2003.
5. 水伟厚,高广运,王亚凌等.湿陷性黄土在强夯作用下的非完全弹性碰撞与冲击应力解析.建筑结构学报,2003,24(5).
6. 吴福良,耿光旭,仲伟周.瑞雷波在地基强夯检测中的应用.西安交通大学学报,2003,37(4).

(上接第 45 页)

条件,灵活地选用不同配比浓度的泥浆以满足工程要求,利于桩侧阻力、端阻力的充分发挥。

(3)工程的泥浆试验研究为后续的设计及施工工作提供了良好的依据,也为类似工程提供了借鉴经验。

参 考 文 献

1. 建筑桩基技术规范(JGJ94—94).北京:中国建筑工业出版社,1995.
2. 史佩栋等.实用桩基工程手册.北京:中国建筑工业出版社,1999.
3. 孙更生,郑大同.软土地基与地下工程.北京:中国建筑工业出版社,1984.
4. 王文臣等.钻孔冲洗与注浆.北京:冶金工业出版社,1996.