

基于功能原理的南宁膨胀土竖向膨胀能研究

苗 鹏 肖宏彬

(湖南工业大学岩土工程研究所, 湖南株洲 412008)

【摘 要】 基于改进的室内膨胀能测定实验, 联合静力压入法的试样制作新方法, 以功能原理为出发点, 从能量的角度对南宁膨胀土的膨胀能进行了试验研究和理论分析, 探讨了南宁膨胀土的静力压实功和膨胀释放能与含水量、干密度之间的关系。试验表明, 膨胀能和压实功均与初始含水率近似成线性反比关系, 与干密度成线性正比关系; 干密度是影响压实功和膨胀能的主要因素。

【关键词】 膨胀土; 膨胀能; 压实功; 功能原理; 能量

【中图分类号】 TU 411

Research on Vertical Swelling Energy of Expansive Soils Based on Work-Energy Principle

Miao Peng Xiao Hongbin

(Geotechnical Engineering Institute, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008 China)

【Abstract】 Based on ameliorative experiment about swelling energy measurement of Nanning expansive soils, new technique of making soil samples and principle of work-energy, experimental investigation and theoretical derivation are done from the perspective of the energy. The relationship between Nanning expansive soils' swelling potential and initial water content, initial dry density are discussed. Test shows that static force compacting work and swelling released energy are all inversely related to initial water content. There are rectilinear relationships between compacting work, swelling energy and density. Moreover, density is the main influential factor of compacting work and swelling energy.

【Key Words】 expansive soils; swelling energy; compacting work; principle of work-energy; energy

0 引言

膨胀土是一种特殊的非饱和土, 它吸水膨胀、失水收缩等特性常常使建筑物产生不均匀的竖向或水平胀缩变形, 造成位移、开裂、倾斜甚至破坏, 是一种典型的工程危害性地质土。我国是膨胀土分布最广的国家之一, 先后有 20 多个省区发现有膨胀土, 有 3 亿以上人口生活在膨胀土地区^[1]。随着膨胀土地区工程建设项目的日益增加, 膨胀土对工程建设的安全性产生重要影响。

膨胀土对道路桥梁、建筑物基础等工程结构的破坏首先来自其吸水膨胀能。膨胀能测试是膨胀土研究的一个重要组成部分, 也是研究膨胀土地基中桩—土共同作用的基础和前提。影响膨胀能力的因素很多, 诸如膨胀土的矿物组成、结构、孔隙比、含水

量、密度、应力历史等都会对膨胀能产生影响。膨胀力是土体在某状态下吸水时所产生的内应力, 是相对于土体某一初始状态而言的(如干密度、含水量等)。定义不同的初始状态, 将会得到不同的膨胀能。不同的实验方法, 也会得出不同的膨胀能。

从能量角度对膨胀土膨胀势进行研究在目前相关文献中还不多见。在已取得的成果^[2-4]基础上, 本文基于功能原理, 从能量角度就初始含水量、干密度两个因素对膨胀能的影响进行相应的实验研究, 同时也得到了不同含水量、干密度的重塑膨胀土竖向膨胀能规律。

1 基本假定和理论分析

1.1 理想膨胀土基本假定

本文对南宁膨胀土膨胀能的研究基于以下理想

膨胀土假定。理想膨胀土具有以下特征:完全松散、无任何应力历史。

理想膨胀土假定为我们设想了一种零膨胀能的理想膨胀土试样,由于其完全松散和无任何应力历史,其初始膨胀能可视为零。那么将其压缩制成压实膨胀土试样后,便相当于在试样内“存储”了一定的能量,而这正是试样吸水膨胀释放的能量的来源。基于上述理想膨胀土假定,笔者将膨胀土吸水产生膨胀力的过程,看作是释放“存储”的膨胀能的过程,含水量的增加(吸水)只是触发这一过程的外因,实质是来自压缩应力历史。这就摒弃了简单地将含水量的增加视为膨胀土膨胀能来源的传统观点。

1.2 压实功和膨胀能表达式

试样制作时采用“静力压入法”,压缩制作中同时记录外压力的 $p-s$ 曲线,显然这属于典型的变力做功。设想得到压实力-位移方程为

$$p_1 = f_1(s), (p_1 > 0, 0 < s < a) \quad (1)$$

式(1)对 s 在位移区间 $[0, a]$ 上进行积分,便得到了外压力对土样压缩过程中做的压实功,为

$$\Delta W_1 = \int_0^a p_1 ds = \int_0^a f_1(s) ds \quad (2)$$

同理,在对该试样进行吸水膨胀实验中,我们同样可以设想得到膨胀力推动上覆荷重做功的膨胀力-位移方程为

$$p_2 = f_2(s), (p_2 > 0, 0 < s < b) \quad (3)$$

式(3)对 s 在位移区间 $[0, b]$ 上进行积分,便得到了膨胀力对上部荷重做的功,也即膨胀能,为

$$\Delta W_2 = \int_0^b p_2 ds = \int_0^b f_2(s) ds \quad (4)$$

2 实验设备及方法

实验所用土样为广西南宁膨胀土,属中等膨胀土,其基本物理力学性质见表 1。

表 1 试验用南宁膨胀土的基本物理力学性质

土样来源	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	最优含水量 $w_{op}/\%$	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$
南宁膨胀土	61.4	22.8	38.6	15.8	1.89

为了实验测定试样制作时的压缩功,笔者采用了 CM T4000 型 SANS 电子万能试验机,主要参数为:试验力测量范围 $0.2\% \sim 100\%F_s$;最大试验力 50 kN;变形测量范围 $0.2\% \sim 100\%F_s$;变形分辨力:最大变形的 $1/300000$ 。完全能够满足静力压入法制作膨胀土试样的要求,且试验机能够自动记录压缩过程中的 $p-s$ 曲线等相关数据(见图 1-图 3)。试验最后得到了多组不同初始干密度、初始含水量下的直径 61.8 mm,高 20 mm 的标准土块。



图 1 试验用 SANS 电子万能试验机

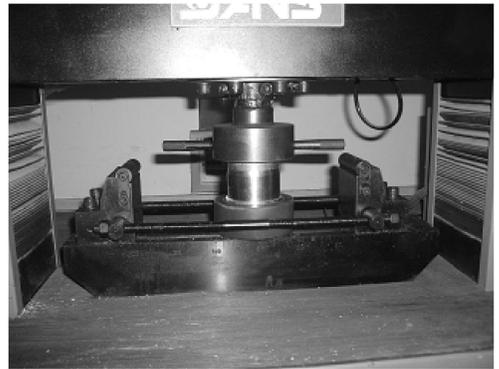


图 2 静力压入法制作试样

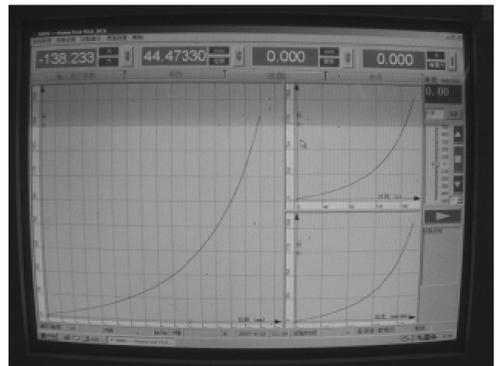


图 3 压实力-位移曲线数据自动采集

膨胀能的研究实验设备采用笔者改进的竖向膨胀能测定仪,与规范中的“加荷平衡法”相比,由于采

用了量力环直接量测膨胀能值的改进法,因而更简单方便且精度更高。竖向膨胀能测定仪由南京土壤仪器厂产YYW-2型无侧限抗压仪改造而来(见图4)。将固结仪用水盆置于原先放置试样的可升降平台上。水盆内依次放置护环、导环,导环内放置制作好的压实膨胀土试样,在试样上下两面垫两块透水石。

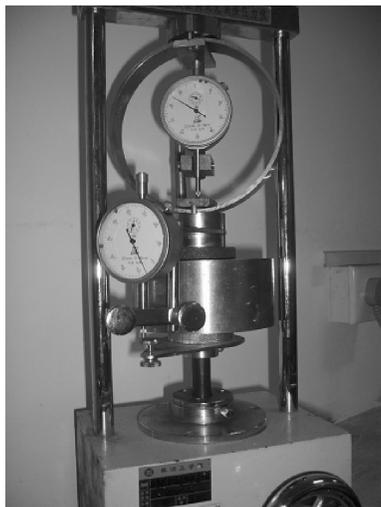


图4 自主研制的膨胀能测定仪

实验前,微调水盆位置,使得试样中心在量力环和平台竖向中心线上,转动底座上的手轮,使平台上升,使得试样上面与量力环底面刚好接触,锁住平台。将量力环内百分表命名为表A,平台上百分表命名为表B,加水前记录各表初读。加水后,试样开始膨胀,其膨胀能向上压缩量力环,表A示数同步增大;同时,表B由于试样膨胀,示数减小,偏离原初度,此时缓缓转动手轮,使得平台再次上升,其反作用力压缩试样,直到使表B示数增大与表A相同幅度(效果等同于现行规范中的“加荷平衡法”),此时读取量力环上百分表A,换算后即得到此时刻的膨胀能。

在实验开始的初期阶段,土的胀缩变形较快,测读时间间隔小于1h,等到2h的变形量小于0.01mm时认为胀缩稳定,以后每1h观测一次,直至膨胀稳定。各级荷载下膨胀变形的稳定标准,为连续两次观测时间内的变形差不超过0.01mm。实验过程中,水分逐渐进入到土体内,注意水分的变化适当的增加水。保持土体表面随时有可见水。

膨胀土地基为半无限体空间体,因此采取有侧限的竖向膨胀能实验是合理的^[9]。

3 实验结果和分析

不同干密度和初始含水率下的土样压缩过程中记录的压实力-位移曲线见图5~图8。

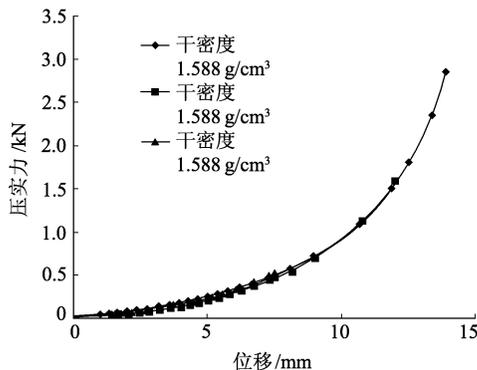


图5 不同干密度下压实力-位移曲线

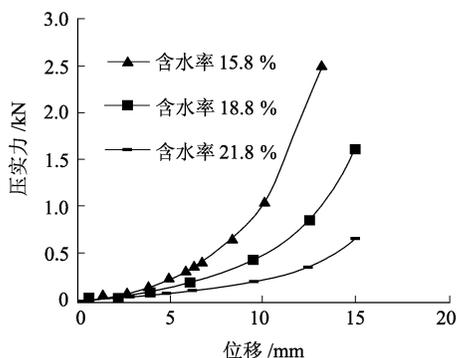


图6 不同初始含水率下压实力-位移曲线

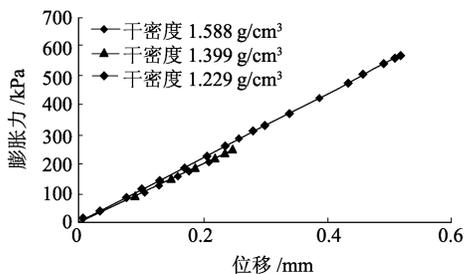


图7 不同干密度下膨胀力-位移曲线

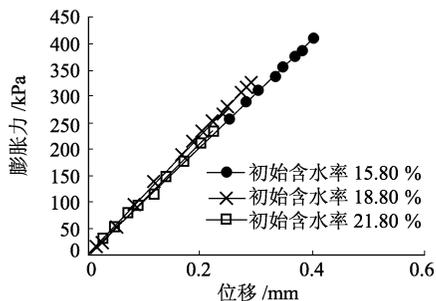


图8 不同含水率下膨胀力-位移曲线

对不同干密度和初始含水率下的压实力-位移曲线,可用3次多项式 $p = as^3 + bs^2 + cs + d$ 进行拟合,则压实功为

$$\Delta W_1 = \int_0^{s_1} (as^3 + bs^2 + cs + d) ds$$

($0 < s < s_1$, a, b, c, d 为试验参量, 可拟合确定) (5)

膨胀力在一定范围内(约800kPa), 膨胀力-位移有着显著的线性关系见图9和图10。实验中, 膨胀土在吸水膨胀产生膨胀能, 并推动上部荷重做功。由于土样一荷重界面的紧密接触, 保证了界面间位移的连续性, 从而可以确定推动上部荷重做功相应的位移即等于膨胀土土体的竖向线膨胀量。即土体瞬时膨胀力 p_2 与瞬时位移 s 间建立了线性关系, 可用简单线性方程 $p_2 = ks + z$ 拟合。则压实功为

$$\Delta W_2 = \int_0^{s_2} (ks + z) ds$$

($0 < s < s_2$, k, z 为试验参量, 可拟合确定) (6)

对试验数据进行整理, 静力压实功和膨胀释放能随初始含水率、干密度的变化规律见图9、图10。

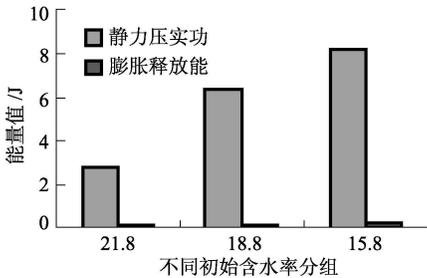


图9 压实功和释放能随初始含水率变化关系

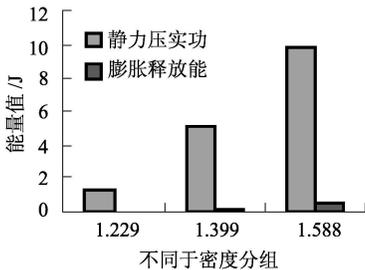


图10 压实功和释放能随干密度变化关系

从图9可以看出, 对于不同的初始含水率分组, 静力压实功随土样初始含水率的减小而增大, 两者近似成线性反比关系; 每组合含水率相对应的膨胀释放能亦与初始含水率近似成线性反比关系, 即膨胀释放能随初始含水率的增大而线性减小。

从图10可以看出, 对于不同的干密度分组, 静力压实功随土样干密度的增大而增大, 两者近似成线性正比关系; 每组合干密度相对应的膨胀释放能亦与干密度近似成线性正比关系, 即膨胀释放能随干密度的增大而线性增大。

将图9与图10横向比较分析, 可明显看出, 虽

然静力压实功和膨胀释放能与初始含水率和干密度均成线性关系, 但较初始含水率因素相比, 静力压实功和膨胀释放能两项指标都对干密度因素更敏感, 这可从图9、图10中两值随各参量相对变化程度上看出。

膨胀土的膨胀能与其初始含水量、干密度密切相关, 即使完全相同的膨胀土样, 由于试样制作时采用的干密度、初始含水量以及压实情况等变异性, 其后期测定出的膨胀力及其膨胀能变动也较大。因此单纯得用膨胀力或者膨胀能数值来描述一类型膨胀土的膨胀潜能都是不准确和不可靠的。

将式(5)与式(6)相除, 便得到了试样膨胀释放能与该试样压实功的比值, 可以形象地称之为“膨胀能释放系数”, 为

$$r = \frac{\Delta W_2}{\Delta W_1} = \frac{\int_0^{s_2} (ks + z) ds}{\int_0^{s_1} (as^3 + bs^2 + cs + d) ds} \quad (7)$$

膨胀能释放系数更能客观地反映该类型膨胀土的膨胀潜能。不同干密度和初始含水率下的 r 见表2。

表2 试验测得不同干密度和初始含水率下的 r 值

组别	压实功/J	膨胀能/J	r
不同干密度 ($g \cdot cm^{-3}$)	1.588	9.86	0.045
	1.399	5.17	0.019
	1.229	1.33	0.001
不同含水率 /%	21.8	2.84	0.028
	18.8	6.30	0.023
	15.8	8.14	0.031

由表2可以看出, 膨胀能释放系数 r 随含水率变动较小, 干密度是影响 r 值的主要因素, 即膨胀能释放系数 r 仅与膨胀土的干密度和土性有关, r 值越大, 即膨胀土膨胀潜能也越大。对 r 值-干密度进行拟合(如图11所示), 发现其线性关系显著。本次实验中, 拟合的回归方程为

$$r = A\rho_d + B \quad (0 < \rho_d \leq \rho_{dmax}), |R| > 0.99 \quad (8)$$

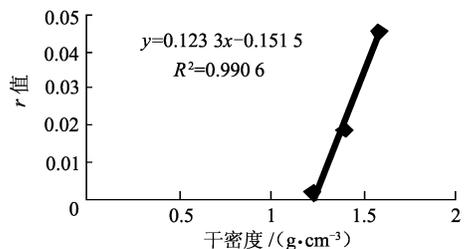


图11 膨胀能释放系数随干密度变化关系

式(8)中, ρ_d 为干密度, g/cm^3 ; A, B 为相关参
(下转第26页)

如图1, 墙背竖直光滑, 墙高 $h=5\text{ m}$, 墙身材料重度 $\gamma=22\text{ kN/m}^3$, 经计算后的墙背主动土压力 $E_a=49.95\text{ kN/m}$, 作用点高度 $z=1.67\text{ m}$, 基底摩擦系数 $\mu=0.6$, 修正后的地基承载力特征值为 $f_a=140\text{ kPa}$, 试设计该挡土墙。

解: 本算例截面尺寸的寻优取值范围选定为 $x \in [0.4, 1]$, $y \in [0, 2]$ 。应用本文方法与文献[5]的方法对该重力式挡土墙进行优化的结果见表1。

表1 优化结果对比

方法	x	y
文献[5]方法	0.400	1.392
本文方法	0.402	1.406

通过本文方法与文献[5]方法的对比, 表明其结果较优, 误差很小, 能达到对工程优化设计的目的。最后根据设计要求可取上部宽度为 $x=0.4\text{ m}$, 底部宽度为 $x+y=1.8\text{ m}$ 。

按《规范》方法进行验证: $K_s=1.454 > 1.3$, $K_1=1.706 > 1.6$, $p_{\max}=165.856\text{ kPa} < 1.2f_a=168\text{ kPa}$, 显然能满足要求。

4 结论

1) 采用遗传算法对重力式挡土墙截面进行优化设计, 具有准确、方便、快捷等优点。

2) 由于 Matlab 具有强大的矩阵运算功能, 使我们能将更多的时间用在优化问题上而非程序的设计上。

参 考 文 献

- [1] 郑宏, 俞茂宏. 基于遗传算法的钢结构优化设计[J]. 长安大学学报, 2002, 22(5): 67-69.
- [2] GB 50007-2002 建筑地基基础设计规范.
- [3] 苏晓生编著. 掌握 MATLAB 6.0 及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [4] 黄太华, 袁健. 关于重力式挡土墙截面尺寸确定方法的探讨[J]. 岩土工程技术, 2004, 18(5): 28-29, 33.
- [5] 袁健, 黄太华. 挡土墙截面设计直接计算方法[J]. 岩土工程技术, 2007, 21(2): 33-35.
- [6] 纪桂民, 林凌锋. 基于 Matlab 语言的重力式挡土墙优化设计[J]. 工程设计与设计, 2007(6): 53-55.
- [7] 黄冀卓, 王湛, 龚明袖. 遗传算法在钢结构截面优化设计中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2005(3): 31-36.
- [8] 张晶, 翟鹏程, 张本源. 惩罚函数法在遗传算法处理约束问题中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(2): 56-59.

收稿日期: 2007-09-17

(上接第23页)

数, 与膨胀土的类型、土性和干密度有关, 对于南宁中等膨胀土 $A=0.1233$, $B=-0.1515$; r 为膨胀能释放系数, 它表征了不同类型膨胀土在不同干密度下的膨胀潜能。本次实验测得, 对于南宁中等膨胀土, 膨胀能释放系数最大值 $r_{\max}=0.082$, 此时 ρ_1 取最大干密度 $\rho_{1\max}=1.89\text{ g/cm}^3$ 。

4 结论

1) 基于“理想膨胀土”假定, 可以将膨胀土吸水产生膨胀力的过程, 看作是释放“存储”的膨胀能的过程, 含水量的增加(吸水)只是触发这一过程的外因, 实质是来自压缩应力历史。

2) 静力压实功和对应的膨胀释放能均与初始含水率近似成线性反比关系, 与干密度成线性正比关系。

3) 干密度是影响静力压实功和膨胀释放能的主要因素。

4) 膨胀能释放系数受初始含水率波动较小, 受

干密度影响很大, 且随干密度增大而线性增大。

参 考 文 献

- [1] 谢云, 陈正汉, 李刚, 等. 南阳膨胀土三向膨胀力规律研究[J]. 后勤工程学院学报, 2006(1): 11-15.
- [2] 肖宏彬, 范臻辉, 王永和, 等. 膨胀土单向浸水膨胀规律的试验研究[C]// 第八届全国地基处理学术讨论会论文集. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2004: 47-50.
- [3] 苗鹏, 肖宏彬, 张春顺. 膨胀土上桩负摩阻力的时程性研究[J]. 株洲工学院学报, 2006, 20(6): 98-100.
- [4] 苗鹏, 肖宏彬. 不同初始条件对膨胀土剪切特性的影响研究[J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(6): 19-22.
- [5] 李凤起, 姚建平, 赵冬生, 等. 膨胀土地基原位膨胀力试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报, 2005, 21(1): 29-31.

收稿日期: 2007-12-13