

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2020.04.002

锚杆-土体界面剪切特性影响因素试验研究

杨庆光, 梁凌川, 柳雄, 刘杰, 邓方根

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 采用自行设计的室内锚杆-土体界面剪切试验装置模拟锚杆抗拔过程, 共开展了72组剪切试验, 深入研究了有无预压、土体含水率和压实度3个因素对锚杆-土体界面剪切特性影响。试验结果表明: 锚杆-土体界面剪应力随剪切位移的提高而提高, 但是当剪切位移达到一定值后, 锚杆-土体界面剪应力逐渐弱化或被破坏, 并出现锚杆-土体界面剪切位移增加而剪应力降低的现象; 土样含水率和压实度对极限剪应力的发挥有十分重要的影响, 含水率等于或略大于最佳含水率的土体有利于界面极限剪应力的提高, 土体压实度越大, 极限剪应力也越高; 对于有预压情况, 剪切试验中当竖向压力低于预压力时, 预压力对于锚杆-土体界面极限剪应力有明显的增强效应, 但随着土体上覆压力增大, 预压力的增幅效果逐渐减弱, 甚至可能出现不利于极限剪应力发挥的现象。

关键词: 锚杆-土体界面; 剪切特性; 影响因素; 含水率

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2020)04-0010-06

引文格式: 杨庆光, 梁凌川, 柳雄, 等. 锚杆-土体界面剪切特性影响因素试验研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(4): 10-15.

An Experimental Study on the Influencing Factors of Shear Characteristics of Anchor-Soil Interface

YANG Qingguang, LIANG Lingchuan, LIU Xiong, LIU Jie, DENG Fanggen

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: 72 sets of shear tests have been carried out by using a self-designed indoor anchor-soil interface shear test device to simulate the pull-out process, followed by an in-depth study on the effects of three factors on the shear characteristics of the anchor-soil interface, including the presence or absence of preloading, the moisture content of the soil and the degree of compaction. The results show that the shear stress of the anchor-soil interface increases positively with the shear displacement, while with the shear displacement reaching a certain value, the anchor-soil interface gradually weakens or destroys, meanwhile the shear stress decreases with the increase of shear displacement of anchor-soil interface. The water content and compactness of soil sample have a very important influence on the development of ultimate shear stress. The soil with water content equal to or slightly greater than the optimal water content is conducive to the improvement of ultimate shear stress; the greater the compactness of soil, the higher the ultimate shear stress. Under the preload condition, when the vertical pressure is lower than the preload in the shear test, the preload has a significant enhancement effect on the ultimate shear stress of the anchor-soil interface, while with the increase of the overburden pressure, the increase effect of the preload gradually decreases, with even the disappearance of the

收稿日期: 2019-10-02

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ6080), 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX20190856)

作者简介: 杨庆光(1979-), 男, 江西黎川人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要从事桩土相互作用理论方面的教学与研究, E-mail: yqg1210@hut.edu.cn

phenomenon that is not conducive to the exertion of the ultimate shear stress.

Keywords: anchor-soil interface; shear characteristics; influencing factor; water content

1 研究背景

锚杆具有制作成本廉价、施工周期灵活、对环境污染小等一系列特点,因而在土木工程及相关领域被广泛运用^[1]。但是,受土体压实度和含水率、土体表面荷载、锚杆长度、材料和表面粗糙程度等复杂因素的影响,目前学术界对于土层锚杆的研究没有统一的结论。

徐成良^[2]以直剪试验为原型,采用颗粒流模拟程序 PFC (particle flow code) 建立粗粒土与混凝土接触面的直剪模型,并从宏观和微观两个方面考虑了粗糙度和高度因素对接触面的影响。郝建斌等^[3]通过室内模拟土层锚杆在现场环境下的支护系统,发现锚杆的轴力极限值随着外部荷载的增加先增大后减小,在地面荷载较小时,支护作用主要由上层锚杆承担,当荷载增加到一定程度后,由中间和底层锚杆起主要的支护作用。段建等^[4]依据界面黏滑本构模型假定和剪切位移法基本原理,建立了锚杆锚固力学微分方程并对其进行解析,发现界面抗剪强度与残余强度的大小直接影响拉拔极限破坏特征;何思明等^[5]通过弹性理论轴对称问题的理论方法,发现在平均轴向应变的假设下,人为地增加锚杆长度,并不能有效增大锚杆的抗拔强度;郭锐剑等^[6]基于界面黏结-软化-滑动力学本构模型假定,分析了锚杆剪应力分布类型、拉拔极限荷载大小及破坏特征之间的关系,并给出相关的判别标准。王祥秋等^[7]在不同介质下对扩孔锚的承载性状进行了数值分析,研究表明,扩孔锚的横截面积与锚固介质的强度是承载力的主要影响因素。马安锋等^[8]利用三维数值模拟以及室内模型试验结合的方法对全长粘结型锚杆的应力分布情况进行了分析,研究表明锚杆的应力以及位置分布与所受的加载有关。贺炜等^[9]通过制备混凝土装置,以孔隙比为指标,在压力板仪中制备了非饱和土与混凝土剪切试样,最终发现土与混凝土的极限剪切力、极限剪切位移和土体含水量密切相关,并得出界面发生破坏时,极限剪切位移范围为 1~5 mm;杨步云等^[10]通过对节理岩体中的锚杆进行研究,发现增大围岩抗压强度及锚杆直径,会导致锚杆轴力随剪力的增长速率降低;陈昌富等^[11]通过研发一种新型的拉拔试验仪器,探究锚固体养护周期与锚杆拉拔速率对极限剪应力的影响,发现锚杆以 0.1~2.5 mm/min

的速度拉拔时,对极限剪应力的影响较小。为了深入了解坡积土中土体含水率及干密度对锚-土体界面剪切特性的影响,陈昌富等^[12]在前期研究的基础上,通过自行研制锚-土体界面摩擦性能测试方法和装置,得出极限剪应力随含水量增加而减小,并且含水量对于干密度较大土体中锚杆的锚固力降低作用大于干密度小的土体。

此外,由于实际工程中施工环境与地理情况十分复杂,而土体在现有应力状态下的固结是一个漫长的过程,土体表面在施工过程中容易产生预压应力,这对于土体与结构的剪切特性会有一定的影响。李晶晶等^[13]发现在对粉质黏土施加预加荷载以后,粉质黏土的强度明显提高;李剑等^[14]通过在不同应力历史情况下,对重塑红黏土进行动三轴试验,给出了重塑红黏土动强度及最大动弹模与应力历史关系的经验公式。

综上所述,由于锚杆-土体界面承载特性的复杂性,导致其影响因素过多,但是专门针对土体含水率、压实度、上覆压力对锚杆承载特性影响方面的研究较少。因此,本文基于自制锚杆-土体界面剪切装置,通过室内模型试验,针对有无预压、土体含水率和压实度 3 个因素,对锚杆-土体界面抗剪强度的影响规律展开研究。

2 试验装置与试样制备

2.1 试验装置

本文采用自制的锚杆-土体界面剪切装置,模拟锚杆-土体界面抗拔试验,试验装置如图 1 所示。考虑有无预压力作用两种情况下,根据正交试验方法,分别就土体含水率和压实度对锚杆-土体界面剪切特性影响开展 72 组剪切试验研究。



图 1 剪切试验装置

Fig.1 Test device of shear tests

2.2 锚杆制作

试验所用锚杆模型采用水泥砂浆和钢筋预制, 钢筋直径为 8 mm, 水泥采用 PO42.5 普通硅酸盐水泥, 石灰比为 0.43:1。锚杆直径为 30 mm, 长度为 210 mm。

2.3 土样制备与填筑

试验土料为株洲市某基坑中常见的红黏土, 经试验测得土体液限 w_L 为 39.5%, 塑限 w_p 为 20.8%。由直剪试验测得土样黏聚力 c 为 30.97 kPa, 内摩擦角 φ 为 29.15°。通过室内击实试验, 得出土的最佳含水率为 12%, 最大干密度为 2.05 g/cm³。土样填筑采用如图 2 所示自制击实仪器完成。击实桶为壁厚 5 mm、高 190 mm、内径 200 mm 的铁桶。在桶底中心开了一个直径为 35 mm 的圆孔, 以保证锚杆在土体下部凸出 20 mm。为了保证击实土体过程中锚杆不接触击实桶的底部圆孔, 特别制作了一个钢制圆柱, 并在圆柱中心开了一个直径为 32 mm、深度为 20 mm 的圆孔, 且用 3 块小型方形钢块将圆柱固定, 然后将击实桶固定于圆柱上方, 使击实桶底部的圆孔与下部钢制圆柱圆孔圆心重合, 最后将锚杆嵌入钢制圆柱中心的圆孔, 因圆孔直径为 32 mm, 略大于锚杆, 故衔接良好。

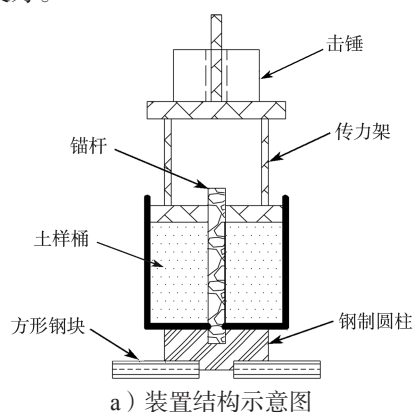


图 2 土样击实装置

Fig. 2 Compaction device of soil samples

击实过程中土体分 3 次等质量加入, 每加入一层后, 依次放置传力架与击锤, 让击锤沿着把手自由

下落, 给予瞬间的冲击力并通过传力架将土体击实, 通过控制每一层土体的质量与所需击实到的高度来满足每一组试验所要求的压实度。在击实过程中, 由于锚杆与土样桶均被固定于钢制圆柱上, 所以击实完成后, 锚杆不会触碰到桶底圆孔边缘。

3 试验方法与步骤

在无预压的试验中, 将击实制作好的锚杆-土体装置放入剪切装置中, 并利用加载支架与加载盘通过传力钢珠对土体表面进行上覆加压。试验开始后, 通过转动升降盘, 使升降台缓慢上升并推动应力钢环, 使之产生形变, 从而向上推动锚杆, 钢环中固定的百分表记录了钢环的变形量, 从而可以获得推力大小。当锚杆向上发生位移时, 应力钢环会产生相应的形变恢复, 从而减小推力, 由此可测出剪应力达到峰值后下降的数据。在锚杆上升过程中, 在支座单元上部, 通过磁性表座安装另一个百分表, 同步记录锚杆的位移。

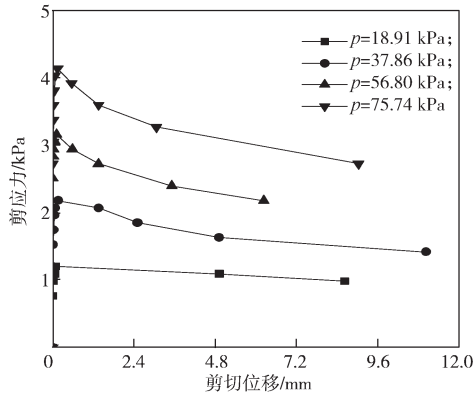
为了更好地研究剪切试验的影响因素, 本试验针对有无预压情况, 共配置了 8%、12% 和 16% 3 个含水率试验土样。针对每个含水率, 采用土体固体质量含量控制法, 分别制作了压实度分别为 60%、70%、80% 的剪切试样, 并分别在竖向压力为 18.91、37.86、50.80、75.74 kPa 情况下, 进行剪切试验, 测试锚杆-土体界面剪切力。对于有预压的情况, 装样后, 需要采用 45.83 kPa 压力, 对土样预压 1 h, 卸载预压荷载, 并分别采用剪切试验时竖向压力完成剪切试验。根据正交实验方法, 本次试验有无预压情况分别为 36 组, 共计 72 组剪切试验。

4 试验结果与分析

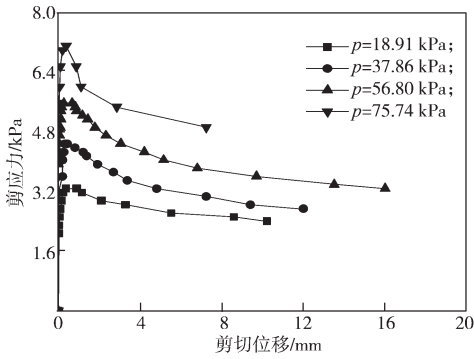
4.1 无预压试验

4.1.1 剪应力与位移的关系

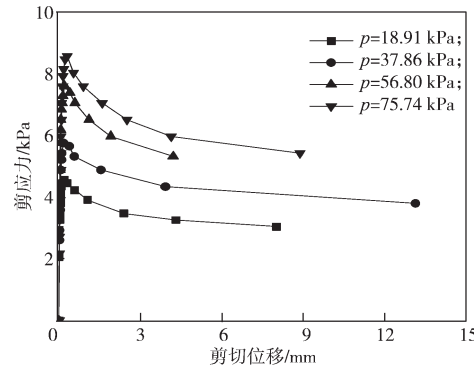
对模型试验结果进行处理, 得到锚杆-土体界面剪应力与位移 ($\tau-s$) 全过程曲线, 由于试验组数较多, 仅选取部分试验曲线结果见图 3。由图 3 所示曲线图可以看出, 剪切试验初期, 剪切变形很小, 但剪应力增长却十分迅速, 并很快达到峰值。当剪应力达到峰值后, 继续增加剪切位移, 剪应力开始下降, 并逐渐趋于稳定, 且竖向压力越大, 曲线下落速度越快。曲线结果表明, 锚杆-土体界面剪应力随剪切位移的提高而提高, 但是当剪切位移达到一定值后, 锚杆-土体界面逐渐出现弱化或破坏, 从而导致锚杆-土体界面剪切位移增加, 但剪应力反而降低。



a) $w=8.0\%$, $\lambda=60\%$



b) $w=12\%$, $\lambda=70\%$



c) $w=16\%$, $\lambda=80\%$

图 3 剪应力与位移关系曲线

Fig. 3 Shear stress and displacement curves

4.1.2 含水率与压实度对极限剪应力的影响

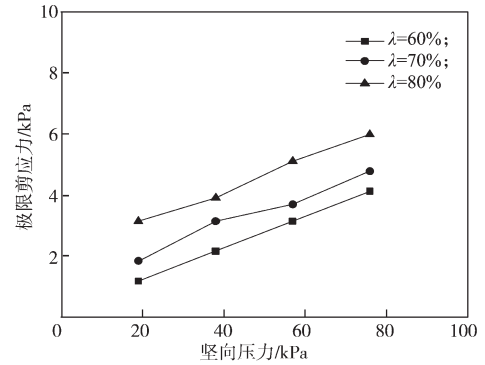
对无预压情况的 36 组剪切试验结果进行分析, 得到不同含水率 w 和不同压实度 λ 情况下, 竖向压力与极限剪应力的关系曲线, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 含水率和压实度一定的情况下, 曲线为单增曲线, 锚杆 - 土体界面极限剪应力 τ_u 均随竖向压力的增加而不断提高, 这说明竖向压力对界面极限剪应力有直接影响。

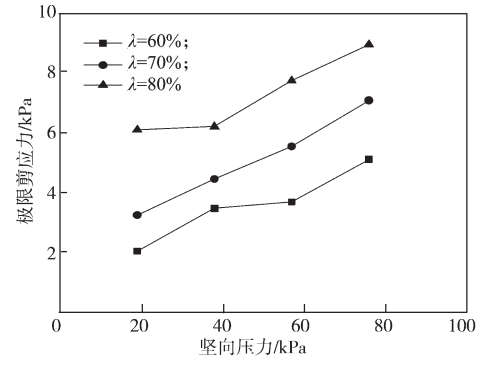
根据击实试验得出该土体最佳含水率为 12%, 对比含水率为 8% 与 16% 的曲线可得, 相同压实度和竖向压实度情况下, 土样含水率为最佳含水率时, 锚杆 - 土体界面的极限剪应力最大。同时发现, 当

含水率为 16% 时, 极限剪应力明显大于含水率为 8% 的土体, 说明土样含水率对极限剪应力的发挥有十分重要的影响, 含水率等于或略大于最佳含水率的土体有利于界面极限剪应力的提高。

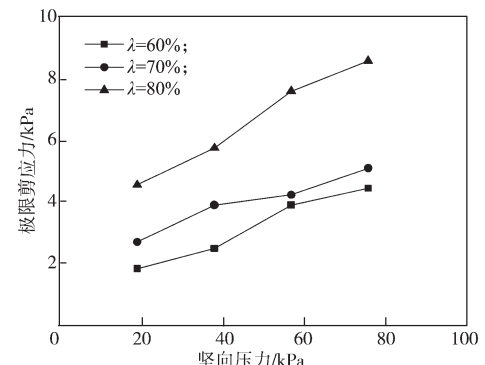
此外, 从曲线结果可以看出, 相同含水率和竖向压力作用下, 压实度为 80% 的极限剪应力曲线始终位于最上方, 因此可以得出土体压实度的大小, 对锚杆 - 土体界面极限剪应力有着直接影响, 土体压实度越大, 极限剪应力越高。



a) $w=8\%$



b) $w=12\%$



c) $w=16\%$

图 4 无预压下土样的极限剪应力 - 竖向压力曲线

Fig. 4 Ultimate shear stress-vertical pressure curves without preload

4.2 竖向预压试验

与无预压试验不同, 完成装样并进行剪切试验之前, 对土样顶部施加一定压力进行预压, 并记录由预

压引起的土样压缩量,从而确定剪切试验锚杆-土体界面接触面面积。由于本次试验主要是研究有无预压对土样极限剪应力的影响,故竖向预压力只采用了45.83 kPa,预压时间为1 h。

对完成的36组有预压试验结果进行整理,得出了锚杆-土体界面剪应力-位移($\tau-s$)全过程曲线,并确定其剪应力,从而得到极限剪应力-竖向压力曲线图,如图5所示。

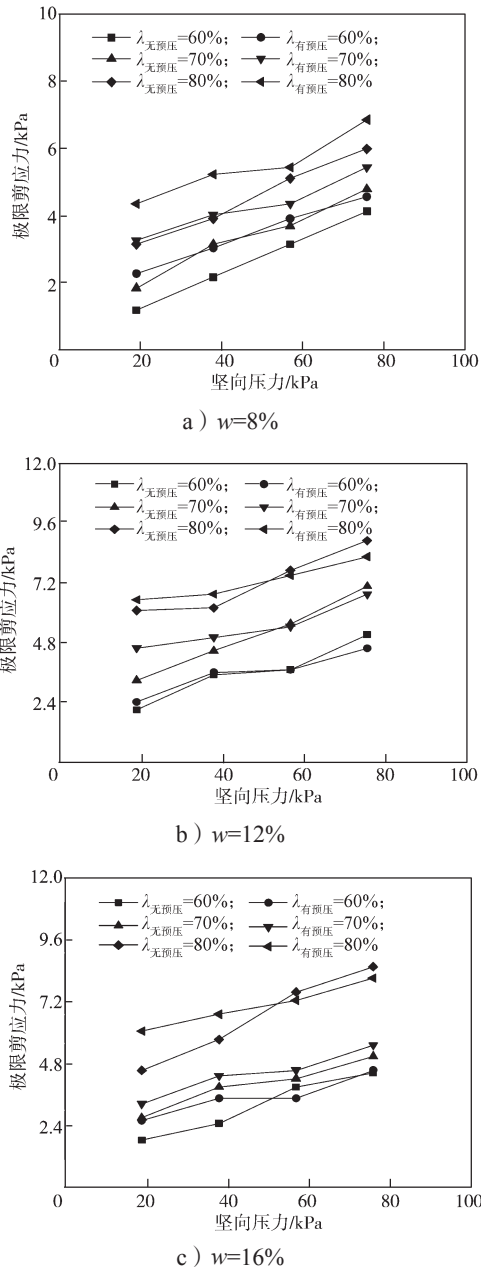


图5 极限剪应力-竖向压力曲线

Fig. 5 Ultimate shear stress-vertical pressure curves

由图5可知,当土面竖向压力低于预压力时,预压力对于锚杆-土体界面极限剪应力有明显的增强效应,但随着土体上覆压力增大,预压力的增幅效果逐渐减弱,有无预压情况的两条曲线逐渐靠拢。

此外,当土样含水率为8%时,相同压实度时,无预压曲线始终低于对应的预压曲线,充分说明了预压力对极限剪应力有明显的增强效果。当含水率为12%时,竖向压力较小时无竖向预压曲线低于有预压曲线,当压力达到一定大小后,有预压曲线反而低于无预压情况的,极限剪应力曲线出现交叉现象。当含水率为16%时,压实度为60%和80%情况下,有无预压极限剪切曲线也表现出交叉现象,但是当压实度为70%时,无预压极限剪切曲线始终低于有预压情况。

从曲线分析可知,竖向预压力对于界面极限剪应力影响比较复杂。当含水率较低时,不同压实度情况下,预压对极限剪应力影响显著。但是,当含水率提高到最优含水率或更大时,对极限剪应力有明显的增强效果主要表现在竖向压力小于预压力阶段,超过预压力反而不利于极限剪应力的发挥。

5 结论

本文通过自制的锚杆-土体界面剪切装置,考虑有无竖向预压情况下含水率和压实度对锚杆-土体界面剪切特性的影响,得到如下结论:

1) 通过试验,得到锚杆-土体界面剪应力与位移($\tau-s$)全过程曲线,并发现锚杆-土体界面剪应力随着剪切位移的提高而提高,但是当剪切位移达到一定值后,锚杆-土体界面逐渐出现弱化或破坏,并出现锚杆-土体界面剪切位移增加剪应力反而降低的现象;

2) 土样含水率和压实度对极限剪应力的发挥有十分重要的影响。含水率等于或略大于最佳含水率的土体有利于界面极限剪应力的提高,而土体压实度越大,极限剪应力越高;

3) 对于有预压情况,当剪切试验中竖向压力低于预压力时,预压力对于锚杆-土体界面极限剪应力有明显的增强效应,但随着土体上覆压力增大,预压力的增幅效果逐渐减弱,甚至可能出现不利于极限剪应力发挥的现象。

参考文献:

- [1] 杜佶峥, 苗子臻, 邱浩然. 岩土锚固理论研究现状与发展[J]. 工业技术创新, 2016, 3(4): 635-638.
DU Jizheng, MIAO Zizhen, QIU Haoran. Research Status and Development of Anchorage Theory of Rock and Soil[J]. Industrial Technology Innovation, 2016, 3(4): 635-638.

- [2] 徐成良. 土与结构接触面直剪试验颗粒流模拟分析[J]. 陕西水利, 2016(1): 140-142.
XU Chengliang. Simulation Analysis of Particle Flow in Direct Shear Test of Soil Structure Interface[J]. Shaanxi Water Resources, 2016(1): 140-142.
- [3] 郝建斌, 门玉明, 汪班桥. 地面荷载下土层锚杆工作性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 247-249.
HAO Jianbin, MEN Yuming, WANG Banqiao. Working Property of Soil Anchors Under Loads on Ground Surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 247-249.
- [4] 段建, 言志信, 郭锐剑, 等. 土层锚杆拉拔界面松动破坏分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 936-941.
DUAN Jian, YAN Zhixin, GUO Ruijian, et al. Failure Analysis of Soil Anchors Induced by Loose Interface Under Pullout Load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 936-941.
- [5] 何思明, 李新坡. 预应力锚杆作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1876-1880.
HE Siming, LI Xinpo. Study on Mechanism of Prestressed Anchor Bolt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1876-1880.
- [6] 郭锐剑, 谌文武, 段建, 等. 考虑界面软化特性的土层锚杆拉拔受力分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(10): 4003-4009.
GUO Ruijian, CHEN Wenwu, DUAN Jian, et al. Pullout Mechanical Analysis of Soil Anchor Based on Softening Behavior of Interface[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2012, 43(10): 4003-4009.
- [7] 王祥秋, 周志国, 唐梦雄, 等. 复杂地层扩体锚抗拔性能研究[J]. 公路工程, 2013, 38(1): 94-97, 102.
WANG Xiangqiu, ZHOU Zhiguo, TANG Mengxiong, et al. Study on the Bearing Behaviors of Under-Reamed Anchor in Complex Strata[J]. Highway Engineering, 2013, 38(1): 94-97, 102.
- [8] 马安锋, 程辉, 许锐, 等. 锚固体系中全长粘结型锚杆应力分布研究[J]. 路基工程, 2016(3): 93-98.
MA Anfeng, CHENG Hui, XU Rui, et al. Research on Stress Distribution of Wholly Bonded Anchor Rod in Anchor System[J]. Subgrade Engineering, 2016(3): 93-98.
- [9] 贺炜, 文为, 孙森. 非饱和土与混凝土界面摩擦特性试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2011, 8(3): 28-32.
HE Wei, WEN Wei, SUN Miao. Experimental Study of Shearing Behavior of Interface Between Unsaturated Soil and Concrete[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2011, 8(3): 28-32.
- [10] 杨步云, 肖明, 罗宁, 等. 锚杆剪切过程中的受力机理分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 127-132.
YANG Buyun, XIAO Ming, LUO Ning, et al. Research on Mechanical Characteristic of Anchor Bolt in Process of Shearing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2019, 47(3): 127-132.
- [11] 陈昌富, 梁冠亭, 汤宇, 等. 锚杆锚固体与土体界面特性室内测试新方法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6): 1115-1122.
CHEN Changfu, LIANG Guanting, TANG Yu, et al. Anchoring Solid-Soil Interface Behavior Using a Novel Laboratory Testing Technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6): 1115-1122.
- [12] 陈昌富, 赵洪波. 基于均匀设计坡积土含水量与干密度对锚-土界面性能影响试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 352-358.
CHEN Changfu, ZHAO Hongbo. Influence of Water Content and Dry Density on Performance of Anchorage Body-Soil Interface with Uniform Experimental Design[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 352-358.
- [13] 李晶晶, 孔令伟, 凌贤长. 高铁堑坡粉质黏土原位强度特性与应力历史效应[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(3): 99-105.
LI Jingjing, KONG Lingwei, LING Xianchang. In-Situ Strength Characteristics and Stress History Effect of Silty Soil on High-Speed Railway Cut Slope[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2019, 46(3): 99-105.
- [14] 李剑, 陈善雄, 姜领发, 等. 应力历史对重塑红黏土动力特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1657-1665.
LI Jian, CHEN Shanxiong, JIANG Lingfa, et al. Experimental Study on Influence of Stress History on Dynamic Properties of Remolded Red Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(9): 1657-1665.

(责任编辑: 申剑)