

填埋场次压缩沉降的室内复合模型研究

廖智强 胡亚东 朱 宁

(河海大学岩土工程研究所 ,江苏 南京 210098)

摘要 :从有限应变理论假设出发 ,在 Kelvin 模型的基础上推导出填埋场室内应力压缩模型 .将该模型与简化的生物降解模型相结合可得到填埋场室内次压缩沉降模拟试验的复合模型 .该复合模型既考虑了应力沉降的机理 ,又考虑了有机质降解产生沉降的机理 ,在考虑合适参数的条件下 ,计算值与实测值较为符合 ,可以为填埋场次沉降计算提供依据 .

关键词 :次沉降 ;Kelvin 模型 ;应力压缩模型 ;生物降解

中图分类号 :X705 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2006)02-0193-04

填埋场封场后的沉降分为主压缩沉降、次压缩沉降及有机降解产生的沉降^[1]. Sowers^①用土力学中黏土主压缩及次压缩方程对其进行研究 ,但 Sowers 无法对有机质降解引起的沉降进行单独计算 ,因此他采用对主压缩指数及次压缩指数进行修正的方法来考虑这部分沉降 ,这种处理显然不太合理 .柯瀚等^[2]主要研究了封场后次压缩沉降 ,其中应力沉降采用了 Sowers 的公式 ,而且单独研究了有机质降解沉降 .Afonso 等^[3]提出了一个所谓的复合压缩模型 ,但该模型并未从机理方面进行研究 .彭功勋^[4]从力学机理层面提出了填埋场应力沉降公式 ,并将主压缩与次压缩作为一个总体过程来研究 .这虽然没有主次压缩时间点的区分 ,但容易混淆概念 ,而且还存在计算模型复杂、参数过多、研究难度大、难以应用等不足 .由此可见 ,填埋场的沉降研究还存在许多问题 .为此 ,本文结合彭功勋室内试验 ,对次压缩沉降进行单独研究 ,并从符合填埋场次沉降的 Kelvin 模型出发导出了应力公式 ,达到了既简化计算公式 ,又便于研究其规律的目的 ,在有机质降解导致的沉降方面 ,采用了简化的有机质降解沉降计算公式 ,从而得到了填埋场的室内次压缩沉降复合计算模型 .

1 室内试验介绍

彭功勋^[4]在室内模拟了封场后填埋场的次压缩沉降 ,进行了有机玻璃桶试验 .有机玻璃桶直径 0.3 m ,内部填入垃圾土 .在参考了国内外填埋场垃圾土成分后 ,选取一种较为典型的配比进行该垃圾土的人工配制 ,具体见表 1 .

表 1 垃圾土配比成分
Table 1 Constituents of MSW

成分	食物	纸	塑料	纺织品	木屑	玻璃 + 金属	泥
配比 / %	21	40	10	2	2	19	6

从表 1 可以看出 ,垃圾土中有机质成分占 75% ,无机质成分为 25% .配制时初始含水量控制为 50% ,共填入 5 层 ,净高度 1.54 m(图 1) .每填入一层后即进行预压 ,预压荷载为 9.5 kPa ,填入完成后最终荷载与预压荷载一致 ,亦为 9.5 kPa ,初始干密度为 0.383 g/cm³ .每天对桶内每层顶端的标志物进行读数 ,按照南京日降水量从上部对桶

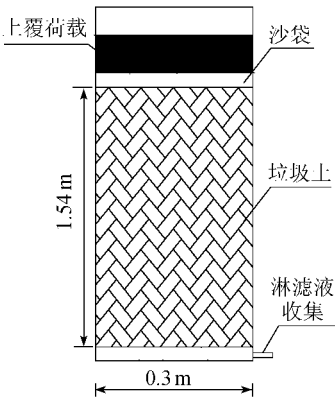


图 1 试验示意图
Fig.1 Sketch of experiment

收稿日期 2005-07-04
基金项目 :建设部攻关资助项目(2001-133)
作者简介 :廖智强(1977—) ,男 ,江西广昌人 ,博士研究生 ,主要从事环境岩土研究 .

① SOWERS G F. Settlement of waste disposal fills//Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Moscow. 1973 207-210.

内加水淋滤,从底部收集产出的淋滤液。

2 次压缩沉降室内复合计算模型推导

根据彭功勋^[4]试验的具体情况,在推导中采用以下的假设:

- a. 有限均质假设. 填埋场内垃圾土成分复杂,但本文试验中的垃圾土是人工配置的,相对于填埋场内的垃圾土来说较为均匀,因此每层的材料可认为是一致的,即具有各向同性性质。
- b. 无孔隙水应力假设. 由于试验中垃圾土的干密度较小,相应地渗透性较大(经试验得知其渗透系数 $> 10^{-3} \text{cm/s}$) ,因此不考虑孔隙水压力。
- c. 无耦合作用效应假设. 压缩与生物降解之间究竟有无耦合作用效应,其研究本身的难度极大,目前未见相关成果,因此本文认为无耦合作用效应。

2.1 “有限应变”理论^[5]

填埋场封场后的沉降很大,可以达到初始高度的 25% ~ 40% ,文献[4]试验沉降也达到原高度的 25% 左右,因此采用小应变假设是不合理的,需采用“有限应变”假设。同时考虑到试验桶中垃圾土只有垂直方向的位移,因此竖向应变方程为

$$\epsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (1)$$

式中: ϵ_z ——竖向应变; w ——竖向沉降值。

2.2 次压缩室内沉降方程的推导

彭功勋试验^[4]上部的荷载为在最顶层垃圾土上覆盖沙袋、加上砝码后所产生的荷载,因此不会随时间而变,即

$$\sigma_0(t) = \sigma_0$$

从沉降曲线来看,沉降随着时间的增加变形速率逐渐减小,最终趋近于 0,呈蠕变性状,而 Kelvin 模型将一个弹簧元件和一个黏性元件并联,能很好地反映材料的蠕变性能,因此基于 Kelvin 模型(图 2)进行研究是可行的。

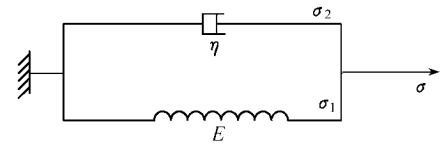


图 2 Kelvin 模型
Fig.2 Kelvin model

$$\text{各元件的本构式为} \quad \sigma_1 = E\epsilon_1 \quad \sigma_2 = \eta \dot{\epsilon}_2 \quad (2)$$

$$\text{总协调方程为} \quad \sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad \epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2 \quad (3)$$

$$\text{微分本构关系为} \quad \sigma = E\epsilon_1 + \eta \dot{\epsilon}_2 \quad \epsilon(0^+) = \epsilon_2(0^+) = 0 \quad (4)$$

式中: E ——Kelvin 模型中弹簧的弹性模量; η ——Kelvin 模型中黏壶的黏滞系数。

$$\text{由式(4)得本构方程为} \quad \epsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right) \quad (5)$$

$$\text{代入式(1),得} \quad \frac{\partial w}{\partial z} = \sqrt{1 + 2\epsilon} - 1 = \sqrt{1 + 2 \frac{\sigma_0(z)}{E} \left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right)} - 1 \quad (6)$$

彭功勋^[4]试验中的边界条件为无侧向变形,侧壁有摩擦力。Powrie^[6]得到的圆形桶中荷载的传递公式为

$$\sigma'_z = \frac{\rho g}{B} + \left(P - \frac{\rho g}{B} \right) e^{-Bz} \quad (7)$$

$$B = \frac{4}{d} (1 - \sin \varphi') \tan \delta \quad (8)$$

式中: φ' ——垃圾土的内摩擦角; δ ——垃圾土与有机玻璃桶壁的摩擦角; z ——计算点开始的深度; d ——试验筒直径; P ——上部荷载; ρ ——试样垃圾土密度; g ——重力加速度; B ——参数。

对试验桶中第 i 层垃圾土的受力情况进行研究,见图 3。由图 3 可知,上部荷载为

$$\sigma'_i = \frac{\rho g}{B} + \left(P - \frac{\rho g}{B} \right) e^{-B \sum_{j=i-1}^n h_j} \quad (9)$$

$$\text{底部荷载为} \quad \sigma'_{i-1} = \frac{\rho g}{B} + \left(P - \frac{\rho g}{B} \right) e^{-B \sum_{j=i}^n h_j} \quad (10)$$

式中 h_j 为第 j 层厚度。

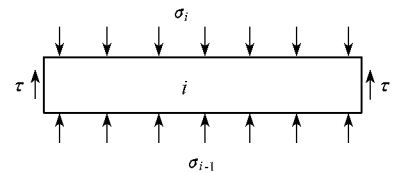


图 3 i 层受力

Fig.3 Forces on layer i

每个计算层相对于桶高均较小 ,因此可以近似地认为应力在每层内均匀分布 ,该层内任意高度的(该层底部 $z_i = 0$)应力为

$$\alpha(z_i) = \sigma_{i-1} + \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\Delta h_i} z_i \tag{11}$$

将式 (11) 代入式 (8) ,得

$$w_i = - \frac{\Delta h_i E_i \sqrt{\left[1 + 2 \frac{\alpha(z_i)}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{E_i}{\eta_i} t}\right)\right]^3}}{\alpha(\sigma_i - \sigma_{i-1}) \left(1 - e^{-\frac{E_i}{\eta_i} t}\right)} - \Delta h_i + \frac{\Delta h_i E_i \sqrt{\left[1 + 2 \frac{\alpha(z_i = 0)}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{E_i}{\eta_i} t}\right)\right]^3}}{\alpha(\sigma_i - \sigma_{i-1}) \left(1 - e^{-\frac{E_i}{\eta_i} t}\right)} \quad (t > 0) \tag{12}$$

式 (12) 只有 2 个参数 ,可通过试验确定 ,且比彭功勋^[4]的计算公式简单 ,概念清楚 ,便于理解和应用。
彭功勋^[4]对相同配比及含水率的垃圾土进行蠕变试验 ,采用式 (12) 反演试验结果 ,得到了该配比下垃圾土的蠕变参数 ,即 $E = 55.64 \text{ kPa}$, $\eta = 1677.8 \text{ kPa} \cdot \text{d}$ 。

2.3 有机物生物降解导致沉降计算方程及参数确定

柯瀚等^[2,7-8]对有机物生物降解导致的沉降进行了研究 ,并认为有机质降解符合水解规律 ,Chen^[9]所得到的有机质水解公式为

$$M_c(t) = M_c(0) e^{-kt} \tag{13}$$

式中 : $M_c(0)$ ——有机质总质量 ; $M_c(t)$ —— t 时刻有机质剩余质量。

Golueke^[10]发现 ,有机质并不是都能完全降解的 ,即一部分可以完全降解 ,但也有一部分不能降解 ,表示有机质降解的式子应为

$$\Delta B(t) = B_1(1 - e^{-kt}) \tag{14}$$

式中 : $\Delta B(t)$ ——降解的有机质含量 ; k ——降解速率 ; B_1 ——可完全降解有机质的百分比。

Chen^[9]认为 ,填埋场降解速率 k 在 $0.012 \sim 0.788 \text{ a}^{-1}$ 之间 ,方云飞^[8]在室内持水率(在重力作用下所能保持的最大含水率)条件下进行了纯有机质碗装降解试验 ,对方云飞试验结果拟合后可知 ,在持水率条件下 , $k = 0.0385 \text{ d}^{-1}$ (14.0525 a^{-1}) , $B_1 = 0.421$ 。对比文献 [4] 与文献 [8] 试验的外部条件(场地、温度及湿度)可知 :文献 [8] 的碗装试验没有受到压力作用 ,材料松散 ,并一直暴露在空气中 ,即整个过程基本上处于耗氧状态 ;文献 [4] 的有机玻璃桶实验仅表层与空气接触 ,内部材料很难接触到空气 ,处于厌氧状态 ,因此其降解速率应该比文献 [8] 的小得多 ,但文献 [8] 得到的降解速率 14.0525 a^{-1} 与文献 [9] 所建议的最大降解速率 0.788 a^{-1} 有数量级的差异 ,若采用文献 [8] 测得的值进行计算 ,则与实际相差太大 ,因此本文取文献 [9] 建议的最大值 0.0022 d^{-1} (0.788 a^{-1}) 及相近的值进行计算。

有机质降解后导致质量损失 ,则必然导致沉降 ,文献 [4] 对质量损失与沉降的关系进行了探讨 ,引入一个参数 α ,认为

$$\frac{\Delta W}{W} = \alpha \frac{\Delta V}{V}$$

即体积损失率与质量损失率正相关 ,本文按文献 [4] 与文献 [8] 的建议取质容转化比 α 为 1.0 ,同时考虑到试验中无侧向变形 ,因此 ,本文采用的简化有机质沉降计算公式为($h = 1.54 \text{ m}$, $B_1 = 0.421$,其中有机质的质量分数为 75%)

$$\Delta h = \frac{h \Delta W}{\alpha W} = \frac{h}{\alpha} B_1(1 - e^{-kt}) = 0.485 \text{ [(} 1 - e^{-kt} \text{)]} \tag{15}$$

3 算例分析

由于预压荷载与最终覆盖荷载一致 ,只存在次压缩与生物降解过程 ,因此采用式 (12) 及 (15) 分别对压缩沉降及有机质降解沉降进行了计算 ,计算结果(采用不同的降解速率)及实测结果比较见图 4。

从图 4 可以看出 , k 取不同值时沉降计算值与实际值趋势相差不大 ,当 $k = 0.0030$ 时 ,计算值与实测值较为接近 ,由此可见 ,本文导出的模型较为合理 ,应该指出 ,计算值与实测值存在一定的差异 ,是因为很多不

确定因素,如 实验得到的蠕变参数 η 与垃圾土本身的 η 相比要小,导致压缩沉降的峰值提前;有机质降解的程度与速率未知;未考虑有机质与无机质之间的耦合作用效应等.

4 结 语

a. 基于 Kelvin 模型推导填埋场封场后的次压缩沉降计算模型,同时采用在有机质水解方程基础上简化的有机物降解沉降公式,对室内有机玻璃试验桶模型试验进行了验算.从结果看,计算结果与实际沉降符合较好.

b. 虽然本文模型是在室内试验基础上导出的,但现场填埋场次压缩沉降计算只需要对应力进行修正即可.

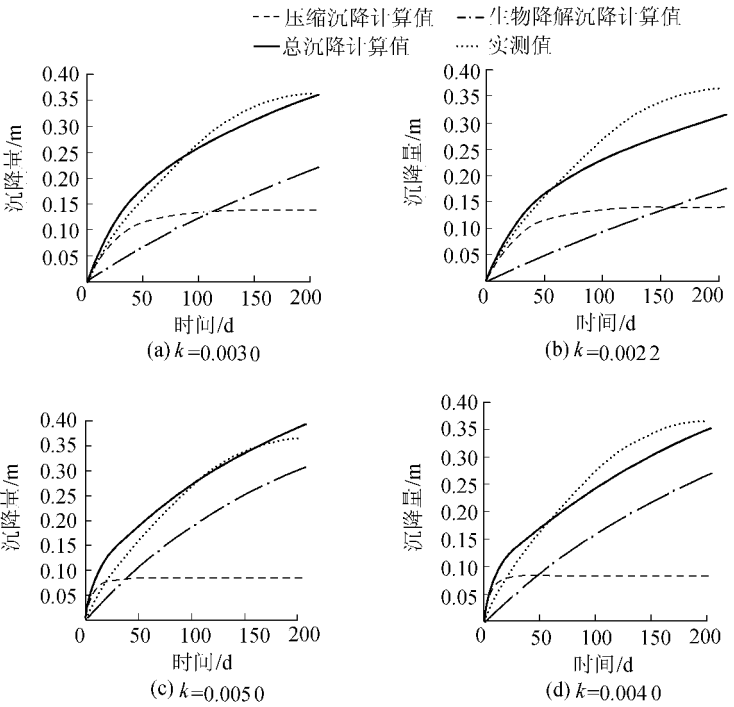


图 4 不同 k 值的沉降计算结果
Fig.4 Calculated settlement at different k values

参考文献:

[1] 钱学德,郭志平,施建勇,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,2001:166-170.

[2] 柯瀚,陈云敏.填埋场封场后的次沉降计算[J].岩土工程学报,2003,25(6):742-746.

[3] AFONSO C M,GEROGE M F,ORENCIO M V, et al. Composite compressibility model for municipal solid waste[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003,129(4):372-378.

[4] 彭功勋.城市固体废弃物的沉降变形研究[D].南京:河海大学,2004.

[5] 杜庆华,郑百哲.应用连续介质力学[M].北京:清华大学出版社,1986:8-10.

[6] POWRIE W, BEAVEN R P. Hydraulic properties of household waste and implication for landfills[J]. Proc Instr Civ Engrs Geotech Engng, 1999,10:235-247.

[7] 张振营,陈云敏.城市垃圾填埋场有机物降解沉降模型的研究[J].岩土力学,2004,25(2):238-241.

[8] 方云飞.城市生活垃圾有机物降解和变形规律研究[D].南京:河海大学,2005.

[9] CHEN W H. Time-settlement behavior of milled refuse[D]. Evanston: Northwestern University, 1974.

[10] GOLUEKE C. Composting: a study of the process and its principal[M]. Emmaus: Rodaie Press, 1972:155-163.

Laboratory composite model for landfill secondary settlement

LIAO Zhi-qiang, HU Ya-dong, ZHU Ning

(Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Based on the hypothesis of finite strain theory and Kelvin model, a laboratory stress compression model for simulation of landfill secondary settlement was deduced. By combination of the compression model with a simplified biodegradation model, a composite model was obtained. The composite model is more reasonable than other models because it considers the mechanism of landfill settlement not only caused by stress but also by organism biodegradation. With some parameters taken into account, the calculated results accord with the measured data, which can provide a basis for calculation of landfill secondary settlement.

Key words secondary settlement; Kelvin model; stress compression model; biodegradation