

云南红土的循环胀缩特性研究

范本贤, 黄英, 孙书君, 杨恒, 周丹

(昆明理工大学电力工程学院, 昆明 650500)

摘要: 以云南红土为研究对象, 考虑干湿循环时间、干湿循环次数、初始干密度等影响因素, 通过膨胀、收缩试验与图像处理相结合的方法, 研究不同影响因素对云南红土胀缩特性的影响。结果表明: 干湿循环过程中, 红土的膨胀过程可以分为快速膨胀、缓慢膨胀和稳定膨胀3个阶段, 收缩过程可以分为缓慢收缩、快速收缩和稳定收缩3个阶段。随增湿时间延长, 红土的竖向膨胀率、含水率、孔隙率等膨胀参数呈“厂”形增大变化; 随脱湿时间延长, 竖向收缩率、横向收缩率、体积收缩率等收缩参数呈“S”形增大变化, 含水率、孔隙率逐渐减小。随增湿次数增加, 稳定竖向膨胀率、横向膨胀率、体积膨胀率呈先急剧增大后缓慢减小的变化; 随脱湿次数增加, 稳定竖向收缩率、横向收缩率、体积收缩率呈先增大后缓慢波动变化。随初始干密度增大, 稳定竖向膨胀率、竖向收缩率、体积膨胀率增大, 横向膨胀率、横向收缩率、体积收缩率呈减小变化。竖向膨胀大于竖向收缩, 体积膨胀大于体积收缩, 横向收缩大于竖向收缩。

关键词: 云南红土; 胀缩特性; 干湿循环时间; 干湿循环次数; 初始干密度

中图分类号: TU411.91 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)02-0120-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.02.018

Study on Cyclic Swell-Shrink Characteristics of Yunnan Laterite

FAN Benxian, HUANG Ying, SUN Shujun, YANG Heng, ZHOU Dan

(College of Electrical Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

Abstract: Taking Yunnan laterite as the research object, this paper studied the effects of different factors on the swell-shrink characteristics of Yunnan laterite and the influencing factors such as wetting-drying cycle time, wetting-drying cycle times and initial dry density were taken into account through the method of expansion and shrinkage test combined with image processing. The results showed that the expansion process of laterite can be divided into 3 stages: rapid expansion, slow expansion, and stable expansion. The contraction process could also be divided into 3 stages: slow contraction, rapid contraction, and stable contraction. With the increase of wetting time, the vertical expansion rate, moisture content, porosity and other expansive parameters of laterite increased as the “厂” type. The shrinkage parameters such as vertical shrinkage, transverse shrinkage, volume shrinkage and so on increased with the time of dewetting, showing the change of “S” type, and the moisture content and porosity decrease gradually. With the increase of humidification times, the stability of vertical expansion rate, the transverse expansion rate, and the volume expansion rate increased sharply first and then decreased slowly. With the increase of dehumidifying times, the vertical shrinkage, the transverse shrinkage, and the volume shrinkage increased firstly and then fluctuated slowly. With the increase of initial dry density, the vertical expansion rate, the vertical shrinkage rate, and the volume expansion rate increased, while the transverse expansion rate, transverse shrinkage rate, and volume shrinkage rate decreased.

Keywords: Yunnan laterite; swell-shrink characteristics; wetting-drying cycle time; wetting-drying cycle times; initial dry density

红土广泛分布于我国云南、广西、贵州、福建、湖南、江西等南方省份, 是具有特殊工程地质性质的土体^[1]。红土的特殊性表现在含水率高、孔隙比大、密度低等物理特性, 但其低压缩性和高承载力等的力学

特性使云南红土作为筑坝材料广泛用于土石坝的建设中, 构成红土型大坝。而云南干湿分明、降雨集中的气候特点, 促使红土型大坝受到年复一年的干湿循环作用, 导致红土型大坝产生反复胀缩变形, 形成裂

隙,引起渗漏^[2-3],出现病险水库问题。因而,研究干湿循环作用下云南红土的胀缩变形问题,对于有效防治红土型病险水库具有重要意义。

关于土体的胀缩变形特性问题,国内外学者主要针对膨胀土开展了大量的研究工作^[4-7],表明膨胀土具有明显的膨胀收缩特性,多次循环作用下表现出持续膨胀收缩的不可逆的体变特征。唐朝生等^[8]通过对比吸力法和常规的浸水饱和—蒸发干燥法2种干湿循环试验方法,研究了干湿循环膨胀土的胀缩变形特征问题,表明膨胀土胀缩变形与吸力有关;谭波等^[9]通过开展膨胀土三向胀缩试验研究表明,干密度和三向应力状态是影响三向膨胀性的重要因素;杨和平等^[10]针对原状膨胀土研究了有荷载条件下的干湿循环过程,表明在一定荷载变化范围内,经历相同的干湿循环次数,荷载越大膨胀土的胀缩率越小;魏星等^[11]通过把干湿循环作用下击实膨胀土产生的胀缩体变分解为可逆性分量与不可逆分量,并分别给出了可逆性和不可逆性干湿体变分量的数学描述,结合低塑性非饱和土的BBM模型,提出了一个适用于击实膨胀土的实用本构模型;李志清等^[12]通过开展膨胀土普通胀缩试验,并应用 Does Response 模型,定量模拟了膨胀土胀缩时程规律,表明膨胀土含有的大量细小黏土颗粒与较强的蒙脱石晶体矿物及显著的微结构特征,是其产生强烈胀缩变形灾害的内因与本质,而土中发育的微孔隙—裂隙结构及其初始状态,是发生胀缩变形灾害的外因。关于红土的胀缩问题,谈志志等^[13]以压实红黏土为研究对象,开展了自然风干条件下不同初始干密度的自由收缩试验,并通过孔隙分析仪测定该脱湿状态下的孔隙分布特征,揭示细观孔隙体积与宏观总体积收缩的对应过程;朱建群等^[14]通过常规收缩试验和压汞试验,研究了干湿循环作用下红黏土的收缩特性,表明干湿循环作用对聚集体内孔径的影响大于对微聚体内孔隙影响,与宏观收缩规律相吻合;黄丁俊等^[15]研究了初始干密度对红黏土胀缩特性的影响,表明红黏土初始干密度越大,稳定后膨胀率越大。王莹莹等^[16]研究了初始含水率对红黏土的胀缩特性的影响,表明红黏土相同的干湿循环次数下,初始含水率越大,红黏土绝对膨胀率和绝对收缩率越大。

关于云南红土的胀缩特性问题研究较少,而云南干湿分明、降雨集中的气候特点,尤其是前几年的极端干旱气候,干湿循环作用强烈,红土型土石坝胀缩产生裂隙现象,导致土石坝渗漏严重。因此,本文以云南大坝红土为研究对象,以干湿循环作为控制条件,采用室内试验和图像处理方法,研究云南大坝红土的胀缩问题。

1 试验设计

1.1 试验材料

试验土料取自昆明世博园附近某处的典型红土,

其基本性质为:风干含水率 3.3%,最大干密度 1.50 g/cm³,塑限 26.6%,最优含水率 27.4%,自由膨胀率 25%,粉粒 45.9%,黏粒 44.7%,砂粒 9.4%,说明该红土以粉粒和黏粒为主,占比 90.6%;塑性指数 16.7,介于 10~17,液限 43.3%小于 50%,该红土比重 2.72。因此属于低液限粉质红土。

1.2 试验设计

以云南红土为研究对象,考虑干湿循环时间、干湿循环次数和初始干密度的影响,制备红土试样,开展室内(室内温度 18~22 ℃)膨胀与收缩试验,研究干湿循环时间、干湿循环次数和初始干密度对云南红土胀缩特性的影响。以含水率作为干湿循环的控制条件,控制初始含水率为 26.3%,初始干密度分别设置为 1.15,1.25,1.35,1.45 g/cm³,增湿膨胀时间控制为 24 h,脱湿收缩时间按含水率减小到 8.0%控制。先增湿膨胀,后脱湿收缩,作为一次完整的干湿循环过程。图 1 为初始干密度 1.45 g/cm³ 时红土试样的膨胀—收缩干湿循环控制过程。

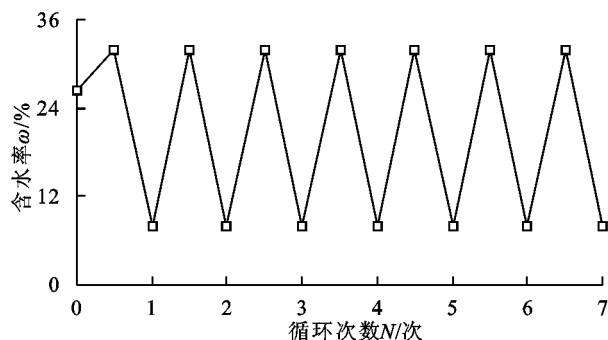


图1 红土试样干湿循环过程示意

试验过程中,根据设定的初始含水率,按击实法制备直径 61.8 mm、高度 20 mm 的环刀试样(在环刀底部放置透水滤纸,顶端不进行处理,便于观察试样表面的胀缩变化),安装在无荷载膨胀仪中,进行浸水膨胀试验,模拟增湿过程,记录增湿时间分别为 0,1,2,3,5,10,15,20,25,30,60,120,180,360,540,720,1440 min 时刻百分表的读数,称取试样质量。达到预定增湿时间,膨胀试验结束,完成 1 次增湿膨胀过程,即完成前半个干湿循环,并以该膨胀试验结束时的状态作为接下来收缩试验的初始状态,进行收缩试验。需要说明的是在膨胀过程中,试样的称量是以相同条件下的平行试验来进行。根据膨胀试验数据,可计算不同增湿时间下试样的竖向膨胀率、体积膨胀率、含水率、孔隙率等反映膨胀特性的膨胀参数。

膨胀试验结束后,将膨胀仪连同试样一起放入 40 ℃烘箱中,进行低温收缩试验,模拟脱湿过程。脱湿时间每 3 h 记录一次百分表读数,称取试样质量,获取试样表面图像。待试样含水率脱湿至 8.0%附近时,收缩试验结束,完成一次脱湿收缩过程,即完成后半个干湿循环。至此,进行了一个完整的干湿循环

过程。并以此收缩试验结束时的含水率作为下一增湿过程中膨胀试验的初始状态,进行下一次膨胀—收缩干湿循环试验,反复进行 7 次增湿—脱湿的干湿循环。根据收缩试验数据,结合 Matlab 图像处理提取的试样表面尺寸,可计算不同脱湿间试样的竖向收缩率、横向收缩率、体积收缩率、含水率、孔隙率等反映收缩特性的收缩参数。

2 结果与分析

2.1 红土的胀缩特性随时间的变化

2.1.1 增湿时间对膨胀特性的影响 图 2 为增湿过程中经历 1 次增湿作用、不同初始干密度 ρ_d 下,红土样的竖向膨胀率 δ_{sp} 、含水率 ω_p 、孔隙率 n_p 等膨胀参数随增湿时间 t_p 的变化。

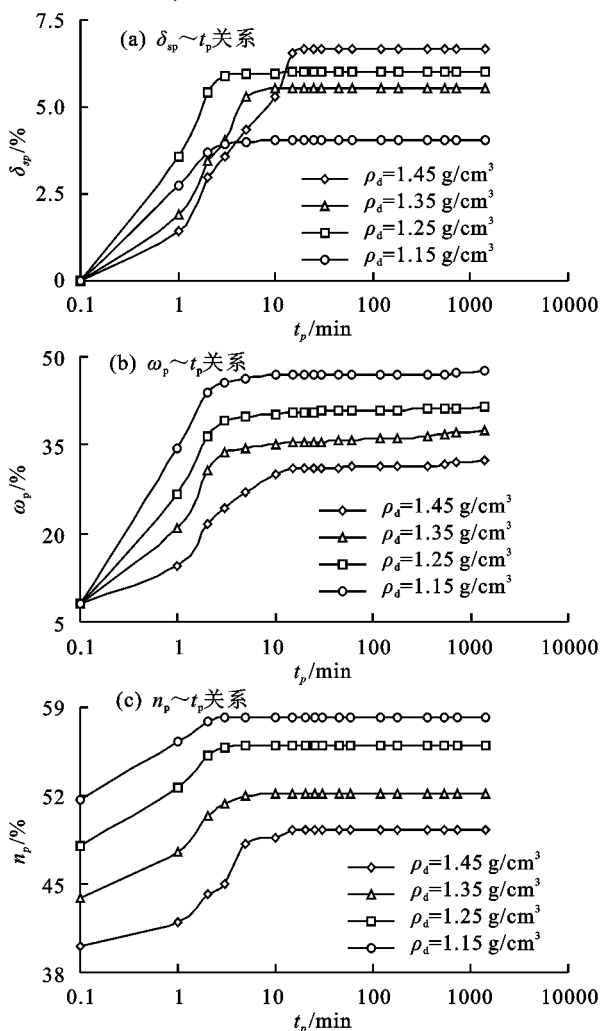


图 2 增湿过程中红土的膨胀参数随增湿时间的变化

从图 2 可以看出:(1)增湿过程中不同初始干密度下,随增湿时间的延长,红土的竖向膨胀率、含水率、孔隙率等膨胀参数呈“厂”形变化。根据膨胀率随增湿时间的变化趋势,红土的膨胀过程可以分为快速膨胀、缓慢膨胀和稳定膨胀 3 个阶段。快速膨胀阶段,红土的膨胀率在增湿前期急剧增大;缓慢膨胀阶段,红土的膨胀率在增湿中期缓慢增大;稳定膨胀阶段,红土的膨胀率在增湿后期趋于稳定状态。(2)当

初始干密度按 1.15,1.25,1.35,1.45 g/cm³ 增大时,快速膨胀时间段分别对应于 0~2,0~3,0~5,0~15 min 以内,这一阶段,红土的竖向膨胀率、含水率、孔隙率等膨胀参数急剧增大,相比起始时间 0,竖向膨胀率分别增大到 3.7%,5.9%,5.3%,6.5%,含水率分别增大了 434.0%,377.2%,319.9%,276.6%,孔隙率分别增大了 11.9%,16.5%,18.8%,23.0%。超过快速膨胀时间,红土的竖向膨胀率、含水率、孔隙率等膨胀参数增长缓慢,缓慢膨胀时间分别对应于 2~10,3~15,5~15,15~20 min,相比快速膨胀时间,竖向膨胀率分别增大了 9.0%,1.5%,4.5%,1.8%,含水率分别增大了 6.9%,2.2%,2.5%,0.2%,孔隙率分别增大了 0.7%,0.1%,0.2%,0。超过缓慢膨胀时间,红土的竖向膨胀率、含水率、孔隙率等膨胀参数基本不变,红土的膨胀达到稳定状态。(3)说明红土的膨胀程度主要由增湿初期控制。初始干密度越大,达到快速膨胀的时间越长,含水率增大程度越小,孔隙率增大程度越大,竖向膨胀率越大。增湿过程中,短时间内红土大量吸水,引起含水率的快速增大;同时由于水的楔入作用,破坏了红土颗粒之间的连接,增大了红土颗粒间的孔隙,引起孔隙率增大;而且由于试样顶部无约束,孔隙的增大必然导致试样体积增大,主要是竖向高度的增大,因而竖向线膨胀率增大。但随增湿时间延长,红土的吸水量越来越少,水的楔入作用越来越弱,破坏颗粒间连接引起孔隙增大的程度越来越低,试样体积的增大特别是高度的增大越来越小,体现出含水率、孔隙率及膨胀率的变化很小,试样膨胀趋于稳定。

2.1.2 脱湿时间对收缩特性的影响 图 3 为脱湿过程中经历 1 次脱湿作用、不同初始干密度 ρ_d 下,红土样的竖向收缩率 δ_{ss} 、横向收缩率 δ_{hs} 、体积收缩率 δ_{vs} 、含水率 ω_s 、孔隙率 n_s 等收缩参数随脱湿时间 t_s 变化。

从图 3 可以看出:(1)不同初始干密度下,随脱湿时间延长,红土的竖向收缩率、横向收缩率、体积收缩率等收缩参数呈“S”形增大变化趋势,含水率、孔隙率呈减小变化趋势。据此,红土的收缩过程可以分为缓慢收缩、快速收缩和稳定收缩 3 个阶段。缓慢收缩阶段,红土的收缩率在脱湿前期缓慢增大;快速收缩阶段,红土的收缩率在脱湿中期急剧增大;稳定收缩阶段,红土的收缩率在脱湿后期趋于稳定状态。(2)当初始干密度按 1.15,1.25,1.35,1.45 g/cm³ 增大时,缓慢收缩时间分别对应于 12,12,6,6 h,这一阶段,红土的收缩率增长缓慢,竖向收缩率增大到 0.4%~0.6%左右,横向收缩率为 0,体积收缩率约为 0.5%;超过缓慢收缩时间,达到 18~21 h,进入快速收缩阶段,红土的收缩率急剧增大,相比缓慢收缩阶段,竖向收缩率增大了 336.2%,406.0%,1 111.1%,1 163.0%,横向收缩率由 0 增大到 4.5%,5.1%,5.0%,

4.2%, 体积收缩率增大到 11.3%, 12.7%, 13.0%, 11.9%; 超过快速收缩时间, 红土的收缩率变化很小, 逐渐进入稳定状态。(3) 随脱湿时间延长, 红土的含水率逐渐减小。当初始干密度按 1.15, 1.25, 1.35, 1.45 g/cm³ 增大时, 脱湿时间 0~3 h, 每小时含水率分别减小了 2.9%, 1.8%, 1.7%, 1.0%; 脱湿时间 3~32 h, 每小时含水率分别减小了 1.0%, 0.9%, 0.8%, 0.7%; 脱湿时间超过 32 h, 含水率趋于稳定。说明脱湿初期, 红土的含水率较小较快; 脱湿后期, 含水率较小缓慢。红土的脱湿过程可以分为快速脱湿、缓慢脱湿、稳定脱湿 3 个阶段, 而且初始干密度越大, 红土脱湿含水率的减小程度越小。(4) 随脱湿时间延长, 红土的孔隙率逐渐减小。对于初始干密度 1.15, 1.25 g/cm³, 脱湿时间 0~12 h, 红土的孔隙率缓慢减小, 相比 0 h, 分别减小了 0.4%, 0.9%; 脱湿时间 12~21 h, 红土的孔隙率快速减小, 相比 12 h, 分别减小了 8.6%, 10.1%; 脱湿时间超过 21 h, 红土的孔隙率趋于稳定。对于初始干密度 1.35, 1.45 g/cm³, 脱湿时间 0~9 h 孔隙率缓慢减小, 相比 0 h, 分别减小了 1.2%, 0.9%; 9~18 h 快速减小, 相比 9 h, 分别减小了 12.1%, 12.3%; 超过 18 h 趋于稳定。(5) 说明脱湿过程中, 红土含水率的减小与对应的孔隙减小和收缩率的增大不完全同步。脱湿初期, 土颗粒表面包裹水膜较厚, 大量自由水的排除导致含水率在快速减小时对应的孔隙减小不明显, 所以收缩率增大缓慢; 脱湿中期, 土颗粒表面包裹水膜逐渐变薄, 少量自由水和弱结合水的排除导致含水率继续减小的, 同时由于土颗粒的吸附作用, 颗粒之间距离靠拢, 孔隙减小, 相应地收缩率增大; 脱湿后期, 土颗粒表面包裹的水膜更薄, 主要是少量弱结合水尤其是强结合水的存在, 土颗粒对水的吸附作用增强, 水的排除困难, 无法拉近颗粒之间的距离, 所以含水率变化很小, 对应孔隙变化不大, 相应地收缩率变化不大, 趋于稳定。

2.2 红土的胀缩特性随干湿循环次数的变化

2.2.1 增湿次数对膨胀率的影响 图 4 为不同初始干密度 ρ_d 下, 增湿过程中达到膨胀稳定状态时, 红土样的竖向膨胀率 δ_{sp} 、横向膨胀率 δ_{hp} 和体积膨胀率 δ_{vp} 随增湿次数 N_p 的变化。从图 4 可以看出, 总体上增湿过程中不同初始干密度下, 随增湿次数增加, 膨胀达到稳定时红土的竖向膨胀率、横向膨胀率、体积膨胀率呈先急剧增大后缓慢减小的变化趋势。增湿 2 次, 红土的竖向、横向以及体积膨胀率达到最大值; 当初始干密度由 1.15 g/cm³ 增大到 1.45 g/cm³, 竖向膨胀率由 0 增大到 4.0%~6.7%, 横向膨胀率由 0 增大到 5.1%, 体积膨胀率由 0 增大到 13.8%~16.0%。增湿超过 2~7 次时, 相比 2 次的最大值, 竖向膨胀率减小了 20.3%~38.1%, 横向膨胀率减小了 0~16.6%, 体积膨胀率减小了 5.2%~11.1%。说明随增湿次数增加, 膨胀达到稳

定时红土的竖向、横向以及体积膨胀主要体现在第 2 次增湿过程中; 随后的增湿不但没有产生新的膨胀, 反而引起收缩, 导致膨胀率减小, 尤其是竖向膨胀率的减小程度大于横向膨胀率的减小程度。

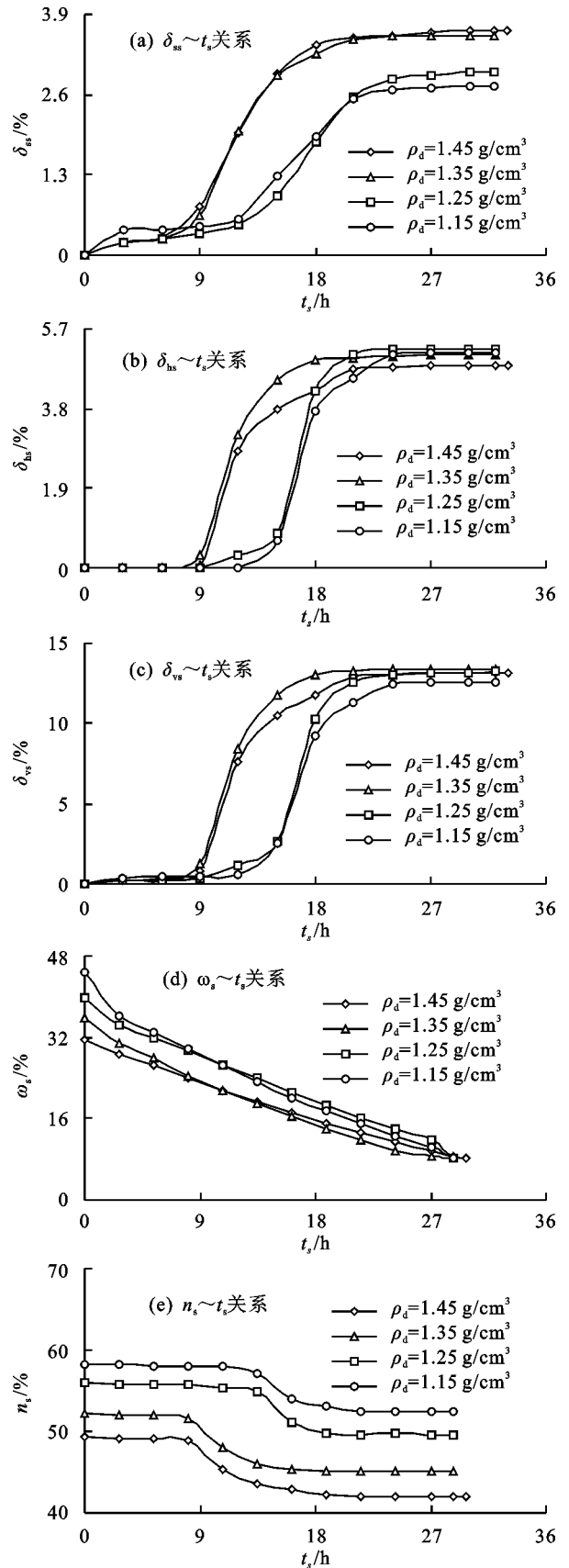


图3 脱湿过程中红土的收缩参数随脱湿时间的变化

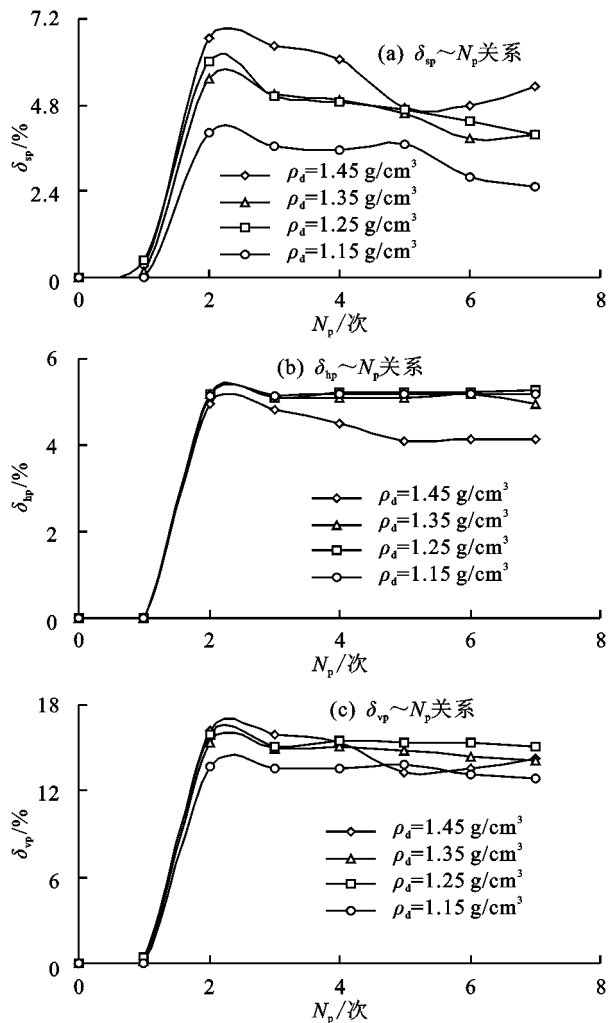


图 4 增湿过程中红土的稳定膨胀率随增湿次数的变化

2.2.2 脱湿次数对收缩率的影响 图 5 为不同初始干密度 ρ_d 下、脱湿过程中达到收缩稳定状态时红土样的竖向收缩率 δ_{ss} 、横向收缩率 δ_{bs} 和体积收缩率 δ_{vs} 随脱湿次数 N_s 的变化。从图 5 可以看出,总体上脱湿过程中随脱湿次数增加,达到收缩稳定时红土的竖向收缩率、横向收缩率、体积收缩率呈先急剧增大后缓慢波动变化趋势。脱湿 2 次,红土的竖向收缩率达到最大值;当初始干密度由 1.15 g/cm^3 增大到 1.45 g/cm^3 ,竖向收缩率由 0 增大到 $2.7\% \sim 3.6\%$;脱湿 7 次,相比 2 次的最大值,除干密度 1.35 g/cm^3 外,竖向收缩率减小了 $2.9\% \sim 9.1\%$ 。脱湿 1 次,横向收缩率达到最大值;初始干密度为 $1.15 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$,横向收缩率由 0 增大到 $5.0\% \sim 5.1\%$,体积收缩率由 0 增大到 $12.4\% \sim 11.8\%$;脱湿 7 次,横向收缩率为 $4.1\% \sim 5.2\%$,体积收缩率为 $14.1\% \sim 12.4\%$ 。说明随脱湿次数增加,达到收缩稳定时红土的竖向收缩主要体现在第 2 次脱湿过程中,横向收缩和体积收缩主要体现在第 1 次脱湿过程中,随后缓慢波动变化趋于稳定。体现出红土的竖向收缩和横向收缩的发展程度不同步现象。

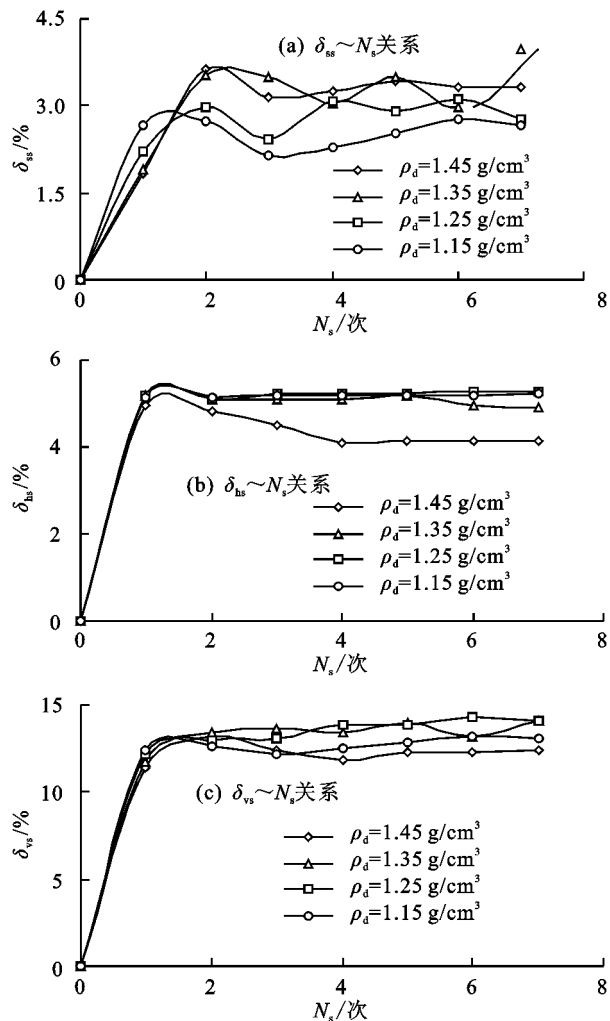


图 5 脱湿过程中红土的稳定收缩率随脱湿次数的变化

2.3 红土的胀缩特性随干密度的变化

2.3.1 干密度对膨胀特性的影响 图 6 为不同增湿次数 N_p 下、增湿过程中达到膨胀稳定时红土样的竖向膨胀率 δ_{sp} 、横向膨胀率 δ_{bp} 、体积膨胀率 δ_{vp} 随初始干密度 ρ_d 的变化。从图 6 可以看出,总体上增湿过程中相同增湿次数下,随初始干密度增大,达到膨胀稳定时红土的竖向膨胀率、体积膨胀率呈波动增大变化趋势,横向膨胀率呈减小变化趋势。随初始干密度增大,增湿 1 次稳定时红土的竖向膨胀率、横向膨胀率和体积膨胀率很小,竖向膨胀率由 0 增大到 0.3% ,体积膨胀率由 0 增大到 0.3% ,横向膨胀率为 0。增湿 1 次以上达到稳定时红土的竖向膨胀率、体积膨胀率增大,横向膨胀率减小。当初始干密度由 1.15 g/cm^3 增大到 1.45 g/cm^3 ,膨胀稳定竖向膨胀率从 $2.5\% \sim 4.4\%$ 增大到 $4.8\% \sim 6.7\%$,横向膨胀率从 5.2% 减小到 $4.1\% \sim 4.8\%$,体积膨胀率从 $12.9\% \sim 13.9\%$ 增大到 $13.6\% \sim 16.0\%$ 。说明不论初始干密度大小,增湿初期,由于红土样内外含水不平衡,浸入的水分主要由下往上充填颗粒之间的孔隙,楔入颗粒间的水分少,引起红土的竖向膨胀程度小,而初期试

样的横向贴紧环刀壁,所以横向没有膨胀。随增湿过程的深入,红土样的初始干密度越大,孔隙越小,经过上一次的脱湿过程,增湿过程中水分很快充满孔隙,多余的水分更易于楔入颗粒之间,包裹土颗粒表面的水膜增大了颗粒间的距离,由于试样顶部没有约束,导致试样竖向颗粒间的距离增大,引起竖向膨胀;而横向由于有环刀的侧限约束,试样只能膨胀至环刀内壁,体现出竖向膨胀率增大、横向率膨胀率减小,综合的结果导致体积膨胀率约有增大。

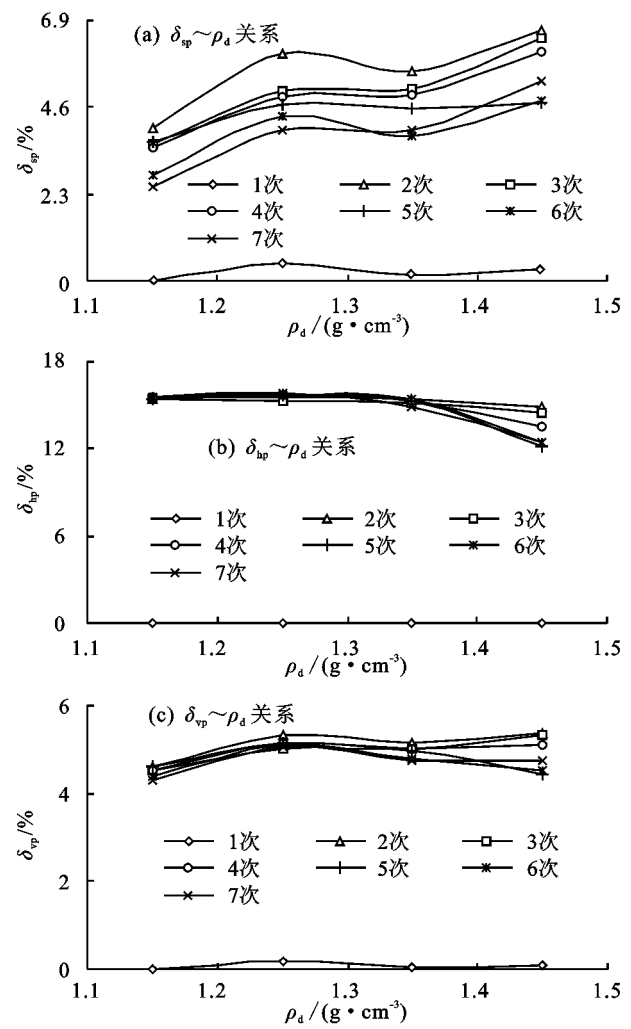


图6 增湿过程中红土的稳定膨胀率随干密度的变化

2.3.2 干密度对收缩特性的影响 图7为不同脱湿次数 N_s 下、脱湿过程中达到收缩稳定状态时红土样的竖向收缩率 δ_{ss} 、横向收缩率 δ_{hs} 、体积收缩率 δ_{vs} 随初始干密度 ρ_d 的变化。从图7可以看出,总体上脱湿过程中,除1次脱湿,随初始干密度增大,达到收缩稳定时红土的竖向收缩率呈增大变化,横向收缩率呈减小变化,体积收缩率呈凸形减小变化趋势。当初始干密度由 1.15 g/cm^3 增大到 1.45 g/cm^3 ,脱湿1次收缩稳定时,红土的竖向收缩率减小了31.3%,横向收缩率减小了3.5%,体积收缩率减小了8.5%。脱湿1次以

上收缩稳定时,竖向收缩率由 $2.2\% \sim 2.8\%$ 增加到 $3.1\% \sim 3.6\%$;横向收缩率由 5.2% 减小到 $4.1\% \sim 5.0\%$,干密度 $1.15 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ 减小缓慢,干密度 $1.35 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$ 下降较快;干密度 $1.25 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$ 体积膨胀率出现最大值,由 $12.2\% \sim 13.1\%$ 增加至 $13.4\% \sim 14.1\%$;干密度在 $1.35 \sim 1.45 \text{ g/cm}^3$,体积收缩率由 $13.4\% \sim 14.1\%$ 减小至 $12.3\% \sim 13.2\%$ 。说明在脱湿的过程中,随脱湿过程的深入,达到收缩稳定状态时初始干密度越大,更易于引起红土的竖向收缩,减小横向收缩。

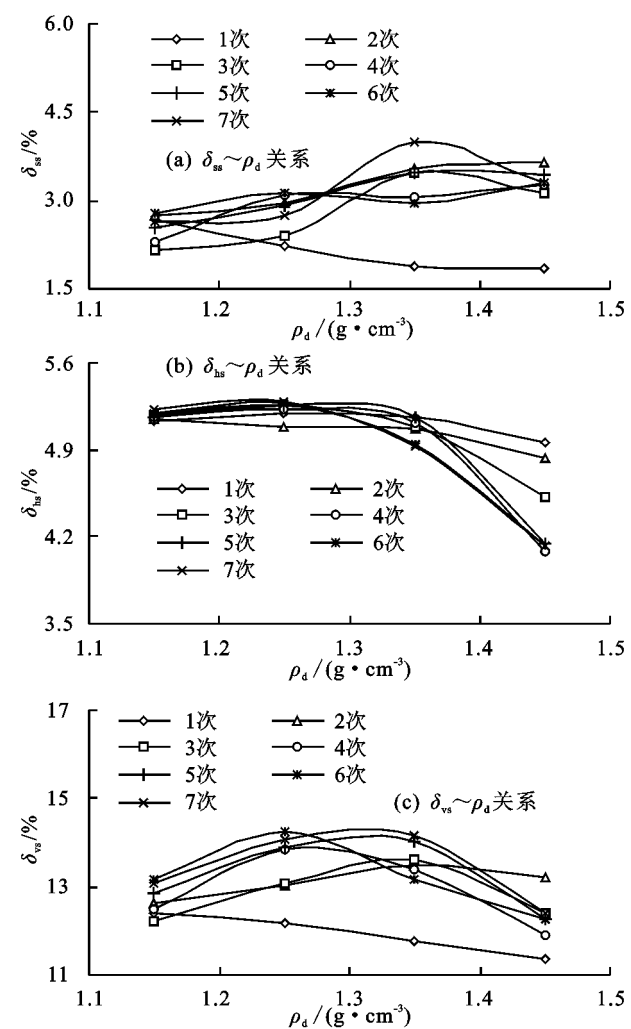


图7 脱湿过程中红土的稳定收缩率随干密度的变化

2.4 胀缩特性比较

2.4.1 横向与竖向收缩率比较 图8为脱湿过程中达到收缩稳定时,红土样的竖向收缩率 δ_{ss} 、横向收缩率 δ_{hs} 随脱湿时间 t_s 、含水率 ω_s 、脱湿次数 N_s 、初始干密度 ρ_d 的变化。从图8可以看出:(1)脱湿过程中达到收缩稳定时,随脱湿时间的延长,红土的含水率增大,其竖向收缩率和横向收缩率增大;收缩时间小于10 h、含水率小于 22.0% 时,红土的竖向收缩率大于横向收缩率;脱湿时间超过10 h、含水率超过 22.0% 时,红土的横向收缩率大于竖向收缩率。脱湿时间达

到 21 h、含水率减小到 15.0%，横向收缩率比竖向收缩率增大 35.2%。说明脱湿时间越长，含水率越小，红土的横向收缩和竖向收缩都趋于稳定，但横向收缩始终大于竖向收缩。(2)随脱湿次数增加，红土的竖向收缩率、横向收缩率先增大后减小；相同脱湿次数下，横向收缩率大于竖向收缩率。脱湿 2 次，竖向收缩率达到最大值，约为 3.6%；脱湿 7 次，竖向收缩率减小到 3.3%。脱湿 1 次，横向收缩率达到最大值，约为 5.0%；脱湿 7 次，横向收缩率减小到 4.1%。说明脱湿过程中脱湿初期对红土的收缩特性影响最大，

显著引起竖向和横向收缩；随脱湿过程的深入，脱湿作用的影响逐渐减弱，竖向和横向收缩趋于稳定。(3)随初始干密度增大，红土的竖向收缩率增大，横向收缩率减小；相同初始干密度下，横向收缩率大于竖向收缩率。当初始干密度由 1.15, 1.25, 1.35 增大到 1.45 g/cm³，横向收缩率减小了 6.2%，竖向收缩率增大了 33.3%；相比竖向收缩率，横向收缩率分别增大了 88.6%，71.0%，43.2%，32.7%。说明在脱湿过程中，初始干密度越大，红土的横向收缩和竖向收缩的程度差越小。

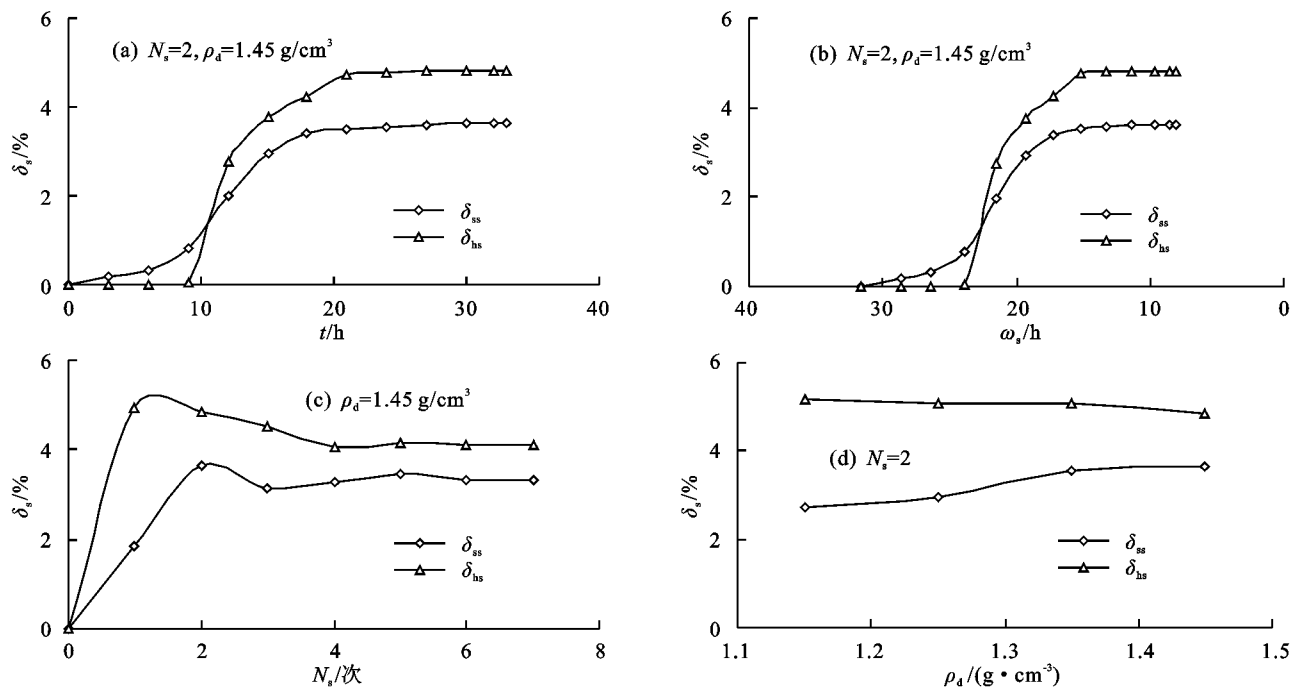


图 8 脱湿过程中红土的横向收缩率与竖向收缩率比较

2.4.2 膨胀率与收缩率比较 图 9 为增湿—脱湿的干湿循环过程中达到膨胀—收缩稳定状态时，红土样的竖向膨胀率 δ_{sp} 、竖向收缩率 δ_{ss} 、体积膨胀率 δ_{vp} 、体积收缩率 δ_{vs} 随含水率 ω 、初始干密度 ρ_d 、干湿循环次数 N 的变化。

从图 9 可以看出：(1)干湿循环过程中，随含水率增大红土的竖向膨胀率增大，竖向收缩率减小，竖向膨胀率由 0 增大到约 6.0%，而竖向收缩率由 3.0% 减小到 0。含水率小于 18.0%，收缩率大于膨胀率，含水率为 8.0% 时，竖向膨胀率为 0，而竖向收缩率达到 3.0%；含水率大于 18.0%，膨胀率大于收缩率；含水率为 40.0% 时，竖向收缩率为 0，而竖向膨胀率达到 6.0%。说明干湿循环具有增湿过程吸水膨胀、脱湿过程失水收缩的典型特征。(2)随初始干密度增大，红土的竖向膨胀率和竖向收缩率呈增大趋势；相同初始干密度下，膨胀率大于收缩率。当初始干密度由 1.15, 1.25, 1.35 增大到 1.45 g/cm³，竖向膨胀率

增大了 64.6%，竖向收缩率增大了 33.3%；相比竖向收缩率，竖向膨胀率分别增大了 48.0%，102.4%，56.5%，82.7%。说明干湿循环过程中，初始干密度越大，红土竖向的膨胀、收缩趋势越大，但竖向膨胀始终大于竖向收缩。(3)随干湿循环次数增加，红土的竖向膨胀率、竖向收缩率、体积膨胀率急剧增大后缓慢减小，体积收缩率缓慢增大；干湿循环 1 次，竖向膨胀率、体积膨胀率小于竖向收缩率、体积收缩率；干湿循环 1 次以上，竖向膨胀率、体积膨胀率大于竖向收缩率、体积收缩率。干湿循环 2 次，竖向膨胀率、竖向收缩率、体积膨胀率、体积收缩率分别由 0 增大到 6.0%，3.0%，16.0%，13.0%；干湿循环 7 次，竖向膨胀率、体积膨胀率、竖向收缩率分别减小了 33.4%，5.2%，7.1%，体积收缩率增大了 8.3%。说明相同初始干密度下，干湿循环初期对红土的胀缩特性影响最大，显著引起红土的膨胀和收缩；随干湿循环过程深入，干湿循环作用的影响减弱。

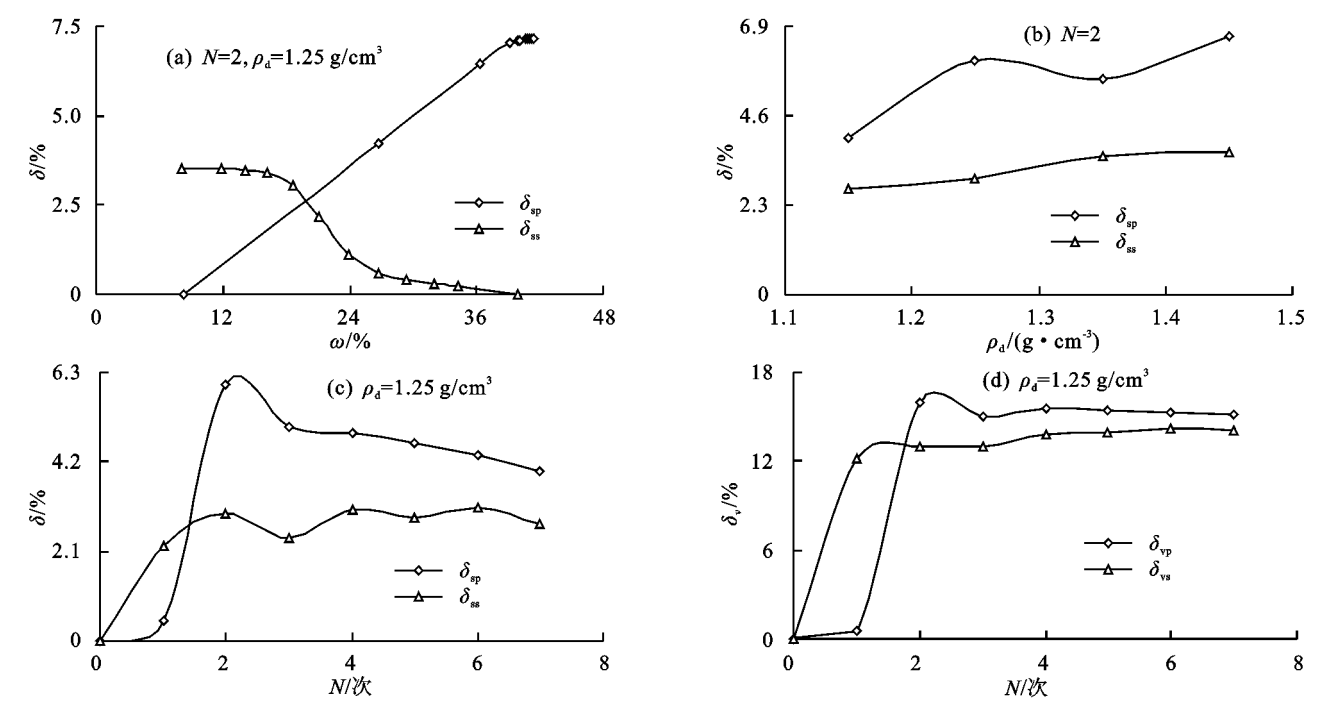


图 9 干湿循环过程中红土的膨胀率与收缩率比较

3 结论与建议

(1)红土的胀缩特性与干湿循环时间有关。增湿过程中,随增湿时间延长,红土的膨胀参数呈“厂”形增大变化,其膨胀过程可以分为快速膨胀阶段、缓慢膨胀阶段和稳定膨胀阶段。快速膨胀阶段,红土的膨胀率在增湿前期急剧增大;缓慢膨胀阶段,红土的膨胀率在增湿中期缓慢增大;稳定膨胀阶段,红土的膨胀率在增湿后期趋于稳定状态。脱湿过程中,随脱湿时间的延长,红土的收缩参数呈“S”形增大变化,其收缩过程可以分为缓慢收缩阶段、快速收缩阶段和稳定收缩阶段。缓慢收缩阶段,红土的收缩率在脱湿前期缓慢增大;快速收缩阶段,红土的收缩率在脱湿中期急剧增大;稳定收缩阶段,红土的收缩率在脱湿后期趋于稳定状态。

(2)红土的胀缩特性与干湿循环次数有关。增湿过程中,随增湿次数增加、达到膨胀稳定时,红土的竖向膨胀率、横向膨胀率、体积膨胀率呈先急剧增大后缓慢减小的变化趋势,增湿 2 次达到最大值;脱湿过程中,随脱湿次数增加、达到收缩稳定时,红土的竖向收缩率、横向收缩率、体积收缩率呈先急剧增大后缓慢波动变化趋势,脱湿 2 次竖向收缩率达到最大值,脱湿 1 次横向收缩率达到最大值。

(3)红土的胀缩性与初始干密度有关。随初始干密度增大,增湿过程中达到膨胀稳定时,增湿 1 次的竖向膨胀率、横向膨胀率和体积膨胀率较小;增湿 1 次以上的竖向膨胀率、体积膨胀率呈波动增大,横向膨胀率呈减小变化趋势;脱湿过程中达到收缩稳定

时,脱湿 1 次的竖向收缩率、横向收缩率和体积收缩率减小;脱湿 1 次以上的竖向收缩率呈增大变化、横向收缩率、体积收缩率呈减小变化趋势。

(4)随脱湿时间延长,脱湿次数增大,初始干密度增大,含水率减小,红土的横向收缩大于竖向收缩;随干湿循环次数增大,初始干密度增大,含水率增大,红土的竖向膨胀大于竖向收缩,体积膨胀大于体积收缩。

参考文献:

- [1] 黄英,符必昌.红土化学成分的变化特征[J].昆明理工大学学报,2002,27(8):63-66.
- [2] 刘特洪.工程建设中的膨胀土问题[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
- [3] 陈建斌,孔令伟,郭爱国,等.降雨蒸发条件下膨胀土边坡的变形特征研究[J].土木工程学报,2007,40(11):70-77.
- [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] 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.
- [7] 查普生,崔可锐,刘松玉,等.膨胀土的循环胀缩特性试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2009,32(3):399-402.
- [8] 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,2009,33(9):1376-1384.