

# 考虑降解率下的垃圾土降解压缩量计算模型

刘东燕, 冯国建, 罗云菊, 赵新涛

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**从无机物质量不变出发,在考虑降解率与密度变化的情况下,围绕垃圾土的密度、质量与体积三者关系,结合由自配试样进行降解试验获得的降解率规律,推导了垃圾土一维降解压缩模型。研究表明,降解压缩量与初始时刻有机物的体积百分含量、降解率及初始高度有关,且成正比关系。利用该模型对重庆市某垃圾填埋场的有机物降解沉降量进行了计算,可以看出降解沉降量与时间呈指数函数关系,在填埋初期降解沉降速率较大,随着时间推移,降解沉降量趋于稳定。

**关键词:**垃圾填埋场;降解;沉降;模型

**中图分类号:**TU434 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)02-0014-05

## Degradation Settlement Model of Municipal Solid Waste with the Degradation Rate

LIU Dong-yan, FENG Guo-jian, LUO Yun-ju, ZHAO Xin-tao

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** By the law of conservation of mass, one-dimensional municipal solid waste(MSW) degradation model was proposed with considering the degradation and density fluctuation, the relationship between density, quality and volume and the degradation characteristics obtained from the degradation test. With the analysis, it was found that the settlement of degradation was positive proportional with the following three elements; the volume percentage of organic matter, the rate of degradation and the initial height. As a case study, the degradation settlement of Chongqing MSW landfill was predicted. And it was found that the relationship between the settlement and the time showed exponential attenuation trend, in which the degradation settlement of MSW landfill was large in the initial stages, and then it gradually stabilized with the time.

**Key words:** municipal solid waste landfill;degradation;settlement;models

卫生填埋是处置生活垃圾的一种有效、经济的方法<sup>[1]</sup>。填埋场在填埋过程中及封场后将会遇到很多环境土工问题,如填埋场的沉降变形计算、稳定性分析及填埋设施损坏等,其中填埋场的沉降变形研究是环境土工中最关心的课题之一。填埋场的沉降主要由主沉降、次沉降和有机物分解沉降 3 部分组成<sup>[2-3]</sup>,并且有机物降解引起的沉降在填埋场长期沉

降中是主要的<sup>[4]</sup>。因此,要全面了解填埋场的沉降变形,就需要研究垃圾土中有机物的降解引起的沉降。

关于垃圾填埋场的沉降计算,一直都沿用传统土力学理论来进行计算。然而,采用传统土压缩理论存在一定弊端,其中主要的一点就是没有认识到垃圾土的有机物降解,并未从沉降发生的机理出发

收稿日期:2009-12-25

基金项目:重庆大学研究生科技创新基金项目(200811A1B0060295)

作者简介:刘东燕(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事环境岩土及地质灾害防治研究,(E-mail) fengguojian2000@163.com。

进行分析研究<sup>[5]</sup>。随着人们对沉降认识的不断深入,生物降解沉降以及影响因素得到考虑。Park 和 Lee<sup>[6]</sup>指出,填埋场的总沉降量在考虑生物降解时是不考虑生物降解时的2倍,说明在填埋场的长期沉降中,生物降解效应占一定的主导作用。Jin<sup>[7]</sup>通过7个模拟的生物反应器来研究含水量、有机物成分对降解的影响,指出增加含水量和有机物成分会加速垃圾土的降解。Junqueira<sup>[8]</sup>、Swati<sup>[9]</sup>也研究了含水量对垃圾土降解的影响,得到同样的结论:往试样中添加水或者渗滤液,能增加试样的次沉降。Sherie<sup>[10]</sup>指出在好氧条件下的沉降速率要高于厌氧条件下的沉降速率,并且指出增加垃圾土内有机物的含量能加快降解和沉降。张振营<sup>[11-12]</sup>在土力学原理的基础上,考虑垃圾土中有机物的降解作用,提出了垃圾土压缩量计算公式。彭功勋<sup>[13]</sup>通过试验认为试样质量损失率是体积损失率的2倍,得到有机物降解引起的体积缩减量。孔宪京<sup>[14]</sup>通过对比试验得出,生物降解引起的体积缩减量随时间的延长呈指数型增长,生物降解引起的体积缩减量占垃圾体积的24%左右。

该文假定垃圾土内无机物的密度不发生变化,在考虑降解率及密度变化的情况下,围绕垃圾土的密度、质量与体积三者关系,进行有机物降解作用下垃圾土的降解沉降研究。

## 1 模型推导

垃圾土内成分复杂,主要由有机物和无机物组成。假设无机物在垃圾填埋过程中,质量和密度均不发生变化,分别为 $m_s$ 、 $\rho_s$ 。在初始时刻,垃圾土内有机物的质量和密度分别为 $m_{01}$ 、 $\rho_{01}$ ,单元初始高度为 $h_1$ ;经过时间 $\Delta t$ 后,垃圾土内的有机物发生降解,质量减小为 $m_{02}$ ,密度变为 $\rho_{02}$ ,单元高度为 $h_2$ 。单元体在有机物降解作用下,发生沉降 $s = h_1 - h_2$ 。初始时刻及经过时间 $\Delta t$ 后的状态对比图如图1所示。

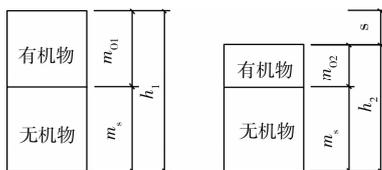


图1 垃圾土质量变化示意图

在初始时刻,垃圾土内有机物质量百分含量及体积百分含量分别用下式表示

$$A_{m1} = \frac{m_{01}}{m_s + m_{01}} \quad (1)$$

$$A_{v1} = \frac{v_{01}}{v_{01} + v_s} = \frac{\frac{m_{01}}{\rho_{01}}}{\frac{m_{01}}{\rho_{01}} + \frac{m_s}{\rho_s}} = \frac{1}{1 + \frac{1 - A_{m1}}{A_{m1}} \frac{\rho_{01}}{\rho_s}} \quad (2)$$

式中 $A_{m1}$ 为初始时刻垃圾土中有机物的质量分数,%; $m_{01}$ 为初始时刻垃圾土中有机物的干质量,kg; $m_s$ 为初始时刻垃圾土中无机物的干质量,kg; $A_{v1}$ 为初始时刻垃圾土中有机物的体积分数,%。

经过时间 $\Delta t$ 后,垃圾土内有机物的质量百分含量为

$$A_{m2} = \frac{m_{02}}{m_s + m_{02}} \quad (3)$$

由于假设无机物的质量不发生变化,因此,由式(1)、式(3),分别求出 $m_s$ ,有

$$\frac{1 - A_{m1}}{A_{m1}} m_{01} = \frac{1 - A_{m2}}{A_{m2}} m_{02} \quad (4)$$

垃圾土的总质量由有机物质量和无机物质量组成,即

$$m = m_s + m_0 \quad (5)$$

设垃圾土柱的横截面积为 $S$ ,在初始时刻,垃圾土的总质量和密度分别为

$$m_1 = m_s + m_{01} = \frac{1 - A_{m1}}{A_{m1}} m_{01} + m_{01} = \frac{1}{A_{m1}} m_{01} \quad (6)$$

$$\rho_1 = \frac{m_1}{v_1} = \frac{\frac{1}{A_{m1}} m_{01}}{Sh_1} \quad (7)$$

经过时间 $\Delta t$ 后,垃圾土的总质量和密度分别为

$$m_2 = m_s + m_{02} = \frac{1 - A_{m2}}{A_{m2}} m_{02} + m_{02} = \frac{1}{A_{m2}} m_{02} \quad (8)$$

$$\rho_2 = \frac{m_2}{v_2} = \frac{\frac{1}{A_{m2}} m_{02}}{Sh_2} \quad (9)$$

由式(7)和式(9),可得

$$m_{01} = \rho_1 Sh_1 A_{m1}; m_{02} = \rho_2 Sh_2 A_{m2} \quad (10)$$

把式(10)代入式(4),得

$$\frac{1 - A_{m1}}{A_{m1}} \rho_1 Sh_1 A_{m1} = \frac{1 - A_{m2}}{A_{m2}} \rho_2 Sh_2 A_{m2} \quad (11)$$

由于 $s = h_1 - h_2$ ,式中 $s$ 为垃圾土柱的降解沉降量。有

$$s = \left[ 1 - \frac{1 - A_{m1}}{1 - A_{m2}} \frac{\rho_1}{\rho_2} \right] h_1 \quad (12)$$

## 2 模型分析

式(12)即为降解沉降量计算公式,从该式可知,

影响沉降量的因素之一是垃圾土的密度,如果在垃圾土的沉降计算中,不考虑有机物的降解对垃圾土密度的影响,即式(12)中 $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1$ 时,式(12)化简为

$$s = \left[ 1 - \frac{1 - A_{m1}}{1 - A_{m2}} \right] h_1 = \left[ \frac{A_{m1} - A_{m2}}{1 - A_{m2}} \right] h_1 \quad (13)$$

式(13)就和文献[11]的计算结果一致。

在推导垃圾土密度 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 时,为使问题得到简化,假设降解前后垃圾土内有机物的密度不发生变化,即假设 $\rho_{01} = \rho_{02} = \rho_0$ 。

初始时刻,垃圾土的密度

$$\rho_1 = \frac{m_1}{v_1} = \frac{m_1}{v_{\text{有机物1}} + v_{\text{有机物2}}} = \frac{m_1}{\frac{m_{01}}{\rho_{01}} + \frac{m_s}{\rho_s}} = \frac{m_1}{\frac{A_{m1}m_1}{\rho_{01}} + \frac{(1 - A_{m1})m_1}{\rho_s}} = \frac{1}{\frac{A_{m1}}{\rho_{01}} + \frac{1 - A_{m1}}{\rho_s}} \quad (14)$$

经 $\Delta t$ 时间降解后,垃圾土的密度

$$\rho_2 = \frac{m_2}{v_2} = \frac{m_{02} + m_s}{\frac{m_{02}}{\rho_{02}} + \frac{m_s}{\rho_s}} = \frac{(1 - \lambda_m)A_{m1}m_1 + (1 - A_{m1})m_1}{\frac{(1 - \lambda_m)A_{m1}m_1}{\rho_{02}} + \frac{(1 - A_{m1})m_1}{\rho_s}} = \frac{1 - \lambda_m A_{m1}}{\frac{(1 - \lambda_m)A_{m1}}{\rho_{02}} + \frac{1 - A_{m1}}{\rho_s}} \quad (15)$$

式(15)中的 $\lambda_m$ 为垃圾土的降解率, $\lambda_m =$

$$\frac{m_{01} - m_{02}}{m_{01}} \times 100\%。$$

用式(14)除以式(15),得

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\frac{1}{\frac{A_{m1}}{\rho_{01}} + \frac{1 - A_{m1}}{\rho_s}}}{\frac{1 - \lambda_m A_{m1}}{\frac{(1 - \lambda_m)A_{m1}}{\rho_{02}} + \frac{1 - A_{m1}}{\rho_s}}} = \frac{(1 - \lambda_m)A_{m1}\rho_s + (1 - A_{m1})\rho_0}{[A_{m1}\rho_s + (1 - A_{m1})\rho_0](1 - \lambda_m A_{m1})} \quad (16)$$

分析式(16)可知,虽然在计算过程中假设了有机物和无机物的密度不发生变化,但由于存在降解,垃圾土的整体密度还是发生了变化。当不考虑降解率时,即式(16)中的 $\lambda_m = 0$ 时,垃圾土的密度不会发生变化。

将式(16)代入(12),得

$$s = \left[ 1 - \frac{1 - A_{m1}}{1 - A_{m2}} \frac{1 - A_{v1}\lambda_m}{1 - A_{m1}\lambda_m} \right] h_1 \quad (17)$$

经 $\Delta t$ 时间后,垃圾土内有机物的质量百分含量

$A_{m2}$ 可以表示为

$$A_{m2} = \frac{m_{02}}{m_{02} + m_s} = \frac{(1 - \lambda_m)m_{01}}{(1 - \lambda_m)m_{01} + m_s} = \frac{(1 - \lambda_m)A_{m1}m_1}{(1 - \lambda_m)A_{m1}m_1 + (1 - A_{m1})m_1} = \frac{(1 - \lambda_m)A_{m1}}{1 - \lambda_m A_{m1}} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17),进行化简,最后得到垃圾土在有机物降解情况下的沉降公式

$$s = A_{v1}\lambda_m h_1 \quad (19)$$

式(19)即为考虑有机物降解情况下,垃圾土的沉降计算公式。从该式可以看出,降解沉降量与以下3种因素有关:初始时刻垃圾土内有机物的体积百分含量 $A_{v1}$ 、垃圾土的降解率 $\lambda_m$ 以及垃圾土的初始高度 $h_1$ ,并且降解沉降量与这三者成正比例的关系。

### 3 计算实例

重庆市某垃圾填埋场始建于1986年,场址位于市区旁几条冲沟的交汇处,距市区约800m。该填埋场属于简易填埋场,到封场时,已填埋垃圾约220万t,垃圾填埋平均厚度为23m。

根据李东<sup>[15]</sup>对重庆市垃圾成分进行的分析可知,垃圾土内有机物质量百分含量为47.41%,由此可得填埋场内有机物的质量为104万t,则填埋场内无机物的质量为116万t。由于填埋场内有机物和无机物的种类众多,且各成分的密度也不一样,因此,有机物的密度和无机物密度应采用加权密度,密度按下式确定

$$\rho = \frac{\sum m_i \rho_i}{m_i}$$

式中: $\rho_i$ 为垃圾中各成分的密度; $m_i$ 为垃圾中各成分的质量。

经计算,初始时刻垃圾土内有机物的体积百分含量为60.7%。

根据中国垃圾填埋场的垃圾成分统计资料,结合重庆市的垃圾成分的分析<sup>[16]</sup>,自行配置一具有代表性的成分进行降解试验获得试样的降解率,试验所用材料见表1。试样干重为100g,含水率为50%,试验环境温度控制在18~21℃范围内。限于篇幅,未写出具体试验过程,只给出试验结果。经过近4个月的试验,得到图2所示的降解率及降解速率曲线。根据试验结果,拟合得到垃圾土内有机物的降解规律公式,即

$$\lambda_m = a(b - e^{-ct})$$

式中 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为降解控制参数(无量纲)。

表 1 试验所用垃圾土组成/g

麦麸	纸	塑料	纺织品	果皮	土
30	15	15	5	10	25

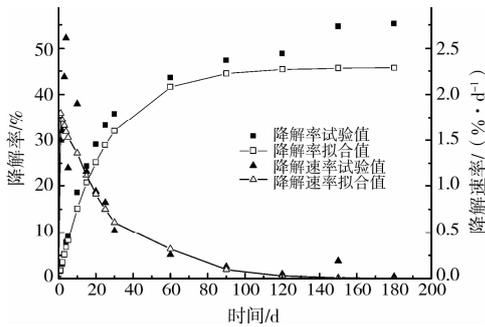


图 2 垃圾土有机物降解试验曲线

利用式(19),计算垃圾填埋场由于有机物降解引起的沉降量,见表 2。

表 2 垃圾填埋场的有机物降解沉降量

时间/d	0	50	100	200	300	600	900
降解沉降量/m	0	5.52	6.27	6.38	6.38	6.38	6.38

将该文模型计算值与现有模型计算值进行比较,现有模型选用比较常用的 Sowers 模型,该模型中由于有机物降解引起的沉降公式为  $s_u = H \cdot C_a \cdot l_g(t/t_{ci})$ ,其中  $H$  为填埋场沉降前的初始厚度,  $C_a$  为次固结系数,取值范围为 0.03~0.1,  $t_{ci}$  为次固结时间。根据模型参数取值要求,取几种不同的参数取值情况(分 3 种)来进行计算,见表 3,由此可以得到由于有机物降解引起的沉降量曲线。将该曲线绘于图 3 中。

表 3 Sowers 模型参数取值

Sowers 模型	1	2	3
次固结系数	0.03	0.1	0.1
次固结时间/d	2	2	0.5

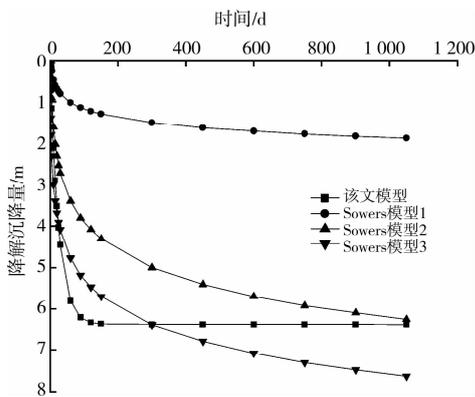


图 3 该文模型与 Sowers 模型沉降量比较

将表 2 的计算结果同样绘于直角坐标系中(图 3),从该图可以看出,有机物的降解沉降量随时间的增加而逐渐增大,在填埋初期,降解沉降量较大,并

且降解沉降量与时间成指数函数关系。当填埋时间  $t \rightarrow \infty$  时,由于降解引起的沉降稳定在 6.38 m,该沉降量占填埋场初始高度的 27.74%,最终降解率稳定在 45.76%,由于降解导致的质量损失为 47.59 万 t,垃圾土的质量损失率是体积损失率的 1.65 倍,该结论与文献[11]和[12]通过试验得到的结论基本一致。由图 3 还可看出,当采用 Sowers 模型 1 时, Sowers 模型计算值明显小于该文模型计算值,但二者的降解规律相符,均是在最初时间内迅速发生降解,然后降解趋于稳定。当采用 Sowers 模型 2 和 Sowers 模型 3 时,在 200 d 以前 Sowers 模型计算值小于该文模型计算值,由于 Sowers 模型 3 是有利垃圾土降解的情况,因此,模型 3 计算值与该文模型计算值在初始时间内相差不大。在 200 d 之后,该文模型计算值处于模型 2 和模型 3 计算值之间。以上分析表明, Sowers 模型受参数取值影响较大,只有经验性的取值范围,因而不利于推广。

### 4 结论

在假设无机物密度不变的情况下,推导了在有机物降解情况下垃圾土的沉降计算公式,并应用该公式对重庆市某垃圾填埋场的降解沉降进行了计算,得到了以下结论:

- 1)在假定垃圾土内无机物的密度不变及考虑有机物降解的情况下,经过一系列推导,得到了垃圾土一维降解沉降计算公式;
- 2)垃圾土内有机物的降解规律符合指数衰减规律,降解率在初始时间内逐渐增大,随后趋于定值,降解速率有先增大后减小的变化趋势;
- 3)重庆市某垃圾填埋场的降解沉降量与时间呈指数衰减关系,随着时间的增加,降解沉降量在初期较大,随后逐渐减小,并趋于一个定值。

模型是在未考虑温度作用影响下得到的,而实际垃圾填埋场内由于有机物的降解会产生大量的热量,热量的迁移反过来会影响有机物的降解,进而影响填埋场的沉降规律。因此,模型中应考虑温度场的影响。总之,填埋场的降解沉降问题相当复杂,有待理论和试验工作的进一步深入研究。

### 参考文献:

[1] 蒲舸. 城市生活垃圾处理的可持续发展[J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25(6): 94-99.

PU GE. Sustainable development of municipal solid waste disposal [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2003, 25(6): 94-99.

- [2] 刘毓斌, 黄超强. 考虑生物降解的填埋场长期沉降研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1532-1534.  
LIU YU-CHUAN, HUANG CHAO-QIANG. Estimation of long-term settlement of landfill considering biological decomposition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1532-1534.
- [3] 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.  
HU MIN-YUN, CHEN YUN-MIN. Calculation for the settlement of MSW landfill [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 88-92.
- [4] 张振营, 陈云敏. 城市垃圾填埋场沉降模型的研究[J]. 浙江大学学报:工学版, 2004, 38(9): 1162-1165.  
ZHANG ZHEN-YING, CHEN YUN-MIN. Settlement model of municipal solid waste landfill[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2004, 38(9): 1162-1165.
- [5] MONTEIRO V E D, JUCA J F T. Geotechnical studies of clay liners in a municipal solid waste landfill [C]//Environmental Geotechnics. Rotterdam. London, 1998: 185-189.
- [6] PARK Y I I, LEE S R, DO N Y. Evaluation of decomposition effect on long-term settlement prediction for fresh municipal solid waste landfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(2):107-118.
- [7] JIN H, WARITH M A, MEMON M. Accelerating the biodegradation of high moisture and organic content solid wastes in bioreactor landfills [C]//33rd CSCE Annual Conference 2005: 9th Environmental Engineering Specialty Conference, Toronto, Canada, 2005:1-10.
- [8] JUNQUEIRA FERNANDO F, SILVA ANTONIO RAFAEL LEITE, PALMEIRA ENNIO MARQUES. Monitoring operational and leachate characteristics of an aerobic simulated landfill bioreactor[J]. Journal of Solid Waste Technology and Management, 2007, 33(1): 1-15.
- [9] SWATI M, JOSEPH, KURIAN. Settlement analysis of fresh and partially stabilised municipal solid waste in simulated controlled dumps and bioreactor landfills[J]. Waste Management, 2008, 28(8): 1355-1363.
- [10] SHERIEN A ELAGROUDY, ABDEL-RAZIK, MOHAMED H, et al. Waste settlement in bioreactor landfill models[J]. Waste Management, 2008, 28(11): 2366-2374.
- [11] 张振营, 陈云敏. 城市垃圾填埋场有机物降解沉降模型的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 238-241.  
ZHANG ZHEN-YING, CHEN YUN-MIN. Degradation settlement model of organic substance of municipal solid waste landfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(2): 238-241.
- [12] 张振营, 吴世明, 陈云敏. 天子岭垃圾填埋场有机物降解规律的研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 60-62.  
ZHANG ZHEN-YING, WU SHI-MING, CHEN YUN-MIN. Study on degradation law of organic substance of Tianziling MSW landfill[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(1): 60-62.
- [13] 彭功勋. 城市生活固体废弃物的沉降变形研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [14] 孔宪京, 孙秀丽, 邹德高, 等. 垃圾土中有机物降解引起的体积缩减量与时间的关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2060-2065.  
KONG XIAN-JING, SUN XIU-LI, ZOU DE-GAO, et al. Study on relationship between volume reduction of municipal solid waste due to biodegradation and time [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2060-2065.
- [15] 李东, 顾恒岳. 重庆市主城区生活垃圾现状调查与分析[J]. 重庆环境科学, 2001, 23(1): 67-69.  
LI DONG, GU HENG-YUE. Investigation and analysis of municipal solid waste status in Chongqing [J]. Chongqing Environmental Science, 2001, 23(1): 67-69.
- [16] 罗云菊. 西部山城垃圾填埋场气液运移规律及其污染控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.

(编辑 胡英奎)