

红黏土的胀缩特性及对检测压实度的影响研究

高江林^{1,2}, 傅琼华^{1,2}, 邹晨阳^{1,2}

(1. 江西省水利科学研究院, 南昌 330029; 2. 江西省水工安全工程技术研究中心, 南昌 330029)

摘要: 针对江西红黏土堤坝填筑工程后期检测存在的压实度变化问题, 通过对同一土样进行不间断的收缩、膨胀试验, 研究了自然干湿循环作用下典型红黏土压实土样的胀缩特性及机理, 并对后期压实度的检测偏差进行了分析。试验结果表明: 自然干湿循环作用下, 压实红黏土具有明显的干缩湿胀特性; 无荷载作用时, 土样表现出明显的膨胀特性, 绝对膨胀率随循环次数的增加而增大, 最大膨胀率达 12.88%; 有荷载作用时, 随循环次数的增加表现出压缩特征, 且荷载越大, 压缩特征越明显。红黏土工程后期压实度的检测结果较施工过程有较大偏差, 且不同干湿状态时检测的结果也有明显差异, 在后期检测评定中应予以考虑, 同时提出了减小偏差的建议。

关键词: 水利工程施工; 胀缩变形; 自然干湿循环; 红黏土; 压实度检测

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.11660/sfdxb.20161112

Swell-shrink behaviors of lateritic clay and their effect on test compactness

GAO Jianglin^{1,2}, FU Qionghua^{1,2}, ZOU Chenyang^{1,2}

(1. Jiangxi Provincial Institute of Water Science, Nanchang 330029; 2. Jiangxi Provincial Research Center on Hydraulic Structures, Nanchang 330029)

Abstract: Aiming at the problem that the compactness of earthworks in Jiangxi varies in the later tests on lateritic clay embankment, this study has explored swell-shrink properties and mechanism of typical compacted lateritic clays under natural dry-wet cycling by applying a continuous swell-shrink procedure on the same soil sample, and conducted an analysis on the biases of compactness tests. The results indicate that in the case of natural dry-wet cycling, compacted lateritic clay shows significant shrinkage and swell. When no load was applied, the soil sample swelled obviously, and its absolute swell ratio increased with an increase in cycling times, reaching a peak swell ratio of 12.88%. Application of loads made a soil sample compressed: the greater load was applied, the more significant the compression was; an increase in cycling times under loading condition caused greater compression. Thus, in assessing construction quality, we must consider that compactness tests of lateritic clay earthworks performed in the later stages have biases significantly greater than those tested in the initial stage at the time of construction. In addition, similar biases will occur if dry-wet cycles are applied. A method for reducing the biases is suggested in this paper.

Key words: construction of hydro project; swell-shrink deformation; natural dry-wet cycling; lateritic clay; compactness test

0 引言

我国国土上广泛分布着不同类型的特殊土类,

如膨胀土、湿陷性黄土、冻胀土、红黏土等, 由于土的物质成分、结构特征及形成过程的不同, 其工程特性往往存在显著差异^[1]。红黏土主要指石灰岩

收稿日期: 2016-03-24

接受日期: 2016-08-19

基金项目: 江西省水利厅科技项目(KT201301; KT201414; KT201516)

作者简介: 高江林(1981—), 男, 高级工程师。E-mail: gaojianglin@163.com

或其他熔岩经风化后形成的富含铁铝氧化物的褐红色粉土或黏土,多处于雨旱交替频繁地区。红黏土在江西省境内分布广泛。由于具有较小的渗透系数和良好的力学特性,红黏土大量应用于堤坝土方填筑工程。

压实度是反映堤坝土方填筑质量的主要指标,对于黏性土一般采用环刀法进行检测。水利工程验收检测多在实体工程完工一定时期后进行,是对工程最终实体质量的反映,对于工程质量控制和验收把关具有重要意义。然而,笔者在实际红黏土堤坝工程的土方检测工作中发现,后期检测的压实度往往与施工过程存在一定偏差,从而影响最终工程质量的评定。如江西某大型水利枢纽防护工程的土方填筑工程,通过降雨前后土方压实度的对比试验发现^[2],雨后检测的压实度明显减小(取样深度为 0.1 m 时,压实度从 94.6% 下降至 87.7%;取样深度为 0.3 m 时,压实度从 94.5% 下降至 92.8%;取样深度为 0.5 m 时,压实度从 94.2% 下降至 94.0%),深度越小压实度减小越明显;江西省某中型水库大坝土方回填工程,施工过程检测压实度的平均值为 95.2% (2013 年 1 月,施工层面取样 20 组),完工一定时期后检测压实度的平均值为 98.2% (2014 年 7 月,采用薄壁取土器钻孔取样 9 组,深度 2.8 ~ 10.3 m),后期检测结果明显大于施工过程结果。由此可见,在实际工程条件下,完工一定时期后检测的压实度可能与施工过程中存在明显偏差,为实现后期压实度的准确检测与评定,有必要对压实红黏土在自然条件下的后期体变特性进行研究。

目前关于黏土体变特征的研究大多集中在膨胀土领域,尤其在干湿循环条件下的胀缩特性方面国内外学者开展了大量的试验研究工作^[3-7]。多数成果表明,膨胀土具有明显的收缩膨胀特性,在多次循环作用下,试样表现出持续膨胀的不可逆体变特征。杨和平等^[7]对荷载作用下膨胀土的胀缩变形进行了研究,并分析了干湿循环条件下荷载作用对胀缩率变化的影响。

国内学者针对不同地域红黏土的体变规律开展了一定的研究。杨庆等^[9]对大连红黏土、南京膨胀土的强度特性进行了试验研究,认为红黏土具有与膨胀土类似的吸水膨胀规律。赵颖文等^[10-11]通过对广西红黏土进行相对独立的吸湿-脱湿试验,认为红黏土具有明显的干缩湿胀特性,但由于矿物组成的差异,其力学特性和水敏性特征与贵阳红黏土

及荆门膨胀土均有明显差异。

干湿循环条件下土样体变特性的量化研究,一般可采用非饱和土的本构关系进行模拟。魏星等^[12]在经典的非饱和土本构模型 (BBM) 的基础上,通过引入可逆性和不可逆性干湿循环体变的数学描述,建立了膨胀土干湿循环的本构模型,得到了较好的模拟效果。李舰等^[13]基于 BBM 模型,提出了适用于吸力循环作用的膨胀性非饱和土本构模型,通过与试验数据的对比,认为该模型能较好地模拟吸力循环作用下产生的累积变形及随循环次数增加逐步趋于平衡的特性。

综上所述,红黏土在干湿循环条件下存在收缩膨胀特性,但不同类型土类存在显著差异。为分析江西红黏土堤坝工程中土体的后期体变情况,有必要对自然干湿循环条件下压实红黏土的胀缩特性进行研究,成果可为红黏土地区堤坝土方工程的压实度检测方法及时体变量化模拟研究提供参考。

1 研究方法

1.1 试验仪器与方法

红黏土多处于雨旱交替地区,为更好地反映自然条件下的工程实际情况,宜对同一土样进行不间断的收缩、膨胀试验。SL 237—1999《土工试验规程》(下文简称《规程》)中土的无荷载膨胀率、有荷载膨胀率及收缩试验需分别采用膨胀仪、固结仪和收缩仪进行。分别在不同仪器上进行土样的收缩、膨胀试验,反复取装样易造成土样扰动甚至破坏,从而影响试验结果。为此,本文利用杠杆式固结仪同时进行收缩、膨胀试验,实现在同一仪器上进行同一土样的反复收缩膨胀试验。同时,为满足收缩试验的透水要求,对试验环刀进行了加工。试验仪器为 WG-1B 型三联中压固结仪,试验环刀直径 61.8 mm,高 20 mm。试验原理、杠杆式固结仪和试验环刀如图 1、图 2 所示。

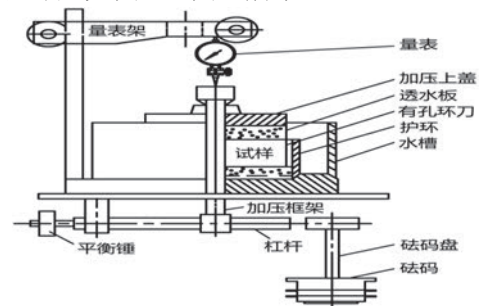


图 1 收缩膨胀试验示意图

Fig. 1 Schematic of swell-shrink test

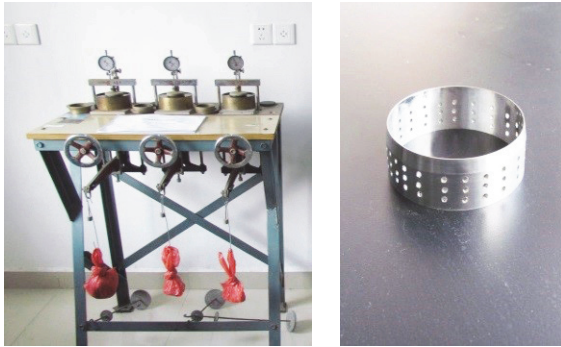


图2 杠杠式固结仪与多孔环刀

Fig. 2 Oedometers and porous cutting ring

本文与《规程》中试验条件的主要区别在于本文试验土样侧面为多孔环刀, 而传统收缩试验土样侧面无环刀作用, 传统膨胀试验土样侧面为普通环刀。由于收缩试验土样为轴向和侧向同时收缩, 同时根据多孔环刀和普通环刀的土样胀缩试验对比 (见图 3, 土样压实度为 96%), 说明本文试验土样侧限条件的改变对于试验结果总体规律的分析影响较小。

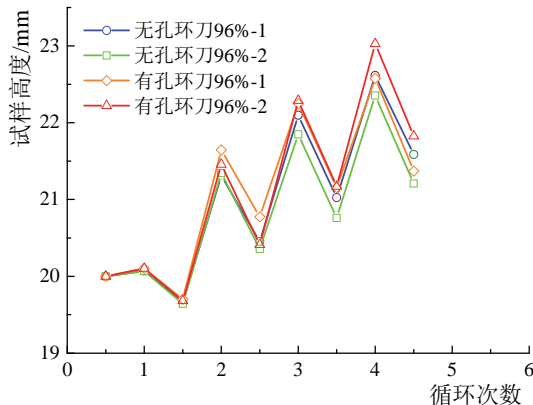


图3 无荷载作用时多孔和无孔环刀的胀缩循环过程

Fig. 3 Process of swell-shrink cycling of porous cutting ring and common cutting ring without loads

为真实反映实际工程中压实红黏土的体变规律, 采用自然风干和浸水膨胀措施模拟自然条件下的干湿循环作用。具体试验步骤如下: ①按设定压实度制备土样, 用多孔环刀切取试样; ②将环刀试样装入试验固结仪, 安装好百分表, 记录初始读数; ③在水盒中注入纯水, 记录开始时间, 按 5 min、10 min、20 min、30 min、1 h、2 h、3 h、6 h、12 h 等时间记录百分表读数, 以 6 h 内试样变形不超过 0.01 mm 作为膨胀试验终止条件; ④达到湿胀终止条件后, 吸去水盒中的水, 保持通风条件, 开始自然收缩试验, 并记录开始时间, 根据室内温度及收缩速度每隔 1 ~ 4 h 记录百分表读数, 2 天后

每隔 16 ~ 24 h 记录百分表读数, 以 2 次读数相同作为收缩试验终止条件; ⑤达到干缩终止条件后, 重新向水盒注入纯水开始膨胀试验, 重复步骤 3, 如此循环进行自然条件下的收缩膨胀试验, 记录相应的土样变形值。

1.2 试验方案

自然条件下非饱和土体受降雨和蒸发影响较大的干湿循环区域具有一定深度界限^[14], 参考部分学者有关非饱和土边坡降雨入渗的监测成果^[15-18], 土体含水率变化较大的区域多在 1.0 m 深度以上。此外, 对于一般堤坝土方工程, 主要采用浅层开挖的环刀法进行压实度检测 (取样深度一般不超过 1.0 m)。因此, 本文分别取 0.0 m、0.3 m、0.5 m、1.0 m 四个深度的荷载进行试验。此外, 考虑实际土方填筑工程以最优含水率进行施工填筑, 仅对最优含水率条件下的压实土样进行研究。

试验方案如表 1 所示, 以压实度为 96% 的土样为例, 相同试验条件下制备 2 个平行样。

表 1 收缩膨胀试验方案
Table 1 Schemes of swell-shrink tests

试验内容	荷载/ kPa	对应的土样 深度/m	循环 次数	压实度	含水率
不同荷载 时的收缩 膨胀试验	0.00	0.0		96%	23.2% (击实最 优含水 率)
	1.92	0.1	4		
	3.84	0.2			
	5.76	0.3	5		
	9.60	0.5			
	19.20	1.0			

2 红黏土的基本物理特性

试验土样取自江西省余江县洪湖水库大坝坝体土, 呈红褐色。试验土样的基本物理指标如表 2 所示, 参照《规程》塑性图分类, 土样定名为低液限黏土。

3 压实红黏土的收缩膨胀特性

3.1 胀缩率的计算方法

采用绝对膨胀率、相对膨胀率、绝对线缩率、相对线缩率进行土样的收缩膨胀特性分析。

某时刻的无荷载膨胀率为:

$$\delta_t = \frac{R_t - R_0}{h_0} \times 100 \quad (1)$$

表 2 土样的基本物理指标

Table 2 Physical properties of soil samples

分类名称	土粒比重 G_s	液限 $W_L/\%$	塑限 $W_p/\%$	塑性指数 I_p	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	击实特性 (轻型)		颗粒组成/%							
						最大干密度 $\rho_{dmax}/(g/cm^3)$	最优含水率 $w_{op}/\%$	砾粒 (角砾)			砂粒			粉粒 (0.075 ~ 0.005 mm)	黏粒 (< 0.005 mm)
								粗(60.0 ~ 20 mm)	中(20.0 ~ 5 mm)	细(5.0 ~ 2.0 mm)	粗(2.0 ~ 0.5 mm)	中(0.5 ~ 0.25 mm)	细(0.25 ~ 0.075 mm)		
低液限黏土	2.69	44.5	26.3	18.2	10	1.56	23.2	—	—	0.1	1	1.4	9.9	72.7	14.9

式中： δ_t 为 t 时刻的无荷载膨胀率，%； R_t 为 t 时刻量表的读数，mm； R_0 为试验开始时量表的读数，mm； h_0 为试样初始高度，mm。

压力下 p 作用下的膨胀率：

$$\delta_{ep} = \frac{R_p + \lambda - R_0}{h_0} \times 100 \quad (2)$$

式中： δ_{ep} 为压力 p 作用下的膨胀率，%； R_p 为压力 p 作用下膨胀稳定后量表的读数，mm； λ 为压力 p 时的仪器变形量，mm； R_0 为试压力为零时量表的读数，mm； h_0 为试样初始高度，mm。

线缩率按下式计算：

$$\delta_{si} = \frac{R_i - R_0}{h_0} \times 100 \quad (3)$$

式中： δ_{si} 为试样在某时刻的线缩率，%； R_i 为 i 时刻量表的读数，mm； R_0 为试验开始时量表的读数，mm； h_0 为试样初始高度，mm。

相对膨胀（线缩）率为土样多次干湿循环过程中的某次膨胀（收缩）过程中试样的高度增量与本次膨胀（收缩）前试样高度的比值。

3.2 收缩膨胀特性分析

根据表 1 制备压实度为 96% 的土样，分别施加不同深度所对应的土压力进行有荷载的收缩膨胀试验，土的重度按 19.2 kN/m³ 计算。

不同荷载作用下的试样在自然干湿循环过程中的高度变化如图 4 所示，干湿循环条件下压实红黏土试样均具有明显的湿胀干缩特征，无荷载作用时，随着循环次数增加，土样表现出明显的膨胀特性，经历一次干缩后单次循环的膨胀量明显增加，且随循环次数增加呈不断发展趋势，表现出不可逆膨胀特征。有荷载作用时，干湿循环过程中的膨胀特性明显减小，且当荷载深度大于 0.2 m 时，土样表现出一定的收缩特征，荷载越大，收缩特征越明显。

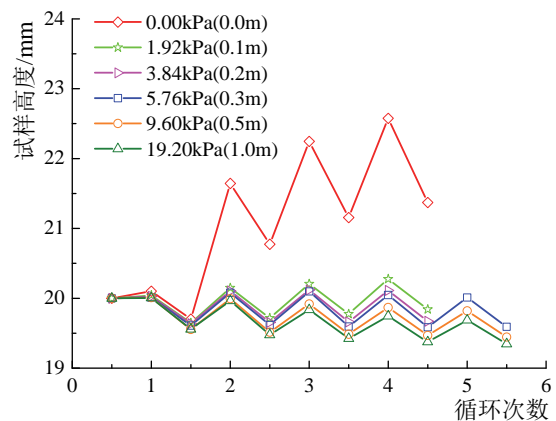


图 4 不同荷载条件下的胀缩循环过程

Fig. 4 Processes of swell-shrink cycling under different loads

为反映土样收缩膨胀对体积变化的影响程度，分别列出胀缩率随循环次数的变化规律，如图 5 ~ 图 8 所示。

从图 5 可以看出，土样的膨胀率、随循环次数的变化规律与荷载大小密切相关。无荷载作用时的绝对膨胀率随着循环次数增加，但增长速率逐步趋缓，随着荷载的增大，绝对膨胀率随循环次数增加而逐步减小。不同荷载土样经多次循环后的绝对膨胀率分别为 12.88%、1.38%、0.56%、0.05%、-0.90%、-1.56%。当深度荷载大于 0.5 m 时，即使在湿胀状态，土样体积仍小于初始状态，表现出明显的收缩特征。

相对膨胀率（见图 6）随循环次数的增加，表现为先增大后减小（第 2 次膨胀时最大），并逐步趋于稳定。不同荷载土样经多次循环后的相对膨胀率分别为 6.71%、2.53%、2.29%、2.17%、1.81%、1.61%，荷载越大相对膨胀率越小。

绝对线缩率（见图 7）随循环次数的变化关系同样受荷载影响明显，荷载越大，绝对线缩率越大。不同荷载土样经多次循环后的绝对线缩率分别为 -6.85%、0.80%、1.65%、2.04%、2.78%、3.26%。无荷载作用时，即使是干缩状态，土样体积较初始

状态均发生了明显膨胀。

无荷载作用时, 相对线缩率(见图8)随循环次数增加表现逐步增大, 有荷载作用时则表现为先增后减, 且荷载越大相对线缩率越小。经多次循环后的相对线缩率分别为 5.34%、2.15%、2.19%、2.10%、1.89%、1.73%。

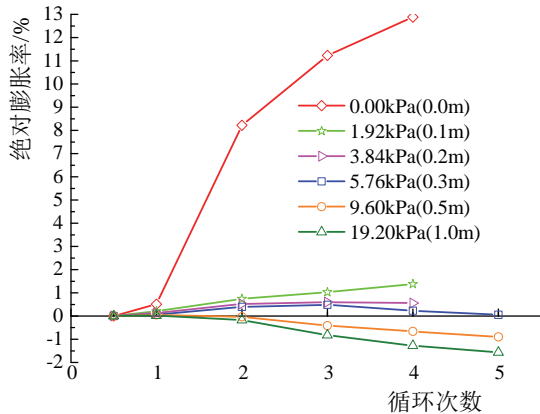


图5 绝对膨胀率随循环次数的变化关系

Fig. 5 Variations of absolute swell ratio with cycling times under different loads

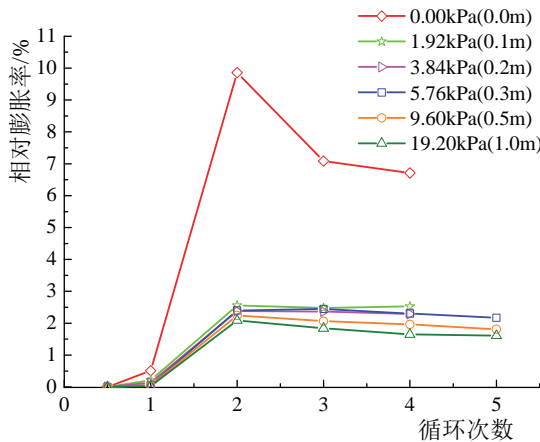


图6 相对膨胀率随循环次数的变化关系

Fig. 6 Variations of relative swell ratio with cycling times under different loads

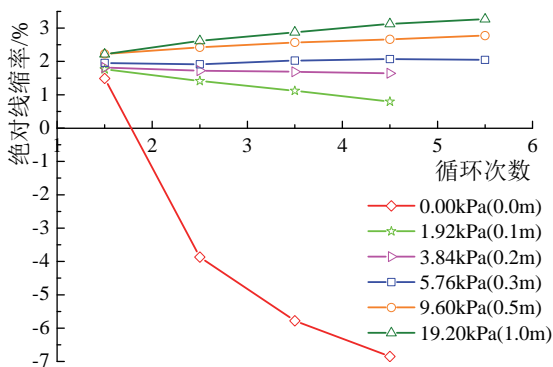


图7 绝对线缩率随循环次数的变化关系

Fig. 7 Variations of absolute linear shrinkage ratio with cycling times under different loads

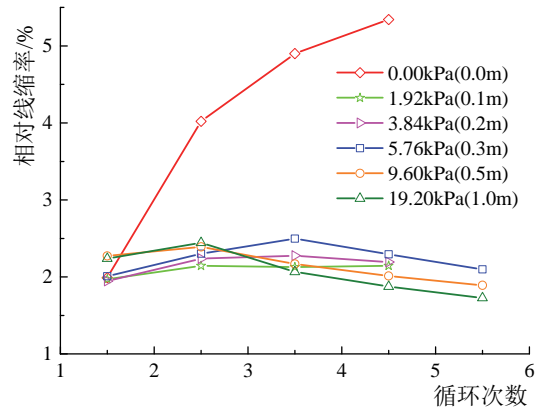


图8 相对线缩率随循环次数的变化关系

Fig. 8 Variations of relative linear shrinkage ratio with cycling times under different loads

根据无荷载作用时土样的绝对膨胀率和线缩率(见图5和图7)的变化规律, 经过多次干湿循环后土样的体积膨胀范围为 6.85% (干缩) ~ 12.88% (湿胀)。可见, 表层压实红黏土在自然干湿循环条件下存在明显的体积膨胀现象, 此时检测的压实度会明显小于施工过程中的检测结果。

综合相对膨胀率和相对线缩率(见图6和图8)可以看出, 随着循环次数的增加, 相对线缩率与相对膨胀率逐步接近, 说明土样胀缩体变逐步接近平衡状态。此外, 有荷载作用时的相对膨胀率和线缩率明显小于无荷载时的结果, 表明自重荷载对干湿循环条件下压实土样的收缩膨胀效应具有一定的约束作用。

总体上, 江西压实红黏土在自然干湿循环条件下的胀缩特性与一般压实膨胀土类似。有关压实黏土微观结构分析的研究成果表明, 压实黏土具有明显的微观和宏观双重结构特征^[19], 外力作用(荷载、重力场)主要影响土的宏观结构, 而内力作用(吸力或含水率变化引起)主要影响微观结构, 同时微观结构的变化也会对宏观结构有一定影响^[20-21], 这与部分国内学者对干湿循环作用下土样的孔径分布测试成果类似^[22]。因此, 干湿循环作用下土的胀缩变形主要是吸力(或含水率)变化引起聚集体的微观结构变化在宏观上的表现。

综合本文试验成果, 自然干湿条件下压实红黏土的实际变形为自重荷载引起的宏观结构变化和干湿循环引起的微观结构变化及其耦合作用的综合变形效应。

4 后期压实度检测的影响分析

为分析后期压实度检测结果与施工过程结果

的差异情况,根据压实红黏土的收缩膨胀特性和环刀法检测的操作过程,分别对干湿循环、土体自重压缩、取样卸荷回弹等作用对压实度检测结果的影响进行分析。

4.1 干湿循环作用的影响

根据不同深度土样的绝对膨胀率和线缩率(见图4、图6),不同取样深度所检测的压实度较施工过程中检测结果的差异情况如表3所示。受土体胀缩变形的影响,后期压实度的检测结果较施工过程中有较大偏差,且不同干湿状态时检测的结果也有明显偏差。取样深度对后期压实度的检测结果也有显著影响,若在表层取样,受土体膨胀影响,压实度会明显小于施工过程中的检测结果;而当取样深度较大时(大于0.5 m),受土体压缩影响,检测结果则会偏大。

表3 多次干湿循环后的压实度偏差(压实度96%)
Table 3 Biases of compactness after dry-wet cycling (compactness of 96%)

取样深度/m	体变比例最大/%	体变比例最小/%	压实度的变化情况/%	
			压实度	偏差范围
0	12.88	6.85	85.05 ~ 89.85	-10.95 ~ -6.15
0.1	1.38	-0.79	94.69 ~ 96.76	-1.31 ~ 0.76
0.2	0.56	-1.65	95.47 ~ 97.61	-0.53 ~ 1.61
0.3	0.06	-2.05	95.94 ~ 98.01	-0.06 ~ 2.01
0.5	-0.90	-2.78	96.87 ~ 98.75	0.87 ~ 2.75
1.0	-1.57	-3.27	97.53 ~ 99.25	1.53 ~ 3.25

注:表中体变比例为较土样初始体积的比值,体积增加为正、减小为负;压实度增加为正,减小为负。

根据《土石方工程》(SL 631—2012)、《堤防工程》(SL 634—2012)施工质量验收评定标准,土坝的压实度检测中不合格样的压实度不低于设计值的98%;1、2级堤防防渗体的压实度检测中不合格样的压实度不低于设计值的96%。由表3的偏差范围可知,后期土体的收缩膨胀变化会直接影响检测结果的评定。

由表3中不同取样深度与偏差范围的对应关系可知,根据土体干湿状态(如含水率大小)选择取样深度可减小后期压实度检测结果的偏差。多次循环后土样表现为膨胀或收缩的临界状态(收缩量与膨胀量相等)所对应取样深度,即为综合偏差最小的取样深度。将表3中两个深度(0.1 m和0.2 m)对应的偏差范围的中值进行内插,得出临界深

度为0.13 m,该深度进行取样检测的偏差范围为-0.92%~1.19%。

通过综合室内试验与现场检测成果的对比可以看出,室内试验反映出的后期检测压实度随取样深度的变化规律与类似工程现场实测结果的总体规律^[2]基本一致,但由于两者试验条件(试验土类、循环次数、制备压实度、试验节点的控制条件等)的不同,各节点量值有所差别。

4.2 自重荷载作用的影响

通过制备压实度为96%的土样进行压缩试验(无干湿循环作用),得出不同深度自重荷载与土体收缩率的变化关系如图9所示。3个深度(0.3 m、0.5 m和1.0 m)对应的自重荷载引起的体积收缩率分别为0.11%、0.28%、0.45%,自重荷载引起的体积收缩率随着深度增加而增大,但明显小于有干湿循环作用时的收缩率。可见,由于干湿循环过程中土的结构变化,干湿循环作用会使土体荷载作用的体变效应更加明显。

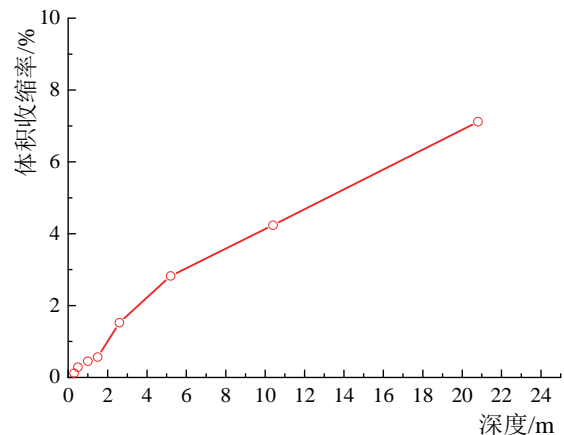
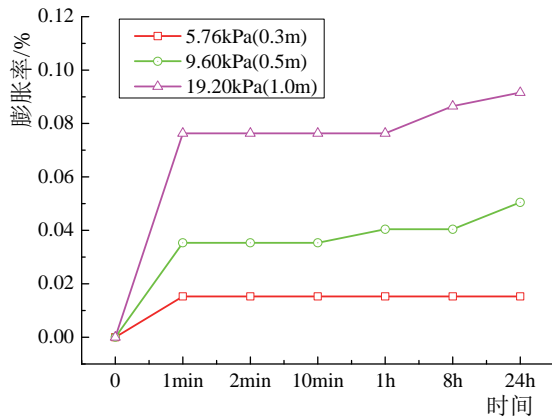


图9 不同深度荷载作用时的体积收缩率

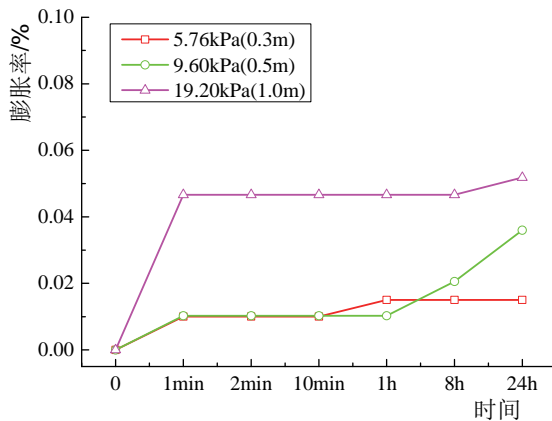
Fig. 9 Volume shrinkage ratio with loads of different depths

4.3 取样卸荷回弹作用的影响

为探讨取样过程中卸荷回弹对土样体积变形的影响,对经多次干湿循环后的土样(分湿胀和干缩两种状态)进行卸荷回弹试验,不同荷载土样卸荷回弹膨胀率随时间的变化规律如图10所示。卸荷回弹作用导致的膨胀率随取土样深度的增加而增大,浸水膨胀状态较自然干缩状态的膨胀率略大,但回弹膨胀率均不超过0.09%。由于环刀法检测的卸荷影响过程有限(取样过程一般不超过1小时),因此取样过程的卸荷回弹作用对压实度检测结果的影响可以忽略。



(a) 湿胀状态



(b) 干缩状态

图 10 卸荷回弹导致的土样膨胀率

Fig. 10 Swell ratios due to unloading rebound

综合分析,影响后期压实度检测结果偏差的主要因素为干湿循环作用和自重荷载作用。考虑实际土方填筑工程中土体的含水率变化幅度和取样深度均在一定范围内,在已知最大和最小含水率的前提下,对于经多次干湿循环后土样的体积变化,可根据实测含水率进行线性内插获得。此外,采用考虑吸力(或含水率)循环、净应力及其耦合效应的膨胀性非饱和土本构模型进行模拟计算也能达到较为理想的效果^[12-13]。

5 结论

(1) 压实红黏土在自然干湿循环条件下具有明显的干缩湿胀特性,且受荷载作用的影响显著。无荷载作用时,土样表现出明显的膨胀特性,绝对膨胀率随循环次数的增加而增大。有荷载作用时,绝对和相对膨胀率明显减小,荷载越大,压缩特征越明显。

(2) 红黏土填筑工程中,后期检测的压实度与施工过程中的结果存在明显偏差,且不同干湿状

态时的检测结果也有较大差异,在后期压实度的检测与评定中应予以考虑。

(3) 影响后期压实度检测结果的主要因素为干湿循环和自重荷载作用。为减小偏差,可根据土样干湿状态(含水率)选择取样深度进行检测。

(4) 在已知相关试验参数的条件下,后期检测压实度的修正可根据土样含水率与体变的关系进行内插计算,或采用相关的非饱和土本构模型进行模拟计算。

本文试验成果主要基于标准胀缩试验条件,为提高成果的可应用性,有待于进一步开展实际工程条件下土体胀缩特性的对比分析及干湿循环影响深度的研究。

参考文献 (References)

- [1] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(5): 141-161.
KONG Lingwei, CHEN Zhenhan. Advancement in the techniques for special soils and slopes [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(5): 141-161. (in Chinese)
- [2] 俞文岗. 峡江水利枢纽库区工程料场土分类及实验数据规律探究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
YU Wengang. Classification of the reservoir stockyard soil in Xiajiang hydro project and probe about the regular pattern of experimental data [D]. Nanchang: Nanchang University, 2014. (in Chinese)
- [3] 刘松玉, 季鹏, 方磊. 击实膨胀土的循环膨胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 9-13.
LIU Songyu, JI Peng, FANG Lei. Approach to cyclic swelling behavior of compacted expansive clays [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(1): 9-13. (in Chinese)
- [4] Nowamooz H, Mrad M, Abdallah A, et al. Experimental and numerical studies of the hydromechanical behaviour of a natural unsaturated swelling soil [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(4): 393-410.
- [5] Tripathy S, Rao K S S. Cyclic swell-shrink behaviour of a compacted expansive soil [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, 27(1): 89-103.
- [6] Farulla C A, Ferrari A, Romero E. Volume change behaviour of a compacted scaly clay during cyclic suction changes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(6): 688-703.

- [7] 唐朝生, 施斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376-1384.
TANG Chaosheng, SHI Bin. Swelling and shrinkage behavior of expansive soil during wetting-drying cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1376-1384. (in Chinese)
- [8] 杨和平, 张锐, 郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩变形及强度变化规律[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1936-1941.
YANG Heping, ZHANG Rui, ZHENG Jianlong. Variation of deformation and strength of expansive soil during cyclic wetting and drying under loading condition [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1936-1941. (in Chinese)
- [9] 杨庆, 贺洁, 栾茂田. 非饱和红黏土和膨胀土抗剪强度的比较研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 13-16.
YANG Qing, HE Jie, LUAN Maotian. Comparative study on shear strength of unsaturated red clay and expansive soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 13-16. (in Chinese)
- [10] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红黏土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2004, 25(3): 369-373.
ZHAO Yingwen, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behaviors of compacted lateritic clay in Guangxi [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 369-373. (in Chinese)
- [11] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 典型红黏土与膨胀土的对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2593-2598.
ZHAO Yingwen, KONG Lingwei, GUO Aiguo, et al. Comparative laboratory study on typical red clay and expansive soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2593-2598. (in Chinese)
- [12] 魏星, 王刚. 干湿循环作用下击实膨胀土胀缩变形模拟[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1423-1431.
WEI Xing, WANG Gang. Modeling swell-shrink behavior of compacted expansive clays subjected to cyclic drying and wetting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1423-1431. (in Chinese)
- [13] 李舰, 赵成刚, ASREAZAD Saman. 适用于吸力循环作用的膨胀性非饱和土本构模型[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(1): 132-139.
LI Jian, ZHAO Chenggang, ASREAZAD Saman. Constitutive model for unsaturated expansive soils under suction cycles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(1): 132-139. (in Chinese)
- [14] 陈伟, 莫海鸿, 陈乐求. 非饱和土边坡降雨入渗过程及最大入渗深度研究[J]. 矿冶工程, 2009, 29(6): 13-16.
CHEN Wei, MOU Haihong, CHEN Leqiu. Study on rainfall infiltration process and the biggest infiltration depth for unsaturated soil slope [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2009, 29(6): 13-16. (in Chinese)
- [15] Ng C W W, Zhan L T, Bao C G, et al. Performance of an unsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. Geotechnique, 2002, 53(2): 143-157.
- [16] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 151-158.
ZHAN Liangtong, NG Wangwai Charles, BAO Chenggang, et al. Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2): 151-158. (in Chinese)
- [17] 李焕强, 孙红月, 孙新民, 等. 降雨入渗对边坡性状影响的模型实验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 589-594.
LI Huanqiang, SUN Hongyue, SUN Xinmin, et al. Influence of rainfall infiltration on slopes by physical model test [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 589-594. (in Chinese)
- [18] 李萍, 李同录, 付昱凯, 等. 非饱和黄土中降雨入渗规律的现场监测研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(10): 3551-3559.
LI Ping, LI Tonglu, FU Yukai, et al. In-situ observation on regularities of rainfall infiltration in loess [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(10): 3551-3559. (in Chinese)
- [19] Gen A, Alonso E E. A framework for the behavior of unsaturated expansive clays [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6): 1013-1032.
- [20] Sivakumar V, Tan W C, Murray E J, et al. Wetting, drying and compression characteristics of compacted clay [J]. Géotechnique, 2006, 56(1): 57-62.
- [21] Monroy R, Zdravkovic L, Ridley A. Evolution of

microstructure in compacted London Clay during wetting and loading [J]. *Geotechnique*, 2010, 60(2): 105-119.

- [22] 万勇, 薛强, 吴彦, 等. 干湿循环作用下压实黏土力学特性与微观机制研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(10): 2815-2824.

WAN Yong, XUE Qiang, WU Yan, et al. *Mechanical*

properties and micromechanisms of compacted clay during drying-wetting cycles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(10): 2815-2824. (in Chinese)

(责任编辑: 介玉新)

主编简介

李庆斌, 男, 生于 1964 年 3 月, 清华大学水工结构专业教授、博士生导师, 教育部“大型水电枢纽灾变机理与安全极限理论”创新团队带头人。1984 年郑州工学院水工建筑专业工学学士。1990 年大连理工大学水工结构工程专业博士, 师从林皋先生。1992 年清华大学博士后出站留校至今, 其中 1996 年 6 月至 1998 年 1 月在美国 NJIT 做高级访问学者。

主要从事水工结构工程方面的研究, 围绕大坝混凝土真实力学性能和智能控制技术研究方向, 开展了理论研究、技术创新和重大工程应用的全链条研究, 形成了从理论到工程实践的系列成果。发表论文 200 余篇, 其中 SCI 收录 70 余篇; 出版专著 2 部。

获授 2000 度清华大学“学术新人奖”、2002 年度国家杰出青年基金、2009 年度教育部长江学者特聘教授、2012 年度国务院政府特殊津贴、2016 年云南省五一劳动奖章等荣誉称号和国家科技进步二等奖、教育部科技进步一等奖等科技奖励。

曾任清华大学水利系河川枢纽研究所所长、土木水利学院副院长兼水沙科学与水利水电工程国家重点实验室副主任。现任水沙科学与水利水电工程国家重点实验室主任、中国水力发电工程学会《水力发电学报》主编。

