

应力历史对黄土增湿变形影响

王协群^{*1}, 董广丰¹, 胡波², 孙慧²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;

2. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 黄土由于其特殊的工程性质, 即由它的水敏性、大孔性、结构性所造成的强烈湿陷性, 常会在黄土地区的工程建设中出现与水的作用密切相关的多种工程病害. 长期以来, 对于黄土增湿变形的研究大多针对增湿速率、增湿路径及应力条件等因素展开. 然而, 在黄土地区需进行挖填方处理的建设场区颇为常见, 大面积的挖填方工程改变了土体的应力状态, 因此对于应力历史对黄土增湿变形的影响研究尤为重要. 通过室内 GDS 三轴试验, 对黄土试样进行应力历史的模拟之后, 对试样进行偏压固结不排水水试验和恒载增孔压试验. 分析结果表明: 不同应力历史条件下的黄土试样承载力无明显变化, 高先期固结压力的试样发生变形的时间稍晚, 但土体的破坏过程更为迅速, 受剪初期出现剪胀的特性.

关键词: 黄土; 增湿变形; 应力历史; 剪胀性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201906011

0 引言

我国黄土高原地区自然灾害分布广, 发生频率高, 对当地百姓的人身财产安全造成了巨大的威胁, 同时国家在黄土高原地区的公路、铁路、隧道等工程建设规模也与日俱增. 因此黄土稳定性的研究既有重要性又有紧迫性. 目前我国对黄土增湿稳定性的研究还处于起步阶段, 还有很多的问题亟待解决.

以往关于黄土增湿变形的研究, 主要关注应力水平、增湿路径等方面, 而对于土体本身应力历史影响的研究则较少. 如吴民晖等^[1]采用固结仪, 对相同干密度、不同含水率的重塑黄土进行固结试验, 发现在一定的应力水平下, 土样的最终应变与土样的含水率呈正相关; 湿陷系数随着含水率的增加呈线性减小. 杨玉生等^[2]通过双线法增湿湿陷试验, 对压实黄土在增湿条件下的压缩及增湿变形性质进行研究, 发现增湿含水率、压力、密实度以及它们之间的交互作用, 均显著地影响压实黄土的增湿变形特性. 金松丽等^[3]以新疆伊犁地区的黄土为对象, 使用侧限固结仪展开了不同

水平压力作用下的分级增湿黄土试验和湿陷性试验, 研究了在增湿过程中伊犁黄土的持水特性和静止土压力系数变化规律, 并且引入了“增湿水平”变量用以描述土体的含水状态, 以及黄土增湿变形与不同增湿水平之间的关系. 谢定义^[4]总结出了增湿路径与加载路径的耦合对原状黄土试样增湿变形性质的影响, 并且提出在黄土力学特性和应用研究上, 未来研究应该以“可能湿陷势”的研究思想取代“最大湿陷势”的设计研究思想.

由上述可见, 许多学者对完全侧限条件下的黄土增湿变形性质进行了大量研究, 但是对于黄土的增湿发展性质与应力历史等其他因素所造成的影响相关研究仍未涉及, 而应力历史对黄土增湿变形特性的影响是很大的.

甘肃天水位于黄土丘陵区, 天水市北山的南坡分布着多处黄土滑坡群, 表明地质史上存在非常严重的滑坡现象, 该地的黄土地质灾害主要位于黄土坡的前沿部位, 而此处存在着大量的阶地梯田以及当地居民修建的民房等生活居住区. 由于当地的工程活动较多, 黄土边坡在坡面方向上卸载和回弹, 再加上连续大雨的共同作用, 最终造

成山体滑坡和坍塌等灾害。

为此,本文以甘肃天水黄土为对象,开展不同先期固结压力条件下的偏压固结不排水试验以及恒载增孔压试验.在应力历史模拟过程中,使用GDS三轴仪施加先期固结压力,能够更加真实模拟土体开挖前的应力状况.最后通过比较偏应力-轴向应变、平均有效应力-体积应变等关系曲线,分析先期固结压力对黄土增湿变形特性的影响,进而为日后黄土地区大面积挖填工程的变形分析提供参考.

1 试验方案

1.1 试验土样

试验用土取自甘肃天水,其主要物理指标参数如表1所示.按土工试验描述,该黄土孔隙较大、丰富,有植物根系和动物巢穴,属于黏质粉土.根据土工试验方法标准^[5]配制重塑黄土试样,对原状黄土进行烘干后,再经粉碎、研磨、过筛,按照含水率15%掺水搅拌均匀,土样制成后放置2 d,使得试样中水分分布均匀.处理后的土样分层击实,以尽量保证土样为各向同性的均匀体.

表1 天水黄土试样的物理指标					
Tab.1 Physical properties of Tianshui loess sample					
天然密度/ (g·cm ⁻³)	相对 密度	天然含 水率/%	液限/%	塑限/%	渗透系数/ (cm·s ⁻¹)
1.79	2.69	20.2~21.8	34.1	18.8	3.46×10 ⁻⁴

1.2 试验方法

三轴试验采用GDS三轴仪(图1)进行.GDS软件系统可独立控制围压、轴压和孔压3个变量.该系统还可实现常规应力路径之外的多种复杂应力路径.试样为直径61.8 mm、高125 mm的圆柱体.

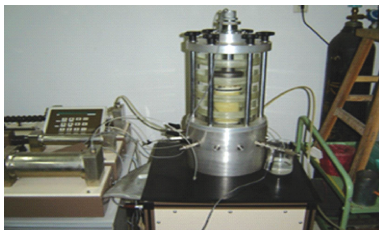


图1 GDS三轴仪
Fig.1 GDS triaxial instrument

以往针对黄土应力历史的研究大都使用原状试样,在完全侧限的条件下进行高压固结试验.然

而,有许多文献都曾经指出,如果原状试样扰动,会模糊土样的应力历史,对于试验结果的影响很大.曹晓娟^[6]指出,在固结法得到先期固结压力的室内试验中,试样尺寸涉及试验的代表性和试样扰动等问题.因为土体为非均质材料,试样的大小不同,所得到的试验结果的应力历史状态与实际可能相差很大.而且环刀的内壁阻力减少了试样上的实际有效应力.这些因素都对试验结果产生比较大的影响.杨玉生等^[2]发现,在以往研究黄土湿陷特性的过程中,大部分是对完全饱和条件下的最大湿陷性的研究,对增湿变形过程性质的研究相对较少.对黄土增湿变形性质的研究,绝大部分是针对原状黄土展开的,对重塑黄土的增湿变形性质研究较少涉及.综合考虑以上因素,本文三轴试样采用了将饱和后的试样在GDS三轴仪进行先期固结压力固结—卸载回弹—正常固结的方式,进行应力历史模拟,模拟黄土试样原有的超固结状态,更为真实地表征土样原始应力状态.然后分别对每组试样做偏压固结不排水(ACU)试验和恒载增孔压(SDL)试验.

本次三轴试验的过程如下:

(1)黄土试样的饱和采用两步饱和法,初始围压为30 kPa,向试样内充入CO₂气体,等黄土试样内水与CO₂融合后,再进行反压饱和,直至B值达到0.98后,饱和过程完成.

(2)对3组试样分别施加200、300、400 kPa的围压,待固结稳定以后,卸除围压,静置24 h回弹之后,进行100 kPa等压固结至固结完成.此时,3组试样的超固结比(OCR)均大于1,处于超固结状态.

(3)ACU试验和SDL试验按照现场实际K₀条件,进行偏压固结.偏压固结采用排水剪切的方式偏压加载,应变速率为0.05 mm/min.主应力比K₀=σ₃/σ₁=0.8.

(4)对于ACU试验,偏压固结结束后,关闭排水阀门,在同一速率下开展不排水剪切,直至试样破坏或者轴向变形达到25%.

(5)在SDL试验中,偏压固结完成后,维持黄土试样的轴向压力,逐步增加反压直至试样破坏,反压增加的速度为4 kPa/h.

2 试验结果

2.1 偏压固结不排水试验

图2为试验所得到的应力-应变曲线.随着剪

切应变的增加,试样的偏应力平缓增加,直至应变增加到 25%,试样破坏. 3 组不同先期固结压力的试样,偏应力发展趋势基本相近,随着先期固结压力的提高,试样偏应力水平略有提高. 这说明应力历史对黄土试样的承载能力无明显影响.

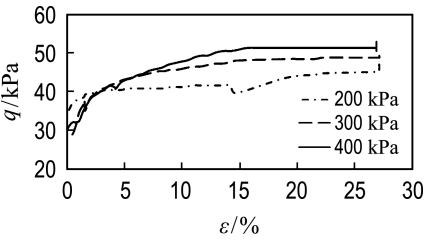


图 2 ACU 试验应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of ACU test

2.2 恒载增孔压试验

轴向应变随平均有效应力的变化见图 3. 可以看出,先期固结压力为 200 kPa 的试样,随着反压不断增加,平均有效应力减小,试样轴向应变缓慢持续增加到 25%,试样破坏. 先期固结压力为 300 kPa 的试样,在试验初期反压增加时没有发生轴向应变,直到平均有效应力降低到 60 kPa 时,试样轴向应变开始增加,增加速度明显大于 200 kPa 试样. 先期固结压力为 400 kPa 的试样,在增湿过程中轴向应变发展趋势与 300 kPa 试样大致相同,轴向应变开始增加时的平均有效应力稍小于 300 kPa 试样,而且试样轴向应变增加更为迅速,试样破坏过程较快. 这说明随着先期固结压力的增加,试样发生轴向应变的时间会略微变晚,但土样破坏速度更快,破坏的过程更加难以控制.

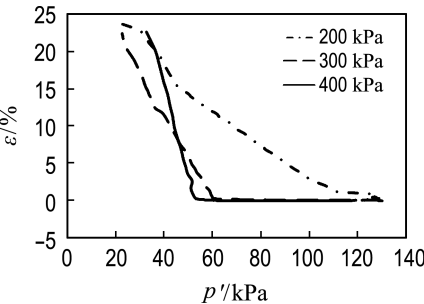


图 3 轴向应变随平均有效应力的变化

Fig. 3 Axial strain varying with mean effective stress

图 4 为偏应力与平均有效应力的关系曲线. 随着试样增湿,反压增加,平均有效应力逐渐减

小,偏应力相对稳定,直至平均有效应力减小到 30 kPa 左右时,3 组试样均发生破坏. 可见先期固结压力对于试样的承载能力并没有很大的影响. 3 组试样破坏时,偏应力为同一水平.

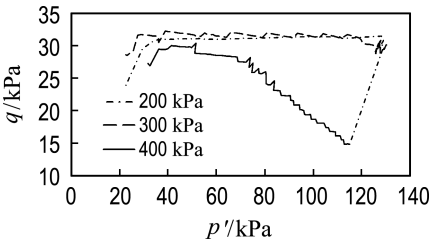


图 4 SDL 试验应力路径

Fig. 4 Stress path of SDL test

图 5 为试样增湿过程中,体积应变 θ 随平均有效应力发展的变化情况. 先期固结压力较低的 200 kPa 试样,随着反压增加,体积缓慢减小直至试样破坏;300 kPa 与 400 kPa 试样的体积应变发展情况大致相似,试验初期,随着反压增大,土体内水分含量增加,试样体积逐渐增加(体积应变为负),直到平均有效应力发展至 20~40 kPa 时,体积迅速减小,试样破坏. 这说明在增湿过程中,先期固结压力较高的试样能够更好地维持土样原有结构. 但在增湿发展到一定程度时,土体会迅速破坏.

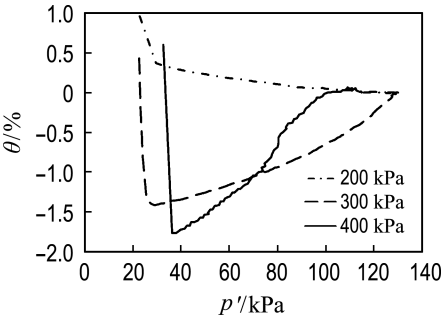


图 5 体积应变随平均有效应力的变化

Fig. 5 Volume strain varying with mean effective stress

3 分析和讨论

3.1 先期固结压力对黄土湿剪性的影响

如图 6 所示,在 SDL 试验中,随着土样增湿过程的进行,平均有效应力逐渐减小,土体发生轴向应变的时间会随着先期固结压力的增加而略微推迟,土体破坏的过程会更为迅速. 谢定义^[7]的研究表明,黄土在已有剪应力作用下,受到增湿作用

或浸水时,随着土体内水分的增加,黄土结构性开始软化,负孔隙水压力逐渐消失,导致土体的抗剪强度大幅下降,出现增湿剪切破坏.按照增湿后和增湿前的轴向变形和剪应力的关系可将增湿剪切过程划分为 3 个阶段:起始阶段、屈服阶段和塑流阶段.

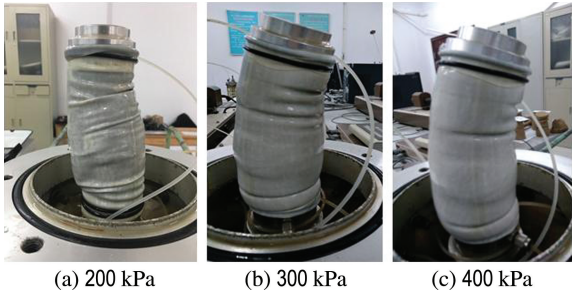


图 6 3 组试样破坏情况

Fig. 6 Failure of three groups of test specimens

图 7 反映了 3 组试样在增湿过程中剪应力随轴向应变的变化.在增湿起始阶段,试样原有结构强度未破坏;3 组试样的剪应力发展趋势相似,均迅速达到屈服点,进入试样的屈服阶段.此时,试样的原有结构强度逐渐破坏,而新结构仍未形成;随着轴向应变的发展,较低先期固结压力的 200 kPa 试样,在轴向应变达到 18% 时,剪应力达到了破坏点,试样进入塑流阶段,试样的原有结构彻底破坏.而 300 kPa、400 kPa 试样,分别在轴向应变达到 20%、23% 时,剪应力才达到破坏点,试样进入塑流阶段.这表明,试样的屈服阶段会随着先期固结压力的增加而有所增长,在增湿过程中,随着轴向应变的发展,高先期固结压力的试样原有结构强度破坏速度更为缓慢.

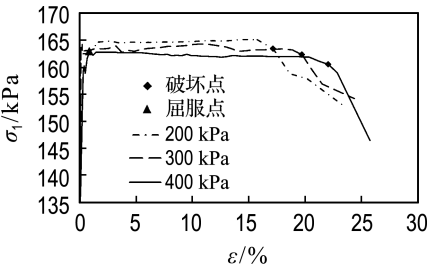


图 7 剪应力随轴向应变的变化

Fig. 7 Shear stress changes with axial strain

3.2 先期固结压力对黄土剪胀性的影响

对试验结果进行分析后发现,300 kPa、400 kPa 试样在试验过程中发生剪胀现象.体积应变

随轴向应变变化曲线如图 8 所示.可知总体趋势是在增湿初期,体积应变迅速减小为负值发生剪胀现象;随着轴向应变增大,剪胀逐渐明显.当轴向应变发展到 20% 时,体积应变迅速变回正值,试样破坏.其原因主要是在增湿过程中,随着反压的增加,试样内水含量增加的速度要快于试样内水通道形成的速度,试样发生径向膨胀变形,直到试样内原有强度结构破坏,土体发生了突变性的破坏.然而,先期固结压力较低的 200 kPa 试样未出现剪胀现象.这说明土体的应力历史改变了黄土增湿变形特性,先期固结压力越大,剪胀现象越明显.

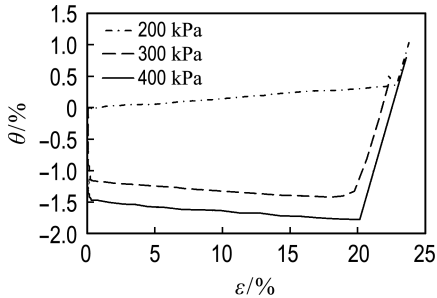


图 8 体积应变随轴向应变的变化

Fig. 8 Volume strain varying with axial strain

4 结 论

(1)通过对比 ACU 试验的应力-应变曲线,发现随着轴向应变的发展,3 组试样的偏应力发展趋势有一定差异但并不明显,说明应力历史对于土体承载能力的影响并不显著.

(2)先期固结压力较大的试样在增湿过程中,其屈服阶段会有所增长,发生塑流变形略微延缓.在相对较大的轴向应变状态下,仍具有一定的承载能力.但随着反压的增加,试样的原有结构强度彻底破坏,平均有效应力降低到一定水平后,变形进入塑流阶段.土样迅速破坏,破坏过程更为短暂.

(3)SDL 试验中,先期固结压力较高的试样会出现剪胀现象,且先期固结压力越大,剪胀越明显.

参考文献:

[1] 吴民晖,许德鲜,祝学文. 不同含水率重塑黄土变形特性分析 [J]. 路基工程, 2015(1): 55-59.
WU Minhui, XU Dexian, ZHU Xuewen. Analysis

of deformation characteristics of remolded loess with different moisture content [J]. **Subgrade Engineering**, 2015(1): 55-59. (in Chinese)

[2] 杨玉生,李靖,邢义川,等. 压实黄土增湿变形性质及其影响因素试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(4): 626-635.

YANG Yusheng, LI Jing, XING Yichuan, *et al.* Experimental study on the properties of compacted loess and its influencing factors [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, **39**(4): 626-635. (in Chinese)

[3] 金松丽,赵卫全,邢义川,等. 侧限条件下原状黄土增湿特性研究 [J]. 人民长江, 2017, **48**(18): 61-66, 85.

JIN Songli, ZHAO Weiquan, XING Yichuan, *et al.* Study on humidification characteristics of undisturbed loess under confined conditions [J]. **Yangtze River**, 2017, **48**(18): 61-66, 85. (in Chinese)

[4] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向 [J]. 岩土工程学报, 2001(1): 3-13.

XIE Dingyi. Discussion on some new trends in the study of loess mechanics in China [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001(1): 3-13. (in Chinese)

[5] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.

Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standard for Soil Test Method: GB/T 50123-1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese)

[6] 曹晓娟. 室内确定地基土前期固结压力的试验方法及试验要点的探讨 [J]. 铁道勘察, 2007(3): 76-77.

CAO Xiaojuan. Test method and key points for determining consolidation pressure of foundation soil in laboratory [J]. **Railway Investigation and Surveying**, 2007(3): 76-77. (in Chinese)

[7] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来 [J]. 地下空间, 1999, **19**(4): 273-284.

XIE Dingyi. The past, present and future of the research on mechanical characteristics and application of loess [J]. **Underground Space**, 1999, **19**(4): 273-284. (in Chinese)

Influence of stress history on humidification deformation of loess

WANG Xiequn*¹, DONG Guangfeng¹, HU Bo², SUN Hui²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources,
Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Due to its special engineering properties, namely the strong collapsibility caused by its water sensitivity, macroporosity and structure, loess often presents a variety of engineering diseases closely related to the role of water in the construction of loess areas. For a long time, most of the research on the humidification deformation of loess has been carried out for factors such as humidification rate, humidification path and stress conditions. However, the construction site that needs to be excavated and filled in the loess area is quite common. The large-scale excavation and filling works have changed the stress state of the soil. Therefore, it is important to study the influence of stress history on the humidification deformation of loess. Through the indoor GDS triaxial test, the stress history of the loess sample is simulated, and the sample is subjected to the bias consolidation undrained test and the dead load diafiltration test. The results show that there is no significant change in the bearing capacity of loess samples under different historical stress conditions, and the samples with high pre-consolidation pressure deform a little later, but the failure process of soil is more rapid, and dilatancy occurs at the early stage of shear.

Key words: loess; humidification deformation; stress history; dilatancy