

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.08.025

一维损伤对低含水率膨胀土强度和变形的影响^①

胡东旭, 毛新, 张雅倩, 王晓琪, 汪时机

西南大学 工程技术学院, 重庆 400715

摘要: 对 3 组 15 个不同破损孔径的一维损伤膨胀土圆柱试样, 进行控制净围压分别为 50, 100, 150 kPa 的三轴剪切试验, 研究低含水率($w=7\%$)条件下一维圆柱孔破损重塑膨胀土的应力-应变特性、体变特性以及破损形态。试验结果发现: 与以往常规含水率(约 20%)土样不同, 破损孔径对膨胀土强度没有显著的弱化或者是强化作用, 相同破损面积的试样之间也未表现出相似的强度和变形特征; 揭示了既有破损对土体峰值强度的影响与土体的含水率密切相关。试样整体表现出先剪缩后剪胀的特性, 但随着围压的提高, 剪缩阶段明显缩短; 从破坏形态可以看出, 随着围压的提高, 裂隙长度变短、倾角变小, 说明围压对既有裂隙的扩展有明显的抑制作用。

关键词: 一维损伤; 膨胀土; 低含水率; 破损特性; 破坏形态

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)08-0174-06

膨胀土是一种吸水膨胀, 失水收缩, 具有超固结性、胀缩性和多裂隙性的粘土。它在世界上分布十分广泛, 由于膨胀土工程性质不稳定, 常给膨胀土地区的工程建设带来极大的建设难度和致灾隐患^[1]。膨胀土中主要粘粒成分蒙脱石、伊利石具有极强的亲水性, 是引起膨胀土胀缩的首要原因^[2]。自然条件下, 膨胀土体中存在着较多的原生裂隙、次生裂隙和孔洞等形式的损伤; 由于季节变换和加、卸荷作用, 导致新生裂隙萌生、原生裂隙发展, 其成为边坡滑动的关键诱因; 胀缩性和超固结性对稳定性的影响则通过裂隙表现出来^[3-12]。

殷宗泽等^[4]研究认为, 膨胀土是多裂隙土, 其边坡稳定性在很大程度上受裂隙影响, 裂隙开展后抗剪强度显著降低。徐彬等^[5]通过对同一种膨胀土开展直剪试验和三轴剪切试验, 研究土体在含水率为 12%、18%、25% 和 46% 下, 从无损到裂隙萌生、发展, 到充分发育过程中强度的不同影响因素, 发现含水率和裂隙对膨胀土强度影响较大。Bhuvaneshwari 等^[6]研究表明, 膨胀土由于含水率变化、反复胀缩导致了土体结构裂化。裂隙、孔洞等在低含水率下迅速地萌生、发展甚至贯通。姚志华^[7]利用 CT-非饱和土三轴仪, 对初始含水率为 26.55% 的结构损伤的膨胀土干湿循环后的屈服应力进行细观研究, 将 Barcelona 膨胀土模型推广到结构损伤的情况。汪时机, 韩毅等^[8-10]对处于最优含水率为 20% 的破损重塑膨胀土样进行 CT-三轴剪切试验发现, 孔洞破损改变了试样的内部结构, 进而改变了土体的强度。

可见, 现有的研究对象主要是含水率相对较高(一般高于缩限)的原状土或重塑土样, 饱和度通常在 80% 以上; 在三轴试验过程中, 裂隙萌生、发展不明显, 甚至有细微裂隙闭合的情况。然而, 初始损伤对低

① 收稿日期: 2016-01-25

基金项目: 国家自然科学基金(11572262); 中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2016B006, XDJK2015C018)。

作者简介: 胡东旭(1991-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 主要从事非饱和土力学方面的研究。

通信作者: 汪时机, 教授, 博士。

含水率膨胀土的力学特性影响如何,尚待研究.本文以南水北调中线总工程南阳陶岔膨胀土为研究对象,制备低含水率试样,并在垂直试样横截面的一维方向上预设圆柱孔破损,通过三轴排水剪切试验研究不同净围压下,不同孔径初始破损膨胀土的强度及变形特性.

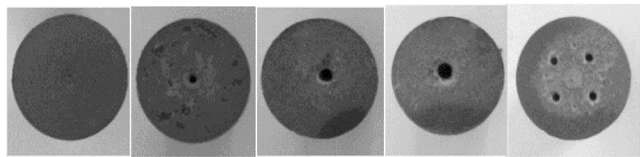
1 试验方案

1.1 试样制备

将试验用土经烘干后碾碎,过 2.5 mm 筛,制备初始破损土样.由于试样含水率低,为使土样含水率充分均匀,采用初始含水率 12%进行培土,每次撒土厚度 1~2 mm;然后喷洒额定质量的蒸馏水,间隔 2 h 循环;密封恒温放置 48 h.等待水分均匀后在制样器中分 5 层击实,制作直径 39.1 mm、高度 80 mm 的试样,称量、编号后放进保湿器.每组土样制备完毕,统一放入 24 ℃恒温空调室,缓慢干燥到设定含水率 7%.在垂直试样横截面的一维方向上,由套筒保护对每组试样作分别为 0,2.5,4,5 mm 垂直中心圆柱孔和 4 个 2.5 mm 垂直偏心圆柱孔,以制备好一维初始损伤试样.保证出土率在 85%~105%之间(出土率=实际钻出土的质量/理论孔径下出土质量×100%),初始破损情况如图 1 所示;试样初始参数如表 1 所示.

表 1 试样初始参数

质量密度	干密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	饱和度/%	孔隙比
2.73	1.7	7	32	0.61



从左至右试样孔径分别为:0,2.5,4,5,4×2.5 mm.

图 1 不同孔径圆柱孔破损试样

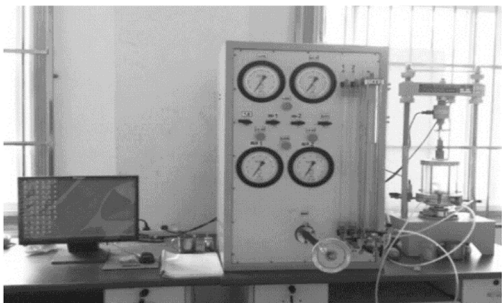


图 2 非饱和土三轴仪

1.2 试验方案

试验利用图 2 所示非饱和土三轴仪试验系统对 A、B、C 3 组 15 个低含水率损伤试样进行三轴剪切试验;每组试样编号 1~5.试验中,每组分别控制围压为 350,400,450 kPa,孔隙气压均为 300 kPa,净围压(净围压=围压 σ_3 -孔隙气压 σ_a)分别为 50,100,150 kPa,详见表 2.剪切控制条件统一设置成变速率为 0.02 mm/min,试样高度 80 mm,破坏停止条件为轴向应变大于 15%,数据自动采集系统记录数据时间间隔为 60 s.

表 2 试样编号表

净围压/ kPa	试验孔径/mm				
	0	2.5	4	5	4×2.5
50	A1	A2	A3	A4	A5
100	B1	B2	B3	B4	B5
150	C1	C2	C3	C4	C5

2 试验结果

2.1 相同净围压不同破损孔径时应力-应变关系

图 3(a)~(c)分别为净围压 50,100,150 kPa 时,不同孔径破损土样的偏应力($\sigma_1-\sigma_3$)-轴向应变(ϵ_a)关

系. 从图 3 可以看出, 所有试样均在轴向应变 3% 以内发生屈服, 甚至破坏; 在低净围压(50 kPa, 100 kPa) 时, 净围压对土样峰值强度的影响不明显; 但当净围压增大至 150 kPa 时, 其峰值强度明显得到提高. 进一步分析发现, 破损孔径面积大小对土样抗剪强度的影响是随机的, 并不存在一定的规律性, 说明初始破损是否会强化(或弱化)土体的抗剪强度与含水率、净围压等因素密切相关.

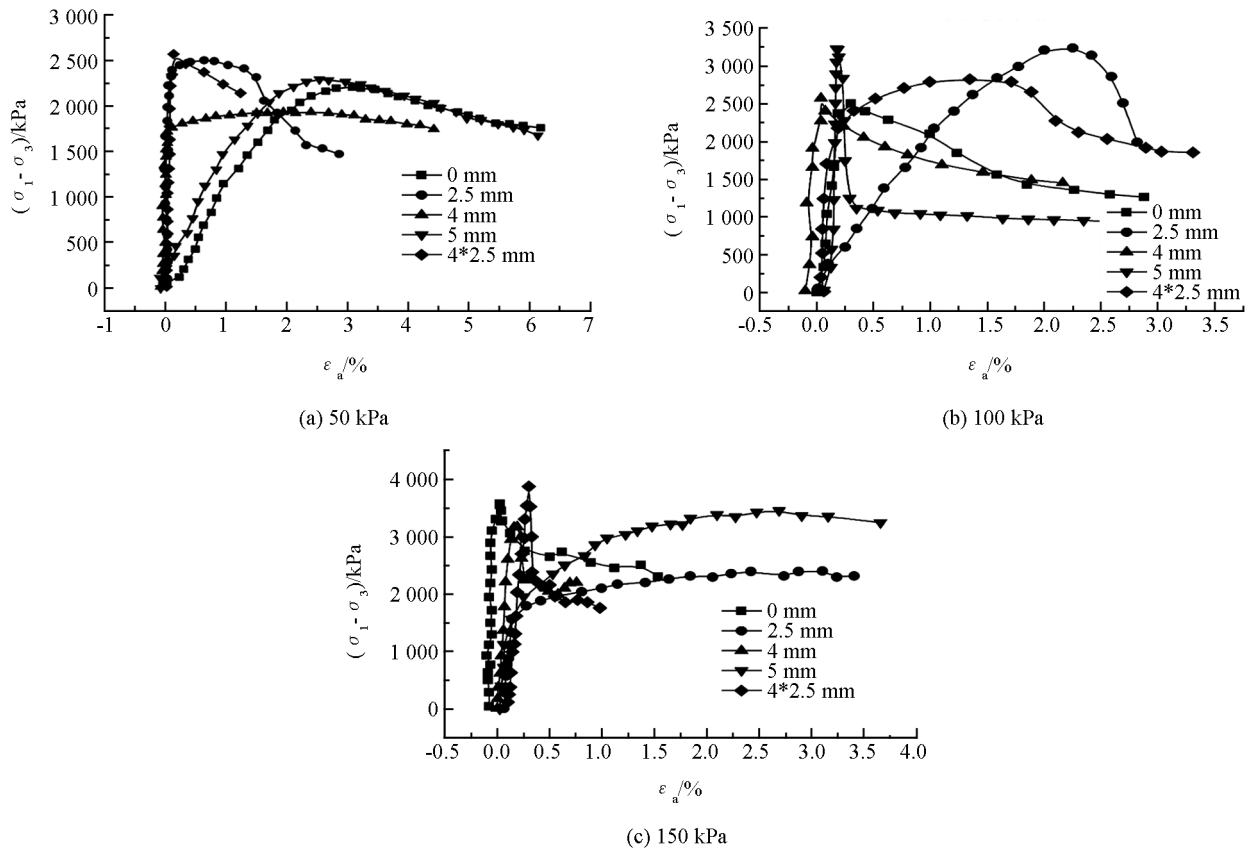


图 3 净围压分别为 50、100 和 150 kPa 时, 不同破损孔径试样的应力-应变关系

图 4(a)–(c) 3 组试样, 从左至右分别是 0、2.5、4、5、 4×2.5 mm 破损孔径, 试验中剪切速率控制为 0.02 mm/min. 从图 4 中的 3 组破坏形态可以看出: 裂隙绝大多数都从底部开始萌生, 并进一步向试样顶部扩展甚至贯通. 净围压为 50 kPa 时, 试样破坏裂缝与中轴线成 30° 以内的角度, 裂隙基本都是沿着试样轴线竖直方向扩展, 而较高净围压下(100 kPa、150 kPa), 裂隙倾斜的角度减小, 并且大部分裂隙都没有上下贯通, 这说明净围压对既有破损的扩展有明显的抑制作用.

2.2 不同破损程度和不同净围压时的峰值强度特性

根据前文实验偏应力-轴向应变关系, 可看出在达到偏应力峰值之前, 呈现出弹塑性变形的特征, 但达到土体应力峰值之后, 土体迅速屈服, 呈现一种脆硬性破坏特征, 这与前期研究^[8–10]差异较大. 这是因为在低含水率状态, 土样在轴向偏应力作用下, 裂隙迅速萌生、扩展、甚至贯通, 形成决定其峰值强度的主裂隙, 土体表现出较强的结构性. 为更好地比较土柱在不同净围压($\sigma_3 - \sigma_a$) 和不同损伤程度的应力-应变特性, 取各个试样的偏应力峰值($\text{Max}(\sigma_1 - \sigma_3)$) 绘制出不同净围压不同破损程度试样的偏应力峰值图, 如图 5.

可以看出, 在同一组净围压相同, 不同程度圆柱孔破损的偏应力峰值与破损程度并不构成确定的相关性关系, 这与文献^[8–10]发现土体抗剪强度与破损孔径大小之间的相关性结论不同, 说明既有破损对土体峰值强度的影响与土体的含水率密切相关.

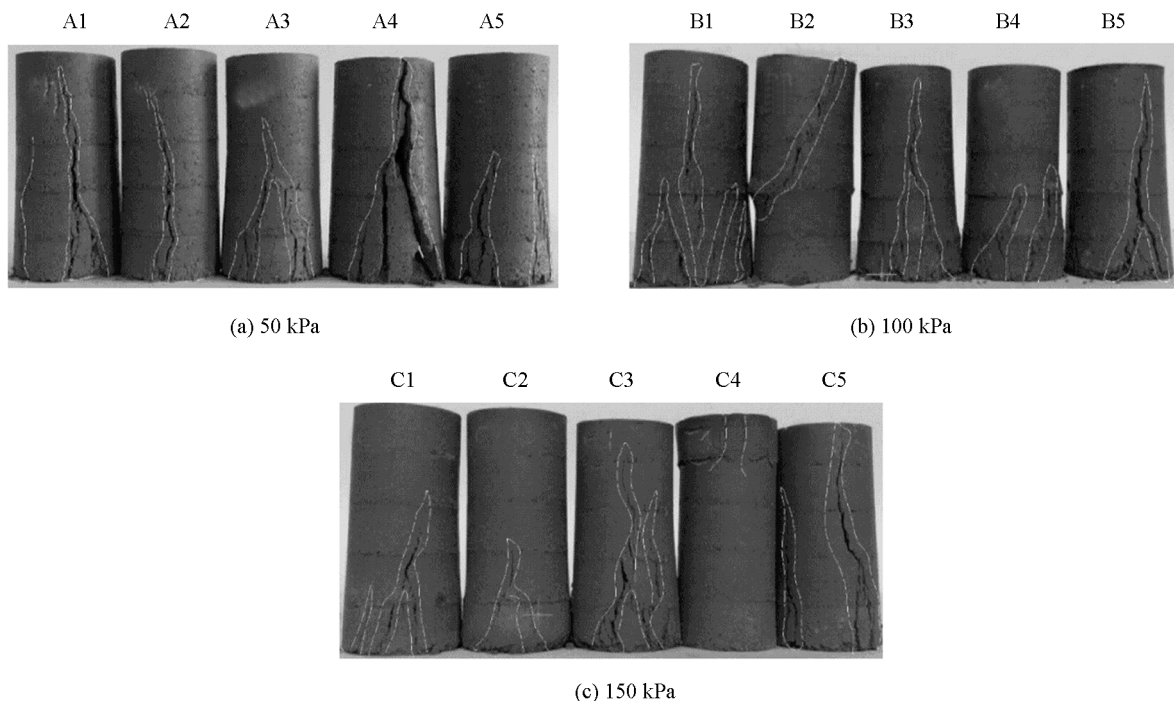


图 4 净围压分别为 50,100,150 kPa 时,不同破损孔径试样试验后的破损形态

2.3 体变特性分析

图 6(a) — (c) 分别对应于净围压 50, 100, 150 kPa. 从图中可以看出, 试验前期均先发生剪缩, 后期则表现不一. 净围压 50 kPa 下的 5 mm 孔试样和净围压 150 kPa 下的 2.5 mm、5 mm 孔试样则一直处于剪缩状态, 因其试样底部或顶部在剪切过程中局部屈服破坏, 而非裂隙贯通破坏, 并且在轴向应变很小时, 这一过程就已完成. 也就是说, 体应变(ϵ_v)的变化与土体后阶段中裂缝的扩展情况密切相关. 通过比较图 6(a)、(b)、(c) 3 组体变关系发现: 净围压越大, 土样由剪缩变化到剪胀过程越短, 剪胀越明显.

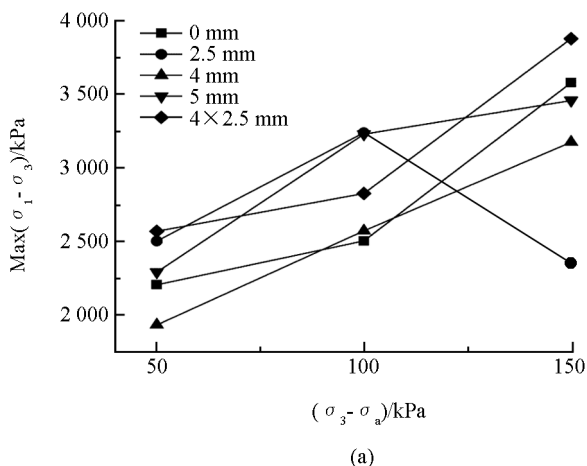


图 5 不同损伤程度试样的不同净围压-偏应力峰值

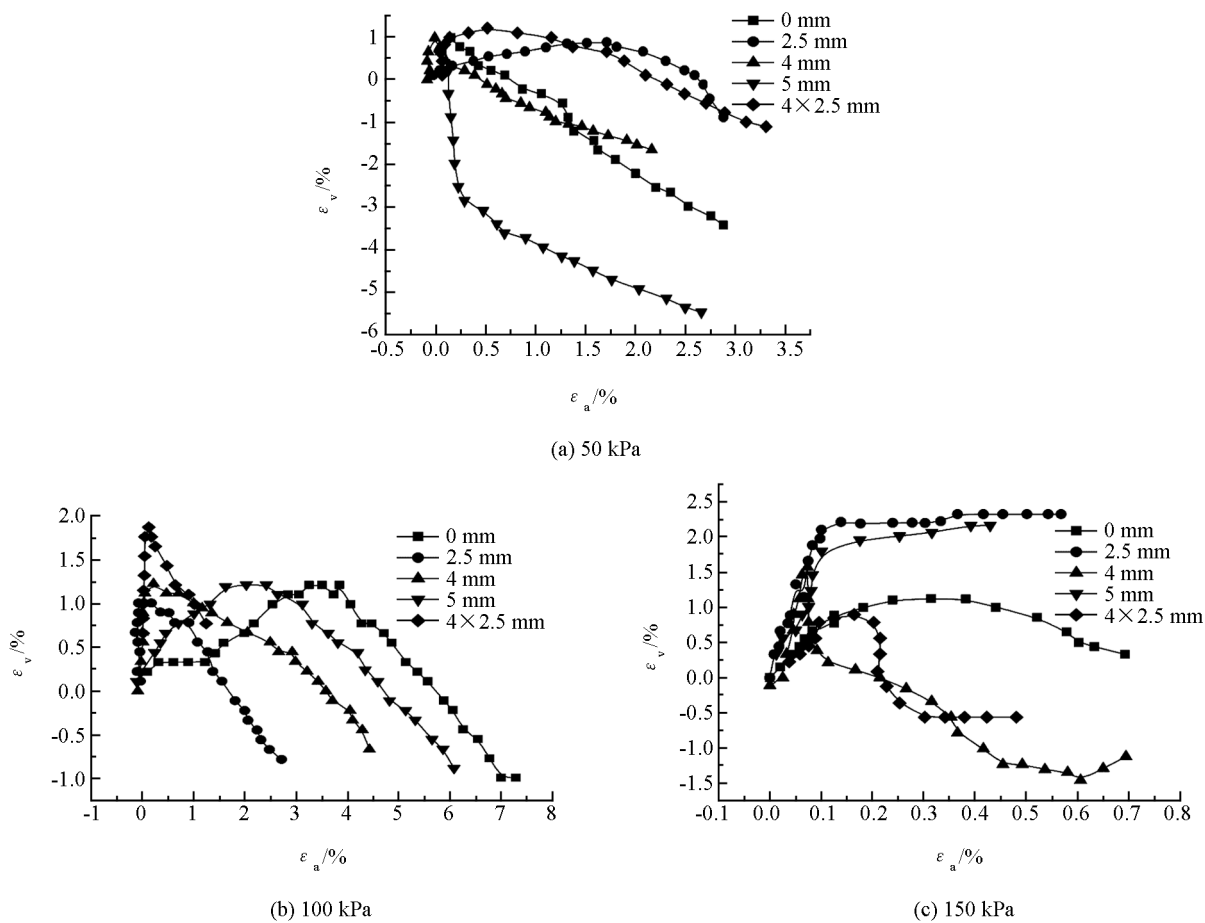
3 结 论

通过 3 组 15 个不同破损孔径试样的三轴剪切试验, 定量研究了低含水率状态下一维圆柱孔破损膨胀土的力学特性和体变特性以及演变规律, 并与前期研究相比较, 得出以下结论:

1) 所有试样均在轴向应变 3% 以内发生屈服甚至破坏; 净围压对土样峰值强度的影响在较高围压 (150 kPa) 时表现明显. 同时, 净围压越大, 土样由剪缩变化到剪胀过程越短, 剪胀越明显.

2) 破损孔径面积大小对土样抗剪强度的影响是随机的, 并不存在一定的规律性, 但前期研究中破损土样在 20% 含水率时, 峰值强度与其破损状态之间存在一定的相关性. 这说明初始破损对土体的峰值强度的影响与土样含水率密切相关, 并且这种相关性主要表现在土体达到一定的饱和度之后.

3) 在低净围压 50 kPa 时, 破损裂缝基本上都贯穿整个试样, 但随着净围压增高到 150 kPa, 裂隙破损开展受到限制, 裂隙倾斜的角度减小, 并且大部分裂隙都没有上下贯通, 这说明净围压对既有破损的扩展有明显的抑制作用.



(a), (b), (c)净围压分别为 50,100,150 kPa.

图 6 不同净围压下不同孔径圆柱孔损伤体应变-轴向应变关系图

参考文献:

[1] 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.

[2] 邵梧敏, 谭罗荣, 张梅英, 等. 膨胀土的矿物组成与膨胀特性关系的试验研究 [J]. 岩土力学, 1994, 15(1): 11—19.

[3] 包承纲. 非饱和土的性状及膨胀土边坡稳定问题 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 1—15.

[4] 殷宗泽, 袁俊平, 韦 杰, 等. 论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(12): 2155—2161.

[5] 徐 彬, 殷宗泽, 刘述丽. 膨胀土强度影响因素与规律的试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 44—50.

[6] BHUVANESHWARI S, ROBINSON R G, GANDHI S R. Cyclic Well-Shrink Behavior of Lime Columnstabilized Expansive Soil. 4th Asia Pacific Conference on Unsaturated Soils, November 23—25, 2009 [C]. Newcastle, NSW, Australia: CRC Press, 2010.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 汪时机, 陈正汉, 李 贤, 等. 土体孔洞损伤结构演化及其力学特性的 CT-三轴试验研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 150—154.

[10] 韩 毅, 汪时机, 李 贤, 等. 土体圆柱孔破损结构演化特性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(12): 156—161.

- [11] 卢再华. 非饱和膨胀土弹塑性损伤本构模型及其在土坡多场耦合分析中的应用 [D]. 重庆: 后勤工程学院, 2001: 16—17.
- [12] 龚壁卫, 程展林, 胡 波, 等. 膨胀土裂隙的工程特性研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1825—1830+1836.

The Influence of One-Dimensional Damage on the Strength and Deformation of Low Moisture Content of Expansive Soil

HU Dong-xu, MAO Xin, ZHANG Ya-qian,
WANG Xiao-qi, WANG Shi-ji

School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to research the stress-strain properties, volumetric strain characteristics and one-dimensional damage morphologies of reconstituted expansive soils with cylindrical-hole damage at low moisture content ($w=7\%$), 15 different cylindrical-pore damaged expansive soil samples were divided into three groups, under the net confining pressure of 50 kPa, 100 kPa and 150 kPa, respectively. Then, triaxial tests were conducted. The results showed that differing from the past conventional studies (i. e. w was about 20%), soil strength was not obviously weakened nor reinforced, and samples with the same pore area did not show similar strength as well as deformation characteristics, revealing that soil peak strength influenced by the damage is closely related to its water content. Generally, soil samples showed a property of shearing shrinkage first, and then dilation. Furthermore, the shearing shrinkage stage was shortened significantly along with the increase in net confining pressure. Observed from the morphology of cracks, the length of fissure was shortened, and the inclination of the cracks became smaller as the confining pressure increased, which indicated that net confining pressure has a significant restraining effect on the development of cracks.

Key words: one-dimensional damage; expansive soil; low water content; damage behavior; failure mode

责任编辑 汤振金

