

膨胀土单向浸水膨胀时程特性试验与应用研究

袁俊平, 陈 剑

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 通过膨胀土单向浸水膨胀试验,研究了单向浸水条件下膨胀土的膨胀时程特性,并运用神经网络方法对试验拟合参数进行了预测.结果表明:膨胀土的膨胀过程可分为吸水膨胀、加速膨胀和缓慢膨胀 3 个阶段,各阶段膨胀速率与时间呈半对数关系;试验拟合参数与初始干密度及含水量有关.利用修正的分层总和法可计算单向浸水边界条件下的膨胀土层任意时刻的膨胀变形量.通过裂隙两侧土体随时间膨胀过程的计算,可刻画出裂隙逐渐愈合的过程.

关键词 膨胀土;单向浸水膨胀;神经网络;膨胀变形;裂隙

中图分类号 :TU443

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2003)05-0547-05

众所周知,膨胀土浸水以后所发生的体积变化表现为强烈的膨胀性.不同边界条件下的膨胀土体,浸水后膨胀变化过程不尽相同,对边坡与基础工程的影响也随着时间而变化.特别是膨胀土边坡失稳破坏所具有的渐近性和长期性的特点,与膨胀变形随时间发展的规律密切相关.明确膨胀土的膨胀时程特性,对膨胀土边坡与基础工程的膨胀变形预测及工程设计施工等有一定的实际意义.

目前,对膨胀变形量或膨胀力与土样初始含水量、干密度及上覆压力间关系的研究较多^[1~8],而对非饱和膨胀土的浸水膨胀过程研究较少.为此,笔者通过试验,对膨胀土浸水膨胀过程进行了研究.虽然膨胀土的浸水变形规律的试验研究已经从一维发展到三维^[6],但考虑到膨胀土发生膨胀变形时的浸水条件一般为地表降雨或地下水位的提高,属单向浸水条件,为简化问题起见,研究中仍采用单向浸水试验方法.

1 膨胀土的单向浸水试验

1.1 试样制备

试验中所用土样取自湖北枣阳大岗坡二级站引水渠膨胀土渠坡,为冲洪积膨胀土,土体呈棕黄色,其中混夹灰白蒙脱,属中等膨胀性.试样采用如下方法进行制备:(a)将碾散的风干土样过 2 mm 筛,充分拌匀.(b)将土样分层铺在盆里,每铺一层用喷雾器喷加水至稍湿,再铺加下一层,完成后土样上加盖塑料布放置 4~6 h,然后用塑料袋将搅拌均匀的土样装起,袋口扎紧后放置于保湿缸内 24 h 以上以保证土样中水分均匀.(c)用烘干法量测土样的含水量($T=105\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t\geq 8\text{ h}$).按设计的干密度计算所需土样质量.(d)将两环刀背靠背放置于较大的平整垫块上,将称好的土样均匀地放入环刀内;在上面的环刀中放入一个外径与环刀内径相同、高度与环刀等高的金属垫块;用油压千斤顶将上面的金属垫块均匀地压入环刀内,直到垫块与环刀相平为止.

1.2 试验仪器与试验条件

采用常规固结仪进行膨胀土的单向浸水膨胀试验.由于膨胀土坡发生滑动失稳一般在浅层,故试验土样的上覆压力不宜取得过大,取为 25 kPa.浸水水位不高于试样高度的一半.

1.3 试验过程

试验过程为:(a)将制备好的试样两面加贴薄型滤纸,上下放置透水石,施加荷载直到稳定为止.(b)加水并开始计时.(c)开始时每 2 min 读取百分表示数 1 次,待膨胀速率降低后将时间间隔适当加长.试验进行到膨胀量 $\delta < 0.1\text{ mm/d}$ 时为止.(d)试验结束后,吸去容器中的水,卸除荷载,取出试样称重,并测定其含水量.

1.4 试验结果

总共进行了 3 组不同初始含水量试样的浸水膨胀试验,每组各试样初始干密度各不相同.试验膨胀过程线如图 1 所示.

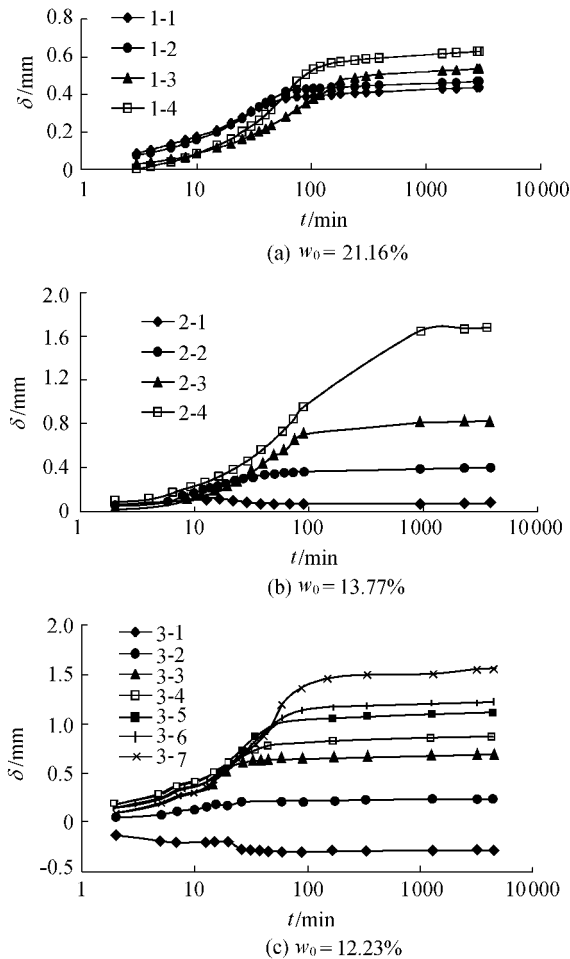


图 1 膨胀过程线
Fig.1 Expansion process

2 膨胀土浸水膨胀规律

试验结果表明 相同初始含水量情况下,土体最终膨胀量随初始干密度的增大而增大 ;当土体干密度较小时,由于浸水后土体团粒结构塌陷,土体体积不但不膨胀,反而会收缩,从而造成土体湿陷(见图 1(a)中样 2-4 和图 1(c)中样 3-7) 初始含水量越低,土体的最终膨胀量越大.

试验结果还表明,土体的膨胀变形随时间发生变化,膨胀变形过程线呈 S 形.膨胀变形过程大体上可分为 3 个阶段(见图 2) :(a)吸水膨胀阶段 ;(b)加速膨胀阶段 ;(c)缓慢膨胀阶段.第 1 阶段土体膨胀发生在浸水表面,吸力较大,吸水较快,膨胀速率较高.随着水分在土体内的深入,土水交界面扩大,土体开始完全膨胀而进入第 2 阶段的加速膨胀阶段.随着土体水分的增加,土体中吸力逐渐降低,吸水量逐渐减少,土体进入缓慢膨胀的第 3 阶段.此时,由于水分的增加,粘土颗粒间胶结部分可能由于水解而形成土体团粒结构崩坍,土体可能因湿化而体积减小,膨胀速率进一步降低甚至可能为负(即湿陷).为描述 3 个阶段膨胀变形的规律,可在半对数图上将 3 个阶段分别简化拟合为直线段(见图 2).其中各阶段均可表示为

$$\delta = a_i \lg t + b_i \qquad (i = 1,2,3)$$

(1)

式中 : a_i ——各直线段的斜率 ; b_i ——各直线段在纵轴上的截距.对试验结果的拟合情况如表 1 所示.

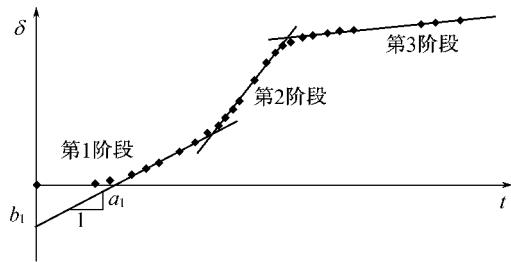


图 2 单向浸水膨胀变化的 3 个阶段

Fig.2 Three stages of one-side immersion induced-expansion

表 1 单向浸水膨胀试验情况

Table 1 Test details of one-side immersion induced-expansion

试样编号	$w_0/\%$	ρ_d $/(g \cdot cm^{-3})$	拟合参数					
			a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3
1-1	21.16	1.43	0.184	-0.004	0.319	-0.165	0.029	0.336
1-2	21.16	1.43	0.163	-0.004	0.365	-0.235	0.033	0.362
1-3	21.16	1.51	0.072	-0.002	0.362	-0.359	0.042	0.391
1-4	21.16	1.51	0.275	-0.191	0.584	-0.640	0.046	0.471
2-1	13.77	1.37	0.005	0.060	0.065	0.044	-0.080	0.205
2-2	13.77	1.48	0.108	0.006	0.309	-0.141	0.024	0.317
2-3	13.77	1.56	0.076	-0.001	0.671	-0.643	0.076	0.565
2-4	13.77	1.70	0.178	0.024	0.801	-0.695	0.049	1.507
3-1	12.23	1.35	-0.266	-0.017	-0.168	-0.003	0.013	-0.328
3-2	12.23	1.45	0.122	0.003	0.153	-0.019	0.016	0.180
3-3	12.23	1.50	0.356	0.017	0.592	-0.230	0.020	0.609
3-4	12.23	1.55	0.387	0.022	0.489	-0.033	0.034	0.743
3-5	12.23	1.60	0.345	0.015	0.927	-0.600	0.039	0.969
3-6	12.23	1.65	0.319	-0.005	0.965	-0.618	0.060	1.328
3-7	12.23	1.75	0.294	-0.001	0.898	-0.629	0.038	1.075

3 试验拟合参数的预测方法

由于膨胀土体的膨胀性随着初始含水量和干密度的变化而变化,因此表 1 中的试验拟合参数也与膨胀土体初始含水量及干密度之间存在相关关系.图 3 和图 4 表示了试验拟合参数随膨胀土干密度和初始含水量变化的情况.从图 3,4 中可以看出,试验拟合参数与膨胀土体初始含水量及干密度之间存在一定的相关关系.但要全面统计出试验拟合参数随初始含水量及干密度变化的规律并以曲线形式对其进行拟合还需进行大量的试验.从表 1 中样 1-1,1-2 和样 1-3,1-4 两组对比情况来看,由于土样性质不尽相同,而且试验过程中也很难完全保证加荷与浸水条件完全一致,因此上述膨胀过程的试验拟合参数总会有一定的离散性,它们与初始含水量及干密度的关系也很难直接进行曲线拟合.

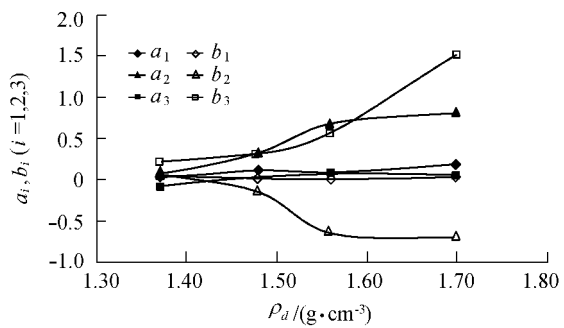


图 3 试验拟合参数随干密度的变化

Fig.3 Fitting parameters vs. dry density

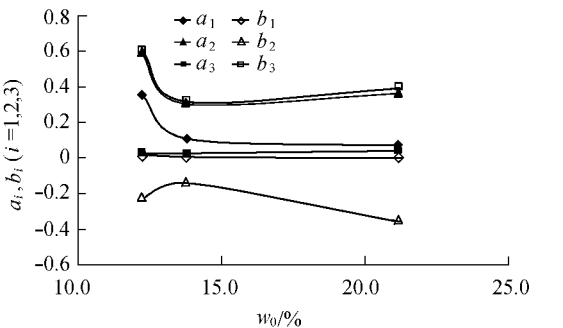


图 4 试验拟合参数随初始含水量的变化

Fig.4 Fitting parameters vs. initial water content

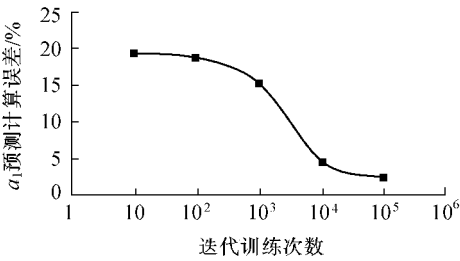


图 5 预测误差与迭代训练次数的关系

Fig.5 Error of prediction vs. iterative training times

应用神经网络方法不仅可对试验结果进行统计分析,而且还可对试验拟合参数进行预测,以减少浸水膨胀试验工作量和试验拟合参数的误差.本文采用的是前馈-反馈网络.这里影响试验拟合参数 a_i 和 b_i 的主要有土体的初始含水量和干密度 2 个指标,故与之相对应的神经网络输入层为 2 个单元.为简化神经网络的训练,分别对每个参数(a_i 和 b_i)进行神经网络训练和预测计算,因此输出层取为 1 个单元.为保证尽可能地反映试验拟合参数与土体初始含水量及干密度间的相关关系,同时又不使网络结构过于复杂,网络设计为输入层、输出层和中间层 3 层,其中中间层设置了 4 个元素.2 层间的传递函数分别为 $t(x)$ 和 $p(x)$.

$$t(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad p(x) = x \tag{2}$$

应用 Matlab 中的神经网络工具箱可方便地进行神经网络的训练与模拟,可在较少土样试验数据情况下,经过适当次数的网络迭代训练后,对不同初始含水量和干密度情况下土体的膨胀性参数进行较好的预测,如图 5 所示.

4 应用研究

4.1 考虑时间因素的膨胀土单向浸水变形量计算

据文献[9],为了方便地计算不同厚度土层的膨胀量,应将前述试验拟合计算中采用的膨胀变形量转换成膨胀率,这只需将相应的试验拟合参数乘以常数 0.05 就可以了.那么,考虑时间因素的膨胀土单向浸水条件下膨胀变形量计算公式为

$$S_{et} = \psi_e \sum_{i=1}^n \delta_{epit} \beta h_i \tag{3}$$
$$\beta = \begin{cases} \left[\frac{(S_{r,i-1}, S_{r,i}, S_{r,i+1})_{\min}}{(S_{r,i})} \right]^4 & (\delta_{epit} > 0) \\ 1 & (\delta_{epit} < 0) \end{cases}$$

式中: ψ_e ——某一区域膨胀土浸水变形的综合影响系数; $S_{r,i}, S_{r,i-1}, S_{r,i+1}$ ——第 $i, i-1, i+1$ 土层的饱和度,若 i 为第一层或最后一层,则式中 $(S_{r,i-1}, S_{r,i}, S_{r,i+1})_{\min}$ 用 $(S_{r,i}, S_{r,i+1})_{\min}$ 或 $(S_{r,i-1}, S_{r,i})_{\min}$ 代替; h_i ——第 i 层土的厚度; δ_{epit} ——用本文方法预测得到的 t 时刻第 i 层土在一定压力下的膨胀率.

式(3)适用于膨胀土在单向浸水条件下任意时刻膨胀变形量的计算.由于膨胀率 δ_{epit} 综合考虑了膨胀土在浸水湿化过程中的膨胀变形和湿陷变形,因此,土体无论是处于膨胀状态还是处于湿陷状态,式(3)总可以考虑膨胀土单向浸水时的湿化变形.

4.2 膨胀土中裂隙随时间愈合变形计算

包含裂隙的膨胀土,在浸水膨胀过程中裂隙会逐渐愈合.愈合过程可通过计算裂隙两侧土体随时间变化的膨胀量来反映.具体计算方法为:设裂隙初始宽度为 δ_0 ,裂隙两侧土体土性相同,厚度分别为 h_a, h_b ,膨胀变形计算参数为 $a_i, b_i (i = 1, 2, 3)$,膨胀过程曲线折点时刻为 t_1, t_2 ,所处应力状态下最终膨胀率为 δ_{ep} .需要说明的是,裂隙两侧土体计算厚度,或取裂隙间距(或裂隙面到自由面的距离,见图 6),或取水分可浸润有效厚度.于是,裂隙两侧土体在 t 时刻的膨胀量为

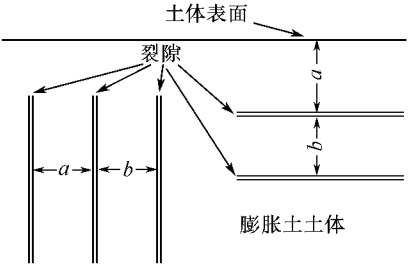


图 6 裂隙两侧土体计算厚度示意图
Fig.6 Calculated soil depth at both sides of fissures

$$\delta_{a(b)}(t) = \begin{cases} 0.05(a_1 \lg t + b_1) h_{a(b)} & (t < t_1) \\ 0.05[a_1 \lg t_1 + b_1 + a_2 \lg(t - t_1) + b_2] h_{a(b)} & (t_1 \leq t < t_2) \\ 0.05[a_1 \lg t_1 + b_1 + a_2 \lg(t_2 - t_1) + b_2 + a_3 \lg(t - t_2) + b_3] h_{a(b)} & (t \geq t_3) \\ \delta_{ep} h_{a(b)} & (\delta_{a(b)}(t) > \delta_{ep} h_{a(b)}) \end{cases}$$

这样, t 时刻裂隙的宽度减小为 $\delta_t = \delta_0 - (\delta_a + \delta_b)/2$. 当 $\delta_t = 0$ 时, 可认为裂隙已完全闭合, 此时裂隙的渗透和力学特性与周围土体完全一致.

5 小 结

- a. 膨胀土的浸水变形量与浸水条件有关, 单向浸水膨胀试验能比较真实地反映膨胀土受降雨或地下水位上升所引起的膨胀变形情况. 土体初始含水量较低且干密度较大时, 其膨胀变形量较大, 反之较小, 甚至可能出现湿陷.
- b. 膨胀土浸水变形量的增长随时间的增长而增大. 该过程可分为吸水膨胀、加速膨胀、缓慢膨胀 3 个阶段. 膨胀变形历时曲线可用分段直线来拟合, 在上覆压力一定的情况下, 其拟合参数与土体干密度及初始含水量有关, 并可用神经网络方法进行统计计算和预测.
- c. 利用修正的分层总和法可以计算膨胀土地基遇水时任意时刻的膨胀变形量.
- d. 通过计算分析可得出裂隙两侧土体随时间膨胀变化的过程, 从而可刻画出裂隙逐渐愈合的过程.

参考文献：

[1] 邵梧敏, 谭罗荣, 张梅英, 等. 膨胀土的矿物成分与膨胀性的关系研究[J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 11—29.
[2] 李生林, 秦素娟, 薄遵昭, 等. 中国膨胀土工程地质研究[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992. 1—22.
[3] 徐永福, 龚友平, 殷宗泽. 宁夏膨胀土膨胀变形特征的试验研究[J]. 水利学报, 1997(9): 27—30.
[4] 徐永福. 宁夏膨胀土膨胀变形的速率过程参数的确定[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(5): 100—102.
[5] 王园. 膨胀土的变形性能[J]. 工程勘察, 1997(5): 14—18.
[6] 刘祖德, 王园. 膨胀土浸水三向变形研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(6): 16—21.
[7] 缪林昌, 仲晓晨, 殷宗泽. 非饱和膨胀土变形规律的试验研究[J]. 大坝观测与土工测试, 1999, 23(3): 36—39.
[8] 朱建强. 水分对膨胀土膨胀变形与膨胀压力的影响研究[J]. 湖北农学院学报, 1999, 19(1): 59—61.
[9] 孙长龙, 王宝田, 殷宗泽, 等. 宁夏膨胀土地基浸水变形规律试验研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(2): 82—85.

Experimental research on swelling characteristics of expansive soil under one-side immersion and its application

YUAN Jun-ping, CHEN Jian

(Geotechnical Research Institute of Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract The expansion time-travel characteristics of expansive soil under one-side immersion are studied by one-side immersion swelling tests. The research shows that the swelling process can be divided into three stages, i. e. initial swelling, accelerating swelling, and steady swelling, and that the expansion rate is of a semi-logarithmic relationship with time at each stage. The fitting parameters, varying with initial dry density and water content, are predicted by the neural network method. Furthermore, a method is presented to calculate the swelling deformation of expansive soil layers under one-side immersion. By calculation of the swelling process of soil at both sides of fissures, the closing process of fissures is reflected.

Key words expansive soil; one-side immersion-induced swelling; neural network; swelling deformation; fissure