

城市固体废弃物(MSW)的沉降参数研究

刘 荣

(扬州大学水利与建筑工程学院, 扬州 225009)

施建勇 彭功勋

(河海大学岩土工程研究所, 南京 210098)

【摘要】 通过室内配制的4种不同成份比例的垃圾土固结试验, 对不同成份垃圾土的沉降参数的变化规律及垃圾土的变形机理和过程进行了研究。通过垃圾土的室内沉降试验, 对垃圾土沉降量的计算值与实测值进行了比较分析。

【关键词】 垃圾土; 固结试验; 室内沉降试验; 沉降参数

【中图分类号】 X 705

Study on the Settlement Parameters of Municipal Solid Waste

【Abstract】 According to the interior consolidation tests of different component refuses, the variation laws of the settlement parameters of different component refuses and the deformation mechanism and course of refuse are studied. On the basis of the interior settlement test of the refuse, the calculated values and the measured values of the refuses settlement are analyzed.

【Key words】 refuse; consolidation test; interior settlement test; settlement parameter

0 引言

城市固体废弃物(MSW)是指城市生活中所废弃的各种固体垃圾的总称。修建具有严格意义上的现代卫生填埋场对固体废弃物进行填埋处理已是我国今后对一切固体废弃物最终处置的最主要方法。为保证填埋场的安全可靠, 诸如垃圾填埋场最终覆盖系统、衬垫系统及排水系统不致于因为垃圾土过大的不均匀沉降而破坏等问题^[1, 2], 选用合适的沉降模型对垃圾土的沉降进行准确的预测是我们面临的首要问题。但是, 因为固体废弃物分布的不均匀性, 成份差异很大, 因而其参数的随机性及方差也比较大, 参数获取的偏差可能淹没模型选取的合理性。所以, 岩土工程师需投入相当的精力获取准确参数。

1 垃圾土沉降机理

垃圾土的沉降机理相当复杂, 与土的沉降

机理不尽相同, 往往具有相当大的孔隙率和极度的非均质性。其物理作用包括扭曲、弯曲、挤压和颗粒的重新定位、细颗粒向粗颗粒孔隙的侵入等。当固体废弃物被压实时, 体积逐渐被压缩, 应力状态发生变化, 部分孔隙水从废弃物中被排出, 应力逐渐从孔隙水转移到废弃物的颗粒骨架上面, 使颗粒发生物理变化, 直到废弃物固结至稳定状态。废弃物中的生化反应包括腐蚀、氧化和生化降解(需氧发酵和厌氧发酵), 废弃物中的有机物在各种细菌的作用下逐步分解或转化为可溶性的有机和无机分子随淋滤液排出, 或转变成挥发性的气体释放^[3]。

(Sowers, 1973)将废弃物的沉降分为三个阶段: ①瞬时沉降阶段, 主要发生在填埋期。当施工期完成后, 一般也认为瞬时沉降也已经完成。瞬时沉降的压缩机理与土相似。②主

固结沉降阶段,其始于施工期开始,荷载稳定后还将持续一段时间,随着孔隙水压力的消散而增长。主固结的过程取决于孔隙水和气向外排出的速率。具有完善的排渗、导气系统的卫生填埋场,因孔隙水和气排放较快,因此,其固结过程也完成得较快。(Lukas, 1992)将主固结沉降与瞬时沉降归为一类,称为主沉降。

③次固结沉降(长期沉降)阶段,包括物理蠕变和生化降解。物理蠕变的值通常比主固结沉降值小很多。长期沉降主要是由填埋废弃物的有机物发生生物和化学降解而产生的。有机质含量较高的废弃物中的有机物发生生化降解是导致固化废弃物体积减少、沉降增加的主要原因。有研究人员将生化降解过程称为生物固结,其过程可以持续数十年。通常认为长期沉降与荷载无关。

垃圾填埋有其自身的特殊规律,通常都是分层按一定的时间间隔来完成的。对于首先开始填埋的基本垃圾层来说,在填埋时间间隔内,首先发生的是瞬时沉降,随后则有主固结沉降及长期沉降。当新的基本垃圾层开始填埋其上时,新施加的荷载会导致原先填埋的基本垃圾层发生新的瞬时沉降、主固结沉降及长期沉降。依此类推,其瞬时沉降、主固结沉降及长期沉降实际上是交错发生的。对于任一基本垃圾填埋层 h_i 其沉降发展过程也都有与之相似的规律。 h_1 垃圾层的沉降示意图 1。

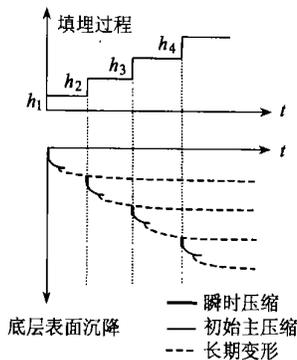


图 1 h_1 层垃圾土上表面随填埋进行而沉降的过程图

目前见于诸文献的沉降模型基本都以经典土力学为理论基础建立的,较常用的是(Sowers, 1973)模型:

$$W_I = H \cdot C_c' \cdot \lg \left[\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right] \quad (1)$$

$$W_{II} = H \cdot C_{\alpha}' \cdot \lg \left[\frac{t_1}{t_2} \right] \quad (2)$$

式中: W_I 为主沉降, m; W_{II} 为长期沉降, m; H 为垃圾层的初始厚度, m; C_c' 为修正主固结压缩指数; C_{α}' 为修正次固结压缩指数; σ_0 为垃圾层受到的前期应力, kPa; $\Delta\sigma$ 为竖向增填或其它外荷载引的应力增量, kPa; t_1 为长期沉降开始的时间; t_2 为垃圾层长期沉降结束的时间。

2 试验计划

与一般土相比,固体废弃物具有相当大的差异性,其成份具有极度的离散性、大孔隙性和非饱和性,并且随时间、季节、地点、民族、习俗、国家、生活水平及生活方式等诸多因素而改变。随着经济的快速发展、人们生活水平的提高及废弃物中可回收成份的增加,废弃物的成分呈明显的由以无机物为主逐渐向以有机物为主转化的趋势。观察国内外固体废弃物的成份^[4~9],我们可以发现,一方面,国外垃圾土的有机质含量明显高于国内垃圾土。另一方面,国内垃圾土中灰土的含量也明显高于国外垃圾土。究其原因,应是经济发展水平差异所造成的。例如,英国在 1953 年其垃圾土中灰土的含量超过 50%, 而到 1980 年,灰土含量则降至 10% 左右。

本试验计划包括固结试验及室内沉降试验两部分。固体废弃物的试验配比方案见表 1。

表 1 固体废弃物的试验配比一览表

成 份	质量分数/ %			
	方案 I	方案 II	方案 III	方案 IV
食物垃圾	25	25	25	25
纸 张	41	31	21	11
橡 胶	3	3	3	3
塑 料	6	6	6	6
纺织品	3	3	3	3

续表

成份		质量分数/%			
		方案I	方案II	方案III	方案IV
无机物	金属	4	3	2	1
	玻璃	10	8	6	4
	灰土	8	21	34	47

废弃物为自行配制,按各成份的干质量分数进行。因缺乏有关固体废弃物的试验标准,根据相关土工试验规程,控制废弃物最大尺寸为试验垃圾样尺寸。废弃物按设计比例配制完成后,在试验室内进行充分搅拌并均匀喷洒水。综合考虑国内外垃圾填埋场的含水量,试样的初始含水量控制在69%左右。垃圾土的初始干密度按 0.4 g/cm^3 控制。采用常规高压固结仪来测定垃圾土的压缩性。试验标准按《土工试验规程》(SL237-1999)执行。试样击实到设计密度后,装入固结仪内,按非饱和土考虑,用湿棉围住加压盖板四周,以避免水分蒸发。加压等级采用25kPa、50kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa、1 600 kPa分别施加。稳定标准为每级压力下固结24 h。

沉降试验自行设计。试验筒由5个尺寸 $\Phi 300 \times 10 \times 400$ 的有机玻璃筒组成,图2为垃圾土试样柱分层沉降计算示意图。图3为沉降试验装置示意图。每个填埋层厚度为

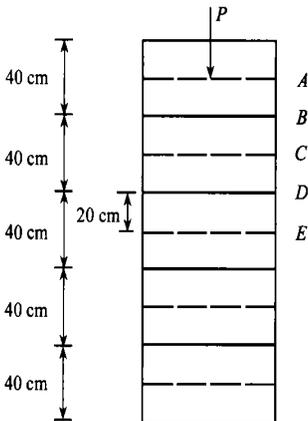


图2 垃圾土试样柱示意图

20 cm。筒内壁贴一层塑料薄膜以减少废弃物

与筒壁之间的摩擦。沉降试验的配比按方案I执行。每个填埋层完成后,施加10 kPa的预压荷载。在A、B、C、D、E各点处设置观测片,测定各垃圾层的压缩量。

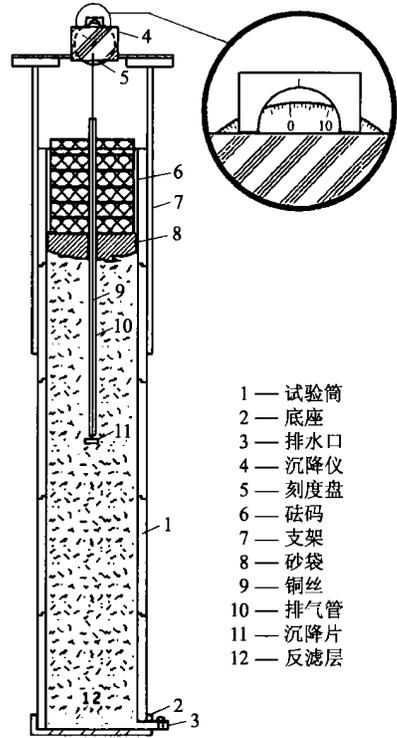


图3 沉降试验装置示意图

3 垃圾土的沉降参数及其变化规律

固结试验的结果见图4、5及表2。计算结果显示,主压缩指数 C_c 的变化范围在0.77~2.06,修正主压缩指数 C_c' 的变化范围为0.13~0.46。这样的 C_c 及 C_c' 值的变化范围,对于土而言,已属于高压缩性土。从计算结果可以看出,随着垃圾土中有机质含量的变化, C_c 及 C_c' 也出现明显的变化。试样I~IV中有机质含量的质量分数是逐渐降低的,计算得出,应力在100~1 600 kPa的变化范围内, C_c 及 C_c' 的变化也是逐渐降低的。这说明,在一定的应力变化范围内,垃圾中有机质的增加会加大垃圾及土体的压缩变形量。另外,在 $e-\log p$ 曲线的后段未发现明显的直线段,因

此, C_c 、 C_c' 并非常量。在 25 ~ 100 kPa 应力范围内, 其参数值 C_c 、 C_c' 随着应力的增加而增加。在 100 ~ 1 600 kPa 应力范围内, C_c 、 C_c' 随应力的增加而减少。这说明, C_c 、 C_c' 的选取与应力范围的选取有相应的关系。(Landva & Clark, 1990)对加拿大五个填埋场(Kingston, Edmonton, Hansport, Ottawa, Edmundston)取样进行固结试验。试验结果分别为 $C_c' = 0.17$ ($p = 20 \sim 200$ kPa), $C_c' = 0.35$ ($p = 80 \sim 200$ kPa), $C_c' = 0.22$ ($p = 80 \sim 200$ kPa), $C_c' = 0.21$ ($p = 100 \sim 400$ kPa), $C_c' = 0.36$ ($p = 100 \sim 400$ kPa), C_c' 值的变化范围为 0.17 ~ 0.36。(Sowers, 1973)给出 C_c 值的变化范围为 0.6 ~ 4.25, C_c' 值的变化范围为 0.15 ~ 0.3。可以看出本试验得出的参数值与其吻合相当好。

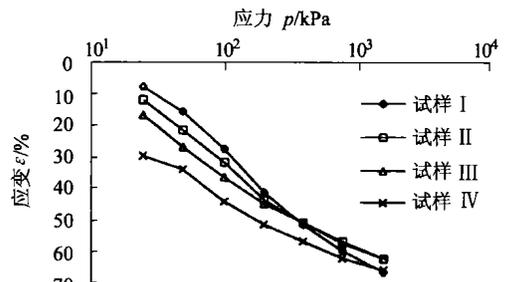


图4 固结试验 $\epsilon - \text{Log } p$ 关系曲线

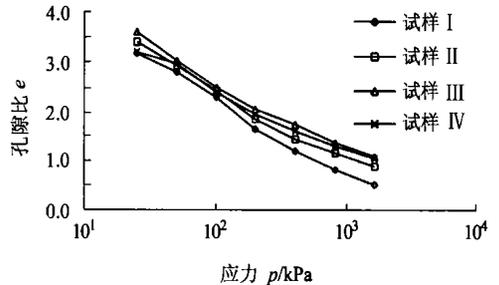


图5 固结试验 $e - \text{Log } p$ 关系曲线

表2 主压缩指数 C_c 、修正主压缩指数 C_c'

荷载 p/kPa	试样 I		试样 II		试样 III		试样 IV	
	C_c	C_c'	C_c	C_c'	C_c	C_c'	C_c	C_c'
25 ~ 50	1.23	0.27	1.53	0.30	1.89	0.34	0.82	0.14
50 ~ 100	1.73	0.39	1.69	0.34	1.89	0.31	1.94	0.32
100 ~ 200	2.06	0.46	1.96	0.40	1.46	0.26	1.41	0.24
200 ~ 400	1.50	0.33	1.26	0.25	1.06	0.20	1.10	0.19
400 ~ 800	1.23	0.28	0.93	0.19	1.23	0.22	1.0	0.17
800 ~ 1 600	1.00	0.22	0.86	0.17	0.89	0.16	0.77	0.13

4 垃圾土沉降量的计算值与实测值比较分析
沉降试验的结果见图6。

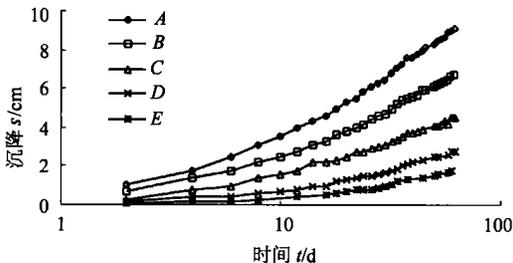


图6 沉降—时间关系曲线

根据(Keene, 1997)的研究结论, 可设本次试验的长期沉降开始时间为 1 个月。修正主压缩指数 C_c' 取 0.36。则根据 Sowers 沉降模

型 $W_1 = H \cdot C_c' \cdot \lg \left[\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0} \right]$ 可计算出沉降筒各垃圾压缩层的主沉降量。作为算例, 取 A-B 压缩层为计算层。计算出其主沉降量为 5.65 mm。根据图 6 可知, A-B 层在一个月时的压缩量其实测值为 18 mm。很显然, 垃圾土主沉降的计算值要小于实测值。换句话说, 实测值大约为计算值的 3 倍。分析其原因在于以下几个方面:

1) 垃圾土的沉降是一个相当复杂的过程。而 Sowers 沉降模型只是沿用了土力学的压缩理论, 其计算公式只是反映了土体中土粒因调整位置、重新排列、互相挤紧所导致的孔隙减少^[9]。而垃圾土颗粒的尺寸往往相差极为悬

殊,形状也千差万别,具有很大的孔隙比。所以 Sowers 沉降模型并不能完全反映具有大孔隙的垃圾土沉降变形机理。在 Sowers 沉降模型计算的“主沉降”中,除了由轴向应力所产生的压缩变形外,还应包括另一项“沉降”。这部分沉降应能反映垃圾土中除压缩之外的其它作用所产生的沉降。因此,寻求能更加准确地反映垃圾土的沉降机理的计算模型将是下一步对垃圾土变形研究的一个重要方面。

2)据表 2 的计算结果可知, $\epsilon - \log p$ 关系曲线是非线性的。修正主压缩指数 C_c' 会随垃圾压缩层的应力水平及荷载所施加的时间的改变而变化。在固结试验中,其轴向压应力的变化范围为 25 ~ 1 600 kPa,而在沉降筒试验中,垃圾层所受的前期固结应力为 10 kPa,加上其自重应力,垃圾层所受的总压缩应力小于 25 kPa。其次,在固结试验中,每级压力下的稳定压缩标准按照常规土的固结试验标准为 24 h。而在沉降筒试验中,主沉降的计算时间为 1 个月。时间和初始应力水平的差异也会导致计算值和实测值的不同。

5 结 论

1)垃圾土中有机质含量及土粒的含量是影响垃圾土沉降参数取值的重要因素。垃圾土的固结试验表明,垃圾土的压缩性随垃圾土中的有机质含量增加而增加,主压缩指数 C_c 的取值范围为 0.77 ~ 2.06,修正主压缩指数 C_c' 的取值范围为 0.13 ~ 0.46。对于国内的垃圾土, C_c 及 C_c' 宜取低值。

2)在垃圾土 $e - \log P$ 曲线的后段未发现明显的直线段,因此, C_c 、 C_c' 并非常量。时间和应力水平的差异会导致 C_c 及 C_c' 值的变化。

3)因垃圾土成份的复杂性及其尺寸的离散性较大,常规土试验仪器因其尺寸较小,用

在垃圾土试验上,并不十分合适。研制更合适的垃圾土试验仪器将是今后研究工作面临的首要问题。

4)应用 Sowers 模型所得到的垃圾土沉降量的计算值小于其实测值,因此,有必要对 Sowers 沉降模型进行修正。

5)生化降解是影响次固结沉降的主要因素,因此,研究垃圾土的生化降解规律应是今后对垃圾土研究的一个主要方向。

参 考 文 献

- 1 钱学德,郭志平,施建勇.现代卫生填埋场的设计与施工.北京:中国建筑工业出版社,2001.166
- 2 Edited by David E. Daniel. Geotechnical Practice for waste disposal. Published by Chapman & Hall, 1997. 12
- 3 Gowrc J P, Thomas. S, Vuillemin M. Proposal of a Waste Settlement Survey methodology. Environmental Geotechnics 1998. 195 ~ 200
- 4 Powell G E, Watkins A T, Manley B J W. Restoration of a Large urban Landfill in Hong Kong Geotechnique, 1992, 42(1): 37 ~ 47
- 5 Machado S. Santos Juca J F T, Arago J M S. Geotechnical Properties of a Solid waste Landfill; Muribeca's case. Environmental Geotechnics, 1998. 181 ~ 184
- 6 Antonio Pais Antunes & Luis joaquim Leal Lemos. Contribution for a Solution of the Urban Solid Waste in the Central Region. Environmental Geotechnics, 1998. 319 ~ 323
- 7 Watts K S, Charles J A. Settlement Characteristics of Landfill Wastes. Geotechnical Engineering, 1999, 137(10): 225 ~ 233
- 8 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算.北京:中国水利水电出版社,1996.199

收稿日期:2002-11-17