

文章编号:1671-8879(2012)04-0061-04

Usher 模型在垃圾土沉降预测中的应用

张玉杰,郝增韬,谭 进

(贵州交通职业技术学院 建筑工程系,贵州 贵阳 550008)

摘 要:为了预测垃圾土的沉降量,以便指导填埋场的建设以及封场利用,基于线性加载情况下垃圾土的沉降变形曲线呈“S”型这一特征,指出可用 Usher 模型预测其沉降随时间的变化规律,通过分离变量法,结合初始条件对建立的 Usher 模型求解,得到模型解的表达式。通过分析可知,Logistic 模型和 Gompertz 模型是 Usher 模型的特例。采用重复二元回归法对 Usher 模型参数进行求解,利用该模型对某填埋场的沉降量进行了计算,通过计算可知,Usher 模型的误差平方和为 108.19,而 Logistic 模型和 Gompertz 模型的误差平方和分别为 162.21 和 952.41。对比结果说明,Usher 模型具有较高的预测精度,对同类工程的沉降预测具有一定的指导意义。

关键词:地基处理;沉降预测;Usher 模型;重复二元回归法

中图分类号:TU196.2

文献标志码:A

Prediction of refuse soil settlement by Usher model

ZHANG Yu-jie, HAO Zeng-tao, TAN Jin

(Department of Architectural Engineering, Guizhou Polytechnic College of
Communications, Guiyang 550008, Guizhou, China)

Abstract: The prediction of the settlement of municipal solid waste (MSW) is important to guide the design, build and use of landfill. Based on the feature that settlement deformation under the linear load condition present the “S” form of MSW, the Usher model was used to predict the change law with time of settlement by the variable separation method with the initial condition. The result show that the Logistic model and Gompertz model is the special examples of Usher model. The repetition duality regression method was adopted to solve parameters and to calculate the settlement of a MSW. The error square of Usher model, Logistic model and Gompertz model was 108.19, 162.21 and 952.41 respectively. The results indicate that the Usher model in predicting the settlement is reasonable and have a higher forecast accuracy, it can be adopted in engineering practice. 1 tab, 1 fig, 10 refs.

Key words: foundation treatment; settlement prediction; Usher model; repetition duality regression

0 引 言

随着国家城市化进程的加快和居民生活消费水

平的提高,城市生活垃圾的增长速度十分迅速。中国目前主要采用卫生填埋的方式,对城市生活垃圾进行处理^[1-2]。在城市生活垃圾填埋过程中,由于有

收稿日期:2011-09-20

基金项目:贵州省交通运输厅科技项目(2010-121-048)

作者简介:张玉杰(1970-),男,江苏南京人,副教授,工学硕士,E-mail:1147514464@qq.com。

机物的降解以及上覆荷载的共同作用,城市生活垃圾填埋场会发生沉降变形,由此会对填埋场的设计、建设、运营以及开发利用造成一定影响,因此,必须对沉降问题予以足够重视。

国内外针对城市生活垃圾沉降变形的研究已有很长的历史,对城市生活垃圾沉降变形均进行过深入的研究。在试验研究方面,谢强利用自制的蠕变压缩仪器对试样采取分别加载的方式,研究城市生活垃圾的蠕变特性。通过试验得出:加荷状态下,填埋初期城市生活垃圾的沉降很快,沉降量为整个试验阶段沉降量的 80%~92%;初期沉降与荷载有关,荷载越大,初期沉降越大;城市生活垃圾的变形不可能永久进行下去,理论上应有应变极限,即具有衰减蠕变的特点^[3]。朱青山等采用聚乙烯筒作为试验仪器,在恒定压力作用下研究城市生活垃圾的变形及生物降解特性,得到沉降与时间的关系式^[4]。上述研究虽然通过室内试验已取得一些有价值的成果,但是存在一定弊端,如研究者采用的试验仪器各不相同,试验操作方式也存在差异,因试验方法不同,得出的试验结果可比性较差^[5-7]。总体来说,关于城市生活垃圾的试验仪器以及试验操作步骤还没有规范可循,因此,在室内试验设备及试验方法的规范化方面还有待进一步完善。在理论研究方面,研究者尝试将主固结、次固结结合起来,提出以积分形式建立沉降模型。这类模型与一般土的沉降模型形式相似,容易被人们接受。这类模型存在以下缺点:城市生活垃圾沉降曲线中,主、次固结的分界点难以把握,两部分常常交错发生,很难区分开^[8-9]。因此,人为的把城市生活垃圾的压缩过程分割成主、次固结两个阶段是欠妥当的。Edgers 等提出专门用于描述城市生活垃圾因生物降解而产生的沉降^[10]

$$w_{\text{bio}} = HB[e^{\beta(t-t_k)} - 1]$$

式中: H 为填埋场高度; t_k 为有机物降解开始时间; B 、 β 均为参数,0.122 3/年 < β < 1.267/年。

对该式进行求导,得到有机物降解沉降速率为 $HB\beta(t-t_k)\{e^{\beta(t-t_k)}-1\}$ 。该沉降速率是一个严格单调增加的函数,这与填埋场中“有机物降解速率先增加后降低”的规律不符;并且当 $t \rightarrow \infty$ 时, $w_{\text{bio}} \rightarrow \infty$,这显然是不符合实际的。

综上所述,目前还没有预测沉降特性的合理模型,对填埋场的沉降量很难做出较为准确的计算与估计。因此,对城市生活垃圾填埋场的沉降问题进行研究,有一定的意义。为此,本文基于线性加载情况,建立了 Usher 模型,并进行求解。

1 预测模型的建立及求解

垃圾土在填埋过程中,一般都是每天在填埋场上把垃圾铺散成一定厚度的薄层,然后压实,并在压实之后用一层厚 15~30 cm 的粘土或粉煤灰覆盖。这种填埋方式相当于对垃圾土进行线性加载。梅国雄等人证明,在线性加载情况下,土体的沉降-时间曲线呈“S”型^[11-12]。由于 Usher 曲线具有“S”型变化的数学特征,因此,可通过 Usher 曲线来拟合垃圾土沉降量随时间的变化规律。

美国学者 Usher 于 1980 年提出了一个描述增长信息随时间变化的数学模型,用微分方程表述为

$$\frac{dy}{ydt} = \frac{a}{b} \left[1 - \left(\frac{y}{y_m} \right)^b \right] \quad (1)$$

式中: y 为模型参数; a 为增长速度因子; b 为形状因子; y_m 为极限值。

对式(1)进行变量分离,可得

$$\ln \left| \frac{(y/y_m)^b - 1}{y_m^b} \right| = -a + c_1 \quad (2)$$

式中: c_1 为积分常数。

由式(2)可得式(1)的通解为

$$y = \frac{y_m}{[1 + c_2 y_m^b e^{-at}]^{\frac{1}{b}}} \quad (3)$$

由于式(3)中含有常数 c_2 ,因此还不能完全反映发展规律。对于该常数,可通过初始条件来确定。把初始条件 $y(0) = y_0$ 代入式(3)可得

$$c_2 = \frac{(y_m/y_0)^b - 1}{y_m^b}$$

把 c_2 代入式(3)可得

$$y = \frac{y_m}{\{1 + [(y_0/y_m)^{-b} - 1]e^{-at}\}^{\frac{1}{b}}} \quad (4)$$

式中: y_0 为初始值。

若设 $c = (y_0/y_m)^{-b} - 1$,则式(2)可简化为

$$y = \frac{y_m}{(1 + ce^{-at})^{\frac{1}{b}}} \quad (5)$$

由式(5)可知,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $y \rightarrow y_m$,从而描述了信息函数 y 随时间 t 的增长特征。由于垃圾土的沉降量随时间的变化关系也属于增长曲线的类型,所以沉降量可表示为

$$s = \frac{s_m}{(1 + ce^{-at})^{\frac{1}{b}}} \quad (6)$$

式中: s 为沉降量(mm); s_m 为最终沉降量(mm); t 为时间(d)。

在式(6)中,当 $b = 1$ 时, $s = \frac{s_m}{(1 + ce^{-at})}$,就变成

Logistic 模型。当 $b \rightarrow 0$ 时,对式(6) 进行求导,然后积分整理,得 $s = s_m e^{-c^{-at}}$,该式即为 Gompertz 模型。可以看出, Logistic 模型和 Gompertz 模型是 Usher 模型的特例。

式(6) 中存在一个最大增长速度,即存在一个拐点,拐点发生在 $s_m \left(\frac{2}{2-b}\right)^{\frac{1}{b}}$ 处,该拐点值将随 s_m 和 b 值的变化而变化,因而具有一定的弹性,使 Usher 模型能得到更高的拟合精度。

将式(1) 改写为

$$s = s_m \frac{(1+c)^b}{(1+c)^{b-1}} \left[\frac{1}{(1+ce^{-at})^b} - \frac{1}{(1+c)^b} \right] \quad (7)$$

对式(7) 用 t 微分,即得到瞬时沉降为

$$\frac{ds}{dt} = s_m \frac{abc(1+c)^b}{(1+c)^b - 1} \frac{e^{-at}}{(1+ce^{-at})^{b+1}} \quad (8)$$

联立式(7)、式(8),可得

$$\left[\frac{(1+c)^b - 1}{(1+c)^b} \frac{s}{s_m} + \frac{1}{(1+c)^b} \right]^{1+\frac{1}{b}} s_t = s_m \frac{abc(1+c)^b}{(1+c)^b - 1} e^{-at} \quad (9)$$

式中: s_t 为 t 时刻的沉降量。

对式(9) 两端取对数,得

$$\ln(s_t) = A + B \ln \left[\frac{C-1}{C} \left(\frac{s}{s_m} \right) + \frac{1}{C} \right] - Dt \quad (10)$$

其中: $A = \ln \left[s_m \frac{abc(1+c)^b}{(1+c)^b - 1} \right]$; $B = \frac{b+1}{b}$;

$$C = 1+c; D = a. \quad (11)$$

采用重复二元回归法求解式(10) 的参数,即给不同的 s_m 、 C ,对式(10) 进行二元回归,直到满足条件。如有多解,则提高迭代精度,到达唯一解为止。然后,根据式(11) 求出参数 a 、 b 、 c 。

2 工程实例分析

对某垃圾填埋场进行沉降观测,选取填埋高度为 32 m 的第一作业单元,距底部 5 m 高度处进行沉降量分析,观测资料见表 1。沉降在填埋后的前 2 个月有比较大的沉降,随后又经历变小到变大的过程,最后 3 个月基本达到稳定,符合“S”型曲线的变化特征。依据 30 ~ 300 d 的沉降观测资料,利用 Usher 沉降预测模型,可得到拟合的 Usher 模型、Logistic 模型和 Gompertz 模型分别为

Usher 模型: $s_t = \frac{1.67}{(1+98.49e^{-0.03t})^{0.33}}$

Logistic 模型: $s_t = \frac{1.74}{1+5.01e^{-0.017t}}$

Gompertz 模型: $s_t = 1.82e^{[-e^{(0.74-0.01t)}]}$

表 1 沉降观测值与预测值

Tab. 1 Data of observed and predicted

时间/ d	观测 值/m	Usher 模型		Logistic 模型		Gompertz 模型	
		预测 值/m	相对误 差/%	预测 值/m	相对误 差/%	预测 值/m	相对误 差/%
60	0.69	0.65	5.80	0.62	10.15	0.57	17.42
90	0.82	0.85	-3.66	0.83	-1.78	0.77	6.38
120	1.02	1.09	-6.86	1.05	-3.30	0.96	6.13
150	1.27	1.31	-3.15	1.25	1.52	1.13	11.21
180	1.46	1.48	-1.37	1.41	3.49	1.27	12.81
210	1.60	1.58	1.25	1.52	4.69	1.39	12.97
240	1.64	1.63	0.61	1.60	2.19	1.49	9.25
270	1.64	1.65	-0.61	1.66	-0.96	1.56	4.66
300	1.66	1.66	0	1.69	-1.71	1.62	2.31
误差平方和		108.19		162.21		952.41	

根据 Usher 模型、Logistic 模型和 Gompertz 模型,计算出该垃圾填埋场的沉降预测值和相对误差,对比情况,见表 1;得出的沉降量与时间的关系曲线如图 1 所示。从表 1 和图 1 可以看出,Usher 模型对沉降的预测拟合较好。

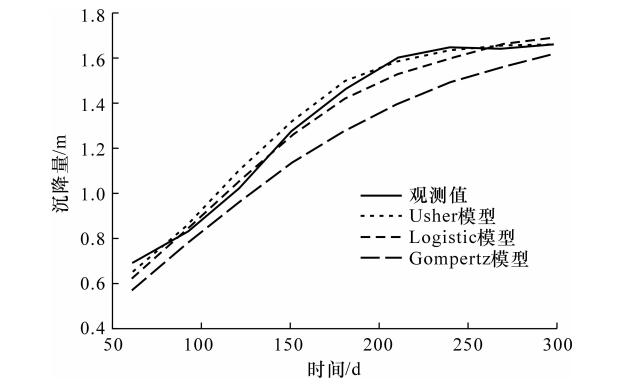


图 1 实测数据与预测曲线

Fig. 1 Measured data and prediction curve

通过图 1 的实测数据与拟合数据曲线可以看出,在曲线拟合过程中,Usher 模型、Logistic 模型和 Gompertz 模型这 3 种模型对沉降早期拟合误差不大,前 2 种模型拟合效果较好,后 1 种模型拟合效果较差,3 种模型计算的误差平方和分别为 108.19、162.21 和 952.41。以上分析表明,对垃圾土沉降的预测,Usher 模型可取得更为满意的结果。

3 结 语

(1)在分析填埋场沉降变形量的基础上,得到其沉降变形规律,并指出可应用 Usher 模型进行沉降预测,通过分离变量和二元回归的方法对该模型进

行求解,并应用于具体工程,对比分析了不同模型之间的差异。

(2)在线性加载的情况下,垃圾土的沉降-时间曲线呈现“S”型,符合 Usher 提出的描述增长信息随时间变化的数学模型,因此,垃圾土的沉降可用 Usher 模型来表示。

(3)应用 Usher 模型、Logistic 模型和 Gompertz 模型对某填埋场的沉降进行拟合,通过计算可知 Usher 模型的误差平方和最小,说明应用该模型进行预测,预测精度高,效果最好。

(4)针对线性或近似线性加载情形,对某个填埋场的数据进行了预测研究,工程实例对比分析结果表明,Usher 沉降预测模型较 Logistic 和 Gompertz 模型能更好地适应实际情况的变化,适用范围更广,且预测精度更高,具有一定的推广应用价值。但目前国内外关于填埋场的现场观测资料极其缺乏,因而对于非线性荷载情况下垃圾土沉降预测,还需通过加强填埋场的现场观测来进行更多的研究。

参考文献:

References:

- [1] 沈莽庭,刘红樱,苏晶文,等.九江市城市垃圾卫生填埋场场址适宜性评价优选[J].地球科学与环境学报,2006,28(4):100-105.
SHEN Mang-ting, LIU Hong-ying, SU Jing-wen, et al. Optimization of condign evaluation for urban hygienic landfill site in Jiujiang city[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(4): 100-105. (in Chinese)
- [2] 曹丽文,桑树勋,姜振泉,等.垃圾卫生填埋衬垫系统工程地质研究的若干进展与问题[J].地球科学与环境学报,2006,28(1):96-100.
CAO Li-wen, SANG Shu-xun, JIANG Zhen-quan, et al. Developments and problems about engineering geological research of liner system for sanitary landfill of solid waste[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(1): 96-100. (in Chinese)
- [3] 谢强.城市生活垃圾卫生填埋场沉降特性研究[D].重庆:重庆大学,2004.
XIE Qiang. A Study on the settlement of sanitary landfill of municipal solid waste [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004. (in Chinese)
- [4] 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.
ZHU Qing-shan, ZHAO You-cai, XU Di-min. Refuse

degradation and stabilizing process in municipal refuse test lysimeters [J]. Journal of Tongji University, 1996, 24(5): 596-600. (in Chinese)

- [5] 陈云敏,柯瀚.城市固体废弃物的压缩性及填埋场容量分析[J].环境科学学报,2003,23(5):694-698.
CHEN Yun-min, KE Han. Compression characteristics of MSW and analysis of capacity for landfills[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(5): 694-698. (in Chinese)
- [6] 彭功勋.城市生活固体废弃物(MSW)的沉降变形研究[D].南京:河海大学,2004.
PENG Gong-xun. Settlement of municipal solid wastes[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese)
- [7] 陈继东,施建勇,胡亚东.垃圾土一维压缩修正公式及有机物降解验证试验研究[J].岩土力学,2008,29(7):1797-1801.
CHEN Ji-dong, SHI Jian-yong, HU Ya-dong. One-dimensional compression modified method of settlement of landfills and verification of degradation of organic content in solid waste[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1797-1801. (in Chinese)
- [8] Monteiro V E D, Juca J F T. Geotechnical studies of clay liners in a municipal solid waste landfill[J]. Environmental Geotechnics, 1998: 185-189.
- [9] Hyun H P, Seung R L, Nam Y D. 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): 107-117.
- [10] Edgers L, Nobel J J, Williams E. A biologic model for long term settlement in landfills[C]//Balkema A A. Proceedings of the Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology. Rotterdam: Balkema A A, 1992: 177-184.
- [11] 梅国雄,宰金珉,殷宗泽,等.沉降-时间曲线呈“S”型的证明:从一维固结理论角度[J].岩土力学,2004,25(1):21-23.
MEI Guo-xiong, ZAI Jin-min, YIN Zong-ze, et al. Proof of $s-t$ curve appearing “S” shape based on one-dimensinal consolidation theory [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 21-23. (in Chinese)
- [12] 刘荣,卢廷浩.垃圾土沉降的 Logistic 模型应用研究[J].工业建筑,2005,35(11):56-59.
LIU Rong, LU Ting-hao. Study on refuse settlement with the logistic model[J]. Industrial Construction, 2005, 35(11): 56-59. (in Chinese)