

生活垃圾填埋过程中的沉降分析与计算

谢 强^{1,2}, 张永兴¹, 张建华¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 里斯本理工大学 岩土工程中心, 里斯本 1049-001, 葡萄牙)

摘 要: 结合生活垃圾 PTH 蠕变方程式中的相关参数, 依据重庆市长生桥垃圾卫生填埋场的填埋工艺和填埋方案, 得出填埋历程与填埋高度的关系曲线。通过与土压缩理论计算方法相比较发现, 土压缩理论中参数选取主要以经验为主, 假设条件也与实际情况不符, 而 PTH 蠕变模型中各参数均可由室内压缩蠕变试验得出, 依据充分。计算表明, 重庆市长生桥垃圾卫生填埋场在填埋过程中产生的沉降达 25.72%, 在容量估算中如果忽略这一数据则会对填埋场的经济性分析产生一定影响。

关 键 词: 生活垃圾; 卫生填埋场; 沉降; 蠕变; 土压缩理论

中图分类号: TU 441; X 705

文献标识码: A

Analysis and calculation of municipal solid waste settlement during landfilling

XIE Qiang^{1,2}, ZHANG Yong-xing¹, ZHANG Jian-hua¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Centro de Geotecnia, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisbon 1049-001, Portugal)

Abstract: Focus on settlement analysis and calculation of municipal solid waste (MSW) during landfilling. After discussing parameters of PTH creep model of MSW, relation curves between landfilling course and MSW landfill's height are obtained with the creep equation, based on landfilling process and landfilling program of Chongqing Changshengqiao sanitary landfill. Comparing with the method of soil consolidation theory, it is found that parameters selection still lies on experiences in the method of soil consolidation theory; and its hypothesis is not accordance with the practical situation. While all parameters in PTH creep equation can be acquired on an adequate basis by creep compressive test indoor. The results by PTH creep equation indicate that the total settlement of 25.7% occurs during landfilling in Chongqing Changshengqiao waste sanitary landfill. Economic analysis will lead to a wrong conclusion if this datum is ignored while estimating the capability of landfills.

Key words: municipal solid waste (MSW); sanitary landfill; settlement; creep; soil consolidation theory

1 引 言

生活垃圾卫生填埋场的沉降问题是填埋法所涉及的主要岩土工程问题之一^[1-4], 也是目前针对卫生填埋场的一项应用性基础研究。进行生活垃圾填埋场沉降特性研究的意义主要体现在^[2, 5]: ①估算场地最终填埋容量, 为合理地组织填埋作业和竖向扩容设计^[6]提供依据, 从而达到少占地的目的; ②为填埋场保护系统的设计和维护提供依据; ③为填埋场的场地再利用提供依据。

20 世纪 40 年代, 随着卫生填埋法的广泛开展, 研究人员开始了对垃圾填埋场沉降特性的研究。前期的研究发现以下规律, 并达成共识^[7]: ①大部分

沉降迅速发生; ②紧密填埋可以减小总沉降量; ③生活垃圾在荷载作用下的沉降量随着埋龄和埋深而减小。

从宏观表现上讲, 垃圾填埋场的沉降是一个应力和时间的双重函数^[8], 从微观上讲, 垃圾填埋场的沉降则是一个复杂的物理化学和生化降解的过程^[9]。考虑到生活垃圾的组分总是千差万别的, 再加上其生物降解过程受外界影响较大, 从微观的角度研究垃圾填埋场的沉降具有相当大的难度, 因此, 针对生活垃圾沉降特性的研究大都从宏观的角度出发进行研究^[5, 10-20]。

目前, 填埋场沉降特性的研究主要有以下几种理论或方法: 传统的土压缩理论^[7, 21]; 生物降解模

型^[22]；经验公式，包括 Yen 和 Scanlon 于 1975 年推导的对数经验公式^[23]，Edil 等 1990 年推导的乘幂公式^[24]，Tan 等 1991 年推导的双曲线公式^[25]，线性回归方程^[10, 26-27]等。但到目前为止还没有建立较为完善的描述填埋场沉降特性的合理模型和理论，或者说合理的模型和理论还没有被大家所普遍接受^[7]。

在文献[28]中，作者以分别加载的方式对以重庆市城市生活垃圾典型组分为依据配制的垃圾试样进行了不同应力水平下的室内压缩蠕变试验，根据蠕变元件的基本性质和试验过程中试样反映出的变形特征，推导出 HK 和 PTH 两种蠕变方程式，并总结得出了蠕变模型的基本参数。本文将依据重庆市长生桥垃圾卫生填埋场的填埋工艺和填埋方案，进一步讨论利用 PTH 蠕变方程式计算卫生填埋场在填埋过程中的沉降计算过程，比较与利用传统土压缩理论计算的优劣，进而验证利用蠕变理论计算填埋场沉降的可行性和合理性。

2 沉降计算方法

2.1 土压缩理论

Sowers^[10]通过分析从一些大规模填埋试验槽中测取的现场沉降数据，提出这种估算填埋沉降量的方法，在近几年中，这种方法已经被其他研究人员改进了^[7]。该理论认为，生活垃圾填埋场的沉降包括主压缩沉降和长历时的次压缩沉降。总沉降量可表示成：

$$\Delta H = \Delta H_c + \Delta H_a \quad (1)$$

式中： $\Delta H_c = C_c \frac{H_0}{1+e_0} \log \frac{\sigma_i}{\sigma_0}$ 或 $\Delta H_c = C'_c H_0 \log \frac{\sigma_i}{\sigma_0}$ ；

$\Delta H_a = C_a \frac{H_0}{1+e_0} \log \frac{t_2}{t_1}$ 或 $\Delta H_a = C'_a H_0 \log \frac{t_2}{t_1}$ 或 $\Delta H_a = C_a H_p \log \frac{t_2}{t_1}$ 。

式中： ΔH 为总沉降量 (m)； ΔH_c 为主压缩沉降量 (m)； ΔH_a 为长历时次压缩沉降量 (m)； H_0 为产生沉降前垃圾层的初始厚度 (m)； H_p 为主压缩完成后垃圾层的厚度 (m)， $H_p = H_0 / (1+e_0)$ 。 e_0 为产生沉降前垃圾层的初始孔隙比； C_c 为主压缩指数； C'_c 为修正的主压缩指数，常取 $C'_c = 0.17 \sim 0.36$ ； C_a 为次压缩指数； C'_a 为修正的次压缩指数，常取 $C'_a = 0.03 \sim 0.1$ ； σ_0 为垃圾层受到的前期压力，亦即压实压力； σ_i 为垃圾层中间受到的总覆盖应力 (kPa)； t_1 为次压缩开始的时间，可取 $t_1 = 1$ 个月； t_2 为次压缩完成的时间。

根据目前一般生活垃圾填埋时的压实效应，该方法通常假设垃圾铺填时碾压设备作用于新铺填埋层上的前期压实应力为 48 kPa^[7]，即 $\sigma_0 = 48$ kPa。换句话说，假设新铺填的垃圾层由于碾压引起的超固结效应在法向应力低于 48 kPa 时是不会产生压缩的。因此，利用该方法计算填埋场沉降时的主要控制参数为压缩指数 C'_c 、 C'_a 或 C_c 、 C_a ，压缩指数的选取曾在多个文献中讨论过，但由于没有针对生活垃圾的标准固结试验方法，压缩指数的选取仍然主要依据经验和现场数据。

主压缩指数 C_c 的数值可根据垃圾层的初始孔隙比 e_0 和有机物的含量由图 1 查得，次压缩指数 C_a 的数值可根据垃圾层的初始孔隙比和降解条件由图 2 选取。

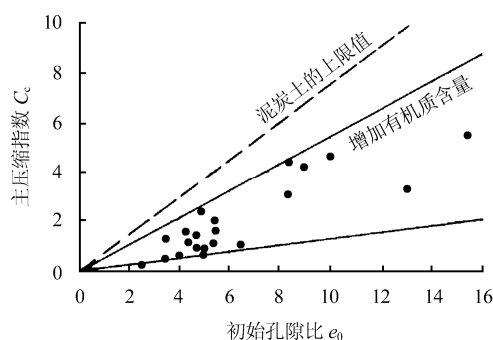


图 1 生活垃圾的压缩性^[10]

Fig.1 Compressibility of MSW^[10]

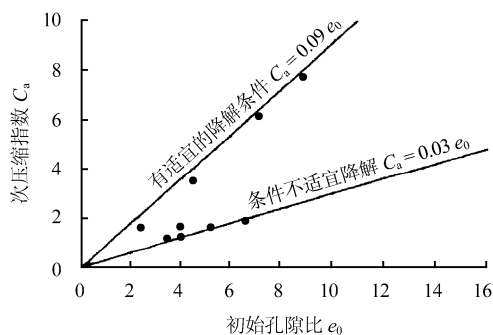


图 2 生活垃圾的次压缩性^[10]

Fig.2 Secondary compression of MSW^[10]

2.2 基于 PTH 模型的沉降计算方法

在文献[28]中笔者曾讨论过城市生活垃圾的 PTH 蠕变模型，表达式如下：

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp \left(-\frac{E_1 E_2 t}{(E_1 + E_2) \eta} \right) + \frac{\sigma_0}{E_1} \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{E_1 E_2 t}{(E_1 + E_2) \eta} \right] \right\} \quad (2)$$

式中参数意义详见文献[28]。需要说明的是, σ_0 与 E_1 和 E_2 并不是线性关系, 但根据对重庆市城市生活垃圾进行的不同应力水平下的室内压缩蠕变试验数据表明, σ_0 与 ε_0 、 ε_{end} 和 η 的线性关系比较明显, 如图 3~5 所示^[5]。

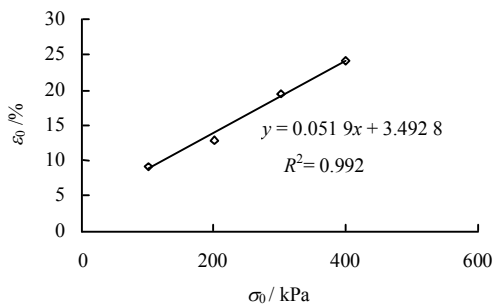


图3 应力 σ_0 与瞬时应变 ε_0 关系曲线

Fig.3 Relation curve between vertical stress σ_0 and instantaneous strain ε_0

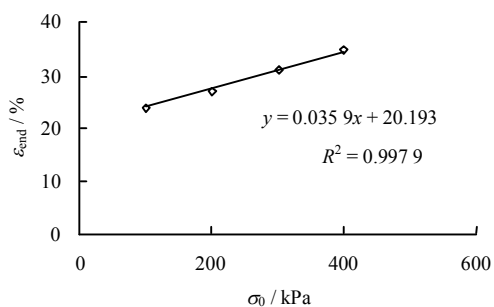


图4 应力 σ_0 与 ε_{end} 关系曲线

Fig.4 Relation curve between vertical stress σ_0 and final strain ε_{end}

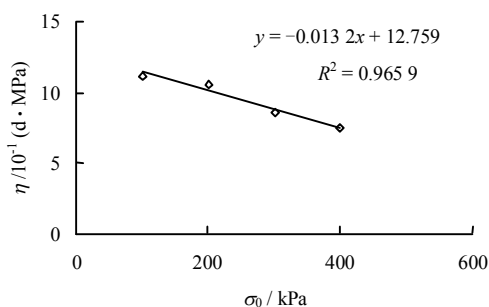


图5 应力 σ_0 与 η 值关系曲线

Fig.5 Relation curve between vertical stress σ_0 and coefficient of viscosity η

根据曲线拟合结果, 令

$$\varepsilon_0 = a\sigma_0 + b; \varepsilon_{\text{end}} = c\sigma_0 + d; \eta = p\sigma_0 + q \quad (3)$$

再利用试验数据和 PTH 模型参数的定义, 可分别求出模型中的 E_1 和 E_2 两个参数:

$$\text{当 } t \rightarrow \infty \text{ 时, } \varepsilon_{\text{end}} = \frac{\sigma_0}{E_1} \Rightarrow E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_{\text{end}}} \quad (4)$$

$$\text{当 } t = 0 \text{ 时, } \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_1 + E_2} \Rightarrow E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} - E_1 \quad (5)$$

将式 (3) 带入式 (2) 中即得:

$$\varepsilon = ((a-c)\sigma_0 + b-d) \cdot \exp\left(-\frac{[(c-a)\sigma_0 + (d-b)]\sigma_0 t}{(c\sigma_0 + d)(c\sigma_0 + d)(p\sigma_0 + q)}\right) + c\sigma_0 + d \quad (6)$$

式中: a 、 b 、 c 、 d 、 p 、 q 均为试验参数, 对于重庆市城市生活垃圾, 具体数值如图 3~5。

3 工程实例

3.1 工程概况

2000 年 10 月, 重庆市利用世界银行贷款的重庆城区长生桥垃圾卫生填埋场工程可行性研究报告获得国家计委发文批准^[29]。建成后的长生桥垃圾填埋场是重庆市有史以来的第一座现代化生活垃圾卫生填埋场。该场占地 691 333.3 m², 其中生产作业区 545 333.3 m², 有效填埋库容约 1 161×10⁴ m³, 填埋高度大于 37 m, 设计日处理垃圾量 1 500~2 000 t/d, 填埋压实后垃圾密度为 0.8~1.0×10³ kg/m³, 使用年限 20 年以上。

3.2 计算条件

垃圾填埋单元按水平推进填埋, 如图 6 所示。

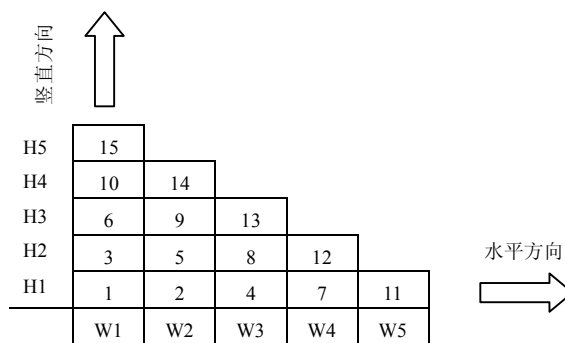


图6 生活垃圾填埋进程

Fig.6 Landfilling course

图 6 中框内数字表示该填筑单元对应的填埋时间段, 例如“3”表示该单元在第 3 个时间段填筑而成。W1~W5 表示填筑单元宽度, W1→W5 为水平推进方向; H1~H5 表示填筑单元高度, H1→H5 为竖直推进方向。根据工程实际, W1=W2=...=W5=15 m, H1=H2=...=H5=2.65 m (含覆土层高度 0.15 m)。

长生桥垃圾卫生填埋场一旦正常运营后, 按上述方式推进填埋, 则达到设计平均高度 37 m 共需垃圾层 37/2.65 = 14 层。预计在过了 105 个时间段

后,“W1”所在列的垃圾填筑单元最先达到,该列填筑单元间隔时间为 2、3、4、5、6 个时间段……;“W2”所在列的垃圾填筑单元随后达到 37 m 高度,该列填筑单元间隔时间为 3、4、5、6、7 个时间段……以此类推。因此,只要得出“W1”所在列的垃圾填筑单元沉降随填筑时间的变化,即可总结得出整个填埋场在填埋过程中的沉降规律。

假定长生桥卫生填埋场延纵深方向填筑 1 个月(即 30 d, 30 个单元)再分别向水平和垂直方向推进,则每一填筑时间段就代表 1 个月,W1 所在列的垃圾填筑顺序如表 1 所示。表中 A_i 表示每层垃圾(含覆盖层)的填筑高度,根据长生桥设计资料:

$$A_i = 2.65 \text{ m}; B_i = \sum A_i, (i=1 \sim 14)$$

表 1 垃圾填埋记录
Table 1 Records of landfilling

填埋次序 (从下到上)	时间历程	垃圾填埋高度 A_i/m	累计高度 B_i/m
第 1 层	第 1 个月	2.65	2.65
第 2 层	第 3 个月	2.65	5.30
第 3 层	第 6 个月	2.65	7.95
第 4 层	第 10 个月	2.65	10.6
第 5 层	第 15 个月	2.65	13.25
第 6 层	第 21 个月	2.65	15.90
第 7 层	第 28 个月	2.65	18.55
第 8 层	第 36 个月	2.65	21.20
第 9 层	第 45 个月	2.65	23.85
第 10 层	第 55 个月	2.65	26.50
第 11 层	第 66 个月	2.65	29.15
第 12 层	第 78 个月	2.65	31.80
第 13 层	第 91 个月	2.65	34.45
第 14 层	第 105 个月	2.65	37.10

3.3 利用传统的土压缩理论计算

根据室内试验测试结果,重庆市生活垃圾孔隙比约为 3^[28-29]。长生桥卫生填埋场沿纵深方向填筑 1 个月后再分别向水平方向和竖直方向推进,即每层垃圾至少 1 个月后才会有上层垃圾填筑,场内生活垃圾具备适宜的降解条件,取

$$C_a = 0.09e_0$$

$$\text{则 } C'_a = \frac{C_a}{1+e_0} = \frac{0.09e_0}{(1+e_0)} = 0.0675.$$

同样,根据图 1 可以查得主压缩指数 C_c 或修正主压缩指数 C'_c ,但图 1 中 C_c 值在一个较大的范围内变动,其取值的随意性较大。在本文的讨论中,

为了从数量上与 PTH 模型的计算结果有一个较为直观地比较,作者根据土压缩理论基本公式编制了一个小程序用于反算 C'_c ,程序中假定由该方法求的最大沉降量与 PTH 蠕变方程式求得值相等,即 $\Delta H = 37.1 - 27.558 = 9.542 \text{ m}$ 。程序反算结果为 $C'_c = 0.326$,介于经验取值 0.17~0.36 之间。

取垃圾压实后的重度 $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$,垃圾的初始压力 $\sigma_0 = 48 \text{ kPa}$,按如下步骤进行垃圾填埋场的沉降计算:

- (1) 计算每一垃圾层中点的高度 H_i ;
- (2) 计算作用于每一垃圾层中点的总上覆压力 σ_i ;
- (3) 计算各垃圾层的压缩量 ΔH_i ;
- (4) 计算 105 个月后填埋场的总沉降量 ΔH ;
- (5) 计算每一垃圾层填埋结束后填埋场的实际高度。

最终得出各层垃圾受上层垃圾压力影响产生的沉降计算结果如表 2。

3.4 利用 PTH 蠕变方程式计算

同样,假设垃圾压实后的容重 $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$,根据表 1 和式(4)可以计算出填埋进程中各垃圾层填埋结束后填埋场的实际高度,计算结果如图 7。

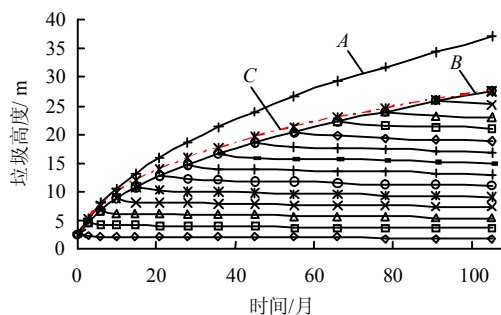


图 7 填埋历程与填筑高度的关系曲线

Fig.7 Relation curves between landfilling course and MSW landfill's height

图 7 中曲线 A 表示垃圾层未发生沉降时的理论填筑曲线,曲线 B 表示垃圾层沉降时由 PTH 蠕变模型计算所得的填筑曲线,C 表示垃圾层沉降时由土压缩理论计算所得的填筑曲线,曲线 A 分别与曲线 B 或曲线 C 在某一时刻之差代表了填筑进行至该时刻时的沉降量。其余各曲线分别表示各垃圾层高度随填埋时间的变化曲线。

由图可以看出,填筑于最底层的垃圾压缩量最大,达 $(2.65 - 1.775)/2.65 = 33.0\%$;最顶层垃圾的沉降量最小,为 $[2.65 - (27.557 - 25.036)]/2.65 = 4.83\%$ 。

表 2 每一垃圾层填埋结束后填埋场的实际高度(土压缩理论计算结果 /m)
Table 2 Results based on soil consolidation theory (m)

层	时间/月													
	1	3	6	10	15	21	28	36	45	55	66	78	91	105
1	2.650	2.565	2.390	2.224	2.098	1.997	1.912	1.839	1.774	1.717	1.665	1.618	1.575	1.535
2		5.215	4.955	4.614	4.322	4.095	3.909	3.750	3.613	3.491	3.382	3.283	3.193	3.110
3			7.605	7.179	6.712	6.319	6.007	5.747	5.525	5.330	5.156	5.000	4.858	4.728
4				9.829	9.277	8.709	8.231	7.845	7.521	7.241	6.995	6.774	6.575	6.393
5					11.927	11.274	10.621	10.069	9.619	9.238	8.907	8.613	8.349	8.110
6						13.924	13.185	12.459	11.843	11.336	10.903	10.525	10.188	9.884
7							15.835	15.024	14.233	13.560	13.002	12.522	12.100	11.723
8								17.674	16.798	15.950	15.226	14.620	14.096	13.634
9									19.448	18.515	17.616	16.844	16.195	15.631
10										21.165	20.180	19.234	18.419	17.729
11											22.830	21.798	20.808	19.953
12												24.448	23.373	22.343
13													26.023	24.908
14														27.558

由土压缩理论计算得出填筑于最底层的垃圾压缩量为 $(2.65 - 1.535) / 2.65 = 42.1\%$ ，大于由 PTH 模型的计算结果；而在土压缩理论计算中，因最上层垃圾 $\sigma_{14} = 13.25 < 48 \text{ kPa}$ ，其沉降量为 $2.65 - (27.558 - 24.908) = 0$ ，也就是说利用该理论计算时，如果没有继续填筑上层垃圾，顶层垃圾的沉降也始终不会发生，这显然与实际不符。

4 计算方法比较

PTH 蠕变方程式与传统的土固结理论计算结果的差异和计算方法的优劣在于：

(1) 利用 PTH 模型求解实际问题时需由室内试验测定 6 个参数 (即 a 、 b 、 c 、 d 、 p 、 q)，土压缩理论仅有 2 个参数，但此 2 个参数的确定目前仍以经验为主，取值的随意性较大；

(2) 土压缩理论用于垃圾填埋场的沉降计算时有 2 点假设：①假定垃圾层受到的前期压力为 $\sigma_0 = 48 \text{ kPa}$ ；②次压缩开始时间 $t_1 = 1$ 个月。众所周知，由于生活垃圾的组分和性质总是千差万别的，如果在计算中将 σ_0 和 t_1 视为某一定值，与实际不符。PTH 模型参数则完全来自室内试验数据，依据较充分，曲线能较好地反映出填埋场初期的变形。

(3) 土压缩理论中主压缩指数 C_c 或 C'_c 可以由 PTH 模型计算结果反算得出，2 种计算方式在一定程度上可以互补。

2 种计算方法均能直观地反映出填埋历程与填筑高度的关系，生产单位可以根据计算结果结合生活垃圾的产量调整填筑单元在水平方向或纵深方向推进速度。

5 结 论

(1) PTH 蠕变方程式尽管参数较多，但都来源于试验数据，依据比较充分；传统的土压缩理论中将垃圾层受到的前期压力和次压缩开始时间视为一定值，忽略了生活垃圾自身特性的差异性；

(2) 利用 PTH 蠕变方程式能较好地模拟填埋历程与填埋高度的关系，土压缩理论中的 2 个假设条件与实际情况不符，沉降曲线不能正确反映填埋初期垃圾场的沉降；

(3) 由 PTH 蠕变方程式计算所得的结果表明，填埋场填埋过程中产生的沉降可达 25.72%。尽管在实际填埋过程中人们通常不会注意到这些沉降变化，但若在容量估算或沉降分析中忽略这一数据则会造成很大的误差，影响填埋场的经济性分析。

参 考 文 献

- [1] 梅其岳, 吴世明. 填埋处置固体废弃物中环境岩土工程问题分析[J]. 中国人口、资源与环境, 1999, 9(4): 52—55.
MEI Qi-yue, WU Shi-ming. Some aspects of solid waste landfilling in geoenviroment[J]. China Population, Resources and Environment, 1999, 9(4): 52—55.
- [2] 谢强, 张永兴, 张建华. 生活垃圾卫生填埋场沉降特性研究的意义及现状[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(8): 119—122, 126.
XIE Qiang, ZHANG Yong-xing, ZHANG Jian-hua. Significance and present conditions of research on the settlement of MSW landfill[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Version), 2003, 26(8): 119—122, 126.

- [3] 刘毓毓, 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.
- [4] 张乾飞, 王艳明, 徐永福. 城市固体垃圾填埋场不均匀沉降分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 404—408.
ZHANG Qian-fei, WANG Yan-ming, XU Yong-fu. Differential settlement analysis of municipal solid waste landfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 404—408.
- [5] 谢强. 城市生活垃圾卫生填埋场沉降特性研究[博士学位论文 D]. 重庆大学, 2004.
- [6] 蔡洁, 霍凯成. 垃圾填埋场的设计[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(8): 46—49.
CAI Jie, HUO Kai-cheng. The design of a landfill site[J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2001, 23(8): 46—49.
- [7] 钱学德, 郭志平, 卢廷浩, 等. 现代卫生填埋场的设计与施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [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] 王罗春. 城市生活垃圾填埋场稳定化进程研究[博士学位论文 D]. 上海: 同济大学, 1999.
- [10] SOWERS G F. Settlement of waste disposal fills[C]//Proc. 8th Int. Conf. on Soil Mech. and Fdn. Engrg. Moscow: [s. n.], 1973: 207—210.
- [11] SPIKULA D R. Subsidence performance of landfills[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 1997, (15): 395—402.
- [12] MUTASEM EI-FADEL, HANA AI-RASHED. Settlement in municipal solid waste landfills: I. Field scale experiments[J]. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, 1998, 25(2): 89—98.
- [13] GOURC J P, THOMAS S, VUILLEMIN M. Proposal of a waste settlement survey methodology[C]//Environmental Geotechnics. Rotterdam: Balkema, 1998: 195—200.
- [14] LEONARD M L, FLOOM K J J. Estimating method and use of landfill settlement[J]. **Geotechnical Special Publication**, 2000, 105: 1—15.
- [15] LING H I, LESHCHINSKY D, MOHRI YOSHIYUKI, et al. Estimation of municipal solid waste landfill settlement[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1998, 124(1): 21—28.
- [16] EI-FADEL M, SHAZBAK S, SALIBY E, et al. Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications[J]. **Waste Management and Research**, 1999, 17(5): 347—368.
- [17] STULGIS R P, SOYDEMIR C, TELGENER R J. Predicting landfill settlement[J]. **Geotechnical Special Publication**, 1995, 46/2: 980—994.
- [18] ZIMMERMAN R E, CHEN W W H, FRANKLIN A G. Mathematical model for solid waste settlement[J]. **Instruments and Experimental Techniques**, ASCE, 1977, 13-15: 210—226.
- [19] EDGERS L, NOBLE J J, WILLIAMS E. A biologic model for long term settlement in landfills, environmental geotechnology[C]//Proceedings of Mediterranean Conference on Environmental Geotechnology. Rotterdam: A. A. Balkema, 1992: 177—184.
- [20] SIMPSON PICKETT TAIT. Laboratory analysis of sanitary landfill potential settlement[Ph. D]. New York: Rensselaer Polytechnic Institute, 1998, 373.
- [21] 钱学德, 郭志平. 城市固体废弃物 (MSW) 的工程性质[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 1—6.
QIAN Xue-de, GUO Zhi-ping. Engineering properties of municipal solid waste[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1998, 20(5): 1—6.
- [22] 柯翰. 城市固体废弃物填埋场的沉降、静力和动力稳定研究[博士学位论文 D]. 浙江大学, 2002.
- [23] YEN B C, SCANLON B. Sanitary landfill settlement rates[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, 1975, 101(5): 475—487.
- [24] EDIL T B, RANGUETTE V J, WUELLNER W W. Settlement of municipal refuse[J]. **ASTM Special Technical Publication**, 1990, 1070: 225—239.
- [25] TAN T S, INOUE T, LEE S L. Hyperbolic method for consolidation analysis[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, 1991, 117(11): 1723—1737.
- [26] CHEYNEY A C. Settlement of landfill[C]//Landfill Completion Symposium Proceedings. UK: Harwell, 1983: 13—29.
- [27] 温振统. 城市固体废弃物填埋场沉降及稳定分析[硕士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 1999.
- [28] 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, 40(10): 74—79.
XIE Qiang, ZHANG Yong-xing, ZHANG Jian-hua. Investigation on creep behavior of municipal solid waste in Chongqing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 40(10): 74—79.
- [29] 重庆大学环境工程设计研究所, 国家电力公司中南勘察设计院. 重庆城区长生桥卫生填埋场可行性研究报告[R]. [S. l.]: [s. n.], 1999.