

杭州天子岭垃圾填埋场扩容可行性研究

Study on feasibility of enlarging capacity in Tianziling waste landfill

朱向荣^{1, 2}, 王朝晖³, 方鹏飞²

(1. 浙江大学 宁波理工学院, 浙江 宁波 315104; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027;
3. 深圳益田房地产开发公司, 广东 深圳 518026)

摘 要: 杭州天子岭垃圾填埋场进场的垃圾量与日俱增, 填埋场承受的压力越来越大, 现有场区的扩容问题变得非常重要。本文根据大量的土工试验, 在垃圾堆填体进行稳定性分析的基础上, 对场区的扩容可行性及其措施进行了探讨, 提出了切实可行的场区扩容方案。

关键词: 城市垃圾堆填土; 工程性质; 土坡稳定; 扩容

中图分类号: X 705; TU 432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)03-0281-05

作者简介: 朱向荣(1961-), 男, 浙江义乌人, 浙江大学岩土工程研究所教授, 博士生导师。主要从事软黏土力学、基础工程和环境岩土工程等方面的研究。

ZHU Xiang-rong^{1, 2}, WANG Zhao-hui³, FANG Peng-fei²

(1. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315104, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Shenzhen Yitian Real Estate Co., Shenzhen 518026, China)

Abstract: Pressure sustained by Tianziling waste landfill becomes great day by day for waste quantity increasing steadily. So the problem of enlarging capacity for waste landfill is very important. Based on geotechnical tests, the paper studies the slope stability and feasibility of enlarging capacity in Tianziling waste landfill, and proposes several feasible schemes.

Key words: municipal waste landfill; engineering properties; slope stability; enlarging capacity

1 前 言^{*}

随着城市建设的发展和居民生活的提高, 城市生活垃圾产量与日俱增, 这些垃圾不但污染环境, 破坏城市景观, 而且还传播疾病威胁人类的生命安全, 因此, 城市垃圾的治理是当今世界各国面临的重大问题。目前处理垃圾的方法主要采用堆肥、焚烧和填埋等。堆肥法处理量大, 极易污染地下水; 焚烧法投资大, 处理量少, 需经常对设备进行维修; 填埋法处理量大, 投资少, 并且是垃圾的最终处理方法, 广泛地被我国各大城市采用。

垃圾填埋场的设计必须进行广泛的土工分析。因此对垃圾土工程性质的研究显得非常重要。美国 Maine 州中心填埋场在现场对垃圾土进行了大直径直剪试验, 结果显示垃圾土的黏聚力 $c = 0 \sim 23$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 24^\circ \sim 41^\circ$ ^[1]。国内对垃圾土的研究起步较晚, 有关垃圾土物理性质指标和抗剪强度指标的试验资料极其匮乏。国内垃圾填埋场堆体外坡度的设计一般都采用国外的经验数据, 而国外的垃圾成分与国内大不一样, 垃圾填埋方式也有所区别, 垃圾堆填土的工程性质有很大的差异, 所以对国内垃圾土的各种工程性质指标进行试验研究显得非常必要。本文通过大量的室内试验测定了杭州天子岭垃圾填埋场垃圾土的物

理力学性质指标, 同时运用 UU、CU 等试验以期得到较为符合实际的 c 、 φ 值。然后在此基础上对填埋场的边坡进行了稳定分析, 并探讨了场区扩容的可行性及其方案。

2 工程概况

天子岭垃圾填埋场是杭州市为解决城市垃圾无害化处理而建设的山谷型填埋场, 并且是国内第一个规范化的山谷型卫生填埋场。

天子岭垃圾填埋场位于杭州市拱墅区沈家滨与余杭崇贤乡之间的青龙坞内, 于 1991 年 4 月建成, 设计年限为 13 年。垃圾填埋场从黄海标高 + 50.5 m 开始阶梯式填埋, 每层平台高 12.5 m。现已填到标高 + 102.5 m, 从垃圾坝顶(标高 + 65 m)开始, 已完成 + 77.5 m, + 90 m, + 102.5 m 三个平台。

随着社会经济的发展和人们生活水平的提高, 杭州地区垃圾产生量与日俱增。据统计, 1995 年杭州天子岭垃圾填埋场进场垃圾量增长速度为 15.7%, 1997 年为 26.3%, 1998 年为 30%。到 1998 年天子岭垃圾填埋场已消化垃圾 3.57×10^6 m³, 承受的压力越来越

* 基金项目: 浙江省建设厅(9617)和杭州市科委(96212012)资助
收稿日期: 2001-09-19

大。日益增长的环保要求,使得填埋场的选址和建设需要大量的资金,重新建场面临许多困难。因此对天子岭垃圾填埋场的扩容分析具有非常重要的意义。

3 垃圾土主要物理力学性质指标和强度指标^[2]

3.1 垃圾土的组成

垃圾土复杂的成分是导致其工程性质复杂的主要原因。垃圾堆填土由垃圾和分层填埋覆盖用的黏土层组成,其中垃圾的成分起决定性的作用。不同年份、不同时期垃圾的构成不尽相同,对一段历史时期以来杭州市垃圾的组成进行统计调查,结果见表 1 示。

表 1 1984~1998 年杭州市垃圾成分调查表

Fig. 1 Investigation of waste ingredient from 1984 to 1998 in Hangzhou %

年份	易腐动物	垃圾植物	无机物	杂 物							合计
				纸	布	塑料	金属	玻璃	竹木		
1984	0.28	39.99	56.57	0.78	0.65	0.33	0.47	0.35	0.58	3.16	
1985	0.27	33.82	63.91	0.54	0.39	0.25	0.25	0.26	0.31	2.0	
1986	0.83	38.44	56.5	1.09	0.8	0.62	0.38	0.91	0.43	4.23	
1987	0.87	43.52	50.69	1.08	0.98	0.73	0.46	1.12	0.46	4.92	
1988	0.93	44.74	49.57	1.02	0.82	0.63	0.54	1.25	0.5	4.26	
1989	0.82	46.20	48.23	0.96	0.77	0.64	0.56	1.31	0.51	4.25	
1990	1.30	41.36	51.44	1.16	0.96	1.03	0.59	1.27	0.76	5.73	
1991	0.98	46.11	45.44	1.51	1.18	1.54	0.9	1.4	0.94	7.47	
1992	1.57	49.58	40.74	1.71	1.17	1.68	0.62	1.87	0.94	7.98	
1993	1.67	50.2	38.76	1.8	1.63	2.5	0.84	1.87	0.95	9.59	
1994	1.67	50.2	38.76	1.8	1.63	2.5	0.84	1.87	0.95	9.59	
1995	1.91	50.53	37.25	1.74	1.15	3.14	0.83	1.94	1.01	9.81	
1996	2.00	53.28	33.17	1.8	1.5	5.02	1.12	1.42	0.39	11.5	
1997	2.99	55.21	24.14	3.68	2.23	7.62	0.98	2.09	1.2	17.8	
1998	3.35	49.13	24.03	4.9	3.8	11.3	0.67	1.15	1.66	23.48	

注: 资料来源于杭州天子岭垃圾处理总场。

3.2 容重

在填埋场+ 102.5 m、+ 90 m 和+ 77.5 m 平台上共钻取了 31 个试样。试验表明,试样容重变化范围在 8.0~ 16.8 kN/m³ 之间,而大多数试样在 8.0~ 13.8 kN/m³ 之间,见图 1 示。数据离散性较大,但总体趋势是随深度的增加而增加,见图 2 示。和其他地区垃圾堆填土的研究资料相比较范围略大^[3]。其原因是垃圾填埋前未进行严格的分选,造成塑料、树枝等含量过多,使部分试样的容重较小;另外,埋覆土采用附近地表的黏土,夹杂的石子也加大了土样的容重。

3.3 含水率

在 1998 年 4~ 6 月取原状试样 30 个,土样保存在蜡封的密闭试样筒内。由于垃圾堆填土的“颗粒”远远

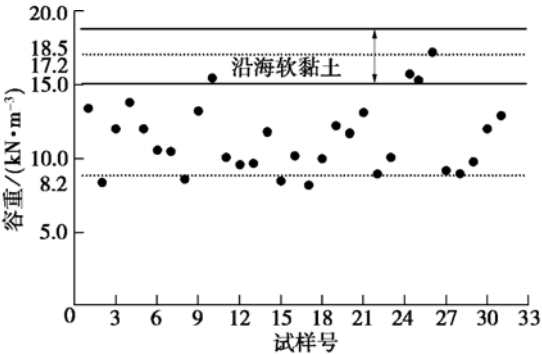


图 1 垃圾堆填土的密度分布

Fig. 1 Density of waste landfill

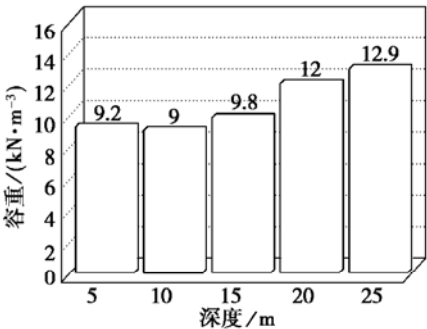


图 2 垃圾堆填土密度与埋深度的关系

Fig. 2 Relation between density and depth of waste landfill

大于一般的土,每次试验的土样试验量取普通土的 10 倍,甚至 100 倍,这样才使测定的含水率具有实际意义。测得的含水率大致在 20%~ 60% 之间,大多数试样集中在 30% 左右,数据离散性非常明显,见图 3 示。含水率随深度的增加逐渐减小,趋势并不十分显著。垃圾堆填土含水率与填埋季节和填埋方式有关,多雨潮湿季节垃圾堆填土的含水率一般较高。若填埋前对垃圾进行分选,并及时用渗透系数小于 10⁻⁷ cm/s 的黏土进行覆盖,通畅堆体排水路径,就可以减小气候条件的影响,有效地降低垃圾堆填土的含水率。

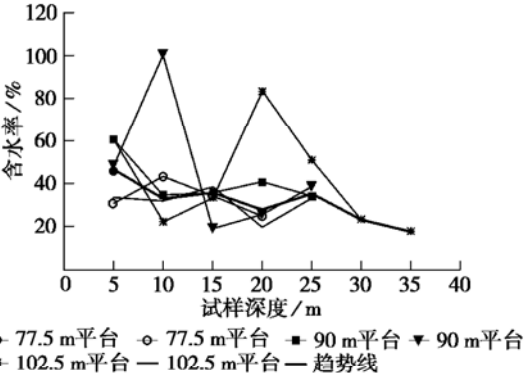


图 3 垃圾堆填土含水率的统计分析

Fig. 3 Statistics of water content for waste landfill

3.4 比重

比重试验采用真空抽气法。由于垃圾堆填土中的有机质含量较高,且可能含有可溶性盐,采用煤油作试

剂。试验前剔除土样中尺寸大于 0.5 cm 的颗粒,测得的垃圾堆填土比重和一般常见土相比较小,并且具有明显的离散性,见图 4 示。其中埋深在 20 m 以下垃圾堆填土的比重分布趋于均匀,其均值约为 2.2。

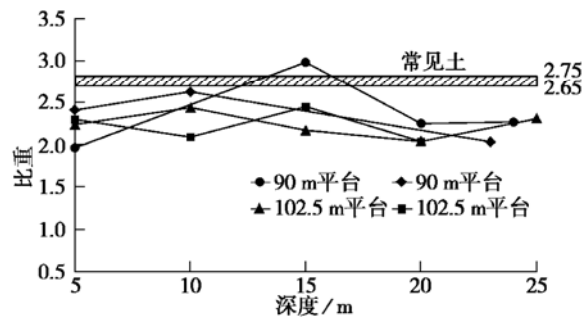


图 4 垃圾堆填土的比重分布

Fig. 4 Specific weight of waste landfill

3.5 UU 试验

抗剪强度是研究城市垃圾堆填土工程性质的一个核心内容。采用常规土工试验设备进行三轴不固结不排水剪(UU)和固结不排水剪(CU)来分析城市垃圾堆填土的力学性质及其抗剪强度。

在填埋过程中,垃圾堆填土在顶部压实机械和运输车辆的作用下,还没来得及固结和排水,此时垃圾土的性质更适合采用 UU 试验指标来描述。试验取了 12 个原状试样,从试样筒中切取试样尺寸为 $\phi 10\text{ cm} \times 20\text{ cm}$,试验剪切速度控制在 1.2 mm/min 左右。

试验得到的城市垃圾堆填土的 Mohr–Coulomb 强度参数指标见表 2 示。杭州天子岭垃圾堆填土 UU 三轴试验强度的变化范围为 $c_u = 0 \sim 10.2\text{ kPa}$, $\varphi_u = 10.5^\circ \sim 19^\circ$ 。

表 2 垃圾堆填土 UU 试验的强度参数指标

Table 2 Strength parameters of waste landfill in UU test

试样号	c_u / kPa	$\varphi_u / (^\circ)$	试样号	c_u / kPa	$\varphi_u / (^\circ)$
1	8	13	7	7.5	12.3
2	10.2	12	8	8	14.7
3	5.3	18	9	9	12.0
4	7.4	17	10	0	10.5
5	1.4	16	11	0	7.50
6	0	18	12	6.8	19.0

3.6 CU 试验

在分析垃圾堆填体长期稳定性问题时易采用 CU 三轴试验指标来描述。试验采用 9 组原状试样,试样制备过程与上述 UU 试验相同,试验加载速率取 1.2 mm/min。

在 CU 试验中测定的数据有孔压、侧压、轴向压力和轴向变形,因此可对城市垃圾堆填土进行总应力和有效应力分析。由试验确定的 Mohr–Coulomb 有效应力强度参数指标和总应力强度参数指标见表 3 示。

表 3 垃圾堆填土 CU 试验的有效应力强度和总应力强度参数指标

Table 3 Effective and total stress strength parameters in CU test

试样号	有效应力强度指标		总应力强度指标	
	c' / kPa	$\varphi' / (^\circ)$	c_{cu} / kPa	$\varphi_{cu} / (^\circ)$
13	3.8	38.7	0	25.2
14	1.3	36.9	6.2	21.0
15	6.3	36.9		
16	10.9	34.5	12.8	21.0
17	6.7	41.4	4.6	29.5
18	6.6	25.0	3.5	21.0
19	5.9	32.1	0	21.0
21	3.1	36.9	2.55	24.2

4 杭州天子岭垃圾堆填体的稳定分析

4.1 现阶段的稳定分析

垃圾堆填体稳定分析采用 REAME 程序^[4]进行,它是根据 Bishop 法编制的,可以考虑渗流条件下成层土的稳定问题,自动搜索具有最小安全系数的圆形滑动面,确定土坡的最小安全系数。

天子岭垃圾填埋场以 12.5 m 高作为一个填埋单元,坡度为 1:3。现有的垃圾堆填体划分为 4 层,见图 5 示。根据上述的试验结果确定各层垃圾土的土工参数指标,见表 4 示。

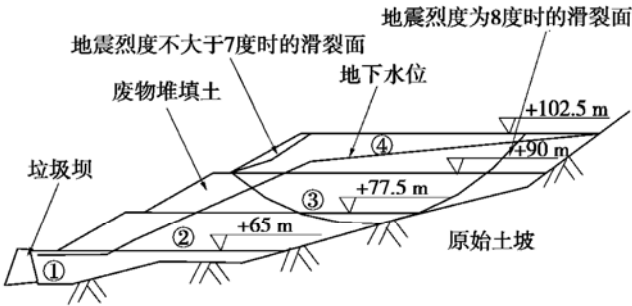


图 5 杭州天子岭垃圾填埋场体的现阶段稳定分析示意图

Fig. 5 Slope stability analysis of Tianziling waste landfill

表 4 各层垃圾堆填土的土工参数指标

Table 4 Geotechnical parameters of each layer

土 层	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	容重/(kN·m ⁻³)
①	3.5	21.0	12.47
②	8.7	25.25	11.5
③	1.92	22.07	11.3
④	0	25.2	10.0

天子岭垃圾堆填土体中的含水主要来源于大气降雨、地下水补给、地表径流和内部生物的降解反应。采用现场勘测的方法测得垃圾堆填体的地下水位,见表 5 示,表中数值为各孔水位离各自平台面的距离。考虑到工程的重要性,计算模型中坡底地下水位取垃圾

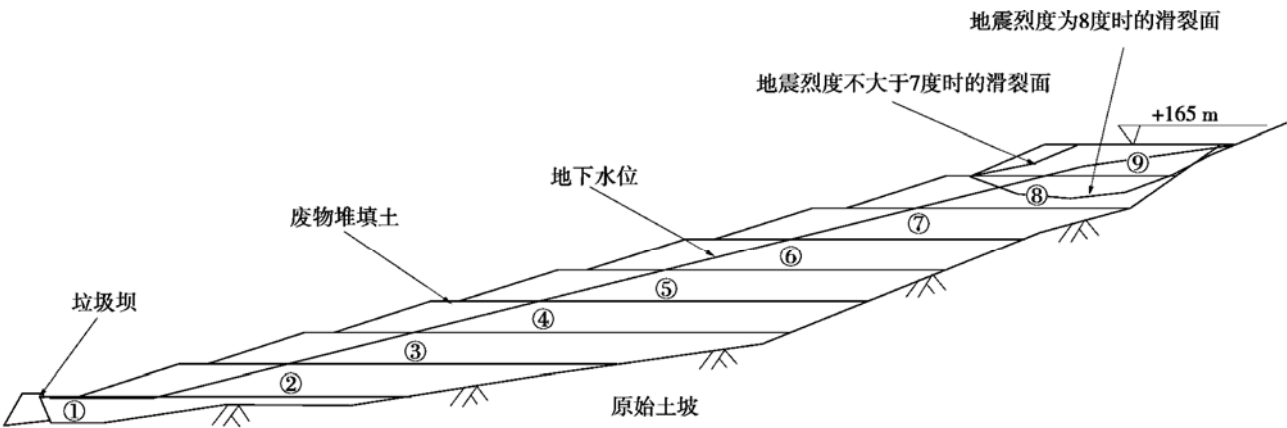


图6 杭州天子岭垃圾填埋场坡体达到设计填埋标高的稳定分析示意图

Fig. 6 Slope stability analysis of Tianziling waste landfill with its surface at design level

坝顶,坡顶取原土坡面。因在 1998 年 5 月底,杭州连续几日降雨,以上地下水位的取值是安全的。

表5 垃圾堆填体的地下水位

Table 5 Groundwater level of waste landfill

日期	地下水位/m					
	Z1 (+ 102.5 m)	Z2 (+ 90 m)	Z3 (+ 77.5 m)	Z4 (+ 77.5 m)	Z5 (+ 102.5 m)	Z6 (+ 90 m)
1998. 5. 18	9. 9	9. 3	10. 7	13. 4		
1998. 5. 22	10. 4	9. 7	10. 8	13. 6		
1998. 5. 26	10. 9	10. 3	11. 3	13. 7	13. 4	
1998. 5. 30	塌孔	10. 9	11. 8	14. 0	13. 9	
1998. 6. 3		10. 7	塌孔	13. 5	塌孔	11. 2

现阶段杭州天子岭垃圾堆填体的静、动力分析结果见表 6 示。根据杭州天子岭垃圾填埋场的重要性以及有关的工程经验,把 6 度地震时坡体的安全系数小于 1.2 作为判断可能发生滑坡的标准。经过分析,在无地震发生时,垃圾堆填土坡体的安全系数为 1.57;杭州地区的地震烈度为 6 度,垃圾堆填土坡体的计算安全系数为 1.26,大于 1.2,坡体是稳定的。

表6 REAME 程序稳定分析结果

Table 6 Results of slope stability by REAME program

填埋高程	安全系数			
	无地震	6 度	7 度	8 度
现阶段(+ 102.5 m)	1.57	1.26	1.14	0.72
设计高程(+ 165m)	1.53	1.24	1.12	0.78

4.2 设计填埋高程为+ 165 m 的坡体稳定分析

天子岭垃圾填埋场的设计填埋高程为+ 165 m,和垃圾坝的高差达 100 m。从上至下依次把垃圾堆填土坡体划分为 9 个单元,见图 6 示,水位的确定同上,各层垃圾堆填土土工参数见表 7 示。

坡体稳定分析结果表明,随着垃圾堆填土填埋层数的增加,堆体的安全系数略有降低,见表 6 示。在无地震时,垃圾堆填土坡体的安全系数为 1.53;在地震烈度为 6 度时的计算安全系数为 1.24,大于 1.2,坡体

是稳定的;地震烈度为 8 度时安全系数小于 1.0,坡体将发生滑裂破坏。确定的滑裂面位置见图 6 示,垃圾堆填体的滑裂破坏主要发生在上部一、二层中。

表7 各层垃圾堆填土的土工参数指标

Table 7 Geotechnical parameters of each layer

分层	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	容重/(kN·m ⁻³)
①	3.5	21.00	12.47
②	8.7	25.25	11.5
③	8.7	25.25	11.5
④	8.7	25.25	11.5
⑤	2.92	22.07	11.3
⑥	2.92	22.07	11.3
⑦	2.92	22.07	11.3
⑧	2.92	22.07	11.3
⑨	0	25.20	10.0

5 杭州天子岭垃圾填埋场的扩容可行性分析

增加垃圾填埋场场区容量有许多方法,例如分选垃圾、分类填埋,提高压实效果,改善垃圾堆填体内化学条件,加快物理、化学和生化反应等。本文针对杭州天子岭垃圾填埋场的具体情况,从岩土工程的角度提出了两种扩容方案,并进行了稳定分析。

5.1 填埋至+ 190 m 平台

天子岭垃圾填埋场的设计填埋高程为+ 165 m,在设计最高平台上再加填两个作业平台。这两个平台依然采用原来的填埋方式,以 12.5 m 为一个填埋单元高度,坡度为 1:3,每层平台宽 10 m。各计算单元的划分以及地下水位的确定同前,分析结果见表 8 示。分析表明,再增加两个填埋平台,垃圾堆填体仍可以保持整体的稳定性。即使在地震烈度为 6 度时,安全系数仍大于 1.2,坡体还处于稳定状态。此时+ 190 m 平台顶宽 14.3 m,不宜再建填埋平台。

表8 场区扩容 REAME 程序稳定分析结果

Table 8 Analyzed results of enlarging capacity by REAME program

填埋高程	安全系数			
	无地震	6度	7度	8度
增加第一层(+ 177.5 m)	1.44	1.20	1.09	0.84
增加第二层(+ 190.0 m)	1.51	1.24	1.12	0.88

采用此措施,按平台长 150 m,垃圾堆填土的密度为 1 t/m^3 计,填埋场可增加库容 266000 t。存在的问题是必须在原设计的基础上增加铺设道路的工程量。

5.2 部分填埋坡度改为 1:2.9

维持原设计填埋高程+ 165 m 不变,采用改变填埋坡度的措施增加库容。经过多次运算,对不同坡度组合情况下的垃圾堆填土坡体稳定情况进行分析,见表 9。

表9 不同坡度场区扩容 REAME 程序稳定分析结果

Table 9 Analyzed results of different slope ratio by REAME program

填埋高程 /m	坡比	安全系数			
		无地震	6度	7度	8度
+ 115	1:2.8	1.46	1.19	1.08	0.67
	1:2.9	1.58	1.25	1.13	0.67
+ 127.5	1:2.9	1.5	1.23	1.12	0.69
+ 140	1:2.9	1.65	1.20	1.09	0.73
+ 152.5	1:2.9	1.44	1.18	1.07	0.72
	1:3	1.47	1.20	1.10	0.73
+ 165	1:3	1.46	1.2	1.09	0.77

当填埋至+ 115 m 时,坡度等于 1:2.8 的安全系数为 1.46,满足静力稳定的要求,地震烈度为 6 度时安全系数就减少到 1.19。考虑到填埋场失稳将产生污染及引起一系列的严重后果,应取用 1:2.9 的坡度。

当垃圾堆填土坡体填埋到+ 152.5 m 时,已不适用于采用 1:2.9 的坡度。地震烈度为 6 度时填埋体的安全系数为 1.18,小于 1.2。为确保垃圾填埋体的安全与稳定,开始采用 1:3 的坡度,直至填埋到+ 165 m 的设计高程。

虽然填埋坡度比的改变较小,上述措施还是能有效地增加场区库容,填埋垃圾堆填土的增加量为 27000 t(按平台长 150 m,垃圾堆填土密度为 1 t/m^3 计)。和前一种方法相比,该措施的优点是不用增铺进场道路,节约工程施工量和投资。存在的问题是对填埋操作人员的要求比较高;另外场区增容量有限,仅为前一措施的 10% 左右。

为充分利用现有的填埋场地,追求更大的场区增容量,在改变原设计坡度的基础上,再增填两个平台(每层高 12.5 m,顶面宽 10 m),最终填埋高程达到+ 190 m,填埋方案如表 10 示。经过稳定分析计算,在地震烈度为 6 度的情况下,安全系数大于 1.2,垃圾堆填土坡体保持稳定状态。采用此措施后,在上述措施的基础上可再增容 270000 t,总的扩容量达到 297000 t。

表10 不同填埋方案情况下计算表

Table 10 Results under different landfilling schemes

填埋高程/m	+ 115	+ 127.5	+ 140	+ 152.5	+ 165	+ 177.5	+ 190
坡比	1:2.9	1:2.9	1:2.9	1:3	1:3	1:2.8	1:2.9
安全系数*	1.25	1.23	1.20	1.21	1.20	1.26	1.25
增加库容*/ 10^3 t	1.17	3.52	5.86	7.03	9.38	135.3	134.2
累计增加库容/ 10^3 t	1.17	4.69	10.6	17.6	27.0	162.3	297.0

注:* 地震烈度为 6 度时坡体的安全系数;* * 与原设计相比。

综上所述,采用后一种措施,需改进坡比和增铺进场道路,在一定程度上增加了工程量。同时,这种方法可以显著提高垃圾的填埋量,扩容效果十分可观,并且可以保证垃圾堆填土坡体的稳定性。从建设资金和工程施工量方面,与重新建场与增铺道路相比较,采用后一种措施是可行的。

6 结 论

(1) 采用土工试验方法得出杭州天子岭垃圾堆填土容重在 $8.0 \sim 16.8 \text{ kN/m}^3$ 之间;含水率在 20% ~ 60% 之间,大多数试样在 30% 左右;堆填土的比重比常见土要小,在 1.92 ~ 2.62 之间,离散性较大。

(2) 由不固结不排水三轴试验得出总应力强度指标:黏聚力为 0 ~ 10.2 kPa,内摩擦角为 $10.5^\circ \sim 19^\circ$;固结不排水三轴试验的有效应力强度指标:黏聚力为 1.3 ~ 16 kPa,内摩擦角为 $25^\circ \sim 41.4^\circ$;固结不排水三轴试验的总应力强度指标:黏聚力为 0 ~ 12.8 kPa,内摩擦角为 $21^\circ \sim 29.5^\circ$ 。

(3) 运用 REAME 程序对杭州天子岭垃圾处理总场垃圾堆填土坡体进行了稳定性分析,并对场区的扩容可行性及其措施进行了探讨,提出了可行的场区扩容方案:填埋至+ 190 m 和部分填埋坡度改为 1:2.9,可分别增加库容 266000 t 和 27000 t。

(4) 在改变原设计坡度的基础上再增填两个平台后重新进行稳定性分析,结果表明,地震烈度为 6 度时垃圾堆填体仍保持稳定,同时可增容 297000 t。

参考文献:

- [1] Richardson G, Reynolds D. Geosynthetic considerations in a landfill on compressible clays[A]. In: Proceeding of Geosynthesics 91 (2)[C]. St Paul MN: Industrial Fabrics Association International, 1991.
- [2] 王朝晖. 城市废物堆填土的工程性质及稳定分析[D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [3] 钱学德, 郭志平. 城市固体废弃物(MSW)的工程性质[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 1~ 6.
- [4] Huang Yang H. Stability analysis of Earth Slopes[M]. New York: VNR, 1983.