

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.04.027

不同破损位置对膨胀土力学特性影响的三轴试验研究^①

张雅倩, 汪时机, 韩毅, 程明书, 江胜华

西南大学 工程技术学院, 重庆 400716

摘要: 以南水北调中线工程陶岔引水渠坡的膨胀土为研究对象, 利用 X-Ray CT 断层扫描技术机配套使用的 CT-多功能土工三轴仪, 对不同损伤位置的 3 组重塑膨胀土样进行控制吸力为 50 kPa 和净围压为 100 kPa 的 CT-三轴压缩试验. 通过 CT 扫描设备获得试验过程中土样内部结构的实时演化情况. 试验结果表明: 不同损伤位置的圆柱孔对土体的强度特性和变形特性有分阶段、不同程度的影响, 轴向应变小于 11% 时, 相同损伤面积不同损伤位置的试样的偏应力-轴向应变关系曲线形式基本重合; 但当轴向应变大于 11% 以后, 6 mm 中孔试样表现出与其他两个试样不同的明显的应变软化特征, 而体应变-轴向应变关系曲线只在应变小于 6% 范围内表现出基本相似的变化规律, 后阶段 6 mm 中孔试样体变速率加剧. 同时在剪切过程中, 损伤位置也影响土体内部结构的演变规律, 损伤位置越靠近中间的试样其 ME 值和 SD 值都将越大.

关键词: 膨胀土; 力学特性; CT-三轴试验; 损伤位置

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)04-0176-05

膨胀土是地质运动中产生的一种多裂隙并具备吸失水、胀缩特性的特殊土体. 膨胀土内部存在的多种状态的裂隙是由于在荷载作用和环境因素影响下, 经沉积、干湿循环、剥蚀等各种自然力及胀缩效应造成的土体细观结构的缺陷和劣化^[1]. 膨胀土具有一定的结构性, 在外部条件的影响下, 膨胀土内部结构会发生不可逆的变化(如原生裂隙的发育, 次生裂隙的产生, 粘聚力、内摩擦角的降低等), 这种细观结构的变化引起的膨胀土整体力学特性的弱化, 称为损伤^[2]. 损伤是膨胀土力学结构的软弱面, 随着膨胀土密实度的降低和损伤范围的扩大, 其抗剪强度和稳定性都将逐渐减弱.

岩土科学工作者对膨胀土已经做了大量研究^[3-15]. 党发宁^[3-4]利用集合论和测度论知识, 阐述了非饱和土介质形态某一处的完整度、破损度的理论, 以 CT 数为基础, 分析了裂隙产生的位置以及损伤的判别依据. 卢再华等^[5-12]利用多功能 CT-土工三轴仪对三轴剪切试验与干湿循环试验过程中的原状、重塑膨胀土试样做了动态、实时和无扰动的监测, 获得了一系列反映试样裂隙演变特征的 CT 数据及高分辨率的 CT 图像. 研究表明: 膨胀土的强度、变形等宏观力学特性与其内部裂隙-孔隙结构是密切相关的, 并提出了相应的损伤演化方程. 雷胜友等^[14]利用 CT 机, 采集原状膨胀土三轴浸水过程与浸水后的压缩剪切过程的 CT 图像和数据; 分析认为土体浸水实质上是一个水进入膨胀土气相空间引起土体胀缩, 进而发育新的孔隙, 新旧孔隙连通的过程. Willson 等^[15]利用 CT 技术对岩石或砂土受载后裂隙状态及其发育过程进行了扫描, 根据扫描的 CT 数进行了岩石或砂土结构演化的初步研究.

本文在已有成果之上, 以重塑膨胀土为研究对象, 通过 CT-三轴排水压缩试验, 研究相同损伤面积不

① 收稿日期: 2015-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(10902091, 51208078); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(XDJK2015C018, XDJK2013C042).

作者简介: 张雅倩(1989-), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事非饱和土力学的研究.

通信作者: 汪时机, 博士, 教授.

同损伤位置土样的强度特性和演化规律.

1 研究方法

1.1 试样制备

试样直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm, 横截面积为 12 cm^2 , 剪切前初始体积为 96 cm^3 . 将试验所需的原状土体碾碎(达到试验所需级配)、烘干; 根据试验设计的干密度和含水率加水配土、分层击实制样. 在制样器内土样上, 用不同内径的金属棒在土样竖向不同位置制成多种直径的圆柱孔. 1[#]–3[#] 分别为 6 mm 中孔试样, 6 mm 偏孔试样, $4 \times 3 \text{ mm}$ 偏孔试样(试样损伤面积相同), 如图 1 所示, 最后把制备好的试样放入保湿罐中待用. 土样的初始参数指标见表 1.

表 1 试样初始参数

相对密度 ρ_s	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率 $w/\%$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e
2.73	1.55	24.0	86.07	0.76

1.2 试验方案

利用 CT-多功能土工三轴仪对试样进行三轴剪切试验. 首先在三轴仪双层围压室内, 对土样进行限定围压下的固结操作, 直到土样形变和排水稳定. 然后进行控制净围压和吸力的三轴排水剪切试验, 剪切速率为 0.0167 mm/min (经多次试验验证能保证内部吸力与控制吸力的平衡). 由于试样排水量较小, 故将体变作为稳定的判据, 限定体变速率不超过 $0.00315 \text{ cm}^3/\text{h}$, 排水速率不超过 $0.012 \text{ cm}^3/\text{h}$. 并在轴向应变为 0%, 5%, 10% 和 15% 时, 分别扫描 5 个断层, 第一次扫描位置同图 2 所示, 因试样的压缩, 扫描位置发生变化, 为保证每次扫描均处在试样相同位置上, 后续每次扫描的断面位置应按式(1)计算得到.

$$\Delta H_i = \frac{H_i}{H} \cdot (H \cdot \epsilon_a) = H_i \cdot \epsilon_a \quad (1)$$

式中 ΔH_i 为 i 扫描断面的位移量, H_i 为 i 断面到试样底面的初始高度, H 为试样初始高度, ϵ_a 为轴向应变.

本试验 3 个试样均进行控制净围压和吸力的三轴排水剪切试验. 1[#]–3[#] 试样吸力和净围压条件一致, 均为吸力 50 kPa, 净围压 100 kPa.

1.3 应力应变参数

本文采用双应力状态变量: 净总应力张量 ($\sigma_{ij} - u_a \delta_{ij}$) 和吸力张量 ($u_a - u_w$) δ_{ij} , 其中 σ_{ij} 为总应力张量, u_a 为孔隙气压力, u_w 为孔隙水压力, δ_{ij} 为 Kronecker 记号. 为表达简便, 采取下列参数来表达三轴应力特性:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} - u_a \quad (2)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (3)$$

$$s = u_a - u_w \quad (4)$$

式中: p, q, s 分别为净平均应力、偏应力和吸力, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 分别为 3 个主应力, 单位均为 kPa. 试样体应变 ϵ_v , 应变 ϵ_s , 定义如下:



图 1 剪切后试样照片

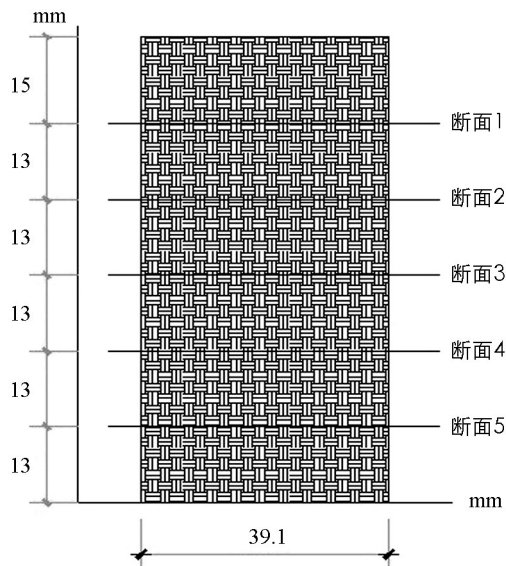


图 2 第一次 CT 扫描试样 5 截面位置示意图

$$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \epsilon_1 + 2\epsilon_3 \quad (5)$$

$$\epsilon_s = \frac{2}{3}(\epsilon_1 - \epsilon_3) \quad (6)$$

式中: ΔV 为试样的体积变化量, V_0 为试样的初始体积, ϵ_1 为大主应变, ϵ_3 为小主应变。

1.4 试验仪器

本试验利用解放军后勤工程学院科研工作站中与 ProSpeed AI 型 X 射线单排螺旋 CT 机配套使用的三轴仪。该仪器具有快速薄层(1 mm)、高分辨率、高智能、自动网络传输、图像输出方便等特点。CT-多功能土工三轴仪如图 3 所示。将土样放置在压力室内,环绕试样一周扫描断层,同时检测器自动检测 X 射线衰减值,计算机显示检测数据,就可以得到相应断层位置的二维 CT 图片。CT 扫描图片即被测物体某一断层面的密度图,CT 机以断面上选取范围内所有物质点的 CT 数,按一定规则来计算选定范围的总体 CT 值,ME 值和一定置信水平的方差值 SD 值。ME 值反映了扫描范围内全部物质点的平均密度,SD 值则反映了扫描范围所有物质点变量值的离散程度,表明了该范围内土体的结构性强弱。



图 3 后勤工程学院 CT-多功能土工三轴仪

2 试验结果分析

2.1 偏应力-轴向应变关系分析

图 4 为 3 个试样偏应力与轴向应变的关系曲线图。从图 4 可以看出,试样偏应力随着轴向压缩的进行而变大。轴向应变 0%~2% 期间,偏应力随轴向应变急剧增加,后期土样进入明显的变形阶段。比较 3 个土样的关系图发现,轴向应变 0%~11% 时,偏应力值相差不大,表明轴向应变较小时,不同损伤位置对土体所承受偏应力值影响不明显。轴向应变达到 11% 以后,发现 2# 土样与 3# 土样偏应力值基本重合,而 1# 土样偏应力值低于 2# 土样与 3# 土样,说明损伤位置影响土体剪切的破坏强度,破损位置越靠近土样中心,土体破坏强度越小。

2.2 体应变-轴向应变关系分析

图 5 为体应变与轴向应变之间的变化曲线图,由曲线可知,剪切前期各土样的体应变随轴向应变增加而增大。损伤面积相同的 3 个土样,其体应变与轴向应变的变化趋势一致,都是先增大,后减小;轴向应变为 6% 时,1# 土样体应变达到最高值 1.61%;轴向应变为 8% 时,2# 土样体应变达到最高值 1.28%;轴向应变为 11% 时,3# 土样体应变达到最高值 1.22%。由此可以看出,损伤位置对土样体应变的演化存在影响,损伤位置越接近土样中心,剪切过程中土样体应变值越大,同时体应变最大值所对应的轴向应变值越小。

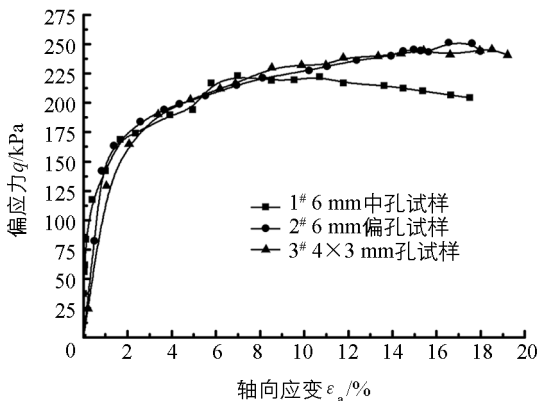


图 4 偏应力与轴向应变关系图

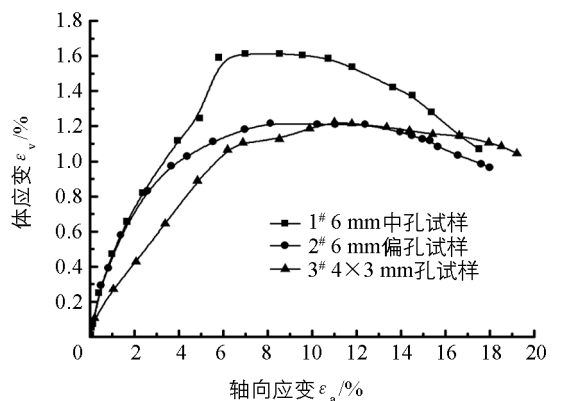


图 5 体应变与轴向应变关系图

2.3 ME 值-轴向应变关系分析

图 6 为 1[#]-3[#] 土样 ME 值与轴向应变的曲线图. 由图 6 可知, 随着三轴仪轴向位移的逐步推进, 轴向应变增加, 3 个试样 ME 值均变大, 试样断层的平均密度提高. 比较 1[#]-3[#] 土样发现, 3[#] 土样 ME 均值最小, 2[#] 土样 ME 均值最大, 说明不同圆柱孔损伤位置土样之间的 ME 值变化存在一定规律性. 从曲线变化规律可以看出, 相同损伤面积下, 损伤位置越靠近试样中心(1[#], 2[#] 土样), 试样 ME 值越大, 平均密度越大, 孔洞位置对称土样(1[#] 土样和 3[#] 土样)的 ME 值小于孔洞位置非对称土样(2[#] 土样).

2.4 SD 值-轴向应变关系分析

图 7 描述了不同圆柱孔土样之间 SD 值与偏应力的关系. 依据图 7 中曲线形式可得, 各土样 SD 值随着轴向应变均变小, 但相同剪切条件下圆柱孔损伤位置越靠近中心(1[#] 和 2[#] 土样), 试样的 SD 值越大, 而在剪切过程中不同损伤位置试样 SD 值下降的斜率相差不大, 说明损伤位置对试样剪切过程中的 SD 值有影响, 但对 SD 值的变化率影响不大.

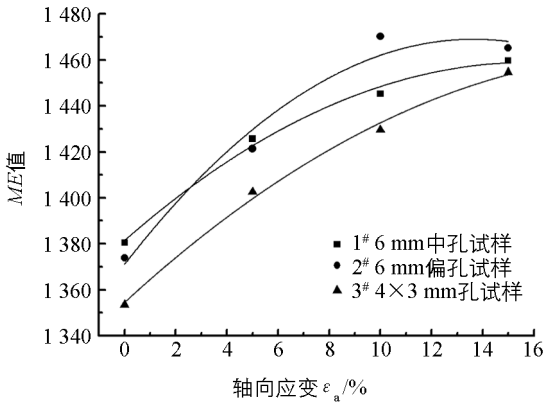


图 6 ME 均值与轴向应变关系

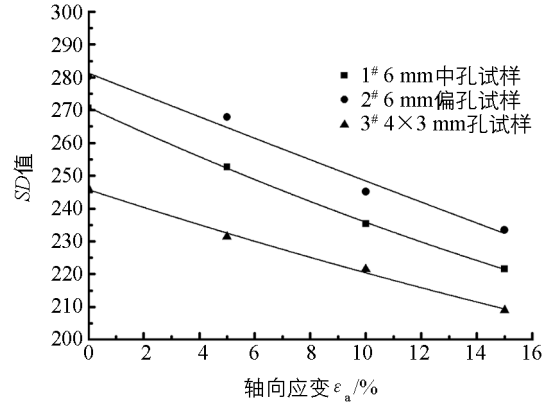


图 7 SD 均值与轴向应变关系

3 结 论

本文利用 CT-多功能土工三轴仪试验研究了不同圆柱孔径破损条件下膨胀土的强度及其变形特性. 试验结果表明:

1) 控制剪切条件一定时, 相同损伤面积的土样损伤位置影响试样剪切破坏应力和试样体积应变, 圆柱孔损伤位置越靠近土样中心位置, 土样破坏应力越小, 体应变达到最大值所对应的轴向应变越小, 体变速率加剧.

2) 相同剪切条件下, 随着轴向压缩的进行各土样 ME 值变大, SD 值变小, 表明随着土样被压剪, 密度变大, 土样逐渐被压实; 离散性减小, 试样总体逐渐趋于均匀. 但不同损伤位置的试样之间损伤位置越靠近中间其 ME 值和 SD 值都将越大.

3) 本文利用不同损伤位置的圆柱孔, 针对相同剪切条件下重塑膨胀土土体的强度和变形特性展开分析. 分析方法和相关思路也可应用到其他类土体的研究中. 针对各类土体的力学性质, 可进一步开展损伤位置对土体力学特性影响的量化分析.

参考文献:

- [1] 刘特洪. 工程建设中膨胀土问题 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [3] 党发宁. 岩土破损演化理论(I): 破损空间 [J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 513-519.
- [4] 党发宁. 岩土破损演化理论(II): 物理状态指标与分区破损理论 [J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 673-679.
- [5] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 原状膨胀土剪切损伤演化的定量分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1428-1432.
- [6] 卢再华, 陈正汉. 非饱和原状膨胀土的弹塑性损伤本构模型研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 422-426.
- [7] 陈正汉, 卢再华, 蒲毅彬. 非饱和土三轴仪的 CT 机配套及其应用 [J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 387-392.

- [8] 姚志华,陈正汉,朱元青,等. 膨胀土在湿干循环和三轴浸水过程中细观结构变化的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 68-76.
- [9] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等. 结构损伤对膨胀土屈服特性的影响 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1503-1512.
- [10] 汪时机,孙世军,陈正汉,等. 造孔损伤重塑膨胀土三轴剪切试验研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(3): 128-132.
- [11] 汪时机,韩毅,李贤,等. 圆柱孔破损膨胀土强度和变形特性的 CT-三轴试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2763-2768, 2809.
- [12] 李贤,彭贞,汪时机,等. 重塑膨胀土结构性损伤 CT-三轴试验研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(6): 131-135.
- [13] 韩毅,汪时机,李贤,等. 圆柱孔破损膨胀土扫描数据的三维重建研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(4): 65-69.
- [14] 雷胜友,许瑛. 原状膨胀土三轴浸水过程的细观分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2005, 31(1): 119-122.
- [15] WILLSON C S, LU N, LIKOS W J. Quantification of Grain, Pore, and Fluid Microstructure of Unsaturated Sand from X-Ray Computed Tomography Images [J]. Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(6): 911-923.

A Study on the Effect of Different Damage Locations on the Mechanical Properties of Expansive Soils by a CT-Triaxial Test

ZHANG Ya-qian, WANG Shi-ji, HAN Yi,
CHENG Ming-shu, JIANG Sheng-hua

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: To research the real-time evolution of the internal structure of expansive soils during a triaxial test, three groups of remolded expansive soil samples with different locations of cylindrical pore damage were tested by an X-ray CT-triaxial apparatus, where the soils were taken from the site of the Central Line Project of South-to-North Water Diversion. Then experiments were carried out under controlled suction of 50 kPa, and net confined pressure of 100 kPa. The results indicated that different locations of damage with cylindrical pores had a by-stage and different-degree effect not only on the deformation characteristics but also on the mechanical properties of the soils. That is, when the axial strain was less than 11%, the curve variation tendency relationship between deviatoric stress and axial strain had minor differences with the same damage area but different locations; when the axial strain was over 11%, 6 mm central pore-damaged sample showed a strain softening property, which differed obviously from the other two. Moreover, the curve of volumetric strain and axial strain presented a similar effect only within the scope of a strain less than 6%. In the late stage of the test, 6 mm central pore sample's volumetric strain rate increased drastically. Furthermore, different initial damage positions had an influence on the evolution of the samples' internal structure, that is, when the damage position was closer to the samples' centre, the mean value (*ME*) and standard deviation (*SD*) were greater.

Key words: expansive soil; mechanical property; CT-triaxial test; damage location