

干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响

刘宏泰, 张爱军, 段 涛, 连江波, 董晓宏

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:长期的干湿循环作用必然会引起黄土结构的改变,从而影响其强度特性及渗透特性.通过室内三轴压缩和三轴渗透试验,得到了干湿循环作用对重塑黄土强度和渗透性的影响规律:重塑黄土的剪切强度、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均随着干湿循环周期的增加而衰减,且经过第1次干湿循环后衰减最大;土样初始含水率越低,干湿循环对其强度的影响越大;干湿循环达到一定次数后,土体结构会重新达到平衡,强度也将趋于稳定;渗透系数 k 随着干湿循环次数的增加明显增大,而且围压对渗透系数的影响很大.

关 键 词:黄土;干湿循环;强度;渗透性

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2010)04-0038-05

黄土是我国西北地区的主要建筑材料,黄土构筑物在广大黄土地区发挥着极为重要的作用.然而,由于气候变化,黄土构筑物受到干湿交替作用:干旱季节,降雨量较少,地下水位下降;湿润季节,降雨集中,地下水位上升.长期的干湿循环作用必然会引起黄土结构的改变,从而影响其强度特性及渗透特性.这将对建筑物的稳定造成极大危害,严重影响工程的正常运行和安全使用.前人对于膨胀性土在干湿循环作用下的抗剪强度变化规律做过一些研究^[1-4],但对于黄土的研究非常少.

本文以山西离石黄土为研究对象,通过三轴剪切试验和三轴渗透试验,研究干湿循环作用对重塑黄土的强度特性及渗透特性的影响规律,为黄土构筑物的长期稳定性评价提供参考.

1 研究思路及方法

1.1 土样的物理性质指标

试验所用的黄土取自山西离石,属 Q_3 黄土,土样呈褐黄色,土质均匀、坚硬,大孔隙较少.该黄土为粉质黏土,颗粒组成为:粒径在 $2.000 \sim 0.075$ mm的占7%,在 $0.075 \sim 0.005$ mm的占73%,小于 0.005 mm的占20%.土样密度为 2.71 g/cm³,最大干密度为 1.681 g/cm³,最优含水率为18.37%,液限 ω_L 为31.2%,塑限 ω_p 为17.7%,塑性指数 I_p 为13.5.

1.2 试样制备及试验方法

试验全部采用重塑试样,用常规三轴制样器分4层压实,制成直径39.1 mm,高80 mm的标准土样.试样初始干密度控制为 1.45 , 1.51 和 1.63 g/cm³三种,其中,同一干密度试样初始含水率分别控制为饱和、16%和8%.试样的饱和处理在真空抽气缸内进行,抽气约1 h,进水饱和约10 h.根据试验设计,试样共为4组,对每组试样分别进行0,1,3,5次干湿循环.土样采用自然风干方式,各试样干湿循环结束后控制含水率在初始含水率.

试验均采用常规三轴剪切压缩仪,严格按《土工试验规程》(SL237-1999)进行.其中,三轴剪切试验采用

收稿日期: 2009-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50779058);冻土工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLFSE200803)

作者简介: 刘宏泰(1985-),男,河南新乡人,硕士研究生,主要从事岩土力学与工程方面的研究工作.

E-mail: liuhongtai@163.com 通讯作者: 张爱军(E-mail: zaj@nwsuaf.edu.cn)

CU 试验方法,剪切速率为 0.06 mm/min,进行回弹时的速率为 0.18 mm/min. 试验过程中控制周围压力分别为 100, 200, 400 kPa,固结时间为 2 h. 对于发生脆性变形的土样,当量力环百分表读数出现峰值或从压力室可看到明显断裂面时终止试验;若试验过程中土样发生塑性变形,则以轴向变形达到试样总高度的 15% (即 1.2 cm) 作为剪切终止的条件. 渗透试验采用饱和和重塑土样,试验过程中控制周围压力分别为 100, 200, 300, 400 kPa,在每级围压下分别施加不同的渗水压力进行恒水头渗透试验. 试样在某一渗透压力下的渗透系数 k_{20} 按下式计算:

$$k_{20} = \frac{\eta_T Q L}{\eta_{20} A H t} \quad (1)$$

式中: k_{20} 为水温 20℃ 时土体的渗透系数; t 为渗透历时; Q 为 t 时间内的总流量; L 为试样固结完成后的总轴向高度 (mm); H 为渗透水压力差; A 为渗透流经的平均过流断面; η_T, η_{20} 分别为测试水温 T 和水温为 20℃ 时水的黏滞系数.

2 试验结果分析

2.1 干湿循环周期对重塑黄土抗剪强度的影响

数据分析可得,相同初始状态和围压的试样,干湿循环对其强度的影响很明显. $\rho_d = 1.51 \text{ g/cm}^3$, 初始含水率为 8%, $\sigma_3 = 400 \text{ kPa}$ 的土样在不同干湿循环周期下的应力应变关系曲线见图 1(a). 由图可见,重塑黄土由于干湿循环的作用,其抗剪强度特性呈减小趋势. 经历 1 次循环后强度变化比较大,随着干湿循环周期的增加,强度的变化量逐渐减小,这是因为黄土中含有起胶结作用的可溶盐,而胶结结构为黄土提供了较大的抗剪强度;同时黄土骨架颗粒排列方式发生改变^[5]. 干湿交替过程中,水溶解可溶盐致使盐分含量降低和胶结结构强度降低或破坏^[5]. 其中,1 次循环后盐分的流失最为明显,胶结结构的破坏也最剧烈,3 次循环以后土体中易溶盐含量基本稳定,土体强度变化也越来越小. 原状黄土的微结构特征表现为许多架空结构和孔隙^[6],而重塑黄土由于颗粒形状的不规则,会存在一定的架空结构和孔隙,这种结构的连接刚度和强度都很小,遇水的情况下,颗粒发生新的配位和排列. 1 次循环后这种结构的破坏最严重,其后结构重新趋于平衡^[7]. 试验过程中,观察到 1 次循环的土样表面出现孔隙,甚至是细微的裂缝,3 次循环后土样裂缝的发展不太明显. $\rho_d = 1.45 \text{ g/cm}^3$ 时不同含水率的 2 组试样在 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 下得到的应力应变关系曲线见图 1(b) 和 (c). 对比 2 组曲线可见,土样初始含水率为 8% 时,干湿交替对其强度的影响最大,随着初始含水率的增加,影响逐渐减弱. 因为含水率由低开始增高时对结构的影响最大,其后影响越来越小^[8-10].

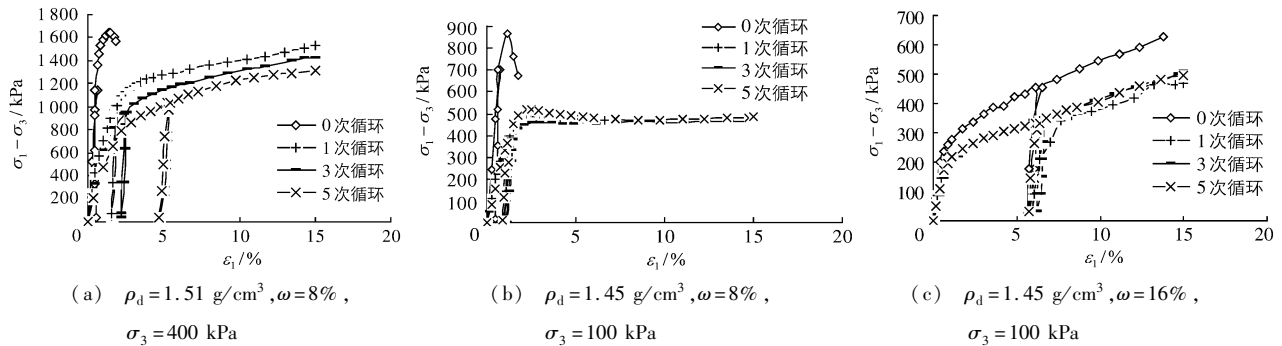


图1 干湿循环条件下土样的应力应变关系

Fig. 1 Stress-strain relationships under different dry-wet cycles

从图 1 还可以看出,不同干湿循环周期下的应力应变曲线基本都呈现为强化型. 1 次循环后,强化程度变化幅度最大,随着循环次数的增加,应力应变曲线有逐渐稳定的趋势. 其原因为:1 次循环后颗粒重新排

列,颗粒之间的连接形式发生较大改变,土中的盐分溶解量也较大,所以强度变化比较大;其后虽仍有干湿交替作用,但结构的变化已经很小.可以预测干湿交替达到一定次数以后土体结构会趋于稳定,强度也将趋于稳定.

在数据分析过程中,发现干湿交替次数对黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的影响具有较强的规律性.为直观方便,从原始数据中选择 3 组具有代表性的数据进行比较分析(见图 2).

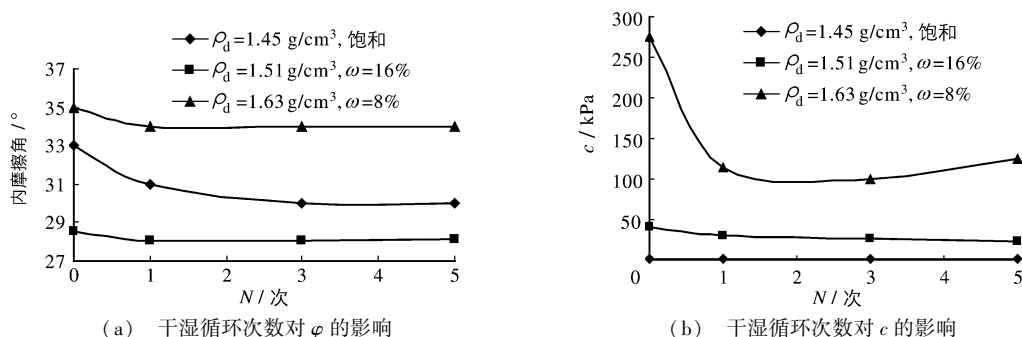


图 2 干湿循环周期与 c, φ 之间的关系

Fig. 2 Variation of c and φ with cycle number

从图 2 可见,随着干湿交替周期的增加,黄土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 都呈现衰减趋势. c 值在 1 次干湿交替之后衰减最大,3 次以后衰减幅度逐渐减小,某些土样则基本趋于稳定.说明 3~5 次干湿交替后,土体的结构逐渐重新平衡.黏聚力 c 是由于土粒之间的胶结作用、结合水膜及水分子引力作用等形成的.土样浸水后,胶结结构和双电层的破坏将会直接导致 c 值的减小. φ 值在 1 次干湿循环后的衰减也比较明显,原因在于土样经历 1 次循环后,水分和孔隙通道的分布以及土颗粒的排列均发生了较大变化^[3].

2.2 干湿循环条件下重塑黄土的渗透性变化规律

干湿交替次数和渗透系数之间的关系见图 3.可见,不同围压下土样的渗透系数 k 均随着干湿交替周期的增加而明显增大,其原因可能有如下几点:

(1) 干湿交替过程中土体结构变化,颗粒排列改变,导致土体架空孔隙增多,甚至出现细微裂缝,从而引起密度的减小和孔隙比的增大.

(2) 土体中易溶盐的溶解,使土体中形成孔隙或导致土粒表面的双电层被破坏,土粒之间由阴阳离子形成的连接力不断减弱,密度呈下降的趋势^[8]:①黄土中含有的氯化物、硫酸盐及碳酸盐等可溶矿物溶解后形成残留孔隙,由于土样经过反复的饱和—烘干,可溶盐不断地溶解到水中,土体的孔洞就会越来越多,直至显著地影响到土体的密度和强度.②黄土中的易溶盐,一般同时存在于固态和液态两相组成中.当土中含有水分时,易溶盐解离为离子存在于土的孔隙中,其中的阴离子与土粒表面吸附的阳离子之间,可以相互置换,并且处于动态平衡中.因此,易溶盐含量和成分的变化,对土粒表面扩散的双电层的性态和结构的连接特征,以及物理力学性质都有较大影响.

(3) 黏土矿物吸水体积变化.蒙托石,特别是伊利石在饱和时吸收水分而膨胀,当失去水分时,体积并不能恢复到吸水前的水平,因而形成架空,导致土体的体积增大而密度减小.

从图 3 亦可见渗透系数 k 随着围压的增大明显减小^[11-12]. 主要是在围压增大的过程中,土体发生固结,颗粒重新排列,结构变密实,孔隙比减小.

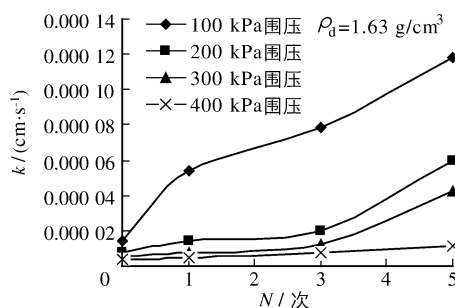


图 3 干湿交替次数和渗透系数的关系

Fig. 3 Variation of k with cycle number

3 结 语

通过研究干湿交替周期对重塑黄土的强度特性及渗透特性的影响规律,主要得出以下结论:重塑黄土的剪切强度、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 均随着干湿循环周期的增加而衰减,且1次交替后衰减影响最大;土样初始含水率越低,干湿循环对其强度的影响越大;干湿交替达到一定次数以后土体结构会重新达到平衡,强度也将趋于稳定;渗透系数 k 随着干湿循环周期的增加明显增大,围压对于渗透系数的影响很大。

由于本次试验采用的干湿循环周期较短,对黄土的实际情况模拟不足,因此要得到更准确的变化规律,仍有待于对长期干湿循环影响的研究。

参 考 文 献:

- [1] 朱思哲,刘虔,包成刚,等. 三轴试验原理与应用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2003. (ZHU Si-zhe, LIU Qian, BAO Cheng-gang, et al. Principle and application technology of triaxial tests[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 慕现杰,张小平. 干湿循环条件下膨胀土力学性能试验研究[J]. 岩土力学,2008,28(增刊):580-582. (MU Xian-jie, ZHANG Xiao-ping. Research on mechanical properties of expansive soil under wetting-drying cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 28(Suppl): 580-582. (in Chinese))
- [3] 王艳军. 膨胀土干湿循环强度特性的试验研究[J]. 山西建筑,2007,33(35):120-121. (WANG Yan-jun. Test and research of expended soil dried and wet cycling intensity characters[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(35): 120-121. (in Chinese))
- [4] 杨和平,张锐,郑健龙. 有荷条件下膨胀土的干湿循环胀缩及强度变化规律[J]. 岩土工程学报,2006,28(11):1936-1941. (YANG He-ping, ZHANG Rui, ZHENG Jian-long. 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))
- [5] 雷胜友,唐文栋. 黄土在受力和湿陷过程中微结构变化的CT扫描分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(24):4166-4169. (LEI Sheng-you, TANG Wen-dong. Analysis of microstructure change for loess in the process of loading and collapse with CT scanning[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4166-4169. (in Chinese))
- [6] 蒋希雁,陆培毅. 黄土湿陷机理和影响因素分析[J]. 河北建筑工程学院学报,2004,22(1):25-27. (JIANG Xi-yan, LU Pei-yi. Analysis of the collapsible mechanism and effect factors of loess[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering, 2004, 22(1): 25-27. (in Chinese))
- [7] 陈正汉,方祥位,朱元青,等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. 岩土力学,2009,30(1):1-11. (CHEN Zheng-han, FANG Xiang-wei, ZHU Yuan-qing, et al. Research on meso-structures and their evolution laws of expansive soil and loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 1-11. (in Chinese))
- [8] 刘海松,倪万魁,颜斌,等. 黄土结构强度与湿陷性的关系初探[J]. 岩土力学,2008,29(3):722-726. (LIU Hai-song, NI Wan-kui, YAN Bin, et al. Discussion on relationship between structural strength and collapsibility of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 722-726. (in Chinese))
- [9] 李雯霞,米海珍,李如梦. 含水量与围压对黄土结构性的影响[J]. 甘肃科学学报,2006,18(4):110-113. (LI Wen-xia, MI Hai-zhen, LI Ru-meng. The influence of water content and cell pressure on structural behavior of loess[J]. Journal of Gansu Sciences, 2006, 18(4): 110-113. (in Chinese))
- [10] 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,2001,23(1):4-13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 4-13. (in Chinese))
- [11] 李平,骆亚生. 饱和土的三轴渗透试验研究[J]. 路基工程,2006(6):32-33. (LI Ping, LUO Ya-sheng. Triaxial permeability test study of saturated soil[J]. Subgrade Engineering, 2006(6): 32-33. (in Chinese))

- [12] 王志杰, 陈能远. 饱和黄土三轴渗透试验[J]. 人民黄河, 2007(12): 87-88. (WANG Zhi-jie, CHEN Neng-yuan. Triaxial permeability test study of saturated loess [J]. Yellow River, 2007(12): 87-88. (in Chinese))

The influence of alternate dry-wet on the strength and permeability of remolded loess

LIU Hong-tai, ZHANG Ai-jun, DUAN Tao, LIAN Jiang-bo, DONG Xiao-hong

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The soil structure changing with the alternate dry-wet affects the strength and permeability of loess. Through the indoor triaxial compression and penetration test^[1], the influence of alternate dry-wet on the strength and permeability of loess was shown as follows: with the increase of dry-wet cycles, the strength, cohesion and internal friction angle of remolded loess all decreased. The reduction was the greatest at one cycle; the lower the initial water content was, the more the alternate dry-wet affected the strength; the soil structure was re-balanced, and the strength was stabilized, after a certain number of cycles of dry-wet; and the permeability coefficient increased significantly with the addition of dry-wet cycles.

Key words: loess; dry-wet cycle; strength; permeability

我院牵头承担的国家科技支撑计划项目“水库大坝安全保障技术研究”课题验收会在北京召开

2010 年 12 月 7~8 日,水利部国际合作与科技司在北京组织召开了由我院牵头承担的“十一五”国家科技支撑计划项目“水库大坝安全保障技术研究”第一课题“水库大坝病险与溃坝规律研究”、第二课题“溃坝试验和模拟技术研究”、第三课题“基于风险的大坝安全评价技术开发”、第五课题“水库大坝风险控制非工程措施研究”、第七课题“水库大坝风险标准研究”验收会。水利部国际合作与科技司陈明忠巡视员主持会议,水利部副总工庞进武、原总工朱尔明出席会议,来自水利部、清华大学、国家防办、水利部水规总院、水利部海河水利委员会、长江三峡工程开发总公司、新疆生产建设兵团水利局、江西省水利科学研究院、水利部科技推广中心、水利部预算执行中心等单位的专家听取了各课题组的成果汇报。蔡跃波副院长代表项目牵头单位汇报了项目研究总体情况。专家组经过充分讨论,一致认为五个课题均全面完成了任务书规定的各项研究任务,经费执行情况良好、使用规范,研究成果具有综合性、前瞻性、科学性、实用性、指导性,一致同意通过验收,并建议加快成果的推广应用,在“十二五”期间继续滚动研究。

本项目牵头人、中国工程院院士、我院院长张建云在最后的总结发言中表示,将根据专家组的意见和建议,在课题研究成果的基础上进行项目成果的凝练和总结,尽快完成项目验收,并将组织开展拓展和深化研究。

水利部国际合作与科技司有关领导、我院李云副院长、科研处及各课题和专题负责人、中国水利水电科学研究院、长江科学院、长江勘测规划设计研究院、南京大学、河海大学等单位的参研人员参加了会议。

摘自南京水利科学研究院网站