



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.06.021

邱秀梅, 赵晓龙, 章赛泽, 等. 重塑黏土恒压湿化变形试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(6): 144-150. QIU X M, ZHAO X L, ZHANG S Z, et al. Experimental study on wetting deformation of remolded cohesive soil under constant pressure[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(6): 144-150. (in Chinese)

重塑黏土恒压湿化变形试验研究

邱秀梅¹, 赵晓龙^{1,2}, 章赛泽¹, 孙兆辉¹, 卞汉兵^{1,3}

(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 3. LEM3, CNRS 7239, 洛林大学, 梅兹 法国 57045)

摘要: 针对某重塑黏土, 通过常规固结仪, 研究了恒压下初始孔隙比、应力及初始饱和度对湿化变形的影响。试验结果显示, 应力和初始孔隙比 e 对湿化变形影响明显, 低应力下, 变形随 e 的提高逐渐由膨胀变为压缩; 高应力下, 试样均发生压缩, 压缩量随 e 的增大而增大; 定量分析了湿化变形与应力和 e 之间的关系。试样湿化稳定时间 t_0 受应力和初始孔隙比 e 影响明显, t_0 随应力的增加而增大; 低应力下, t_0 随 e 的增加而增大, 高应力下, t_0 随 e 的增加先增大后减小。初始饱和度 S_r 对湿化变形也有较大影响, 低压应力下, 试样膨胀量随着 S_r 的增加先减小后增大, 可能存在“最优初始饱和度”, 使得变形量最小; 高压应力下, 试样压缩量随 S_r 的增加而减小, 二者可近似用直线拟合。

关键词: 非饱和土; 孔隙比; 饱和度; 湿化变形

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1672-1683(2017)06-0144-07

Experimental study on wetting deformation of remolded cohesive soil under constant pressure

QIU Xiumei¹, ZHAO Xiaolong^{1,2}, ZHANG Saize¹, SUN Zhaohun¹, BIAN Hanbing^{1,3}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. LEM3, CNRS 7239, Université de Lorraine, 57045 Metz, France)

Abstract: This study investigated the influences of initial void ratio, stress, and initial water saturation on the wetting deformation of remolded cohesive soil under constant pressure using the conventional consolidation apparatus. The experimental results showed that the stress and initial void ratio e had significant impact on the wetting deformation. Under low stress, the deformation changed from expansion to shrinkage with the increase of e ; while under high stress, all the samples were compressed and the amount of compression would increase with the increase of e . The relationships among wetting deformation, stress, and e were analyzed quantitatively. The wetting stability time t_0 was affected obviously by the stress and e . The t_0 would increase with the increase of stress. Under low stress, t_0 would increase with the increase of e ; under high stress, t_0 would increase first and then decrease with the increase of e . The initial water saturation S_r also had great influences on the wetting deformation. Under low stress, the swelling capacity would decrease first and then increase with the increase of S_r ; the "optimum initial water saturation" may exist, which can lead to the smallest deformation. Under high stress, the amount of compression would decrease with the increase of S_r , and their relationship was approximately linear.

Key words: unsaturated soil; void ratio; water saturation; wetting deformation

收稿日期: 2017-02-22 修回日期: 2017-07-18 网络出版时间: 2017-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171115.0900.007.html>

基金项目: 山东省重点研发计划(2017GSF16104); 中央高校基本科研业务费专项资助项目(2017B651X14); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目(KYCX17_0475); 山东省科技发展计划项目(2012GN11203)

Funds: Key Research and Development Plan of Shandong Province(2017GSF16104); Special Fund for Basic Scientific Research in Central Universities(2017B651X14); Project Supported by the Jiangsu Province Graduate Research and Innovation Program(KYCX17_0475); Shandong Science and Technology Development Plan Project(2012GN11203)

作者简介: 邱秀梅(1962-), 女, 山东东阿人, 教授, 主要从事土石坝防渗体破坏机理与防控技术的相关研究。E-mail: qxmrx@126.com

通讯作者: 卞汉兵(1975-), 男, 江苏盐城人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程数值计算分析。E-mail: hanbing.bian@univ-lorraine.fr

土石坝因造价低廉,施工简单,抗震性能好等诸多优点而广泛应用在我国水利工程中^[1]。对心墙坝,在蓄水初期,上游坝壳堆石会经历由干燥到饱和的过程,其间产生的变形称为湿化变形^[2]。

较大的湿化变形可能会导致坝体出现裂缝而影响大坝的安全运行,因此土石坝湿化变形问题仍是需要解决的热点问题。目前关于坝壳堆石料的湿化变形研究较多^[3-5],但对黏土心墙本身的湿化变形研究却较少^[6-9]。若心墙黏土由于湿化变形而产生了裂缝,那极有可能引起水力劈裂^[10-13]等严重后果。因此对心墙黏土的湿化变形研究很有工程意义。

心墙粘土在填筑时通常采用分层碾压^[14],含水量接近于最优含水量,饱和度较高,但很难达到完全饱和^[8]。研究表明,非饱和土湿化过程中,在低应力条件下湿胀特性引起膨胀,在高应力条件下由于孔隙坍塌产生不可恢复的塑性变形^[15-16]。某种土呈现膨胀还是湿陷,不仅取决于矿物成份,还和应力状态、孔隙比和饱和度有关^[17-18]。

土石坝蓄水过程中坝体及心墙部分的饱和度将发生变化,而饱和度变化对强度、变形和渗透性都会产生影响^[19-21]。沈珠江^[22]院士提出广义吸力的概念,认为随着广义吸力的丧失,孔隙比逐步向稳态发展,欠压缩土的孔隙比变小,超压缩土的孔隙比变大。Fredlund^[23]基于非饱和土“相”的物理意义,提出了孔隙比状态方程,并通过孔隙比和含水量估计了膨胀量的变化。

本文通过非饱和重塑土恒压湿化变形试验,模拟水库蓄水过程中土石坝黏土心墙的湿化变形,初步研究了初始孔隙比、应力和初始饱和度对试样湿化变形的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为临沂市蒙阴县某土石坝心墙用土。取样后经烘干粉碎,并过 0.5 mm 筛备用。土样的基本物理指标见表 1,可判定为中液限黏质土。

表 1 土样的基本物理参数

Tab. 1 Basic physical parameters of soil samples

液限 w_L (%)	塑限 w_P (%)	塑性指数 I_P (%)	土粒相对密度 密度 G_s	最优含水率 w_{opt} (%)	最大干密度 ρ_{dmax} / (g·cm ⁻³)
37.8	21.2	16.6	2.63	22	1.65

1.2 试验方法

将一定量粉碎干土与一定量水(按最优含水率附近配置)均匀混合,在密封塑料袋中养护一昼夜。

之后按设计的层数和每层击数对土样击实,两层交接面作刨毛处理。通过击实层数和次数来改变试样的孔隙比,击实后的试样通过环刀切取土样若干,分别放入固结仪内同时在不同固结应力下进行试验。试验采用 WG-1B 型三联中压固结仪,具体试验方案和试样尺寸见表 2。

表 2 重塑土湿化试验方案

Tab. 2 Wetting test schemes for remolded soil

击实方案 (层数×每层击数)	固结应力/kPa	试样尺寸 /(mm×mm)
3×25	50 100 150 200 300 400	61.8×20
5×15	50 100 150 200 300 400	
5×11	50 100 150 200 300 400	
5×9	50 100 150 200 300 400	

注:由于击实过程的人为因素,试样孔隙比难以精确控制,每种方案下重复做几组试验

土样固结后,为获得湿化前的饱和度,需卸载,取出土样称重后再迅速归位加载,2 h 后加水湿化,具体流程见图 1。土样固结 48 h 后,沉降量均小于 0.005 mm/h,根据《土工试验规程 SL 237-1999》,可认为土样已达到稳定。但图 2 中固结段最后仍有沉降,这主要是水分散失引起土样干缩的影响。土样重新加载 2 h 后已达到稳定标准,开始加水湿化。这里假定土样再加载 2 h 后状态与卸载前相同。不同荷载模拟心墙在原位受到的固结应力,湿化模拟水库的蓄水过程。

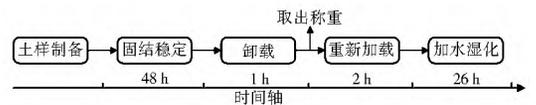


图 1 试验流程图

Fig. 1 Flow chart of test

试验某完整典型曲线见图 2,本文重点研究加水湿化段曲线性质。

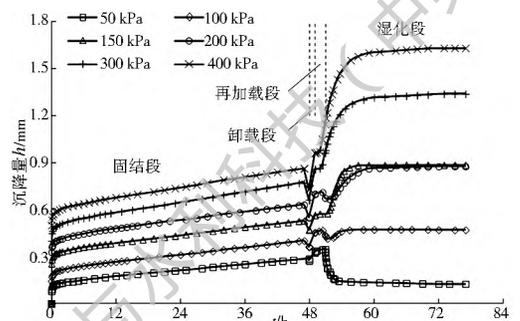


图 2 试验完整典型曲线

Fig. 2 Whole typical test curves

1.3 土相指标计算方法

本文初始孔隙比 e 和初始饱和度 S_r 均为土样湿化前的状态,且考虑了固结沉降的影响。具体计算如下:土粒体积 $V_s = M_s / G_s$, G_s 为土粒比重;孔隙

水体积 $V_w = M_w / \rho_w$, ρ_w 为水的密度; 孔隙水质量 $M_w = M - M_s$, M 为总质量, 湿化前取出试样获得; 总体积 $V = Sh_0$, S 为环刀界面面积, h_0 为试样净高度, $h_0 = h - \delta_h$, h 为环刀高度, δ_h 为固结稳定的沉降量。综上, 可按定义求得孔隙比 $e = V_v / V_s = (V - V_s) / V_s$, 饱和度 $S_r = V_w / V_v$ 。需要指出, 虽然按最优含水率制样, 但由于制样和固结过程水分的散失, 实际湿化前土样含水率仅在约 14%~17% 范围内。

2 试验结果分析

2.1 湿化变形时程曲线分析

图 3- 图 5 为不同固结应力下不同初始孔隙比土样湿化变形时程曲线, 为节省篇幅, 将两种应力下的曲线放在一起。曲线时间零点设定在土样加水湿化的时刻。在侧向约束下, 土样仅发生竖向变形, 体变 ϵ_v 仅反映轴向变形, 与三轴试验中的体变是有区别的。

从图 3 可以看出, 50 kPa 和 100 kPa 应力下, 大部分土样发生膨胀, 且随着 e 的增大, 膨胀量减小, 直到出现收缩。值得注意的是, 土样 ($e = 0.671$ 和 $e = 0.710$) 出现由膨胀到压缩的转变。土样 ($e = 0.710$) 在湿化初期, 变形表现为膨胀, 到 0.8 h 后, 变形速率降为零, 曲线出现一个短暂的平台, 大约持续 20 min, 随着湿化的继续, 土样变形表现为压缩。

图 4 可以看出, 在 150 kPa 应力下, e 较大时 ($e = 0.696$ 和 $e = 0.711$), 土样表现为明显的压缩; 而 e 较小时 ($e = 0.606$) 土样表现为膨胀; 在两者之间的土样 ($e = 0.647$) 表现为初期膨胀, 后期压缩。

在 200 kPa 应力下, 试样变形规律和 150 kPa 的情况基本一致: e 较大的试样 ($e = 0.746$) 表现为明显的压缩, e 较小的试样 ($e = 0.604$) 有体积膨胀的迹象, 但应力的作用越来越明显。首先, 对 e 较小的土样 ($e = 0.604$), 虽然有膨胀的迹象, 但膨胀整体不明显。其次, 虽然土样 ($e = 0.681$ 和 $e = 0.650$) 在初期存在膨胀的趋势, 但无论是膨胀时间还是膨胀量均相对较短/小, 总体上仍表现为压缩。

在 300 kPa 和 400 kPa 应力下 (图 5), 土样均表现为压缩, 且压缩量随 e 的增大而增大。此时, 应力对变形起主导作用, 试件内部孔隙塌陷引起的体积收缩远大于黏土颗粒吸水引起的体积膨胀, 土样宏观表现为压缩。

2.2 湿化变形的影响因素分析

为便于分析, 整理不同竖向荷载的土样湿化体变 ϵ_v 、初始孔隙比 e 和饱和度 S_r 关系, 如图 6 所示。图中 ϵ_v 用折线表示, 水平虚线 $\epsilon_v = 0$ 以上代表体积收缩, 水平虚线以下则膨胀。

从图 6 可以看出, 应力对试样变形影响明显: 随着应力的增加, 试样由膨胀逐渐变为收缩, 且收缩量随着应力的增加而增大。对于低应力水平 (比如 50 kPa、100 kPa), 试样主要表现为膨胀; 对于高应力水平 (比如 300 kPa、400 kPa), 试样则全部为收缩。同一应力下, 试样随 e 的增加收缩量增加。

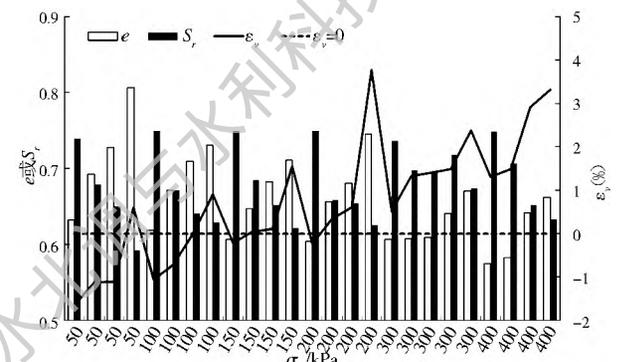


图 6 不同应力的土样湿化后的 ϵ_v 、 e 和 S_r 关系
Fig. 6 Relationships among ϵ_v , e and S_r of soil samples after wetting phase under different vertical loads

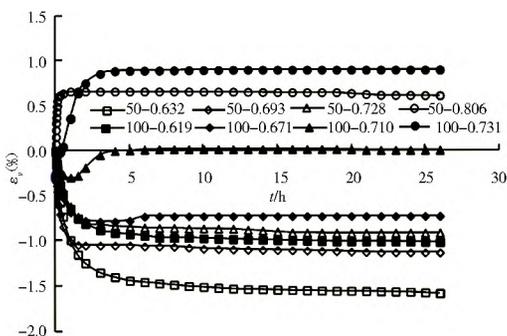


图 3 $\sigma_1 = 50$ kPa, 100 kPa 时试样湿化时程曲线
Fig. 3 Wetting time history curves for $\sigma_1 = 50$ kPa and $\sigma_1 = 100$ kPa

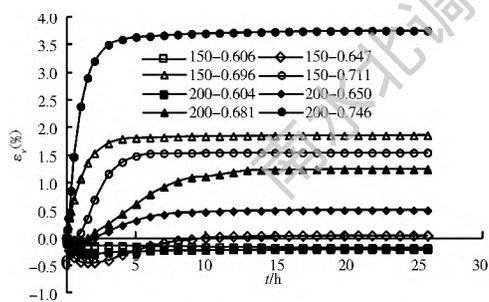


图 4 $\sigma_1 = 150$ kPa, 200 kPa 时试样湿化时程曲线
Fig. 4 Wetting time history curves for $\sigma_1 = 150$ kPa and $\sigma_1 = 200$ kPa

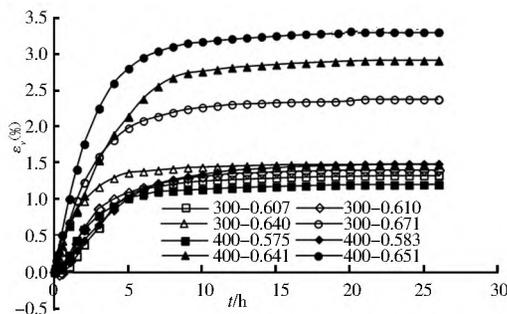


图 5 $\sigma_1 = 300$ kPa, 400 kPa 时试样湿化时程曲线
Fig. 5 Wetting time history curves for $\sigma_1 = 300$ kPa and $\sigma_1 = 400$ kPa

此外, 体变 ε_v (图 6 中折线) 在 200 kPa 出现一个峰值, 该点对应的 e 较大, 这说明当应力达到 200 kPa 后, ε_v 对 e 更加敏感, 较大的 e 可能会导致很大的变形。因此在土石坝心墙填筑时应严格控制孔隙比的范围, 过大的孔隙比会导致湿化时产生大变形, 这对工程不利。

为进一步分析应力 σ_1 和初始孔隙比 e 对湿化变形 ε_v 的影响, 绘制不同 σ_1 下 $\varepsilon_v - e$ 曲线, 见图 7。因 200 kPa 下 ε_v 有峰值, 在分析时不予考虑。可以看出, 不同 σ_1 下的各点可近似用直线拟合。设 $\varepsilon_v - e$ 拟合直线的斜率和截距分别为 a 和 b 。显然 a 和 b 随 σ_1/P_a 的变化而变化, 故点绘 $a - \sigma_1/P_a$ 和 $b - \sigma_1/P_a$ 关系, 见图 8, 也可用直线拟合。故 ε_v 随 e 和 σ_1 的变化可近似用下式表示:

$$\varepsilon_v = \left[a_v \frac{\sigma_1}{P_a} + b_v \right] e + \left[c_v \frac{\sigma_1}{P_a} + d_v \right] \quad (1)$$

式中: 参数 a_v , b_v , c_v 和 d_v 分别等于 2 787, 11. 812, - 0 501 和 - 9 751。

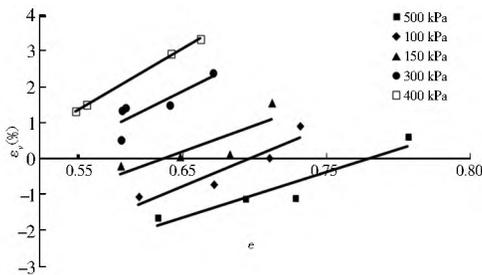


图 7 同应力下土样的 $\varepsilon_v - e$ 关系曲线

Fig. 7 $\varepsilon_v - e$ curves under different stresses

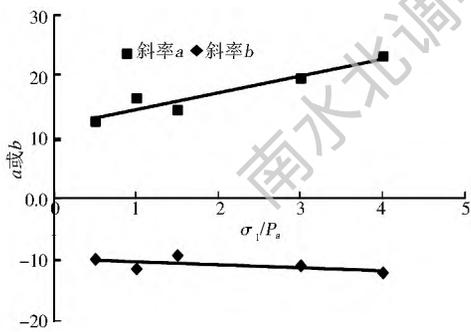


图 8 $a \sim \sigma_1/P_a$ 及 $b \sim \sigma_1/P_a$ 关系

Fig. 8 Relationships among a , b and σ_1/P_a

文献[17]根据广义吸力^[22]的定义, 给出了广义吸力 u'_s 的建议表达式, 认为 u'_s 与孔隙比和应力状态有关, 并给出了广义吸力丧失引起变形的估计式。本文(1)式也包含孔隙比和应力状态, 但估计的变形不仅包含广义吸力丧失的变形, 还包含晶格本身的胀缩变形, 是宏观的估计, 对实际工程土体的湿化变形预测有一定的参考作用。

2.3 湿化变形稳定时间影响

整理不同荷载下试样湿化变形稳定时间见图

9, 土样初始孔隙比 e 用折线表示。可以看出, 试样湿化变形稳定时间 t_0 受固结应力影响明显, 随着应力的增加, t_0 大体呈增大趋势。同一应力下, 初始孔隙比 e 不同, t_0 也不同: 低压应力下, t_0 随着 e 的增大会减小; 高压应力下, t_0 随 e 的增加先增大后减小。

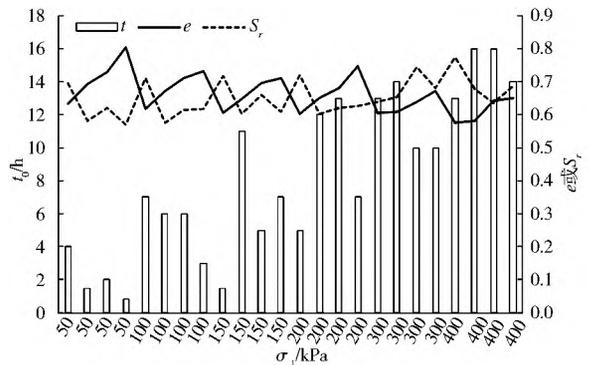


图 9 不同荷载下试样湿化变形稳定时间与初始孔隙比

Fig. 9 Stability time of wetting deformation and initial void ratio for soil samples under different loads

应力对 t_0 的影响可从渗透系数方面解释。已有研究表明, 渗透系数是孔隙比的函数, 其值取决于孔隙的大小和空间分布。孔隙比越小, 渗透系数越小。在应力作用下, 较大且不稳定的孔隙首先被压缩, 土体的渗透系数急速下降, 且其下降速度远大于孔隙比的下降速度。渗透系数的下降导致湿化过程减缓。

初始孔隙比 e 对 t_0 的影响也可从渗透系数考虑: 随着 e 的增加, 水分进入土体变得容易, 土体湿化稳定的时间会加快, 因而 t_0 会减小。高压应力下, e 小的土样 t_0 反而小, 这可能是由于 e 较小, 土体结构稳定且饱和度 S_r 较高(见图 9 中虚折线), 水分进入土样困难, 导致其稳定较快。

2.4 初始饱和度对湿化变形量影响

湿化过程中, 初始饱和度 S_r 对体积应变 ε_v 的影响相对复杂。试验得到的 S_r 与 ε_v 之间的关系并不符合 Tadeballi 和 Fredlund^[24] 所描述的简单的线性关系。

图 10 中给出了低应力下初始饱和度 S_r 与体积应变 ε_v 的关系。实际孔隙比 e 和饱和度 S_r 会互相影响, 二者呈负相关(见图 6, 图 9), 为了消除 e 的影响, 每组曲线选取 e 大小相近的数据, 浮动范围不超过 0.02, 图 10 土样 e 均为 0.7 ± 0.02 , 图 12 的处理与此类似。结果显示, 试样 S_r 与 ε_v 可能存在非线性关系, 可用多项式拟合, 对给定的 e 和应力, 可能存在“最优初始饱和度”使得试样在湿化过程中膨胀最小。

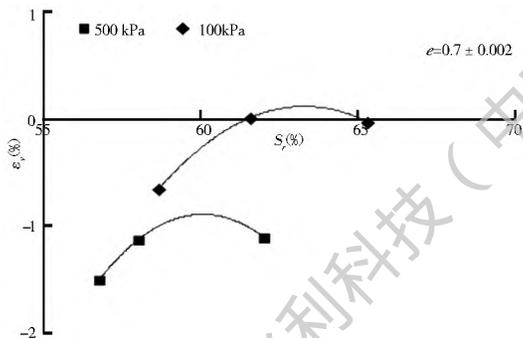


图 10 低应力下湿化 ϵ_v 和 S_r 关系图

Fig. 10 Relationship between ϵ_v and S_r under low stress

图 10 中的曲线可从微观方面进行解释。当饱和度较低时(图 11(a)),土的基质吸力较大,收缩膜提供的张力将土颗粒紧紧拉住,土体孔隙结构较为稳定。湿化过程中,基质吸力减小导致结构破坏产生的收缩量相对较小,因而总体表现为膨胀量随饱和度的增大而减小。另一方面,当土样本身饱和度较高时(图 11(b)),土样湿化时基质吸力变化不大,因而孔隙结构的破坏较少,膨胀量会略微增大,但由于饱和度高,湿化需要的水分较少,因而总体上膨胀量还是小于饱和度较低的试样。

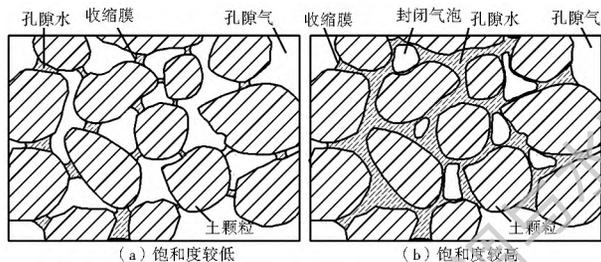


图 11 非饱和土饱和度示意图

Fig. 11 Schematic diagram of S_r for unsaturated soil

图 12 为高应力下初始饱和度 S_r 与体积应变 ϵ_v 关系。高应力下,试样均表现为压缩, ϵ_v 随着 S_r 的增大而减小。与低压下不同, ϵ_v 和 S_r 可近似用直线拟合。

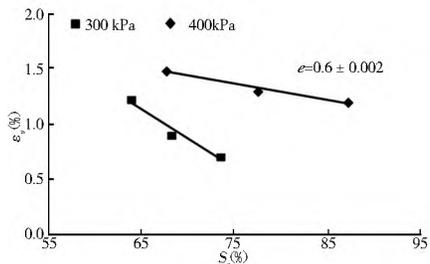


图 12 高应力下湿化 ϵ_v 和 S_r 的关系

Fig. 12 Relationship between ϵ_v and S_r under high stress

在高应力下,由于应力对变形起主要控制作用,土样的微观孔隙结构的稳定性变得十分重要。 S_r 较低时,土样的基质吸力较大,在湿化过程中, S_r 的

变化导致“有效应力”变化较大,因而宏观表现为 ϵ_v 较大。随着饱和度的增大,土样的基质吸力变化减小, ϵ_v 减小。

3 讨论

土体作为颗粒材料,湿化变形主要取决于微观结构(宏观上可通过初始孔隙比及孔隙分布描述),应力和初始饱和度。较高的孔隙比,通常预示着不稳定的微观结构。在湿化过程中,一方面随着饱和度的增加,基质吸力下降,土体失去“围压效应”,“有效应力”降低,导致其强度下降^[25-26];另一方面,水分进入土颗粒之间,形成一层润滑的水膜,削弱了土颗粒间的有效接触,使得土体中的孔隙结构不再稳定。两方面的共同作用下,土体孔隙结构破坏造成体积收缩。相反,初始孔隙比较小,土体孔隙结构相对稳定,土体的压缩性小。吸水过程中,土体孔隙结构破坏较小,土体矿物成分膨胀占主导地位,宏观上表现为膨胀。

土体表现为膨胀还是收缩,主要取决于黏土湿化引起的膨胀量和孔隙结构破坏引起的压缩量的大小。吸水膨胀量通常有以下因素控制:(1)土体中黏粒(蒙脱石)含量,含量越高,体积膨胀越大;(2)初始含水量,其值越高,体积膨胀量越小;(3)微观结构,即土体颗粒的排列,稳定的土体微观结构会增大土体的宏观体积膨胀量。而土体的收缩除受所处应力影响外,还取决于微观孔隙结构,稳定均匀的微观结构可有效地降低微观孔隙破坏,因而减小宏观体积压缩量。

4 结论

本文通过恒压湿化试验,研究了土样湿化过程,湿化变形量及湿化稳定时间的影响因素,对初始饱和度与变形量的关系进行了探讨,主要结论如下:

(1) 低应力(50 kPa, 100 kPa)下,试样湿化曲线主要为膨胀,随着初始孔隙比 e 的增加,膨胀量减小,并逐渐变为收缩。高应力(300 kPa, 400 kPa)下,试样均收缩,且收缩量随 e 的增加而增大。建立了湿化变形与应力、初始孔隙比之间的关系式,可在工程上对土体湿化变形进行初步估计。

(2) 试样湿化稳定时间 t_0 受应力、初始孔隙比 e 影响明显。 t_0 大体随应力的增加而增大。低应力下, t_0 随 e 的增大而减小;高应力下, t_0 随 e 的增加先增大后减小。

(3) 试样湿化体积应变受初始饱和度 S_r 影响较大。低应力下,试样膨胀量随 S_r 先减小后增大,可

能存在“最优初始饱和度”，使得试样的膨胀量最小。高应力下，试样收缩量随 S_r 的增大而减小，二者可近似用直线拟合。

(4) 本试验仅初步分析了试样湿化变形的影响因素，后续仍需通过试验对结论予以验证，并借助理论分析和模型建立等手段开展相关定量分析，以便将成果运用到实际工程中。

参考文献(References):

- [1] 王柏乐, 刘瑛珍, 吴鹤鹤. 中国土石坝工程建设新进展[J]. 水力发电, 2005, 31(1): 63-65. (WANG B L, LIU Y Z, WU H H. New development of China earth and stone dam project construction[J]. Water Power, 2005, 31(1): 63-65. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2005.01.020
- [2] 朱俊高, Mohamed A. ALSakran, 龚选等. 某板岩粗粒料湿化特性三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 170-174. (ZHU J G, MOHAMED A. ALSakran, GONG X, et al. Triaxial tests on wetting deformation behavior of a slate rockfill material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(1): 170-174. (in Chinese))
- [3] 魏松, 朱俊高. 粗粒土料湿化变形三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1609-1614. (WEI S, ZHU J G. Study on wetting behavior of coarse grained soil in triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1609-1614. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2007.08.015.
- [4] 程展林, 左永振, 丁红顺, 等. 堆石料湿化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 243-247. (CHENG Z L, ZUO Y Z, DING H S, et al. Wetting characteristics of coarse grained materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 243-247. (in Chinese))
- [5] 丁艳辉, 袁会娜, 张丙印. 堆石料非饱和湿化变形特性试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(9): 139-143. (DING Y H, YUAN H N, ZHANG B Y. Unsaturated wetting deformation characteristics of rockfill materials[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(9): 139-143. (in Chinese))
- [6] 郭冲, 邱秀梅, 赵晓龙, 等. 土石坝心墙填土恒压吸湿变形试验研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2013, 44(1): 76-80. (GUO C, QIU X M, ZHAO X L, et al. Experimental study on the wetting deformation of the soil used in the core wall of earth rock dam under constant pressure[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2013, 44(1): 76-80. (in Chinese))
- [7] 张芳枝, 陈晓平. 反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 41-46. (ZHANG F Z, CHEN X P. Influence of repeated drying and wetting cycles on mechanical behaviors of unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 41-46. (in Chinese))
- [8] 罗婉. 湘南地区高液限红粘土湿化变形特性试验研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014. (LU O W. Study on wetting deformation characteristic of high liquid limit red clay in Southern Hunan[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese))
- [9] 王小军, 方建生. 膨胀土(岩)湿化性的影响因素及降低湿化性的途径和方法[J]. 铁道学报, 2004, 26(6): 100-105. (WANG X J, FANG J S. Factors influencing the slaking of expansive soil (rock) and methods to reduce slaking[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(6): 100-105. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-8360.2004.06.019.
- [10] 朱俊高, 王俊杰, 张辉. 土石坝心墙水力劈裂机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 487-492. (ZHU J G, WANG J J, ZHANG H. Study on mechanism of hydraulic fracturing in core of earth rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 487-492. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2007.03.011.
- [11] 赵晓龙, 邱秀梅, 韩慧敏, 等. 土石坝带裂缝黏土心墙破坏机理试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2016, 2: 134-138. (ZHAO X L, QIU X M, HAN H M, et al. Experimental research on the failure mechanism of clay core with cracks for earth rock fill dams[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016, 2: 134-138. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2016.02.034.
- [12] 冯晓莹, 徐泽平, 梁茂田. 黏土心墙水力劈裂机理的离心模型试验及数值分析[J]. 水利学报, 2009, 40(1): 109-114, 121. (FENG X Y, XU Z P, LIANG M T. Centrifugal model test and numerical analysis on mechanism of hydraulic fracturing of clay core wall in rockfill dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 109-114, 121. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2009.01.016.
- [13] 姬耀斌, 魏海, 吴凤昌. 心墙堆石坝水力劈裂可靠性分析方法及应用[J]. 中国农村水利水电, 2010, 4: 85-87, 90. (JI Y B, WEI H, WU F C. Reliability analysis method for hydraulic fracturing in earth core rock fills dam and its application[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, 4: 85-87, 90. (in Chinese))
- [14] 赵开伟, 李同春, 程井, 等. 土石坝施工模拟中填筑层数的选取[J]. 水电能源科学, 2014, 32(4): 106-108. (ZHAO K W, LI T C, CHENG J, et al. Selection of fill layer number on simulation of earth rockfill dam construction[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(4): 106-108. (in Chinese))
- [15] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 207-209. (GONG B W, ZHOU X W, ZHOU W H. Test on suction and strength of expansive soil in a desorption-absorption cycle of moisture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 207-209. (in Chinese))
- [16] 詹良通, 吴宏伟. 非饱和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 196-201. (ZHAN L T, WU H W. Experimental study on mechanical behavior of recomacted unsaturated expansive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 196-201. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2006.02.010.
- [17] 程钰, 周正明. 非饱和土稳态孔隙比变形理论[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1399-1404. (CHENG Y, ZHOU Z M. Study of deformation of unsaturated soil based on steady state void

- ratio[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1399-1404. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.05.019.
- [18] FREDLUND D G, RAHARDJO H. 非饱和土力学[M]. 陈仲颐, 张在明, 陈愈炯, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. (FREDLUND D G, RAHARDJO H. *Soil mechanics for unsaturated soils*[M]. Translated by CHEN Z Y, ZHANG Z M, CHEN Y J, et al. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese))
- [19] 赵成刚, 韦昌富, 蔡国庆. 土力学理论的发展和面临的挑战[J]. *岩土力学*, 2011, 32(12): 3521-3540. (ZHAO C G, WEI C F, CAI G Q. Development and challenge for soil mechanics [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(12): 3521-3540. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2011.12.001.
- [20] 张玉, 徐卫亚, 邹丽芳, 等. 降雨条件下大型滑坡体渗流稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(3): 833-841. (ZHANG Y, XU W Y, ZOU L F, et al. Analysis of seepage stability of large scale landslide under rainfall condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(3): 833-841. (in Chinese))
- [21] 赵晓龙, 邱秀梅, 卞汉兵, 等. 一种非饱和土相对渗透系数的试验数值联合估计法[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 853-857. (ZHAO X L, QIU X M, BIAN H B, et al. A combination method of experimental and numerical estimations for predicting the relative hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(6): 853-857. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbddqk.2015.06.020.
- [22] 沈珠江. 广义吸力和非饱和土的统一变形理论[J]. *岩土工程学报*, 1996, 18(2): 1-9. (SHEN Z J. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1996, 18(2): 1-9. (in Chinese))
- [23] FREDLUND D G, 杨宁. 非饱和土的力学性能与工程应用[J]. *岩土工程学报*, 1991, 13(5): 24-35. (FREDLUND D G, YANG N. The mechanical properties and their engineering applications to unsaturated soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 13(5): 24-35. (in Chinese))
- [24] TADEPALLI R, FREDLUND D G. The collapse behavior of a compacted soil during inundation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1991, 28(4): 477-488.
- [25] 闫亚景, 文宝萍, 计博勋. 基质吸力对非饱和和重塑黄土抗剪强度的贡献[J]. *工程地质学报*, 2011, 19(6): 865-874. (YAN Y J, WEN B P, JI B X. Construction of matric suction to shear strength of unsaturated remolded loess soils[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2011, 19(6): 865-874. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2011.06.011.
- [26] 张鹏程, 汤连生, 姜力群, 等. 基质吸力与含水量及干密度定量关系研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增1): 2792-2797. (ZHANG P C, TANG L S, JIANG L Q, et al. Research on quantitative relations of matric suction with water content and dry density[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(s1): 2792-2797. (in Chinese))

《南水北调与水利科技》编辑部郑重声明

《南水北调与水利科技》自创刊以来,从未委托任何中介机构、网站及个人征稿,请广大读者、作者提高警惕,不要通过他人投稿,更不要向他人或不明机构缴纳任何费用。

编辑部投稿网址: www.nsbddqk.net, 电话: 0311-85020535, 85020639, 85020512。

《南水北调与水利科技》编辑部