

# 金口垃圾填埋场内大型建筑物地基基础 及安全性研究

杨明亮<sup>1</sup>, 骆行文<sup>1</sup>, 喻晓<sup>2</sup>, 姚海林<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉市环境卫生科学研究设计院, 湖北 武汉 430015)

**摘要:** 金口垃圾填埋场内拟建一大型垃圾中转站, 该垃圾填埋场还没有达到稳定性化, 必然对建筑物地基基础结构及安全性有很大影响。通过垃圾土的室内土工试验、现场平板载荷试验以及边坡反分析, 对垃圾土的压缩特性、承载特性以及抗剪强度进行了研究, 得出了场内垃圾土是一种含有可降解有机质和大量纤维成分的疏松的无粘性的特殊软土, 具有高压缩性、不均匀沉降特性、抗剪强度较高和承载能力较高等工程力学特性。对建筑物的基础进行选型分析, 提出主体工程宜采用大直径钻孔灌注桩基础, 配套工程宜采用能承受较大变形和不均匀沉降影响的筏板基础, 而上部结构宜采用框架结构。根据经验公式, 计算垃圾土的负摩阻力后, 提出基桩设计时应考虑负摩阻力对基桩承载力的影响。通过化学测试及调研, 得出垃圾土具有中腐蚀性, 渗滤液具有强腐蚀性, 提出桩基础必须采取三级防护措施。垃圾渗滤液中含有污染物质种类多且浓度高, 分析了在基桩施工过程中渗滤液对地下水的污染途径, 提出包括全护筒支护、膨润土泥浆护壁以及减少钻孔成孔至灌注混凝土的间隔时间等控制污染的主要措施, 经理论计算分析, 这些措施能有效降低渗滤液对地下水的污染程度。对填埋场气体进行分析, 填埋场内已含有大量有害气体, 且仍处于产气高峰期, 提出施工前必须强行排气, 进行了特殊的覆盖层设计, 以保证工作人员及建筑物的安全。

**关键词:** 土力学; 垃圾土; 物理力学特性; 垃圾填埋场; 建筑物; 地基基础; 安全性; 城市固体垃圾

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)04-0628-10

## RESEARCH ON FOUNDATION AND SECURITY OF THE EDIFICE IN JINKOU MUNICIPAL REFUSE LANDFILL

YANG Ming-liang<sup>1</sup>, LUO Xing-wen<sup>1</sup>, YU Xiao<sup>2</sup>, YAO Hai-lin<sup>1</sup>

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Wuhan Environmental Sanitation Scientific Research and Design Institute, Wuhan 430015, China)

**Abstract:** The aging process of Jinkou municipal refuse landfill in Wuhan city, China, is still in the unstable period, and it will greatly influence the foundation and security of the large-scale refuse transfer station which will be built on the landfill. Based on indoor geotechnical experiments, in-situ plate loading test and slope reverse analysis, the compressibility and the bearing capability and shearing strength of refuse soil are studied, and the refuse soil is defined as a kind of special loose cohesionless soft soil with organism and a great deal of fiber. The refuse soil is of high compressibility, uneven settlement characteristic, and high bearing capacity and shear strength. Foundation types for this case is discussed, the large-diameter bored pile foundation is chosen for the main part of project, and the raft foundation for annexes to deal with the problem of high and uneven foundation settlement. Based on the empirical formula, the negative friction caused by the settlement of landfill should be

收稿日期: 2003-09-05; 修回日期: 2003-11-06

基金项目: 湖北省环境岩土工程重点实验室项目(T000305)

作者简介: 杨明亮(1971-), 男, 1997年于武汉理工大学获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: mlyang@whrsm.ac.cn.

considered in the bearing capacity of piles. Based on chemical test and investigation in site, it is concluded that the refuse soil is of medium corrosively and the leachate is of intense corrosively to piles. Then, the three-level protective measures for reinforced concrete are put forward. There are plenty of pollutants of higher concentration in the leachate. After analysis on pollutant pathway to underground water in construction, major pollution-controlled measures are put forward, including whole-length steel tube timbering of bore, bentonite-mud protection of bore wall, and reduction of interval time between the ending of bore drilling and the beginning of concrete filling. Theoretic calculation shows that these measures are available to reduce the contaminated degree of underground water. There are plenty of poisonous gases in the landfill and production of is still in the fastigium. The gases should be discharged before construction for long-term security of workmen and constructions, so a special cover layer is designed.

**Key words** : soil mechanics ; refuse soil ; physical and mechanical property ; municipal refuse landfill ; building ; foundation ; security ; municipal solid waste(MSW)

## 1 引言

武汉市金口垃圾填埋场剩余可容库容仅能维持半年左右,为缓解汉口垃圾处理的紧张局面,拟在现金口垃圾填埋场内建设一大型垃圾转运站。垃圾填埋场拟建场区内垃圾的封场时间仅 4~5 a,填埋场地还未达到稳定化。在未达到稳定化的填埋场上如何兴建大型建筑物?以及如何对其安全性进行评估?针对这些问题国内尚没有进行相关的研究。而研究建筑物地基基础及安全性对垃圾填埋场内建筑物的设计、施工以及安全营运有非常重要意义。

笔者首先研究了垃圾土的物理力学特性及渗滤液的化学特性,通过室内及现场试验,分析了垃圾土的物理力学特征及沉降变形规律,并选择适合垃圾填埋场的地基基础形式;提出分析垃圾土及渗滤液对地基基础结构物的腐蚀性,分析建筑物施工时对地下水造成的污染;最后分析填埋气体对建筑物和工作人员的影响,并根据研究分析结果,提出一系列解决垃圾填埋场建筑物地基基础不安全因素的工程措施。

## 2 工程概况

金口垃圾填埋场原始地面高程多在 20~21 m,地形相对平坦,地貌单元属长江二级堆积阶地,且靠近前缘地带。场内的垃圾直接填埋到未经防渗处理的地表上。场区地层分布较简单,从上到下分别为:垃圾层厚 10 m,杂填土平均层厚 8.2 m,素填土平均层厚 1.4 m,粘土层厚约 25 m,砂砾石层厚约 4 m,粉砂质泥岩未揭示层厚。砂砾石层所含地下

承压水与分布于北面的大面积该层的地下水连成一体,丰、枯水期承压水头高程分别在 22.17, 20.84 m。该垃圾填埋场将粘土层作为天然防渗层,防止垃圾渗滤液向地下承压水体中渗透。

场区内垃圾的填埋工艺为:垃圾进场后被碾压压实,每 2.5 m 覆盖一层 0.2 m 厚的粘土,直至达到设计填埋标高。垃圾填埋至设计标高后加 0.5 m 厚的建筑垃圾和 0.5 m 厚的粘土层,进行封场植草绿化。由于填埋库区深度仅 10 m,基本上是一次性从场底填埋至场顶封场标高后覆盖封场。拟建场区内垃圾的填埋时间及封场时间均为 1999 年。

场区内的垃圾渗滤液采取的是盲沟导流至集污井,经过调节池调节以及系统处理后排到场外的城市污水排放明渠。根据监测,垃圾渗滤液处理前后的水质情况见表 1。

表 1 垃圾渗滤液处理前后的水质

Table 1 The water quantity of the leachate before and after treatment

指标	pH 值	COD <sub>Cr</sub> /mg · L <sup>-1</sup>	氨氮 /mg · L <sup>-1</sup>	总磷 /mg · L <sup>-1</sup>	总固体 /mg · L <sup>-1</sup>	大肠菌值 /个 · L <sup>-1</sup>
处理前	7.34	8 192.86	1 646.10	1.90	530.90	6.75×10 <sup>3</sup>
处理后	7.53	541.76	670.51	0.79	7.81	0.575

场内填埋沼气(LFG)的排放全部采取沼气井排放的方式。在设置初期,井口的沼气流量和压力都较大,目前,井口的气流和气压均不明显。

拟建大型垃圾转运站的主体工程有转运车间及上、下行引桥等;配套工程有汽修车间、机修车间、洗车台、停车场、地磅房、办公楼、食堂、职工宿舍和连接公路等。

### 3 垃圾土的物理力学特性

#### 3.1 垃圾试样及试验设计

城市生活垃圾土为无粘性土，垃圾土中含有大量随机分布且不易分解的塑料制品，特别是塑料薄膜，虽然其重量占垃圾的份量不大，但其体积占垃圾土的比例却较大，且其形体尺寸一般在几厘米至二十几厘米，使垃圾土具有与“加筋土”类似的力学特征。针对这一含有大量纤维成分且无粘性的特殊土，如何确定垃圾土试样的尺寸，如何在填埋场取原状土样以及如何进行垃圾土试验，目前还没有统一可行的规范，是环境岩土工程师的难题之一。

考虑到垃圾土的特征，本次在拟建场区内，随机选取 4 个取样点，在距地表 1 m 处，采用人工切割方法，每一取样点取 1 个 0.4 m×0.4 m×0.4 m 的原状垃圾试件，小心装入木箱并密封，拟进行天然密度、侧限压缩试验；同时在各取样点处，分别取若干扰动样，拟进行天然含水量、成分分析、比重试验等。

在拟建场区内，随机选取 3 个现场平板载荷试验点，通过现场试验确定垃圾土的天然地基承载力。

另外，在拟建场区附近有一大开挖坑，坑深为 6.5 m，坑底有渗滤液，坑边坡坡度为 80°。边坡顶面有临时公路宽约 3 m，并有垃圾车进出，公路边线距坡顶线约 1 m。边坡形成已有较长时间，其间经历了阴雨和大雨，仍保持稳定。根据垃圾土边坡实际地形和受荷条件，结合室内试验结论，可通过边坡反分析计算，估算垃圾土的抗剪强度指标。

#### 3.2 垃圾土的室内土工试验

##### 3.2.1 天然密度

先称取垃圾箱的重量，将垃圾土装箱后，称取箱和土的重量，测量土体体积，可计算出大试件垃圾土的天然密度，结果见表 2。

##### 3.2.2 天然含水量

将扰动垃圾土样，装入大不锈钢容器内，置于 60° C 左右的恒温箱内，烘 24 h 左右，使其烘干至恒重。将各取样点的测试结果求平均值，试验结果见表 2。

##### 3.2.3 比重试验

将烘干土样充分混合粉碎，取 50 g 左右置于 500 mL 比重瓶中，称瓶土质量后，注入煤油约 200 mL，完全浸没垃圾土，然后置入真空干燥器内进行真空抽气，真空度需接近一个大气压，并保持 1 h 以上。垃圾土的比重采用下式计算：

$$G_s = \frac{m_{12} - m_1}{m_{13} + (m_{12} - m_1) - m_{123}} G_3 \quad (1)$$

式中： $m_1$  为瓶的质量； $m_{12}$  为瓶和垃圾土质量； $m_{13}$  为瓶和煤油质量； $m_{123}$  为瓶、垃圾土和煤油质量； $G_3$  为煤油的比重值，其值为 0.799 5。垃圾土的比重值见表 2。

##### 3.2.4 垃圾成分含量试验

取烘干后土样约 4 kg，按 11 类组份分类法手工拣，先拣出易分辨的 9 类分别称量，然后用灼烧法确定灰渣和其他有机物量。试验结果如表 3 所示。武汉市环境卫生科学研究设计院于 1998 年对武汉市生活垃圾进行组份分析，其结果见表 4<sup>[1]</sup>。将本次试验结果与 1998 年垃圾组成相比较可知：(1) 在生活垃圾中含量最大的厨余成分经 4~5 a 后，大部分已降解，未降解有机物含量约 18.75%；(2) 垃圾土中塑料的含量虽然只有 16.10%，但是其密度低导致

表 2 金口垃圾填埋场垃圾土基本物理性质指标

Table 2 Basic physical indexes of MSW in Jinkou municipal refuse landfill

取样点	天然密度/g·cm <sup>-3</sup>	天然含水量/%	干密度/g·cm <sup>-3</sup>	比重	孔隙比 e	孔隙率 n/%	饱和度 S <sub>r</sub> /%
1 <sup>#</sup>	0.936	32.2	0.708	2.006	1.833	64.7	35.2
2 <sup>#</sup>	0.886	34.3	0.660	1.960	1.970	66.3	34.1
3 <sup>#</sup>	0.742	18.1	0.628	1.818	1.895	65.5	17.4
4 <sup>#</sup>	0.793	24.0	0.640	2.004	2.131	68.1	22.6
平均值	0.839	27.2	0.659	1.947	1.954	66.1	27.1

表 3 金口垃圾填埋场垃圾的成分含量

Table 3 Content of components of MSW in Jinkou municipal refuse landfill

塑料	橡胶	纺纤	纸张	毛骨	木屑	其他有机物	灰渣	玻璃	金属	陶瓷砖石	%
16.10	0.48	0.92	0.73	1.04	1.88	10.41	61.20	1.65	0.64	4.95	

表 4 1998 年武汉市城市生活垃圾组成

Table 4 Content of components of MSW in 1998 in Wuhan

厨余	废纸	纤维	竹木制品	塑料橡胶	有机物合计	废金属	玻璃陶瓷	灰渣	其他	无机物合计
39.16	4.33	1.33	3.20	7.50	55.52	0.69	6.55	32.74	4.50	44.48

其体积与垃圾土体积之比相当大，且其随机分布于垃圾土中，并具有良好的抗拉变形的能力，因此必然使垃圾土具有“加筋土”的力学特征。

3.2.5 侧限压缩试验

将垃圾土试件装入尺寸为 400 mm×400 mm×450 mm 的钢筒内，钢筒底部无排水孔，两侧分别有一出气孔。将钢筒置于反力架平台上，进行侧限压缩试验。

加压等级分别采用 0, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1 500 kPa。稳定标准为每级压力下固结 24 h。试验结果如表 5 和图 1 所示。

表 5 压缩试验结果表

Table 5 The result of compression test

压力 P/kPa	孔隙比				
	1 <sup>#</sup>	2 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	平均值
0	1.833	1.970	1.895	2.131	1.957
25	1.832	1.893	1.873	2.077	1.920
50	1.748	1.789	1.721	1.867	1.780
100	1.549	1.617	1.501	1.601	1.570
200	1.351	1.423	1.284	1.389	1.360
400	1.178	1.364	1.070	1.226	1.210
800	0.988	1.209	0.863	1.074	1.030
1 500	0.838	1.044	0.707	0.950	0.880

根据试验结果，垃圾土的压缩系数  $a_{v1-2} = 2.05 \text{ MPa}^{-1}$ ，压缩指数  $C_c = 0.60$ ，表明场区内垃圾土是一种高压缩性土，在较低的附加荷载作用下垃圾土地基将产生较大的沉降量。

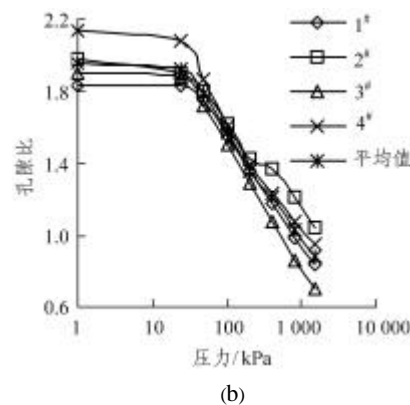
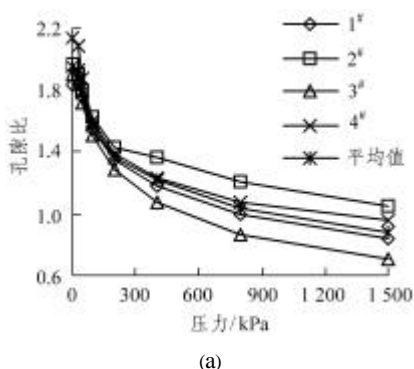


图 1 垃圾土的压缩曲线

Fig.1 The compression curves of refuse soil

由图 1(b)可知，垃圾土试样存在前期固结压力，其值在 20 kPa 左右，这与取样点处上覆的 1 m 厚土体相关，即取样点处的垃圾土在上覆荷载作用下，历时 4~5 a，已基本完成其固结。

根据垃圾土的室内土工试验，可以给垃圾土一个较完整的定义，即本填埋场内的垃圾土是一种含有可降解有机质和大量纤维成分的疏松的无粘性的特殊软土。

3.3 垃圾填埋场现场平板载荷试验

在拟建场区内进行平板载荷试验，采用 0.707 m×0.707 m 刚性载荷板，反力平台采用堆载法。试验结果如图 2 所示。

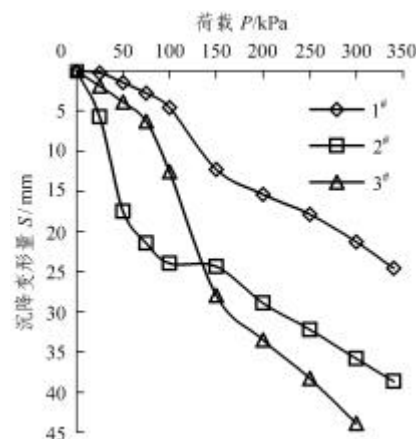


图 2 P-S 曲线图

Fig.2 P-S curves

由图 2 可看出本场区内垃圾土的  $P-S$  曲线具有以下特征：

(1) 垃圾土的  $P-S$  曲线可分为 4 个变形阶段，即直线变形阶段、局部剪切阶段、拉伸强化阶段和完全破坏阶段。其中，拉伸强化阶段也叫“上凹”阶段，当垃圾土体变形到一定程度时，由于垃圾土中的“加筋”项的拉应力承担了作用于垃圾土体上的大部分荷载，使垃圾土体变形经历一段时间后能趋于稳定。其他软土地基没有这一沉降变形阶段。因此，说明垃圾土是一种极特殊的软土。

(2) 试验结果离散性较大，说明垃圾土地基在荷载作用下具有不均匀沉降变形特征。

(3) 本次试验过程中，荷载达到拟定的终止值时， $P-S$  曲线仍未出现完全破坏阶段，说明垃圾土地基的极限承载力大于 300 kPa。

根据《建筑地基基础设计规范》(GB5007-2002)，按相对沉降变形量  $S/d$  来确定垃圾土的承载力特征值， $d$  为方形承压板的边长，取  $S/d = 0.01 \sim 0.015$  所对应的荷载为承载力特征值(表 6)。

表 6 垃圾土的承载力特征值  
Table 6 Baring capability of MSW

试验点	$S/d = 0.01$ 时		$S/d = 0.015$ 时	
	沉降量 $S$ /mm	$P_{0.01}$ /kPa	沉降量 $S$ /mm	$P_{0.015}$ /kPa
1 <sup>#</sup>	7.07	115	10.61	136
2 <sup>#</sup>	7.07	28	10.61	36
3 <sup>#</sup>	7.07	80	10.61	92

由表 6 得出，垃圾土的承载力特征值离散性很大，最小值与最大值相差近 4 倍，根据规范要求，不能取试验的平均值作为该土层地基承载力特征值。

由该试验得出，在垃圾土上进行建筑物结构设计时，应充分考虑到垃圾土不均匀沉降变形的特性。

### 3.4 垃圾土的抗剪强度

分析大开挖坑形成的垃圾土边坡可知：(1) 由于该边坡形成已有较长时间，其间经历了阴雨和大雨，仍保持稳定，故边坡稳定性系数可取 1.10。(2) 路面附加荷载取 20 kPa。(3) 根据室内试验的结果，以及垃圾填埋施工工艺，将垃圾土、粘土和顶部的填土简化为一种土体，取天然容重为  $10 \text{ kN/m}^3$ 。反分析计算方法采用圆弧条分法。根据垃圾土边坡的地形、边界条件及稳定条件，可估算出垃圾土的抗剪强度指标。计算结果见表 7。

文[2]在某垃圾填埋场进行了现场静力触探试验和固结不排水试验，并提出了如表 8 所示垃圾土

表 7 边坡稳定条件反演抗剪强度指标

Table 7 Calculated indexes of shear strength based on stable conditions of slope

$j / (^\circ)$	$c / \text{kPa}$
0	24.67
10	20.43
15	18.35
20	16.52
25	14.74

表 8 垃圾土的物理力学指标

Table 8 Physical indexes of refuse soil

深度	$c$ 标准值 /kPa	$j / (^\circ)$	天然容重 /kN · m <sup>-3</sup>	孔隙比 $e$	干容重 /kN · m <sup>-3</sup>
Z 4.5 m	6.0	17.0	10	3.65	7.0
4.5 m < Z 14 m	11.5	17.0	10	3.25	7.6
Z > 14 m	14.5	17.5	10	2.50	8.4

的物理力学指标。与本场区垃圾土的物理力学性质相比较可知，本场区的上层垃圾土的孔隙比小于表 8 中垃圾土的孔隙比，因此表 7 中的抗剪强度指标较大是合理的。

张季如、陈超敏等人采用直剪试验，对取自不同深度垃圾试样的强度值进行线性拟合分析，结果表明，粘聚力  $c$  变化范围为  $0 \sim 29 \text{ kPa}$ ，随着取样深度的增加，粘聚力普遍增大。而垃圾土内摩擦角极为稳定，相差不超过  $1^\circ$ ， $j$  值高达  $24.4^{[63]}$ 。其抗剪强度指标值变化特征与表 5 类似，但其数值偏大一些。该试验的试样直径为 200 mm，高 60 mm，虽然大于一般土体的试样尺寸，但对于垃圾土而言，如塑料薄膜等“加筋相”的长度一般在 150 mm 左右，因此，该试验的结果比真实值有所偏大。

根据以上分析可知，通过反分析计算的抗剪强度指标是合理的。结合垃圾土内摩擦角极为稳定这一特点，场区内垃圾土的抗剪强度指标的取值为  $c = 16.52 \text{ kPa}$ ， $j = 20^\circ$ 。

根据《建筑地基基础设计规范》(GB5007-2002)第 5.2.5 条，取地基宽度为 8 m，基础埋深为 0 m，采用抗剪强度指标确定垃圾土地基承载力特值为 124 kPa。根据太沙基地基极限承载力理论进行计算<sup>[4]</sup>，垃圾土地基的破坏形式为整体滑移，采用抗剪强度指标确定地基的极限承载力为 362 kPa，与现场平板载荷试验确定的地基承载力相近。

因此,场区内的垃圾土具有较高抗剪强度,使垃圾土地基具有较高的承载能力。

#### 4 垃圾土地基的沉降变形分析

垃圾土地基的沉降共分 2 类: 填埋场自然沉降和附加荷载作用下垃圾土地基的固结沉降。其中自然沉降包括在自重作用下填埋场的固结沉降和因生物降解引起的填埋场沉降。

根据垃圾土成分试验结论,大部分容易降解的有机质已降解,垃圾土的成分正趋于稳定。垃圾土的结构松散、含水量较低和持水能力差,其固结沉降主要是由垃圾土中空气向外排出和垃圾土骨架的调整蠕变引起,主固结沉降变形需用的时间较短。因此,填埋场的自然沉降大部分已经完成,本次主要计算附加荷载作用下的地基固结沉降变形。

根据《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ017-96),软土地基的主固结沉降  $S_c$  计算式如下:

$$S_c = \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e_{vi}}{1 + e_{0i}} \Delta h_i \quad (1)$$

式中:  $n$  为垃圾沉降计算分层层数;  $\Delta h_i$  为第  $i$  层计算分层厚,取 0.5 m;  $e_{0i}$  为第  $i$  层分层中点,垃圾土在自重应力作用下稳定时的孔隙比;  $e_{vi}$  为第  $i$  层分层中点,垃圾土在自重应力与附加应力作用下稳定时的孔隙比。

设条形路基宽 8 m,垃圾层厚 10 m,均布附加荷载取 28 kPa,则有主固结沉降量  $S_c = 0.30$  m。

路基的总沉降量  $S$  采用沉降系数  $m$  与主固结沉降量  $S_c$  计算:

$$S = mS_c \quad (2)$$

根据垃圾车运载大于 20 t 及垃圾土的高压缩性特征,宜取  $m = 1.7$ 。则路基总沉降量为 0.51 m。

在无三轴试验数据的情况下,高压缩性土的瞬时沉降量可按总沉降量的 30% ~ 40% 计算<sup>[5]</sup>。当取 30% 进行计算时,瞬时沉降量约为 0.15 m,主固结沉降与次固结沉降量约为 0.36 m。

当均布荷载为 28 kPa 时,路基的沉降量不能满足一级公路一般路堤段的工后沉降要求。

在相同的附加应力作用下建筑物的地基沉降变形量大于条形路基的沉降变形量。即垃圾土地基沉降变形量必然超过一般建筑物地基变形允许值。

因此,垃圾土地基是一种特殊软土地基,在建

筑物荷载作用下,地基的沉降量不能满足地基变形的允许要求。如何确保建筑物结构能承受地基的较大沉降变形量以及不均匀沉降变形量,是场区内建筑物基础的设计关键。

#### 5 建筑物的基础选型

拟建大型垃圾转运站的主体工程的动荷载大,对地基沉降和不均匀沉降要求较高。如果采用浅基础,主体工程的建筑结构容易因地基沉降和不均匀沉降过大而破坏,另外引桥与转运车间的荷载差异较大,基础间必然有很大的不均匀沉降,使工后主体工程不能正常营运。由于场区内垃圾土是一种含有可降解有机质和大量纤维成分的疏松的无粘性的特殊软土,层厚 10 m,且垃圾土下面的填土层不宜作地基持力层,因此,排水固结法、振密挤密法、搅拌法和加筋法等地基加固或处理方法均不适用。采用置换回填法处理深度将超过 20 m,经济上不合理。因此,转运车间及上、下行引桥等主体工程应选择桩基础,桩类型宜采用直径大于 0.8 m 的灌注桩,桩底应进入粉砂质泥岩层中。配套工程中办公楼和职工宿舍为 2 层建筑物,其他建筑物仅 1 层。建筑物采用桩基础,则成本太高。由于垃圾土具有较高的抗剪强度和承载特性,因此,配套工程的基础可考虑采用能承受较大变形和不均匀沉降影响的筏板基础,上部结构建议采用框架结构。

另外,在上、下行引桥与一般路堤相邻处有很大工后的相对沉降量,应在设计和施工时特别重视。

#### 6 桩周负摩阻力的估算

在设计桩基承载力时,因垃圾土自然沉降而产生的负摩阻力基本值  $F$  的计算经验公式<sup>[6]</sup>如下:

$$F = \frac{\delta DHq_u}{2K} \quad (3)$$

式中:  $D$  为桩直径;  $H$  为中性点的深度,填土层也为较软土层,故取 10 m;  $K$  为安全系数值,取为 2;  $q_u$  为无侧限抗压强度。根据莫尔-库仑定理,  $q_u$  用抗剪强度指标求出,计算式如下:

$$q_u = \frac{2c \cos j}{1 - \sin j} \quad (4)$$

当桩径  $D = 0.8$  m 时,有  $F = 296$  kPa; 当  $D = 1.0$  m 时,有  $F = 370$  kPa。

因此,在桩基承载力设计过程中,垃圾土对桩

基的负摩阻力不应被忽视。

### 7 垃圾土和渗滤液对基桩的腐蚀性分析

填埋场区内垃圾土和渗滤液的化学性质测试结果见表 9 和 10。

本场区气候条件属湿润区、半湿润区以及微冻区，渗滤液面以下土体均处于饱和状态，垃圾土中一部分土体位于渗滤液水面之上，水位受季节和大气降雨控制，在垃圾土中一定范围内有干湿交替现象，因此，环境类别属于 II 类。《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)将地下水和土的腐蚀等级分为弱、中和强三级，并分别给出腐蚀介质对应的浓度。将表 9 和 10 中各腐蚀介质的浓度，与规范中腐蚀介质浓度相比较可知：渗滤液中的铵盐和侵蚀性 CO<sub>2</sub> 的离子浓度均对混凝土结构有强腐蚀性，Cl<sup>-</sup> 浓度对钢筋混凝土结构中钢筋有中腐蚀性。垃圾土中的铵盐的离子浓度对混凝土结构有中等腐蚀性。因此，综合评价应为强腐蚀。

根据《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)，当综合评价腐蚀等级为强腐蚀时，混凝土结构的防护等级应为三级防护。

### 8 基桩的施工工艺设计

由于垃圾土是一种含有可降解有机质和大量纤维成分的疏松的无粘性的特殊软土，基桩在垃圾土

层中宜采用旋挖法掘进，采用泥浆护壁时，泥浆的损失量很大，垃圾渗滤液与泥浆进行大量的离子交换，使泥浆中含有大量浓度很高的污染物质，致使泥浆的品质下降，将进一步影响泥浆护壁的效果。

当钻孔进行到其他土层时，由于钻孔内泥浆的水压大于周围土体的孔隙水压，钻孔内泥浆必然向其他土体渗透，同时在钻孔孔壁处形成泥皮，钻孔泥皮有降低泥浆液渗透能力的功能。一般而言，周围土体和泥皮的渗透系数越小，泥皮的厚度越大，泥浆液的渗流损失量就越小。填土层的水体已与垃圾渗滤液充分混合，因此，泥浆对填土层的水质无影响。粘土层渗流透数很低且厚度大，为不透水层，因此，粘土层中泥浆液的损失量可忽略。砂砾石层的渗透系数较大，泥浆液中的污染物进行入地下水体后将扩散到整个地下水系中，泥浆液的损失量越大，对地下水的污染程度就越大。

因此，基桩施工过程中，防止渗滤液对地下水的污染，主要是防止含有渗滤液污染物的钻孔泥浆对赋存于砂砾石层中的承压水体的污染。

控制渗滤液的污染传输的关键在于：(1) 减少渗滤液与泥浆的离子交换量，从而降低钻孔泥浆中污染物质浓度，以及减少泥浆品质下降；(2) 降低泥浆液的渗透损失量。

因此，提出 3 条控制污染的主要措施：(1) 在垃圾土层中采用全钢护筒支护，可降低渗滤液与泥浆的离子交换量；(2) 当护筒到位时，强行排除护筒内渗液后，迅速注入膨润土泥浆液，膨润土泥浆具有较高粘度，在孔壁上易形成一层低渗透性的泥

表 9 金口垃圾填埋场垃圾土的化学性质

Table 9 Chemical characteristics of MSW in Jinkou municipal refuse landfill

pH 值	腐熟度	硫酸盐/%	氯化物/%	全氮/%	总磷/%	细菌总数/个·g <sup>-1</sup>	大肠菌群值/MPN·g <sup>-1</sup>
8.11	未完全	1.15	0.78	2.12	0.20	8.38 × 10 <sup>9</sup>	<9.03 × 10 <sup>5</sup>

表 10 金口垃圾填埋场渗滤液化学性质

Table 10 Chemical characters of the leachate in Jinkou municipal refuse landfill

项目	pH 值	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	Cl <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	Ca <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	总矿化度 /mg·L <sup>-1</sup>	总碱度(以 CaO 计) /mg·L <sup>-1</sup>	总碱度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)/mg·L <sup>-1</sup>
调节池	7.99	1 417	2 162	37.9	51.61	8 593	627	1 118
开挖坑	7.68	1 617	1 585	144.2	60.39	7 390	661	1 180

项目	OH <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	总磷 /mg·L <sup>-1</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	Mg <sup>2+</sup> /mg·L <sup>-1</sup>	侵蚀性 CO <sub>2</sub> /mg·L <sup>-1</sup>	游离 CO <sub>2</sub> /mg·L <sup>-1</sup>
调节池	1.02 × 10 <sup>-6</sup>	13.58	1.65	21.19	0.58	0.20	814	194
开挖坑	2.09 × 10 <sup>-6</sup>	16.59	1.04	22.84	0.36	0.19	352	198

皮,限制了泥浆的渗透损失量;(3)减少钻孔成孔至灌注混凝土的间隔时间,可减少泥浆的渗透损失量。通过这些措施降低渗滤液对地下水体的污染。

因此,基桩施工过程中,为防止渗滤液对地下水体的污染,其施工工艺设计为:场地平整、放样、桩机就位 用旋挖法将桩基所对应的部位的垃圾挖除,挖孔深度至填土层 1~2m 中 下钢护筒 抽出护筒内渗滤液 迅速注入膨润土泥浆液 钻孔至拟定深度,成孔 清孔 下钢筋笼 及时进行混凝土浇注,成桩 桩机移至下一桩位。

## 9 桩基础施工对地下水体的污染影响评估

### 9.1 施工过程中渗滤液对地下水体的污染评估

由上一节可知,基桩施工过程中,防止渗滤液对地下水的污染,主要是防止含有渗滤液污染物的钻孔泥浆对赋存于砂砾石层中的承压水体的污染。本节将在基桩施工过程中已采取一系列控制污染扩散的措施的基础上,分析垃圾渗滤液对地下水体的污染。

渗滤液传输到地下承压水体的污染离子浓度  $C$  的估算公式如下:

$$C = K'nQC_0 \quad (5)$$

式中: $C_0$ 为渗滤液中离子浓度, $K'$ 为稀释系数, $Q$ 为施工过程中单桩泥浆浆液损失总量, $n$ 为场内总桩数。

稀释系数  $K'$  按下式计算:

$$K' = \frac{h_0}{H(1-a)AL} \quad (6)$$

式中: $h_0$ 为注入膨润土泥浆时,渗滤液在护筒内的深度,取 1 m; $H$ 为桩长, $H = 50$  m; $a$ 为泥浆中粘粒与浆液的体积比; $A$ 为填埋场总面积; $L$ 为砂砾石层厚,取 4 m。

泥浆中粘粒与浆液的体积比  $a$  的计算式如下:

$$a = \frac{(g - g_w)(d_s g_w - g_d)}{(g_1 - g_w)d_s g_w - (g - g_w)(d_s g_w - g_d)} \quad (7)$$

式中: $g$ 为泥浆的比重, $g_1$ 为掺入膨润土的密度, $g_d$ 为掺入膨润土的干密度, $d_s$ 为膨润土的比重, $g_w$ 为水的密度。

本次施工过程中,单桩的浆液在砂砾石层中的损失总量  $Q$  的估算公式如下:

$$Q = \delta DL \sqrt{\frac{2km_w}{am} \Delta P t} \quad (8)$$

式中: $k$ 为钻孔泥皮的渗滤系数, $m$ 为泥浆的粘滞系数, $m_w$ 为水的粘滞系数, $\Delta P$ 为钻孔内泥浆与地下承压水的水头差, $t$ 为砂砾层中钻孔成孔至混凝土灌注完成的时间。

由计算公式可知:降低渗滤液在护筒内的残余量、提高泥浆的粘度、减少成孔至混凝土灌注的时间以及降低基桩的数量能有效的降低渗滤液对地下水体的污染。

取  $D = 1$  m,  $g = 1.04$ ,  $g_1 = 2.01$  g/cm<sup>3</sup>,  $g_d = 1.61$  g/cm<sup>3</sup>,  $d_s = 2.76$ ,  $g_w = 1.0$  g/cm<sup>3</sup>,  $m = 7.8$  mPa · s,  $m_w = 1$  mPa · s,  $k = 10^{-6}$  cm/s,  $\Delta P = 11.8$  kPa,  $n = 250$ ,  $A = 3.043 \times 10^5$  m<sup>2</sup>。垃圾渗滤液中的污染离子浓度取值见表 1,取处理前的污染离子浓度,计算结果见表 11。

表 11 施工过程中地下水体中污染物质新增浓度

Table 11 Additional content of pollutant in groundwater during construction

$t/h$	COD <sub>Cr</sub> /mg · L <sup>-1</sup>	氨氮 /mg · L <sup>-1</sup>	总磷 /mg · L <sup>-1</sup>	总固体 /mg · L <sup>-1</sup>	大肠菌值 /个 · L <sup>-1</sup>
4	0.067	0.013	$1.6 \times 10^{-5}$	0.004	0.055
8	0.095	0.019	$2.2 \times 10^{-5}$	0.006	0.078
12	0.116	0.023	$2.7 \times 10^{-5}$	0.008	0.096
24	0.164	0.033	$3.8 \times 10^{-5}$	0.011	0.135

由表 11 可知:当  $t = 24$  h 时,地下承压水体中的污染物质的增加浓度低于《生活垃圾填埋污染控制标准》(GB16889-1997)中生活垃圾渗滤液排放限值(大肠菌值除外)一级指标。当  $t = 8$  h 时,地下承压水体中大肠菌值达到生活垃圾渗滤液排放限值一级指标。因此,基桩施工过程中,采取合理的控制措施后,可有效地降低渗滤液对地下水体的污染程度。

### 9.2 成桩后,渗滤液对地下水体的污染评估

基桩施工完成后,钻孔内混凝土的粘滞系数很高且水压大于周围土体的孔隙水压,同时钻孔泥皮将继续阻止混凝土和孔隙水进行离子交换,渗滤液中污染物质沿钻孔向下传输的能力很差。基桩混凝土强度随时间迅速增长,逐渐形成不透水刚体,同时基桩周围土体的力学特性经 27 d 后将逐渐恢复。因此,基桩施工后,对地下水体产生负面的影响可忽略不计。



## 10 垃圾填埋场内气体分析及表面覆盖排气措施

### 10.1 垃圾填埋场内气体组成成分及产气规律

垃圾填埋产生的气体数量大、种类多而复杂，仅有机挥发性气体就有 100 多种，其中含有多种致癌致残物质。按成分可归纳为 6 类：饱和及不饱和碳氢化合物(多不溶于水)、酸性碳氢化合物和有机醇(多溶于水)、芳香族碳氢化合物、卤代碳氢化合物、硫化物(包括硫醇)、无机化合物及惰性气体等<sup>[7]</sup>。其中， $H_2S$ 、 $NH_3$  和  $RSH$ (如甲硫醇)是垃圾产生恶臭的根源。垃圾分解和产气过程大体可分为：好氧分解(主要产生  $CO_2$ 、 $NH_3$ 、 $N_2$ )、厌氧分解(主要产生  $CH_4$ 、 $CO_2$ 、 $NH_3$ 、 $H_2S$ )、甲烷快速增长( $CO_2$ 、 $N_2$  减少， $N_2$ 、 $O_2$  浓度趋于 0)和逐渐稳定( $CO_2$ 、 $N_2$  含量稳定， $CH_4$  含量过到峰值并渐降) 4 个阶段<sup>[8]</sup>。垃圾填埋后 1~2 a，有机物中易于分解组份多被分解而趋于稳定。期间甲烷含量逐渐上升，其峰值一般在填埋 3~5 a 后出现(体积浓度可达 60% 以上)，之后渐减，并仍可持续产气 10~20 a<sup>[9]</sup>。

### 10.2 垃圾填埋场表面覆盖排气措施

拟建场区内垃圾仍处于产气高峰期，而沼气井气流和气压均不明显，说明沼气的排放系统已破坏，场区已聚积了大量的沼气。为了施工安全，在建筑施工前必须强行排出填埋场内的沼气。为了建筑物及工作人员的长期安全，施工期间必须对垃圾填埋场表面采取有效的覆盖排气措施。

表面覆盖层主要作用或功能是：(1) 减少降水或地表水渗入填埋体内；(2) 提高地面高程并做成一定的坡度以便排水；(3) 控制填埋体内降解产生的气体；(4) 隔离废物以免有害于人、动植物<sup>[10]</sup>。

一般情况下，覆盖层应满足 8 点要求：(1) 渗透系数很低，一般不能大于  $10^{-7}$  cm/s；(2) 接缝处必须不漏水，且容易施工；(3) 具有足够的强度和延展性，可以抵抗剪切破坏，且随地基下沉而不被拉裂；(4) 在填埋中及填埋结束后不能破损，保护系统的完整性；(5) 有优良的耐腐蚀性；(6) 能够经受气候的极端变化，如冷热、湿干等；(7) 有优良的耐久性，满足建筑物的使用年限；(8) 有良好的经济性<sup>[9]</sup>。

因此，施工时应先埋设集气管，再设置约 0.3 m 厚的土壤或建筑垃圾层，集中排气管，然后覆盖约

0.5 厚的压实粘土，在粘土层上铺一层土工膜，最后设一层 0.3~0.4 m 厚砂土保护层，见图 3。在填埋场拟建场区内，经认真覆盖处理后，才进行上面建筑物施工。

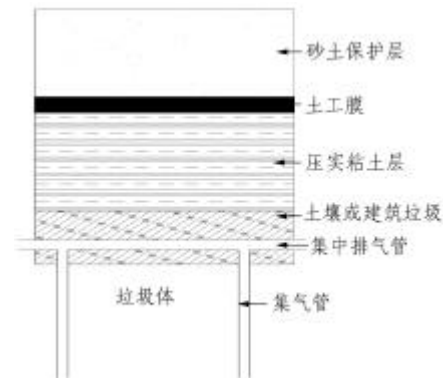


图 3 填埋场覆盖排气措施示意图

Fig.3 Sketch map of measures of the coverings and exhausts in landfill

垃圾转运站建成后，应注意监测集中排气管内的气压，及时排放填埋场内的气体，防止气压太大破坏覆盖层；应加强建筑物室内有毒害气体的监测；同时对燃烧后排放的气体进行测试，以确保建筑物及常住工作人员的安全。

## 11 主要结论

通过试验、现场调研和理论分析对填埋场上建筑物面临的岩土工程与环境问题进行研究，主要结论如下：

(1) 本填埋场内的垃圾土是一种含有可降解有机质和大量纤维成分的疏松的无粘性的特殊软土。

(2) 垃圾中的大量的纤维成分使垃圾土具有与“加筋土”类似的力学特性，垃圾土具有较高抗剪强度，使垃圾土地基具有较高的承载能力。如何确保建筑物结构能承受地基的较大沉降变形量以及不均匀沉降变形量，是场区内配套工程的设计重点。

(3) 主体工程宜采用大直径钻孔灌注桩。配套工程宜采用浅基础。配套工程的基础可考虑采用能承受较大变形和不均匀沉降影响的筏板基础，上部结构建议采用框架结构。

(4) 垃圾渗滤液对钢筋混凝土结构有强腐蚀性，垃圾土对钢筋混凝土结构有中腐蚀性，因此桩基必须采取三级防护措施。

(5) 桩基施工过程中必须采取措施有: 垃圾层中进行全护筒支护; 护筒到位时, 排出护筒内渗滤液; 及时注入高粘度的膨润土泥浆; 减少钻孔成孔至灌注混凝土的间隔时间。采取这些措施后, 可有效地降低渗滤液对地下水体的污染程度。

(6) 拟建场区内垃圾仍处于产气高峰期, 场区内含有大量有害气体。为了施工、建筑物及人员的安全, 必须采用有效的排气措施、覆盖措施以及监测措施。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘东, 江丁酉, 喻晓等. 武汉市城市生活垃圾组分变化的主成分分析[J]. 环境卫生工程, 2001, 9(4): 173-176. (Liu Dong, Jiang Dingyou, Yu Xiao, et al. Analysis of staple element change of urban domestic waste in Wuhan[J]. Environmental Sanitation Engineering Journal, 2001, 9(4): 173-176. (in Chinese))
- [2] 陈云敏, 王立忠, 胡亚元等. 城市固体垃圾填埋场边坡稳定性分析[J]. 土木工程学报, 2000, 33(3): 92-97. (Chen Yunmin, Wang Lizhong, Hu Yayuan, et al. Stability analysis of a solid waste landfill slope[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 92-97. (in Chinese))
- [3] 张季如, 陈超敏. 城市生活垃圾抗剪强度参数的测试与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 110-114. (Zhang Jiru, Chen Chaomin. Measurement and analysis on shear strength parameters of municipal solid waste[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 110-114. (in Chinese))
- [4] 顾晓鲁, 钱鸿缙, 刘惠珊等. 地基与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. (Gu Xiaolu, Qian Hongjin, Liu Huishan, et al. Compile, Groundsill and Foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995. (in Chinese))
- [5] 杨小平. 土力学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001. (Yang Xiaoping. Soil Mechanics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2001. (in Chinese))
- [6] 胡人礼. 桥梁桩基础分析和设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987. (Hu Renli. Analysis and Design of Bridge Pile Foundation[M]. Beijing: Publishing Company of Chinese Railway Department, 1987. (in Chinese))
- [7] 李定龙, 彭明国, 蒋荣泉等. 武汉市夹山垃圾卫生填埋场大气环境影响评价[J]. 江苏石油化工学院学报, 2001, 13(1): 35-38. (Li Dinglong, Peng Mingguo, Jiang Rongquan, et al. Impact assessment of atmospheric environment in Wuhan Jiashan sanitary landfill[J]. Journal of Jiangsu Institute of Petrochemical Technology, 2001, 13(1): 35-38. (in Chinese))
- [8] 赵由才. 城市生活垃圾卫生填埋场技术与管理手册[M]. 化学工业出版社, 1999. (Zhao Youcai. Technique and Supervision Manual of Sanitary Landfill of Municipal Solid Waste[M]. Chemical Industry Press, 1999. (in Chinese))
- [9] 李雁, 张淑娟, 熊永达. 垃圾填埋场内部 CH<sub>4</sub> 浓度随时间的变化特征及其模拟[J]. 环境科学学报, 2000, 20(5): 584-587. (Li Yan, Zhang Shujuan, Xiong Yongda. Dynamics of methane concentration in a landfill and its simulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, 20(5): 584-587. (in Chinese))
- [10] 熊孝波, 施斌, 张凌. 国外城市垃圾填埋场岩土工程研究的最新进展[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3): 345-350. (Xiong Xiaobo, Shi Bin, Zhang Ling. The recent development of geotechnical research on municipal waste sanitary landfill in foreign countries[J]. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(3): 345-350. (in Chinese))
- [11] 施有志, 马时冬. 垃圾填埋场中的土工聚合物膨润土衬垫[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2002, 23(2): 151-156. (Shi Youzhi, Ma Shidong. Application of geosynthetic clay lines to landfills[J]. Journal of Huaqiao University(Natural Science), 2002, 23(2): 151-156. (in Chinese))