

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0497

竖向扩建填埋场变形离心模型试验研究

李俊超^{1,2}, 朱 斌^{1,2}, 杨春宝^{1,2}, 王路君^{1,2}, 陈云敏^{1,2}

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 填埋场扩建是增大库容的重要手段, 而其引起的沉降变形对填埋场及内部构筑物的稳定性有重大影响。针对扩建填埋场自重应力作用下的沉降变形问题, 采用能够模拟我国固废工程特性的人工固废开展了平原型填埋场竖向扩建的离心模型试验。结果表明, 堆体自重应力沉降随固废龄期增大而减小, 最大沉降可达到堆体初始高度的 20%。新老堆体界面不均匀沉降随老堆体龄期增大而减小, 界面水平位移最大值出现在新堆体坡肩附近, 且随坡比增加和龄期减小而增大。坡比越小, 龄期和垃圾坝的作用越明显。垃圾坝对填埋堆体变形的影响随其相对高度减小而减弱。试验结果略大于常用的填埋场一维沉降计算结果, 为填埋场扩容及中间衬垫设计和稳定评估等提供了参考。

关键词: 城市固体废弃物; 平原型填埋场; 竖向扩建; 离心模型试验; 沉降变形

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)11-4071-09

Centrifugal model tests on stress deformation of plain-type landfills under vertical expansion

LI Jun-chao^{1,2}, ZHU Bin^{1,2}, YANG Chun-bao^{1,2}, WANG Lu-jun^{1,2}, CHEN Yun-min^{1,2}

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: Expansion is an important strategy to increase the capacity of a landfill, but the induced deformation by expansion can threaten the stability of the landfill and its internal structure. Synthetic municipal solid wastes (MSWs) which exhibited engineering characteristics similar to MSW in China were developed, and a series of centrifugal model tests on the deformation of expanded plain-type landfill under self-gravity stress was performed. The settlement of landfill under self-gravity stress decreased as the MSW age increased with a maximum settlement of approximately 20% of the initial landfill height. Differential settlement of the interface between the old landfill and the new landfill decreased with the increase of old landfill MSW age. The maximum value of horizontal displacement on the interface occurred under the slope shoulder, and increased with the increase of slope ratio and decrease of filling age. The engineered berm restricted the settlement of the old landfill before expansion, but the settlement restriction was weakened as the height of landfill increased after expansion. It might induce large difference of the horizontal displacement on the interface. The results of the tests are slightly larger than those of one-dimensional settlement calculation of the landfill, and can provide reference for the expansion and liner system design, stability assessment and landfill operation.

Keywords: synthetic MSW; plain-type landfill; vertical expansion; centrifuge model tests; deformation

1 引 言

目前我国城市固体废弃物的产量急剧增加, 由于场地限制和新场选址困难, 特别是在经济发达、人口密集地区, 基于原有城市固废堆体进行竖向扩建是解决城市固废填埋库区容量不足最经济和有效

的手段之一。由于城市固废压缩性大, 扩建过程中因新老堆体沉降而增加的库容是十分可观的^[1]。Bjarngard 等^[2]对 24 座填埋场封场后的沉降进行了观测, 发现封场后的沉降可达到填埋场初始厚度的 5%~30%。自 1987 年纽约 Islip 填埋场竖向扩建后, 迄今全球已超过 75 座填埋场进行了类似的扩容扩建。

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 浙江省科技厅资助项目 (No. 2015C03021)。

This work was supported by the Technology Office in Zhejiang Province (2015C03021).

第一作者简介: 李俊超, 男, 1988 年生, 博士生, 从事填埋场静动力灾变研究。E-mail: lijunchao@zjhu.edu.cn

通讯作者: 朱斌, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 主要从事软弱土基本特性和静动力灾变等方面的教学和科研工作。E-mail: binzhu@zju.edu.cn

然而, 竖向扩建同时也带来了不少问题。Qian等^[1]对填埋场竖向扩建所涉及的主要关键问题进行了系统总结。一方面, 由于填埋龄期、填埋深度不同, 老填埋场各处沉降有一定差异, 竖向扩建将引起老填埋场附加变形和不均匀沉降, 导致中间衬垫系统和渗滤液导排系统的坡度发生改变, 甚至产生逆坡, 使得渗滤液导排受阻, 从而引起填埋场渗滤液水头雍高, 增加了堆体失稳的风险; 同时老填埋场的不均匀沉降还可能引起填埋气收集系统的过大变形甚至失效, 导致填埋场内水气压力过高, 从而降低了堆体稳定性。另一方面, 竖向扩建增大了老填埋场斜坡区的侧向变形, 使得中间衬垫系统产生一定的附加拉应变, 可能引起防渗材料的拉伸破坏并导致其隔渗性能失效, 对周围水体和土体产生持久的二次污染。另外, 对于干旱和半干旱区域的无衬垫填埋场, 竖向扩建使得老填埋体产生附加压缩, 可导致固废含水率超过其田间持水量, 从而引起渗滤液挤出污染地下水等问题^[3]。故竖向扩建填埋场沉降变形问题的研究, 对填埋场增容及中间衬垫设计、安全运营及其稳定评估都有重大意义。

国内外学者通过填埋场现场沉降观测分析, 建立了估算填埋场沉降的数学模型, 结合室内压缩试验对填埋场沉降进行了研究^[2, 4-13], 认为填埋场沉降由主沉降、次沉降和降解沉降组成。然而, 目前对填埋场沉降变形问题的研究主要集中在一维理论分析上, 仅有少数学者展开了二维理论研究, 由于城市固废工程特性的复杂性及填埋场的大规模性, 采用试验手段对填埋场沉降开展的研究尚少。离心模型试验能够在超重力条件下再现实际填埋场的沉降变形甚至破坏过程, 是研究填埋场变形的一种有效手段, 其中配制适用于离心模型试验的人工固废是试验关键之一。剑桥大学 Thusyanthan 等^[4]用人工配制固废进行了填埋场静动力离心模型试验, 发现了填埋场在自重应力作用下产生大变形的问题, 但对填埋场沉降变形规律缺乏深入详细的探究。我国固废高有机质含量和高含水率的特性增大了固废的压缩性, 也加大了填埋场沉降变形研究的复杂性。

本文针对填埋场在自重应力作用下变形的问題, 配制了能够模拟我国城市固废重度、孔隙比、含水率、压缩性及应力-应变关系等工程特性的人工固废, 采用超重力离心模型试验研究了平原型城市固废填埋场扩建前后沉降变形特性, 探究了固废龄期、边坡坡比及垃圾坝对填埋场沉降的影响, 并探讨了平原型填埋场竖向扩建导致新老堆体及界面的变形规律。

2 离心模型试验

本次试验在浙江大学离心机 ZJU-400 上进行, 其有效旋转半径为 4.5 m, 最大运行能力为 400 g·t, 最大离心加速度为 150 g。

2.1 试验材料

本文采用多种不同材料的混合物模拟城市固废, 根据材料的物理和力学特性, 选取了长白山草炭、福建标准砂和高岭土 3 种材料。长白山草炭应力-应变曲线与城市固废相似具有明显的应变硬化特性, 而标准砂和高岭土在改善人工固废应力-应变特性和压缩性等方面起到重要作用。

由于有机质降解等原因, 城市固废特性会随着填埋龄期增加而发生明显变化, 呈现出明显的龄期效应^[15]。采用长白山草炭、福建标准砂和高岭土配制了多种不同配比的人工固废, 根据三轴剪切试验的应力-应变曲线与真实固废的相似程度, 选取了两种配比分别模拟苏州七子山填埋场新鲜固废 (0a) 和部分降解固废 (5a), 如表 1 所示, 所配制的人工固废在重度、含水率、孔隙比、压缩特性及应力-应变关系等方面均与七子山固废相似。表 1 中七子山不同龄期固废含水率、重度和孔隙比分别为埋深为 5、15 m 固废参数的平均值。

图 1 为本文人工固废与苏州七子山填埋场固废应力-应变关系对比, 可以看出, 人工固废的应力-应变曲线与真实固废的应力-应变关系曲线一致性较好, 均表现出明显的应变硬化特性。此人工固废的压缩特性与规范^[16]中汇总的城市固废压缩试验结果相近, 如图 2 所示, 且其修正主压缩指数与国外的经验值 (0.17~0.36)^[17]亦较符合。

表 1 人工固废与七子山填埋场固废参数比较

Table 1 Comparison of parameters between synthetic MSW and MSW in Suzhou Qizishan landfill

固废类型	填埋龄期 / a	平均填埋深度		草炭: 福建标准砂: 高岭土	含水率 / %	重度 / (kN/m ³)	孔隙比	修正主压缩指数
		/ m						
七子山固废	新鲜	0	5	/	65	8.3	2.7	0.26
	部分降解	5	15	/	50	9.4	1.7	0.20
人工固废	新鲜	/	/	1.25:1.00:1.00	55	7.0	2.9	0.24
	部分降解	/	/	1.00:1.00:1.00	45	9.0	1.6	0.18

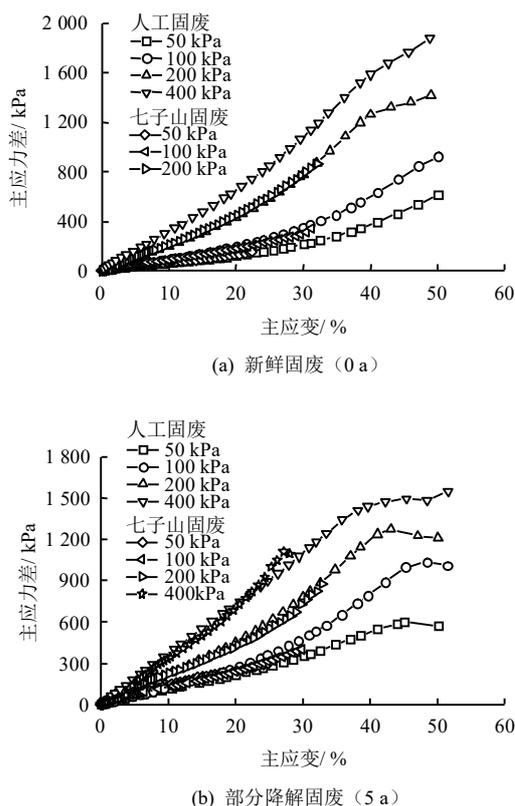


图 1 人工固废与七子山填埋场固废应力-应变关系比较
Fig.1 Comparison of stress-strain relationships between synthetic MSW and MSW in Suzhou Qizishan landfill

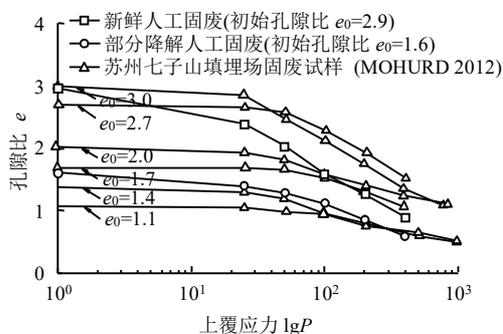


图 2 人工固废与七子山填埋场固废压缩性比较
Fig.2 Comparison of compressibility between synthetic MSWs and MSW in Suzhou Qizishan landfill

2.2 模型制作

试验布置和模型尺寸如图 3 所示，新老填埋场分两次堆填。以重度控制的原则，采取分层填筑、夯实、再人工削坡的方式制作填埋场模型，每层厚度控制在 50 mm。为保证填筑固废的均匀性，采用杨春宝等^[18]制样方法，采用能在 X、Y、Z 3 个方向上精确定位的三自由度夯击仪，先后用大小夯板按预定顺序进行夯击，每次夯击面积与上一次夯击面积重叠一半，直到该层土达到所需厚度为止。为保证各层土交界面处的均匀性，夯实完成后用钢丝刷

对表面 5 mm 深度范围内进行拉毛处理。在模型箱侧面有机玻璃板的内侧紧贴有标记点，间隔为 45 mm，模型箱侧面外安装数字相机，根据图像矢量分析土体变形^[19]。在堆体不同位置（坡顶、坡肩和坡中）分别布置激光位移计 L1~L3。

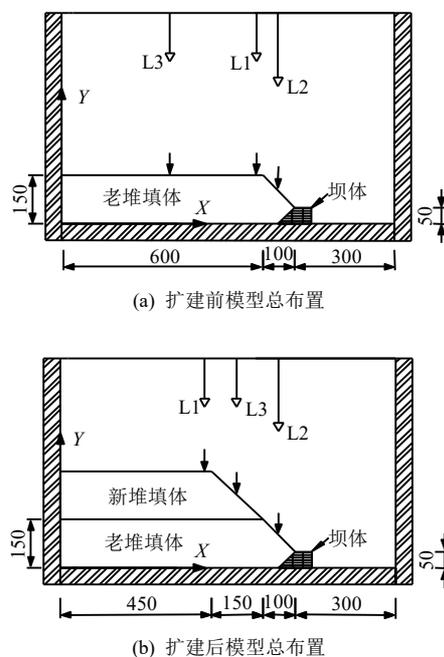


图 3 模型总布置图 (单位: mm)
Fig.3 Model layout (unit: mm)

2.3 试验方案

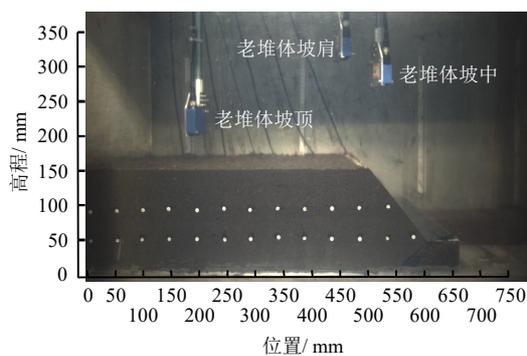
如表 2 所示，共进行 8 组试验。模型试验中老填埋堆体分别采用新鲜和部分降解人工固废，新填埋堆体采用新鲜人工固废，制作了坡比分别为 1:1、1:2 和 1:3 的有垃圾坝和无垃圾坝的平原型填埋场模型，分别研究填埋龄期、边坡坡比及垃圾坝对填埋场竖向扩建前后新老填埋体沉降及界面变形的影响。

表 2 模型试验方案
Table 2 Test program

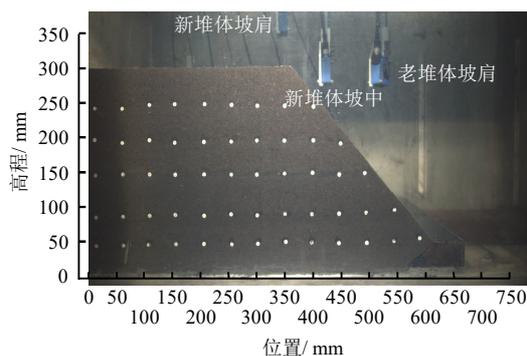
组别	坡比	老堆体固废类型	垃圾坝
Test 1	1:1	新鲜	无
Test 2	1:1	部分降解	有
Test 3	1:2	新鲜	无
Test 4	1:2	新鲜	有
Test 5	1:2	部分降解	有
Test 6	1:3	新鲜	无
Test 7	1:3	新鲜	有
Test 8	1:3	部分降解	有

每组试验分两阶段进行。第 1 阶段：如图 4(a) 所示，先在 1.0 g 条件下填筑、夯实老填埋堆体，然后运行离心机，并分别在 20.0 g、40.0 g 和 66.7 g

下稳定运行至堆体沉降稳定, 对应到原型可分别模拟 3、6、10 m 高的填埋体沉降; 然后逐步降低离心加速度并分别在 40.0 g、20.0 g 和 1.0 g 下稳定后记录堆体的回弹高度。第 2 阶段: 在老填埋堆体上继续填筑、夯实扩建堆体, 如图 4(b)所示, 然后运行离心机, 并分别在 20.0 g、40.0 g 和 66.7 g 下稳定运行至堆体沉降稳定。



(a) 扩建前模型照片



(b) 扩建后模型照片

图 4 模型试验照片 (单位: mm)
Fig.4 Pictures of model test (unit: mm)

3 试验结果及分析

3.1 填埋堆体沉降

(1) 第 1 阶段: 老堆体自重应力沉降

第 1 阶段设置不同重力加速度模拟不同高度的老填埋体因自重应力在运营期间产生的沉降, 其坡顶、坡肩和坡中沉降随时间的发展如图 5 所示。从图 5(a)和 5(b)中可以看出, 垃圾坝可有效降低老堆体的沉降变形量。在 66.7 g 条件下沉降稳定时, 垃圾坝可使坡比为 1:2 堆体的顶部沉降量降低 14%; 而使坡比为 1:3 堆体的顶部沉降量降低高达 24%。图 5(c)和 5(d)对比了坡比为 1:2 和 1:3 时固废龄期对老堆体沉降的影响, 可以看出, 随着龄期的增大, 老堆体沉降量减小, 且在坡比为 1:3 时, 减小量达到 40%。图 5(e)和 5(f)给出了两组不同边坡坡比堆体的沉降, 可以看出, 坡比对老堆体的沉降影响相

对较小, 规律性不明显。但是分别对比图 5(a)和 5(b)、图 5(c)和 5(d), 可以发现, 当边坡坡比减小时, 龄期和垃圾坝对堆体沉降的影响加剧。

图 6 为在各级离心机加速度下老堆体坡顶最终沉降量, 可以看出, 老堆体坡顶的最终沉降量与堆体的填埋高度基本成正比, 且随着固废龄期的增大而减小。在 66.7 g 条件下, 对于小龄期人工城市固废堆体, 坡顶的最大应力压缩沉降量与老堆体初始高度的比值为 13%~21%; 而对于中龄期人工城市固废堆体, 则降为 10%~12%。同时, 垃圾坝对堆体沉降起到了较大的抑制作用。边坡坡比越小, 龄期和垃圾坝的影响越明显。

(2) 第 2 阶段: 扩建后堆体总沉降

扩建后, 老填埋体在扩建堆体荷载作用下变形进一步发展, 扩建后填埋堆体不同位置的总沉降(新老堆体沉降之和)如图 7 所示。

可以发现, 填埋堆体总沉降量随龄期变化规律与老堆体一致, 固废龄期越小, 其最终沉降越大。当老堆体为小龄期人工固废时, 堆体坡肩的最大总沉降与堆体初始高度的比值约为 19%; 而当老堆体为中龄期人工固废时, 该比值降为 16%左右, 且随着坡比的增大而略有减小。扩建后垃圾坝对堆体总沉降的影响很小, 这表明垃圾坝的影响范围有限, 当堆体相对高度超出一定值时, 垃圾坝对堆体总沉降的影响可以忽略。老堆体坡中测得的沉降值减小, 这与新堆体荷载作用下堆体发生水平变形有关。从模型箱侧壁观测窗观察发现, 在扩建堆体自重应力作用下老堆体坡面向坡外鼓出, PIV 分析结果也表明, 扩建后老堆体发生了明显的侧向变形, 如图 8 所示。

(3) 堆体沉降计算

在填埋过程中固废是分层填埋和压实的, 不同深度处的固废承受着不同的自重荷载, 也对应着不同的填埋时间, 可用分层法计算填埋体沉降。填埋体沉降由主沉降、次沉降和降解沉降组成, 本文主要针对自重应力下堆体产生的沉降进行计算并和试验结果对比, 由于固废填埋时间小于 5 a, 不计次沉降^[1]。根据 Qian 等^[1], 堆体主沉降可采用如下公式进行计算:

$$\Delta H_c = C'_c H_0 \lg \frac{\sigma_i}{\sigma_{0i}} \quad (1)$$

式中: ΔH_c 为主沉降; H_0 为堆体初始厚度; C'_c 为修正主压缩系数; σ_{0i} 为固废的初始填埋压力(根据国内情况, 各固废层的 σ_{0i} 可统一取埋深为 1 m 处的自重应力); σ_i 为第 i 层固废的自重应力。

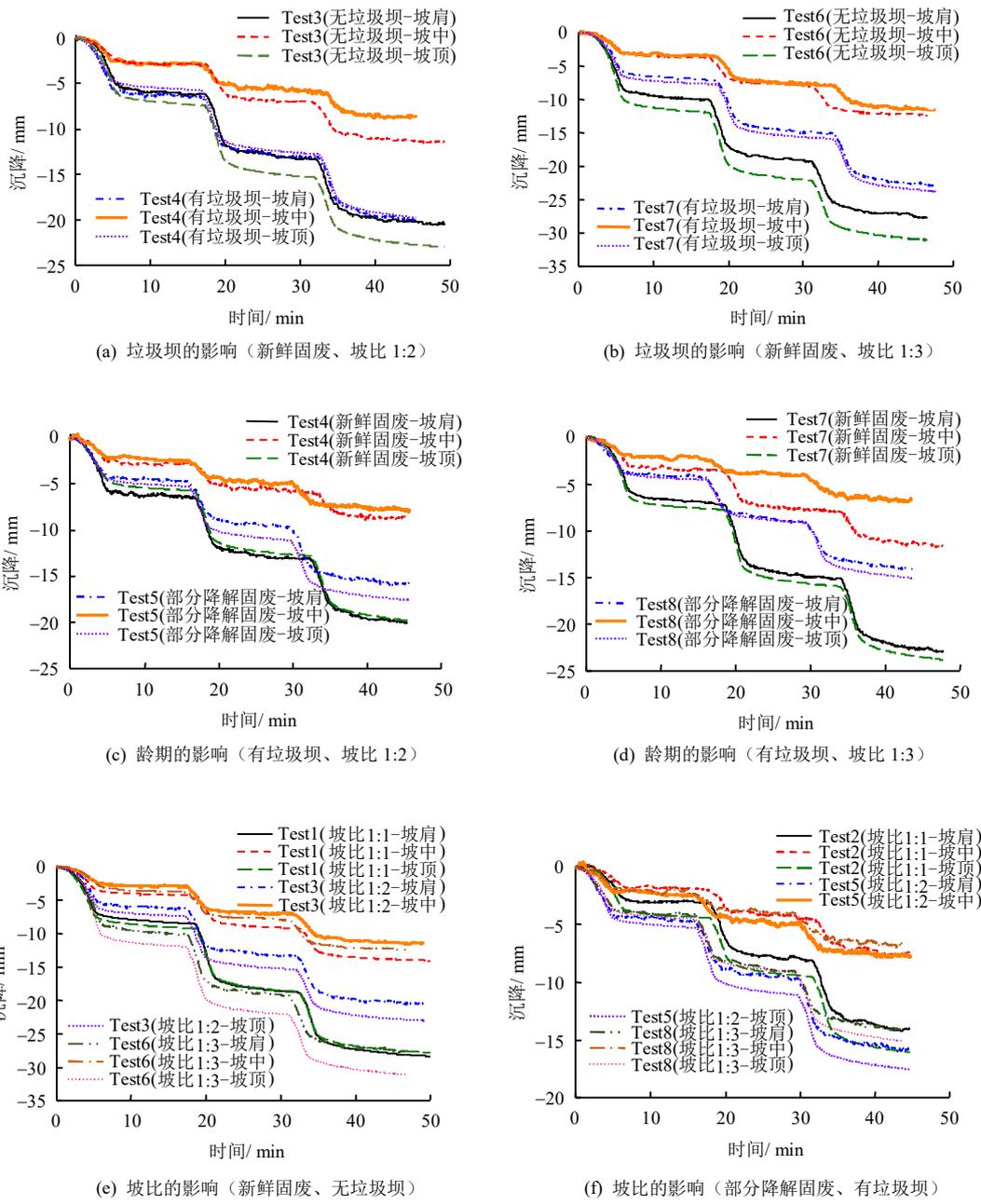


图 5 离心机加速过程中老填埋堆体的沉降曲线
Fig.5 Settlement of old landfill during accelerating process of centrifuge

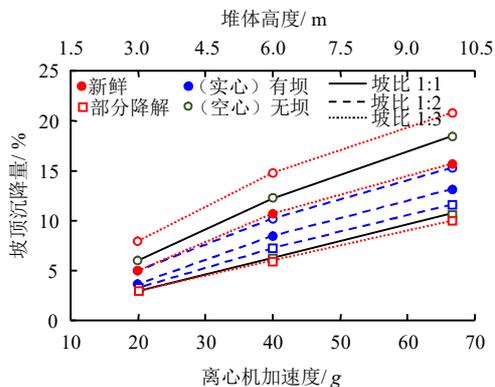


图 6 各级重力加速度条件下老填埋体坡顶沉降值
Fig.6 Settlement at the top of old landfill under different gravitational accelerations

竖向扩建荷载下，老堆体的附加主沉降：

$$\Delta H'_c = C'_c H_0 \lg \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0} \quad (2)$$

式中： $\Delta H'_c$ 为附加主沉降； σ_0 为固废的自重应力； $\Delta \sigma$ 为固废的自重应力增量。

扩建前后堆体各处沉降计算结果如表 3 所示，对于大多数试验，实测的老堆体坡顶沉降略大于计算值，这是由于式 (1) 计算的沉降值基于侧限条件下的一维压缩理论，而试验过程中，模型边坡无侧限条件允许堆体水平向变形发展，从而增大了沉降量。而计算所得的扩建后新堆体坡肩沉降值均小于

试验实测值，这表明扩建后堆体的二维压缩更加明显。由于扩建堆体荷载作用下老堆体水平变形，坡面向外鼓出。固废龄期的增大，减小了其压缩性，

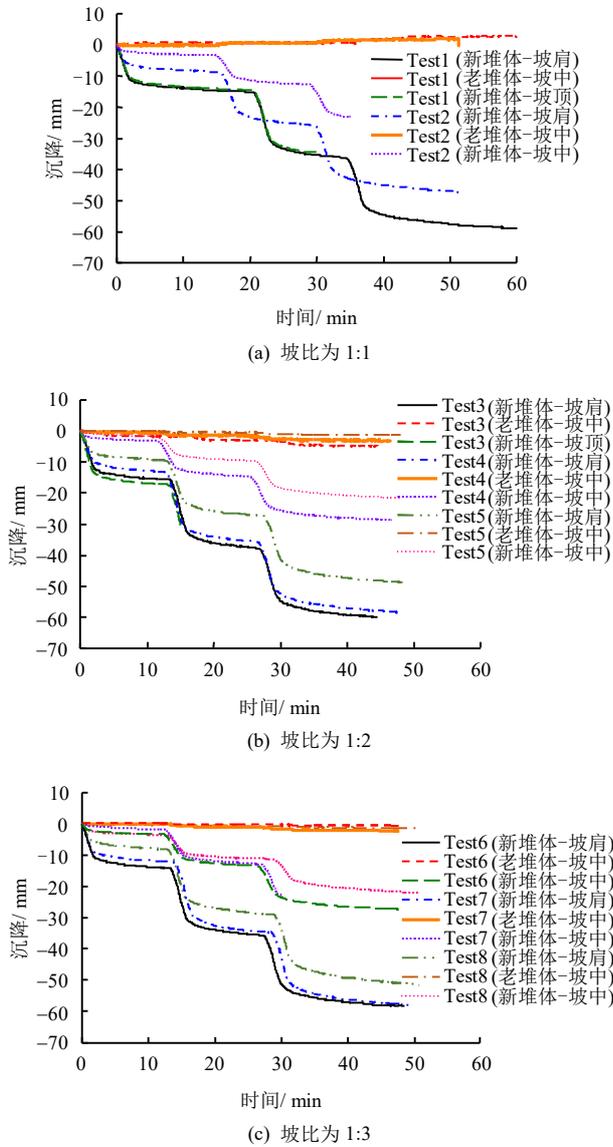


图 7 扩建后堆体不同位置总沉降
Fig.7 Total settlement of expanded landfill at different locations

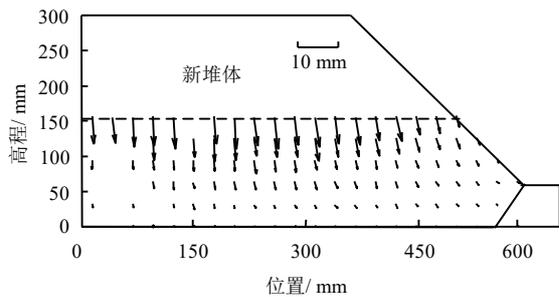


图 8 Test 2 扩建后老堆体位移矢量图 (40.0 g → 66.7 g)
Fig.8 Displacement vectors of landfill after expansion in test 2 (40.0 g → 66.7 g)

表 3 扩建前后堆体沉降值
Table 3 Settlement of landfill before/after expansion

位置		扩建前老填埋体沉降			扩建后总沉降 (新老填埋体之和)	
		/ mm			/ mm	
		老堆体 坡顶	老堆体 坡肩	老堆体 坡中	新堆体 坡肩	老堆体 坡中
Test1	试验值	27.94	28.44	14.09	58.92	-2.88
	计算值	21.71	21.71	10.86	57.02	10.86
Test2	试验值	16.05	14.18	7.55	46.96	-2.89
	计算值	16.28	16.28	8.12	43.12	8.12
Test3	试验值	22.98	20.48	11.47	60.00	4.91
	计算值	21.71	21.71	10.86	57.22	10.86
Test4	试验值	19.75	20.00	8.71	58.37	3.17
	计算值	21.71	21.71	10.86	57.36	10.86
Test5	试验值	17.54	15.79	7.87	48.80	1.39
	计算值	16.28	16.28	8.12	43.08	8.12
Test6	试验值	31.00	27.72	12.56	58.24	0.52
	计算值	21.71	21.71	10.86	56.88	18.06
Test7	试验值	23.78	22.79	11.7	57.81	2.27
	计算值	21.71	21.71	10.86	57.19	18.06
Test8	试验值	15.04	14.03	6.71	51.14	1.21
	计算值	16.28	16.28	8.12	43.15	8.12

使得填埋体沉降量减小。设置垃圾坝在一定程度上抑制了扩建前老填埋体坡顶沉降的发展，而对扩建后坡顶总沉降的影响则较小，这与扩建后垃圾坝高度相对堆体高度变小有关。

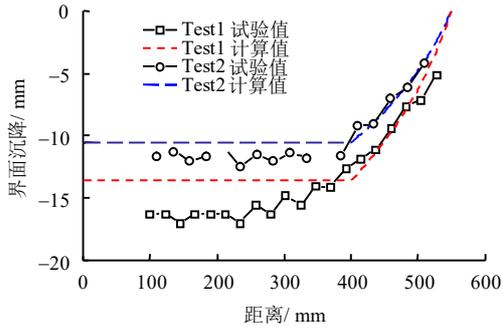
3.2 新老堆体界面变形

(1) 界面沉降

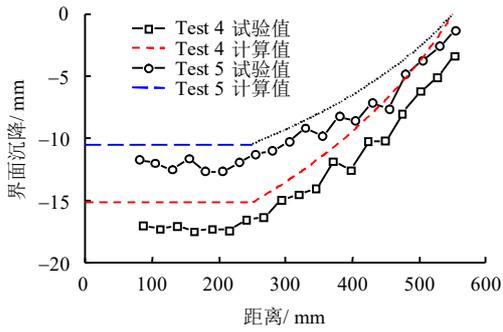
由于不同区域堆填固废龄期、扩建堆体厚度的差异，在新老堆体界面处往往会产生不均匀沉降，本节主要研究在扩建堆体自重应力作用下新老堆体界面处的附加沉降。通过 PIV 分析得到扩建后新老堆体界面附加沉降，如图 9 所示，其中界面沉降计算值根据式 (2) 得到。计算所得附加沉降值普遍略小于试验实测值，扩建堆体荷载作用下老堆体的水平变形增大了其附加沉降量。可以发现，老填埋堆体龄期越小，则中间界面沉降和不均匀沉降差越大，界面沉降差最大可达老堆体厚度的 7%。这表明，老填埋堆体中固废的降解程度对扩建后堆体的变形有很大影响，底部固废降解不充分，会导致堆体整体发生较大不均匀沉降，从而可能破坏堆体中的导排系统及防污屏障等。因此，对于填埋场竖向扩建工程，建议在下覆填埋体充分降解后进行。

(2) 界面水平位移

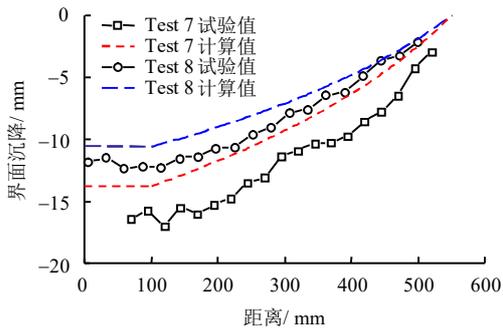
通过 PIV 图像分析得到新老填埋堆体界面的水平位移，如图 10 所示。对于部分降解的固废，界面最大水平位移发生在靠近扩建堆体坡肩位置(见图 11)，



(a) Test 1 和 Test 2 (坡比 1:1)



(b) Test 4 和 Test 5 (坡比 1:2)

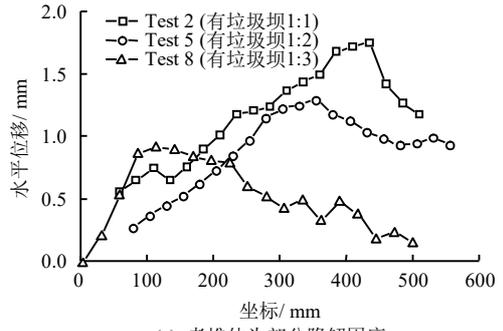


(c) Test 7 和 Test 8 (坡比 1:3)

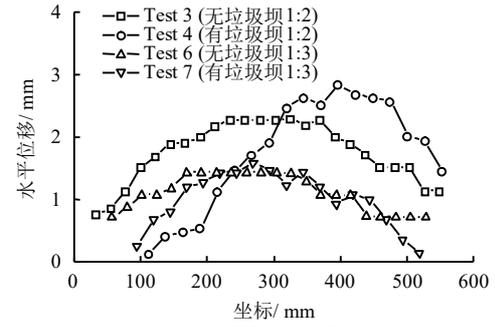
图 9 新老堆体交界面的沉降

Fig.9 Settlement of interface between old landfill and the new landfill

在扩建堆体水平段下方界面水平位移从左至右逐渐增大，而扩建堆体边坡下方则逐渐减小；对于新鲜固废，界面最大水平位移出现在坡肩前部边坡下方。新老堆体界面最大水平位移随着坡比增加和龄期减小而增加。图 10(b)中可以看出，有垃圾坝的堆体，界面水平位移略大于无垃圾坝的堆体，且界面上各处水平位移差值更大。这同样与垃圾坝相对高度变小有关，垃圾坝限制了老堆体底部的水平位移，使得堆体背坡处的位移减小，而对于老堆体顶部靠近坡肩处的位移限制较小，因而增大了老堆体界面水位平移的差异。但是对于无垃圾坝的堆体界面，发生最大水平位移的区域更大。故进行竖向扩建时，应根据垃圾坝高度合理设计坡比和填埋区域。



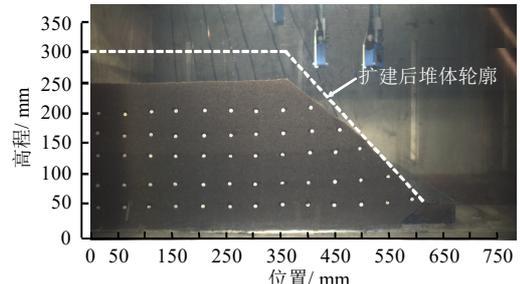
(a) 老堆体为部分降解固废



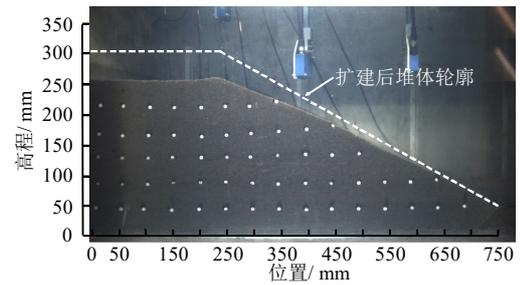
(b) 老堆体为新鲜固废

图 10 新老填埋堆体界面水平位移

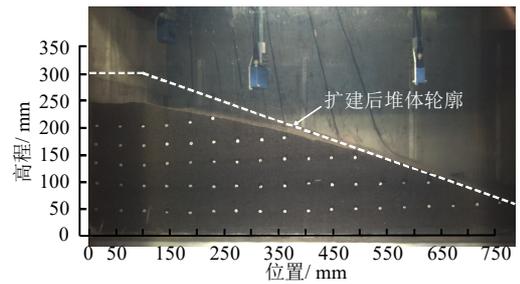
Fig.10 Horizontal displacements of interface between old landfill and new landfill



(a) Test 2



(b) Test 5



(c) Test 8

图 11 扩建后堆体沉降图(单位: mm)

Fig.11 Landfill settlement after expansion (unit: mm)

4 结论与建议

(1)老填埋堆体沉降随着固废龄期增大而减小,且与初始填埋高度成正比。垃圾坝的存在使老填埋堆体的沉降量减小。边坡坡比越小,龄期和垃圾坝对堆体沉降的影响越大。

(2)扩建后,堆体最大总沉降达到了堆体高度的19%,且随固废龄期增大而减小,垃圾坝对堆体总沉降的影响很小。老填埋堆体在扩建堆体自重应力作用下会发生明显的水平变形,导致坡面鼓出。

(3)扩建堆体作用下,新老填埋堆体交界面的最大沉降随老填埋堆体的龄期增大而减小。界面水平位移最大值出现在扩建堆体坡肩附近,随着坡比增加和龄期减小而增加。

(4)垃圾坝对堆体沉降变形的影响与其相对高度有关。扩建前,垃圾坝可有效降低老堆体的沉降量;扩建后,垃圾坝对堆体总沉降的影响不明显,当堆体相对高度超出一定值时,垃圾坝对堆体总沉降的影响可以忽略。同时,垃圾坝的存在,使得扩建后新老堆体界面各处的水平位移差异更大。

进行填埋场扩建设计时,应让老填埋堆体充分降解,并根据垃圾坝的相对高度选取合适的边坡坡比和填埋区域。

参 考 文 献

- [1] QIAN X D, KOERNER R M, GRAY D H. Geotechnical aspects of landfill design and construction[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 2002.
- [2] BJARNGARD A B, EDGERS L. Settlement of municipal solid waste landfills[C]//Proceedings of the 13th Annual Madison Waste Conference. Wisconsin: University of Wisconsin, 1990, 192—205.
- [3] ZORNBERG J G, JERNIGAN B L, SANGLERAT T R, et al. Retention of free liquids in landfills undergoing vertical expansion[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 1999, 125(7): 583—594.
- [4] SOWERS G F. Settlement of waste disposal fills[C]//Proceedings of 8th International Conference of Soil Mechanical and Found Engineering. Moscow: [s. n.], 1973.
- [5] YEN B C, SCANLON B. Sanitary landfill settlement rates[J]. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 1975, 101(5): 475—487.
- [6] EDIL T B, RANGUETTE V J, WUELLNER W W. Settlement of municipal refuse[M]. Philadelphia: American Society of Testing and Materials, 1990.
- [7] LING H I, LESHCHINSKY D, MOHRI Y. Estimation of municipal solid waste landfill settlement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1998, 124(1): 21—28.
- [8] ZHAO Y C, CHEN Z G. Monitoring and long-term prediction of refuse compositions and settlement in large-scale landfill[J]. *Waste Management and Research*, 2001, 19(2): 160—168.
- [9] LIU J Y, XU D M, ZHAO Y C. Long-term monitoring and prediction for settlement and composition of refuse in Shanghai Laogang municipal landfill[J]. *Environmental Management*, 2004, 34(3): 441—448.
- [10] CHEN Y M, KE H, FREDLUND D G, et al. Secondary compression of municipal solid wastes and a compression model for predicting settlement of municipal solid waste landfills[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(5): 706—717.
- [11] 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. Analysis and calculation of settlement of municipal solid waste landfill[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2001, 34(6): 88—92.
- [12] 张振营, 陈云敏. 固体废弃物压缩特性及填埋场沉降研究[J]. *岩土工程学报*, 2005, 27(1): 116—120.
ZHANG Zhen-ying, CHEN Yun-min. Study on compressibility and settlement of landfill with municipal solid waste[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(1): 116—120.
- [13] 孔宪京, 孙秀丽. 城市固体废弃物沉降模型研究现状及进展[J]. *大连理工大学学报*, 2006, 46(4): 615—622.
KONG Xian-jing, SUN Xiu-li. Research and development on settlement model of municipal solid waste[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2006, 46(4): 615—622.
- [14] THUSYANTHAN N I, MADABHUSHI S P G, SINGH S. Centrifuge modeling of solid waste landfill systems-part 1: development of a model municipal solid waste[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2006, 29(3): 217—222.
- [15] CHEN Y M, ZHAN L T, WEI H Y, et al. Aging and compressibility of municipal solid wastes[J]. *Waste Management*, 2009, 29(1): 86—95.