

国家自然科学基金项目 (40372069)

教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-05-0479)

江苏省自然科学基金项目 (BK2008133)

垃圾填埋衬垫系统 实验模拟研究

曹丽文 姜振泉 桑树勋 著



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(40372069)

教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0479)

江苏省自然科学基金项目(BK2008133)

垃圾填埋衬垫系统 实验模拟研究

曹丽文 姜振泉 桑树勋 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以垃圾渗滤液化学作用和渗流对排水层孔隙结构及渗透性能的影响规律为核心问题,以渗滤液对压实黏土衬垫层土工性状的影响特征为主线,以室内模拟实验为技术手段,从土质学和环境工程相统一的视角,系统论述了垃圾填埋场衬垫系统结构、渗滤液水质特征及其中的化学反应对衬垫系统土工性质的影响,揭示了城市垃圾卫生填埋场排水层渗透性能变化的发生机理和规律,探索了渗滤液水质与离子特征对压实黏土层土工性质的影响。

本书可供环境地质、地质工程、城市生态系统建设、环境工程等专业的科研人员及技术人员使用,也可供高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

垃圾填埋衬垫系统实验模拟研究/曹丽文,姜振泉,
桑树勋著. —徐州:中国矿业大学出版社,2007.10(2009.12 重印)
ISBN 978 - 7 - 81107 - 765 - 0

I. 垃… II. ①曹…②姜…③桑… III. 垃圾处理—
模拟实验—研究 IV. X705

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 163023 号

书 名 垃圾填埋衬垫系统实验模拟研究
著 者 曹丽文 姜振泉 桑树勋
责任编辑 潘俊成 周 红
责任校对 周俊平
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×960 1/16 印张 11 字数 209 千字
版次印次 2007 年 10 月第 1 版 2009 年 12 月第 2 次印刷
定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

城市生活垃圾是城市环境的主要污染源之一。近年来,世界各国的垃圾产生量逐年增加,随着城市化进程的推进,城市垃圾产生量还将以每年 8%~10% 的速度递增。垃圾的污染问题对城市环境和居民的健康、生存及经济发展构成了严重威胁。从 20 世纪 70 年代开始,固体废物的处置逐渐从简单堆放到具有工程防护措施的卫生填埋。80 年代后期到 90 年代初,垃圾卫生填埋地质处理发展成为环境工程地质的重要研究内容,涉及填埋场衬垫系统的设计、边坡稳定性、垃圾填埋体的稳定、变形特性、衬垫材料的渗透性、渗滤液的特殊成分对下伏黏土渗透性能的影响等诸多方面。

垃圾填埋场设计的目的是阻断渗滤液、废气和固体有害物质与周围环境的联系,而确保不发生填埋场污染物向周围环境迁移扩散的关键技术是采取有效的隔离措施。衬垫系统是垃圾填埋场常用的隔离设施,能起到防止或最大限度地降低垃圾填埋体对地质环境污染的作用。在填埋场的运行过程中,衬垫系统须具有低渗透性及与所填废物长期相容性,能协调垃圾填埋体与天然地质体间的关系等特性。因此,研究这种人工地质体的系统性和稳定性对于保护自然环境、维护经济持续健康发展具有深远意义。

然而,填埋场在施工和运行过程中,垃圾的生物降解、渗滤液中的生物化学反应及其渗流作用,不断影响和改变着衬垫系统的渗透性能、塑性和力学性质,导致衬垫系统出现穿刺、老化现象及天然防渗材料开裂。国内外由于衬垫系统失效而导致的二次污染事故比比皆是。而渗滤液对衬垫系统的影响是复杂的、动态的,通过研究渗滤液特殊成分及其渗流作用对黏土、砂砾等填埋衬垫材料土工性状的影响,可以正确评价衬垫系统的适用性,预测衬垫系统土工性质的变化规律,为垃圾填埋场的设计、运行提供理论依据。同时,也为垃圾填埋场的环境影响评价和垃圾污染场地的建筑勘察设计与施工奠定理论基础,并丰富离子对黏性土性状影响的研究内容。因此,加强渗滤液对衬垫材料土工性状影响的理论研究是十分重要的。

本书主要反映的是国家自然科学基金(40372069)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0479)和江苏省自然科学基金项目(BK2008133)的部

分科研成果。本书以垃圾渗滤液化学作用和渗流对排水层孔隙结构及渗透性能的影响规律为核心问题,以渗滤液对压实黏土衬垫层土工性状的影响特征为主线,以室内模拟实验为技术手段,从土质学和环境工程相统一的视角,系统论述了垃圾填埋场衬垫系统结构、渗滤液水质特征及其中的化学反应对衬垫系统土工性状的影响,揭示了城市垃圾卫生填埋场排水层渗透性能发生变化的机理和规律,探索了渗滤液水质与离子特征对压实黏土层土工性状的影响。

在研究和写作过程中,作者在查阅和分析大量文献资料的基础上,建立、设计了室内垃圾填埋模拟实验装置和实验方法(该装置和实验方法已经获得国家专利),力求实验的科学性和代表性,积极探求渗滤液影响下的衬垫系统性质变化特征,愿此书为引玉之砖。由于实验周期长和实验条件的限制,及作者水平所限,书中难免有浅薄之见和不当之处,恳请读者不吝赐教。

本书适于从事环境地质、地质工程、城市生态系统建设、环境工程等专业的技术及管理人员参考,也适于作有关专业的大专院校的教师和本科生、研究生的阅读材料。

作者

2009年6月于徐州

目 录

第一章 垃圾卫生填埋的作用与意义	1
第一节 城市生活垃圾及其特点	1
第二节 我国城市生活垃圾基本土工性质	4
第三节 垃圾卫生填埋处置方法	8
第四节 卫生填埋场的组成	12
第五节 卫生填埋技术展望	15
第二章 垃圾填埋场渗滤液水质特征	17
第一节 渗滤液的来源	17
第二节 渗滤液水质特征	17
第三节 垃圾填埋场渗滤液生物化学特征与规律	26
第四节 渗滤液产生量的估算与预测	30
第五节 渗滤液对岩土性质的影响	32
第三章 衬垫系统的结构特征	35
第一节 衬垫系统的研究意义	35
第二节 衬垫系统的组成	36
第三节 生活垃圾填埋场衬垫系统的研究现状与存在问题	38
第四节 黏土衬垫层及其评价	43
第四章 渗滤液排水层渗透性变化特征	50
第一节 渗滤液排水层渗透性的研究意义与研究现状	50
第二节 渗滤液收集系统的组成与结构	53
第三节 排水层最大渗滤液水头的估算	61
第四节 排水层渗透性能实验变化特征	65
第五节 淤堵物成分与性质	93
第六节 排水层结构参数、COD 与渗透系数间的函数关系	100

第七节	排水层渗透性能变化机理分析·····	102
第八节	填埋场淤堵时间的确定和淤堵控制·····	103
第五章	渗滤液对压实黏土土工性质的影响·····	106
第一节	单离子对压实黏土土工性质的影响·····	106
第二节	多离子对压实黏土土工性质的影响·····	110
第三节	离子对黏土土工性质影响的机理分析·····	114
第四节	渗滤液降解产物对黏土土工性质的影响·····	116
第五节	渗滤液对压实黏土层土工性质的影响·····	118
第六章	压实黏土层截污性状·····	122
第一节	黏土对垃圾污染质的阻隔能力·····	122
第二节	黏土对金属污染质的阻隔能力·····	124
第三节	压实黏土衬垫层水分特征曲线及水分运动参数的确定·····	130
第四节	压实黏土衬垫导水率的变化规律·····	135
第五节	填埋场内污染质、水分运移控制方程·····	137
第六节	压实黏土衬垫截污性状研究·····	144
第七节	压实黏土对渗滤液中离子的吸附作用·····	147
第八节	特殊土对垃圾污染质的阻隔能力·····	148
参考文献 ·····		154

第一章 垃圾卫生填埋的作用与意义

第一节 城市生活垃圾及其特点

一、城市生活垃圾

按照《城市生活垃圾卫生填埋技术规范》(CJJ 17—2001)所述,城市生活垃圾是指在城市日常生活或者为城市日常生活提供服务的活动中产生的固体废物,如菜叶、废纸、废玻璃制品、废瓷器、废家具、废塑料、厨房垃圾和建筑垃圾等,但不包括工厂排出的工业固体废物。

城市生活垃圾(Municipal Solid Waste, MSW)是国际上现代化城市环境污染的主要污染源之一。据资料统计,全世界各地生活垃圾的产生总量每年以3%的速度递增,有的国家则达到了10%。俄罗斯每年产生生活垃圾近7 000万t,美国是俄罗斯的3倍,日本每年也有3 500万t的垃圾产生量。美国年人均产生垃圾近600 kg,欧洲为320 kg,亚洲地区人均产生生活垃圾也在200 kg左右。我国年人均垃圾产量为4.40 kg,是人均粮食产量1.6倍,且垃圾产生量从1986年的5 200万t猛增到1996年的1.66亿t(刘长礼等,1999;章光等,2002)。垃圾产生量与经济发展水平有关。统计数据表明,我国经济发达城市,如北京、上海等城市中心区域,人均生活垃圾日产生量约1 kg,一些中等发达的城市,人均生活垃圾日产生量约0.85 kg,而一些不发达的城市及中小城镇,人均生活垃圾日产生量约0.7 kg(栾智慧等,2004)。随着我国城市规模的扩大、人口数量的增多以及人民生活方式的变化和生活水平的提高,城市生活垃圾以年均8.98%~10%的增长率迅猛增加(宋宝增等,2002)。

二、我国城市生活垃圾的特点

与一般土相比,生活垃圾差异性较大,具体体现在其成分具有极度的离散性、大孔隙性和非饱和性,并且随时间、季节、地点、民族、习俗、国家、生活水平及生活方式等诸多因素的不同而改变。随着经济的快速发展、人们生活水平的提高及废弃物中可回收成分的增加,废弃物的成分呈明显变化趋势,其特点是以无机物为主逐渐转化为以有机物为主(见表1-1、表1-2)。对于我国沿海和南方各

大中城市而言,城市卫生填埋场垃圾土中的有机物含量普遍介于 25%~60% 之间(张振营等,2000)。一般来说,经济较发达地区垃圾中的厨余有机物(易降解)、纸、塑料所占的比例较大,煤灰和渣土所占的比例较低,而经济发展相对落后地区的情况则相反。相同的地区(城市),不同的时间段中,生活垃圾的成分及含量也有所变化。

表 1-1 我国城市居民的人均生活垃圾产量(转引自张振营等,2000) kg/(人·d)

年份	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
产量	0.88	0.90	0.93	1.04	1.18	1.15	1.13	1.20	1.26

表 1-2 各主要城市的人均生活垃圾产量(转引自张振营等,2000) kg/(人·d)

年份	上海	北京	天津	深圳	广州	厦门	珠海	福州	青岛	杭州	西安	沈阳	郑州	济南	武汉
1981	—	—	0.67	1.22	0.52	0.47	0.79	0.75	1.05	0.36	0.52	1.27	1.12	0.51	0.96
1992	1.09	1.92	1.40	4.00	1.14	1.67	1.68	0.81	1.07	1.24	0.89	1.46	1.22	1.07	1.40
1993	1.02	1.96	1.21	4.00	1.40	1.35	1.93	1.12	1.13	1.29	0.88	1.49	1.40	1.03	1.27

表 1-3 1989~1998 年杭州市生活垃圾组分调查(转引自沈东升,2003) %

垃圾组分		年 份									
		1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
易腐垃圾	动物性	0.82	1.30	0.98	1.57	1.67	1.67	1.91	2.00	2.99	3.35
	植物性	46.20	41.36	46.11	49.58	50.20	50.20	50.53	53.28	55.21	49.13
	合 计	47.20	42.86	47.09	51.16	51.87	51.87	52.44	55.28	58.20	52.48
煤渣	渣(>15 mm)	1.21	1.58	1.08	1.24	2.28	2.28	1.73	2.56	1.66	4.47
	灰土(<15 mm)	47.02	49.86	44.36	39.50	36.48	36.48	36.02	30.61	22.48	19.56
	合 计	48.23	51.44	45.44	40.74	38.76	38.76	37.25	33.17	24.14	24.03
废品	纸	0.96	1.16	1.51	1.71	1.80	1.80	1.74	1.80	3.68	4.90
	布	0.77	0.96	1.18	1.17	1.63	1.63	1.15	1.50	2.23	3.80
	塑 料	0.64	1.03	1.54	1.68	2.50	2.50	3.14	5.02	7.62	11.3
	金 属	0.56	0.59	0.90	0.62	0.84	0.84	0.83	1.12	0.98	0.67
	玻 璃	1.31	1.27	1.40	1.87	1.87	1.87	1.94	1.42	2.09	1.15
	竹 木	0.51	0.76	0.94	0.94	0.95	0.95	1.01	0.39	1.20	1.66
	合 计	4.25	5.73	7.47	7.98	9.59	9.50	9.81	11.5	17.8	23.5
水 分									52.8	55.5	55.7

表 1-3 结果表明,杭州市生活垃圾中渣、灰土含量持续下降,而易腐垃圾和废品的含量持续增长。与 1989 年相比,1998 年垃圾中废品的比例增加了几乎 5 倍,易腐垃圾含量也是持续增加,塑料、纸张、玻璃、金属等的含量也是逐年增加,可燃物增多,可回收利用物增多,可利用价值增大。垃圾成分含量的变化,与当地的生活水平和经济发展水平不断提高有着直接的关系。另外,生活用品和食品等包装越来越讲究,导致城市垃圾中的废品物质显著增加,其中塑料成分增长最快,主要是日常生活中塑料包装使用广泛造成的。

我国城市生活垃圾的变化特点概况如下:① 随着城市煤气化率的上升,厨余垃圾中的煤渣、灰土明显减少,而易腐有机物的比例逐年增加;② 随着消费水平的提高、生活用品和食品包装的日益讲究,城市垃圾中的废品类物质显著增加,其中塑料类成分增长最快,主要是塑料包装材料和廉价的一次性用品;③ 随着城市垃圾构成比例的变化,垃圾的发热值也有了较大的提高,已达到中等发达国家的水平(沈东升等,2003)。

国内外城市生活垃圾在成分含量上有一定的区别,表现在:一方面国外垃圾的有机质含量明显高于国内垃圾,在有机质成分中,尤其引人注意的是纸张含量(见表 1-4);另一方面,国内垃圾土中灰土的含量明显高于国外垃圾土,究其原因,应该是经济发展水平的差异所造成的。美国等经济发达的国家,他们的日常生活主要消费半成品和成品,因此生活垃圾中的厨余垃圾等大大减少,垃圾构成中相应的有机物含量不高,日常生活中的纸张、塑料、金属等却大大增加。

表 1-4 部分国家城市生活垃圾组成(据毕新慧等,2000)

%

成 分	国 家					
	英国	法国	荷兰	瑞士	意大利	美国
有机物	27	22	21	20	25	12
纸	38	34	25	45	20	50
灰、渣	11	20	20	20	25	7
金属	9	8	3	5	3	9
玻璃	9	8	10	5	7	9
塑料	2.5	4	4	3	5	5
其他	3.5	4	17	2	15	8
平均含水量	25	35	25	35	30	25
每人每年平均量/kg	320	270	210	250	210	820

我国城市生活垃圾的无害化处理程度很低,仅为 15%(张力威,2003),97%

的垃圾被转移到城郊,并且被简单地堆放在空气中,产生大量的渗滤液进入土壤和水体中,还有大量的有毒气体进入大气中(严树等,2003)。垃圾的污染问题对城市环境和居民的健康、生存构成了严重威胁,已成为社会的一大公害(锁志文,1997)。

第二节 我国城市生活垃圾基本土工性质

卫生填埋形成的垃圾填埋体,属于特殊土体的一种。垃圾土由有机质、无机质、水、气 4 种成分组成,其中有机质会在压力、水等因素影响下,随时间发生化学降解反应,引起垃圾土体积减小、渗滤液成分改变、孔隙率减小等现象;无机质包括陶瓷、砖瓦、炉灰土等,且其成分和含量在填埋过程中不发生变化(孟云伟等,2006)。垃圾土的粒径随填埋时间的延长而逐渐降低,表 1-5 是上海老港填埋场不同填埋龄期垃圾的粒径分布情况。与一般土相比,垃圾土的成分具有极高的离散性、非饱和性和大孔隙性,而且其中的有机物会发生降解,垃圾土成分的特殊性源自其产生源的特殊性。垃圾土工程性质指标的确定,对于填埋体、填埋边坡稳定分析具有重要作用。

表 1-5 上海老港填埋场不同填埋龄期垃圾的粒径分布(转引自谢焰,2006)

填埋龄期/a	垃圾筛分效率(质量分数)/%		
	粒径>40 mm	粒径 15~40 mm	粒径<15 mm
10	29.45	29.24	41.31
8	29.50	32.85	37.65
6	35.16	32.12	32.72
4	66.44	14.87	18.68
2	68.68	16.60	12.83

与国外相比,国内在垃圾土工程性质方面的研究起步较晚。由于垃圾土成分、填埋环境等方面存在的差异,国外相关研究资料不能直接套用。近年来,国内一些学者涉及垃圾土工程性质方面研究,得到了一些认识(孟海燕等,2005)。

一、垃圾土的天然密度

垃圾土的天然密度 ρ 大多分布在 $0.8 \sim 1.68 \text{ t/m}^3$ 之间。 ρ 和天然重度 γ 并不随埋深的增大而呈现有规律的变化,主要是因为生活垃圾的大孔隙结构所致,而有机物的压密需很长时间,且填埋方式、环境条件对 ρ 、 γ 均有影响。但垃圾土的干重度 γ_d 则随埋深 Z 的增加而增大,当 $Z < 4.5 \text{ m}$ 时, γ_d 的平均值为

7.0 kN/m^3 ; 当 $Z > 14 \text{ m}$ 时, γ_d 的平均值为 8.4 kN/m^3 。钱学德先生认为, 大多数填埋场对废弃物进行了压实, 压实比为 $2:1 \sim 3:1$, 建议压实后的垃圾土平均重度值取 $9.4 \sim 11.8 \text{ kN/m}^3$ 。

二、垃圾土的天然含水量

垃圾土天然含水量的变化幅度很大, 一般分布在 $60\% \sim 110\%$ 之间, 并随埋深的增大而减小。垃圾土的含水量通常与废弃物的组成成分、当地气候条件、填埋场运行方式(覆土情况)、渗滤液收集和导排系统的有效程度、填埋场生物分解过程产生的水分数量以及从填埋场中气体脱出的水分数量等因素有关。一般来说, 由于垃圾中有机质的降解和渗滤液的排除作用, 填埋深度越大, 垃圾土的含水量越低。与国外相比, 国内垃圾土的含水量普遍较高。

三、垃圾土的天然孔隙比

垃圾土的孔隙比较大, 但是, 随着填埋深度的增加, 垃圾的生化降解进行得较彻底, 且上部垃圾土自重压力的逐渐增加, 导致垃圾土孔隙比随深度的增大而减少。发达国家垃圾土的孔隙率为 $40\% \sim 52\%$ (孔隙比为 $0.67 \sim 1.08$), 高于一般压实黏土衬垫的孔隙率。我国垃圾土的孔隙率为 $65\% \sim 80\%$, 普遍大于国外的相应值。

四、垃圾土的相对密度

垃圾土的相对密度大多分布在 $2.0 \sim 2.4$ 之间。相对密度的大小与垃圾中有机质含量多少有直接关系。有机质含量多, 相对密度越小; 反之, 则相对密度越大。

五、有机质含量

生活垃圾中的有机质含量大多分布在 $20\% \sim 40\%$ 之间, 且大致随埋深的增加而降低, 这与深部填埋体中的有机质降解较彻底有关。随着填埋时间的延长, 这种趋势还会更加明显。从收集到的资料可以发现, 我国经济较发达地区的垃圾土有机质含量较高。

六、垃圾土的渗透性

垃圾土的渗透系数变化范围较大, 就浙江大学、河海大学、同济大学等科研单位的学者所做的室内实验和现场实验资料估算结果来看, 垃圾土的渗透系数基本在 $2 \times 10^{-4} \sim 9.21 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 之间。美国垃圾土的渗透系数是 $9.2 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。垃圾土渗透性的变化规律是随填埋深度和填埋时间的增加而降低。

七、垃圾土的压缩性

垃圾填埋场的沉降由两部分组成: 一是土体在自重及上部荷载作用下发生的沉降, 属于物理变化; 二是土体中有机质降解作用引起的沉降, 属于化学变化。二者都是时间的函数。在压缩性上, 垃圾与土的主要差别在于, 垃圾中有机质具

有降解特征。在土力学教程中,土颗粒被被认为是刚性的,土颗粒的体积在压缩过程中通常被认为保持不变。由于垃圾中存在可降解的有机质部分,有机质的降解会导致固体颗粒体积减小,因而固体颗粒体积不再是常数。垃圾降解压缩的机理十分复杂,涉及垃圾的物理、化学、生物和力学等特性。生活垃圾中有机质降解可以分为四个阶段:① 好氧分解阶段;② 厌氧酸化阶段;③ 厌氧加速产甲烷阶段;④ 厌氧减速产甲烷阶段。垃圾的降解过程伴随着气体产生,导致垃圾中气压增加,引起垃圾中有效应力降低,使得填埋场沉降速率减小。

基于经典土力学理论建立的垃圾土沉降模型主要分为三类:一类称为主沉降及长期沉降模型,如 Sowers 模型(1973);一类称为长期沉降模型,如 Yenand Scanlon 模型(1975);还有一类称为生物降解模型,如 Edgers 模型(1992)。Sowers 模型将沉降分为三个阶段:① 瞬时沉降阶段:主要发生在填埋期,当施工期完成后,瞬时沉降也就完成,其沉降机理与一般土相同。② 主固结沉降阶段:始于施工期开始,荷载稳定后还将持续一段时间。主固结的过程取决于孔隙水和填埋气体向外排除的速率。具有完善的排渗、导气系统的卫生填埋场,因孔隙水和填埋气体排放较快,固结过程也就完成得较快。有的学者将主固结沉降与瞬时沉降归为一类,称之为主沉降。③ 次固结沉降(长期沉降)阶段:包括物理蠕变和生物降解。物理蠕变的值通常比主固结沉降值小得多。长期沉降主要是由填埋废弃物中的有机质发生生物和化学降解而产生的。有机质含量较高的废弃物,其中有机质发生生化降解是导致垃圾土体积减小、沉降增加的主要原因。有的学者将生化降解过程称为生物固结,其过程可以持续数十年,通常认为长期沉降与荷载无关。

垃圾土的压缩变形是由固相体积的缩减和孔隙体积的压缩共同引起的。固相体积的缩减率与有机质降解有关。当垃圾填埋时间少于 5 a 时,可只考虑主压缩(胡敏云等,2001)。垃圾土的压缩变形在填埋后就会立即发生,并在相当长的时间内持续进行。现阶段研究垃圾土的压缩变形时,多采用传统的土体压缩理论来分析。垃圾压缩时间和压缩应变的比值与压缩时间的关系是一条直线,其压缩特性可以归结为双曲线模型。目前,垃圾压缩性研究取得了一些认识和成果。张振营等(2005)结合实测结果及土力学基本理论,建立了填埋场垃圾填埋体的沉降模型;黄仁华等(2000)认为,垃圾密度与压实机械的压力和碾压遍数、垃圾层初始厚度有关;陈云敏等(2003)提出了填埋体中有机质随填埋时间(深度)变化的公式,并提出了考虑荷载和有机质降解作用的填埋场容量计算方法,定量分析了有机质分解速度对填埋场容量的影响。

八、垃圾土的强度及本构关系

如同经典土力学,垃圾土抗剪强度的指标也采用黏聚力 c 和内摩擦角 ϕ 两

个参数来描述。垃圾土的抗剪强度离散性较大,目前,强度参数常通过室内实验、现场试验或根据垃圾填埋场边坡进行反算的方法确定,室内实验常采用大型三轴仪、无侧限抗压实验和直剪仪,原位试验包括现场大型直剪试验、十字板剪切试验、标准贯入试验、静力触探等。但因垃圾成分极不均匀、抗剪强度的非等向性、垃圾土抗剪强度与探头比贯入阻力间的对比关系缺少等因素,所得结果的离散性较大,且不能完全或准确确定垃圾土的抗剪强度参数。内摩擦角与粒状材料含量有关,黏聚力与条状纤维物含量、有机质降解所产生的渗滤液浓度、密实度、填埋时间等有关。根据文献统计,内摩擦角 ϕ 的变化范围为 $10^{\circ} \sim 49.6^{\circ}$,黏聚力 c 的变化范围为 $0 \sim 67$ kPa。垃圾土中的塑料、布条等纤维质成分对垃圾土具有加筋作用,可以赋予垃圾土较大的黏聚力,相对而言对内摩擦角的影响则小一些。李小勇等对北京某垃圾填埋场的试样进行室内直剪实验,得出不排水条件下其黏聚力 c_q 为 $1.3 \sim 15.3$ kPa,内摩擦角 ϕ 为 $12.5^{\circ} \sim 35.2^{\circ}$ 。王朝晖通过室内三轴实验研究认为,垃圾土的固结不排水实验有效应力强度指标黏聚力 c 为 $1.3 \sim 16.0$ kPa,内摩擦角 ϕ 为 $25.0^{\circ} \sim 41.4^{\circ}$ 。垃圾土中含有会随时间、水分等条件变化而发生降解的物质,这是不同于一般土体的,其 c 、 ϕ 值随这种降解作用而发生变化的研究还不多。浙江大学岩土工程研究所对杭州某填埋场不同埋深的垃圾土进行了三轴实验,结果表明,垃圾土应力—应变与围压无关。通过 CD 实验及 CU 实验发现,当埋深到一定深度后,属于加工硬化材料的垃圾土,本构关系基本符合 Duncan-Chang 双曲线模型;抗剪强度与正应力呈线性增加的关系,符合莫尔—库仑强度准则(刘荣等,2005)。

也许有关城市固体废弃物强度确定的最大问题是与其基本原理有关的问题,那就是莫尔—库伦理论是否同样适用于废弃物?这个关于强度准则的应用问题,有不同的研究结论。由于城市固体废弃物可产生很大的变形而不破坏,应取对应多大应变时的剪应力作为强度值才合适呢?Singh 和 Murphy(1990)用谢尔贝薄壁取土器取样,做过城市固体废弃物的三轴压缩实验,在应变达到 30% 以后,应力仍在持续增长,并没有达到一稳定值的迹象。在美国加州 Monterey Park 进行的荷载实验中,一超载的填埋体边坡产生了很大的变形,但仍无明显的破坏面。根据以上事实和其他资料, Singh 和 Murphy 断定,用莫尔—库伦理论来描述固体废弃物的强度特征可能是不合适的。在填埋场设计中,穿过废弃物的边坡破坏可能不是一个重要问题(钱学德等,2001)。

填埋场稳定破坏常发生于衬垫系统内的接触面或下卧软土层中。因此,当进行稳定分析时,在估计垃圾土强度特性的基础上,与考虑不同材料的应变协调性一样,正确计算软弱接触面和不良地基的强度特性是更为重要的(钱学德等,2001)。

九、垃圾土的动力特性

垃圾土的动力特性受初始剪应力、小应变荷载、荷载频率、垃圾土填埋时间等因素的影响。我国在这方面的研究非常少,同济大学周健教授(1999)分别模拟交通荷载和震荷载情况,对城市垃圾土的动模量和振动残余应变实验结果进行了分析。重塑垃圾土的循环实验结果表明:当振动周数少于 50 周时,动压缩模量随循环周数的增加而降低;而当振动周数大于 50 周时,动压缩模量随循环周数的增加而略有增大。对人工配制固体废弃物试样的中型动三轴实验研究表明,MSW 的动剪切模量和阻尼比随着动剪应变的变化曲线与泥炭土的相关曲线形状基本一致,并且在相同应变时数值相差不大(冯世进等,2005;施建勇等,2001)。

垃圾土的物理力学性质随时间而变,这是因为其中有机物不断降解和垃圾体的压缩造成的。同时,垃圾土成分极不均匀,各成分的物理力学性质离散性较大,小直径、小尺寸的实验结果难以反映垃圾体的宏观性质,试样也难以制作成型,影响实验结果的其他因素较多,因此采用单一的实验方法难以合理反映垃圾体的实际物理力学性质,可以采用室内实验和现场试验相结合的方法进行确定。

第三节 垃圾卫生填埋处置方法

一、垃圾卫生填埋处置方法的涵义

常用的垃圾处置方法主要有简单堆放法、堆肥发酵法、卫生填埋法、焚烧发电法和回收综合利用资源化等。从 20 世纪 70 年代开始,发达国家固体废物的处置逐渐从简单堆放到具有工程防护措施的填埋,即卫生填埋。建设部 2001 年发布的《城市生活垃圾卫生填埋技术规范》(CJJ 17—2001)中对卫生填埋的解释是:采取防渗、铺平、压实、覆盖对城市生活垃圾进行处理和对气体、渗滤液、蝇虫等进行治理的垃圾处理方法。该方法是将垃圾堆放至选定填埋场地,以每层 2.5~3 m 的厚度在限定区域内铺散、压实,并以 20~30 cm 厚的土料覆盖、压实。

垃圾层和土料覆盖层共同构成一个填埋单元,一个完整的卫生填埋场由若干个填埋单元组成。当垃圾填埋至最终设计高度后,在垃圾填埋层上覆盖一层 20~30 cm 厚、渗透系数不大于 1×10^{-7} cm/s 的黏土,其上再覆盖 45~50 cm 厚的自然土层并压实,最终形成一个封闭的卫生填埋体系。卫生填埋的核心内容是:以地学观点合理选择废弃物安全排放场址,查清排放场基础的地质结构,为填埋场的设计、施工提供最有保证的地质数据,提出对水体尤其是对地下水体保护的经济要求,并对废物排放作业后的污染进行预测和风险评价。一个标准的

卫生填埋场应具有贮留垃圾、隔断垃圾与外界环境的水力联系,以及对水、气和垃圾本身处理的三大功能。最后的功能是最新被人们了解的,即所谓的“生物发生器”(Bioreactor Landfilling),也就是利用填埋层作为有机物降解的生物反应器,处理填埋场所产生的含高浓度有机物的渗滤液,并使垃圾中的有机物迅速降解。

卫生填埋法成本低廉、适用范围广,如果处置方法得当,产生二次污染的概率较低,同时还可生产填埋气体,具有环保效果显著和处置彻底等优点。1904年,第一个城市生活垃圾卫生填埋场建立在美国伊利诺伊州的香潘市,随后一些发达国家和发展中国家相继采用这种方式处理城市生活垃圾。目前,发达国家69%~73%的城市垃圾是用填埋方法处理的,其中,美国城市垃圾的62%用地质填埋处置(D. Adam et al., 2001)。卫生填埋法的成本是堆肥法的1/3,焚烧法的1/10(周健等, 2001)。1991年9月,国家科学技术委员会和建设部将此法确定为垃圾处理的首选推广方法(严树等, 2003)。

二、卫生填埋的研究简史

国内外的垃圾卫生填埋处置方法和技术发展,主要经历了以下几个阶段(刘长礼等, 1999)。

1. 国外研究简史

(1) 初始阶段:20世纪70年代,研究内容集中在场址调查及条件评价上,如Stewart等(1970)对影响佛罗里达州Hillshorough卫生填埋场土地利用的水文地质因素进行的分析研究,Brown(1973)对Whiteman卫生填埋场场址的评价,Matin(1975)对Lee County填埋场地表水、地下水水体的影响评价和Ronsin(1977)对Denver填埋场影响地下水水质的调查等,都属于这一阶段的典型文献。其特点是集中于定性的条件分析和评价。

(2) 地质环境影响的机理研究阶段:20世纪70年代后期至80年代中期,着重对单个污染组分与地下水或地层中矿物成分相互作用机理的研究。研究方法包括:物探法、同位素法和示踪技术以及溶质运移模型、有机质降解运移、非饱和带运移机理等,其中的代表文献有:1983年加拿大的J. A. Cherry,在《水文学杂志》中以“卫生填埋场地下水污染物运移”为主题,组织了一本专集,从7个方面系统总结了卫生填埋场对地质环境影响的研究成果;1981年A. B. Gureghian等在对美国纽约长岛卫生填埋场地下水污染研究中,成功地采用了有限单元法对渗滤液的溶质运移进行模拟研究。1982年以后,J. F. Sykes等首次在文献上发表了卫生填埋场有机质运移降解的模拟研究成果,研制出一个预测渗滤液中COD运移变化的预测模型。之后,又有大量文献发表了该领域内的各种理论和应用研究成果。A. C. Demetracopoulos等(1984, 1986),对非饱和渗流卫生填

埋体进行模拟和敏感性分析研究,提出在场底不同条件下收集渗滤液的设计措施。R. A. Gerhardt(1984)研究了一套采集方法,在层状和非层状土层中进行实验。这些成果对研究垃圾填埋具有重大意义。

(3) 综合模型研究阶段:20 世纪 80 年代中期以来,一些学者开始着重于综合全面的研究,以弥补前期研究中人为局部分割实际环境条件的不足,如 Beeman (1987) 的“卫生填埋场淋滤液对浅层含水层污染的微生物研究”。此研究阶段最有代表意义的是 HELP 模型的建立。1988 年, R. L. Peyton 等通过对 17 个卫生填埋场的长期模拟实验,验证了 HELP 模型的可靠性和适用范围; S. C. Hollingshead 等(1989)利用该模型对卫生填埋场覆盖系统的改进作了进一步研究,考虑了黏土隔水层厚度、隔水层渗透系数、表层厚度等因素。此阶段在认识方法上,从局部单因素向整体综合方向发展,模型也向具有调试敏感性分析功能的综合模型方向发展。

(4) 全面系统化研究阶段:① 填埋场设计更加系统。最具代表性的是德国 Langer(1998)的“对垃圾处置项目地质和岩土工程屏障的地球科学评价”一文。该文明确指出,一个永久性的完善的地质处置场必须具有与地质屏障对应的岩土工程屏障,建立场地,除考虑工程地质、水文地质和环境地质外,还要进行岩土工程安全分析和工程安全评价,同时,还必须对运行中的填埋场进行长期观测。② 系统分析方法更加多样化。其一,在该领域引入系统分析方法。R. A. Freeze, J. Massman, G. L. Mocolymont 等(1990, 1991, 1992)将水文地质决策分析方法、人工智能应用到卫生填埋场对地下水环境影响的评价中。C. Irigar (1994)在垃圾处置场选址中,利用地理信息系统进行岩土工程设计和环境评价。其二,将研究范围延伸到工程地质领域。主要研究内容包括:卫生填埋场的边坡稳定性评价、黏土衬砌的渗透性和渗滤液的特殊成分对下伏黏土渗透性的影响等。③ 阻隔材料性能的研究不断深化。学者们在对垃圾污染物与地质体矿物成分、地下水等相互作用和转化机理研究的同时,展开了污染质阻隔材料性能的研究。如加拿大学者 D. A. Dixon(1992)从土的渗透系数、吸附性能、解吸能力及孔隙水运移规律等方面,对膨润土的污染质阻隔能力进行了研究。RoLand Pusch(1989)通过添加剂,对衬垫黏土水理性质和化学性质进行改良,以提高其防渗性能。

上述各研究阶段密切衔接,主要内容相互渗透,反映了垃圾地质填埋研究从定性到定量、从局部条块分割到综合全面性研究的发展趋势和过程。随着对污染质与人工岩土体(防渗衬垫系统)相互关系研究的重视,及对防渗阻隔材料研究和认识的深入,衬垫层的设计更加趋于系统化和富有针对性。