

DOI: 10.11779/CJGE2016S2036

# 延吉膨胀岩变形特性的水-力路径效应与机制浅析

曾志雄<sup>1</sup>, 孔令伟<sup>1</sup>, 黄珏皓<sup>1</sup>, 凌贤长<sup>2</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 膨胀岩的体积变形受加载模式和增湿过程的影响, 为了研究不同水-力路径下延吉膨胀岩的变形特性, 以延吉膨胀岩为研究对象, 针对不同初始含水率的压实试样开展了3种水-力路径(①吸水膨胀(无荷)—加载压缩—卸荷回弹; ②浸水吸湿(体积不变)—加载压缩—卸荷回弹; ③加载压缩—浸水吸湿(有荷)—卸荷回弹)的一维压缩试验。试验结果表明: 试样在路径①下的压缩指数和回弹指数最大, 路径②下次之, 路径③下最小, 随着初始含水率的增加, 试样在路径①和②下压缩指数和回弹指数逐渐减小, 而在路径③下压缩指数逐渐增大; 无荷状态下试样吸水膨胀, 当上覆荷载较大时试样发生轻微的湿陷现象, 无荷膨胀率和潜在湿陷率均随初始含水率的增加而减小; 膨胀反压法和平衡加压法确定的膨胀力均随初始含水率的增加而减小, 对于相同初始状态的试样, 膨胀反压法确定的膨胀力较平衡加压法大; 延吉膨胀岩的体变规律具有强烈的水-力路径效应, 其强烈的水敏性是其中的根本原因。

**关键词:** 膨胀岩; 水-力路径; 初始含水率; 吸湿变形; 压缩变形; 回弹变形

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0222-06

**作者简介:** 曾志雄(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事特殊土土力学与地基基础方面的研究。E-mail: zzhxhp@163.com。

## Effect and mechanism of hydro-mechanical path on deformation behavior of Yanji swelling rock

ZENG Zhi-xiong<sup>1</sup>, KONG Ling-wei<sup>1</sup>, HUANG Jue-hao<sup>1</sup>, LING Xian-zhang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** The deformation of swelling rock is affected by both loading condition and moistening process. For the deformation behaviors of compacted swelling rock under 3 different hydro-mechanical paths (① soaking (with no load)-compression-decompression; ② soaking (with no swelling)-compression-decompression; ③ compression-soaking (under load)-decompression), laboratory tests on 1D compression of Yanji compacted swelling rock with different initial water contents are carried out. The test results show that the compression and swelling indexes of specimens under 3 different hydro-mechanical paths are not the same. The specimens under path ① provide the highest values of compressive index and swelling index, while the specimens under paths ③ provide the lowest. With the increase of the initial water content, the compressive and swelling indexes of specimens under paths ① and ② decrease, but the compressive indexes under path ③ increase. The specimens swell obviously under no load condition, but they collapse slightly under a larger vertical load. The no-load expansive ratio and potential collapsible ratio decrease with the increase of the initial water content. The swelling pressures determined by the swelling and loading method and no-swelling method decrease with the increasing initial water content, and the values of swelling pressures provided by the former method are larger than those by the latter method. There is a clear effect of hydro-mechanical path on the deformation behavior of Yanji swelling rock, and the strong water sensitivity of swelling rock is the key factor.

**Key words:** swelling rock; hydro-mechanical path; initial water content; soaking deformation; compressive deformation; rebound deformation

## 0 引言

膨胀岩是一类主要由强亲水性的蒙脱石、伊利石和高岭石等黏土矿物组成的特殊软岩<sup>[1]</sup>, 失水收缩开裂、吸水膨胀软化是其主要性质。膨胀岩作为一种

特殊的非饱和岩土, 其变形特征是土样自身的膨胀潜

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41430634); 岩土力学与工程国家重点实验室自主部署项目(Y11002)

收稿日期: 2016-05-19

势与应力状态综合作用表现出来的结果<sup>[2]</sup>, 其变形规律除了受到应力路径的影响, 还具有明显的水-力路径效应。

近年来, 国内外学者针对膨胀岩土吸水膨胀特性开展了大量的研究工作, 矿物成分、干密度、含水率以及竖直荷载对膨胀性的影响规律已形成广泛共识<sup>[3-6]</sup>, 研究工作逐渐向不同吸湿和应力路径下的变形特征不断深入。Baille等<sup>[6]</sup>和Tang等<sup>[7]</sup>利用单轴压力机初步研究了膨润土保持体积不变吸水饱和后的一维压缩变形特征。周葆春等<sup>[2]</sup>开展了不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀—压缩试验, 研究了膨胀土发生膨胀变形后的压缩特性。罗冲等<sup>[8]</sup>通过一系列的膨胀性和直剪试验, 发现约束状态对试样的膨胀性和抗剪强度等物理力学性质有显著影响。张俊峰等<sup>[9]</sup>研究了压实膨胀土在两种加载路径下的吸湿变形特征, 发现膨胀土在不同加载路径下的变形特征会存在较大差异。然而到目前为止, 比较膨胀性岩土在多种水-力路径下的变形规律和机制的系统研究并不多见。

基于此, 本文以延吉黄褐色膨胀性泥岩为研究对象, 针对不同初始含水率的试样, 开展了 3 种水-力路径下的压缩试验, 得到了 3 种水-力路径下压实膨胀岩的变形规律, 分析了水-力路径对延吉膨胀岩变形特性的影响, 以期加深对延吉膨胀岩变形规律的认识和理解。

1 试验方法与实施过程

试验样品取自吉林省延边朝鲜族自治州境内, 取样运至实验室后按照相关规范立即开展室内试验, 基本物理性质和矿物成分组成试验结果如表 1 所示, 试验样品天然状态下呈坚硬状态, 结构致密, 自由膨胀率为 54%, 经判定具有弱膨胀性。试验采用直径为 61.8 mm, 高度为 20 mm 的压实环刀样, 以控制干密度为 1.67 g/cm<sup>3</sup> 的方法, 制备含水率为 12.0%, 16.0%, 20.0%, 23.0% 的环刀样各 3 个, 共制备试样 12 个。将试样装入固结仪中, 在试样上下两端放置滤纸和透水石, 保证水分能够顺利进入和排出。3 种水-力路径下的压缩试验具体实施过程如下:

①吸水膨胀(无荷)—加载压缩—卸荷回弹。将不同初始含水率的试样装入固结仪中, 立即向容器内

加入适量蒸馏水, 试样浸水吸湿膨胀, 直至其高度不再变化, 然后按照固结试验规程, 按 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa 逐级增加荷载进行压缩, 加荷比为 1, 加至最大荷载后再逐级卸载至零, 每一次加载或卸载均在试样高度稳定后进行。

②浸水吸湿(体积不变)—加载压缩—卸荷回弹。将试样装入固结仪中, 固定好百分表, 立即加入蒸馏水, 当百分表指针顺时针轻微转动时, 立即向盛砂桶内加入适量的铁砂使指针恢复到初始读数, 待膨胀力稳定后, 继续逐级加载至 800 kPa, 再逐级卸载至零。

③加载压缩—浸水吸湿(有荷)—卸荷回弹。将试样装入固结仪中, 按照 12.5, 25, 50, 100, 200, 400, 800 kPa 逐级加载, 待最后一级荷载下试样变形稳定后, 然后向容器内加入蒸馏水, 试样吸湿变形稳定后, 逐级卸载至零, 压缩过程中为了防止水分挥发, 采用湿棉纱包裹固结仪。

2 试验结果与分析

2.1 压缩和回弹特性

根据百分表读数得到每次变形稳定后试样的高度变化, 按照下式计算得到变形后试样的孔隙比:

$$e = e_0 - \frac{H_0 - H}{H_0}(1 + e_0) \quad , \quad (1)$$

式中,  $H$  和  $e$  分别为变形后试样的高度和孔隙比,  $H_0$  和  $e_0$  分别为试样的初始高度和孔隙比。不同初始含水率试样在 3 种水-力路径下的孔隙比变化规律如图 1 所示。试样在 3 种路径下的压缩曲线均呈上凸型, 卸载回弹曲线呈下凹型。试样在路径①下的压缩曲线最为陡峻, 试样在路径①和②下的压缩曲线位于回弹曲线的上方, 试样在路径③下的压缩曲线相对较为平缓, 待试样压缩稳定以后, 试样浸水吸湿过程中产生了轻微的湿陷现象。当卸荷至零后, 试样在路径①下的孔隙比最大, 路径③下孔隙比最小。不同初始含水率试样的压缩回弹曲线变化规律基本一致, 只是在孔隙比大小上存在一定差异。从图 1 可以看出, 3 种水-力路径下初始含水率越小试样的压缩—回弹曲线总是在初始含水率高的试样的上方。初始含水率越小的试样在路径①下的无荷膨胀率越大, 压缩曲线和回弹曲线越

表 1 试验土样的基本物理性质和矿物组成

Table 1 Basic physical properties and mineral compositions of test soils

天然 含水 率 $w/\%$	干密 度 $\rho_d$ /( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	颗粒相 对密度 $G_s$	塑限 $w_p/\%$	塑性 指数 $I_p/\%$	自由膨 胀率 $\delta_{ef}/\%$	体缩 率 $e_s/\%$	收缩 系数 $\lambda_n$	缩限 $w_s/\%$	矿物相对含量/ $\%$				
									蒙脱 石	伊利 石	白云 石	石英	长石
20.0	1.67	2.72	25.6	15.8	54	14.0	0.49	13.9	23.0	5.2	3.1	23.5	45.2



陡峭。初始含水率越小的试样在路径②下吸湿过程保持高度不变需要施加的荷载越大，继续加载产生的压缩变形越小，而回弹变形反而越大。随着初始含水率的增加，试样在路径③下的压缩变形逐渐增大，吸湿过程中产生的湿陷变形越小，卸荷后的回弹变形也越小。

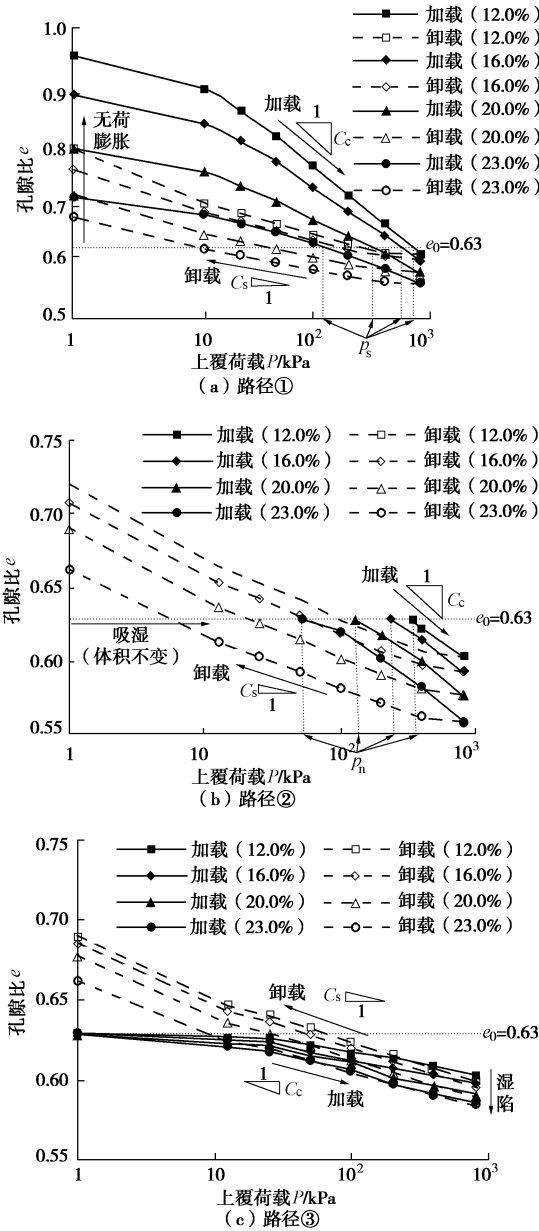


图 1 不同水-力路径下试样的压缩-回弹曲线

Fig. 1 Compression-rebound curves of specimens under different hydro-mechanical paths

由图 1 可以看出，压缩曲线后半段和回弹曲线前半段具有较好的线性，计算直线段的平均斜率得到不同初始含水率试样在 3 种水-力路径下的压缩指数  $C_c$  和回弹指数  $C_s$  如图 2 所示（柱状图上方数字表示压缩指数和回弹指数）。试样在路径①下的压缩指数和回弹指数最大，路径②下次之，路径③下最小。试样在路

径①下的压缩指数和回弹指数随初始含水率减小呈递增的趋势，初始含水率越低的试样浸水膨胀后的压缩性和回弹膨胀性越高，这与 Perdok 等<sup>[10]</sup>和唐朝生等<sup>[11]</sup>的结论吻合，试样吸水膨胀以后，初始含水率越低的试样产生的膨胀变形越大，加载前的孔隙比和含水率越大，加卸载过程中产生的压缩变形和回弹变形越大。试样在路径②下压缩指数和回弹指数随初始含水率减小同样呈递增的趋势，Baille 等<sup>[6]</sup>研究膨润土的压缩性时也得到了类似结论。而试样在路径③下压缩指数随初始含水率的增加而增大，这是因为试样的含水率越高，土颗粒表面结合的水膜越厚，颗粒之间的摩擦力越小，更容易产生压缩变形。

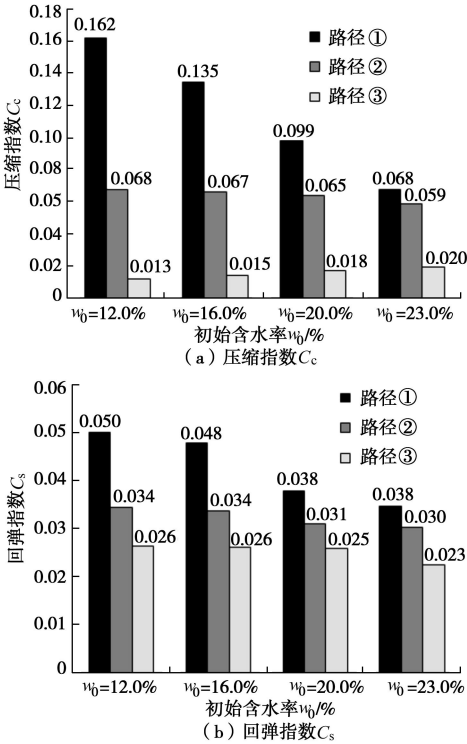


图 2 不同水-力路径下试样的压缩指数  $C_c$  和回弹指数  $C_s$

Fig. 2 Compressive index  $C_c$  and swelling index  $C_s$  of specimens under different hydro-mechanical paths

2.2 吸湿变形特性

不同初始含水率试样在路径①下的无荷膨胀率与初始含水率之间的关系如图 3 所示，试样的初始含水率越低，膨胀速率越快，膨胀率越高。当初始含水率由 23.0%减小到 12.0%，无荷膨胀率由 5.54%急剧增加至 21.03%。

由图 1 (c) 可知，试样在较大的上覆荷载（本文为 800 kPa）作用下浸水吸湿，吸湿饱和过程中发生轻微的湿陷现象，参考张先伟等<sup>[12]</sup>定义的潜在湿陷率  $I_c$  的概念：

$$I_c = \frac{\Delta e}{e_0 + 1} \times 100\% \quad , \quad (2)$$

式中,  $\Delta e$  为浸水前后试样的孔隙比变化量,  $e_0$  为试样的初始孔隙比。计算得到不同初始含水率试样在 800 kPa 的上覆荷载下的潜在湿陷率如图 3 所示。潜在湿陷率与初始含水率之间大致呈线性负相关关系, 潜在湿陷率随初始含水率的增加而减小。

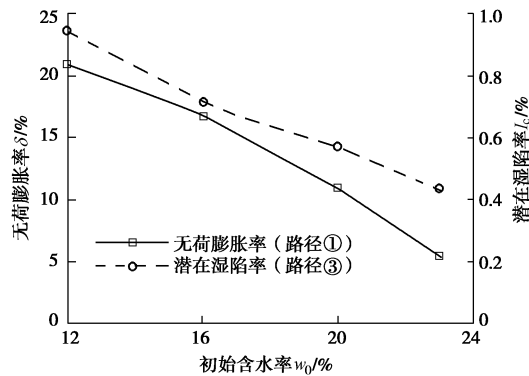


图3 无荷膨胀率、潜在湿陷率与初始含水率之间的关系

Fig. 3 Relationship among no-load expansive ratio, potential collapsible ratio and initial water content

### 2.3 膨胀力的水-力路径效应

试样在路径②下的吸湿过程中, 按照平衡加压法向盛砂桶加入铁砂使试样体积保持不变。吸湿结束后, 将加入铁砂的质量换算成相应的荷载即为平衡加压法确定的膨胀力  $p_n$  (见图 1 (b) 和图 4)。初始含水率越低的试样, 膨胀力增长的速率更快, 最终的膨胀力也越大, 当初始含水率由 23.0% 减小到 12.0%, 膨胀力由 71 kPa 急剧增加至 549 kPa。

根据试样在路径①下的压缩曲线与初始孔隙比直线的交点, 得到膨胀反压法确定的膨胀力  $p_s$  (见图 1 (a) 和图 4)。初始含水率越低的试样, 黏土颗粒结合的水分子层薄, 浸水后试样膨胀变形更大, 将试样恢复至初始高度需要的荷载更大, 因而根据膨胀反压法测得膨胀力越大。

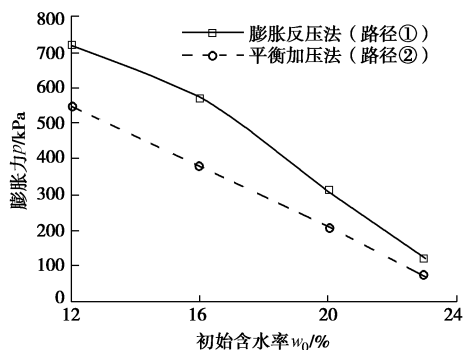


图4 膨胀力与初始含水率之间的关系

Fig. 4 Relationship between swelling pressure and initial water content

对于相同初始状态（含水率和干密度）的试样,

平衡加压法和膨胀反压法确定的膨胀力并不相同, 膨胀反压法确定的膨胀力较平衡加压法大。两种方法确定的膨胀力与初始含水率之间大致呈线性负相关关系, 膨胀力随初始含水率的增加而减小, 平衡加压法得到的膨胀力与初始含水率的关系曲线更为平缓, 随着初始含水率的增加, 两种方法得到的膨胀力与初始含水率的关系曲线有逐渐靠拢的趋势。

### 3 延吉膨胀岩的变形机制探讨

从图 2 (a) 可以看出, 试样在路径①下的压缩指数最大, 在路径②下次之, 在路径③下最小, 其原因是试样在路径①下充分吸水后, 土颗粒表面结合的水膜变厚, 颗粒之间的间距增大, 孔隙比增加, 加载后试样产生的压缩变形大, 压缩指数最大, 而试样在路径③的压缩过程中处于非饱和状态, 颗粒之间滑移需要克服的阻力较大, 试样在荷载作用下产生的压缩变形最小。由图 2 (a) 还可以看出, 试样在路径①下的压缩指数随着初始含水率的增加而减小, 这是缘于静压制样过程中, 土颗粒之间由于缺少水分的润滑作用, 难以发生相对错动, 初始含水率低的试样孔隙主要分布在大孔径范围内<sup>[13]</sup>, 初始含水率低的试样在路径①下吸附水分子的能力更强, 吸水饱和后黏土颗粒表面结合的水分子层变厚, 加载前试样孔隙比较大, 颗粒之间的联接力减弱, 更容易产生压缩变形。试验所用岩样具有较强的水敏性, 抗水性较差, 容易发生崩解水化现象, 当试样的吸湿膨胀受到外部荷载限制时(路径②和③), 大的团聚体逐渐分散成若干小团聚体, 填充在大孔隙中, 土颗粒平均粒径变小, 颗粒尺寸分布越来越均匀。初始含水率较低的试样中大量分布的大孔隙为黏土颗粒的水化产物提供了内部空间, 初始含水率低的试样在路径②的吸湿过程中土颗粒水化程度高, 吸湿后土颗粒更细, 更均匀, 压缩性越大<sup>[11]</sup>。与路径①和②不同, 试样在路径③的压缩过程中处于非饱和状态, 初始含水率低的试样黏土颗粒周围结合的水膜比较薄, 压缩过程中颗粒间的阻力较大, 试样压缩性小。

相比压缩指数, 3 种水-力路径下试样的回弹指数差异相对较小。试样在 3 种路径下的回弹指数随着初始含水率增加而减小, 初始状态相同的试样在路径①下的回弹指数最大, 路径②下次之, 路径③下最小。卸荷后自由水会进入土颗粒之间使水膜变厚, 产生“楔力”使得土颗粒之间的距离增大, 孔隙体积增加, 土体产生回弹变形<sup>[11]</sup>。试样在路径②和③的吸湿过程中由于受到外部荷载的限制, 黏土颗粒水化程度高, 损失在内部空间的膨胀势大, 不可恢复的塑性变形大,

回弹膨胀性低。尤其路径③下试样受到的上覆荷载最大,回弹指数最低,这也使得卸载后试样孔隙比最小。

试样在路径③下压缩变形稳定后浸水吸湿,并未产生体积膨胀,而是发生轻微的湿陷现象,许多学者在开展类似研究时也得到了相似的结果<sup>[9, 11, 14-15]</sup>,膨胀性岩土在较大外部荷载作用下的吸湿变形常常表现出湿陷性黄土常见的性质。唐朝生等<sup>[15]</sup>认为膨胀性岩土在荷载作用下的吸湿体变实际上是膨胀和塌陷行为综合表现的结果,其与试样自身黏土矿物含量、初始状态以及应力状态紧密相关。初始含水率低的试样孔隙平均孔径较大,吸水能力强,无荷膨胀率更大,当试样的吸湿膨胀受到荷载限制时试样中大量分布的大孔隙能为黏土颗粒的膨胀水化提供足够的空间,导致颗粒间的结构强度弱化,试样更容易发生塌陷,潜在湿陷率也更大。在膨胀岩土地基上修筑建(构)筑物时应及时采取防水保湿措施,避免地基出现较大的湿陷变形。

即使相同的试样,路径①和②下得到的膨胀力并不相同,膨胀反压法确定的膨胀力较平衡加压法大,这主要是缘于2种水-力路径下试样浸水吸湿阶段黏土颗粒吸附水分子的能力以及土颗粒之间的摩擦力的方向不同。膨胀反压法中试样先充分吸水膨胀,颗粒之间间距增大,然后通过加载的方式使试样恢复到初始高度,颗粒之间距离减小,会受到阻碍土颗粒靠近的摩擦力,摩擦力方向与膨胀力方向一致,使得宏观表现出的膨胀力较大。2种方法确定的膨胀力随初始含水率的增加而减小,随着初始含水率的增加,两种方法得到的膨胀力与初始含水率之间的关系曲线有逐渐靠近的趋势(见图4),这是由试样的膨胀势和孔隙结构随初始含水率变化宏观表现出来的综合结果。初始含水率低试样的孔隙主要集中在较大孔径范围内<sup>[14]</sup>,浸水后水分容易进入土颗粒之间的孔隙,与黏土颗粒发生物理化学作用,当试样的吸湿膨胀受到荷载限制时(平衡加压法),水化产物填充在大孔隙中,造成试样结构弱化,宏观表现为部分膨胀势消失,随着初始含水率的增加,试样的平均孔径减小,损失在内部孔隙的膨胀势逐渐减小,平衡加压法与膨胀反压法确定的膨胀力逐渐趋于一致。

## 4 结 论

以延吉黄褐色膨胀岩为研究对象,开展了3种水-力路径的压缩试验,分析了不同水-力路径下压实膨胀岩的变形特性,得到以下4点结论。

(1) 试样在路径①下的压缩指数和回弹指数最大,路径②下次之,路径③下最小。试样在路径①和

②下的压缩性和回弹膨胀性随初始含水率增加而减小,试样在路径③下的压缩性随初始含水率增加而增大,回弹膨胀性随初始含水率的增加而减小。

(2) 试样在不同的应力状态下吸湿变形呈现不同的特征,试样在无荷状态下吸湿体积膨胀,当上覆荷载较大时(本文为800 kPa)试样会发生轻微的湿陷现象,无荷膨胀率和潜在湿陷率均随初始含水率的增加而减小。

(3) 对于相同的试样,膨胀反压法确定的膨胀力较平衡加压法大。膨胀反压法和平衡加压法确定的膨胀力均随初始含水率的增加而减小,随着初始含水率的增加,2种方法确定的膨胀力趋于一致。

(4) 由于3种水-力路径下施加荷载的方式和试样吸湿过程中的应力状态不同,即使初始状态相同,试样在3种路径下的变形特性也存在明显差异。延吉膨胀岩的体积变形具有强烈的水-力路径效应,其强烈的水敏性是其中的根本原因。

## 参考文献:

- [1] 谭罗荣,孔令伟.特殊岩土工程土质学[M].北京:科学出版社,2006. (TAN Luo-rong, KONG Ling-wei. Engineering behavior of special rock and soil [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 周葆春,张彦钧,汤致松,等.不同压实度荆门弱膨胀土的一维膨胀-压缩特性[J].岩土力学,2014,35(5): 1275 - 1283. (ZHOU Bao-chun, ZHANG Yan-jun, TANG Zhi-song, et al. One-dimensional swelling-compression characteristics of Jingmen weak expansive soil under different compactnesses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1275 - 1283. (in Chinese))
- [3] 温春莲,陈新万.初始含水率、容重及载荷对膨胀岩特性影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,1992,11(3): 304 - 311. (WEN Chun-lian, CHEN Xin-wan. Effects of initial water content, dry unit weight and load on the swelling of clayey weak rock: an experimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(3): 304 - 311. (in Chinese))
- [4] 李国富,李 珠,戴铁丁.膨胀岩力学性质试验与巷道支护参数的预测研究[J].工程力学,2010,27(2): 96 - 101. (LI Guo-fu, LI Zhu, DAI Tie-ding. Mechanical test of swelling rock and prediction of roadway support parameters[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2): 96 - 101. (in Chinese))
- [5] VILLAR M V, LLORET A. Influence of dry density and water content on the swelling of a compacted bentonite[J]. Applied Clay Science, 2008, 39: 38 - 49.

- [6] BAILLE W, TRIATHY S, SCHANZ T. Swelling pressures and one-dimensional compressibility behavior of bentonite at large pressures[J]. *Applied Clay Science*, 2010, **48**: 324 – 333.
- [7] TANG C S, TANG A M, CUI Y J, et al. Investigating the swelling pressure of compacted crushed-callovio-oxfordian argillite[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, **36**(17/18): 1857 – 1866.
- [8] 罗 冲, 殷坤龙, 周春梅, 等. 膨胀土在不同约束状态下的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(3): 635 – 638. (LUO Chong, YIN Kun-long, ZHOU Chun-mei, et al. Testing study on expansive soil indifferent restrained conditions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(3): 635 – 638. (in Chinese))
- [9] 张俊峰, 邹维列, 李志勇, 等. 压实膨胀土吸湿体变特征的试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, **11**(3): 576 – 600. (ZHANG Jun-feng, ZOU Wei-lie, LI Zhi-yong, et al. Experimental research of wetting-induced deformation characteristics for compacted expansive soil[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, **11**(3): 576 – 600. (in Chinese))
- [10] PERDOK U D, KROESBERGEN B, HOOGMOED W B. Possibilities for modelling the effect of compression on mechanical and physical properties of various Dutch soil types[J]. *Soil and Tillage Research*, 2002, **65**(1): 61 – 75.
- [11] 唐朝生, 崔玉军, TANG Anh-minh, 等. 高放废物处置库中 CO<sub>x</sub> 黏土岩回填材料压缩特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(12): 2459 – 2465. (TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG Anh-minh, et al. Compression behaviors of crushed CO<sub>x</sub> argillite used as backfilling material in HLW repository[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(12): 2459 – 2465. (in Chinese))
- [12] 张先伟, 孔令伟, 臧 濛. 雷州半岛玄武岩残积土的工程地质特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2014, **36**(5): 855 – 863. (ZHANG Xian-wei, KONG Ling-wei, ZANG Meng. Engineering geological characteristics of basalt residual soils in Leizhou peninsula[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(5): 855 – 863. (in Chinese))
- [13] 谈云志, 胡新江, 喻 波, 等. 压实红黏土的恒体积膨胀力与细观机制研究[J]. *岩土力学*, 2014, **35**(3): 653 – 658. (TAN Yun-zhi, HU Xin-jiang, YU Bo, et al. Swelling pressure and mesomechanism of compacted laterite under constant volume condition[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, **35**(3): 653 – 658. (in Chinese))
- [14] 项 伟, 董晓娟. 南水北调淤王坟段弱膨胀土膨胀性研究[J]. *岩土力学*, 2012, **33**(4): 986 – 992. (XIANG Wei, DONG Xiao-juan. Study of swelling characteristic of the weak expansive soil in Luwangfen for South-to-North Water Diversion Project[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(4): 986 – 992. (in Chinese))
- [15] 唐朝生, 崔玉军, TANG Anh-minh, 等. 重塑 CO<sub>x</sub> 泥岩在饱和过程中应力应变的演化规律[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(8): 1166 – 1171. (TANG Chao-sheng, CUI Yu-jun, TANG Anh-minh, et al. Stress and strain evolution of remoulded CO<sub>x</sub> argillite during saturation[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(8): 1166 – 1171. (in Chinese))

(责任编辑 孙振远)