

【工程应用】

丘陵山区填方地基强夯加固及现场试验

朱德良^{1,2}, 王玉林^{1,2}, 陈道栩^{1,2}, 谢新宇³

(1. 武夷学院 土木工程与建筑学院, 福建 武夷山 354300; 2. 闽北山地地质灾害防治福建省高校工程研究中心, 福建 武夷山 354300;
3. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 依托武夷山市杜坝旅游综合园区高挖低填场地进行强夯加固和现场试验, 根据工程场地特点及地形地貌分析, 进行强夯加固施工流程设计及有效加固深度估算, 采用静载荷试验与动力触探试验进行地基加固效果检验。结果表明: 采用优化的强夯工艺设计结合不良地质条件综合处理, 加固后的丘陵山区填方地基承载力特征值达到 200 kPa, 满足设计要求; 本场地丘陵山区填方地基加固后的承载力特征值、变形模量与动测击数基本呈线性关系, 可采用动力触探对强夯后填方地基进行承载力判别, 为相近丘陵山区填方地基处理提供参考。

关键词: 强夯法; 土石混填地基; 有效加固深度; 动力触探

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)01-0057-07

Dynamic compaction reinforcement and field tests for filled foundation in hilly areas

ZHU De-liang^{1,2}, WANG Yu-lin^{1,2}, CHEN Dao-xu^{1,2}, XIE Xin-yu³

(1. College of Civil Engineering & Architecture, Wuyi University, Wuyishan 354300, China;

2. Provincial Engineering Research Center of Prevention and Control of Geological Hazards of Mountainous Region of Northern Fujian Province, Wuyishan 354300, China;

3. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Dynamic compaction and field tests were conducted in a high-cut low-filled field at Duba tourist resort in Wuyishan city. According to the site characteristics and topographical analysis, the dynamic compaction construction process was designed and the effective reinforcement depth was estimated. The foundation reinforcement effect was verified by static load tests and dynamic penetration tests. The results show that the bearing capacity of hilly areas foundation reinforced by optimized process design of dynamic compaction combined with treatment of adverse geological condition, can be up to 200 kPa, which meets the design requirement. The revised penetration number has approximately linear relationship with bearing capacity and deformation modulus. The dynamic penetration tests can be adopted to estimate the foundation bearing capacity value. This research can be used as a reference for treatment of close fill foundation in hilly areas.

Key words: dynamic compaction method; soil-rock filled foundation; effective reinforcement depth; dynamic penetration

0 引言

福建省的地貌素有“八山一水一分田”的说法, 以山丘广布、平原狭小为特征, 山地、丘陵占全省土地面积 80% 以上^[1]。近年来, 大规模工程项目建设为了减少耕地占用, 大多建设在空旷的丘陵山区地带; 为了资源合理利用与施工方便, 通常采用场

地内高挖低填、挖填平衡, 形成了“挖山填谷”的填方地基, 闽北的武夷新区、三菇旅游度假区、杜坝旅游综合园区等均属于此类型场地。此类型场地存在山间沟谷发育、地形高差大, 填土厚度不均、填料粒径和级配不易控制, 填筑地基与开挖地基工程性质相差较大等特点^[2]。大量工程实践表明, 丘陵山区填方地基如果不能合理控制沉降变形, 极可

收稿日期: 2021-02-01

基金项目: 福建省自然科学基金 (2020J01400); 福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划和国家级大学生创新创业训练计划项目 (201910397023)。

作者简介: 朱德良 (1970—), 男, 汉族, 福建惠安人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为岩土工程勘察与地基处理。E-mail: 337275100@qq.com。

能造成上部构筑物倾斜、开裂等,严重影响正常使用^[3]。

对于此类地基的常用处理方法有:碾压法、强夯法、换填法等,对于沉降敏感的上部构筑物可采用挖(钻)孔灌注桩、预制管桩等。强夯法也可称为动力固结法、动力压实法,利用夯锤下落产生的夯击能对地基土压密从而提高地基承载力并降低其压缩性、减少不均匀沉降^[4],是一种经济快速的地基处理技术。

关于强夯法的研究主要集中在工程适用性、加固机理、有效加固范围等方面。由于加固机理存在差别,不同土体类型与处理方法在地基处理效果上相差较大^[5-7]。Feng等^[8]采用8000 kN m高能级强夯对沙漠砂土场地进行了现场加固试验,动力触探试验和载荷板试验结果表明地基承载力不低于450 kPa、地基加固深度不低于12 m。张芮瑜等^[9]通过物质点法模拟了强夯过程,发现在相同能级下,强夯能量转化率上重锤低落>轻锤高落,能够产生更大的夯沉量。姚仰平和张北战^[10]将夯后地基体应变与干密度相联系,得出了夯击冲量相对于夯击能更适合作为施工参数的控制标准。胡瑞庚等^[11]提出了考虑土类型的高能级强夯有效加固深度计算公式,分析了不同夯点间距、锤底面积对有效加固深度的影响。

目前强夯法加固地基的设计计算以经验法为主^[12-14],关于夯后地基加固效果检验及方法仍然是研究热点^[15-16]。针对沟谷发育的丘陵山区填方地基强夯处理,从勘察设计、施工工艺及加固效果检验方面开展的研究较少。本文通过闽北山区丘陵山区填方地基强夯加固和现场试验,根据工程场地特点及地形地貌分析,进行强夯加固施工及有效加固深度估算;分别采用静载荷试验与动力触探试验进行地基加固效果检验,并拟合了承载力特征值、变形模量与动测击数的经验公式,可为相近丘陵山区填方地基处理提供参考。

1 工程概况

1.1 工程场地特点

拟建工程位于武夷山市杜坝旅游综合园区内,为山区丘陵地形,场地平整前地势起伏较大,东高西低,地形标高范围204.5~245.0 m,有3条大的冲沟和4座山头,面积约69 410.35 m²。工程场地示意图如图1所示。

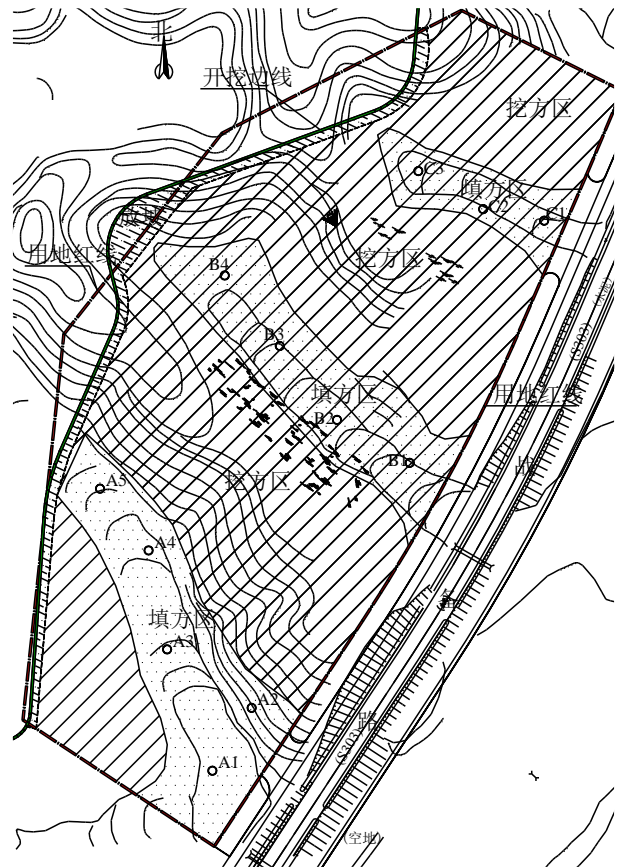


图1 工程场地示意图

Fig. 1 Sketch map of engineering site

如图1所示,工程红线范围内的挖方区与填方区呈交错布置。拟建工程重要性等级均为三级,场地复杂程度为二级,地基复杂程度为二级,要求处理后的地基承载力特征值 $f_{ak} \geq 200$ kPa。

工程场地高挖低填、依山势设计不同台面,场地平整后将形成标高分别为210、214、218、220、222、224、227 m的多个平台;按照场坪设计标高,最大挖方高度为14.8 m,最大回填深度为13.7 m。

1.2 工程地质条件

工程场地的山间沟谷主要为淤积的淤泥质黏土,山坡主要为坡积的黏土、泥岩风化残积的泥岩残积黏性土,其下为白垩系上统赤石群崇安组泥岩及其风化层。根据现场鉴定及原位测试结果,计算各岩土层的承载力特征值,并结合地区经验得到各岩土层的物理力学性质指标,如表1所示。

1.3 不良地质条件及挖填交界面处理

场地3条主干沟谷的表层淤泥质黏土层厚1.5~4.7 m,含水率高、承载力低、工程性质较差,经验算不能满足设计要求、难以作为强夯加固的天然持力层,在场地平整回填前挖除;山坡黏土沉降计算结果满足要求,在清除表面树根、草皮等杂物

后直接进行填筑施工。

场地挖填平衡的典型工程地质剖面(23~23')如图2所示, 由于新填土层结构松散、未完成自重固结, 易产生不均匀沉降、不利于地基稳定。在场地高挖低填平整过程中, 同一场地不可避免地出现两种不同类型的地基: 填筑地基和开挖地基。特别是当开挖地基为岩石时, 两者作为建筑物持力层的工程性质相差较大, 荷载作用下可能产生较大的差异沉降, 因此需对填挖交界面进行处理。

对于承载力和变形控制要求不高的部分场地, 采用传统办法对挖方区岩石进行部分挖除以设置蠕垫层, 如图3所示; 对于承载力和变形控制要求较高的部分场地, 可在填方区采用桩基控制沉降变形, 或在交界面处设置沉降缝。

2 强夯加固施工及加固深度估算

2.1 强夯加固施工组织设计流程

针对拟建工程实际地形、工程地质情况及施工条件, 结合土工试验及工程经验初步设计强夯施工参数, 选择土石混填典型区域进行试夯以分析加固效果, 在夯前、夯中、夯后进行相应的测试工作。夯前进行回填土粒径分析试验; 夯中对每一击的夯沉量进行实测, 并在夯点设置并列的竖向位移观测点, 记录强夯作用下周围地面变形; 夯后采用静载荷试验和动力触探试验进行加固效果检验。

试夯结果表明: 试夯过程中各夯坑周围没有明显的沉降和隆起现象, 夯坑深度 1.8~2.8 m, 夯坑直径 3.1~3.7 m。施工过程如下:

表1 岩土层物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil layers

岩土层	含水率/%	密度/ g cm ⁻³	孔隙比	液性指数	黏聚/kPa	内摩擦角/°	压缩系数/ MPa ⁻¹	压缩模量/ MPa
①淤泥质黏土	38.9	1.70	0.968	0.52	25.6	13.6	0.55	3.92
②黏土	31.0	1.88	0.868	0.53	41.2	19.2	0.23	12.21
③泥岩残积黏性土	26.5	1.88	0.802	0.49	35.7	20.6	0.19	13.72
④强风化泥岩	—	2.10*	—	—	30.0*	28.0*	—	(35.00)
⑤中风化泥岩	—	2.20*	—	—	—	—	—	—

注: *为经验值, () 内所取值为变形模量。

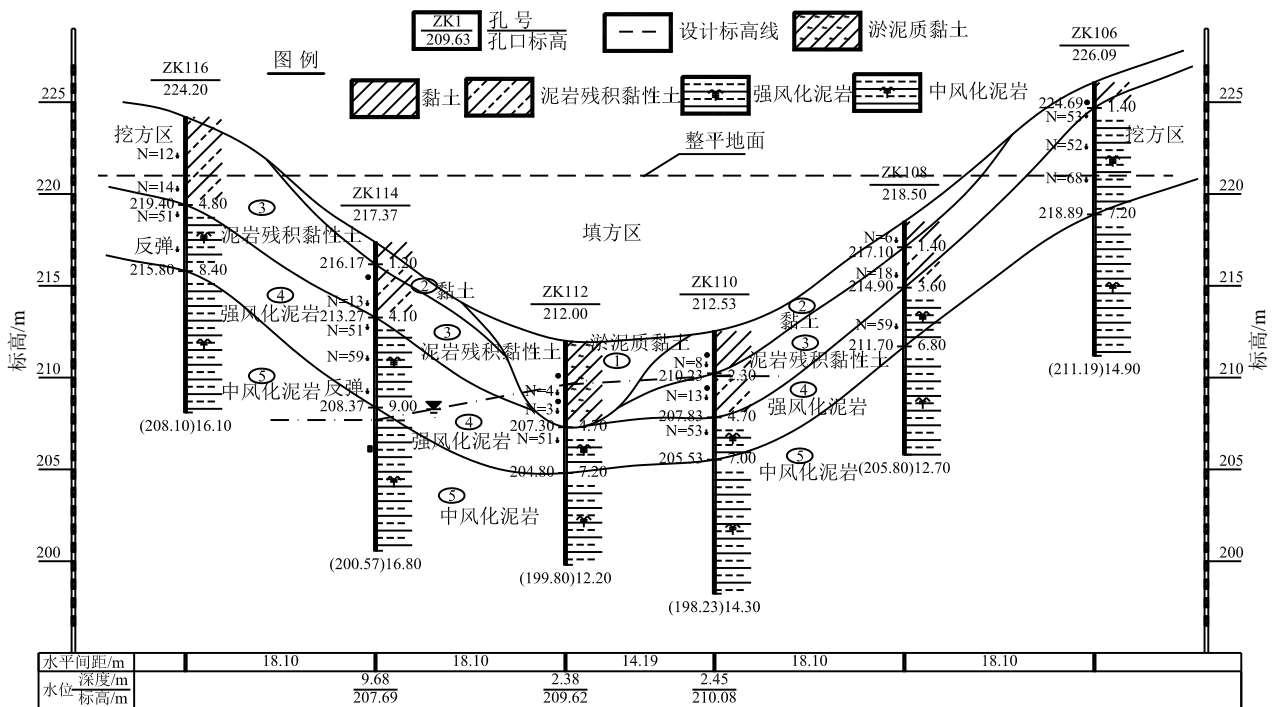


图2 23~23'工程地质剖面图
Fig. 2 Geological profile of section 23~23'

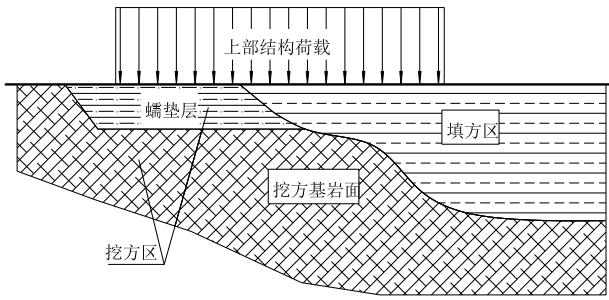


图3 挖填交界面处理示意图

Fig. 3 Schematic diagram for treatment of cut-fill interface

(1) 场地 3 条主干沟谷在填筑前设置排水盲沟, 不改变区域排水的原始路径。

(2) 考虑到填方区回填土厚度较高, 土方分亚层进行堆填, 每个亚层的厚度 ≤ 1.2 m; 控制回填土的最大粒径 ≤ 0.5 m, 不均匀系数 $C_u \geq 10$ 、曲率系数 $C_c = 1.0 \sim 3.0$; 堆平后用 22 t 压路机碾压 2 遍, 循环往复完成填方施工。

(3) 以某平台区块为例, 夯点布置如图 4 所示。强夯施工机具采用 50 t 履带吊车, 夯锤重 40 t、直径 2.5 m; 根据不同夯击工艺分别采用 6 000、3 000、1 500 kN·m 的夯击能级; 点夯后将场地推平进行满夯, 夯点间距按 $d/3$ 锤印搭接布置; 同时采用不同的击数和收锤标准 (最后两击平均夯沉量), 如表 2 所示。

(4) 夯坑填料就地取材, 采用场地级配良好的强风化或中风化泥岩, 填料最大粒径 ≤ 0.8 m, 土石比不高于 3 : 7。

丘陵山区填方地基强夯加固施工组织设计流程图如图 5 所示。

2.2 有效加固深度估算

对于丘陵山区填方地基强夯加固, 影响因素主要包括地基土的性质如土石混填比例、颗粒级配、密度、饱和度等, 以及施工工艺如填土厚度、强夯能级、夯点布置形式等。

采用修正后的梅纳公式^[17] 预估强夯有效加固深度为:

$$Z = \alpha \sqrt{MH} \quad (1)$$

式 1 中: Z 为有效加固深度, m; M 为锤重, t; H 为落距, m; α 为小于 1 的修正系数, 与土质条件有关, 根据已有研究^[17] 取 0.35~0.40。

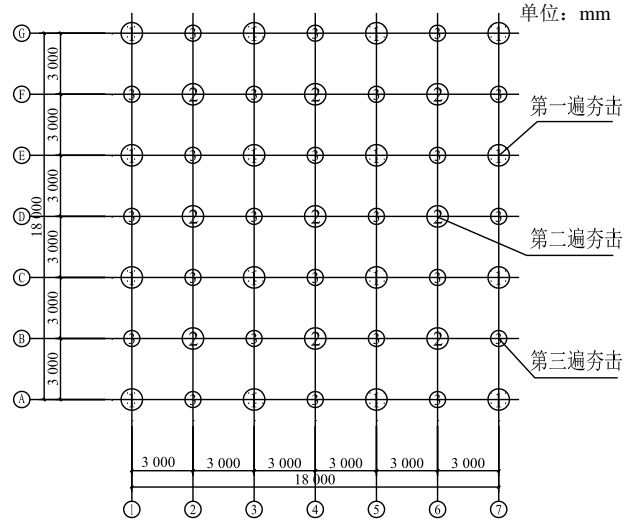


图4 夯点及强夯工艺设计示意图

Fig. 4 Schematic diagram for tamping points and dynamic compaction process design

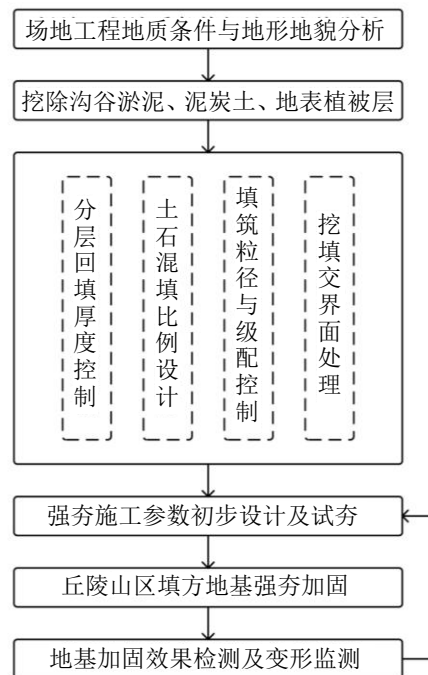


图5 丘陵山区填方地基强夯加固施工组织设计流程图

Fig. 5 Flow chart of dynamic compaction construction organization plan for filled foundation in hilly areas

表 2 强夯施工参数及控制标准

Table 2 Construction parameters and control standards for dynamic compaction

夯击工艺	强夯能级/kN·m	夯点间距/m	夯点布置形式	夯点击数	收锤标准/cm
第一遍点夯	6 000	6.0	正方形	10	10
第二遍点夯	6 000	6.0	正方形	8	10
第三遍点夯	3 000	3.0	主夯点间插点	8	5
满夯	1 500	$d/3$ 搭接	—	2	—

计算得到不同能级的有效加固深度, 如表3所示。

表3 不同能级的有效加固深度

Table 3 Effective reinforced depth for different energy levels

强夯能级/kN·m	有效加固深度/m
6 000	8.57~9.80
3 000	6.06~6.93
1 500	4.29~4.90

3 加固效果分析

强夯加固效果的原位检验方法主要有静载荷试验、静力触探试验、标准贯入试验、动力触探试验、波速试验等。静载荷试验是一种直接可靠的原位检验方法, 工期长、价格高; 动力触探试验经济实用、操作方便。

对于大面积丘陵山区填方地基强夯加固, 为了相对可靠地节约检验成本, 我们在工程场地典型位置取 A1~A5、B1~B4、C1~C3 等 12 个测点 (图 1), 通过静载荷试验获取承载力特征值、变形模量, 随后进行重型动力触探试验 ($N_{63.5}$), 通过建立地基承载力特征值、变形模量与动测击数的关系, 为相近丘陵山区填方地基处理提供参考。

3.1 静载荷试验结果

静载荷试验在设计基础埋深 1.0 m 位置进行, 采用尺寸为 $d=798$ mm 的圆形承压板, 通过慢速维持荷载法进行, 填方区典型位置 A3、B2、C2 测点的 $P-s$ 曲线如图 6 所示。

静载荷试验结果表明: 每级荷载增量均为 50 kPa, 最大试验荷载均加至 400 kPa; 当加荷至最大荷载时, 承压板累计沉降均未超过 $0.06 d$ (47.88 mm), 未达到极限破坏状态; 强夯加固后的地基土承载力特征值达到 200 kPa, 能够满足上部构筑物地基承载力要求。

3.2 动力触探承载力检验方法

重型圆锥动力触探试验 ($N_{63.5}$) 在距离静载荷试验测点前后左右各 2.0 m 处进行, 测试深度 1.0~6.0 m, 单孔测试 15 组, 根据杆长对击数进行修正后取均值。汇总动力触探试验击数 $N_{63.5}$ 对应的静载荷试验地基承载力特征值、变形模量等结果, 如表 4 所示。

绘制强夯加固后地基承载力特征值、变形模量与动测击数的关系, 如图 7、图 8 所示。

结果表明, 本场地丘陵山区填方地基加固后的承载力特征值、变形模量与动测击数 $N_{63.5}$ 基本呈线

性关系, 可拟合为以下公式:

$$\begin{cases} f_{ak} = 22.25 N_{63.5} + 110, R^2 = 0.833 \\ E_0 = 1.11 N_{63.5} + 8.25, R^2 = 0.769 \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中: f_{ak} 为地基的承载力特征值, kPa; E_0 为地基的变形模量, MPa; $N_{63.5}$ 为动测击数。

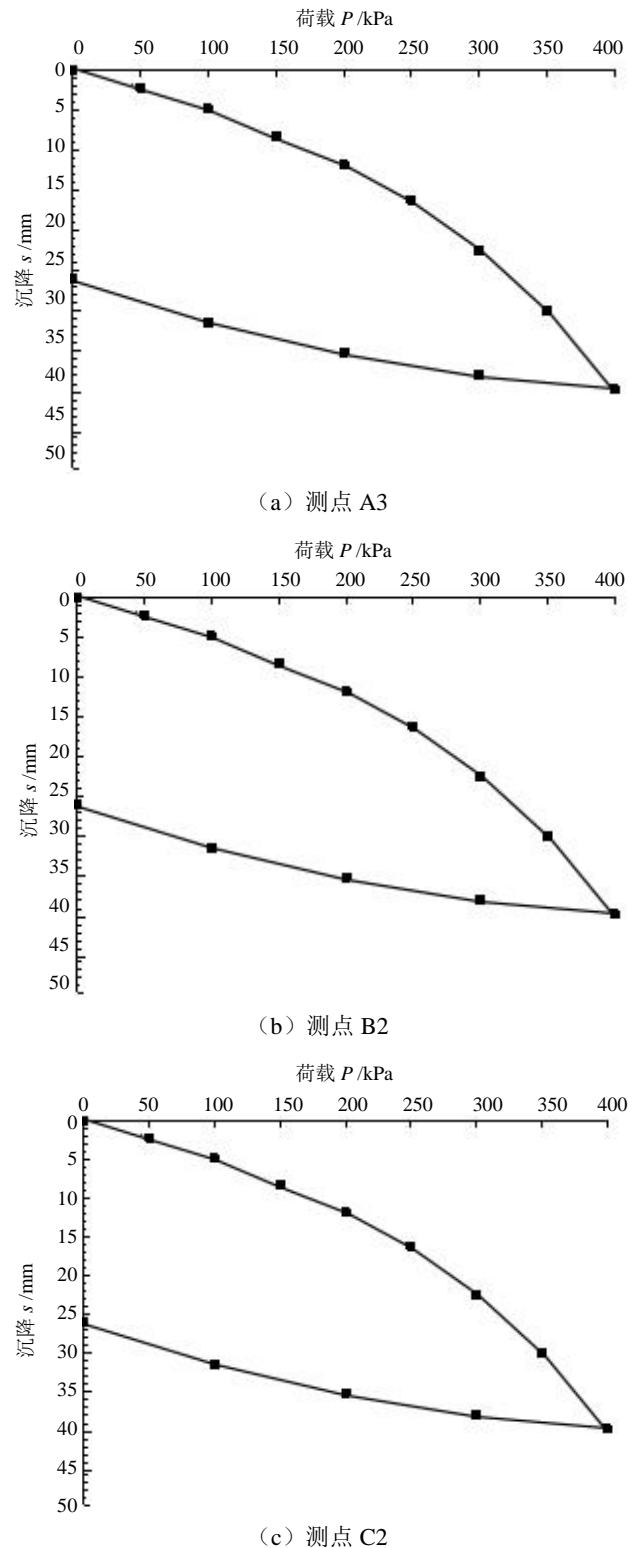


图6 静载荷试验 $P-s$ 曲线
Fig. 6 $P-s$ curves of static load tests

表4 静载荷试验与重型动力触探试验结果汇总

Table 4 Summary of static load tests and heavy cone dynamic penetration tests

测点	静载荷试验		重型动力
	承载力特征值	变形模量	触探试验
	f_{ak}/kPa	E_0/MPa	平均击数 $N_{63.5}$
A1	235.6	15.8	6.10
A2	250.1	16.1	6.35
A3	195.9	13.1	4.52
A4	247.7	15.3	5.80
A5	270.3	15.7	7.63
B1	207.2	12.7	4.71
B2	242.5	14.6	5.35
B3	280.1	16.8	7.78
B4	237.1	14.2	5.12
C1	272.4	15.9	6.57
C2	220.3	13.7	5.22
C3	232.8	13.5	5.50

根据拟合得到的承载力特征值 f_{ak} 与动测击数 $N_{63.5}$ 关系, 可用于加固后填方地基承载力特征值判别, $f_{ak}=200 \text{ kPa}$ 对应动测击数 $N_{63.5}=4.05$; 取 20% 安全储备, 本工程可按动测击数 $N_{63.5} \geq 4.86$ 进行加固效果检验。

4 结 论

依托武夷山市杜坝旅游综合服务园区内某高挖低填场地, 开展填方地基强夯加固和现场试验, 进行强夯加固施工组织流程设计及有效加固深度估算, 分别采用静载荷试验与动力触探试验进行加固效果检验, 获取加固后地基承载力特征值、变形模量与动测击数关系, 得到以下结论:

(1) 对于闽北山区“挖山填谷”形成的填方地基, 填土厚度不均、填料粒径和级配不易控制, 采用优化的强夯工艺设计结合不良地质条件综合处理, 能够满足上部构筑物地基承载力要求。

(2) 静载荷试验表明当加荷至最大荷载 400 kPa 时, 未达到极限破坏状态, 强夯加固后的地基土承载力特征值达到 200 kPa。

(3) 本场地丘陵山区填方地基加固后的承载力特征值、变形模量与动测击数基本呈线性关系; 根据拟合所得经验公式, 可采用动力触探对强夯后填方地基的承载力特征值进行判别, 动测击数 $N_{63.5} \geq 4.86$ 为达标, 为相近丘陵山区填方地基处理提供

参考。

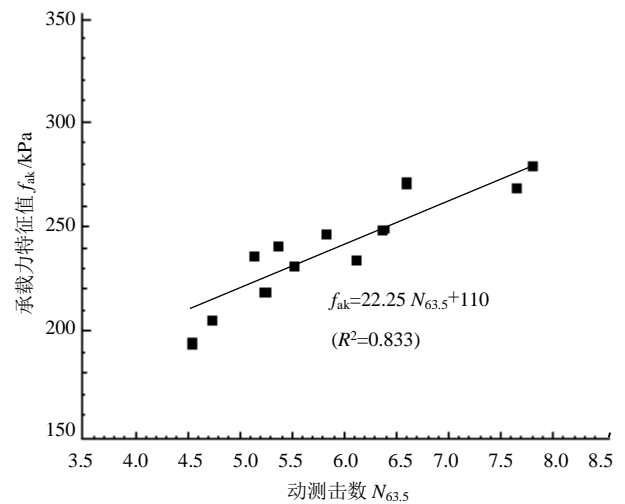


图7 承载力特征值与动测击数关系

Fig. 7 Relationship between bearing capacity value and dynamic penetration times

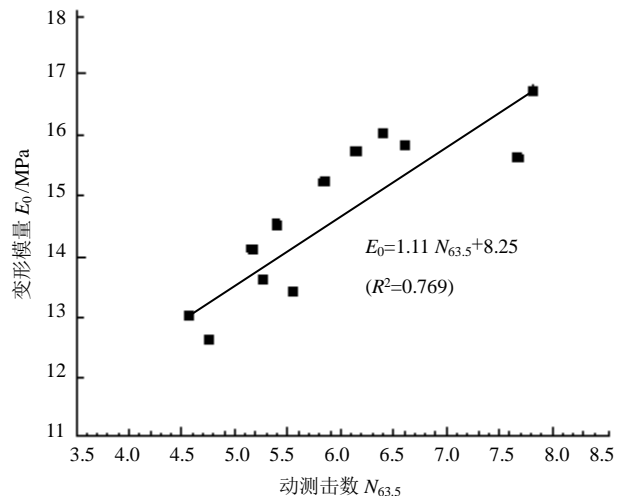


图8 变形模量与动测击数关系

Fig. 8 Relationship between deformation modulus and dynamic penetration times

参考文献

- [1] 汪水前, 王维明. 福建省水土保持监测站点布设探讨[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2): 103-106.
WANG Shui-qian, WANG Wei-ming. Layout of soil and water conservation monitoring station in Fujian province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(2): 103-106.
- [2] 蒋堃, 徐超. 复杂地形条件下填方路基稳定性分析与设计[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(3): 142-146.
JIANG Kun, XU Chao. Stability analysis and design of a filled subgrade in complicated terrain[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(3):

- 142-146.
- [3] 黄磊. 山区高填方地基强夯试验及加筋土挡墙工作性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
HUANG Lei. Study on dynamic compaction test of high filled foundation in mountain areas and performance of reinforced retaining wall[J]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [4] 胡长明, 梅源, 王雪艳. 离石地区湿陷性黄土地基强夯参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2903-2909.
HU Chang-ming, MEI Yuan, WANG Xue-yan. Experimental research on dynamic compaction parameters of collapsible loess foundation in Lishi region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2903-2909.
- [5] SHEN M, MARTIN J R, KU C S, et al. A case study of the effect of dynamic compaction on liquefaction of reclaimed ground[J]. Engineering Geology, 2018, 240: 48-61.
- [6] WANG W, CHEN J J, WANG J H. Estimation method for ground deformation of granular soils caused by dynamic compaction[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 92: 266-278.
- [7] 屈耀辉, 苗学云. 3种常用地基处理方法在黄土区高铁地基中的适用性研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36(4): 8-12.
QU Yao-hui, MIAO Xue-yun. Applicability of three common ground treatment methods for high speed railway subgrade in loess areas[J]. China Railway Science, 2015, 36(4): 8-12.
- [8] FENG S J, TAN K, SHUI W H, et al. Densification of desert sands by high energy dynamic compaction[J]. Engineering Geology, 2013, 157: 48-54.
- [9] 张芮瑜, 孙玉进, 宋二祥. 强夯的物质点法模拟及其能量转化规律分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1208-1216.
ZHANG Rui-yu, SUO Yu-jin, SONG Er-xiang. Simulation of dynamic compaction using material point method and analysis of its energy conversion law[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1208-1216.
- [10] 姚仰平, 张北战. 基于体应变的强夯加固范围研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2663-2671.
YAO Yang-ping, ZHANG Bei-zhan. Reinforcement range of dynamic compaction based on volumetric strain[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2663-2671.
- [11] 胡瑞庚, 时伟, 水伟厚, 等. 深厚回填土地基高能级强夯有效加固深度计算方法及影响因素研究[J]. 工程勘察, 2018, 46(3): 35-40.
HU Rui-geng, SHI Wei, SHUI Wei-hou, et al. Study on the effective depth of improvement and influential factors for deep backfilled soils by using high energy dynamic compaction[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(3): 35-40.
- [12] 韩云山, 董彦莉, 白晓红. 夯锤冲击黄土行程试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 631-638.
HAN Yun-shan, DONG Yan-li, BAI Xiao-hong. Model test on process of hammer under dynamic compaction of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 631-638.
- [13] 王智合. 强夯法加固大面积素填土与液化土地基应用研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(2): 197-200.
WANG Zhi-he, The application research of dynamic consolidation for large foundations of plain fill and liquefied soil[J]. Journal of Water Research and Architectural Engineering, 2015, 13(2): 197-200.
- [14] TORRIJO F J, GARZÓN-ROCA J, ALIJA S, et al. Dynamic compaction evaluation using in situ tests in sagunto's harbor, Valencia (Spain)[J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(19): 658.
- [15] RANASINGHE R, JAKSA M B, KUO Y L, et al. Application of artificial neural networks for predicting the impact of rolling dynamic compaction using dynamic cone penetrometer test results[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, 9(2): 340-349.
- [16] ZHANG J, PENG J, ZHENG J, et al. Prediction of resilient modulus of compacted cohesive soils in South China[J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(7): 04019068.
- [17] 年廷凯, 李鸿江, 杨庆, 等. 不同土质条件下高能级强夯加固效果测试与对比分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 139-144.
NIAN Ting-kai, LI Hong-jiang, YANG Qing, et al. Improvement effect of high energy dynamic compaction under complicated geological conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(1): 139-144.