

软土地区淤泥质土堆山工程的地基沉降与土体稳定性数值分析

仓基俊¹, 关云飞², 陈海军², 刘加才³

(1. 盐城市水利科学研究所, 江苏 盐城 224002; 2. 南京水利科学研究所 岩土工程研究所, 江苏 南京 210029; 3. 南京工业大学 交通学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 在软土地区利用淤泥质土进行人工堆山, 地基处理方案和堆土方案的设计非常重要。以某拟建堆山工程为例, 通过理论分析和三维有限元数值计算, 论证了地基处理和堆土填筑的技术方案。地基处理设计以地层强度的增长为主要目标, 综合地基土层的性质、工程造价和建设周期等因素, 根据不同区域的堆土高度选择不同的地基处理形式。为确保山体填筑过程的稳定, 通过三维有限元数值分析方法, 计算山体稳定性和地基沉降, 验证和调整设计参数, 预测最终沉降, 达到设计方案最优化的目的。

关键词: 人工堆山; 地基沉降; 山体稳定性; 数值分析

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2012)01-0031-05

Mumerical Analysis for Foundation Treatment and Stability of Muddy Soil during Artificially Piling Mountain in Soft Soil Areas

CANG Ji-jun¹, GUAN Yun-fei², CHEN Hai-jun², LIU Jia-cai³

(1. *Yancheng Hydraulic Research Institute, Yancheng, Jiangsu 224002, China;*

2. *Geotechnical Engineering Branch Institute, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China;*

3. *College of Communications, Nanjing Polytechnical University, Nanjing, Jiangsu 210009, China)*

Abstract: When artificially piling mountain with muddy in soft soil areas, the design for foundation treating and earth piling scheme is very important. Here, taking a mountain piling engineering for example, the technical scheme for foundation treatment and bulldozing filling is analyzed and demonstrated through theoretical analysis and 3-D finite element calculation. In the design for foundation treatment, the increasing of formation strength should be taken as a main aim, some factors as the nature of foundation soil, project cost, construction period and so on should be taken into account comprehensively, then the appropriate forms of foundation treatment are selected according to the bulldozing height of different regions. In order to assure the stability in hill filling progress, the 3-D finite element analysis method is used to calculate the mountain stability and foundation settlement, verify and adjust the design parameters, and predict the final settlement, at last, the design optimization is achieved.

Keywords: artificial piled mountain; foundation settlement; stability of mountain; numerical analysis

随着社会、经济的快速发展,很多平原地区陆续规划、建设人造山体。天津奥林匹克公园、太仓郑和公园等都是人工堆山为基础建造的特色景观区,发挥了良好的社会效益和经济效益^[1]。在软土分布地区进行人工堆山,地基加固设计方案和设计参数的确定直接决定工程的成败,另外由于该类地区砂

石缺乏,山体填筑材料大多采用就近开挖的淤泥质土,因此淤泥质土堆山方案的设计也是关系到工程造价和建设周期的重要因素^[2]。

本文以某人工堆山工程为研究对象,详细分析了在软土地区进行人工堆山工程的地基处理设计方法,以及以淤泥质土作为堆山材料的山体填筑方案,

为类似工程提供参考与借鉴。

1 工程概况

1.1 工程背景

某市在实施市区新饮用水源工程建设过程中,需开挖土方约 $600 \times 10^4 \text{ m}^3$,为解决开挖土方的出路问题,在人工湖周边规划生态景观区,形成地标性的高品质、多样性的山水景区。挖湖堆山可改善民生,开发旅游资源,同时节约大量弃土转运资金,一举两得。

1.2 工程地质概况

根据工程勘察资料分析,场地内各土层工程性质变化较大。各主要土层的物理性质指标见表 1。其中 3 层淤泥质粉质粘土,流塑,高含水量,高压缩性,抗剪强度低,承载力低,工程地质条件差,为地基土中的不良工程地质层,孔隙比大于 1,天然含水率大于液限,液性指数大于 1,压缩系数大于 0.5 MPa^{-1} 。根据土体物理力学指标,可选择第 5B 层粉砂层作为地基处理的承压层,该层工程性质较好,中等压缩性,在 5B 层缺失区域,以 6 层粉砂层代替。

表 1 主要土层的物理性质指标平均值^[3]

土层编号	土层名称	平均厚度 /m	基本物理指标						承载力建议值		压缩试验	
			天然含水率/%	天然重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	天然孔隙比 e	液限 W_L	塑性指标 I_p	液性指标 I_L	土层承载力 /kPa	灌注桩承载力 /kPa	压缩系数 $a_{1-2} / \text{MPa}^{-1}$	压缩模量 $E_{s1-2} / \text{MPa}^{-1}$
2	粉质粘土	0.79	28.7	19.2	0.830	34.6	16.4	0.65	95	35	0.44	4.38
3	淤泥质粉质粘土	2.79	40.6	18.0	1.140	32.9	14.4	1.52	60	19	0.86	2.90
4	粉质粘土	4.05	27.9	19.5	0.795	37.0	17.7	0.49	155	52	0.38	5.32
5A	粉质粘土	2.93	26.1	19.7	0.744	30.9	11.6	0.60	110	45	0.27	7.11
5B	粉砂	3.31	28.5	19.2	0.820	27.4	6.7	0.94	155	48	0.30	6.24
5C	粉质粘土	3.27	34.2	18.7	0.949	30.3	11.7	1.38	120	35	0.42	5.42
6A	粉砂	9.64	27.7	19.3	0.794	27.2	5.5	0.62	210	60	0.30	10.1
7	粉质粘土	4.40	25.3	19.9	0.720	35.7	17.0	0.40	180	65	0.26	7.16

本工程堆山用土为开挖人工湖挖出,开挖土体以 4 m 以内第 2、3 层土为主,粉质粘土、淤泥质粉质粘土经开挖扰动后工程性质显著下降,工程性质较差,若直接将其作为堆山材料,容易导致边坡失稳等问题。

1.3 软土地区淤泥质土堆山的技术难点

初步设计新建山体最大堆土高度达 50 m,原有地基存在较厚的软土层,承载力较低,堆山用土方为挖湖形成的淤泥质粘土,在软土地基上填筑如此高的人工山体,在全国范围内鲜有类似的工程经验可以借鉴。

本工程成败的关键是如何使地基承载力满足填筑山体的需要并且保证山体在填筑和运营阶段的稳定性,包括以下几个方面:

(1) 根据地基土层分布和堆土高度,在不同区域选择合适的地基加固措施,以提高地基承载力,同时确保地基的整体性和稳定性;

(2) 根据山体形状和堆土性质,合理安排山体填筑和坡面排水方案,保证山体的稳定;

(3) 提出适合本工程的施工流程、质量控制措施和施工监测方案。

2 软土地区淤泥质土堆山方案设计

2.1 地基处理方案设计

本工程地基处理设计主要采用强度控制原则,即主要以地层强度的增长为主要目标,采用适当地基处理措施提高地基承载力,保证堆山边坡和地基的整体稳定^[4-5]。

人工堆筑的山体往往体积大高度高,荷载面积大,对地基的承载力要求极高,因此在山体填筑之前必须对地基进行加固处理,尤其在软土分布地区修建类似工程,地基处理的费用在工程总造价中占很大的比例,设计方案的选择事关整个工程的成败。

地基处理方案的选择与工程造价和建设周期密切联系。在保证工程质量和安全的前提下,以工程造价为控制目标,应尽量选择打设排水板或砂井,利用填土荷载堆载预压,每一级荷载施加后预压一段时间,待地基承载力满足要求后再施加下一级荷载。对于以建设周期为控制目标的工程,应选择钻孔灌注桩或高强度桩复合地基作为地基加固的主要形式。

由于拟建工程以地基承载力为设计控制指标,

为实现地基处理方案和工程造价的最优化,根据拟建山体的高度即荷载大小,将场区分为 A、B、C、D 四个区,见图 1。A 区堆高:0~15 m; B 区堆高:15 m~20 m; C 区堆高:20 m~30 m; D 区堆高:30 m~50 m。对于山体荷载较小的 A 区和 B 区采用排水固结法加固地基,山体荷载较大的 C 区采用半刚性桩复合地基法,荷载最大的 D 区采用桩基础。

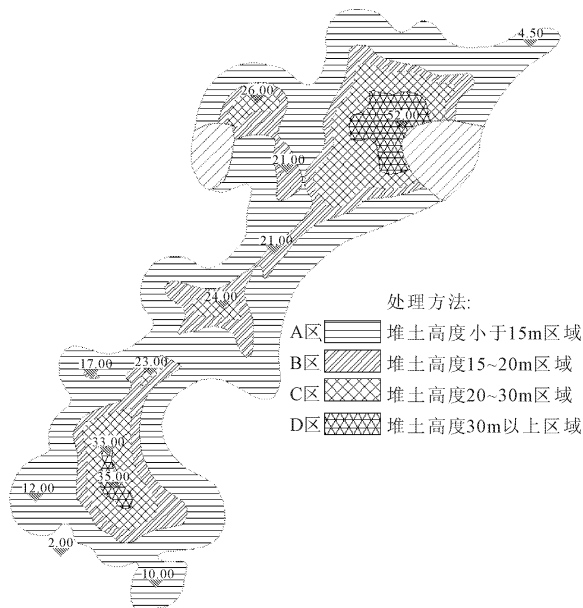


图 1 地基处理分区及山体外形图

具体加固方案为:

(1) A 区采用塑料排水板进行堆载预压。排水板采用 SPB100-C 型,深度为 12 m,间距 1.5 m,等边三角形布置。

(2) B 区采用挤密砂石桩联合堆载预压法。砂石桩直径取 400 mm,桩间距 1.5 m,按等边三角形布置,打设深度 18 m。

(3) C 区采用混凝土芯砂桩复合地基加固法。该项技术综合了排水固结法对软土本身加固效果显著和预制混凝土桩强度高、质量容易控制两者优势,综合了排水固结法和复合地基法对地基的加固作用。预制芯桩统一采用边长 200 mm 的预制方桩,整个混凝土芯砂桩桩体直径 500 mm,间距取 2.5 m,等边三角形布置,且芯桩与外部砂壳的打设深度保持一致。

(4) D 区采用钻孔灌注桩及承台对地基进行加固处理,打设深度 16 m,桩径 1 000 mm,间距 5.0 m。

为保证充分发挥地基土的承载力,同时孔隙水沿竖向排水体渗入地表后能顺利排到场外地外,在堆土之前铺设一层砂垫层或碎石垫层。由于在靠近中

心荷载较大的部位可能产生 3 m 以上的沉降,为保证砂垫层在水平方向有效排水,因此填砂垫层时,需要预填土形成人字坡,保证堆载沉降后不形成锅底。

2.2 人工堆山方案设计

堆载进度控制应以土坡稳定计算结果控制为准,由于填筑山体的土方是开挖人工湖而来的淤泥质土,含水率较大,不宜直接填筑。因此在取土前可对开挖场地进行轻型井点降水,必要时进行晾晒碾压,碾压法施工时应根据压实机械的压实能量,控制碾压土的含水率符合最优百分比,对于一般粘性土,通常采用 8 t~10 t 的平碾或 12 t 发热羊足碾,每层铺土厚度 30 cm 左右,碾压 8~12 遍。后期堆土的含水率控制在最优含水率 $w_y \pm 2$,压实系数 $\lambda_c \geq 0.90$,其中 λ_c 为土的控制干密度 ρ_d 和最大干密度 ρ_{dmax} 的比值;最大干密度宜采用击实试验确定。

逐步堆载设计方案按照地基极限承载力除以安全系数的方法得到地基极限堆载高度。地基极限承载力则根据土体的抗剪强度进行计算,土体抗剪强度的增长量依据附加应力及其固结度进行计算。

2.3 讨论

目前对于大面积堆载问题的设计计算,大多采用规范方法,但由于堆山工程的山体形状不规整,采用建立在条形基础上的规范公式进行设计计算不可避免的会产生误差,对于该类问题,应建立三维有限元计算模型,采用数值方法进行稳定性和沉降计算,分析设计参数,选择优化设计方案^[6]。

对于 D 区,山体填筑高度较高,荷载较大,一般地基处理方法很难满足要求。该处采用复合桩基,考虑到填筑高度的不同采用了不同桩长进行处理,做到区别对待,理论上是可行的,而且是较优的一种方案。山体填筑过程中,地基的强度主要表现为承载力和土坡稳定两个方面,最终应以土坡稳定控制为主。在允许地基土发生较大变形的前提下,复合桩基承载力得以大大提高。由于承台与承台之间是相互断开的,抵抗水平力较差,可通过在承台上方布置土工格栅形成桩-网复合结构,增强山体的整体稳定性。

3 软土地区淤泥质土堆山地基沉降与山体稳定性数值分析

3.1 计算模型

由于山体填筑所用土方为淤泥质粘土,且原有地基存在较厚的软土层,在淤泥质地基上填筑如此高的人工山体,需进行全面的分析论证。在初步设

计的基础上进行三维有限元数值计算,分析山体稳定性和地基沉降,验证和调整设计参数。从图 1 可知,拟建山体的形状较复杂,需对其中多个断面进行计算,本文以 30 m 高程山峰为例,利用大型三维有限元分析软件 ABAQUS 分析山体的稳定和地基沉降。

取 30 m 高程山峰坡度最大处山体的一半建立计算模型,在模拟山体时,将山体按等高线分成若干薄片,计算模型如图 2 所示。填土采用 Mohr-Coulomb 模型,地基土采用修正剑桥模型^[7],模型参

数列于表 2 中。

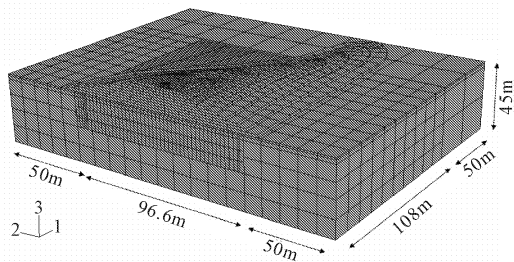


图 2 三维有限元计算模型

表 2 有限元计算参数

深度 /m	地基土									填土			
	e	e_{cs}	$k_v \times 10^{-7}$ /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$k_h \times 10^{-7}$ /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$k_{h,c=4} \times 10^{-7}$ /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	λ	K	M	ν	摩擦角 ϕ /°	凝聚力 c /kPa	弹性模量 E /MPa	μ
0~1	0.70	1.464	13.70	37.80	256.0	0.051	0.0136	1.15	0.30				
1~3	1.07	1.840	3.33	4.70	31.8	0.065	0.0173	1.01	0.35	30	25	10	0.3
3~20	1.35	3.880	3.19	5.32	36.0	0.206	0.0549	1.23	0.35				
20~40	1.02	1.320	4.01	5.27	35.7	0.141	0.0376	1.20	0.35				

3.2 稳定分析

3.2.1 计算工况

山体填筑方案设计时,应使加载进度与软土地基强度增长的速度相适应,如果加载过快,则大部分附加应力由孔隙水所承担,地基土强度不能相应提高,而且土的结构有可能被破坏,导致强度衰减,造成局部或整体的剪切破坏。因此,控制适当的加载进度是极为重要的。对于堆土总高度 30 m 的山峰,初步设计按 9 级加载,具体进度如图 3 所示。

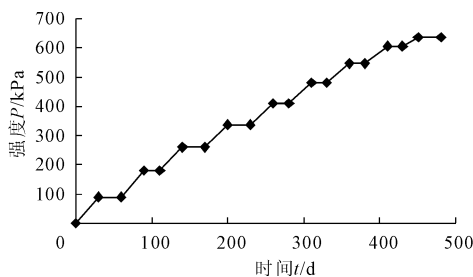


图 3 拟定加载进度

3.2.2 计算原理

采用基于重度增加法的有限元计算方法,重度增加法适用于在饱和沉积土上进行堆载的稳定分析,计算原理为保持岩土体的抗剪强度指标 c, ϕ 为常数,通过逐步增加重力加速度 g 的方式,反复进行有限元分析,直至边坡达到临界破坏状态,此时采用的重力加速度 g_{limit} 与实际重力加速度 g_0 之比即为该边坡的安全系数,即

$$F_s = g_{\text{limit}}/g_0 \quad (1)$$

采用坡面位移点突变作为失稳的判据,以迭代求解的不收敛性、广义剪应变贯通作为参考和补充判断边坡是否失稳破坏。

3.2.3 计算步骤

在有限元分析软件中的具体计算操作过程如下:

(1) 建立有限元分析模型,用实际的土体强度参数进行计算,若计算结果收敛或坡脚位移没有发生突变,表明此时坡体稳定,可进行下一步计算;若计算结果不收敛或坡脚位移突变,表明此时坡体不稳定,对应的安全系数小于 1。

(2) 增大 F_s 调整重力加速度,将加载的重力水平增大,增大的幅度视具体情况而定,将调整后的重力赋予计算模型,记录计算收敛后的坡脚位移。

(3) 重复第(2)步,不断增大 F_s 值,直至计算模型的坡脚位移发生突变或不收敛,则认为边坡发生失稳破坏,计算发散前一步的 F_s 值即为安全系数。

3.2.4 计算结果分析

施加第一级荷载,加载期为 1 个月,以重度增加系数 0.7 作为起点,逐渐增加重力加速度,逐一进行有限元分析,得到坡脚位移增量 Δu_1 与重度增加系数增量 ΔF_s 之比 $\Delta u_1/\Delta F_s$ 与重度增加系数 F_s 的关系,如图 4 所示,从图中可以看出,在重度增加系数达到 1.9 时坡脚位移产生突变,表明该级堆载作用下山体保持稳定。同理得出施加每一级荷载时的坡脚位移增量与重度增加系数增量之比 ($\Delta u_1/$

ΔF_s)与重度增加系数 F_s 的关系,计算得再载安全系数分别 1.3~1.9,因此,初步设计的分级堆载方案是可行的。

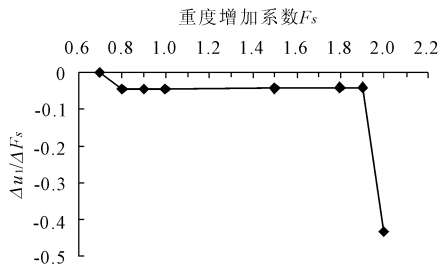


图4 第1级荷载 $\Delta u_1/\Delta F_s \sim F_s$ 关系曲线

3.3 地基最大沉降量计算结果

根据有限元计算结果,该处山峰地基中心点沉降最大,达 2.109 m,四周逐渐减小,形成锅状,图 5 为最终的沉降云图,可按沉降计算结果设置预堆砂垫层的厚度,即将砂垫层铺设成反扣的锅底形,使得山体沉降后砂垫层不出现明显低洼,保证孔隙水的排出。

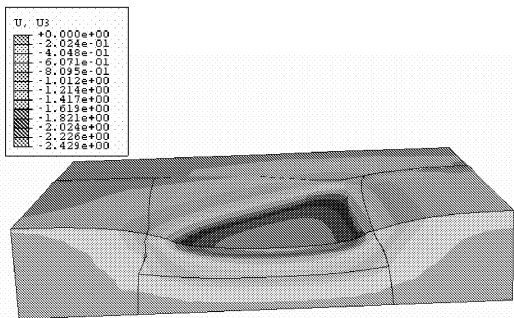


图5 沉降计算结果示意图

根据有限元计算结果,可确定不同区域预铺砂垫层的厚度和山体填筑过程中因沉降所需补充的土方量。

4 结 语

软土地区人工堆山工程的设计,需要解决的主

要技术难题是选择合适的地基加固方案和山体填筑方案,本文结合拟建工程的地质条件、造价和建设周期要求等,从相关工程经验、数值分析等角度系统阐述了软土地区淤泥质土堆山工程的设计方法。

(1) 地基处理设计主要采用强度控制原则,即主要以地层强度的增长为主要目标。为在工程造价和建设周期之间找到平衡点,可按最高堆山高度将拟建场地划分为若干区域,在堆土较高的区域采用钻孔灌注桩或高强度桩复合地基,在堆土相对较低的区域尽量采用排水固结法,充分发挥地基土的承载力。

(2) 为确保填筑过程中的山体稳定,先提出拟定加载进度,再通过数值方法进行验证。

(3) 为了保证工程质量,快速安全的填筑山体,需对施工和运行期的地基和山体进行严格的监控,检验施工方案的合理性,并对工程状态作出符合实际的评价以及获取可靠的设计分析参数,因此现场监测及原位测试也是堆山工程的一个重要环节。

参考文献:

- [1] 雷华阳,李鸿琦,刘祥君,等. 建筑垃圾堆山工程中软土地基稳定性评价探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(Z2): 589-593.
- [2] 何大为. 奥林匹克森林公园堆山工程沉降变形观测及其分析[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.
- [3] 盐城市勘察测绘局. 盐龙山山体工程工程地质勘察报告[R]. 2010.
- [4] 龚晓南. 地基处理手册(第三版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 盛崇文. 地基加固方案优选和地基设计新途径[J]. 水利水运科学研究, 1991, (2): 171-178.
- [6] 刘祥君,李鸿琦,雷华阳,等. 大型有限元软件 ANSYS 在堆山工程中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(Z2): 357-360.
- [7] 王金昌,陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社, 2006.