

考虑生物降解的填埋场长期沉降研究

刘毓胤¹, 黄超强²

(1.福州大学 土木建筑工程学院, 福州 350002; 2.中交第二公路勘察设计研究院, 武汉 430052)

摘 要: 填埋场沉降是环境岩土工程主要研究课题, 填埋场沉降主要由堆载瞬时沉降、与时间有关的填埋体骨架蠕变和有机物生物降解引起的沉降等 3 部分组成。迄今为止, 国内外学者建立了许多估算填埋体沉降的数学模型。根据总结归纳的典型填埋体沉降计算模型, 结合某填埋场沉降实测资料, 探讨了计算模型的适用性。

关 键 词: 填埋场; 沉降; 生物降解

中图分类号: T 449; X 705

文献标识码: A

Estimation of long-term settlement of landfill considering biological decomposition

LIU Yu-chuan¹, HUANG Chao-qiang²

(1.College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

2.China Communications Second Highway Survey, Design & Research Institute, Wuhan 430052, China)

Abstract: Landfill settlement is a topic of concern in geoenvironmental research; Three important mechanisms that contribute to the compression of landfill are instantaneous compression in response to applied load, secondary mechanical creep and time-dependent biological decomposition. In this study, we investigated several approaches for calculating the compression of the municipal solid waste, and then discussed their validity in the South China.

Key words: landfill; settlement; biological decomposition

1 前 言

卫生填埋是一种有效、经济的城市废弃物处置方法, 废弃物填埋场沉降是环境岩土工程主要研究课题之一。在填埋场容量计算、封顶系统设计和复垦利用规划中, 填埋场沉降是需要考虑的重要问题(Sowers, 1973 年; Morris and Woods, 1990 年; 刘毓胤, 2001 年)。固体废弃物填埋场的沉降, 主要是由填埋体体积减小引起的, 填埋体体积减小与填埋体堆载瞬时压缩变形、有机物生物降解和填埋体骨架蠕变等有关(Sowers, 1973 年; Gordon et al. 1986 年)。因此, 填埋场沉降主要由 3 部分组成: (1)堆载瞬时沉降; (2)与时间相关的填埋体骨架蠕变; (3)有机物生物降解。实际上, 生物降解引起的沉降在填埋场长期沉降中是主要的, 而且要延续许多年, Coduton and Huitric(1990 年)认为生物降解引起的沉降占填埋场总厚度的 18 %~24 %。

2 填埋体沉降计算模型

国外学者通过对填埋场沉降的实测分析, 建立的估算填埋体沉降的数学模型有 Yen and Scanlon (1975 年)对数模型、Edil, et al.(1990 年)流变模型、Edil, et al (1990 年)蠕变模型、Ling, et al(1998 年)双曲线模型和 Marques and Filz(2002 年)的复合压缩模型等。国内学者根据国内废弃物成分的特点, 在室内实验、现场实测和理论推导的基础上, 提出了填埋体沉降估算公式(胡敏云、陈云敏, 2001 年, 张振营、陈云敏, 2004 年)。

2.1 对数模型

Yen and Scanlon(1975 年)收集了大量填埋场沉降实测资料, 提出了应变速率经验公式:

$$m = \frac{1}{H_0} \frac{ds}{dt} = c - d \log t \quad (1)$$

式中 s 为填埋场沉降; H_0 为填埋体初始高度; m

为应变速率; t 为计算时段; c, d 为计算参数。

计算时段填埋场沉降可以通过积分得到(Sohn and Lee, 1994 年):

$$s = H_0 \int m dt = H_0 \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} (c - d \log t) dt =$$

$$H_0 \left[ct - \frac{d}{\ln 10} (t \ln t - t) \right]_{t_1}^{t_1 + \Delta t} \quad (2)$$

$$t_1 + \Delta t \leq 10^{(c/d)} \quad (3)$$

2.2 流变模型

Edil, et al.(1990 年)提出计算填埋场长期沉降的流变模型, 与时间相关的沉降计算公式为

$$s / H_0 = \varepsilon(t) = \Delta \sigma (a + b \{1 - \exp[-(\lambda / b)t]\}) = \Delta \sigma a + \Delta \sigma b \{1 - \exp[-(\lambda / b)t]\} \quad (4)$$

式中 s 为填埋场沉降; H_0 为填埋体初始高度; $\varepsilon(t)$ 为应变; $\Delta \sigma$ 为应力; a 为初始压缩系数; b 为次压缩系数; λ / b 为次压缩速率; t 为计算时段。 $\Delta \sigma a$ 为初始压缩量, $\Delta \sigma b$ 为最终次压缩量。

流变模型采用应变速率和时间的关系曲线, 即 $\log_{10}(\Delta \varepsilon / \Delta t) - t$, 该关系曲线的斜率和截距包含参数 b 和 λ :

$$\left. \begin{array}{l} \text{斜率: } -0.434(\lambda / b) \\ \text{截距: } \log_{10}(\Delta \sigma \lambda) \end{array} \right\} \quad (5)$$

初始压缩系数 a 由下式确定:

$$a = \varepsilon(t_k) / \Delta \sigma - b(1 - \exp[-\lambda / b / t_k]) \quad (6)$$

式中 t_k 为初始压缩结束时间。

2.3 蠕变模型

Edil, et al.(1990 年)提出计算填埋场长期沉降的蠕变模型, 该模型反映了应变随时间的变化:

$$\varepsilon(t) = \Delta \sigma m (t / t_r)^n \quad (7)$$

式中 m, n, t_r 为沉降计算参数; $\Delta \sigma$ 为应力。

2.4 双曲线模型

Ling, et al(1998 年)在 3 个填埋场沉降监测的基础上提出了预测填埋场长期沉降的双曲线模型:

$$\varepsilon(t) = \frac{s(t)}{H_0}, \quad \frac{t}{\varepsilon(t)} = H_0 / \rho_0 + (H_0 / s_{ult})t \quad (8)$$

式中 $s(t)$ 为填埋场沉降; H_0 为填埋体初始高度; $\varepsilon(t)$ 为应变; t 为计算时段; s_{ult} 为填埋场最终沉降。

2.5 复合压缩模型

Marques and Filz(2002 年)在对巴西某废弃物填埋场连续 3 年沉降监测数据分析的基础上, 提出了

分别考虑填埋场沉降 3 个组成部分的复合压缩模型, 该模型简图见图 1。

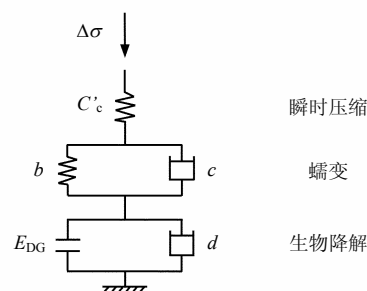


图 1 复合压缩模型简图(Marques and Filz(2002 年))

Fig.1 Composite compressibility model for MSW(Marques and Filz(2002))

根据图 1 的计算简图, Marques and Filz 给出了填埋体总应变计算公式:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_c + \varepsilon_b \quad (9)$$

式中 ε 为填埋体总应变; ε_p 为填埋体堆载瞬时压缩应变; ε_c 为与时间相关的填埋体骨架蠕变; ε_b 为有机物生物降解引起的应变。其中:

$$\varepsilon_p = C'_c \log \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} \quad (10)$$

式中 C'_c 为压缩系数; σ_0 为初始竖向荷载; $\Delta \sigma$ 为荷载增量。

$$\varepsilon_c = b(\Delta \sigma)(1 - e^{-ct'}) \quad (11)$$

式中 b, c 为蠕变参数; t' 为施加荷载增量时刻。

$$\varepsilon_b = E_{DG}(1 - e^{-dt''}) \quad (12)$$

式中 d 为考虑生物降解计算参数; t'' 为填埋时间; E_{DG} 为生物降解引起的填埋场总应变。

通过实测沉降数据的分析拟合, 得到各计算参数参考值, 见表 1, 可供其他填埋场沉降计算参考。

表 1 复合压缩模型的计算参数参考值

Table 1 Parameter values for composite compressibility model

计算参数	C'_c	$b / m^2 \cdot kN^{-1}$	c / d^{-1}	E_{DG}	d / d^{-1}
参考值	0.106	5.27×10^{-4}	1.79×10^{-3}	0.159	1.14×10^{-3}

3 工程应用

南方某小型山谷型废弃物填埋场垃圾成分如表 2 所示, 填埋场封场初始高度为 20 m, 平均容重为 $8.5 kN/m^3$, 平均含水量 92 %。该填埋场于 1995 年

开始投入使用, 由于容量以及环境污染问题现已封场, 封场后典型沉降监测结果见图 2。用沉降实测值拟合各计算模型最佳参数列入表 3, 然后用拟合后的计算模型预测该填埋场封场若干年后的沉降, 预测结果列入表 4。从表 4 中可以看出, 蠕变模型预测结果偏大, 对数模型、双曲线模型和复合压缩模型预测结果较为接近, 预测结果可供填埋场复垦利用参考。

表 2 垃圾成分统计表

Table 2 Component of municipal solid waste

垃圾成分	降解有机物	纸类	塑料	金属	玻璃	皮革	木材	其他
含量/%	33.0	15.6	16.4	5.5	4.5	4	6	15

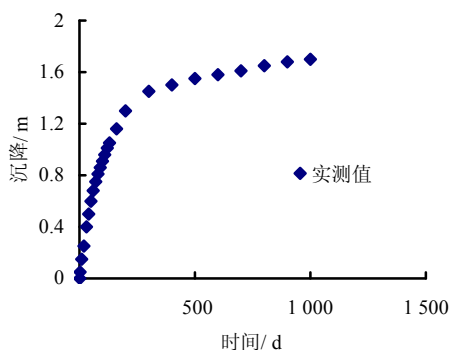


图 2 典型沉降监测结果

Fig.2 Settlement data of MSW landfill

表 3 计算模型回归参数表

Table 3 Best-fit parameters for empirical function

计算模型	模型参数	参数拟合值
$m = \frac{1}{H_0} \frac{dS}{dt} = c - d \log t$	c, d	$c = 0.426,$ $d = 0.006$
$s/H_0 = \varepsilon(t) = \Delta\sigma(a + b\{1 - \exp[-(\lambda/b)t]\}) = \Delta\sigma a + \Delta\sigma b\{1 - \exp[-(\lambda/b)t]\}$	$a, \lambda/b$	$a = 27.55,$ $\lambda/b = 0.90$
$\varepsilon(t) = \Delta\sigma m(t/t_*)^n$	m, n	$m = 3.46,$ $n = 0.02$
$\varepsilon(t) = \frac{s(t)}{H_0}, \frac{t}{\varepsilon(t)} = H_0/\rho_0 + (H_0/s_{ult})t$	ρ_0, s_{ult}	$\rho_0 = 0.125,$ $s_{ult} = 2.68$
复合压缩模型	$c'_e = 0.112, d = 1.17 \times 10^{-3},$ $b = 6.13 \times 10^{-4},$ $c = 1.87 \times 10^{-3}, E_{DG} = 0.159$	

表 4 填埋场沉降预测值(单位: m)

Table 4 Prediction value of landfill settlement (unit: m)

计算模型	封场时间/年		
	10	20	30
对数模型	2.10	2.47	2.65
流变模型	2.09	2.45	2.61
蠕变模型	2.19	2.69	2.86
双曲线模型	2.12	2.49	2.67
复合压缩模型	2.10	2.46	2.66

4 结 语

填埋场沉降是环境岩土工程主要研究课题, 填埋场沉降主要由堆载瞬时沉降、与时间有关的填埋体骨架蠕变和有机物生物降解引起的沉降等 3 部分组成, 其中生物降解引起的沉降在填埋场长期沉降中是主要的。基于填埋场实测资料分析, 国内外学者建立了许多估算填埋体沉降的数学模型。实际工程应用时必须展开必要的现场实验和沉降观测, 以获得可靠的计算参数。此外, 在充分掌握生物降解导致填埋体体积减少机理的基础上建立合乎规律的、物理意义明确的沉降计算模型仍是今后努力的方向。

参 考 文 献

- [1] Edit T B, Ranguatte V J, Wuellner W W. Settlement of municipal refuse[J]. **Geotechnics of waste fills—Theory and practice**: ASTM. STP 1070, Philadelphia, 1990, 225—239.
- [2] Gordon D L, Tisine D. The stockley park project[A]. **Building on Marginal and Derelict Land: An Institution of Civil Engineer Conf.**[C]. Glasflow Scotland: [s. n.], 1986, 359—381.
- [3] Ling H I, Ieshinsky D, Mohri Y, et al. Estimation of municipal solid waste landfill settlement[J]. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.**, 1998, 124(1): 21—28.
- [4] Marques A C M, Filz G M, vilar O M. Composite compressibility model for municipal solid waste[J]. **J. Geotech. Geoenviron. Eng.**, 2002, 129(4): 372—378.
- [5] Morris D V, woods C E. Settlement and engineering consideration in landfill and final cover design[J]. **Geotechnics of waste fills—Theory and practice**: ASTM. STP 1070, Philadelphia, 1990, 9—21.
- [6] Sowers G F. Settlement and waste disposal fills[A]. **Proc., Sth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering**[C]. Moscow: [s. n.], 1973, 2(2): 207—210.
- [7] Yen B C, Scanlon B. Sanitary landfill settlement rates[J]. **J. Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng.**, 1975, 105(5): 475—487.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 刘毓斌, 李琳, 贺怀建. 城市固体废弃物填埋场的岩土工程问题[J]. **岩土力学**, 2002, 23(5): 618—622.
LIU Yu-chuan, LI Lin, HE Huai-jian. Investigation on geotechnical problem of municipal solid waste landfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(5): 618—622.