

引用格式: 丁鲁强, 李大勇. 加筋体与土体界面力学特性试验研究进展综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(3):59-65.

DING Luqiang, LI Dayong. Research progress of interface mechanical characteristics between reinforcement and soil[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(3):59-65.

加筋体与土体界面力学特性试验研究进展综述

丁鲁强^{1,2}, 李大勇^{1,2}

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590; 2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要:加筋土中的土工合成材料可提高土体的抗剪强度, 改善黏性土的黏聚力和渗透性, 改良黄土和膨胀土的不良工程性质。分析了直剪、拉拔及三轴试验测试加筋土筋土界面力学特性的局限性: 对直剪试验而言, 土样的剪切面限定在上下剪切盒之间, 而不是沿其最薄弱面剪切破坏; 拉拔试验试样制作过程中土中加筋体不可避免发生凹凸变形; 三轴试验在试样中分布几层加筋材料, 尺寸效应十分明显。新型全球数字系统(global digital systems, GDS)界面剪切试验仪能够克服上述3种试验方法的不足, 为研究筋土界面力学特性提供了有利工具。

关键词:加筋土; 界面力学特性; 直剪试验; 拉拔试验; 三轴试验; GDS 界面剪切试验仪

中图分类号:TU411

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)03-0059-07

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.03.008

Research Progress of Interface Mechanical Characteristics Between Reinforcement and Soil

DING Luqiang^{1,2}, LI Dayong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Geosynthetics in the reinforced soil can enhance the shear strength of soil, improve the cohesion and permeability of cohesive soil, and ameliorate the poor engineering properties of loess and expansive soil. The shortcomings of the direct shear test, the pull-out test and the triaxial test in analyzing the interface mechanical characteristics between the reinforcement and soil were studied. In the direct shear test, the shear plane was confined between the upper and lower shear boxes, rather than along the weakest shear plane. In the pull-out test, the reinforcement suffered from a concave and convex deformation in the preparation of soil samples. In the triaxial test, the size effect of layers of reinforcement material distributed in the samples was obvious. The global digital systems (GDS) interface shear test apparatus can overcome the shortcomings of the above test methods and provides a beneficial tool for studying the interface mechanical characteristics of the reinforced soil.

Key words: reinforced soil; interface mechanical characteristics; direct shear test; pull-out test; triaxial test; GDS interface shear test apparatus

20世纪60年代初, 法国工程师Vidal根据三轴试验结果首先提出加筋土的概念和原理, 为现代加筋土技术的发展奠定了基础^[1]。土工合成材料是岩土工程领域内的一种新型材料, 因其质量轻、体积小, 柔软性

收稿日期: 2017-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379118); 山东科技大学科研创新团队项目(2015TDJH104)

作者简介: 丁鲁强(1991—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程理论与应用研究. E-mail: 501296333@qq.com

李大勇(1971—), 男, 山东泰安人, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋岩土工程等方面的研究工作, 本文通信作者.

E-mail: ldy@sdust.edu.cn

能适应土体的较大变形,具有加强土体的作用^[2]。土工合成材料加筋土具有良好的抗剪强度,并且具有优良的抗震性能,被广泛应用于路堤、挡土墙、边坡等结构中。

筋土界面的力学特性体现了加筋土结构的加筋效果,并直接影响到加筋土结构的稳定性^[3]。针对加筋土界面力学特性的研究,现阶段的室内试验主要有直剪试验、拉拔试验和三轴试验。加筋体为土工格栅、土工织物、土工膜等。加筋土的填料为砂土、黏性土。

国内外已有学者对加筋土界面力学特性进行了研究,也取得了一定成果。本文对国内外加筋土界面力学特性试验研究成果进行归纳总结,指出了当前试验存在的问题。新型 GDS(global digital systems, 全球数字系统)界面剪切试验仪可以进行土工合成材料与土体的界面剪切试验,克服了当前试验方法的不足。针对该仪器在试验过程中不能严格控制排水条件以及量测试样中孔隙水压力的变化,提出了改进建议。

1 加筋土界面试验研究现状

1.1 直剪试验研究

Abu-Farsakh 等^[4]通过直剪试验探究了不同含水率对格栅-黏土界面剪切特性的影响,认为随着含水率的增加,筋土界面抗剪强度显著减小。Liu 等^[5-6]在大量试验的基础上提出了土工格栅加筋效果明显高于土工织物,且筋土界面强度与横肋拉伸强度有关,与网格尺寸、网孔面积比率基本无关。Lee 等^[7]通过直剪试验认为边界条件和试验方法对加筋土界面特性有很大影响。Nye 等^[8]采用直剪试验研究了土工合成材料与黏土界面剪切特性,认为随着剪切位移的增加,筋土界面抗剪强度先增大后减小,最终趋于稳定值;在循环剪切过程中,加筋体与土体界面强度主要受剪切位移幅度影响,与循环次数、频率及波形基本无关。

刘飞禹^[3]、徐超等^[10]通过直剪试验对加筋砂土试样进行不同剪切速率下的直剪试验,发现剪切速率对加筋体、土体界面的剪切特性影响不大,可以忽略。而刘文白等^[11]认为剪应力峰值强度及其对应的剪切位移都随着剪切速率的增大而逐渐减小。

吴海等^[13]通过室内大型直剪试验研究了不同竖向应力下各种加筋材料对加筋土界面特性的影响,认为土工格栅的加筋效果明显高于土工织物;随着竖向应力的增加,筋土界面抗剪强度提高。许多学者也得到了相同的结论^[14, 19-20]。为了直观并便于比较,汇总试验结果于表 1。

表 1 直剪试验对筋土界面特性的研究总结

Tab. 1 Summary of reinforcement-soil interface characteristics by using direct shear tests

加筋土材料	试验结果
土工格栅、黏土	随着含水率的增加,筋土界面抗剪强度显著减小。
土工格栅、土工织物、砂土	土工格栅加筋效果明显高于土工织物,且筋土界面强度与横肋拉伸强度有关,与网格尺寸、网孔面积比率基本无关。
土工格栅、土工织物、黏土	单调直剪试验过程中,筋土界面剪切强度先增大后减小;循环剪切过程中,筋土界面强度主要受剪切位移幅度影响,与循环次数、频率及波形基本无关。
土工格栅、土工织物、砂土	粗砂和细砂与筋材的界面剪切强度要明显大于粗细混合砂。
土工格栅、砂土	剪切速率对筋土界面的剪切特性影响不大。
土工格栅、砂土、粉质黏土	剪应力峰值与对应的位移都随着剪切速率的增大而逐渐减小。
土工格栅、石英砂	筋土相互作用系数 k 随着法向应力的增大而逐渐减小。
土工格栅、土工织物、砂土、软黏土	土工格栅的加筋效果明显高于土工织物;随着竖向应力的增加,筋土界面抗剪强度提高。

1.2 拉拔试验研究

Lopes 等^[15]通过对砂土与土工格栅界面的拉拔试验,得出界面的抗剪强度与加载速率成正比。Moraci 等^[16]通过动力下的拉拔试验,发现所施加的动力频率对界面特性影响不明显。Bergado 等^[17]研究了不同含水率对筋土界面抗剪强度的影响,得到了不同土工格栅界面抗剪强度公式。

刘文白等^[11]利用拉拔试验研究了土工格栅与土的界面力学特性,认为随法向应力的增大,剪应力峰值及其对应的位移均提高;许多学者也发现了相同的规律^[18-20]。李齐仁^[22]、汪明元^[23]等分别研究了含水率和干密度对土工格栅与膨胀土界面拉拔形状的影响,得出随着含水率升高,拉拔力峰值及界面峰值强度迅速衰减;干密度对界面似摩擦角的影响显著,而对似粘聚力的影响较小。同样,拉拔试验对筋土界面特性研究汇总于表2。

表2 拉拔试验对筋土界面特性的研究总结

Tab. 2 Summary of reinforcement-soil interface characteristics using pull-out tests

加筋土材料	试验结果
土工格栅、砂土、粉质黏土	随着法向应力的增大,剪应力峰值及其对应的位移均提高。
土工织物、土工格栅、土工网、砂土、石灰粉煤灰	土工合成材料的拉拔系数从低到高排序为土工织物、土工网、塑料拉伸土工格栅、经编土工格栅、土工格栅适用于对变形有严格要求的加筋土工程。
土工格栅、膨胀性泥灰岩风化土、砂土	拉拔速率较大时,拉拔力增长较快,其拉拔力峰值和界面强度较大。
土工格栅、砂土、黏土	动力频率对界面的静力、动力特性均不产生明显影响。
土工格栅、膨胀土	土工格栅在膨胀土中的拔出过程主要经过界面静摩擦力阶段、渐进剪切阶段和整体运动阶段,且各阶段受力特性有明显的差异。
土工格栅、黏土	土工格栅与黏土界面的表观摩擦阻力随着法向应力的增加而增加;当法向应力逐渐增大的过程中,土工格栅与黏土界面间的破坏形式由土工格栅的整体拔出破坏转变为纵肋拔出破坏。
土工格栅、膨胀土	随着含水率的升高,界面剪切强度峰值迅速衰减。
土工格栅、膨胀土	干密度对界面似摩擦角的影响显著,而对似粘聚力的影响较小。
土工格栅、砾类粗粒土	土工格栅的相对位移及应变随着拉拔力的增加而逐渐越小;应变随着竖向荷载的增加而逐渐减小。
土工格栅、砂土	拉拔位移较小时,纵肋摩阻力和横肋被动阻力同步增长;拉拔位移大时,纵肋摩阻力逐步达到峰值,拉拔力的增量大部分来源于被动阻力的增量。
土工织物、吹填土、砂土	随着拉拔速率的增大,吹填砂-筋材-吹填砂界面的抗剪强度下降明显,而软土-筋材-吹填砂界面以及砂本身强度变化不大。

1.3 三轴试验研究

Yang 等^[31]通过三轴压缩试验研究了筋土界面抗剪强度的影响因素,发现筋土界面抗剪强度随着土工织物层数和土层厚度的增加而增大。Fabin 等^[32]研究了不同渗透系数的土工合成材料和淤泥质黏土的界面特性,认为在不排水的条件下,高渗透性的加筋体可以使筋土界面抗剪强度增加 40%,而低渗透性的加筋体则相反;界面剪切强度的增加与试样含水率有关,随着含水率的增加,加筋体和土体之间的黏聚力逐渐增大。

对于特殊黏性土,土工合成材料也有很好的加筋效果。王协群等^[33]通过不同围压下的三轴排水剪切试验探究土工格栅的加筋效果,认为土工格栅加筋膨胀土形成排水通道,加速土体的排水固结;土工格栅的植入使剪切带的发展受到抑制,内摩擦角变化不大,而黏聚力则有明显提高。三轴试验对筋土界面特性的研究如表3 所示。

2 当前试验存在的问题与 GDS 界面剪切试验仪

2.1 存在的问题

现阶段对筋土界面力学特性的研究内容丰富,但方法各异,所用的试验仪器差别较大,筋材和填料也多种多样,故得到的筋土界面力学特性具有较大差异。直剪试验、拉拔试验和三轴试验虽能得到加筋土界面力学特性规律,但存在如下局限性:

表 3 三轴试验对筋土界面特性的研究总结

Tab. 3 Summary of reinforcement-soil interface characteristics using triaxial tests

加筋土材料	试验结果
土工格栅、土工织物、淤泥质黏土	在不排水的条件下,高渗透性的加筋体可以使筋土界面抗剪强度增加 40%,而低渗透性的加筋体则相反;界面剪切强度的增加与试样含水率有关,随着含水率的增加,加筋体和土体之间的黏聚力逐渐增大。
土工格栅、膨胀土	土工格栅加筋膨胀土形成排水通道,加速土体的排水固结;土工格栅的植入使剪切带的发展受到抑制,内摩擦角变化不大,而黏聚力则有明显提高。
纤维、土工布、膨胀土	相同含水率时试样的强度随着加筋层数、周围压力的增加而增大;同围压、同加筋层数的试样含水率略微的减少,引起强度明显的增加,表明加筋膨胀土强度的水敏感性。
纱窗、膨胀土	非均匀加筋型式较适合低围压、变形小的加筋土体工程;高围压、大变形的加筋土体工程采用均匀布筋型式将会取得较好的效果。
纱窗、膨胀土	加筋后的膨胀土摩擦角基本不变,粘聚力有明显的提高,且加筋土在加 2,3 层时效果最佳。
土工格栅、土工织物、土工网、砂土	5 种土工合成材料加筋砂土的抗剪强度和应力应变特性不同;砂土对各种土工合成材料侧向收缩的约束作用差异显著。

1) 直剪试验在剪切过程中,破坏面在上下剪切盒之间,且破坏边缘会发生应力集中现象,致使剪应力在剪切面上分布不均匀。试验时不能严格控制排水条件,不能测量孔隙水压力。

2) 拉拔试验在制样过程中,土工合成材料会在土中发生凹凸变形,致使土体对加筋体产生一定的锚固作用,因此拉拔试验测得的界面抗剪强度比实际值大。

3) 三轴压缩试验中,土体的受力状态 $\sigma_2 = \sigma_3$,具有一定的特殊性;在直径为十几厘米到几十厘米之间的试样中分布几层土工合成材料,其尺寸效应十分明显。

2.2 GDS 界面剪切试验仪

通过英国 GDS 公司生产的界面剪切试验仪(图 1)对加筋土界面力学特性进行深入研究,以改进室内试验方法所存在的问题。该仪器能够进行土工合成材料与土体界面剪切试验,试验过程中可以保持剪切面积不变,竖向应力与剪应力在剪切面上均匀分布,土工合成材料不会发生凹凸变形,可以有效避免尺寸效应对试验结果造成的偏差,无限转动的旋转平台能够实现足够大的剪切位移。施加的扭转力与轴向压力由精密电机控制,可以线性或跳跃性增加扭矩、轴向压力和剪切速率,其中扭转力最大可达 200 N·m,轴向压力最大可达 5 kN。试验过程由计算机控制精密电机运行,并自动记录试验时间、扭转力、轴向力、轴向变形等试验数据。因此 GDS 界面剪切试验仪在一定程度上克服了上述 3 种试验方法的局限性,对分析研究加筋土界面力学特性具有较大的优势。

相对于直剪试验的快剪、固结快剪和慢剪试验,界面剪切试验根据不同的固结状态和排水条件分为不固结不排水界面剪切试验、固结不排水界面剪切试验以及固结排水界面剪切试验。不同试验条件下,筋土界面力学特性具有差异性。相对土工合成材料与黏土的界面剪切试验而言,砂土的情况较为复杂。在界面剪切试验过程中,砂粒在孔隙中不断滚动嵌固,导致试样中孔隙水压力发生变化,进而影响了筋土界面力学特性,

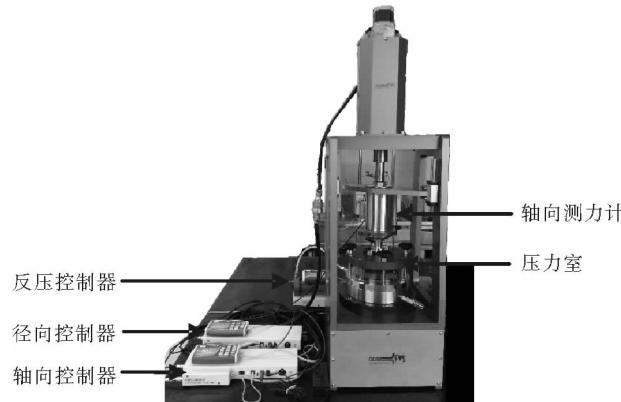


图 1 GDS 界面剪切试验仪

Fig. 1 GDS interface shear test apparatus

故孔隙水压力对筋土界面力学特性的影响不可忽略。现有的GDS界面剪切试验仪可以有效控制试样的固结状态,但不能控制排水条件和量测孔隙水压力的变化,建议增设排水控制设施及孔隙水压力测力计,以进一步确保试验结果的准确可靠。

3 结论

1) 土工合成材料能够有效提高砂土的抗剪强度,改善黏性土的黏聚力和渗透性以及改良黄土和膨胀土的不良工程性质。

2) 直剪试验、拉拔试验及三轴试验都存在不同的局限性。直剪试验在剪切过程中剪切面上剪应力分布不均匀,拉拔试验在制样过程中土工合成材料会在土中发生凹凸变形,三轴试验在试样中分布几层加筋材料,其尺寸效应十分明显。

3) GDS界面剪切试验仪能够实现竖向应力及剪应力均匀分布的假定,可以保持剪切面恒定,土工合成材料不会发生凹凸变形,克服了上述3种试验方法的不足。为进一步研究排水条件和孔隙水压力对筋土界面力学特性的影响,建议增设排水控制设施及孔隙水压力测力计。

参考文献:

- [1] 吴玉友,王家全. 加筋土界面特性室内试验研究进展[J]. 道路工程,2008(3):36-39.
WU Yuyou, WANG Jiaquan. Progress of laboratory test and research on the interface behavior of reinforced soil[J]. Highway Engineering, 2008(3):36-39.
- [2] 施有志,马时东. 土工格栅的界面特性试验[J]. 岩土力学,2003,24(2):296-299.
SHI Youzhi, MA Shidong. Test for interface characteristics of geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(2):296-299.
- [3] 刘飞禹,王攀,王军. 不同剪切速率下格栅-土界面循环剪切及其后直剪特性[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(2):387-395.
LIU Feiyu, WANG Pan, WANG Jun. Cyclic and post-cyclic shear behavior of sand-geogrid interface under different shear rates[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(2):387-395.
- [4] ABU-FARSAKH M, CORONEL J, TAO M. Effect of soil moisture content and dry density on cohesive soil-geosynthetic interactions using large direct shear tests[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(7):540-549.
- [5] LIU C N, JORGE G Z, CHEN T C, et al. Behavior of gogrid-sand interface in direct shear mode[J]. Geotechnical and Geo-environmental, 2009, 135(12):1863-1871.
- [6] LIU C N, HO Y H, HUANG J W. Large scale direct shear tests of soil/pet-yarn geogrid interface[J]. Geotextile and geomem-branes, 2009, 27(1):19-30.
- [7] LEE K M, MANJUNATH V R. Soil-geotextile interface friction by direct shear test[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1):238-252.
- [8] NYE C J, FOX P J. Dynamic shear behavior of a needle-punched geosynthetic clay liner[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2007, 133(8):973-983.
- [9] 刘飞禹,林旭,王军. 砂土颗粒级配对筋土界面抗剪特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(12):2575-2582.
LIU Feiyu, LIN Xu, WANG Jun. Influence of particle-size gradation on shear behavior of geosynthetics and sand interface [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12):2575-2582.
- [10] 徐超,孟凡祥. 剪切速率和材料特性对筋-土界面抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2010,31(10):3101-3106.
XU Chao, MENG Fanxiang. Effects of shear rate and material properties on shear strength[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10):3101-3106.
- [11] 刘文白,周健. 土工格栅与土界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(4):965-970.
LIU Wenbai, ZHOU Jian. Experimental research on interface friction of geogrids and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4):965-970.
- [12] 徐超,石志龙. 循环荷载作用下筋土界面抗剪特性的试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(3):655-660.
XU Chao, SHI Zhilong. Experimental research on shearing resistance property of sand-geogrid interface under cyclic load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3):655-660.
- [13] 吴海,张涛,王攀,等. 不同土工合成材料下新型加筋土界面特性[J]. 工业建筑,2015,45(8):104-109.

- WU Hai, ZHANG Tao, WANG Pan, et al. Interface properties of a new type reinforced soil with different geosynthetic materials[J]. Industrial Construction, 2015, 45(8): 104-109.
- [14] 吴景海, 陈环, 王玲娟, 等. 土工合成材料与土界面作用特性的研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 89-93.
- WU Jinghai, CHEN Huan, WANG Lingjuan, et al. Study on soil interaction characteristics of geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 89-93.
- [15] LOPES M L, LADEIRA M. Influence of the confinement, soil density and displacement rate on soil-geogrid interaction[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14(10): 543-554.
- [16] MORACI N, CARDILE G. Influence of cyclic tensile loading on pullout resistance of geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009, 27(6): 475-487.
- [17] BERGADO D T, CHAI J C, ABIERA H O, et al. Interaction between cohesive-frictional soil and various grid reinforcements[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1993, 12(4): 327-349.
- [18] 蔡剑韬. 土工格栅加筋膨胀土拉拔试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 204-208.
- CAI Jiantao. Pull-out test on interface behavior between expansive soils and geogrids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 204-208.
- [19] 施有志. 土工合成材料的拉拔试验研究[J]. 岩土工程界, 2003, 6(10): 75-78.
- SHI Youzhi. Study on geosynthetics by pull-out test[J]. Geotechnical Engineering World, 2003, 6(10): 75-78.
- [20] 张波, 石名磊. 粘土与筋带直剪试验与拉拔试验对比分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 61-64.
- ZHANG Bo, SHI Minglei. Research on direct shear test and pullout test between clay and geotextile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 61-64.
- [21] 张文慧, 王保田, 张福海, 等. 双向土工格栅与黏土界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1031-1034.
- ZHANG Wenhui, WANG Baotian, ZHANG Fuhai, et al. Test study interaction characteristics between two-way geogrids and clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1031-1034.
- [22] 李齐仁, 汪明元, 蔡剑韬, 等. 含水率对土工格栅与膨胀土界面拉拔形状的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 175-178.
- LI Qiren, WANG Mingyuan, CAI Jiantao, et al. Effect of water content on pull-out behavior of interface between geogrid and compacted expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 175-178.
- [23] 汪明元, 李齐仁, 施戈亮. 干密度对土工格栅与膨胀土界面拉拔形状的影响[J]. 武汉大学学报, 2010, 43(1): 81-84.
- WANG Mingyuan, LI Qiren, SHI Geliang. Effect of dry density on pull-out behaviors of interface between geogrids and compacted expansive soils[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(1): 81-84.
- [24] 王家全, 周健, 邓益兵, 等. 砂土与土工合成材料拉拔试验分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(4): 659-663.
- WANG Jiaquan, ZHOU Jian, DENG Yibing, et al. Pull-out test analysis of sand and geosynthetics[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2011, 36(4): 659-663.
- [25] 王家全, 周岳富, 陆梦梁, 等. 土工格栅拉拔试验及筋材受力特性分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(1): 134-140.
- WANG Jiaquan, ZHOU Yuefu, LU Mengliang, et al. Pull-out test and analysis on geogrid mechanical characteristics[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2016, 41(1): 134-140.
- [26] 徐超, 廖星燧. 土工格栅与砂土相互作用机制的拉拔试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 423-428.
- XU Chao, LIAO Xingyue. Researches on interaction mechanism between geogrid and sand by pull-out tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 423-428.
- [27] 黄文彬, 陈晓平. 土工织物与吹填土界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2831-2837.
- HUANG Wenbin, CHEN Xiaoping. Experimental studies of interface characteristics between geotextile and hydraulic fill soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 2831-2837.
- [28] 汪明元, 包承纲, 丁金华, 等. 试验条件对土工格栅与膨胀土界面拉拔形状的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 442-448.
- WANG Mingyuan, BAO Chenggang, DING Jinhu, et al. Effect of some test conditions on pull-out behaviors of interface between geogrids and compacted expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 442-448.
- [29] 汪明元, 龚晓南, 包承纲, 等. 土工格栅与压实膨胀土界面的拉拔形状[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 145-151.
- WANG Mingyuan, GONG Xiaonan, BAO Chenggang, et al. Pull-out behavior of the interface between geogrid and compacted expansive soil[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 145-151.

- [30]徐林荣,吕大伟,顾绍付,等.筋土界面参数的拉拔试验过程划分研究[J].岩土力学,2004,25(5):709-714.
XU Linrong, LÜ Dawei, GU Shaofu, et al. Experimental research on pull-out tests process-separation for reinforcement/soil interface parameters selection[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 709-714.
- [31]YANG K H, YALEW W M, NGUYEN M D. Behavior of geotextile-reinforced clay with a coarse material sandwich technique under unconsolidated-undrained triaxial compression[J]. International Journal of Geomechanics, 2015, 16(3): 1-15.
- [32]FABIN K, FOURIE A. Performance of geotextiles-reinforced clay samples in undrained triaxial tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1986, 4(1): 33-63.
- [33]王协群,郭敏,胡波.土工格栅加筋膨胀土的三轴试验研究[J].岩土力学,2011,32(6):1649-1653.
WANG Xiequn, GUO Min, HU Bo. Triaxial testing study of expansive soil reinforced with geogrid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1649-1653.
- [34]丁万涛,雷胜友.含水率对加筋膨胀土强度的影响[J].岩土力学,2007,28(2):391-394.
DING Wantao, LEI Shengyou. Influence of water contents on strength of reinforced expansive solid[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2): 391-394.
- [35]丁万涛,雷胜友.加筋膨胀土不同布筋型式三轴试验研究[J].岩土力学,2010,31(4):1147-1150.
DING Wantao, LEI Shengyou. Triaxial tests on reinforced expansive soil under different reinforced modes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1147-1150.
- [36]丁万涛,谭新.加筋膨胀土的三轴试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(1):2367-2370.
DING Wantao, TAN Xin. Study on reinforced expansive soils by triaxial tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 2367-2370.
- [37]吴景海,王德群,陈环.土工合成材料加筋砂土三轴试验研究[J].岩土工程学报,2000,22(2):199-204.
WU Jinghai, WANG Dequn, CHEN Huan. Study on geosynthetic reinforced sand by triaxial compression test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 199-204.
- [38]吴景海.土工合成材料与土工合成材料加筋砂土的相关特性[J].岩土力学,2005,26(4):538-541.
WU Jinghai. Behavior of geosynthetics versus geosynthetic reinforced sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 538-541.
- [39]汪明元,于嫣华,包承纲,等.土工格栅加筋压实膨胀土的强度与变形特性[J].武汉理工大学学报,2009,31(11):88-92.
WANG Mingyuan, YU Yanhua, BAO Chenggang, et al. The strength and deformation characteristics of compacted expansive soils reinforced with geogrids[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(11): 88-92.

(责任编辑:吕海亮)