

文章编号: 1000-7598-(2007)04-0675-04

建筑垃圾填埋场沉降计算中模型参数灵敏度分析

雷华阳¹, 李鸿琦¹, 宛子瑞², 刘洪俊², 应耀明³, 马峰³

(1. 天津大学 土木工程系, 天津, 300072; 2. 天津市市容环境管理委员会, 天津 300201; 3. 天津市地质调查研究院, 天津, 300191)

摘要: 建筑垃圾土的变形机理复杂, 它不同于传统意义上的土体。通过大量的非线性有限元计算, 找到了双屈服面模型中影响建筑垃圾填埋场沉降的主要参数, 并给出了各参数与沉降之间的定性关系, 为建筑垃圾填埋场沉降计算和参数灵敏度分析奠定了基础。

关键词: 建筑垃圾; 沉降; 双屈服面模型; 灵敏度分析
中图分类号: X 705 **文献标识码:** A

Analysis of model parameters sensitivity in settlement calculation of construction waste landfill

LEI Hua-yang¹, LI Hong-qi¹, WAN Zi-rui², LIU Hong-jun², YING Yao-ming³, MA Feng³

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin City Appearance Environmental Management Committee, Tianjin 300201, China; 3. Tianjin Institute of Geology Survey, Tianjin 300191, China)

Abstract: The deformation mechanism of construction waste is complicated and is differ from the traditional soil. By a lot of nonlinear finite element method calculation, the main parameters, which have much larger influence on the calculated accuracy of construction waste landfill settlement, are found out; and then the qualitative relations between every parameter and settlement are also given; and the results can be the basis of settlement calculation and parameters sensitivity analysis of construction waste landfill.

Key words: construction waste; settlement; double yield surface model; sensitivity analysis

1 前言

在沿海城市利用建筑垃圾进行堆山造景^[1], 在给城市垃圾的处理、堆放提供一条废弃资源再生利用的新途径的同时, 也产生了一些急需解决的工程课题。主要原因在于: 一是沿海城市广泛分布有含水量、孔隙比大, 抗剪强度、渗透性低且压缩性、灵敏性高的软黏土, 如何估算地基变形和稳定问题显得尤为突出^[2-3]; 二是对于建筑垃圾工程性质的研究成果较少, 尤其是在软土地基上、采用建筑垃圾进行堆山, 没有类似的工程经验和相应的设计规范。因此, 如何选择合适的本构模型进行计算以及如何根据建筑垃圾填埋场沉降和侧向位移的观测资料进行模型参数反分析, 是当今建筑垃圾堆填工程的热点。对于该问题的研究可为土工实验人员提供一定程度上的参考, 使他们了解哪些参数对计算结果影响较大, 为设计人员认识建筑垃圾土特性提供帮助。

双屈服面模型^[4]是沈珠江教授提出的。考虑到该模型已多次运用于分析软黏土地基固结变形耦合问题, 并取得了较为理想的结果。同时根据多个工程的计算与实测相比较, 该模型的计算沉降量在实测的 75%~110%之间, 计算孔隙水压力与实测值大体接近。故在本工程中采用双屈服面模型进行计算分析, 该模型主要涉及 6 个参数, 针对建筑垃圾填埋场沉降而言, 它们的影响程度是不同的。在实验室中测定这些参数又存在一定的误差, 导致计算结果与实测值之间存在一定的差距。

2 工程概况

某建筑垃圾填埋场场区内地层为全新统(Q¹⁻³₄)和上更新统(Q^{a-e}₃)河流相、湖沼相、滨海潮汐相及浅海相交互沉积的黏性土和砂性土。由于历史原因, 该工程是一个在废弃池塘上进行的大面积堆载工程, 原场址为存放建筑垃圾、市政淤泥和河流清

收稿日期: 2005-05-16

基金项目: 天津大学青年基金(W50101), 天津市建委科研项目资助

作者简介: 雷华阳, 女, 1974年生, 副教授, 主要从事岩土工程教学与科研方面的工作。 E-mail: lei huayang74@yahoo.com.cn.

淤等的堆放地^[1]。主要地基土层的物理力学性质如表 1 所示。

表 1 地基土的主要物理力学性质指标
Table 1 Main physical indexes of the foundation soils

土类	$W/\%$	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$\alpha_{1-2}/\text{MPa}^{-1}$	c/kPa	$\phi/^\circ$
淤泥质土	39.8	18.2	0.77	11.5	9.1
粉土	24.9	19.9	0.12	13.8	28.3
粉质黏土	22.6	20.4	0.30	18.2	14.4
黏土	29.6	19.5	0.31	39.5	12.8

计算过程按照现场堆山工程施工填筑堆体, 考虑固结效应进行弹塑性固结变形分析, 分析中分级模拟堆填、间歇过程, 得出各级荷载下的沉降量、孔隙水压力值。根据实际工程的期限, 可选取不同的填土时间分别进行计算。

在建筑垃圾堆填的过程中, 严格控制加荷速率, 分层均匀缓填, 严禁局部堆土过高。填土顺序先四周后中间。由于建筑垃圾成分复杂, 其密实度难以衡量, 常规方法均不适用, 因此, 主要靠施工工艺控制。利用野外现场压实试验记录: 首先利用推土机将填土推平, 之后采用重型振动碾压机 (57T), 碾压遍数不少于 6 遍 (可先强夯后弱振)。

在计算中将山体视为柔性荷载, 考虑到施工的方便及有利于地基的稳定, 将荷载增量沿山体高度水平划分。堆填高度与时间历程曲线见图 1。地基内部孔隙水压力值为未知的, 可计算求得。在堆体区以外, 地基表面孔隙水压力始终为 0, 地基表面为自由变形, 地基侧向边界令其受水平向约束, 底边界受垂直和水平向约束。

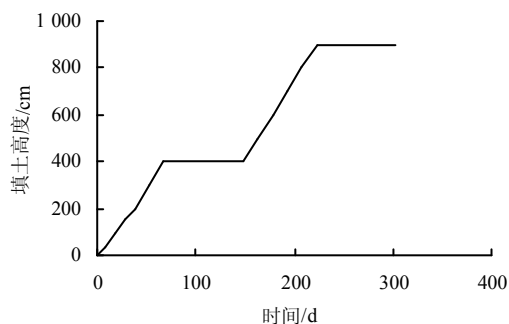


图 1 堆填高度与时间历程线
Fig.1 Curve of height vs. time

沉降监测分为两部分, 一是布设沉降磁环, 布设 4 组, 分别位于堆填体内和堆填体坡脚位置处, 孔深 50 m 左右; 二是埋设地面水准点 20 个, 主要在堆填体上埋设。沉降观测采用 GCY 型直读式沉降仪。

3 计算与分析

在土体工程反演分析中, 由于复杂的本构模型或不合理的选取反演参数常常可导致解的不唯一性, 甚至于反演过程不收敛。因此, 在反演分析中, 必须合理的选择优化方法和反演参数^[5]。

在选取反演参数时, 如选取的参数愈多, 反演计算过程遇到的困难就愈大。其原因: ①计算工作量将成倍地增加; ②反演过程更难收敛; ③由于量测信息本身有误差, 计算过程中将产生传递效应, 待确定参数过多时易于得出无法理解的结果。如果依据工程经验或试验结果等直接选定某个参数的数值将有助于消除输入信息自身误差的传递效应, 反而使所得结果较为合理。各个参数对位移的影响大小可以通过灵敏度分析的方法得到。参数的灵敏度可以用解析或差分的方法求解。由于采用了非线性本构模型, 解析的方法过于复杂, 在程序中的实现比较困难, 故采用了差分的方法来估计各参数的灵敏度。在估计其中一个参数的灵敏度时, 先暂时固定其余的参数, 研究该参数变化以后土体位移变化的大小, 如此反复计算可找出对土体的位移影响较大的参数。

双屈服面模型中的 6 个参数, 即 K , n , R_f , ϕ_c , α_f 和 m 。分别让以上模型参数作 $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$ 变化, 通过计算得出它们在中心线处的最终沉降影响, 见表 2。各参数上、下变化时均是在它们的初始值基础上进行的。根据室内三轴试验结果选取它们的初始值分别为: 90 , 0.55 , 0.792 , 14.4° , 0.3118 , 3 , $6.6 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 。

表 2 参数变化对最终沉降量影响结果表
Table 2 Influence of parameters change on final settlement

各参数 变化率 /%	k		n		R_f	
	最终沉降 / cm	变化率 /%	最终沉降 / cm	变化率 /%	最终沉降 / cm	变化率 /%
-15	60.995	+13.6	53.449	-0.44	43.671	-18.7
-5	54.091	+0.75	56.158	+4.60	48.062	-10.5
0	53.690	0.0	53.690	0.0	53.690	0.0
+5	48.215	-10.2	43.930	-18.2	54.360	+1.25
+15	46.275	-13.8	34.723	-35.3	57.699	+7.47

续表 2

各参数 变化率 /%	ϕ_c		α_f		m	
	最终沉降 / cm	变化率 /%	最终沉降 / cm	变化率 /%	最终沉降 / cm	变化率 /%
-15	51.335	-4.39	64.654	+20.4	58.179	+8.36
-5	78.608	+46.4	54.269	+1.08	50.825	-5.34
0	53.690	0.0	53.690	0.0	53.690	0.0
+5	54.503	+1.51	50.666	-5.63	54.090	+0.75
+15	45.856	-14.6	47.748	-11.1	52.001	-3.15

根据表2的数据,可以绘制出各个参数的变化率与最终沉降的变化率关系曲线见图2。该图反映出各个参数对于沉降变化率的影响程度。由此可见,对于堆填山体最终沉降影响灵敏度较大的参数为: K , n , R_f , ϕ 和 a_f ,尤其是 n 和 ϕ 这两个参数,它们在 $\pm 15\%$ 的区间变化中,沉降变化率绝对值至少大于 10% ,最大的可以达到 46.4% ;相比较而言, m 参数对应的变化范围较小,这也是在软土地基沉降计算中通常将 m 取为3的原因。

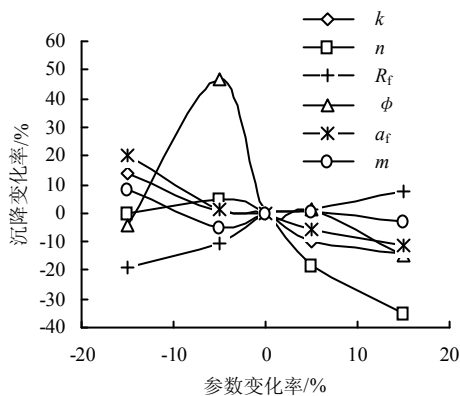


图2 最终沉降与各参数之间的关系

Fig.2 Relationships between final settlement and each parameter

在5个与沉降关系较大的参数中,可以划分成3种情况:(1)与沉降之间呈反相关关系,如 K , n , a_f ;(2)与沉降之间呈正相关关系,如 R_f ;(3)对沉降影响呈现波动变化,如 ϕ 。图3至7分别反映5个参数对沉降计算结果的影响。

K 值的含义为当 σ 取一个大气压时的初始弹性模量。表2中数据表明,当 K 值减少 15% 时,最终沉降增大 13.6% ;当 K 值增大 15% 时,最终沉降减少 13.8% 左右。从图3中可以清楚地看出 K 值与最终沉降呈反相关关系。

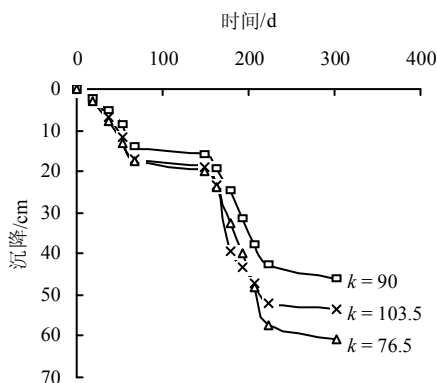


图3 K 对沉降的影响

Fig.3 Influence of K on settlement

a_f 为 $\sigma_c = 1$ 个大气压时的破坏孔隙压力系数。由表2可知, a_f 增大 15% ,最终沉降要减少 11.1% ;而 a_f 减小 15% ,增大率可达到 20.4% 。显示出了非常明显的反相关关系。图4表明了沉降随 a_f 呈反相关关系。

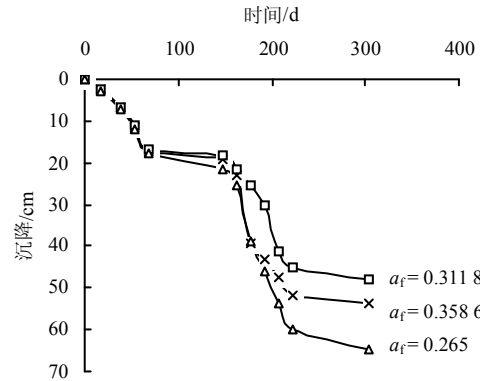


图4 a_f 对沉降的影响

Fig.4 Influence of a_f on settlement

图5显示了参数 n 对最终沉降的影响。 n 值是反映弹性模量随应力变化的非线性参数,当 n 值增大时,在加荷初期的沉降值基本上没有太大的变化,后期由于荷载的逐渐增大,不同时刻的沉降值均减少; n 值减少,沉降反而增大,而且在保持加荷速率不变的情况下,沉降出现陡增现象,变化幅度大致接近 60% 。

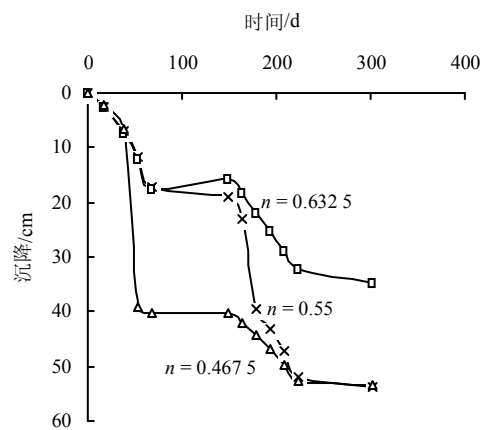


图5 n 对沉降的影响

Fig.5 Influence of n on settlement

破坏比 R_f 的含义为土体在达到破坏时的偏应力与极限偏应力的比值。一般土体取值范围在 $0.50 \sim 0.90$ 之间。从表2可见:地表沉降随着土体破坏比的增加而增大,这主要是因为破坏比越大意味着土体产生破坏的可能性就越大,相应地表变形也就大。当 R_f 在上、下 15% 区间变化时,沉降

的变化率绝对值达到 18.7%。图 6 表明了沉降随 R_f 呈正相关关系。

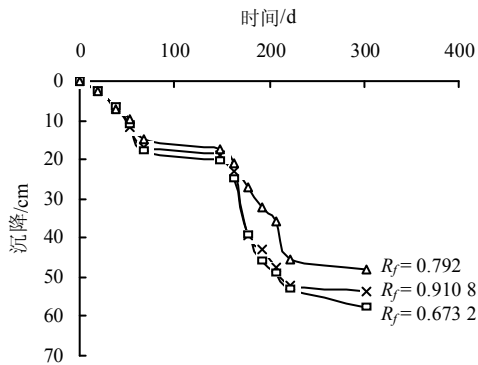


图 6 R_f 对沉降的影响
Fig.6 Influence of R_f on settlement

图 7 和表 2 中数据均显示出参数 ϕ 对于沉降计算的差异性影响是非常显著的, 当 ϕ 值仅降低或增加 5% 时, 最终沉降均呈现出增加的趋势, 变化率绝对值可达 46.4%, 当 ϕ 值在 15%~5% 范围内变化时, 沉降值都呈现出降低的趋势, 变化率达 14.6%。这一方面说明 ϕ 值的变化对于沉降的影响并没有明显的规律, 另一方面也说明了做土工实验测定双屈服面模型参数时, 应尽可能真实地测量土样的抗剪强度指标 (c 和 ϕ), 将有助于正确计算地基的最终沉降。对于堆填材料不宜采用常规试验测定时, 可通过反演分析尽可能地去逼近真实值。

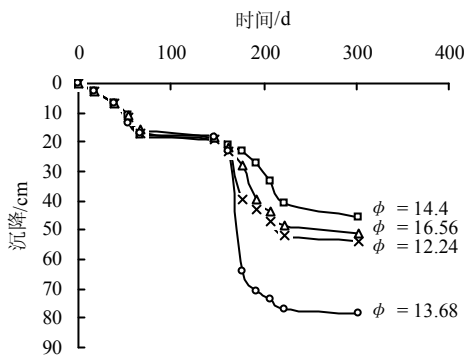


图 7 ϕ 对沉降的影响
Fig.7 Influence of ϕ on settlement

4 结论与建议

本构模型的合理程度对于有限元分析的精度有重要影响, 岩土工程问题模拟的效率在很大程度上依赖于所选用的单元^[6]。除此之外, 如何合理地选择切合实际的岩土本构模型参数也是有限元计算分析中一个非常重要的问题。

基于以上原因, 正确掌握模型参数对于有限元计算结果的影响就显得非常有必要了, 通过一系列分析得出:

(1) 在双屈服面模型中, 对最终沉降影响较大的参数主要有 K , n , R_f , ϕ_c 和 a_f 。尤其是 n 和 ϕ_c 这两个参数;

(2) 在 5 个与沉降关系较大的参数中, 可以划分成 3 种情况: 1) 与沉降之间呈反相关关系, 如 K , n , a_f ; 2) 与沉降之间呈正相关关系, 如 R_f ; 3) 对于沉降影响呈现波动变化的, 如 ϕ_c 。

(3) 在进行双屈服面模型参数反演分析时, 为减少反演工作量, 可采用固定灵敏度小的参数 (m), 且把土体抗剪强度指标 (c 和 ϕ) 当作“真值”处理的方法进行, 这样只需要对其余的 4 个灵敏度大的参数进行反分析。

参考文献

- [1] 天津市环境地质研究所, 天津大学, 天津市地质工程勘察院. 天津市建筑垃圾堆埋场堆山造境工程勘察评价报告[R]. 2003.6
- [2] 杨顺安, 冯晓腊, 张聪辰. 软土理论与工程[M]. 北京: 地质出版社. 2000.
- [3] 黄文熙, 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社. 1983.
- [4] 沈珠江. 新弹塑性模型在软土地基固结分析中的应用[J]. 南京水利科学研究院水利水运科学研究, 1993, 1: 55—63.
- [5] 薛履中. 工程最优化技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [6] 王勖成, 邵敏. 有限元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.