

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.002

垃圾土蠕变-降解沉降特性试验研究

赵燕茹, 谢强, 张永兴, 杨超, 黄达, 王龙飞

(重庆大学土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:为了研究垃圾土蠕变-降解沉降特性,选取重庆市某垃圾场典型试样,基于室内蠕变观测试验得到蠕变-降解沉降过程曲线(0~330 d),建立了符合其沉降变形特性的 PTH 计算模型,验证了该模型合理性,同时对沉降影响因素进行了详细分析。结果表明,因外部应力和内部蠕变降解引起的沉降总量可达试样高度的 33.2%,渗滤液在前期的溢出量受外部荷载和有机物含量的控制;垃圾土中有机物的降解规律可用 Richards 模型来表示,累计沉降量和累计渗滤液产量之间符合指数函数关系;有利于初期压缩变形和后期降解沉降的最优有机物含量区间为 29.1%~36.47%;内部温度监测结果显示,20~41 °C 是一个可加快内部有机物降解速率的温度区间,且在 41 °C 时作用最大。

关键词:垃圾土;蠕变沉降;降解;温度;渗滤液

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)06-0007-09

Experimental Analysis on the Decomposition-Creep Settlement Properties of Municipal Solid Waste

Zhao Yanru, Xie Qiang, Zhang Yongxing, Yang Chao, Huang Da, Wang Longfei

(Department of Civil Engineering; Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Areas, Ministry of Education, Chong Qing University, Chong Qing 400045, P. R. China)

Abstract: In order to study the creep-degradation settlement properties of municipal solid waste, the change of static-creep-settlement for fresh municipal solid wastes which collected from the Chongqing landfill was observed elaborately during the 330 days Laboratory test, and the PTH Model which would fit the settlement properties better was founded. By analyzing leachate-degradation-strain-time relational curves, the number of total creep settlement caused by external load and inner degradation in the waste can reach 33.2% of the sample height. The leachate production can be controlled by the external load and organic content. The tests results indicate that the degradation rule of MSW can be expressed as the Richards model, and the relation of cumulative sellenment with cumulative leachate fit the Exponential function model. The corresponding section for organic content that suit for the initial compression deformation and the creep-degradation settlement could be ranged from 29.1% to 36.47%. During the monitoring for settlement and internal temperature field in the anaerobic reaction stage, an optimum temperature zones that varied from 20°C to 41°C are found, which could accelerate degradation speed of organic matters in the waste. Moreover, degradation speed of organic matters becomes maximum when the temperature reaches 41°C.

Key words: municipal solid waste; creep settlement; biodegradation; temperature; leachate

收稿日期: 2013-03-15

基金项目: 教育部长江学者创新团队计划 (IRT1045); 国家科技计划 (2012BAJ22B06-04); 中央高校基本科研业务费 (106112013CDJZR200008)

作者简介: 赵燕茹 (1983-), 男, 博士生, 主要从事环境岩土工程和岩土力学理论与试验研究, (E-mail) zhaoyanru54022@163.com。

谢强 (通信作者), 男, 副教授, (E-mail) xieqiang2000@hotmail.com。

卫生填埋技术作为经济的垃圾处理方式,仍然被大多数发达国家采用^[1-2]。由于垃圾土是一种复杂的非饱和和多孔介质,影响其变形沉降的因素较多(例如外部荷载、有机物含量等),导致对垃圾土蠕变沉降-沉降规律,以及建立符合其蠕变沉降特性本构模型的研究,仍然是目前研究的难点。

在其他国家,垃圾土的研究主要集中于沉降理论、计算模型以及影响沉降因素分析方面。模型计算理论主要有: Sowers^[3]建立的分阶段沉降计算模型、基于生物降解反应的降解-沉降模型^[4-6],以及根据一级动力衰减理论建立的 Machado 模型^[7]; Babu 等^[8-10]根据临界状态理论、力学蠕变和时间因素决定的降解沉降,给出了具有普遍意义三阶段本构计算模型。但是随着瞬时压缩的完成,针对后期蠕变和降解沉降阶段,由于影响沉降的因素较多(降解、温度、渗滤液量等),至今没有建立一个比较完善的理论和计算模型。根据 Watts 等^[11-12]通过对垃圾组成成份近 65 a 的调查,发现随着垃圾土中有机物含量的增加,因蠕变和降解引起的次固结沉降在总沉降中所占的比例逐渐增加,最高可达占填埋高度的 49%。而这成为导致现有的沉降模型不能准确预测垃圾场的沉降的原因之一。

在垃圾土的降解-沉降影响因素分析方面, Elagroudy 等^[13-15]从有机物降解度方面,研究了降解与产气量、渗滤液以及垃圾土力学参数的影响关系; Hanson 等^[16-20]关于垃圾土中热量的产生以及温度的做了大量的研究,并且得到因垃圾体内部有机物的降解以及内部物理-化学反应,会导致垃圾体内部温度的升高,而温度反过来可加快有机物降解的速度。

在中国,胡敏云等^[21]通过试验得出垃圾土的沉降是应力和时间的双重函数,而从微观上讲是一个复杂的生化反应和降解的长期过程。施建勇等^[22]通过试验指出垃圾中有机物的降解规律可用指数函数来表示;柯瀚等^[23]研究了应力对蠕变-降解沉降的影响,指出初始压力越大,产生的主压缩应变越大,后期的降解沉降和蠕变沉降越小,随着时间的增加,压力对总沉降的影响相对减小;谢强等^[24-28]基于实测沉降数据,对垃圾土的蠕变-沉降特性也进行了大量工作。

本文基于特制蠕变试验装置(图 1),对不同有机物含量的垃圾土进行了 330 d 的降解-蠕变观测试验,根据实测蠕变-沉降数据选取适合沉降特性的模型元件,通过分析有机物含量对垃圾土沉降的影响,以及渗滤液、累计沉降、降解、温度之间的关系,建立符合重庆地区垃圾土蠕变降解-沉降的本构计

算模型,研究结果能够为准确预测垃圾土的蠕变沉降提供理论支持。

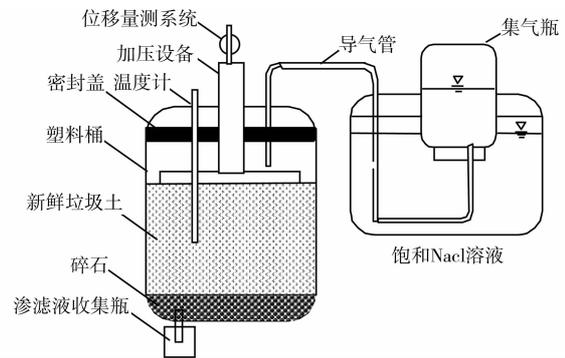


图 1 蠕变沉降观测仪器

1 试验样品的准备以及特性

新鲜垃圾土试样来自重庆市某填埋场,其典型组成成份和含水率范围见表 1、2。

表 1 研究区域生活垃圾典型组成成份

类型	百分比/%	合计/%	
有机物(O)	叶果(OP)	22.82	45.95
	杂骨(OP)	1.55	
	纸类(ON)	5.39	
	织物(ON)	2.84	
	橡塑(ON)	11.82	
	竹木(ON)	1.53	
无机物(I)	金属(ID)	1.16	23.57
	砖瓦(IN)	3.01	
	玻璃(IN)	2.19	
	砂土渣(IN)	17.21	
其它	30.48	30.48	

表 2 生活垃圾中各组分含水率范围值和典型值

类型	范围/%	典型值/%
叶果	50~80	70
杂骨	5~20	15
纸类	4~10	6
织物	6~15	10
橡塑	1~4	2
竹木	15~40	20
金属	2~4	3
砖瓦	6~12	8
玻璃	1~4	2
砂土渣	6~12	6

* 表 1、2 数据由重庆市环境卫生研究所提供。

根据表1和2中所示典型垃圾土组份,在室内配置有机物含量分别为:10%、20%、35%、50%、65%、100%的垃圾土试样,并将试样放入特制密封的蠕变观测仪中(见图1),然后进行蠕变沉降观测试验,试验过程中观测仪器严格密封,为了消除试验数据的差异性,每组试样分为5个平行试验,观测时间为0~330 d。

2 试验方法及监测

2.1 加载方式

目前中国关于室内垃圾土蠕变试验一般采用分级加载的方法。但是这种方法的依据是假定材料满足线性叠加原理,即认为材料是线性流变体。而生活垃圾是否是“线性流变体”,须进一步研究,本次试验选取分别加载方法,加载等级分4级,分别为100、200、300、400 kPa,如图2所示,1 kPa即相当于密度为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的生活垃圾填筑10 cm高时,底层垃圾所受的压力,加载曲线如图3所示。

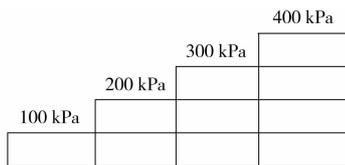


图2 试验的加荷等级

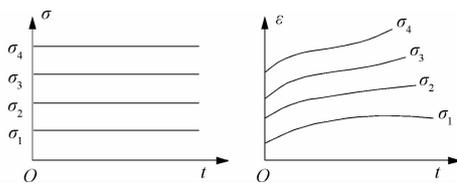


图3 分别加载蠕变曲线示意图

2.2 试验装置及温度监测

静力蠕变试验采用特制的蠕变沉降观测仪,容器高500 mm,直径300 mm,试样高300 mm,承载板厚18 mm;渗滤层层厚20 mm,试验装置如图2所示。试验前对渗滤层充分饱和压实;碎石层上下表面各垫一层滤纸,容器顶部用密封盖密封,以模拟封场后的厌氧环境;其中:百分表用于观测生活垃圾随时间的沉降量,量瓶用于量测渗滤液产生量,加压设备用以保证荷载的垂直施加,生物反应气的回收采用专门的装置。在试验开始前,对有机物含量为10%、20%、35%、50%、65%、100%的试样进行3 kPa初始预压(等价于0.15 m厚的上覆土层),然后放入蠕变监测仪器中进行观测试验,并开始记录渗滤液和沉降量等数据。

在蠕变降解试验中,通过专门设置的温度敏感探头对垃圾体内部温度场进行了探测,监测时间为330 d,同时详细记录了渗滤液量的变化情况。试验过程中,外部温度保持在恒温(20 ℃)。

3 试验结果与分析

3.1 沉降特征曲线

试验选取有机物含量为50%的试验曲线作为分析对象,并对瞬时应力-应变,蠕变降解-沉降过程中渗滤液产量、变形沉降量、不同降解阶段试样有机物残余含量等数据进行了统计和分析,曲线如图4、5、6所示。

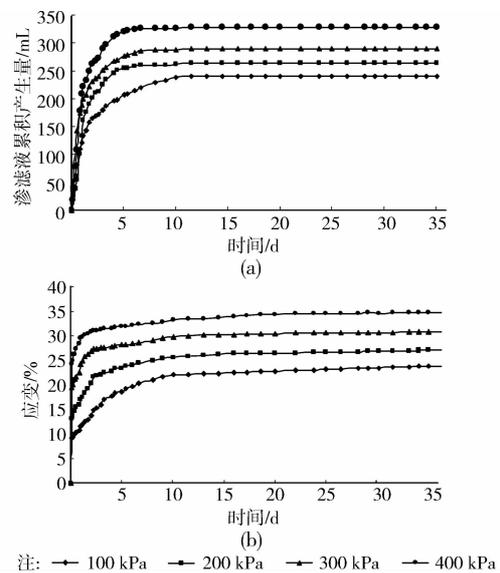


图4 不同正应力下累计渗滤液、应变曲线与时间关系曲线

图4为有机物含量为50%的垃圾土试样,在不同正应力下的侧限压缩(0~30 d)曲线,从上图可以得出,试样的应变量和渗滤液累计产量都随外部荷载的增加而增加,因0~30 d内有机物的降解率小于2.15%,沉降受降解的影响较小,分析认为垃圾土的初始压缩沉降主要受外部荷载的大小以及内部渗滤液因外部应力“挤压”效应的排出引起的^[3]。

根据图5所示,可将压缩变形分为3个阶段,(瞬时压缩、主压缩、次压缩阶段)。对比图5、6,主压缩阶段(30~90 d),渗滤液和沉降量日产值呈递减趋势,且此阶段有机物的降解度在2.15%~6.65%,因此分析认为此阶段垃圾土的沉降量主要由颗粒骨架的受力蠕变、以及垃圾体中细颗粒向大孔隙移动引起孔隙的减小引起,而降解对沉降的贡献较小。

次压缩阶段(90~330 d),随着垃圾内部生化反应和降解的发生(降解度为15.68%~29.63%),渗

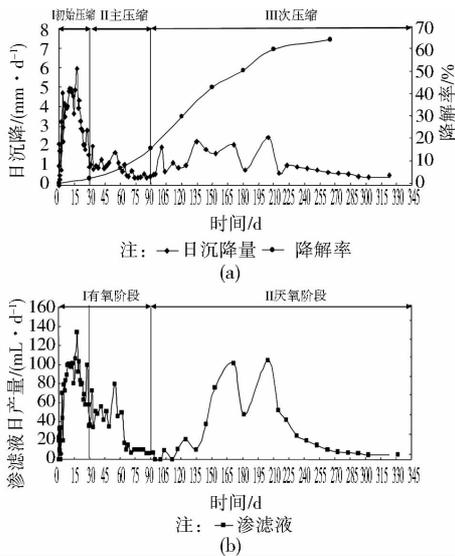


图 5 有机物含量 50% 日渗滤液-降解率-沉降-时间关系曲线

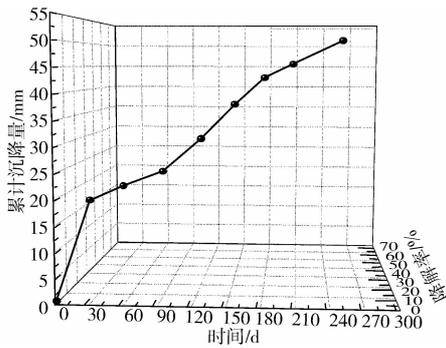


图 6 累计渗滤液-降解率-时间关系曲线

滤液产量在厌氧降解阶段出现典型的二次“M”型峰值,分析认为二次峰值的出现是由于内部生化反应导致内部温度升高,而温度升高对降解产生加速的结果。

3.2 有机质降解特征曲线

由于试验得到的有机质降解率、渗滤液量、沉降量与时间关系曲线与 Richards 模型^[29]有较好的一致性,因而采用此模型来描述有机质的降解过程。

假设垃圾土试样初始质量为 M_0 , M_b 为试样在某一降解时刻的质量,则有降解率:

$$\lambda_m = \frac{\Delta m_b}{m_0} = \frac{m_0 - m_b}{m_0} \quad (1)$$

降解速率:

$$\rho = \frac{\lambda_1 - \lambda_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

根据 Richards 生物生长规律,则有:

$$\lambda_m = A_0 [1 + (d - 1)e^{-k(t-t_0)}]^{-\frac{1}{d}} \quad (3)$$

假设初始垃圾土试样质量为 m_0 , 降解后期垃圾土试样质量为 m_T , 则:

$$A_0 = \frac{m_0 - m_T}{m_0} \cdot 100\% \quad (4)$$

式中: λ_m 为 t 时刻的降解率; A_0 为有机质的最终降解率; d 为形状参数; k 为生物生长速度; t_0 为初始参数。(图 7 所示拟合曲线中: $A_0 = 66.9, d = 0.226, k = 0.026, t_0 = 17$ 。)

图 7 为选取有机物含量为 50% 的试样进行分析,得出的拟合曲线,在 (0~30 d) 降解率急剧增加,这是由于试样中的渗滤液在外部荷载作用下的大量排除造成的,而不是因有机物的降解引起的;随着时间的增加 (30~90 d),降解率趋于平缓,降解速率趋于最低值,试样的沉降进入骨架蠕变沉降阶段,90 d 后进入降解沉降阶段。

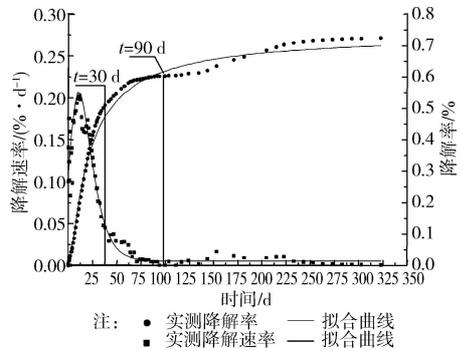


图 7 降解率-降解速率关系曲线

3.3 累计沉降量-渗滤液量特征曲线

图 8 为 5 组不同有机物含量的垃圾土试样,其渗滤液产量和沉降量在 0~330 d 内,实测特征曲线与拟合曲线;随着试样中有机物含量的增加,渗滤液和沉降也随之增加。由于垃圾土在后期蠕变-降解阶段的主要产物为气体和渗滤液,且在后期的产生比例稳定^[12],因此可以通过监测垃圾场渗滤液溢出量来推算其沉降值。

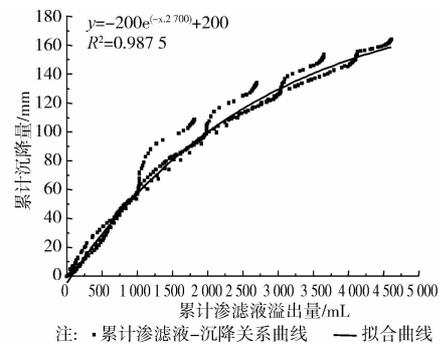


图 8 拟合指数模型

从图 8 中可以得出,不同有机物含量的垃圾土试样,其累计沉降量和渗滤液产量之间符合指数函数关系,公式为:

$$y = a \cdot e^{(-x/b)} + c \quad (5)$$

式中: y 累计沉降量; x : 累计渗滤液量; 适宜重庆地区垃圾土的试验参数 a 、 b 、 c 为: $a = -200$; $b = 2\ 700$; $c = 200$ 。

3.4 有机物含量-渗滤液-沉降关系

表 3 给出了不同有机物含量的垃圾土试样,其渗滤液-沉降在不同阶段监测数据的统计结果,结合

图 7 划分的有氧和厌氧阶段以及有机物含量-沉降量-渗滤液关系曲线,对不同沉降阶段的变形机理进行定量分析,试验曲线如图 9、10 所示。

在有氧阶段(0~90 d),因外部荷载作用,沉降变形量和渗滤液溢出量随有机物含量的增加而增加,当有机物含量为 65%时,两者达到最大值,然后随着有机物含量的增加而逐渐减小。

表 3 不同有机物含量的垃圾土渗滤液-沉降数据统计

试样编号	有机物含量/%	阶段	渗滤液日产出量/(mL·d ⁻¹)				日沉降量/(mm·d ⁻¹)					
			时间/d	范围值/(mL·d ⁻¹)	平均值/(mL·d ⁻¹)	峰值/(mL·d ⁻¹)	峰值时间/d	时间/d	范围值/(mm·d ⁻¹)	平均值/(mm·d ⁻¹)	峰值/(mm·d ⁻¹)	峰值时间/d
No. 1	10	I	0~143	0~41	8.41	41.00	1	0~83	0~1.37	0.69	1.37	62
		II	143~322	1~86	26.27	86.00	204	83~322	0.16~3.67	1.30	3.67	134
No. 2	20	I	0~103	0~48	16.64	48.00	6	0~94	0~3.70	1.13	3.70	17
		II	103~322	0~229	39.05	229.00	200	94~322	0.67~4.56	1.87	4.59	204
No. 3	35	I	0~99	0~63	32.45	63.00	16	0~74	0~4.136	1.81	4.14	18
		II	99~322	0~139	34.26	139.00	171	74~322	0.34~3.85	1.31	3.85	205
No. 4	50	I	0~99	0~133.47	49.88	133.47	18	0~85	0~5.95	2.20	5.95	18
		II	99~322	0~104	27.78	104.00	205	85~322	0.34~2.42	1.01	2.42	204
No. 5	65	I	0~134	0~210	62.50	210.00	18	0~80	0~7.731	2.71	7.73	17
		II	134~322	0~84	30.19	84.00	171	80~322	0.19~1.44	0.58	1.44	100
No. 6	100	I	0~14	0~98.25	38.78	98.25	4					
		II	14~249	2.6~76.75	18.07	76.75	46					

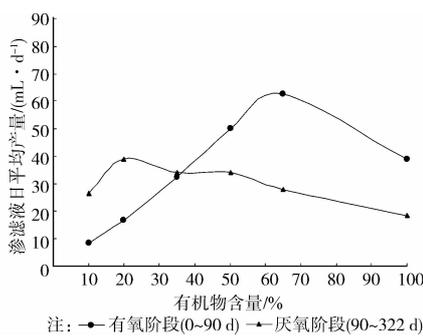


图 9 两阶段有机物含量与平均渗滤液关系曲线

在厌氧阶段(90~330 d),由于试样在外力作用下已经压密,结合封场后的实际情况,外部应力对沉降的影响可以忽略,而降解对沉降开始起主要作用。当试样中有机物含量为 65%时,因降解产生的渗滤液量达到最小值 84 mL;对用的沉降峰值为 1.44 mm,而试样中有机物含量为 100%时对应的渗滤液量为 27.75 mL(对应的沉降量值因发酵起泡而读数失败)。而试样中有机物含量为 20%时,因降

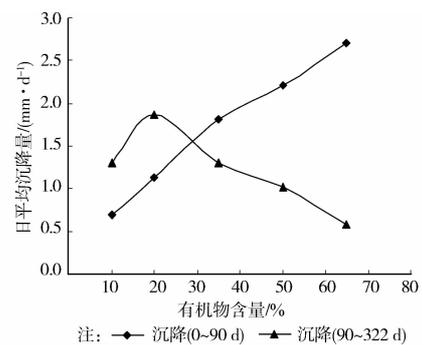


图 10 两阶段有机物含量-平均沉降关系曲线

解在厌氧阶段产生的渗滤液量可达 229 mL。这说明由于有机物含量高的试样随渗滤液在前期大量溢出,阻碍了有机物在厌氧阶段的降解和生化反应,渗滤液溢出量和沉降量反而减小。根据渗滤液产出量,通过内插方法得到两阶段中有利于前期压缩和后期讲解沉降的垃圾土有机物含量最优区间为 29.1%~36.47%。

根据统计结果,有氧阶段(0~90 d)不同有机物含量的试样其平均沉降量为 1.71 mm,而后期平均沉降量为 1.22 mm,这说明前期碾压有助于加快有机物含量高的填埋体的瞬时沉降,但却导致后期降解反应的速度,而垃圾土的次压缩沉降主要由降解、生化反应速度以及试样中有机物含量的大小决定,这与柯瀚^[5]的研究结果趋于一致。

表 4 给出了不同有机物含量的垃圾土试样,其累计沉降量在 30、90、330 d 的统计值,分析得出在同一外部荷载作用下,有机物含量高的垃圾土试样在初期(30 d)的应变增量较大,在后期但后期应变增量却逐渐减小,;而低有机物含量的试样,在前期的瞬时应变量较小,在但在后期蠕变-降解阶段,其累计应变增量却大于高有机物含量的试样。例如在 30~90 d,累计应变最大值对应的有机物含量为 35%;在 90~330 d,有机物含量为 20%所对应的累计沉降量可达试样总高度的 33.2%,试验结果略小于 Swati^[11]测试结果。

表 4 不同有机物含量累计蠕变沉降 %

有机物含量/%	累计应变量		
	30 d	90 d	330 d
10	5.77	8.06	13.69
20	10.53	13.40	20.80
35	16.65	20.10	26.14
50	22.48	25.69	29.93
65	27.80	30.78	33.20

3.5 温度-降解的影响

图 11 为 0~330 d 内温度与渗滤液日产量关系曲线。在 0~90 d,温度区间在 5.5~17.5 °C,由于有机物的降解率低于 15.68%,可认为此阶段温度对降解的影响较小;在 90~135 d,温度区间为 12~24 °C。随着内部氧气的消耗,垃圾体进入厌氧反应阶段,对应垃圾土的蠕变变形阶段;在 135~240 d,温度区间为 22~41 °C,渗滤液日产量呈“M”型峰值,而有机物的降解率在 31.2%~62.5%。240 d 以后,不同有机物含量的垃圾土,其渗滤液日产出量和沉降量都开始减小,并趋于稳定(对应的温度区间 35~38 °C)。

综上分析得出,温度对降解的影响主要在厌氧阶段(135~330 d),随着垃圾土内部温度场上升到 22~41 °C 时,不同有机物含量的垃圾土,渗滤液在厌氧阶段都出现了“M”型峰值,说明此阶段的温度

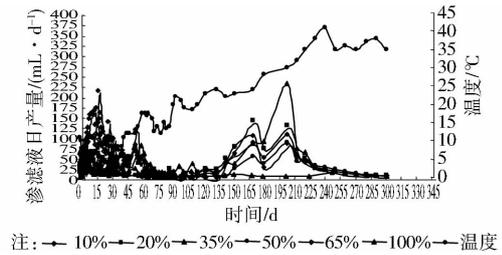


图 11 渗滤液-温度随时间变化曲线

值有助于厌氧阶段垃圾土中有机物的降解,且当温度为 41 °C 时,降解反应最为激烈。而这一温度值与 Hanson^[15]的研究结果较为一致。

本文试验中温度对降解的影响分析仅限于 330 d 内的监测结果,对于更长时间内的温度-降解变化,需要做进一步的研究工作。

4 蠕变降解-沉降本构模型(PTH)

4.1 沉降计算模型(PTH)

通过对不同有机物含量垃圾土试样的前期压缩和后期静力蠕变降解试验,得到不同阶段垃圾土变形特性具有以下特点^[24]:

- 1) 垃圾土在初始应力作用下的瞬时应变。
- 2) 垃圾土的骨架蠕变(不可恢复变形)。
- 3) 因降解产生的衰减蠕变,理论上有时间最大值。

根据垃圾土材料在本次试验过程中所表现出的蠕变特性,选用最接近试验现象的滞弹性体模型(PTH 体),该模型符号为 H || (H-N)。其中 H-N 为弹性粘滞性元件,又称 Maxwell(简称 M 体)。

1) PTH 体的本构方程

设 H 体应力 σ_1 、应变 ϵ_1 及 M 体应力 σ_2 、应变 ϵ_2 。并联特点是应变相等,应力相加,故一维状态:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (6)$$

$$\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2 \quad (7)$$

$$\sigma_1 = E_1 \epsilon_1 \quad (8)$$

$$\dot{\epsilon}_2 = \frac{\dot{\sigma}_2}{E_2} + \frac{\sigma_2}{\eta} \quad (9)$$

式中: E_1 、 E_2 分别为模型中弹性元件 1、2 的弹性模量; η 为粘滞元件的粘滞系数。从以上各方程式中消去 ϵ_1 、 ϵ_2 、 σ_1 、 σ_2 , 即得 PTH 体的本构关系:

$$\sigma + \frac{\eta}{E_2} \dot{\sigma} = e_1 \epsilon + \frac{(E_1 + E_2)}{E_2} \eta \dot{\epsilon} \quad (10)$$

或

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} = q_0 \dot{\epsilon} + q_1 \dot{\epsilon} \quad (11)$$

式中: $p_1 = \frac{\eta}{E_2}, q_0 = E_1, q_1 = \frac{(E_1 + E_2)}{E_2} \eta$

三维张量方程:

$$S' + p_1 \dot{S}' = 2q_0 E' + 2q_1 \dot{E}' \quad (12)$$

式(10)、(11)、(12)均为 PTH 本构方程表达式。

2) PTH 体的蠕变方程

应力条件: $S' = S'_0 = \text{恒量}, S' = 0$

初始条件: $t = 0, E' = E'_0$, 由本构方程(13)得其应变随时间的变化规律:

$$S'_0 = 2q_0 E' + 2q_1 \dot{E}' \quad (14)$$

或

$$\dot{E}' + \frac{q_0}{q_1} E' = \frac{1}{2q_1} S'_0 \quad (15)$$

由该微分方程解得蠕变方程:

$$E' = E'_0 \exp\left[-\frac{G_1 G_2 t}{(G_1 + G_2) \eta}\right] + \frac{S'_0}{2G_1} \left\{ 1 + \exp\left[-\frac{G_1 G_2 t}{(G_1 + G_2) \eta}\right] \right\} \quad (16)$$

即:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp\left(-\frac{E_1 E_2 t}{(E_1 + E_2) \eta}\right) + \frac{\sigma_0}{E_1} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{E_1 E_2 t}{(E_1 + E_2) \eta}\right] \right\} \quad (17)$$

此蠕变方程式表示应力为值恒定时,应变随时间按指数递增。

$$\text{当 } t = 0, E' = E'_0 = \frac{S'_0}{2G_1} + \frac{S'_0}{2G_2};$$

$$\text{当 } t \rightarrow \infty \text{ 时, } E' = \frac{S'_0}{2G_1}, \text{ 蠕变曲线如图 12 所示。}$$

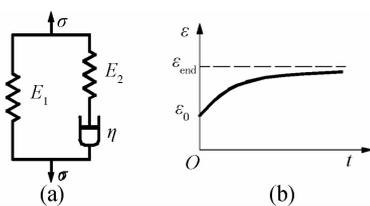


图 12 PTH 体模型及其蠕变曲线

3) PTH 模型参数的求解

根据实测数据和 PTH 模型参数定义,可分别求出模型中的和。

当 $t \rightarrow \infty$ 时:

$$\varepsilon_{\text{end}} = \frac{\sigma_0}{E_1} \Rightarrow E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_{\text{end}}} \quad (18)$$

当 $t \rightarrow 0$ 时,

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_1 + E_2} \Rightarrow E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} - E_1 \quad (19)$$

式中: ε_{end} 为最终(稳定)应变。

4.2 沉降模型(PTH)实验验证

根据 PTH 沉降计算模型,选取有机物含量为 50% 的垃圾土试样,分别在 100、200、300、400 kPa 下的应变随时间的试验曲线,并与拟合曲线作对比。如图 13 所示,计算参数见表 5。

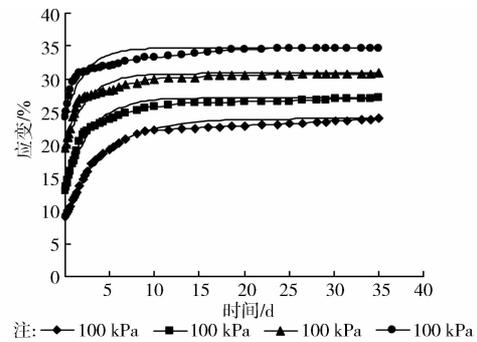


图 13 试验数据与 PTH 模型拟合曲线

表 5 垃圾土 PTH 模型的拟合参数建议值^[24]

应力水平/ kPa	$E_1 /$ (10^{-1} MPa)	$E_2 /$ (10^{-1} MPa)	$\eta /$ (10^{-1} d · MPa)	S^2
100	4.17	6.83	11.23	0.14
200	7.37	7.99	10.57	0.23
300	9.72	5.65	8.55	0.37
400	11.52	5.00	7.52	0.57

5 结 论

通过蠕变沉降观测试验,分别对不同有机物配比的新鲜垃圾土进行了长期静力蠕变沉降观测试验,得到以下结论:

1) 基于蠕变降解-降解沉降特性试验曲线建立的 PTH 沉降计算模型,能够较好的模拟反应过程的蠕变和降解沉降特性。

2) 垃圾土试样因外部应力和内部蠕变降解引起的总沉降量可达试样高度的 33.2% 且垃圾土中渗滤液在前期的溢出量受外部荷载和有机物含量共同控制。

3) 垃圾土试样中有机物降解规律可用 Richards 模型来描述;通过垃圾土的蠕变降解沉降曲线,得出累计沉降量和渗滤液产量之间符合指数函数关系。

4) 通过分析蠕变降解-沉降过程曲线得出有利于初期压缩变形和后期降解沉降的最优有机物含量区间为 29.1%~36.47%。

5) 温度监测结果显示,20~41 °C 是一个可加快内部有机物的降解速率的内部温度场,且在 41 °C 时

对降解的作用最大。

在本构模型的建立中,没有将温度对沉降的影响考虑进去,而这需要做更进一步的研究工作。

参考文献:

- [1] U. S. EPA. 2010. Municipal solid waste in the united states; 2009 facts and figures [S]. United States Environmental Protection Agency.
- [2] Tony L, Zhan T, Chen Y M, et al. Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China [J]. *Engineering Geology*, 2008, 97(3/4):97-111.
- [3] Sowers G F. Settlement of waste disposal fills [C]// Proc. of the 8 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 1973, 1: 207-210.
- [4] Hettiarachchi H, Meegoda J, Hettiaratchi P. Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement [J]. *Waste Management*, 2009, 29(3): 1018-1025.
- [5] Aliyu B N. An analysis of municipal solid waste in Kano Metropolis, Nigeria [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2010, 31(2): 111-119.
- [6] Yu L, Battle F, Carrera J, et al. Gas flow to a vertical gas extraction well in deformable MSW landfills [J]. *Hazardous Materials*, 2009, 168(2/3): 1404-1416.
- [7] Sandro L M, Miriam D F C, Orencio M V. Modeling the influence of biodegradation on sanitary landfill settlements [J]. *Soils and Rocks*, São Paulo, 2009, 32(3): 123-134.
- [8] Sivakumar B G L, Reddy K R, Chouskey S K, et al. Prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement using constitutive model [J]. *Waste Management*, 2010, 14(2): 139-150.
- [9] Sivakumar B G L, Reddy K R, Chouskey S K, et al. Constitutive model for municipal solid waste incorporating mechanical creep and biodegradation induced compression [J]. *Waste Management*, 2010, 30(1): 11-22.
- [10] Sivakumar B G L, Reddy K R, Chouskey S K, et al. Parametric study of MSW landfill settlement model [J]. *Waste Management*, 2011, 31(6): 1222-1231.
- [11] Watts K S, Charles J A, Blaken N J R. Settlement of landfills: measurements and their significance [M]. *Waste2002: Integrated Waste Management and Pollution Control: Research, Policy and Practice*, 2002:673-682.
- [12] Swait M, Joseph K. 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.
- [13] Elagroudy S A, Abdel-Razik M H, Warith M A, et al. Waste settlement in bioreactor landfill models [J]. *Waste Management*, 2008, 28(11): 2366-2374.
- [14] Hossian M S, Haque M A. Stability analyses of municipal solid waste landfills with decomposition [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2009, 27(6): 659-666.
- [15] Hossian M S, Haque M A, Hoyos L R. Dynamic properties of municipal solid waste in bioreactor landfills with degradation [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28(4): 391-403.
- [16] Hanson J L, Yeiller N O, Nicolas K. Spatial and temporal temperature distributions in municipal solid waste landfills [J]. *Environment Engineering*, 2010, 136(8): 804-814.
- [17] Rigo J M, Cazzuffi D A. Test standards and their classification [G]// Rollin A L, Rigo J M, Chapman H. *Geomembranes: Identification and Performance Testing*, New York, 1991: 22-58.
- [18] Townsend T, Miller W, Lee H, et al. Acceleration of landfill stabilization using leachate recycle [J]. *Environment Engineering*, 1996, 122(4): 263-268.
- [19] Bowders J J, Mitchell M. Waste settlements at the Columbia, Missouri landfill international workshop 《Hydro-physico-mechanics of landfills》[R]. LIRIGM, Grenoble 1 University, France, 2005: 21-22.
- [20] Yeşiller N, Hanson J L, Oettle N K, et al. Thermal analysis of cover systems in municipal solid waste landfills [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2008, 134(11): 1655-1664.
- [21] 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 M Y, Chen Y M. Calculation for the settlement of MSW landfill [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(6): 88-92.
- [22] 施建勇, 雷国辉, 艾英钵, 等. 考虑有机物降解的变形试验和计算方法研究 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(10): 1673-1677.
Shi J Y, Lei G H, Ai Y B, et al. Settlement calculation method and experimental study of wastes by considering decomposition of organic matter [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(10): 1673-1677.
- [23] 柯瀚, 刘骏龙, 陈云敏, 等. 不同压力下垃圾降解压缩试

- 验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1610-1615.
- Ke H, Liu J L, Chen Y M, et al. Biodegradation-compression tests on municipal solid waste subjected to different vertical pressures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1610-1615.
- [24] 谢强, 张永兴, 张建华. 重庆市城市生活垃圾的蠕变特性研究 [J]. 土木工程学报, 2007, 10(40): 74-79.
- Xie Q, Zhang Y X, Zhang J H. Investigation on the creep behavior of municipal solid waste in Chongqing [J]. China Civil Engineering, 2010, 10(40): 74-79.
- [25] 谢强, 张永兴, 张建华. 生活垃圾填埋过程中的沉降分析与计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2135-2140.
- Xie Q, Zhang Y X, Zhang J H. Analysis and calculation of municipal solid waste settlement during landfilling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2135-2140.
- [26] 何秋菊, 徐帆, 解仲民, 等. 填埋场不同深度垃圾土压缩特性的室内试验研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(1): 199-203.
- He Q J, Xu F, Xie Z M, et al. Compression parameters of landfill municipal solid wastes sampled at different depths [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(1): 199-203.
- [27] 刘晓东, 施建勇, 胡亚东. 考虑城市固体废弃物(MSW)生化降解的力-气耦合一维沉降模型及计算[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 693-699.
- Liu X D, Shi J Y, Hu Y D. Coupled mechanical-gas settlement model and calculation for MSW by considering biodegradation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 693-699.
- [28] 刘东燕, 冯国建, 罗云菊, 等. 考虑降解率下的垃圾土降解压缩量计算模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(2): 14-18.
- Liu D Y, Feng G J, Luo Y J, et al. Degradation settlement model of municipal solid waste with the degradation rate [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2010, 32(2): 14-18.
- [29] Richards F J. A flexible growth function of empirical use [J]. Experimental Botany, 1959, 10(2): 290-301.

(编辑 王秀玲)