

DOI: 10.11779/CJGE2021S1005

黄土强度及结构的各向异性研究

王丽琴^{1,2}, 赵 聪^{3,2}, 胡向阳⁴, 李 仑², 王 正², 李凯宇²

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利国家重点实验室,陕西 西安 710048;2. 西安理工大学 土木建筑工程学院,陕西 西安 710048;

3. 中国铁塔股份有限公司许昌市分公司,河南 许昌 461000;4. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710065)

摘要:原状黄土是一种具有各向异性的结构性土,其各向异性对受力状态较为复杂的边坡和隧道及地下结构等工程的稳定性影响较大。为研究黄土强度与结构的各向异性,对不同取土角度($0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$)不同含水率的原状、重塑黄土试样进行了无侧限抗压强度试验,获得了相应试样的无侧限抗压强度,并计算得到其初始结构性指标。分析黄土的无侧限抗压强度、结构性指标与取土角度、含水率的关系,结果表明:在试验的取样角度为 90° 时,黄土的强度与结构性最强; 30° 时,黄土的强度与结构性最弱;含水率越低,强度与结构性越强,随着含水率的增大,原状黄土的强度与结构性的各向异性逐渐减弱,饱和时最低。

关键词:黄土;各向异性;结构性;无侧限抗压强度;初始结构性参数

中图分类号:TU43 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-4548(2021)S1-0025-05

作者简介:王丽琴(1976—),女,副教授,博士,主要从事岩土工程等方面的教学与研究工作。E-mail: wanglq@xaut.edu.cn。

Strength and structural anisotropy of loess

WANG Li-qin^{1,2}, ZHAO Cong^{3,2}, HU Xiang-yang⁴, LI Lun², WANG Zheng², LI Kai-yu²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;3. China Tower Corp. Xuchang Branch, Xuchang 461000, China;4. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710048, China)

Abstract: Undisturbed loess is the structural soil with anisotropy, and its anisotropy has great influences on the stability of slopes, tunnels and underground structures with complex stress state. To study the strength and structural anisotropy of loess, the unconfined compressive strength tests are carried out on the undisturbed and remolded loess samples with different sampling angles ($0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ and 90°) and different water contents, and the unconfined compressive strength of the corresponding specimens are obtained. The initial structural parameters are calculated. The relationship among the unconfined compressive strength, structural index, soil sampling angle and water content of loess is analyzed. It is found that the strength and structure of loess are the strongest when the sampling angle is 90° and the weakest when the sampling angle is 30° in the tests. The lower the water content, the stronger the strength and structure. With the increase of the water content, the strength and structural anisotropy of undisturbed loess decrease gradually and are the lowest at saturation.

Key words: loess; anisotropy; structure; unconfined compressive strength; initial structural parameter

0 引言

随着“西部大开发”战略的实施及“一带一路”倡议的推动,西北黄土地区将不断地快速发展^[1],进行大量的工程建设,需要对工程建设中涉及的黄土进行深入的研究。黄土的成因^[1]、基本物理力学性质^[2,3]、微结构特征^[4-5]和结构性^[6]等均作了较为深入的研究,但大多数试验研究中都是针对垂直层面取样的试样。对于主要受竖向荷载作用的黄土地基基础工程及类似工程来说,取垂直层面试样进行研究是合理的;而对于受力状态较为复杂的边坡和隧道及地下结构等主应力方向未必水平的工程^[7]来说,有必要研究黄土力学性质的各向异性^[8]。

因此学者们对黄土的各向异性产生了浓厚的兴趣。

采取竖直向与水平向试样进行黄土各向异性研究的结论并非完全一致。有结果表明原状黄土变形模量竖直向大于水平向^[7],抗剪强度竖直向明显高于水平向^[9-11];有结果表明水平向黏聚力大于竖直向黏聚力,内摩擦角变化不大^[12]。不同层位的黄土结构参数与其抗剪强度表现出不同的各向异性特征^[13]。有些学者增加了取样角度,有结果表明:竖直向剪切面的抗剪

基金项目:西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室项目(QNZX-2019-07);陕西省教育厅科研计划项目(17JS089)

收稿日期:2020-12-15

强度 > 水平向的剪切面抗剪强度 > 45° 方向剪切面抗剪强度^[14]; 有研究认为偏差应力在竖直方向最大, 在与竖直面呈 45° 或 90° 方向时最小^[15]; 也有研究结果表明黄土的无侧限抗压强度随试样的试验平面由水平面向竖直面变化而降低^[16]。以上研究表明, 不同土体的各向异性存在差异。

黄土力学性质的各向异性特点是其结构性的表现方式^[7]。为研究黄土强度的各向异性规律, 分析不同土体各向异性差异的原因, 本文通过对与沉积面呈不同角度不同含水率的黄土试样进行无侧限抗压强度试验, 得出原状、重塑黄土的无侧限抗压强度, 计算不同角度不同含水率试样的初始结构性参数。通过对比分析其强度与结构性指标与取样角度的关系, 得出了黄土强度及结构性的各向异性规律, 并分析了其原因。

1 试验方案

1.1 试验用土

本试验所用土样取自甘肃省兰州市兰州大学榆中校区附近某直立边坡, 去除表层土, 采用人工掏槽法取样, 经室内试验得物性指标如表 1 所示。

表 1 黄土试样的物性指标

Table 1 Physical properties of loess

干密度 /(g·cm ⁻³)	天然含 水率/%	土粒相对 质量密度	塑限 /%	液限 /%	塑性 指数
1.250	2.0	2.70	20.0	28.0	8.0

1.2 试验方案

本试验分别制作不同含水率(2%, 5%, 10%, 15%, 18%, 20%, 25%, 28%, 饱和)与沉积面(压实面)成不同角度($\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$, 如图 1 所示)的原状、重塑黄土共 85 个试样, 进行无侧限抗压强度试验, 试验采用南京自动化仪器厂生产的常规应变控制式三轴剪力仪, 控制轴向变形速率为 0.368 mm/min。试验采用圆柱形试样, 其直径为 39.1 mm, 高为 80 mm。

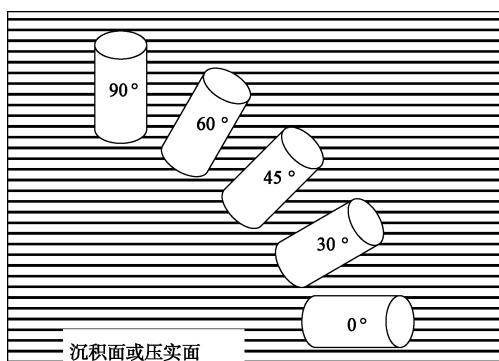


图 1 不同角度取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling from different angles

2 黄土的强度各向异性分析

2.1 原状黄土的试验结果与分析

根据预定方案进行试验, 得到不同含水率不同取样角度原状黄土的应力-应变曲线, 见图 2, 其中 q 表示轴向应力(kPa), ε 表示轴向应变(%)。

从图 2(a)可以看出: 当含水率 $w = 2\%$ 时, 取样方向与沉积面成 90° 时, 原状黄土试样的无侧限抗压强度 q_{u0} 最大; 取样方向与沉积面成 0° 时原状黄土试样的无侧限抗压强度次之; 取样方向与沉积面呈 $60^\circ, 45^\circ$ 时依次减小, 最小的为取样方向与沉积面呈 30° 时的无侧限抗压强度。图 2(b)~(h)也表现出相同的规律。因此, 可以得出: 含水率相同时, 取样方向与沉积面夹角不同时, 试样强度不同, 表现出各向异性, 且具有相同的规律, 即 $(q_{u0})_{90^\circ} > (q_{u0})_{0^\circ} > (q_{u0})_{60^\circ} > (q_{u0})_{45^\circ} > (q_{u0})_{30^\circ}$ 。从图 2 还可以看出: 随着含水率的增加, 不同角度所取试样的无侧限抗压强度之间的差值越来越小, 当试样达到饱和含水率时, 不同取样方向试样的应力-应变曲线差异极小, 说明随着含水率的增加原状黄土强度的各向异性在逐渐减弱。

根据库仑强度理论, 破裂面与最大主应力面(水平方向)呈 $45^\circ + \varphi/2$, φ 为试样的内摩擦角。因此可得出不同取样角度试样的破裂面与沉积面的夹角 α , 如图 3 所示。

从图 3 可以看出: 当取样角度 $\theta = 90^\circ$ 时, 破裂面与沉积面之间的夹角 $\alpha = 45^\circ + \varphi/2$, 最大; $\theta = 30^\circ$ 时, $\alpha = 15^\circ - \varphi/2$, 最小。兰州黄土的内摩擦角 φ 一般在 30° 左右^[17], 因此, $45^\circ + \varphi/2 > 45^\circ - \varphi/2 > 15^\circ + \varphi/2 > \varphi/2 > 15^\circ - \varphi/2$, 即破裂面与沉积面之间的夹角 α 从大到小排列所对应的取样角度分别为 $90^\circ, 0^\circ, 60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ 。这个规律与前述不同取样角度试样的强度大小规律是一致的, 可见强度的大小与破裂面和沉积面之间夹角 α 的大小密切相关。 α 的计算式如下:

$$\alpha = \left| 45^\circ + \frac{\varphi}{2} - (90^\circ - \theta) \right| = \left| \frac{\varphi}{2} + \theta - 45^\circ \right|. \quad (1)$$

试样破裂面与沉积面之间的夹角越大, 无侧限抗压强度 q_u 越大; 反之越小。当 $\alpha = |\varphi/2 + \theta - 45^\circ| = 0$ 时, 即取样角度 $\theta = 45^\circ - \varphi/2$ 时, 强度最小。在试验的几个取样角度中, $\theta = 30^\circ$ 所取试样的破裂面方向最接近水平沉积的层面, 而层面是天然的软弱面, 故此时试样的无侧限抗压强度最小, 证明了前述规律。

2.2 重塑黄土的试验结果与分析

根据预定方案进行试验, 使取样方向与压实面呈不同角度, 得到不同含水率不同取样角度重塑黄土的应力-应变曲线见图 4。

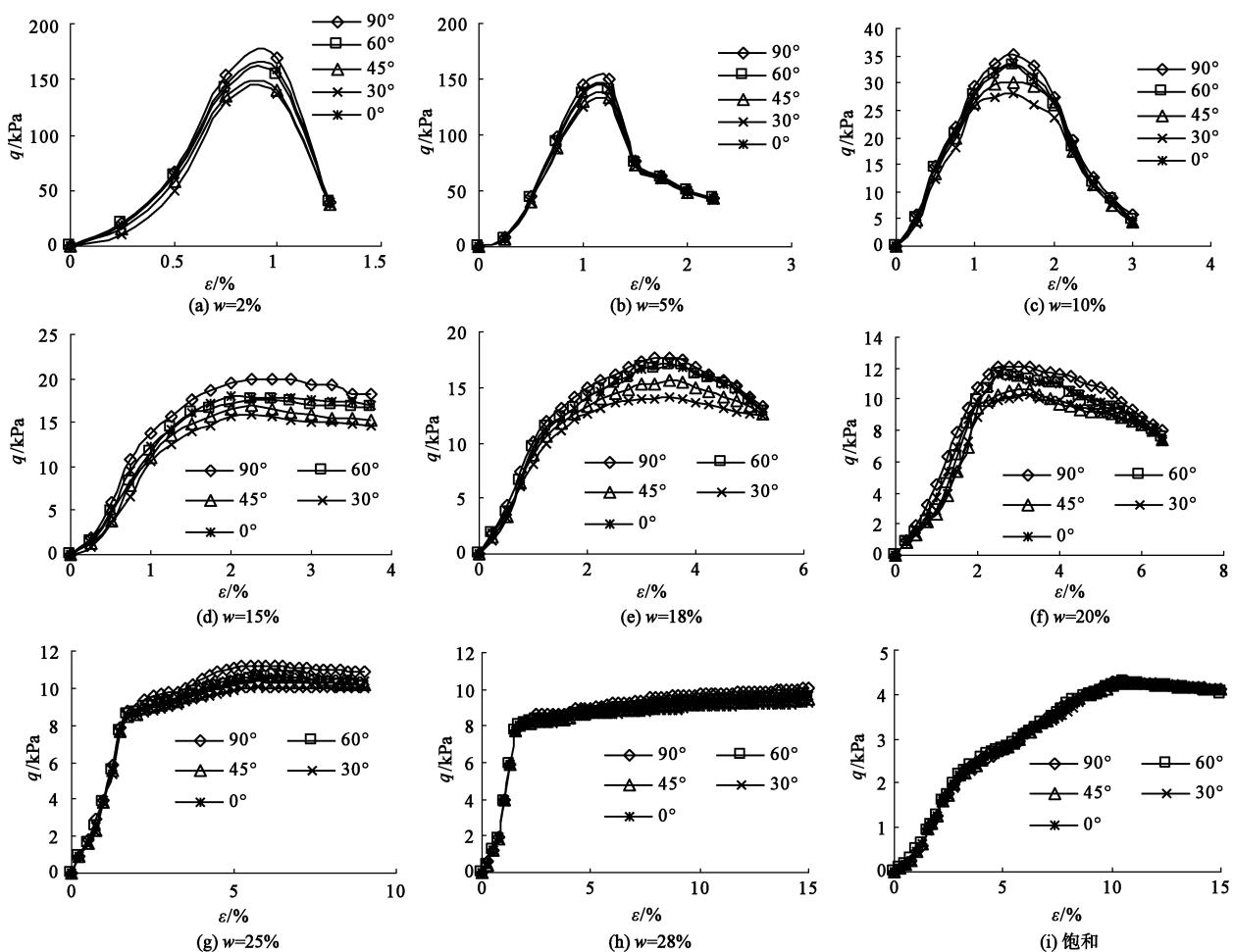


图 2 原状黄土应力—应变关系曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of undisturbed loess

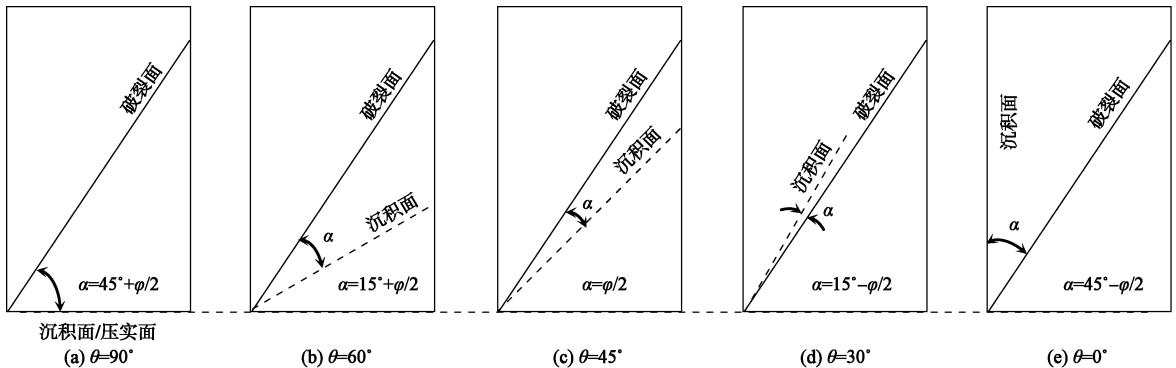


图 3 破裂面与沉积面/压实面的关系

Fig. 3 Relationship between failure surface and sedimentary surface or compacted surface

从图 4 可以看出: 重塑黄土与原状黄土具有相似的强度各向异性, 即 $(q_{ur})_{90^\circ} > (q_{ur})_{0^\circ} > (q_{ur})_{60^\circ} > (q_{ur})_{45^\circ} > (q_{ur})_{30^\circ}$ 。其原因在于重塑黄土制样的分层压实过程中形成的压实层面类似于原状黄土的沉积面, 因此, 不同角度取样的重塑黄土强度与原状黄土强度具有相似的规律, 表现为重塑黄土的剪切破裂面与压实面之间的夹角越大时, 无侧限抗压强度越大, 反之越小。重塑黄土不同角度取样后, 试验所得的破裂面与压实面之间的关系见图 3, 同样表明 $\theta = 30^\circ$ 时, 压实

面与破裂面最接近, 相应试样的无侧限抗压强度最小。同样地, 重塑黄土的各向异性也是随着含水率的增加而逐渐减弱。

3 黄土结构性的各向异性分析

谢定义、齐吉琳等总结了已有黄土结构性的研究成果, 基于对原状黄土、重塑黄土、饱和原状黄土试样的压缩试验, 从土力学的角度, 提出了定量描述黄土结构性的指标——综合结构势^[5]。之后, 学者们在综合

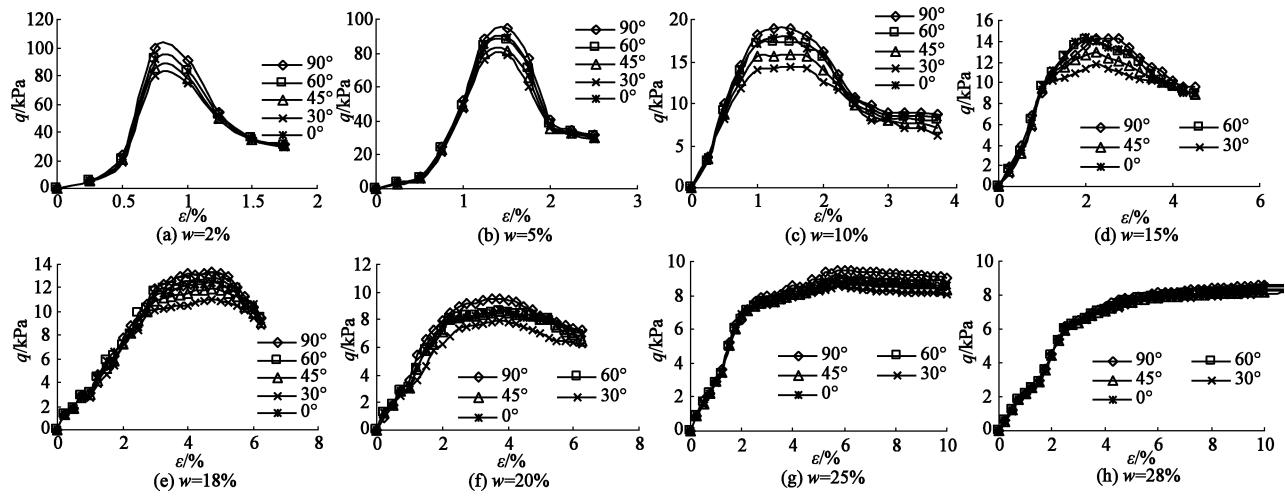


图4 重塑黄土应力-应变关系曲线

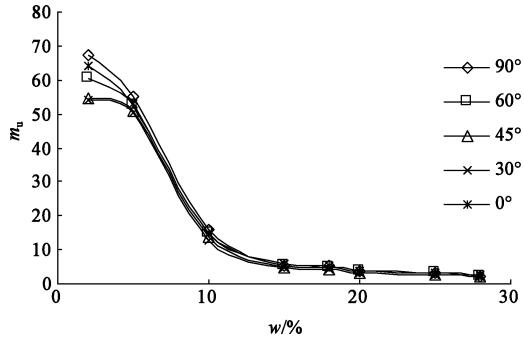
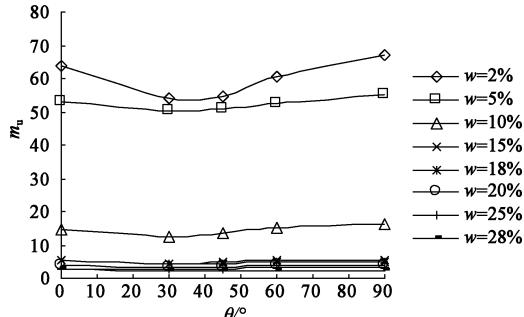
Fig. 4 Stress-strain curves of remolded loess

结构势的基础上提出了多种结构性参数,其中构度指标 m_u 可反映土体的初始结构性^[18],其表达式为

$$m_u = \frac{q_{uo}}{q_{ur}} \cdot \frac{q_{uo}}{q_{us}} \quad (2)$$

式中, q_{uo} 、 q_{ur} 、 q_{us} 分别为原状土、湿密状态相同的重塑土、饱和原状土的无侧限抗压强度。

根据试验所得的原状、重塑黄土的无侧限抗压强度,由式(2)计算得相应黄土的构度指标 m_u 。图5给出了不同取样角度黄土的构度指标 m_u 与含水率的关系,图6给出了构度指标 m_u 与取样角度的关系。

图5 构度指标 m_u 与含水率的关系Fig. 5 Relationship between structural index m_u and water content图6 构度指标 m_u 与取样角度的关系Fig. 6 Relationship between structural index m_u and sampling angle

从图5可以得出:构度指标 m_u 随含水率的增大而减小,且在含水率 $w < 15\%$ 时减小的幅度较大,含水率

$w > 15\%$ 时减小的幅度较小。在含水率相同时,与无侧限抗压强度类似,构度指标 m_u 也表现出在 $\theta = 30^\circ$ 时最小的规律,如图6所示。在含水率相同时,不同取样角度黄土的构度指标不同,说明黄土的结构性也具有各向异性。不过,随着含水率的增加,取样角度对黄土构度指标的影响越来越小,即黄土结构性的各向异性逐渐减弱,且含水率较小时各向异性减弱得较快;随着含水率的增加,构度指标 m_u 越来越接近,说明随着含水率的增加,黄土原始结构逐渐破坏,黄土结构的各向异性在向着各向同性转化。

4 结 论

本文通过对原状、重塑黄土进行无侧限抗压强度试验,分析了其强度及结构性与取样角度的关系,主要得出以下结论:

(1) 当含水率较低时原状黄土、重塑黄土的无侧限抗压强度各向异性较明显,构度指标 m_u 的各向异性也较明显。

(2) 当含水率一定时,破裂面与沉积面所成角度越大,原状、重塑黄土的无侧限抗压强度越大,结构性参数越大。取样角度 $\theta = 45^\circ - \varphi/2$ 时,强度最小。

(3) 随着含水率的增大,原状黄土、重塑黄土的无侧限抗压强度逐渐减小,各向异性逐渐减弱。

不同方向黄土的强度与结构参数存在明显的差异,即黄土具有明显的各向异性,黄土的这一性质在边坡、隧洞及地下构筑物中显得尤为重要,因此此类工程施工时应有效防止地下水或地表水对黄土强度及结构性的影响,同时采用适当的断面形式,充分利用不同方向土体自身的强度与结构性,保证围岩的稳定性。

参 考 文 献:

- [1]关文章. 湿陷性黄土工程性能新篇[M]. 西安:西安交通大学

- 学出版社, 1992. (GUAN Wen-zhang. New Development on Engineering Features of Collapsible Loess [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992. (in Chinese))
- [2] 王丽琴, 邵生俊. 黄土构度与物理指标之间的定量关系 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (S2): 4380 – 4386. (WANG Li-qin, SHAO sheng-jun. Quantitative relationship between structural and physical indexes of loess [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S2): 4380 – 4386. (in Chinese))
- [3] 王丽琴, 邵生俊, 赵 聪, 等. 黄土初始结构性对其压缩屈服的影响 [J]. 岩土力学, 2018, 39 (9): 3223 – 3228, 3236. (WANG Li-qin, SHAO Sheng-jun, ZHAO Cong, et al. Effect of initial structural property of loess on its compressive yield [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (9): 3223 – 3228, 3236. (in Chinese))
- [4] 谭罗荣, 张梅英. 一种特殊土微观结构的研究 [J]. 岩土工程学报, 1982, 4 (2): 432 – 437. (TAN Luo-rong, ZHANG Mei-ying. Study on the microstructure of a special soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1982, 4 (2): 432 – 437. (in Chinese))
- [5] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21 (6): 651 – 656. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin. Soil structure characteristics and new approach in research on its quantitative parameter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21 (6): 651 – 656. (in Chinese))
- [6] 谢定义, 齐吉琳, 朱元林. 土的结构性参数及其与变形强度的关系 [J]. 水利学报, 1999, 30 (10): 1 – 6. (XIE Ding-yi, QI Ji-lin, ZHU Yuan-lin. Soil structure parameter and its relation to deformation and strength [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30 (10): 1 – 6. (in Chinese))
- [7] 梁庆国, 赵 磊, 安亚芳, 等. 兰州 Q₄ 黄土各向异性的初步研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (1): 17 – 23. (LIANG Qing-guo, ZHAO Lei, AN Ya-fang, et al. Preliminary study of anisotropy of Q₄ loess in Lanzhou [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (1): 17 – 23. (in Chinese))
- [8] ARTHUR J R F, MENZIES B K. Inherent anisotropy in a sand [J]. Géotechnique, 1972, 22 (1): 115 – 128.
- [9] 徐善常, 梁庆国, 李帅帅, 等. 甘肃定西原状 Q₃ 黄土各向异性试验研究 [J]. 地质力学学报, 2015, 21 (3): 378 – 385. (XU Shan-chang, LIANG Qing-guo, LI Shuai-shuai, et al. Experimental study on anisotropic characteristics of undisturbed Q₃ loess from Dingxi, Gansu [J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21 (3): 378 – 385. (in Chinese))
- [10] 邵生俊, 许 萍, 王 强, 等. 黄土各向异性强度特性的真三轴试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (9): 1614 – 1623. (SHAO Sheng-jun, XU Ping, WANG Qiang, et al. True triaxial tests on anisotropic strength characteristics of loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (9): 1614 – 1623. (in Chinese))
- [11] 鲁 洁, 杨朝旭, 王铁行. 压实黄土强度和变形各向异性的试验研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48 (5): 676 – 680. (LU jie, YANG Chao-xu, WANG Tie-hang. Experimental research on strength and deformation anisotropy of the compacted loess [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2016, 48 (5): 676 – 680. (in Chinese))
- [12] 叶朝良, 朱永全, 刘尧军, 等. 原状黄土各向异性及卸载变形特征试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2014, 35 (6): 1 – 6. (YE Chao-liang, ZHU Yong-quan, LIU Yao-jun, et al. Experimental study on the anisotropy and unloading deformation characteristics of intact loess [J]. China Railway Science, 2014, 35 (6): 1 – 6. (in Chinese))
- [13] 张奇莹, 徐盼盼, 钱 会. 泾阳原状黄土-古土壤序列抗剪强度各向异性及其机制研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (11): 2365 – 2376. (ZHANG Qi-ying, XU Pan-pan, QIAN Hui. Study on shear strength anisotropy of undisturbed loess-paleosol sequence in Jingyang County [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (11): 2365 – 2376. (in Chinese))
- [14] 茚 地, 武小鹏, 周有禄, 等. 原状黄土抗剪强度的各向异性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2019, 32 (1): 6 – 9. (CHEN Di, WU Xiao-peng, ZHOU You-lu, et al. Anisotropy of shear strength of undisturbed loess [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2019, 32 (1): 6 – 9. (in Chinese))
- [15] 罗传庆, 张吾渝, 李 辉, 等. 西宁地区原状黄土强度各向异性试验研究 [J]. 工程地质学报, 2016, 24 (6): 1327 – 1332. (LUO Chan-qing, ZHANG Wu-yu, LI Hui, et al. Experimental study on the anisotropic strength of intact loess in Xining [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24 (6): 1327 – 1332. (in Chinese))
- [16] 刘奉银, 吉嶺充俊, 车爱兰, 等. Q₃ 黄土力学各向异性特性的初步试验研究 [C] // 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集. 西安, 2002: 142 – 144. (LIU Feng-yin, YOSHIMINE M, CHE Ai-lan, et al. Test investigation on mechanical anisotropy of Q₃ loess [C]. The 7th Conference of the Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering. Xi'an, 2002: 142 – 144. (in Chinese))
- [17] 刘祖典. 黄土力学与工程 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. (LIU Zu-dian. Loess Mechanics and Engineering [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [18] 邵生俊, 郑 文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验确定方法 [J]. 岩土力学, 2010, 31 (1): 15 – 19, 38. (SHAO Sheng-jun, ZHENG Wen, WANG Zheng-hong, et al. Structural index of loess and its testing method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31 (1): 15 – 19, 38. (in Chinese))