

城市生活垃圾卫生填埋场沉降变形分析

王汉席^{1,2}, 刘勇², 徐建玲¹, 任贺², 杨森²

(1. 东北师范大学, 吉林 长春 130117; 2. 长春市海威市政工程设计有限公司, 吉林 长春 130062)

摘要:城市生活垃圾填埋场地基沉降和垃圾堆体沉降受到的影响因素多, 现行规范的计算方法直接采用与实际相差较大, 为减少不均匀沉降对垃圾防渗层的影响、准确确定垃圾储量和保证垃圾堆体的稳定, 开展垃圾填埋场沉降研究具有重要意义。垃圾填埋场沉降变形包括地基沉降和垃圾堆体沉降, 垃圾堆体沉降又分为主沉降和次沉降, 主沉降完成时间短于次沉降。通过对陕西省宝鸡市垃圾填埋场地基土进行沉降计算, 最大沉降差超过 100 mm, 对垃圾防渗层不利影响较大; 而对垃圾堆体沉降计算, 修正后的计算值与沉降观测值非常接近。考虑不同地区地层差异和垃圾成分差异, 积累沉降观测资料具有重要意义。

关键词:生活垃圾填埋场; 密实度; 沉降变形; 固结; 沉降观测; 防渗层

中图分类号: TU470.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)02-0073-05

Analysis on Settlement Deformation of Municipal Solid Waste Sanitary Landfill Site/WANG Han-xi^{1,2}, LIU Yong², XU Jian-ling¹, REN He², YANG Miao² (1. Northeast Normal University, Changchun Jilin 130117, China; 2. Changchun Haiwei Civil Works Design Co., Ltd., Changchun Jilin 130062, China)

Abstract: There are many factors that affect the settlement of the landfill site foundation and the MSW body, great difference exists between direct use of the calculation method of the current standard and the actual actual practice. In order to reduce the influence of uneven settlement on the impermeable layer of landfill, determine the refuse storage and ensure the stability of the garbage heap, it is necessary to make research on settlement of MSW landfill site. The settlement of the landfill site includes the settlement of foundation and the settlement of MSW, and the latter is divided into main settlement and the second settlement, the main settlement time is shorter than the secondary one. Through the settlement calculation of the foundation soil of a landfill site in Baoji City, the maximum settlement difference is more than 100mm, which has a great adverse effect on impermeable layer of landfill site, and for the calculation of the settlement of MSW body, the modified calculation value is very close to the observed value of settlement. Considering the difference of the regions and the garbage composition, the accumulation of observed data is of great significance.

Key words: MSW landfill site; compactness; settlement deformation; consolidation; settlement observation; impermeable layer

0 引言

城市垃圾卫生填埋场沉降主要包括填埋垃圾的沉降和地基的沉降 2 部分。地基的沉降分析计算是保证工程安全和控制工程造价的必要条件。而垃圾堆体的沉降分析成为计算垃圾填埋场储量和保证垃圾堆体稳定的重要依据。由于填埋垃圾沉降影响因素较多, 沉降的主要机理为: 物理压缩、错动、物理化学变化和生化分解等, 准确计算非常困难^[1-3]。将经典土力学理论和有限元 2 种方法对比分析, 结果表明, 传统方法经典土力学理论计算值较有限元方法偏大^[4]。采用单向压剪非线性模型, 应用地基沉降分析软件(SFIA)进行整体验算, 分析结果直观,

能反映整体沉降情况^[5]。现行规范对沉降的计算方法分别采用分层总和法和一维固结沉降理论, 虽然来自于很多项目的总结, 但是由于经验系数的选取受人为影响因素较大, 计算结果和沉降观测结果存在较大的差异, 尚需进一步研究^[6-7]。本文以宝鸡市山谷型垃圾填埋场为例开展研究, 该垃圾填埋场厂址处呈 V 字形, 顶宽 326 m, 底宽 45.5 m, 沟深 55~76 m。考虑该填埋场投入运营后, 垃圾填埋体平均厚约 65 m, 对地基要求高, 同时垃圾堆体沉降大, 沉降计算复杂, 开展前期设计计算和后期观测沉降对比分析, 探讨沉降计算方法具有重要意义。

收稿日期: 2015-09-09; 修回日期: 2015-12-14

作者简介: 王汉席, 男, 汉族, 1978 年生, 公司副总工程师, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 硕士, 长期从事土木工程设计和施工技术、环境污染修复与治理技术研究工作, 吉林省长春市西安大路 3888 号西安花园 1 栋 2 门 5 楼(130062), wanghanxizs1982@126.com。

通讯作者: 徐建玲, 女, 汉族, 1969 年生, 教授, 博士, 长期从事环境污染修复与治理, 固体废物处理研究工作, 吉林省长春市人民大街(130024), xujl@foxmail.com。

1 垃圾密实度分析

1.1 影响垃圾密实度的因素

影响垃圾密实度的因素很多,主要和垃圾的成分有关系,而垃圾的成分并不是稳定的,它和一个城市的消费水平、经济发展以及人口素质有直接的关系。对杭州天子岭垃圾填埋场进行实测,得出垃圾的重力密度随深度的增大而增加的结论^[8]。总体上,垃圾的重力密度变化复杂,但干密度随深度变化^[9]。经统计分析,垃圾的重力密度范围较大,多在 7.0 ~ 11.0 kN/m³ 之间。

1.2 垃圾压缩过程及沉降规律

对于城市生活垃圾,在填埋场中的压缩是个不断变化的过程。随着填埋高度的增加,附加压力增大,垃圾不断地被压缩。当垃圾中的水分被排除后,密实度增加。垃圾的压缩过程是需要很长时间才能够完成,垃圾的沉降也是一个过程,在垃圾填埋过程中,垃圾不断沉降,填埋完成后封场,沉降还要持续一段时间。垃圾从填埋到完全沉降稳定,其总沉降分为瞬时沉降、初期压缩沉降和次压缩沉降。从沉降规律来看,瞬时沉降和初期压缩沉降之和的数值较大,占总沉降的 60% 以上,称为主沉降;后期的次固结沉降占总沉降的比例较小,称为次沉降。

2 沉降变形计算方法分析

2.1 垃圾堆体变形分析

在设计时垃圾堆体沉降采用现行规范^[6],但是由于全国各地的垃圾性质各异,目前能收集的资料有限,很多参数的选择还尚无试验资料,只能靠经验,所以采用现行规范计算值与实际值仍存在较大偏差。

现行规范将垃圾堆体沉降分为主沉降和次沉降,与国外计算方法基本一致,计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n (S_{pi} + S_{si}) \quad (1)$$

$$S_{pi} = H_i \frac{C_c}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_0}\right) \quad (2)$$

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log\left(\frac{1000}{\sigma_0}\right)} \quad (3)$$

式中: S ——垃圾堆体压缩量, m; n ——垃圾分层总数; S_{pi} ——第 i 层垃圾的主压缩量, m; S_{si} ——第 i 层垃圾的次压缩量, m; H_i ——第 i 层垃圾填埋时的初始厚度, m; σ_0 ——垃圾前期固结压力, 无试验数据

时取 30 kPa; σ_i ——第 i 层垃圾所受上覆有效应力, kPa; C_c ——垃圾主压缩系数; e_1 ——在 1000 kPa 压力下垃圾孔隙比, 一般为 0.8 ~ 1.2; e_0 ——初始孔隙比。

根据钱学德^[1]等人的观点,估算沉降时,前期压实应力是改变的。钱学德等人建议垃圾前期固结压力取 48 kPa,而浙江大学陈云敏^[6]等人根据我国垃圾卫生填埋场的现状及多年研究结果,建议在无现场试验资料的情况下前期固结压力取 30 kPa,主要是考虑我国的垃圾填埋场填埋高度相对较低,多为 15 ~ 30 m 之间,国外的垃圾填埋场面积小,填埋高度较高。

次固结沉降采用应力-降解压缩模型或 Sowers 次压缩模型,采用应力-降解压缩模型手工计算比较麻烦,需采用计算机进行模拟,鉴于条件所限,故本次设计采用后者进行计算,计算公式如下:

$$S_{si} = H_i \frac{C_a}{1 + e_0} \log\left(\frac{t_i}{t_0}\right) \quad (4)$$

式中: C_a ——垃圾次压缩指数; t_0 ——垃圾主压缩完成时间,月; t_i ——第 i 层垃圾的填埋龄期,月。

垃圾堆体沉降计算公式:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad (5)$$

式中: ΔS ——垃圾堆体沉降, m; S_2 ——计算时刻下卧垃圾总压缩量,按式(1)计算, m; S_1 ——填埋至该点时下卧垃圾总压缩量,按式(1)计算, m。

填埋场的沉降对库容的影响较大,由于城市垃圾的沉降比天然地基土沉降大得多,且在填埋期就能产生很大的沉降量。在设计时利用类比调查法估算填埋区的储量,对于运营管理以及城市的规划都有一定的意义。

根据钱学德^[1]等人收集的相关资料,还有其它一些经验公式,如对数经验函数、幂函数、双曲线函数等,这些公式来源于工程经验总结,针对不同地区,要根据实际情况选用,同时做适当的调整。通过对 Holtz and Kovacs(1981 年)土力学压缩理论进行分析总结,应用于垃圾堆体沉降中^[10],公式如下:

$$Z_{total} = Z_i + Z_c + Z_s \quad (6)$$

式中: Z_{total} ——垃圾堆体总的沉降量, mm; Z_i ——垃圾堆体瞬时沉降量, mm; Z_c ——垃圾堆体固结沉降量, mm; Z_s ——垃圾堆体长期作用次沉降量, mm。

该方法将主沉降量分为瞬时沉降量和固结沉降量,主沉降为短时间内完成,而次沉降历时较长。影

响沉降的因素较多,其中孔隙度的变化就是影响垃圾填埋场沉降的一个主要因素,以多孔介质流——固结耦合理论为基础,采用 Galerkin 有限元法进行数值模拟,模拟孔隙度的线性变化和非线性变化是研究沉降的一个重要思路^[11]。垃圾降解后,孔隙度发生变化,排水条件和非排水条件是沉降变化的重要条件,排出孔隙中的水后,沉降会突然增加,因此渗滤液的收集和处理系统的设计也将影响到沉降的变化。

对于一些好氧垃圾填埋场,高温产生的温度应力,引起不均匀沉降。相关研究结果表明,这种应力较大,会引起管道和防渗垫层破裂^[12]。但是鉴于这种应力的变化范围较大,影响因素较多,目前尚无成熟的经验公式,有待进一步研究。

2.2 地基沉降变形分析

现行规范^[7]的计算公式如下:

$$S = \psi_s S' = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (Z_i \bar{\alpha}_i - Z_{i-1} \bar{\alpha}_{i-1}) \quad (7)$$

式中: S ——地基最终变形量, mm; S' ——按分层总和法计算出的地基变形量, mm; ψ_s ——沉降计算经验系数; n ——地基变形计算深度范围内所划分的土层数; p_0 ——相应作用的准永久组合时基础底面处的附加压力, kPa; E_{si} ——基础底面下第 i 层土的压缩模量, 应取土的自重压力至土的自重压力与附加压力之和的压力段计算, MPa; Z_i 、 Z_{i-1} ——基础底面至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离, m; $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{i-1}$ ——基础底面计算点至第 i 层土、第 $i-1$ 层土底面范围内平均附加应力系数。

为简化计算工作量,同时满足工程要求的情况下,上述现行规范^[7]计算地基变形的最大计算深度 Z_n 应符合一定的要求。结合规范要求,其计算深度 Z_n 符合下列规定:

$$\Delta S_0' \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta S_i' \quad (8)$$

式中: $\Delta S_0'$ ——在计算深度范围内,第 i 层土的计算变形值, mm; $\Delta S_i'$ ——从计算深度向上取厚度为 ΔZ 的土层计算变形值, mm。

该计算公式来自于若干工程的经验总结,经过很多的项目验证,有其合理性,但因全国地层差异大,有些项目应用该公式还是有一定的偏差。另外对于沉降计算经验系数的选取,要结合各地的地层特征进行计算选择,并需要对地层条件有充分的了解。

3 沉降变形计算分析

垃圾填埋场的沉降包括地基变形沉降和垃圾堆体沉降,对于一般的垃圾填埋场项目,垃圾堆体沉降是主流,而针对本项目,由于垃圾堆体较高,对地基产生的附加荷载较大,地基沉降差大,因此,地基沉降也是不可忽略的一项。采用合理的方法进行计算,使计算结果与工程实际误差在允许的范围,同时考虑影响因素,对计算结果进行修正,将是研究的重点。

3.1 地基变形计算

根据岩土工程勘测报告土工试验结果,分层计算地基的沉降量,地层参数见表 1。通过认真分析,针对本项目,首先采用现行规范公式进行计算,根据勘测钻孔位置的地层情况进行计算,计算结果沉降量为 28.7 ~ 157.6 mm,具体见图 1。从地层情况看,该场地整体地质条件较好,采用规范公式进行计算之后,对计算的沉降量数值进行修正,修正系数宜为 1.05 ~ 1.18 之间,沉降量小的取大值,沉降量大的取小值。考虑到分析方便,计算分析过程暂不对计算的数据进行修正,地基变形重点考虑的是沉降的差异性,地基的不均匀沉降。

表 1 土层参数

层号	地层性质	重力密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	平均层 厚/m	压缩模 量/MPa
①	粉质粘土(可塑)	19.7	6.7	4.5
②	淤泥质粉质粘土(软塑—流塑)	19.3	8.2	3.6
③	粉质粘土(可塑—软塑)	19.5	4.5	4.2
④	黄土状粉质粘土(可塑)	19.6	6.3	4.8
⑤	黄土(可塑—坚硬)	20.2	10.5	5.7

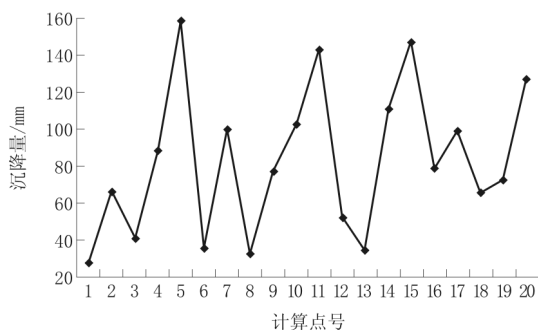


图 1 各计算点沉降量曲线

从选取的 20 个勘察钻孔资料计算结果看,垃圾填埋场堆体靠近边缘位置计算点沉降多在 20 ~ 40 mm 之间,垃圾堆体靠近中心位置的计算点沉降在 120 ~ 160 mm 之间。从计算点的沉降值来看,边缘区域和中心区域位置沉降差较大,最大值达到

128.9 mm。地基沉降较大的原因主要是填埋厚度的不均匀造成的,垃圾场边缘位置填埋厚度较薄,附加压力小,沉降量小;垃圾填埋场中间部位附加压力较大,该部位垃圾填埋厚度高达 72 m,垃圾重度按 8.5 kN/m³考虑,填埋场基底附加压力高达 612 kPa,计算基底土层最大沉降量高达 157.6 mm。如果按修正后考虑,最大沉降量高达 165.48 ~ 185.97 mm,接近 200 mm。对于山谷型填埋场,这样大的沉降量,极易引起防渗层的破坏。

从选取点计算结果看,沉降差较大,从现场情况分析,也是符合实际情况的。垃圾堆体的边缘和中心位置的附加压力差异,从填埋工艺的角度很难改变,所以只能解决沉降差异问题。根据规范要求,差异沉降是不能满足设计要求的,从工程的角度,采取对填埋中心位置进行地基处理,加固中心地基,减少中心位置的沉降。

3.2 垃圾堆体沉降计算

根据区域调研结果,垃圾重度均值按 8.5 kN/m³考虑,垃圾初始压力按 $\sigma_0 = 48$ kPa 考虑,修正后的主压缩指数 $C'_e = 0.22$,修正后的次压缩指数 $C'_\alpha = 0.08$,次压缩开始时间 $t_1 = 1$ 个月。垃圾填埋周期初步按 6 个月考虑,垃圾堆体分层厚度按设计时初步分析确定的 10 和 13 m 考虑。经过综合比较和分析,同时考虑现场的实际情况,笔者认为采用钱学德^[1]等人介绍的公式进行计算,比较符合实际情况。计算主要的参数见表 2。

表 2 垃圾填埋周期计算

时间 过程	垃圾堆填 高度 H/m	各层垃圾 中点深度/m	时间 过程	垃圾堆填 高度 H/m	各层垃圾 中点深度/m
1 个月	10	62	4 个月	13	32.5
2 个月	10	57	5 个月	13	19.5
3 个月	13	45.5	6 个月	13	6.5

详细计算过程如下:

作用于每一垃圾层中点的总的上覆压力:

$$\sigma_1 = \gamma_R H_1 = 8.5 \times 62 = 527 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_2 = \gamma_R H_2 = 8.5 \times 57 = 484.5 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_3 = \gamma_R H_3 = 8.5 \times 45.5 = 386.75 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_4 = \gamma_R H_4 = 8.5 \times 32.5 = 276.25 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_5 = \gamma_R H_5 = 8.5 \times 19.5 = 165.75 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_6 = \gamma_R H_6 = 8.5 \times 6.5 = 55.25 \text{ kN/m}^3$$

σ_6 与 48 kPa 接近,因此初始压力取值合理。

采用下列公式^[1]计算各垃圾层的压缩量:

$$\Delta H_{ci} = C'_e H_{0i} \log \frac{\sigma_i}{\sigma_0}$$

$$\Delta H_{\alpha i} = C'_\alpha H_{0i} \log \frac{t_2}{t_1}$$

$$\Delta H_i = \Delta H_{ci} + \Delta H_{\alpha i}$$

第一层: $\Delta H_{c1} = 2.289$ m; $\Delta H_{\alpha 1} = 0.592$ m; $\Delta H_1 = 2.881$ m。

第二层: $\Delta H_{c2} = 2.209$ m; $\Delta H_{\alpha 2} = 0.523$ m; $\Delta H_2 = 2.732$ m。

第三层: $\Delta H_{c3} = 2.592$ m; $\Delta H_{\alpha 3} = 0.566$ m; $\Delta H_3 = 3.158$ m。

第四层: $\Delta H_{c4} = 2.174$ m; $\Delta H_{\alpha 4} = 0.414$ m; $\Delta H_4 = 2.588$ m。

第五层: $\Delta H_{c5} = 1.539$ m; $\Delta H_{\alpha 5} = 0.183$ m; $\Delta H_5 = 1.722$ m。

第六层: $\Delta H_{c6} = 0.175$ m; $\Delta H_{\alpha 6} = 0$ m (因为小于 1 个月); $\Delta H_6 = 0.175$ m。

计算总的沉降量为(6 个月):

$$\begin{aligned} \Delta H_{\text{总}} &= \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 + \Delta H_4 + \Delta H_5 + \Delta H_6 \\ &= 2.881 + 2.732 + 3.158 + 2.588 + 1.722 + 0.175 \\ &= 13.256 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\Delta H_{\text{总}} / (\Delta H_0)_{\text{总}} \times 100\% = 13.256 / 72 \times 100\% = 18.4\%$$

从图 2 可以很直观地看出各层计算沉降量的变化情况,该垃圾堆体填埋较高,总的沉降量较大,计算总沉降量值为 13.256 m,总沉降量与总层厚之比为 18.4%。

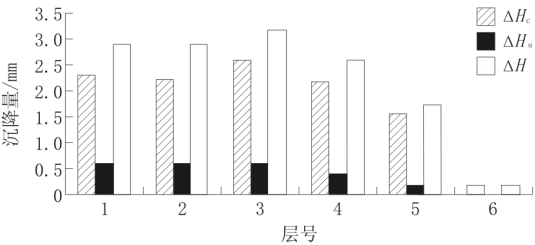


图 2 垃圾各层计算结果

以上计算考虑主沉降和次沉降,主沉降为瞬时压缩沉降和固结沉降,影响因素为垃圾的孔隙和主要成分,次沉降值较小,作用是长期的。在计算过程中,考虑地区垃圾堆体中无机物(灰土、煤渣等)含量相对较高的特点,该计算值应进行修正,修正系数采用前期堆填厚度 36 m 时持续 3 个月的沉降观测值与计算值之比,修正系数为 0.95;同时考虑本垃圾堆体填埋高度大,附加荷载大,堆体下部垃圾压缩程度高,实际沉降高于计算值,也应进行调整,按垃

垃圾堆填厚度 72 m 时持续 1 个月,72 m 深度点与 36 m 深度点沉降差的观测值与计算值之比为 1.26,修正系数为 $0.5 + 0.5 \times 1.26 = 1.13$ 。因此,针对本工程,垃圾堆体总体的修正系数为 $0.95 \times 1.13 = 1.074$ 。按此修正系数进行调整计算结果见表 3。修正前后各层总沉降量对照参见图 3,从图中可以看出沉降计算后是普遍增加的,整体变化趋势一致。总沉降量与总层厚之比为: $\Delta H_{\text{总}} / (\Delta H_0)_{\text{总}} \times 100\% = (14.238/72) \times 100\% = 19.78\%$ 。

表3 垃圾堆体修正后的计算结果

项目 层号	1	2	3	4	5	6	合计
H_c	2.458	2.372	2.784	2.335	1.653	0.188	11.790
H_a	0.636	0.562	0.608	0.445	0.197	0	2.448
ΔH	3.094	2.934	3.392	2.780	1.850	0.188	14.238

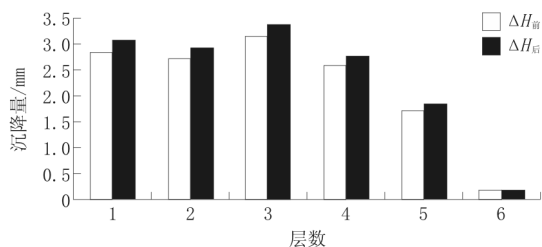


图3 垃圾各层计算结果修正前后对比

这个计算结果相对国外的一些垃圾填埋场平均沉降比 12% 偏大,分析其主要原因是:(1)垃圾堆体较高,最高达到 72 m,边坡安全等级为一级,是一般的垃圾填埋场填埋高度 20~40 m 的 2 倍;(2)我国垃圾分类收集程度低,垃圾堆体密实度低,相对国外的较松散,密实度离散性大。

通过现场沉降观测,并对沉降观测值进行统计分析,结果如下:范围值 11.65~15.85 m,平均值 12.97 m,标准差 2.89 m,变异系数 0.223,标准值 15.35 m。沉降观测结果的标准值与计算结果非常接近,相差 1.112 m,不足 8%,说明以上的修正是合理的。

垃圾堆体的沉降是在填埋开始阶段就发生的,而且随着填埋高度的增加,附加压力增加,沉降逐渐增加,沉降速率的变化是先慢后快,当达到一定阶段开始变慢,逐渐趋于稳定,待垃圾发酵,渗滤液排出,孔隙被压缩,又会出现一个大的沉降阶段。等到填埋后期,渗滤液逐渐减少,沉降趋于最终的稳定。垃圾堆体的这个变化过程一般经历时间较长,需要积累长期观测资料,同时展开对比研究,才能为以后的

设计计算积累经验。

4 结论

(1)对于垃圾堆体厚度较大(超过 50 m)的填埋场,既要考虑垃圾堆体的沉降稳定,又要考虑垃圾堆体对基底的压力影响,计算地基的沉降变形,分析对垃圾堆体底部防渗层的破坏影响。

(2)垃圾填埋场沉降变形包括地基沉降和垃圾堆体沉降,垃圾堆体沉降又分为主沉降和次沉降,其中主沉降分为瞬时沉降量和固结沉降量,能在短期内完成,而次沉降完成周期较长。

(3)通过对宝鸡市垃圾填埋场地基土进行沉降计算,结果表明,边缘区域和中心区域沉降差超过 100 mm,不均匀沉降影响防渗层结构的稳定,需进行地基处理。

(4)通过对垃圾堆体进行沉降变形计算,同时对计算结果进行修正,修正结果与沉降观测结果相比,非常接近,说明修正系数选取合理。

(5)考虑地基沉降和垃圾堆体沉降受到影响的因素较多,且沉降变化过程复杂,准确计算非常困难,因此,需要针对不同地区,积累沉降观测资料,为以后的项目设计提供依据。

参考文献:

- [1] 钱学德,施建勇,刘晓东. 现代卫生填埋场的设计与施工(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:367-405.
- [2] Sowers, G. F. Settlement of Waste Disposal Fills[C]. Proceedings of the 8th international Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow. 1973, 1:207-210.
- [3] 李颖,郭爱军. 城市生活垃圾卫生填埋场设计指南[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005:290-299.
- [4] 王磊,申婵. 垃圾填埋场沉降计算研究[J]. 山西建筑,2010,36(32):95-96.
- [5] 薛详,葛虹,乐园,等. 垃圾填埋场地基沉降计算分析及相关问题探讨[J]. 工程勘察,2008,(S2):13-16.
- [6] CJJ 176—2012,生活垃圾卫生填埋场岩土工程技术规范[S].
- [7] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [8] 朱向荣,王朝晖,方鹏飞,等. 杭州天子岭垃圾填埋场扩容可行性研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):281-285.
- [9] 张季如,陈超敏. 城市生活垃圾抗剪强度参数的测试与分析[J]. 岩土力学与工程学报,2003,22(1):110-114.
- [10] 潘志坤. 生活垃圾填埋场封场后不均匀沉降分析与预测[J]. 科技资讯,2009,(13):137.
- [11] 刘磊,梁冰,薛强,等. 考虑填埋场沉降和生物降解作用下的孔隙度仿真预测研究[J]. 岩土力学,2009,30(1):196-200.
- [12] 张玉杰,郝增韬,高恺恒. 好氧性垃圾填埋场的热变形分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2012,29(4):127-129.