

不同含水率原状黄土的强度与变形特性试验研究

王 燕¹, 姚仰平², 胡玉定¹, 梅 源¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 为研究含水率的变化对黄土强度与变形特性的影响规律, 通过 FSY30 型应变控制式非饱和土三轴仪, 进行了 5 种不同含水率下原状 Q₃ 黄土的各向等压固结试验和三轴剪切试验。研究表明: 由原状黄土各向等压固结试验 $e-\ln p$ 曲线确定的结构强度 p_s 随初始含水率 w 的增大而连续降低, 两者之间的关系可用幂函数 $p_s = A w^\lambda$ 来描述; 由三轴剪切试验得到的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 关系曲线在固结围压 $(\sigma_3 - u_a) = 50$ kPa 时呈现为弱硬化型, 在固结围压 $(\sigma_3 - u_a) = 200$ kPa、300 kPa 时呈现为强硬化型; 由三轴剪切试验得到的 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系曲线在 $w = 9.0\%$, $(\sigma_3 - u_a) = 50$ kPa、100 kPa 时呈现弱软化型, 其余试验条件下均为强硬化型; 原状黄土的黏聚力 c 及固结后的初始基质吸力 $(u_w - u_a)$ 均随着初始含水率 w 的增加而迅速减小。

关键词: 原状 Q₃ 黄土; 含水率; 结构强度; 应力-应变关系; 基质吸力

中图分类号: TU471.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)03-0325-06

Experimental study on strength and deformation characteristics of intact loess with different water contents

WANG Yan¹, YAO Yangping², HU Yuding¹, MEI Yuan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to study the strength and deformation characteristics of intact loess with different water contents, the isotropic consolidation compression tests and triaxial shear tests are performed by using FSY30 unsaturated soil strain-controlled triaxial apparatus. The research results are summarized as follows: The structural strength p_s decreases continuously when the initial water content increases, and their relationship could be described by the power function $p_s = A w^\lambda$; $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ curves from triaxial shear tests are the weak hardening when the confining pressure $(\sigma_3 - u_a)$ is 50 kPa, but they show the strong hardening when the confining pressure $(\sigma_3 - u_a)$ is 200 kPa or 300 kPa; The $\epsilon_v - \epsilon_1$ curves from samples with water content of 9.0% are the weak softening when the confining pressure $(\sigma_3 - u_a)$ is 50 kPa or 100 kPa, but they show strong hardening type in other test conditions; The cohesion c and the initial suction $(u_w - u_a)$ after consolidation decrease rapidly with the increase of initial water contents.

Key words: intact Q₃ loess; water content; structural strength; stress-strain relationship; suction

黄土是我国西北地区广泛覆盖的一种典型的区域性特殊土, 西部大开发战略实施中基础设施建设、生态环境改善均与黄土密切联系^[1-3]。一直以来, 黄土的水敏性是影响其力学特性和工程性质的关键所在, 是岩土工程界面临及关注的热点问题之一。众多学者对此进行了多角度、多方面的试验与理论研究工作, 并取得了可贵的成果。胡再强等^[4-5]进行了原状结构性黄土和人工制备结构性黄土的室内侧限压缩试验、等含水量三轴剪切试验以及等吸力三轴剪切试验研究, 结果表明,

黄土的变形与结构强度的破坏有直接的关系。邵生俊等^[6-7]基于相同干密度下原状黄土、饱和黄土以及重塑黄土的三轴剪切应力-应变曲线, 构建了反映黄土结构性的定量化参数 m_s , 测试结果表明: 不同含水率和不同固结围压下, 结构性参数均呈现较好的规律性和稳定性。陈存礼等^[8]通过不同初始吸力下非饱和原状黄土的等向压缩和三轴剪切试验, 研究了常含水率下非饱和原状黄土的变形特性、临界状态、屈服及吸力变化特性, 对不排水条件下土体快速破坏的工程实际有重要

收稿日期: 2021-08-12

修改稿日期: 2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178302); 西安建筑科技大学专项基金项目(ZR20015)

第一作者: 王 燕(1981—), 女, 博士, 工程师, 主要从事黄土力学方面的研究工作。E-mail: wangyanpost@163.com.

的理论意义和应用价值. 随着测试技术的进步, 利用真三轴仪更真实、全面地模拟黄土的三维受力状态无疑具有优势^[9-10]; 而借助 CT 扫描技术^[11-12], 研究黄土在受力或浸水过程中细观结构的演化过程, 为黄土细观结构与宏观力学之间定量关系的研究奠定了基础^[13-15]. 以上研究工作, 极大地丰富了对黄土特殊力学性质的认识, 缩短了黄土力学与实际工程应用的距离. 然而, 由于受沉积年代、应力历史、水湿状态等自身复杂因素的影响和测试技术、手段的制约, 黄土特殊的力学演化规律还不十分明晰, 基础理论的完善还需更多试验的支撑. 基于此, 本文以西安地区的原状 Q_3 黄土为试验材料, 利用非饱和土三轴仪, 研究不同初始含水率下原状黄土的强度与变形规

律, 为进一步建立黄土在力与水作用下的基础理论提供试验依据.

1 试验土样与试验方案

1.1 土样的基本性质

试验用土取自西安市未央区某一建筑施工场地. 该场地地貌属黄土梁, 地下水属潜水类型, 勘察期间水位埋深为 20.10~21.05 m. 在基坑侧壁 3.5~4.0 m 处取原状土样, 取土及运输过程尽量避免扰动. 所取土样属 Q_3 黄土, 土呈褐黄色, 具有肉眼可见大孔隙, 针状孔隙发育, 含钙质条纹、铁锰质斑点及蜗牛壳等. 在实验室测得其基本的物理性质指标如表 1 所示.

表 1 原状 Q_3 黄土的物理性质指标

Tab. 1 Physical index of intact Q_3 loess

天然含水率 $w/\%$	天然密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	干密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	比重 G_s	天然孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$
21.9	1.47	1.21	2.71	1.23	32.0	18.3

1.2 试样制备

为了研究不同含水率原状黄土的变形强度特性, 对天然含水率为 21.9% 的试样, 通过减湿(自然烘干法)及增湿(水膜转移法)的控制方法, 共制备 5 组不同含水率的试样. 含水率变化依次为: 9.0%、15.0%、21.9% (天然含水量)、27.0%、32.0%; 初始饱和度依次为: 19.8%、33.0%、48.3%、59.5%、70.5%. 将制备好的试样在保湿器中放置 48 h 以上, 以保证试样中的水分均匀扩散.

1.3 试验仪器及试验方法

试验仪器采用江苏溧阳市永昌工程实验仪器厂研制的 FSY30 型应变控制式非饱和土三轴仪, 可通过高进气陶瓷板和轴平移技术实现吸力的测量.

进行两种不同应力路径下的试验: (1) 5 组不同含水率原状黄土的各向等压固结试验. 所加净围压的次序为: 25 kPa、50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、500 kPa、600 kPa; 每级围压的固结时间为 12 h 以上, 稳定标准为: 排水量及体变量连续 2 h 均不超过 0.01 mm^3 . (2) 5 组不同含水率原状黄土的固结排气不排水剪切试验. 固结的净围压分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa. 固结稳定后, 关闭排水阀门, 待试样中的孔隙水压变化稳定后再进行剪切, 剪切速率为 0.032 mm/min .

2 试验结果分析

2.1 各向等压固结试验

在各向等压固结试验过程中, 随着净平均应力 p 的增大, 孔隙气体的压缩及排出, 试样的孔隙比 e 不断减小. 则由试验数据绘制得到不同含水率原状黄土的 $e-\ln p$ 关系曲线如图 1 所示.

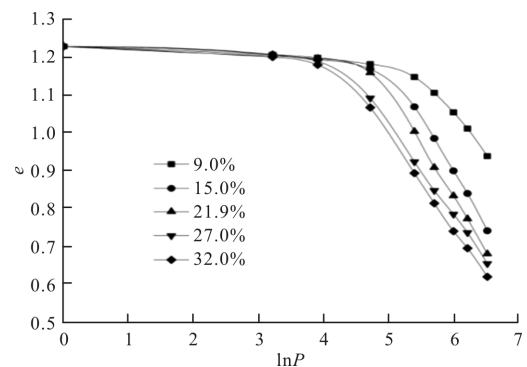


图 1 各向等压固结试验的 $e-\ln p$ 曲线

Fig. 1 $e-\ln p$ curves from isotropic consolidation compression tests

由图 1 可知, 同一含水率下, 原状黄土的 $e-\ln p$ 曲线基本呈现出“前缓后陡”的形态, 即存在一个明显的转折点. 采用 Casagrande 的方法确定曲线的转折点, 则转折点对应的应力即为该土体的结构强度^[16-17]. 在土中应力未达到土的结构强度前, 黄土颗粒间只有部分连接点破坏或移动, 因此, 只产生少量变形, 孔隙比缓慢减小. 当土中

应力超过土的结构强度后, 颗粒间的架空孔隙结构受到极大的破坏, 随着骨架颗粒急速滑落到架空孔隙的空腔中, 土体变形迅速增大, 孔隙比迅速减小^[18]。

进一步得到原状黄土的结构强度 p_s 随含水率 w 的变化规律如图 2 所示。由图 2 可知, 原状黄土的结构强度随含水率的增大而迅速降低, 且在低含水率时其强度的降低幅度远大于高含水率时的降低幅度。具体地说, 当含水率为 9.0% 时, 原状黄土表现出较高的结构强度, 为 298.87 kPa; 但当含水率增加到 15.0% 时, 结构强度很快降低到 164.02 kPa, 降低了 134.85 kPa, 强度损失了近半; 随着含水率的继续增加, 结构强度的下降幅度逐渐放缓, 直至含水率 32.0% 时, 其结构强度仍存 60.34 kPa。

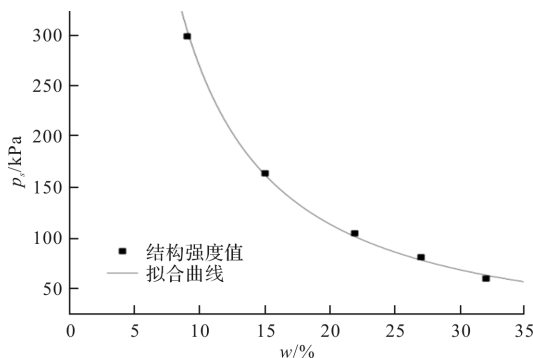


图 2 结构强度与含水率的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves between structural strength and water contents

将结构强度随含水率的变化关系拟合成一条光滑的曲线, 可描述为幂函数的数学表达式为

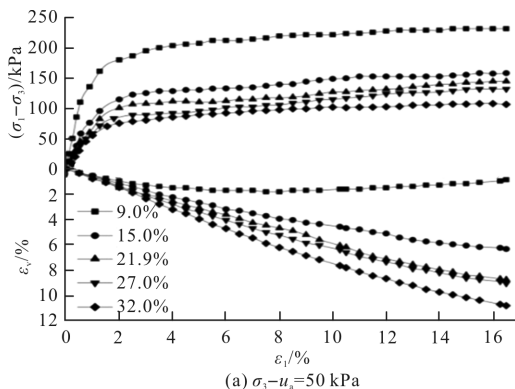
$$p_s = Aw^\lambda \quad (1)$$

式中: A 、 λ 均为土性参数。在本次试验中, 其值分别为 4 578.5、-1.233, 相关系数 $R^2 = 0.998$ 。

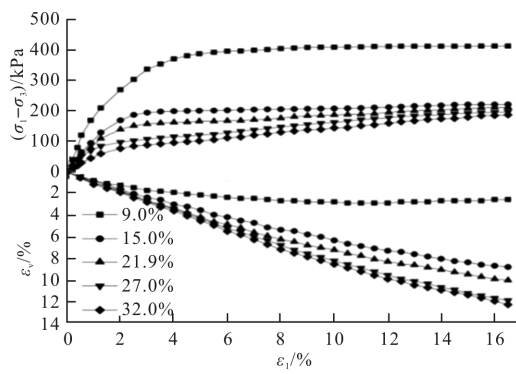
2.2 固结排气不排水剪切试验

2.2.1 不同含水率原状黄土的应力-应变特性

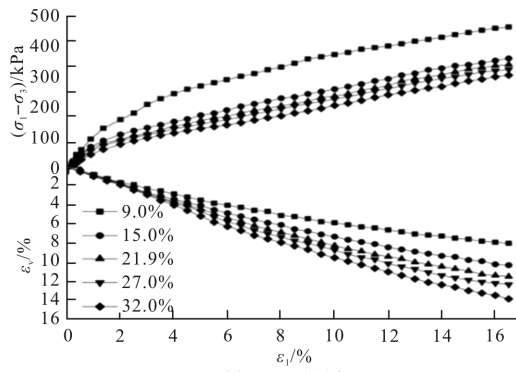
根据试验数据绘制了不同含水率下原状黄土的偏应力-轴应变、体应变-轴应变关系曲线如图 3 所示。



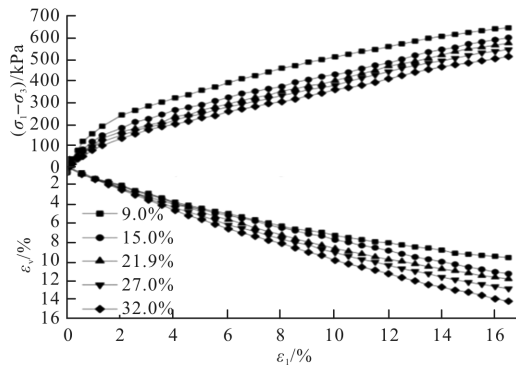
(a) $\sigma_3 - u_a = 50$ kPa



(b) $\sigma_3 - u_a = 100$ kPa



(c) $\sigma_3 - u_a = 200$ kPa



(d) $\sigma_3 - u_a = 300$ kPa

图 3 三轴剪切试验的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 和 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系曲线

Fig. 3 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ and $\epsilon_v - \epsilon_1$ curves from triaxial shear tests

由图 3 可知, 在三轴压缩条件 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 下, 原状黄土的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 、 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系曲线与含水率 (水湿状态) 和固结围压 (应力水平) 均有密切的关系。具体描述如下:

(1) 当固结围压 ($\sigma_3 - u_a$) 为 50 kPa 时 (图 3 (a)), 由于不同含水率原状黄土的结构强度都大于此时的固结应力, 因此, 其 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 关系曲线均表现出弱硬化型, 即随着轴应变 ϵ_1 的不断增大, 土的偏应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 在达到某一数值后基本保持稳定, 没有显著的提高。当固结围压 ($\sigma_3 - u_a$) 增大到 100 kPa 时 (图 3 (b)), $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 曲线有两种趋势: 含水率为 9.0%、15.0%、21.9% 的试样仍呈现为弱硬化型; 而含水率为 27.0%、32.0% 的试样已呈现出强硬化型。随着固结围压 ($\sigma_3 - u_a$) 继续增大到 200 kPa、300 kPa (图 3 (c)、(d)), 各含水

率试样的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 关系曲线均表现出强硬化型,即随着轴应变 ϵ_1 的不断增大,土的偏应力不断提高。进一步分析表明,黄土含水率的变化对原状黄土应力-应变曲线类型有显著的影响:当黄土的含水率较低时,黄土颗粒间较强的固化联结使其表现出较高的结构强度,若此时的固结围压相对较小,那么应力-应变曲线就可能表现出弱硬化型;随着黄土含水率的增加,水分子的楔入引起黄土颗粒间胶结盐晶的不断溶解,从而不断地削弱黄土的结构强度,当固结围压相对较大时,黄土的结构强度会遭到进一步的破坏,随着土体的进一步压密和次生结构的生成,应力-应变曲线就表现出强硬化型;

(2)含水率为9.0%的试样,在固结围压($\sigma_3 - u_a$)为50 kPa、100 kPa时,其 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系曲线表现出弱软化型,即在剪切过程中,试样的体应变 ϵ_v 先增大后缓慢减小,土体有一定的剪胀现象。而在其他试验条件下, $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系曲线均为强硬化型,即在剪切过程中,试样的体应变 ϵ_v 不断增大,土体一直处于剪缩状态。这是由于原状黄土在较低含水率时,颗粒间的胶结咬合作用较强,较低的固结应力无法打破这种联结状况,于是,在剪切过程中因土颗粒间的相互滑移远离而引起土体膨胀;而随着含水率的增加或固结应力的增大,颗粒间的联结状况逐渐破坏,土颗粒在剪切过程中向孔隙中移动,使土体积压缩;

(3)在同一固结围压下,不同含水率试样的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 、 $\epsilon_v - \epsilon_1$ 关系曲线均无交叉现象。随着含水率的增大,黄土的初始变形模量($\epsilon_1 < 2\%$)与抗剪强度($\epsilon_1 = 15\%$)不断减小,而体积变形却逐渐增大。强度的降低与变形的增大是黄土的水敏性这一特殊本质反映出的不同侧面。

2.2.2 临界状态参数与含水率的关系

在常规三轴试验中,由 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$,得平均正应力 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$,广义剪应力 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 。则不同含水率下原状黄土在 $q-p$ 平面上的临界状态线如图4所示。

由图4可知,同一含水率下,原状黄土的临界状态线可拟合为一条直线;不同含水率下,原状黄土的临界状态线近似为一簇随着含水率的增加而平行下移的直线。若分别用 M 、 h 表示各临界状态线的斜率及截距,则不同含水率原状黄土的内摩擦角 φ 及黏聚力 c 的计算公式为

$$\varphi = \sin^{-1}[(3M/(6+M))] \quad (2)$$

$$c = h(3 - \sin\varphi)/(6\cos\varphi) \quad (3)$$

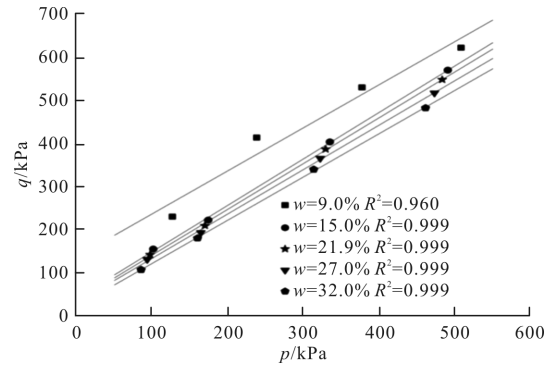


图4 $q-p$ 平面上三轴试验的临界状态线

Fig. 4 $q-p$ relationship curves from triaxial shear tests

由此进一步得到原状黄土在不同含水率时的强度参数如表所示,由表2可知,当含水率从9.0%逐渐增加到32.0%时,原状黄土的黏聚力 c 从64.63 kPa不断降低到9.70 kPa;而内摩擦角 φ 仅从25.5°变化到27.3°,仅仅变化了1.8°。因此,可以认为原状黄土的黏聚力 c 随含水率的增大而减小,内摩擦角 φ 基本不受含水率变化的影响,这与文献[19]的研究结果一致。

表2 不同含水率下原状黄土的强度参数

Tab. 2 Shear strength parameters of intact Q_3 loess under different water contents

含水率 $w/\%$	临界状态 线斜率 M	临界状态线 截距 h/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 c/kPa
9.0	1.003	136.22	25.5	64.63
15.0	1.082	40.09	27.3	19.11
21.9	1.067	34.00	26.9	16.19
27.0	1.035	29.53	26.2	14.03
32.0	1.008	20.44	25.6	9.70

2.2.3 固结与剪切过程中的基质吸力变化

在固结和剪切试验过程中测得了试样的基质吸力,试验结果如图5、图6所示。

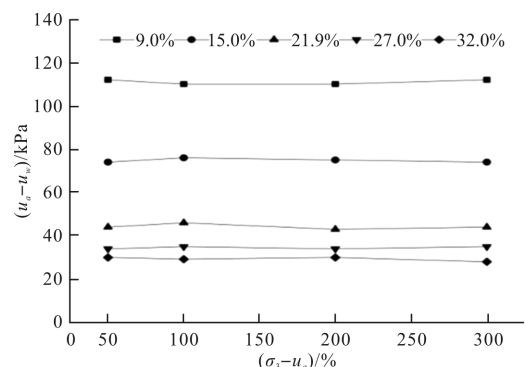


图5 基质吸力与固结围压的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between confining pressure and initial matrix suction

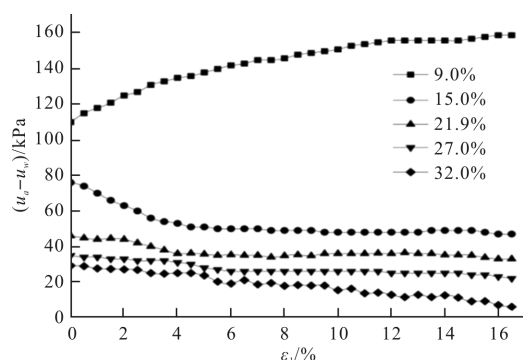


图6 基质吸力与轴应变的关系曲线

Fig. 6 Relationship curves between matrix suction and axial strain

由图5可知,在同一含水率下,随着固结围压的增大,试样固结完成后的初始基质吸力变化幅度不大;而随着含水率的逐渐增加,初始基质吸力却越来越小。由此可见,原状黄土的初始含水率的高低对基质吸力的大小具有显著的影响;相比之下,固结围压对基质吸力的影响却小得多。

由图6可知,在试样的剪切过程中,基质吸力呈现出两种不同的趋势:当含水率 $w=9.0\%$ 时,基质吸力随着轴应变的增加而不断增长,当含水率 $w>9.0\%$ 时,基质吸力随着轴应变的增加而减小。通过剪切过程中土体微观结构的变化进行分析^[20]:含水率低时,土颗粒之间水气界形成的弯液面收缩膜很薄,剪切作用使得颗粒之间空隙减小,导致收缩膜凹面曲率变大,从而引起了吸力的增长;含水率较高时,剪切作用使土颗粒之间原本较厚的弯液面收缩膜因空隙减小而变得更厚,导致其凹面曲率变小,从而引起吸力的降低。

3 结论

(1)由各向等压固结试验得到的原状黄土 $e-\ln p$ 曲线转折点定义了原状黄土的结构强度。结构强度 p_s 随含水率 w 的增大而显著降低,两者的变化规律可拟合为幂函数 $p_s=A w^\lambda$ 的表达式;

(2)不同初始含水率的原状 Q_3 黄土在固结排气不排水剪切条件下,其 $(\sigma_1-\sigma_3)-\epsilon_1$ 关系曲线在低围压(50 kPa)下均呈现出弱硬化型;随着围压的升高和含水率的增大,逐渐向强硬化型过渡;在高围压(200 kPa、300 kPa)下均呈现出强硬化型。含水率为9.0%的试样,在低围压(50 kPa、100 kPa)下其 $\epsilon_v-\epsilon_1$ 关系曲线呈现出弱软化型,土体在剪切过程中出现剪胀现象;在其他试验条件下,试样的 $\epsilon_v-\epsilon_1$ 关系曲线呈现出强硬化型,土体在剪切过程中表现为剪缩;

(3)不同初始含水率下,原状 Q_3 黄土的临界状态线可拟合为一簇随着含水率的增加而平行下移的直线。抗剪强度指标黏聚力 c 随含水率的增加而逐渐减小,而内摩擦角 φ 基本不受含水率变化的影响;

(4)试样固结后的初始基质吸力基本不受固结围压大小的影响,只随着含水率的增大而逐渐减小。试样在剪切过程中,受土颗粒间弯液面收缩膜凹面曲率的变化,基质吸力呈现两种趋势:含水率 $w=9.0\%$ 的试样,其基质吸力随着轴应变的增加而不断增长;含水率 $w>9.0\%$ 的试样,其基质吸力随着轴应变的增加而减小。

参考文献 References

- [1] 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): 3-13.
XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13.
- [2] 李宁, 程国栋, 谢定义. 西部大开发中的岩土力学问题[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(3): 268-272.
LI Ning, CHENG Guodong, XIE Dingyi. Geomechanics development in civil construction in Western China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 268-272.
- [3] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272.
CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272.
- [4] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4142-4146.
HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Deformation properties of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(24): 4142-4146.
- [5] 胡再强, 沈珠江, 谢定义. 结构性黄土的本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 565-569.
HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Constitutive model of structural loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 565-569.
- [6] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531-536.
SHAO Shengjun, ZHOU Feifei, LONG Jiyong. Structural properties of loess and its quantitative parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531-536.

- [7] 邵生俊,龙吉勇,杨生,等. 湿陷性黄土结构性变形特性分析[J]. 岩土力学,2006,27(10):1668-1672.
SHAO Shengjun, LONG Jiyong, YANG Sheng, et al. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10):1668-1672.
- [8] 陈存礼,张登飞,董玉柱,等. 常含水率三轴条件下非饱和和原状黄土的吸力和力学特性[J]. 岩土工程学报, 2014,36(7):1195-1202.
CHEN Cunli, ZHANG Dengfei, DONG Yuzhu, et al. Suction and mechanical behaviours of unsaturated intact loess from constant water content triaxial tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014,36(7):1195-1202.
- [9] FANG Jinjin, FENG Yixin. The Characteristics of suction, yield and strength for the unsaturated intact loess based on true tri-axial tests [J]. Journal of engineering research, 2019, 7(3):33-47.
- [10] FANG Jinjin, FENG Yixin, LI Zhen. Compression and shear strength characteristics of unsaturated intact loess in true triaxial tests. Geotechnical testing journal, 2020, 43(6):1436-1462.
- [11] KATUWAL S, NORGAAARD T, MOLDRUP P, et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography [J]. Geoderma, 2015, 237/238:9-20.
- [12] LI T C, SHAO M A, JIA Y H. Application of X-ray tomography to quantify macropore characteristics of loess soil under two perennial plants [J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(3):266-275.
- [13] 朱元青,陈正汉. 原状 Q_3 黄土在加载和湿陷过程中细观结构动态演化的 CT 三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8):1219-1228.
ZHU Yuanqing, CHEN Zhenghan. Experimental study on dynamic evolution of meso-structure of intact Q_3 loess during loading and collapse using CT and triaxial apparatus [J]. Chinese Journal of civil Engineering, 2009, 31(8):1219-1228.
- [14] 李加贵,陈正汉,黄雪峰. 原状 Q_3 黄土湿陷特性的 CT 三轴试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6):1288-1296.
LI Jiagui, CHEN Zhenghan, HUANG Xuefeng. CT-triaxial test for collapsibility of undisturbed Q_3 loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6):1288-1296.
- [15] 姚志华,陈正汉,李加贵,等. 基于 CT 技术的原状黄土细观结构动态演化特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13):134-142.
YAO Zhihua, CHEN Zhenghan, LI Jiagui, et al. Meso-structure dynamic evolution characteristic of undisturbed loess based on CT technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13):134-142.
- [16] HAMAMDSHEV K B. Investigation of Pseudo-overconsolidation of soils [C]//Proc 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm: Sweden ICSMFE, 1981.
- [17] 胡再强,沈珠江,谢定义. 非饱和黄土的结构性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6):775-779.
HU Zaiqiang, SHEN Zhujiang, XIE Dingyi. Research on structural behavior of unsaturated loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(6):775-779.
- [18] 高国瑞. 黄土湿陷变形的结构理论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(4):1-10.
GAO Guorui. A structure theory for collapsing deformation of loess soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(4):1-10.
- [19] THU T M, RAHARDJO H, LEONG E C. Critical state behaviour of a compacted silt specimen [J]. Soils and Foundations, 2007, 47(4):749-755.
- [20] 孙银磊,汤连生,刘洁. 非饱和土微观结构与粒间吸力的研究进展[J]. 岩土力学, 2020, 41(4):1095-1122.
SUN Yinlei, TANG Liansheng, LIU Jie. Advances in research on microstructure and intergranular suction of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4):1095-1122.

(编辑 吴海西 沈 波)