

加筋土筋土界面抗剪强度影响因素试验研究\*

熊甜甜<sup>1,2</sup>, 廖红建<sup>2,3</sup>, 杨博<sup>2,4</sup>, 谈云志<sup>3</sup>

(1. 西安思源学院 城市建设学院, 西安 710038; 2. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049; 3. 三峡大学防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 4. 云南省设计院, 昆明 650228 )

**摘要:**通过室内筋土界面直剪试验,考虑筋土界面抗剪强度的影响因素,进行了不同剪切速度、筋材空隙率及土体含水率下筋土界面直剪试验,分析了不同因素对筋土界面抗剪强度的影响。试验结果表明,剪切速度主要影响筋土界面的内摩擦角,对筋土界面黏聚力几乎没有影响,随着剪切速度的增加,内摩擦角变大,导致筋土界面抗剪强度增大。筋材空隙率主要影响筋土界面黏聚力大小,空隙率越大,筋材肋条对土颗粒的约束作用越小,筋土界面抗剪强度降低。筋土界面抗剪强度受土体含水率的影响较大,随着土体含水率的增加,筋土界面黏聚力和内摩擦角都明显减小,导致筋土界面抗剪强度显著降低。

**关键词:**加筋土;筋土界面;抗剪强度;影响因素

中图分类号:TU411.7      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2018)03-0629-06

Experimental Study on Influence Factors of Shear Strength between Geogrid and Soil Interface

Xiong Tiantian<sup>1,2</sup>, Liao Hongjian<sup>2,3</sup>, Yang Bo<sup>2,4</sup>, Tan Yunzhi<sup>3</sup>

(1. School of Urban Construction, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, P.R. China;  
2.School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P.R. China;  
3. Hubei Key of Laboratory of Disaster Prevention, China Three Gorges University, Yi Chang, Hubei 443002, P.R. China; 4.Yunnan Design Institute Group, Kunming 650228, P.R. China)

**Abstract:** The direct shear tests between reinforcement material and soil interface are conducted considering different shear speeds, different void ratios of reinforcement material and different moisture contents of soil. And the influences of different factors to shear strength are analyzed. The test results show that shear speeds affected the friction angle mainly but had little effect on the cohesion. The friction angle got bigger with the shear speeds increased which resulted an increasing of shear strength. On the other hand, the cohesion was influenced by different void ratios of reinforcement material mainly. With the reinforcement material void ratios increased, the constraint effects of the ribs to soil reduced and the shear strength got smaller. The shear strength is influenced strongly by soil moisture content. It is shown that with the increases of soil moisture content, the cohesion and friction angle both reduced significantly which resulting a reduction of shear strength.

**Keywords:** reinforced soil; interface between geogrid and soil; shear strength; influence factors

\* 收稿日期:2018-01-22(修改稿)  
作者简介:熊甜甜(1982-),女,江苏徐州人,工学硕士,讲师,主要从事岩土力学的教学与边坡工程方面的研究工作。  
E-mail:627363772@qq.com  
通讯作者:廖红建(1962-),女,湖南华容人,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土工程数值分析方面的研究。  
E-mail:hjliao@mail.xjtu.edu.cn  
基金项目:国家自然科学基金(41630639, 51279155);防灾减灾湖北省重点实验室(三峡大学)(2016KJZ02);陕西省教育厅自然科学基金(16JK2148);西安思源学院科研项目(XASY-B1602)

0 引言

加筋土挡墙是由挡墙面板、筋材和土体组成的复合支挡结构,由于在土体中加入了适当的筋材,有效地增强了土体的整体性,从而使得加筋土可以广泛地应用于各种工程领域<sup>[1-4]</sup>。然而加筋土中筋材与土体界面的相互作用机理及强度影响因素研究仍处于探索阶段。Krieger 等<sup>[5]</sup>通过一系列的室内试验发现,筋土界面摩擦系数的大小直接影响到加筋土挡墙的稳定。Liu 等<sup>[6]</sup>通过室内直剪试验对筋土界面强度特性进行了研究,提出了用横肋影响系数来定量描述格栅横肋对筋土界面强度的贡献。Anubhav 等<sup>[7-8]</sup>通过砂土与土工织物界面直剪试验,探讨了影响筋土界面抗剪强度的因素。张文慧等<sup>[9]</sup>通过拉拔试验发现,法向应力增大到一定值时会出现双向格栅的纵肋被拔出的情形,说明横肋上的被动阻力超出了格栅的节点强度。蔡剑韬<sup>[10]</sup>进行了筋材与膨胀土界面拉拔试验,研究了不同竖向荷载对筋-土界面强度特性的影响。周健等<sup>[11-12]</sup>通过离散元数值模拟,分析了砂土和土工格栅界面的力学特性。

目前对筋土界面抗剪强度影响因素研究<sup>[13-16]</sup>,均是基于单一因素进行分析,很少考虑多个因素对筋土界面抗剪强度的影响。本文采用标准砂和黏土两种填料,通过室内直剪试验,研究剪切速度、筋材空隙率及土体含水率对筋土界面强度特性的影响。根据试验结果,分析影响筋土界面抗剪强度的主要因素,为加筋土挡墙的设计及应用提供参考。

1 试验思路

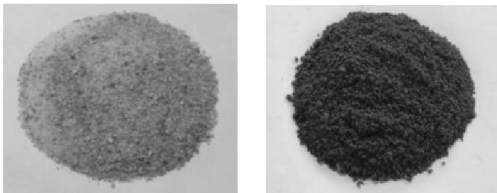


图 1 标准砂和粉质黏土

Fig. 1 Standard sand and silty clay

1.1 试验材料

如图 1 所示,试验所用土体为标准砂和粉质黏土两种。其中,试验标准砂采用福建平潭标准砂,

级配曲线如图 2 所示;粉质黏土取自陕西泾阳滑坡段,其基本参数如表 1 所示。

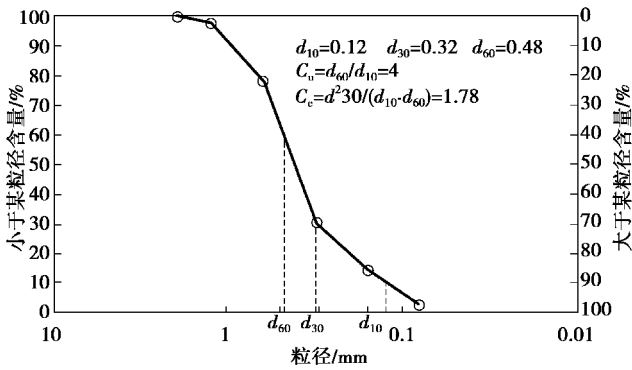


图 2 标准砂颗粒级配曲线

Fig. 2 Grading curve of standard sand

表 1 土体参数

Table 1 Parameters of soil

土体	液限/ %	塑性 指数	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	天然含 水率/%
粉质 黏土	19.31	12.22	1.53	1.75	14.13

试验所用筋材为新型 3D 高强度涤纶复合土工格栅,如图 3 所示。

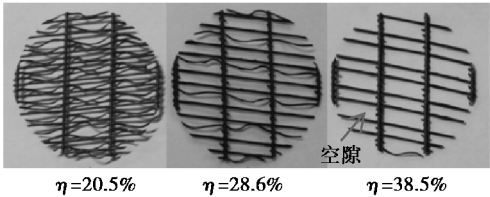


图 3 不同空隙率筋材

定义筋材空隙率  $\eta$  为筋材网格空隙面积与总剪切面积之比

$$\eta = \frac{A_k}{A_z} = 1 - \frac{A_j}{A_z} = 1 - \frac{A_j \cdot \rho \cdot h}{A_z \cdot \rho \cdot h} = 1 - \frac{m_j}{A_z \cdot \rho \cdot h} \tag{1}$$

式中: $A_k$ 为筋材空隙面积; $A_z$ 为总剪切面积; $A_j$ 为筋材所占面积; $m_j$ 为不同空隙率下筋材质量; $\rho$ 为筋材密度(取 1.38 g/cm<sup>3</sup>); $h$ 为筋材厚度(取 2 mm)。

根据公式(1),只需称量不同空隙率筋材质量,便可得到筋材空隙率。计算空隙率时计入了弯

曲筋材,并算作受力筋。筋材参数如表 2 所示。

表 2 筋材参数

Table 2 Parameters of geogrid

筋材	拉伸强度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )		肋条宽度/mm		纵向伸 长率/%	5%应变 强度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )
	纵向	横向	纵肋	横肋		
G-30	30	18	2	1	11	15

1.2 试验方案

本文为了探讨筋土界面抗剪强度的影响因素,使用应变控制式直剪仪,分别进行不同剪切速度 $v$ 、不同筋材空隙率 $\eta$ 及土体不同含水率 $w$ 下筋土界面直剪试验。直剪仪剪切面积为 $30\text{ cm}^2$ ,本文所选筋材网格较密,筋材网格所占尺寸能够反映实际性状,并且可以反映出筋土界面的抗剪强度变化规律和应力应变关系。Anubhav 等<sup>[17]</sup>也利用相同试验设备进行筋土界面研究。

2 试验结果分析

2.1 剪切速度对筋土界面抗剪强度影响

为了分析剪切速度对筋土界面抗剪强度的影响规律,分别进行剪切速度为 $0.8、1.2、2.4\text{ mm/min}$ 筋土界面直剪试验,筋材空隙率 $\eta$ 均为 $20.5\%$ 。竖向应力分别为 $100、200、300、400\text{ kPa}$ 的筋土界面剪应力与剪切位移关系如图 4 所示。

可以看出,在不同的剪切速度下,两种土体与筋材界面的剪应力均随着剪切位移的增加呈非线性增大趋势,且最终趋于稳定,在相同的剪切位移下,剪应力随着竖向应力的增加而增大,并且在相同的竖向应力下,剪切速度越大,剪应力越大。

根据试验,整理不同剪切速度下的筋土界面抗剪强度与法向应力的关系,可得出筋土界面土强度参数如图 5 所示。

可以看出,两种土体对应的筋土界面黏聚力几乎不随剪切速度变化,但摩擦角随着剪切速度的增加有增大趋势,从而导致筋土界面的抗剪强度增大。其主要原因是在剪切过程中,筋土界面土颗粒重新排列,但重新排列的过程并非瞬间完成。当剪切速率增大时,颗粒来不及重新排列,使得剪胀作用明显增加,从而增大了筋土界面的内摩擦角。

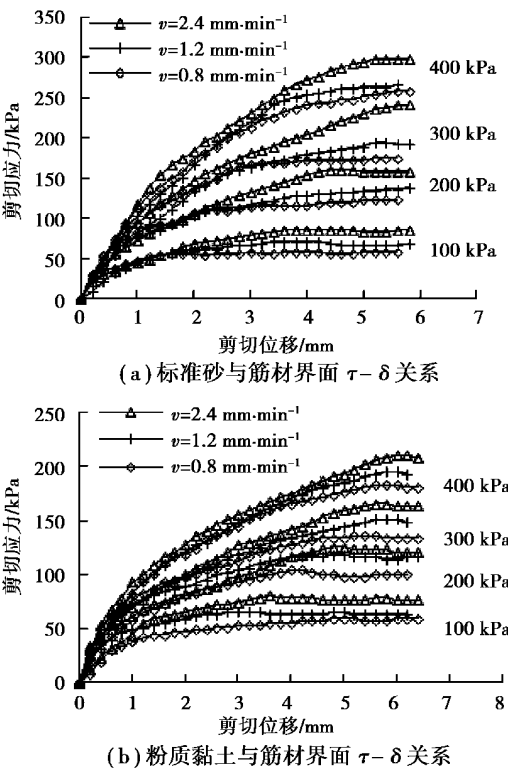


图 4 不同剪切速度筋土界面  $\tau$ - $\delta$  关系

Fig. 4 Relationship between  $\tau$  and  $\delta$  under different shear speeds

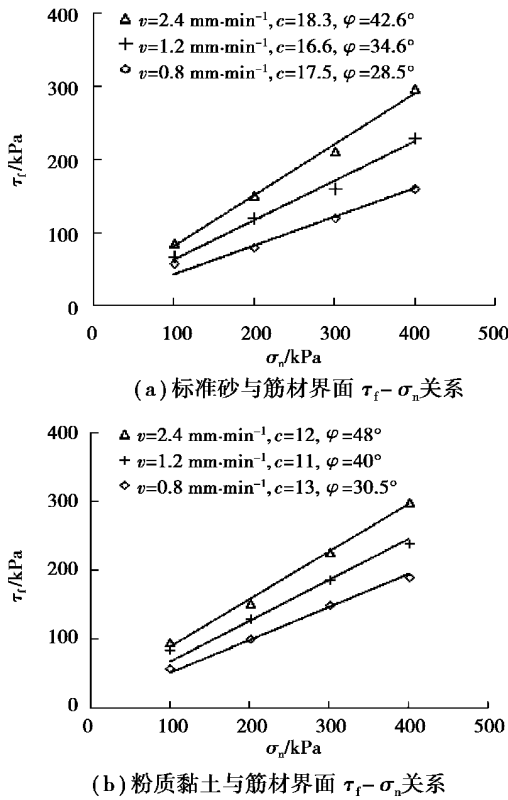


图 5 不同剪切速度筋土界面  $\tau_f$ - $\sigma_n$  关系

Fig. 5 Relationship between  $\tau_f$  and  $\sigma_n$  under different shear rate

2.2 筋材空隙率对筋土界面抗剪强度影响

为了进一步探讨筋材空隙率对筋土界面抗剪强度的影响规律,分别进行空隙率  $\eta$  为 20.5%、28.6% 和 38.5% 筋土界面直剪试验,剪切速度  $v$  均为 1.2 mm/min。将不同空隙率下筋材与两种土体界面剪应力与剪切位移关系进行整理,如图 6 所示。

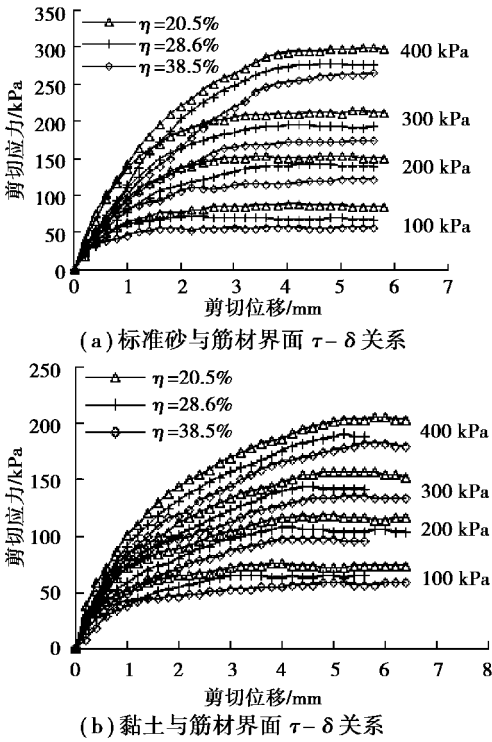
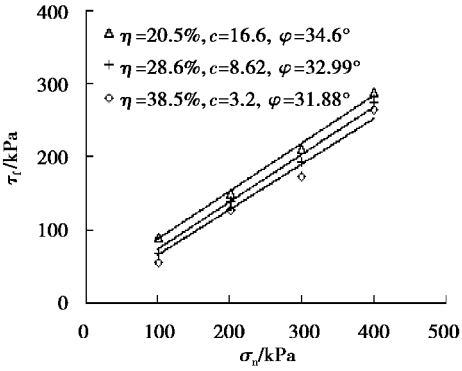


图 6 不同空隙率筋土界面  $\tau-\delta$  关系

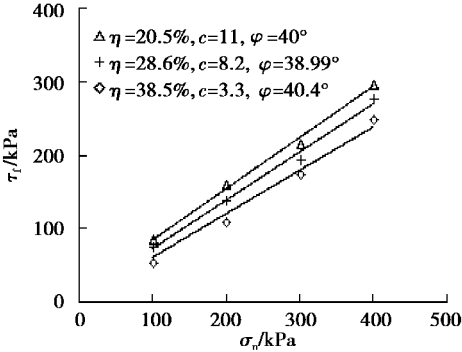
Fig. 6 Relationship between  $\tau$  and  $\delta$  under different void rate

通过对比分析可知,在不同的空隙率下,两种土体的筋土界面剪应力均随着剪切位移的增加而增大,在相同的剪切位移下,剪应力随着竖向应力的增加而增大,并且在相同的竖向应力下,空隙率越大,剪应力越小。

同样,根据试验整理筋材不同空隙率下的筋土界面抗剪强度与法向应力的关系,可得出筋材与两种土体界面强度参数如图 7 所示。通过分析可知,不同空隙率下的抗剪强度线都几乎平行,筋土界面的摩擦角几乎不随空隙率变化。但筋土界面黏聚力随着空隙率的增加有减小趋势,从而导致筋土界面的抗剪强度降低。说明筋材肋条间的空隙越大,在剪切过程中,筋材肋条对土颗粒的约束作用越小,导致筋土界面的抗剪强度越低。



(a) 标准砂与筋材界面  $\tau_i-\sigma_n$  关系



(b) 黏土与筋材界面  $\tau_i-\sigma_n$  关系

图 7 不同空隙率筋土界面  $\tau_i-\sigma_n$  关系

Fig. 7 Relationship between  $\tau_i$  and  $\sigma_n$  under different void ratios

2.3 含水率对筋土界面抗剪强度影响

为了探讨含水率对筋土界面抗剪强度的影响规律,分别进行黏土含水率  $w$  为 14.13%、17.35% 和 21.26% 筋土界面直剪试验,剪切速度  $v$  均为 1.2 mm/min,筋材空隙率均为 20.5%,不同含水率下黏土的干密度相同。将黏土不同含水率下筋土界面剪应力与剪切位移关系及筋土界面抗剪强度与法向应力的关系进行整理,分别如图 8 和图 9 所示。

同样通过分析可知,在相同的竖向应力下,筋土界面剪应力随着剪切位移的增加而增大。在相同的剪切位移下,筋土界面剪应力随着含水率的增加而明显减小,土体含水率越大,筋土界面越容易发生剪切破坏。土体含水率同时影响筋土界面的黏聚力和摩擦角,并且随着含水率的增大,筋土界面黏聚力和摩擦角都明显减小,导致筋土界面抗剪强度显著降低。筋土界面抗剪强度包括筋材与土体界面抗剪强度和筋材空隙间土体抗剪强度,含水率发生变化会引起这两部分抗剪强度同时发生变化。

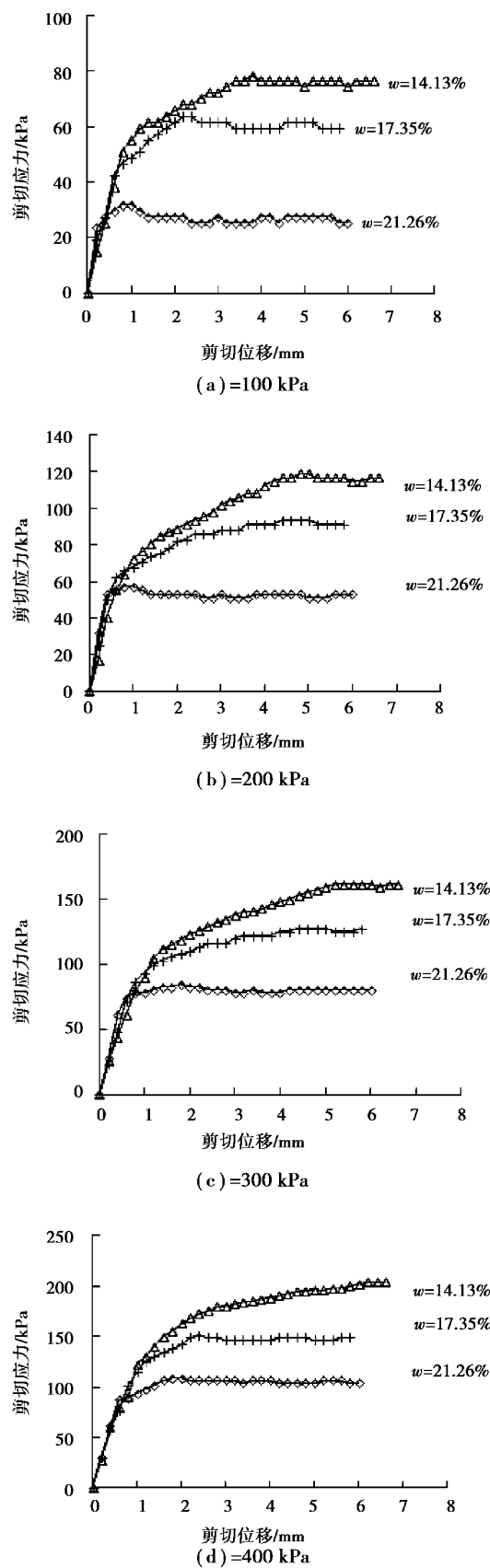


图8 粉质黏土不同含水率筋土界面  $\tau$ - $\delta$  关系

Fig. 8 Relationship between  $\tau$  and  $\delta$  under different moisture contents of silty clay

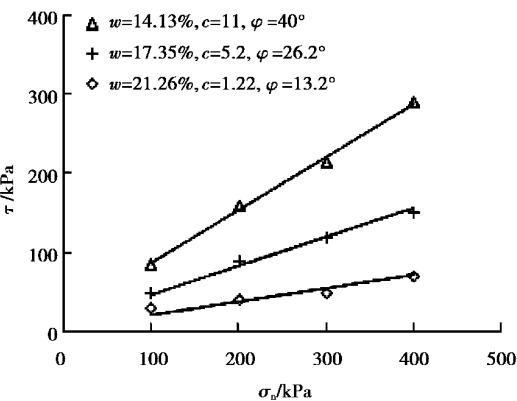


图9 黏土不同含水率筋土界面  $\tau$ - $\sigma_n$  关系

Fig. 9 Relationship between  $\tau$  and  $\sigma_n$  under different soil moisture contents

3 结论

针对不同剪切速度、筋材不同空隙率及土体不同含水率筋土界面直剪试验,研究了影响筋土界面抗剪强度的因素,得到如下主要结论:

- (1)通过不同剪切速度筋土界面直剪试验,得到剪切速度主要影响筋土界面的内摩擦角,对筋土界面的黏聚力几乎没有影响。且随着剪切速度的增加,筋土界面抗剪强度增大。
- (2)筋材空隙率主要影响筋土界面黏聚力的大小,筋材空隙率越大,筋材肋条对土颗粒的约束作用越小,筋土界面抗剪强度降低。
- (3)土体含水率对筋土界面黏聚力和摩擦角都有影响,随着含水率的增大,筋土界面黏聚力和摩擦角明显减小,导致筋土界面抗剪强度显著降低。

参考文献 (References)

[1] 张师德,吴邦颖. 加筋土结构原理及应用[M]. 北京:中国铁道出版社,1986. (Zhang Shide, Wu Bangyin. Principle of reinforced soil structure[M]. Beijing:China Railway Press, 1986. (in Chinese))

[2] 中华人民共和国水利部. 土工试验规程 (SL237-1999) [S]. 1999. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Soil test procedures (SL237-1999) [S]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 1999. (in Chinese))

[3] 中华人民共和国交通部. 公路工程土工合成材料试



- 验规范(JTG E50-2006)[S].北京:人民交通出版社, 2006. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of geosynthetics for highway engineering (JTG E50-2006) [S]. Beijing: China Communications Press, 2006. (in Chinese))
- [4]] 孙红,姜开锋,吴雪萍,等.软弱土路堤的玻璃纤维加筋土加固技术[J].地下空间与工程学报,2014,10(增2):1893-1898. (Sun Hong, Jiang Kaifeng, Wu Xueping, et al. Glass fiber-reinforced soil technology for soft soil embankment [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10 (Supp. 2):1893-1898.(in Chinese))
- [5] Krieger J, Thamm B R. Studies of failure mechanism and design method for geotextile reinforced soil walls [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1991, 10(1): 53-63.
- [6] Liu C N, Zornberg J G, Asce M, et al. Behavior of geogrid-sand interface in direct shear mode[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009,135(12):1863-1871.
- [7] Anubhav P, basudhar K. Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(4): 403-408.
- [8] Esterhuizen J J B, Fliz G M, Duncan J M. Constitutive behavior of geosynthetic interface [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(10):834-840.
- [9] 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 on interaction characteristics between two-way geogrids and clay[J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(5):1031-1034. (in Chinese))
- [10] 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. (in Chinese))
- [11] 周健,王家全,孔祥利,等.砂土颗粒与土工合成材料接触界面细观研究[J].岩土工程学报,2010,32(1):61-67. (Zhou Jian, Wang Jiaquan, Kong Xiangli, et al. Mesoscopic study of the interface between sandy soil and geosynthetics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 61-67. (in Chinese))
- [12] 陈建峰,李辉利,柳军修,等.土工格栅与砂土的细观界面特性研究[J].岩土力学,2011,32(增1):66-71. (Chen Jianfeng, Li Huili, Liu Junxiu, et al. Mesoscopic study of interface properties of geogrid-reinforced soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (Supp. 1): 66-71. (in Chinese))
- [13] 包承纲.土工合成材料界面特性的研究和试验验证[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1735-1744. (Bao Chenggang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,2(5):1735-1744. (in Chinese))
- [14]] 张小莉,张永兴.基于有限元法的加筋路堤影响因素分析[J].地下空间与工程学报,2006,2(5):731-733. (Zhang Xiaoli, Zhang Yongxing. Finite element analysis of reinforced embankment simulated by ANSYS software [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2006,2(5):731-733.(in Chinese))
- [15] 史旦达,刘文白,水伟厚,等.单、双向塑料土工格栅与不同填料界面作用特性对比试验研究[J].岩土力学,2009,30(8):2237-2244. (Shi Danda, Liu Wenbai, Shui Weihou, et al. Comparative experimental studies of interface characteristics between uniaxial/biaxial plastic reinforcement material and different soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2237-2244. (in Chinese))
- [16] 尹光志,张东明,魏作安,等.土工合成材料与细粒尾矿界面作用特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):426-429. (Yin Guangzhi, Zhang Dongming, Wei Zuo'an, et al. Testing study on interaction characteristics between fine grained tailings and geosynthetics [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 426-429. (in Chinese))
- [17] Anubhav, Basudhar P K. Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, 28(4): 403-408.