

文章编号:1006-544X(2001)03-0224-06

深圳龙岗中心花园填土地基强夯加固效果及承载力的确定

熊丽芳¹, 张景德²

(1. 桂林工学院勘察设计院, 广西桂林 541004; 2. 南昌大学土木工程学院, 江西南昌 330000)

摘要:通过对一代表性强夯处理填土地基实例强夯前后地基加固效果的对比分析, 发现低能量区填土层的加固效果稍优于高能量区填土层的加固效果, 一定的深度内, 在相同的夯击能作用下, 厚度较小的填土层的加固效果稍优于厚度较大的填土层加固效果。对于这一与通常人们认知有所不同的现象, 运用波的反射透射理论进行了解释: 填土层下伏硬层的存在及埋深的大小, 是引起强夯加固效果差异的主要因素。通过对强夯地基各种测试方法确定的承载力与载荷试验结果进行对比分析, 认为用于确定一般自然沉积土的承载力的常规方法不适用于强夯地基土, 根据标贯试验击数与载荷试验结果之间存在的相关关系, 提出了根据标贯试验击数确定强夯地基土承载力的经验公式: $f_k = 0.4N^2 + 6.0N$ 。

关键词:强夯; 能量分区; 硬层; 地基; 承载力

中图分类号: TU472.31

文献标识码: A

1 场地工程地质概况

深圳龙岗中心花园小区位于深圳龙岗区中心, 场地红线面积约为 3.61 万 m^2 , 初始地形为低山丘, 中部为一小沟, 后经人工开山填平, 场地平整, 小区拟建 14 栋 8 层住宅楼, 1 栋 6 层楼商铺, 小区内道路、停车场及各种管沟、管线。楼层采用钢筋混凝土框架结构, 基础拟采用大板筏式基础, 基础宽为 8~20 m, 长为 41~67 m。小区每栋楼房均为东西向布置, 与填土变化最大方向一致。小区占地较广, 地基的加固方案经反复比较, 决定采用强夯进行加固处理, 场地填土层为主要加固层, 要求强夯后地基承载力标准值 ≥ 180 kPa, 框架结构柱网间差异沉降 $\leq 2\%$, 建筑物建成后的剩余沉降量 < 10 cm。

场地主要加固层: 填土层①由粉质粘土和强风化砂岩碎块组成, 干, 松散状态, 其最大特点为层厚不均匀, 层厚 0.80~15.10 m, 平均 8.02

m, 场地西边最薄, 中部及东边沟壑部位较厚, 标贯击数一般 3~11 击, 平均 6 击, 在垂向上分布无规律。填土层以下地层自上而下为: 植物层②; 含砾粉质粘土层③; 粉土层④ (该层仅局部分布, 厚度较小); 硬可塑砾质粉土层⑤; 硬可塑—硬塑砂质粘性土层⑥; 全—强风化的石英砂岩⑦; 强风化泥质粉砂岩⑧等。场地代表剖面如图 1 所示^[1]。

2 强夯方案设计要点

由于场地强夯加固的主要对象是填土, 其厚度分布极不均匀, 场地的东西两侧厚度为 2~3 m, 而中部可达 15 m, 根据上述填土特征及设计技术要求, 将场地分为 2 个强夯能量区, 凡厚度大于 8 m 的填土区, 划为大能量强夯区, 最大单击夯击能为 6 000 $kN \cdot m$; 凡厚度小于 8 m 填土区划为中等能量强夯区, 最大单击夯击能 3 000 $kN \cdot m$ 。

收稿日期: 2001-03-16; 修订日期: 2001-05-09。

作者简介: 熊丽芳 (1967-), 女, 湖南安乡人, 硕士, 工程师, 岩土工程专业。

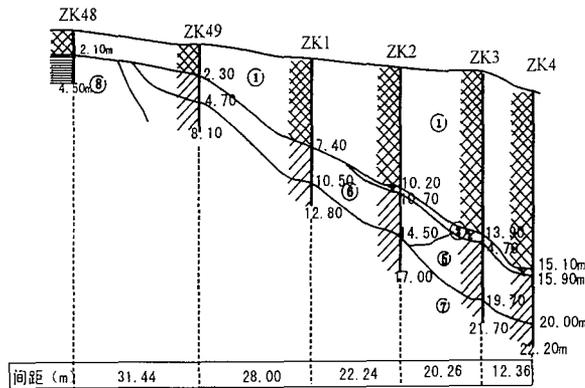


图 1 深圳龙岗花园地质剖面图

Fig.1 Geological section of Shenzhen Longgong garden site

①—填土；②—植物层；⑤—硬可塑砾质粘土；⑥—硬塑砂质粘土；⑦—强风化石英砂岩；⑧—强风化泥质粉砂岩

对于 6 000 kN·m 能量强夯区，采用钢制圆形夯锤，锤底直径 2.5 m，锤高 1.4 m，锤重 250 kN，在楼房基础底面范围夯点间距为 4 m×4 m，其范围为 5 m×5 m，正方形布置。对于 3 000 kN·m 能量强夯区，采用圆形钢制夯锤，锤底直径 2 m，锤高 0.8 m，锤重 150 kN，夯点间距在楼房

基础底面积范围为 3 m×3 m，其范围为 4 m×4 m，正方形布置。

单点夯最佳夯击能采用控制夯坑深度来确定，即最后两击夯沉量不大于 10 cm，试夯期间土中含水量不大，两遍间可连续进行夯击。夯击分三遍，前两遍为点夯，最后一遍为普夯^[2]。

3 强夯加固效果比较分析

3.1 强夯加固效果对比

根据场地能量分区，对不同深度的填土层强夯前后物理力学指标进行统计分析（表 1）。此外，由于填土厚度的非均匀性，同一能量区域的填土厚度的变化仍是不均匀的，对 6 000 kN·m 能量区，根据填土厚度的变化，划分为填土厚度 8~10 m 及填土厚度大于 10 m 两个区，进行夯后土层沿深度的物理力学指标的统计分析（表 2），并根据表 1、2 作图对比分析（图 2~4）。此外对 6 000 kN·m 能量强夯区有代表性的选取测试点进行夯前夯后力学指标的对比分析，了解夯击能作用下沿深度地基土的性质变化规律，结果如图 5。

表 1 不同能量区不同深度填土强夯前后物理力学指标对比表

Table 1 Comparison to physical and mechanical parameters between fill of different depth in different tamping energy area

夯区	填土层深度 /m	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$		孔隙比 e		压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}		压缩模量 E_s/MPa		标贯击数 N/击	
		夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
3 000 kN·m	0~3	--	1.74	--	0.64	--	0.25	--	6.86	--	34
	3~6	--	1.71	--	0.59	--	0.23	--	7.60	5	26
	6~9	--	1.70	--	0.60	--	0.26	--	6.69	4	19
	≥9	--	--	--	--	--	--	--	--	--	15
6 000 kN·m	0~3	--	1.69	--	0.65	--	0.25	--	7.46	8	30
	3~6	--	1.57	--	0.75	--	0.35	--	5.70	7	24
	6~9	1.46	1.58	0.91	0.72	0.43	0.33	4.69	6.22	6	18
	9~13	1.50	1.47	0.83	0.85	0.36	0.42	5.24	4.67	8	14
	≥13	--	1.49	--	0.82	--	0.45	--	4.10	8	10

表 2 6 000 kN·m 能量区不同填土厚度沿深度物理力学指标统计结果

Table 2 Statistical results of physical and mechanical parameters of fill of different thickness in 6 000 kN·m energy area

填土厚度区	填土层深度/m	干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比 e	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_s/MPa	标贯击数 N/击
8~10 m	0.0~3.0	1.79	0.518	0.16	10.08	31.1
	3.0~6.0	1.53	0.811	0.41	5.19	23.7
	6.0~10.0	1.52	0.827	0.34	5.92	16.6
>10 m	0.0~3.0	1.61	0.745	0.29	6.33	29.2
	3.0~6.0	1.51	0.821	0.42	4.91	22.5
	6.0~9.0	1.52	0.706	0.32	6.50	17.7
	9.0~12.0	1.51	0.833	0.41	4.67	14.3
	>12.0	1.51	0.904	0.43	4.22	11.7

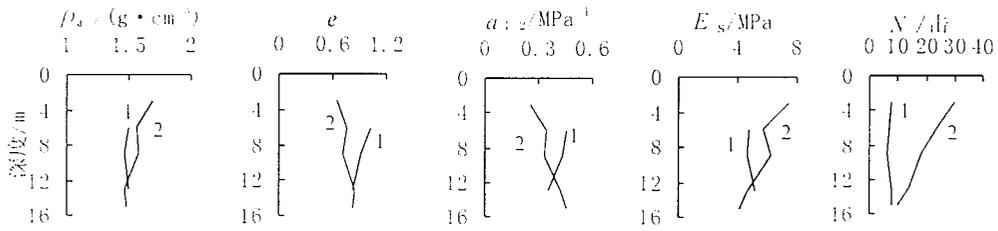


图 2 6 000 kN·m 强夯能量区不同深度填土强夯前后力学指标对比

Fig.2 Comparisons of physical and mechanical parameters between fill of different depth in 6 000 kN·m energy area before and after treatment
1—夯前; 2—夯后

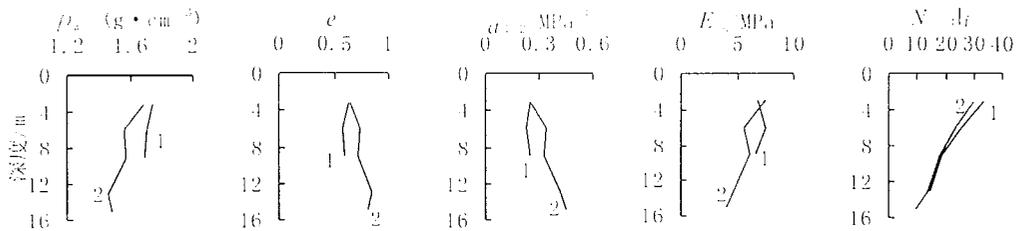


图 3 不同能量夯区填土层沿厚度的力学指标变化曲线

Fig.3 Comparison of physical and mechanical parameters between fill in different tamping energy area
1—3 000 kN·m 能量强夯区; 2—6 000 kN·m 能量强夯区

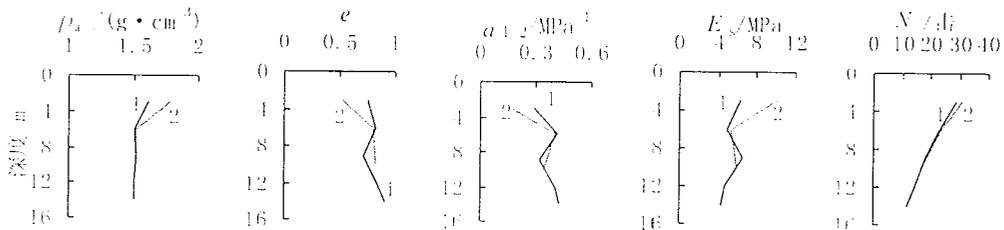


图 4 不同填土厚度区沿深度物理力学指标变化曲线

Fig.4 Comparison of physical and mechanical parameters between fill with different thickness
1—大于 10 m 厚填土区; 2—8~10 m 厚填土区

通过对比分析可知, 深圳龙岗花园小区强夯加固有以下特点:

(1) 夯后填土地基的力学性质较夯前有较大改善。

(2) 3 000 kN·m 能量强夯区填土层较之 6 000 kN·m 能量强夯区填土层, 其 ρ_d , E_s , N 值更大, e , a_{1-2} 更小, 即低能量区填土层强夯加

固效果优于高能量区填土层加固效果。

(3) 在相同的 6 000 kN·m 夯击能作用区, 一定深度内, 厚度较小的填土层的加固效果优于厚度较大的填土层的加固效果。

(4) 在夯击能的影响深度内地基加固呈现出明显分区的特点: 在 6 000 kN·m 强夯区, 夯坑之上 3m 左右的土层经过普夯, 强度大幅度提高,

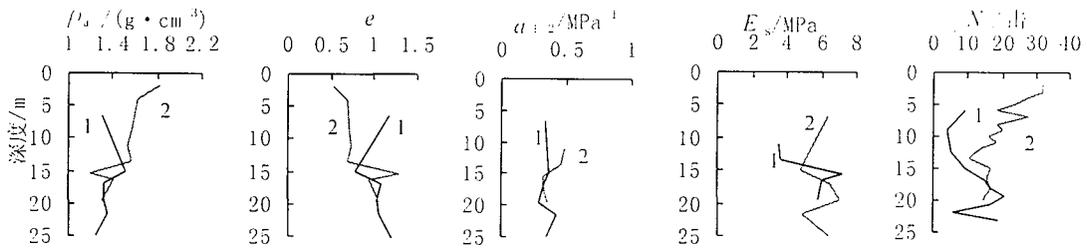


图 5 夯前夯后沿深度地基土物理力学指标对比曲线

Fig.5 Comparison of physical and mechanical parameters of foundation soil before and after treatment

1—夯前；2—夯后

各力学指标如标贯击数、压缩模量、孔隙比等较其下部土层提高明显，在 3~15 m 深度内，地基土的各项物理力学指标均得到了一定的改善，其中，地基土的干密度、孔隙比的变化幅度较小，显示出此加固深度范围内土的密实度变化较一致的特点，为有效加固区。其后，在 15~20 m 深度范围内力学指标夯前夯后呈交替变化，显示地基土受到强夯的影响，发生一定的扰动，为强夯影响区。

3.2 强夯加固效果差异影响因素分析

以上统计结果显示出与人们通常对强夯的理解不一致的现象：低能量区强夯加固效果稍优于高能量强夯区的加固效果；在相同夯击能作用下，厚度较薄的填土层强夯加固效果优于厚度较厚的填土层加固效果。尽管对于本场地影响强夯加固效果的因素较多，如夯点的布置、单位夯击能的大小、夯锤的重量等等，根据对该场地的地质条件分析，笔者认为场地地下伏硬土层的埋深，夯击能在传播过程中的反射与透射的影响是造成上述强夯加固效果差别的主要影响因素^[3]。

在一定的土层深度内，在一定的夯击能作用下，夯击能的传播遵循上部介质波速大于下部介质波速的规律，夯实体随着夯击次数的增加，将不断向下延伸，随着夯实体不断向下延伸，当能量的传播遇到下伏硬土层时，由于其波速大于填土层，即下部介质的波速增大，如果波的人射角不变，上部介质的波速不变，波的透射会减弱，因此，有更多的能量被反射，使得上部填土层得到进一步的加固，在夯击能相同的情况下，在夯击能的影响深度内，填土层越薄，其被反射的能量越多，交接面上部的土层的密实程度得到进一

步加强和巩固，即硬层的存在，在结构面会使得更多的夯击能被反射，而透射的能量减弱，即产生低能量强夯区填土层的夯击效果稍优于高能量强夯区，在相同的高能量强夯区，厚度较小的填土层夯击效果稍优于厚度较大的填土层夯击效果的现象。

4 强夯地基土承载力的确定

地基土经强夯，结构发生了很大的改变，一般常规的确定地基土承载力的方法，如物理力学指标规范查表、标贯击数规范查表^[4]等，并不适用于强夯地基土^[3]。下面是根据本场地多种检测方法，分段进行填土地基的承载力确定，以便进行比较，其中物理力学指标取统计平均值，根据文献^[4]查表并确定，标贯试验击数根据文献^[4]查表进行承载力的确定，各种方法确定的承载力值见表 3。

根据地基土平均物理力学指标查表并综合确定的地基土承载力标准值，与载荷试验确定的地基土的承载力标准值之间有一定的差距，这是因

表 3 多种方法确定的填土地基承载力标准值

Table 3 Standard bearing capacity of fill foundation determined by different methods f_k/kPa

强夯分区	填土层深度/m	承载力标准值 f_k/kPa		
		物理力学指标查表法	载荷试验法	标贯击数查表
3 000 kN·m	0~3	360		≥680
	3~6	380	570	>680
	6~9	370	--	515
6 000 kN·m	0~3	340		≥680
	3~6	280	390	>680
	6~9	280	--	470
	9~13	230	--	345
	>13	250	--	255

为根据地基土的物理力学指标查表确定地基土承载力值时,是针对一般自然沉积的正常固结土,而强夯使得土体的结构发生了变化,有其特定的性质,当仍然利用文献[4]进行强夯地基土的承载力确定时,就会存在较大的误差,而目前还没有根据强夯土体的特殊性统计得到的物理力学指标与土体承载力之间的规律关系。此外取土试样的扰动也是造成物理力学指标误差的原因之一,以上因素均影响到以此确定的强夯地基土承载力与真实值之间的差距。

地基土体经强夯后的标贯试验击数往往较一般性土高,根据文献[4]查表确定的承载力也与实际极不相符,这可能是由于尽管土体的密度经强夯后得到较大的提高,但强夯土体的结构由于受到破坏,其结构力减弱,影响了土体的承载力。

本次现场载荷试验的结果尽管与夯区、夯点的布置之间似乎没有显示出一定的对应关系,但与夯点的标贯试验结果相比较,却显示出一定的相关关系(表4)。试验点上部土层标贯试验击数越高,其载荷试验承载力越高,由于载荷试验主要反映2倍承压板深即6m左右的地基土的承载力,根据上部土层载荷试验与对应点地表下6m内土层标贯试验击数平均值的对应关系进行回归分析及趋势线拟合,标贯试验击数与地基土的承载力关系曲线与二次多项式曲线基本拟合(图6)。

根据以上标贯击数与载荷试验确定的承载力之间的关系曲线进行回归拟合分析,强夯地基土承载力与标贯试验击数的关系曲线与二次多项式几乎完全拟合,拟合方程为

$$f_k = 0.4N^2 + 6.0N$$

其中 f_k 为强夯地基土承载力标准值(kPa), N 为标贯试验击数(击)。以此经验公式,根据标贯击数计算出的强夯填土地基承载力值见表5。

通过钻探了解地基土的性质是一种最基本也最通用的方法,标贯测试在钻探中进行,钻孔取

土时,若注意锤击对土的扰动,一般数据较准确^[5],在工程中较常采用,也较载荷试验等经济,如果未有其他测试方法,该公式是一种简单、快速、有效的判断强夯地基土承载力的方法。

5 结论

(1) 夯击能作用下,地基加固呈现出明显分区的特点。

(2) 对填土地基土强夯时,在夯击能的影响深度范围内,硬层的存在在结构面会使得更多的

表4 地表下6m深土层平均标贯击数与载荷试验承载力的对应关系

Table 4 Correlation between bearing capacity determined by loading test and mean standard penetration value

载荷试验点及对应钻孔	6 m 深标贯平均击数 N/击	载荷试验承载力 f_k /kPa
1—ZK4	26.36	450
2—ZK11	22.28	325
3—ZK17	25.3	414
4—ZK36	31.28	576

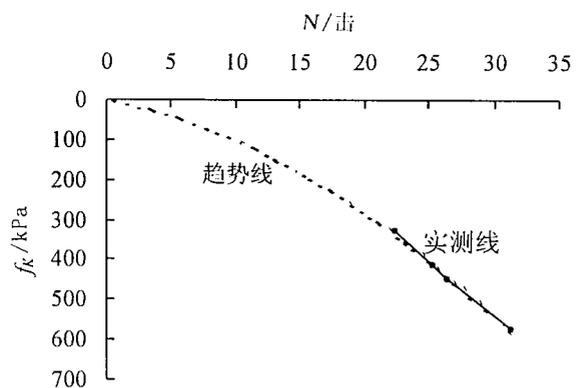


图6 强夯土体标贯击数与载荷试验承载力关系拟合曲线

Fig.6 Correlation between bearing capacity of tamped soil determined by loading test and mean standard penetration value within 6 meters' depth

表5 强夯填土地基承载力 f_k 与标贯试验击数 N 对应关系

Table 5 Correlation between bearing capacity of tamped soil and mean standard penetration value

标贯击数 N/击	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
承载力 f_k /kPa	100	130	160	200	235	280	325	374	426	480	540	600	666

夯击能被反射,而透射的能量减弱,反射的加强会使结构面上部的土层的密实度得到进一步的加强。在相同的夯击能作用下,加固土层下硬层的埋深不同,结构面上部的土层加固效果也不同。

(3)一般常规确定自然沉积土体承载力的方法不适用于强夯地基土。根据强夯土体标贯试验击数与载荷试验确定的承载力之间的关系进行回归拟合分析,得出拟合方程: $f_k = 0.40N^2 + 6.0N$ 。强夯地基土的承载力可根据标贯试验击数按此公式进行估算。

参考文献:

- [1] 深圳市龙岗地质技术开发公司. 深圳龙岗中心花园住宅小区岩土工程勘察报告 [R]. 深圳: 深圳龙岗地质技术开发公司, 1996.
- [2] 深圳地质勘探开发公司. 深圳龙岗中心花园强夯加固地基检测报告 [R]. 深圳: 深圳地质勘探开发公司, 1998.
- [3] 熊丽芳. 填土地基强夯加固效应研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2001.
- [4] GBJ 78-9, 建筑地基基础设计规范 [S].
- [5] 阎明礼. 地基处理技术 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996. 40~80.

Study on effect of heavy tamping with different energy impact on fill foundation and the determination of bearing capacity of tamped soil on Shenzhen Longgang Garden site

XIONG Li-fang¹, ZHANG Jing-de²

(1. Research Institute of Engineering Survey and Design, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China; 2. Department of Civil Engineering, Nanchang University, Nanchang 330000, China)

Abstract: By comparison of the improving effect of heavy tamping in a representative fill foundation before and after heavy tamping, it is found that the improving effect of the fill tamped with lower energy is slightly better than that with higher energy, and the improving effect of the thinner fill is slightly better than that of the thicker fill in the same tamping energy area. This phenomenon is explained by wave propagation theory. It is thought that the harder layers beneath the fill are the main factors causing the differences of improving effect on this site. Through the comparison between the bearing capacity of tamped soil determined by different testing methods and that determined by load-bearing test, it is concluded that the general methods to determine the bearing capacity of the natural soil is not fit for determining that of the tamped soil. An empirical formula is proposed as: $f_k = 0.4N^2 + 6.0N$.

Key words: heavy tamping; impacting area with different energy; harder layer; bearing capacity