

文章编号:1000-582X(2003)08-0119-04

生活垃圾卫生填埋场沉降特性研究的意义及现状

谢强¹, 张永兴¹, 张建华²

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆市市政管理委员会, 重庆 400015)

摘要:生活垃圾卫生填埋场的沉降是目前卫生填埋法所涉及的主要的岩土工程问题之一。深入开展生活垃圾卫生填埋场沉降特性的研究意义重大, 研究可为合理地组织填埋场生产和最大限度地利用有限的填埋空间、为填埋场保护系统的设计和维护、为填埋场的竖向扩容设计和场地再利用等提供理论依据; 本文同时也简要总结了国内外学者在填埋场沉降研究方面所采用的方法和已取得的一些研究成果, 分析了目前的研究趋势和研究中的存在的一些问题, 进而提出一些研究新思路。

关键词:岩土工程; 生活垃圾; 卫生填埋; 沉降

中图分类号:TU441; X705

文献标识码:A

生活垃圾卫生填埋是一种采取防渗、压实、覆盖和气体、渗滤液治理等环境保护措施的垃圾处理方法。作为一种能大量消纳城市生活垃圾的有效方法和各种废弃物最终处置的必不可少的手段, 卫生填埋具有投资少, 处理方法简单, 运行费用较低, 二次污染少, 产生的沼气可回收利用, 对生活垃圾成分无特殊要求(不要求分选)等优点, 是我国主要的垃圾处理方法之一^[1]。

卫生填埋场中的沉降问题包括填埋场基础沉降和堆体沉降2方面^[2]。基础沉降与地基、基础条件有关, 也与堆体载荷有关。堆体沉降则与填埋施工情况、填埋高度、生活垃圾及填土的特性等有关。一般来说, 一个大型生活垃圾卫生填埋场在投入运营之前, 场址的选择、基础的稳定和沉降等问题都进行过合理性和可

行性的论证, 而在运营期间或场地封闭以后的填埋场自身沉降问题(即堆体的沉降)却是一个长期困扰的问题^[3], 也是目前填埋法所涉及的主要的岩土工程问题之一。文章所指的填埋场沉降主要针对填埋堆体而言。

1 卫生填埋场沉降特性研究的意义

1) 估算场地最终填埋容量, 为合理地组织填埋场生产和最大限度地利用有限的填埋空间提供依据, 达到少占地的目的。

尽管卫生填埋存在诸多优点, 但是其大面积占用土地的问题的严重弊端仍需引起广泛重视。

表1为2002年重庆市各区垃圾日产量预测表(按各区人口及人均垃圾日产量推算估算)。

表1 2002年重庆市各区垃圾日产量预测表

渝中区	九龙坡区	大渡口区	南岸区	巴南区	江北区	北碚区	沙坪坝	渝北区	合计
793	570	169	500	127	493	318	832	253	4 055

说明:表中数据由重庆市固体废物处理有限公司提供。

由表1可以得出重庆各区垃圾年产量为:

$$A = 4\,055 \times 365 = 1\,480\,075 \text{ t/a}$$

考虑目前垃圾填埋场大多属简易填埋, 压实程度不够, 垃圾容重一般为 $0.25 \sim 0.6 \text{ t/m}^3$, 取垃圾平均容

重 $\rho = 0.35 \text{ t/m}^3$, 则填埋垃圾总体积为:

$$V = A/\rho = 1\,480\,075/0.35 = 4\,228\,785.7 \text{ m}^3$$

另设填埋场垃圾的平均填埋高度 $h = 30 \text{ m}$ (大多数填埋场实际上无法达到此高度), 由此可估算得出

• 收稿日期:2003-05-12

基金项目:重庆市建设委员会2001年应用基础研究资助项目

作者简介:谢强(1975-),男,重庆潼南人,重庆大学博士研究生,主要从事岩石力学与工程技术研究。

重庆各区每年垃圾将侵占的土地面积:

$$S = V/h = 4\,228\,785.7/30 = 140\,959.5 \text{ m}^2 \approx 14 \text{ 万 m}^2$$

可以预见,随着人口的增多和居民生活水平的提高,垃圾量的增加,垃圾填埋将占用越来越多的土地资源。据不完全统计,全国历年的垃圾存量已达到60多亿t,侵占土地面积多达5亿m²,国内200多个城市已陷入垃圾包围之中。

实际上,自70年代以来,填埋场占地问题就已经很突出了,填埋处理在国内外大多数城市均面临“地荒”的尴尬境地;此外,填埋设施以及由填埋场管理不善而引发的各类环境问题^[4-5],难以受当地居民的接受及欢迎,新场址的选择往往遭到反对。尽量设法延长垃圾场的寿命、合理高效地利用有限的垃圾卫生填埋空间已成为目前生活垃圾卫生填埋技术研究的主要任务。发达国家和国内一些发达城市的垃圾卫生填埋场由原始废物的直接填埋转向卫生填埋处理之前都先进行预处理,例如焚烧、堆肥、高压打包等等^[1],以达到减少填埋物的体积,延长垃圾卫生填埋场使用年限的目的。但是,国内大多数城市,包括重庆,实行垃圾预处理的条件并不成熟,资金有限、管理难度大是限制垃圾预处理的主要因素。

另外,在填埋达到设计高度并封闭填埋场以后,填埋场通常会迅速沉降到拟定的最终填埋高度以下,这样往往会导致先前被管理机构所批准征用的有偿使用空间因沉降问题而没有被充分利用^[3]。

鉴于上述原因,为有效利用有限的土地资源,最大限度地提高垃圾卫生填埋场库容的利用率,一种间接有效的方法是实现垃圾源头的减量化,而最直接有效的方法则是更为精确地预估填埋过程中已填垃圾体和封场后整个填埋场的沉降量,并根据其沉降规律挖掘其填埋潜力。

2)为填埋场保护系统的设计和维护提供依据。

为减少填埋场封场之后的二次污染,必须建立合适的填埋场保护系统。但是填埋场保护系统,诸如覆盖系统、污染控制屏障、排水系统的设计 and 运营同样会受到填埋场沉降的影响^[3]。填埋场的沉降可能会使填埋场形成凹槽,积水成池,甚至会引引起覆盖系统和排水系统开裂,由此可能使得进入填埋场的雨水和渗出的渗滤液大为增加,最终导致环境污染;较大的沉降还会影响到填埋场内外的建筑物和道路,影响其正常使用,阻碍填埋作业的顺利实施。因此,设计合理的填埋场保护系统和制定有针对性的保护系统维护措施必须以充分把握填埋场沉降规律为基础。

3)为填埋场的竖向扩容设计^[6]和场地再利

用^[7-8]提供依据。

另外,已封闭的填埋场是可以再利用的。我们知道,城市垃圾填埋场大多建在城市近郊的山坳、荒地或海滩里,随着城市规模的不断扩大,此类垃圾填埋场也将逐渐被新兴的工业民用建筑所包围,其土地利用价值将进一步提高,封场之后的填埋场经安全防范处理后可用于种植各类经济林木,可改造为种植浅表作物的良田,也可用作兴建各类厂房、停车场、公园、娱乐场、高尔夫球场、足球场^[9]等等。但其前提是必须保证填埋场沉降变化已经停止或沉降变化已不足以影响场地的再利用,因此,掌握垃圾填埋场中沉降变化特性是非常必要的。

综上所述,深入研究城市生活垃圾卫生填埋场沉降特性不仅具有一定的理论价值,而且还会间接性地带来较大的社会效益、环境效益和经济效益。

2 卫生填埋场沉降特性研究现状

针对填埋场的早期工作主要集中在填埋场场址的特性及其可行性的研究上^[10]。20世纪40年代,随着卫生填埋法的广泛开展,研究人员开始了对垃圾填埋场沉降特性的研究。早期的研究普遍发现以下规律,并已达成共识^[3]:

- 1)大部分的沉降迅速发生;
- 2)紧密填埋可以减小总沉降量;
- 3)生活垃圾在荷载作用下的沉降量随着埋龄和埋深而减小。

目前,填埋场沉降特性的研究主要有以下几种理论或方法:

2.1 经典的土力学压缩理论^[11]

经典的土力学压缩理论认为沉降由3个分量组成:

$$Z_{\text{total}} = Z_i + Z_c + Z_s$$

式中: Z_{total} —总沉降量; Z_i —瞬时沉降量; Z_c —固结沉降量; Z_s —一次压缩(次固结)沉降量。

由于瞬时沉降发生得相当快,因此通常将固结沉降和瞬时沉降列为一类,称为“主沉降”。用于估算竖向应力的增长引起的填埋场主沉降参数包括压缩指数 C_c 和修正压缩指数 C'_c 。

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log(\sigma_1/\sigma_0)}$$

$$C'_c = \frac{\Delta H}{H_0 \log(\sigma_1/\sigma_0)} = \frac{C_c}{1 + e_0}$$

式中: Δe —孔隙比的变化; e_0 —初始孔隙比; σ_0 —初始竖向有效应力,kPa; σ_1 —最终竖向有效应力,kPa;

H_0 —垃圾层的初始厚度, m; ΔH —垃圾层厚度的变化, m。

用于估算填埋场主沉降完成后产生的次沉降参数包括次压缩指数 C_c 和修正次压缩指数 C'_c 。

$$C_c = \frac{\Delta e}{\log(t_1/t_0)}$$

$$C'_c = \frac{\Delta H}{H_0 \log(t_1/t_0)} = \frac{C_c}{1 + e_0}$$

式中: t_0 —初始时刻; t_1 —最终时刻; 其余同前。

1973年, Sowers^[12] 采用上述传统的土力学方法预测过垃圾填埋场的沉降并给出了主压缩指数 C_c 和次压缩指数 C'_c 。通过15个月的现场测试之后, 得出经验数据, 他认为 $C_c = (0.15 \sim 0.55)e_0$; $C'_c = (0.03 \sim 0.09)e_0$, 其中 e_0 为初始孔隙比。Yen 和 Scanlon^[13] 等人, 在其基础上作了更为深入的研究, 对主次压缩指数进行了不同程度的修正。钱学德、郭志平^[14]、胡敏云、陈云敏、温振统^[15] 等人针对国内一些垃圾填埋场的沉降观测和试验数据对主次压缩指数进行过一些专门讨论。

利用经典的土力学压缩理论估算填埋场沉降是当前填埋场设计中最广泛的一种方法, 但这种方法还存在一些问题: 1) 垃圾层的初始孔隙比 e_0 较难测定, 因此, 用主压缩指数 C_c 和次压缩指数 C'_c 计算沉降过于粗略; 2) 缺乏专门针对垃圾填埋物的标准固结试验方法, 压缩指数的选取主要依据经验和现场数据; 3) 有效应力是垃圾容重(和填埋场渗滤液含量)的函数, 其数值通常也不清楚; 4) $e \sim \log \sigma$ 的关系一般是非线性的, 因此, 压缩指数也是随时间和初始应力的改变而变化的; 5) 这种方法实际上与研究软土沉降的常规方法是相同的, 影响固体废弃物沉降的特性, 诸如随时间延长而产生的物理—化学变化和生化分解等, 没有得到充分考虑。

垃圾的沉降与泥炭土表现出的沉降特性有很大的相似之处, 1991年 Tan^[16] 等利用土体固结理论研究过泥炭的沉降特性, 以期间接性描述垃圾填埋场的沉降特性, 但其研究成果仍具一定片面性, 相对而言, 垃圾的成分比泥炭更为复杂, 而泥炭中的有机质状态较为稳定。

2.2 动力蠕变法则

动力蠕变法则是常应力下变形与时间关系最简单的表达式之一, 被广泛用于表述许多工程材料的瞬间蠕变特性。根据该法则, 沉降—时间关系式为:

$$S(t) = H \cdot \varepsilon(t) = H \cdot \Delta \sigma \cdot m(t/t_0)^n$$

式中: m —基准压缩性参数; n —压缩速率; t_0 —引入方程的基准时间以消去量纲(t_0 在计算时取 1 d)。

Edil 等^[17](1990) 分析了来自 4 个不同城市垃圾填埋场的沉降数据来确定用于动力蠕变模型的参数 m, n 的范围值, 其中 $m = 7.52 \times 10^{-8} \sim 3.38 \times 10^{-4} kPa^{-1}$, $= 0.264 \sim 1.70 (t_0 = 1 d)$ 。但是从现场测得的参数、不反映外界条件变化时(例如, 外荷载增加)填埋场的作用应力和平均应变的任何规律, 因此, 以动力蠕变法则建立的沉降模型并未得以推广。

2.3 经验公式

常见的经验公式主要有以下几种:

1) Yen 和 Scanlon^[9,13] 1975 年推导的对数经验公式:

$$\rho = \frac{dS}{dt} = m - n \cdot \log t$$

积分: $S = [m - n(\log t - 1)]t = m' - n' \log t$

式中: S —某一时间段的沉降量, 即 $S = (S_i - S_0)$; ρ —某一时间段的沉降量, 即 $\rho = (\rho_i - \rho_0)$; t —时间段, 即 $t = (t_i - t_0)$; m, n —正的经验常数。

2) Edil^[9,17] 等 1990 年推导的乘幂公式:

$$\rho = \frac{dS}{dt} = \frac{p}{t^q}$$

积分: $S = \frac{p}{1-q} t^{1-q} = p' \cdot t^q$

式中: q —正的经验常数; 其余同前。

3) Tan^[9,16] 等 1991 年推导的双曲线公式:

$$S = \frac{t}{1/\rho_0 + t/S_{\infty}}$$

上式表达为 $t/S_{\infty} - t$ 的关系式为: $\frac{t}{S} = \frac{1}{\rho_0} + \frac{t}{S_{\infty}}$, 可以看出 t/S_{∞} 与 t 成线性关系。

式中: ρ_0 —初始沉降率($t = t_0$); S_{∞} —最终沉降量($t \rightarrow \infty$); 其余同前。

4) 国内学者推导的直线型经验公式^[8]:

国内研究主要集中在同济大学和浙江大学, 下式为同济大学一些学者在室内试验基础上总结出的直线型经验公式:

$$L = -0.05758t + 41.5593 \quad t: 30 \sim 190 d$$

式中: L —垃圾高度, cm; t —时间, d。

使用经验公式, 可使问题得以简化, 但填埋场的沉降是一个相当复杂的过程, 过分的简化将忽略各种外界因素对填埋场沉降影响的重要性和主次性, 对填埋场沉降特性的研究也难以深入。

可以这样说, 到目前为止还没有建立较为完善的预测填埋场沉降特性的合理模型和理论, 或者说合理的模型和理论还没有被大家所普遍接受^[3]。

3 卫生填埋场沉降特性研究新思路

1) 探讨并制定适合于垃圾填埋物本身特点的压缩试验标准,包括垃圾试样的制作和压缩装置^[18-19]的研制。

城市生活垃圾成分本来就十分复杂,要量化描述垃圾填埋物的各向异性是比较困难的,再加上由于各地气候、季节、生活水平与习惯、能源结构等差异,造成城市生活垃圾成分和产量更加多种多样、不均匀,而且变化幅度大。目前国内大多数城市已基本完成对当地垃圾典型组分的调查,我们认为根据调查结果配制垃圾试样再进行压缩试验是可行的,由此而得出的研究成果具一定的可比性。

另外垃圾的压缩过程中会不断排除渗滤液和气体,其内部温度也有一定的变化,传统的压缩装置必须加以改装(包括装置的尺寸、气液收集系统、温度测定系统、加压系统等等)才有可能获取可靠的试验数据。

2) 建立合理的填埋场沉降模型。

影响垃圾场沉降的因素众多,其中垃圾本身的生化分解是垃圾填埋体不同于一般的岩土工程材料的主要原因。笔者认为针对目前预测填埋场沉降特性的合理模型和理论尚未完善的现状,今后的研究工作必须在充分考虑垃圾填埋体的特殊性和自身特点的基础上,以大量的室内和室外试验为手段,建立完善的数据库,才有可能建立适用性强的可预测填埋场沉降的合理模型。

填埋场沉降规律的实质是填埋体变形随时间发展变化的过程,即我们通常所说的“蠕变”^[20],与一般的工程材料不同的是,这种变化持续时间将长达数年,甚至数十年。以有限时间范围内的试验数据预测一定时间内填埋场的沉降,建立垃圾填埋材料的蠕变模型将为卫生填埋法的合理利用提供理论依据。

3) 进行填埋场的长期沉降观测,进一步完善填埋场沉降模型。

4) 加强填埋场影响因素研究,分析各类因素对模型参数的影响程度,进而提出加速填埋场沉降的各类物理的、生物的或化学的方法。

参考文献:

- [1] 李国建,陈世和,邵立明. 城市垃圾处理与处置[M]. 北京:中国环境科学出版社,1992. 8.
- [2] 胡敏云,陈云敏. 城市生活垃圾填埋场沉降分析与计算[J]. 土木工程学报,2001,34(6):88-92.

- [3] 钱学德. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2001. 5.
- [4] 彭绪亚,黄文雄,徐毅. 简易垃圾填埋场的污染控制与生态恢复[J]. 重庆建筑大学学报(自然科学版),2002,24(1):106-110.
- [5] 陈家军,张俊丽,裴照滨. 垃圾填埋二次污染的危害与防治[J]. 安全与环境学报,2002,2(3):27-30.
- [6] 朱向荣,王朝晖,方鹏飞. 杭州天子岭垃圾填埋场扩容可行性研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):281-285.
- [7] 李化,赵由才. 填埋场稳定化垃圾的开采、利用及填埋场土地利用分析[J]. 环境卫生工程,2000,(8)2:56-61.
- [8] 刘之春,蒋永生. 深厚垃圾填埋场地上多层建筑地基基础的设计[J]. 建筑技术,2002,33(3):204-205.
- [9] HOEL, LESHCHINSKY, DOV, MOHRI. Estimation of municipal solid waste landfill settlement Ling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(1):21-28.
- [10] 戚筱俊. 固体废物安全填埋场的工程地质研究[J]. 西部探矿工程,2001,(1):22-25.
- [11] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994,4.
- [12] SOWERS G F. Settlement of waste disposal fills[C]. Moscow Proc., 8th Int. Conf. on Soil Mech. and Foundatin Engrg. 1973,207-210.
- [13] YEN B C, SCANLON B. Sanitary landfill settlement rates[J]. J. Geotech Engrg ASCE, 1975,101((5):475-487.
- [14] 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.
- [15] 胡敏云,陈云敏,温振统. 城市垃圾填埋场垃圾土压缩变形的研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(1):123-126.
- [16] TAN T S., INOUE T, LEE S L. Hyperbolic method for consolidation analysis[J]. J. Geotech Engrg, ASCE, 1991, 117(11), 1 723-1 737.
- [17] EDIL T B, RANGUETTE V J, WUELLNER W W. Settlement of municipal refuse [M]. West Conshohocken: Geotechnics of waste fills - theory and practice, STp 1070, Landva and Knowles, eds., ASTM, 1990,225-239.
- [18] 朱青山,赵由才,徐迪民. 垃圾填埋场中垃圾降解与稳定化模拟试验[J]. 同济大学学报,1996,24(5):596-600.
- [19] DEAN K, ZEISS. Municipal landfill biodegradation and settlement Wall[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, 121(3):214-224.
- [20] C C 维亚洛夫. 土力学的流变原理[M]. 北京:科学出版社,1987. 5.

(下转第126页)

- [6] 胡锋平,刘建斌. 水解酸化-生物接触氧化气浮工艺处肉类加工废水[J]. 给水排水,2001,27(9):54-55.
- [7] 刘绍根,黄显怀,赵峰. UASB-SBR 工艺处理屠宰废水[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然版),2001,9(1):54-57.
- [8] 宁平,朱易,金时英. CAF 涡凹气浮-SBR 法在屠宰废水处理中的应用[J]. 环境工程,2001,19(3):14-15.

Applying Secondary Anaerobic - SBR Process to Treat Meat Processing Wastewater

ZHANG Xue-hong^{1,2}, WANG Dun-qi^{1,2}, YU Ze-bin¹, CHEN Hong³

(1 College of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2 Department of Resource and Environment Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541002, China;

3 Guilin Agency of Environment Protection, Guilin 541002, China)

Abstract: Meat processing wastewater is characterized with high organic concentration, high chromaticity color, and inconstant quality and quantity. Two-phase anaerobic-aerobic process is introduced to treat this kind of wastewater. After flowing through the two grilles by which the particulate pollutant was removed, the wastewater went through anaerobic contact tank, anaerobic baffled reactor (ABR) in turn. After the organic was removed in SBR, the wastewater was filtered, then discharged. The combined elastic filler was fixed in the reactor into which the activated zeolite was put as supporter. The investment is 3 500 yuan per ton, and the treating cost is 0.6 yuan. The running result shows that applying this process to treat meat processing wastewater is useful, which has merits of good maneuverability, stable water quality, and high efficiency. It is a method which is worth to be populated in our country.

Key words: meat processing wastewater; two-phase anaerobic; SBR process

(编辑 姚 飞)

(上接第 122 页)

Significance and Present Conditions of Research on the Settlement of MSW Landfill

XIE Qiang¹, ZHANG Yong-xing¹, ZHANG Jian-hua²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Municipal Administration Committee, Chongqing 400015, China)

Abstract: The settlement of MSW landfill is a principal Geotechnical Engineering problem of sanitary landfilling. It is significant to do research on the settlement of MSW landfill. The research will provide grounds in theory for organizing the procedures of land filling, for using the limited space of landfill, for design and maintenance of the protection system, for design of the capacity expansion in vertical and for reuse of the closed landfills. The authors also review some commonly used methods for the MSW landfill settlement research and some results achieved by the domestic and overseas scholars. Some new ideas of research on the settlement of MSW landfill are briefly presented.

Key words: geotechnical engineering; municipal solid Waste (MSW); sanitary landfill; settlement

(编辑 姚 飞)