

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.011



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 加筋土结构筋-土界面特性和筋材位移 变化规律试验研究

肖成志<sup>1</sup>, 路遥<sup>1</sup>, 郑鸿<sup>2</sup>, 王清洲<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 青岛旭域土工材料股份有限公司, 山东 青岛 266111)

**摘要:** 基于拉拔试验研究加筋土结构筋-土界面正应力、填土压实度与含水率、拉拔速率等对筋-土相互作用特性和筋材位移变化的影响, 分析筋材位移的演变规律。研究表明: 土中筋材各点位移均不同程度滞后于加载端位移, 且随与加载端的距离增加而增加, 筋材位移呈非线性递减趋势; 增加界面正应力、压实度或含水率, 相同拉拔力下同一位置处筋材位移呈减小趋势, 且距加载端越远, 筋材位移受影响越小; 筋材拉拔以整体拔出和拉断破坏模式为主, 筋材拔出破坏时拉拔力峰值与加载端位移呈近似线性关系, 且格栅拉拔力峰值与界面正应力、压实度、含水率或拉拔速率呈正相关关系; 增加压实度或含水率, 筋-土界面相互作用增强, 筋-土界面摩擦角略有增加, 但筋-土界面似黏聚力增加明显, 且接近填土最佳含水率时界面似黏聚力较大。拉拔特性试验表明, 加筋土工程中应严格控制填土含水率, 适当的筋-土界面变形有利于发挥筋材作用。

**关键词:** 土工格栅; 位移分布; 筋土界面; 拉拔试验; 拉拔力

中图分类号: TU432 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)04-0029-10

## Experimental study on interface properties between geogrids and sand and reinforcement displacement distribution of reinforced soil structures based on pullout tests

XIAO Chengzhi<sup>1</sup>, LU Yao<sup>1</sup>, ZHENG Hong<sup>2</sup>, WANG Qingzhou<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. Bostd Geosynthetics Qingdao Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong, P. R. China)

**Abstract:** Based on pullout tests, the effect of normal stress, compaction degree as well as water content of backfills on interaction mechanism of reinforcement-soil interface and reinforcement displacement were investigated and the evolving pattern of reinforcement displacement was analyzed. The results showed that geogrid displacements along the full-length obviously lagged behind the displacement at loading end, and with increase of distance away from loading end, the geogrids displacements tended to decrease nonlinearly. An increase in normal stress, compaction degree or water content caused to the decrease in geogrid displacement for the identical pullout force and the same measured points. Moreover, the farther the location of measured points

收稿日期: 2021-10-04

基金项目: 国家自然科学基金(52078182, 41877255); 天津市自然科学基金(20JCYBJC00630)

作者简介: 肖成志(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事加筋土研究, E-mail: chengzhixiao@hotmail.com.

Received: 2021-10-04

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52078182, 41877255); Natual Science Foundation of Tianjin (No. 20JCYBJC00630)

**Author brief:** XIAO Chengzhi (1976-), professor, doctoral supervisor, main research interest: reinforcement-soil, E-mail: chengzhixiao@hotmail.com.

is, the weaker the effect of above-mentioned factors on geogrids displacements. During the pullout tests, the main failure modes included the geogrid pulled out fully and breakup failure of geogrid, and the peak pullout forces were approximately linear with the displacement at loading end. The peak pullout forces were closely related with the normal stress, compaction degree, water content or pullout rate. To increase compaction degree or water content of backfills, which caused to enhance interface interaction of reinforcement and soil, contributed somewhat the increase of friction angle of reinforcement-soil interface made the apparent cohesion of interface to increase remarkably, and the apparent cohesion of reinforcement-soil interface reached the greater value when the water content of backfills equals to the optimum water content. The test results showed that it is necessary to strictly control the water content of the backfill soil, and allowing the reinforced structure to deform properly is conducive to playing the role of reinforcement.

**Keywords:** geogrids; displacement distribution; reinforcement-soil interface; pullout test; pullout force

当前,土工合成材料加筋结构被广泛用于路基边坡与挡墙等加固领域,且筋材主要通过筋-土相互嵌锁与咬合作用提供拉力。因此,筋-土相互作用机理及界面强度参数是土工合成材料加筋土结构与保障稳定的关键因素<sup>[1-2]</sup>。学者们主要采用拉拔试验和直剪试验研究筋-土界面相互作用机理,并在界面强度参数和力的传递机制方面取得了丰富的研究成果<sup>[3-4]</sup>。McGown等<sup>[5]</sup>基于拉拔试验初步提出筋材抗拔力的组成,为后续筋-土界面相互作用机理的研究奠定了基础。徐超等<sup>[6]</sup>细致分析了筋材纵/横肋对界面强度及对抗拔力的贡献程度。既有研究表明,影响筋-土界面特性的因素主要包括界面正应力、填料与筋材性质等<sup>[7]</sup>。学者们围绕这些影响因素开展了大量的试验研究,刘文白等<sup>[8]</sup>研究了筋-土界面摩擦参数;Punetha等<sup>[9]</sup>、Abdi等<sup>[10]</sup>基于直剪试验分析了砂土-筋材间剪切机理和破坏模式;万亮等<sup>[11]</sup>综合多因素对筋-土界面的拉拔特性开展了研究,探讨了张拉状态下筋材尺寸和温度等因素对抗拔力的影响程度;郑俊杰等<sup>[12]</sup>研究了格栅网孔形状对筋-土界面特性的影响,并对比分析了双向和双向格栅的拉拔和直剪试验,深入分析了竖向压力和筋材类型对筋-土界面强度参数的影响;Liu等<sup>[13]</sup>深入研究了填土颗粒尺寸对筋-土界面的影响。为研究拉拔过程中拉力沿筋材长度的分布,刘续等<sup>[14]</sup>研究了拉力沿筋材长度的传递机制;王家全等<sup>[15]</sup>研究了格栅与粗粒土的相互作用,指出随着拉拔力的增加,格栅受力沿嵌固长度方向发展,作用在格栅上的拉拔力沿嵌固长度方向不断减弱;王孝存等<sup>[16]</sup>研究发现,由于土工格栅的延性,其位移逐步从前端向尾部发展。同时,学者们对筋材拉拔渐进破坏模式开展了研究,并在筋材受力分布模式方面积累了丰富成果<sup>[17]</sup>。

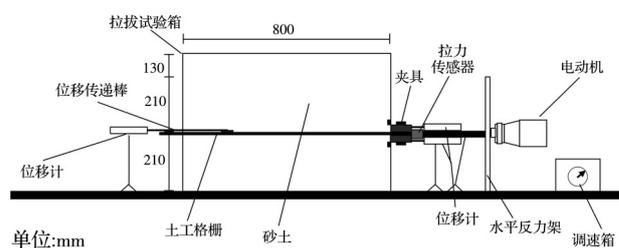
然而,目前不同拉拔阶段筋材位移分布及其对

筋-土界面特性相互影响的研究较少。笔者采用自制中型拉拔仪研究双向格栅和砂土界面特性,并考虑界面正应力、压实度、含水率和拉拔速率对筋材位移分布的影响,分析筋材拔出和拉断破坏时多因素对筋土界面相互作用特性的影响。

## 1 筋-土界面特性拉拔试验

### 1.1 拉拔试验仪

拉拔试验采用自制拉拔仪,包括拉拔试验箱、加载和拉拔速率控制系统、夹具和数据采集系统等,如图1所示。拉拔试验箱尺寸为:长0.8 m、宽0.4 m、高0.55 m,试验箱前端和后端分别开孔,设留高和宽分别为10、340 mm的拉拔缝,前端拉拔端一侧便于筋材试样拔出及筋材与夹具相连,后端供格栅和位移传递棒伸出箱体,便于位移棒监测加载端不同距离处位移。同时,通过箱体内侧布设8 mm厚钢化玻璃,有效减少砂土与箱体内壁的摩擦。拉



(a) 拉拔试验仪示意图



(b) 拉拔仪实物

图1 拉拔模型试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of apparatus for test

拔力和速率由电动机和调速箱组成的水平荷载施加系统控制,并由拉力传感器实时监测试验过程中拉力变化。试验所需法向荷载由反力架和千斤顶组成的竖向荷载施加系统施加。

### 1.2 筋材与回填土

拉拔试验采用双向聚丙烯(PP)格栅,其网孔平面尺寸为40 mm×40 mm,厚度为1 mm,筋材拉力-应变关系曲线如图2所示,筋材极限抗拉强度为30 kN/m。填土采用干净砂土,其颗粒级配曲线如图3所示。砂土不均匀系数 $C_u$ 和曲率系数 $C_c$ 分别为2.77和1.01,最大和最小干密度分别为 $\gamma_{max}=18.7 \text{ kN/m}^3$ 和 $\gamma_{min}=15.3 \text{ kN/m}^3$ 。另外,通过直剪试验获得干砂的抗剪强度指标参数为 $\varphi=35.6^\circ$ 和 $c=7.8 \text{ kPa}$ 。试验中填土压实度通过控制每层填土质量来实现,并采用人工夯实方法。

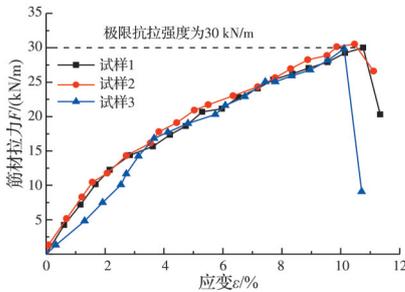


图2 土工格栅的拉力-应变关系曲线

Fig. 2 Tensile force-strain relation curve of the geogrid

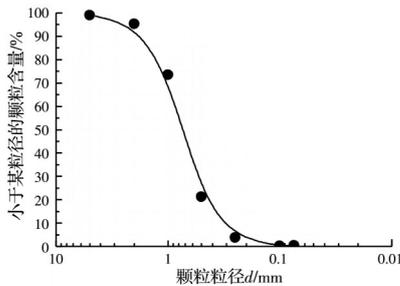


图3 试验砂土颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain size distribution of sand for pullout test

### 1.3 拉拔试验方案

拉拔试验重点研究填土压实度、含水率、界面正应力 $\sigma_n$ 和拉拔速率等因素对筋(格栅)-土(砂土)界面特性的影响,具体试验考虑因素及方案如表1所示。筋材长度为1.1 m,宽度为0.3 m,筋材在夹具中的长度约为0.1 m,且筋材自由端伸出箱体长度约为0.2 m。另外,选取与加载端不同距离的4个点位,将直径较小的细钢棒与筋材位移监测点位相连,并伸出到筋材自由端,进而通过位移计与细钢棒相连,由此监测筋材拉拔试验过程不同位置的位移,具体位移点位布置如图4所示。

表1 筋材界面拉拔试验方案

Table 1 Test plan of pullout test for interface between reinforcement and sand

压实度 K/%	含水率 $w$ /%	界面正应力 $\sigma_n$ /kPa	拉拔速率 $v$ /(mm/min)
90、95	0、6、12	5、10、15、25、50、75	0.5
90、95	0	5、10、15、25、50、75	0.5
90	0、6、12	5、10、15、25、50、75	0.5
90	0	15	0.5、1.0、1.5

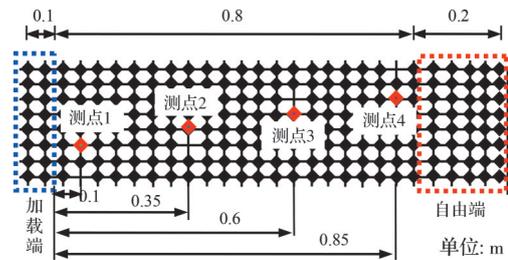


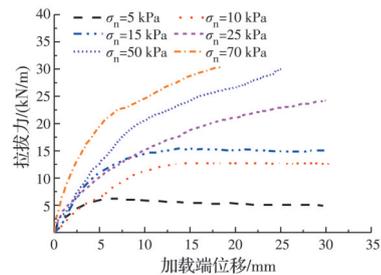
图4 筋材测点布置方式

Fig. 4 Layout of measuring points

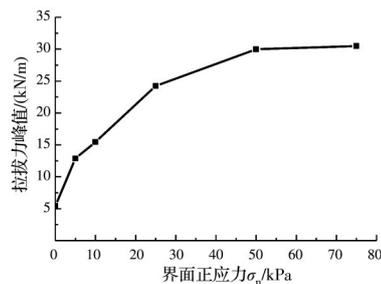
## 2 筋材拉拔试验结果分析

### 2.1 法向荷载对筋材位移分布及拉拔特性的影响

选取填土压实度 $K=90\%$ 、筋材拉拔速率 $v=0.5 \text{ mm/min}$ 和砂土含水率 $w=0\%$ (干砂),分析不同界面正应力 $\sigma_n$ 时,筋材拉拔力与加载端位移曲线的变化特性,如图5所示。由图5(a)可知,在拉拔初始阶段,加载端位移均随着拉拔力增加而增加,当界面正应力 $\sigma_n$ 较小时,如 $\sigma_n=5、10、15 \text{ kPa}$ 时,拉拔力很快达到峰值,随后拉拔力略微减小并最终达到



(a) 拉拔力-加载端位移



(b) 拉拔力峰值-界面正应力

图5 界面正应力对筋-土拉拔特性的影响

Fig. 5 The effect of normal stress on the pullout performance of reinforcement-soil

相对稳定状态,在此阶段加载端位移持续增加直至筋材拔出破坏。而当界面正应力 $\sigma_n$ 增至 50 kPa 及以上时,筋材加载端位移随着拉拔力增加而持续增大,直至筋材拉断破坏,且 $\sigma_n$ 越大,筋材拉断破坏所对应的加载端位移越小。

图 5(b)给出了拉拔过程中筋材拉拔力峰值同界面正应力的关系,显然,当界面正应力较小且筋材为拔出破坏时,拉拔力峰值随界面正应力增加而近似呈线性增加,而当界面正应力持续增加(如 $\sigma_n=50$  kPa 和 75 kPa),拉拔过程中筋材呈现拉断破坏模式时,此时再继续增加界面正应力 $\sigma_n$ ,拉拔力峰值基本不变,且大致为筋材极限抗拉强度 30 kN/m,但界面

正应力越大,峰值拉拔力对应的加载端位移越小。

为了分析不同界面正应力作用下拉拔过程中筋材不同位置处(如图 4 所示)的位移变化,图 6 给出了与加载端不同距离的 4 个测点位移随加载端位移的变化。显然,在相同界面正应力下,随着加载端位移增加,4 个测点依次发生移动,且测点距加载端越远,出现初始位移时对应的加载端位移越大,这点在图 7(a)中亦表现明显。通过对比图 6(a)、(d)及图 7(a)中 $\sigma_n=5$ 、75 kPa 两种情况发现,界面正应力越大,测点初始位移出现滞后性的现象愈加明显,表明筋材沿长度方向各点位移和受力分布呈现显著的不均匀性。

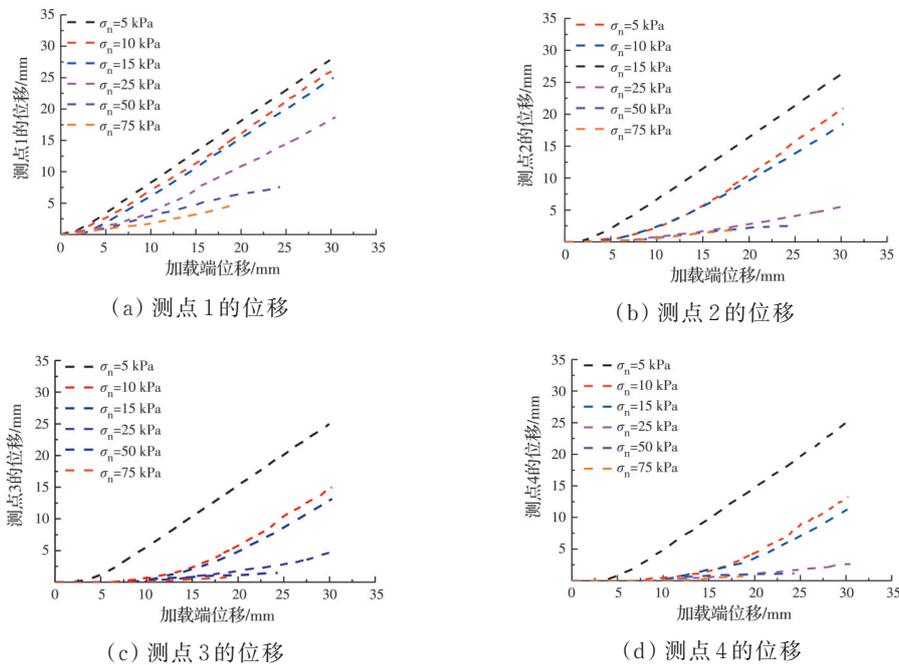


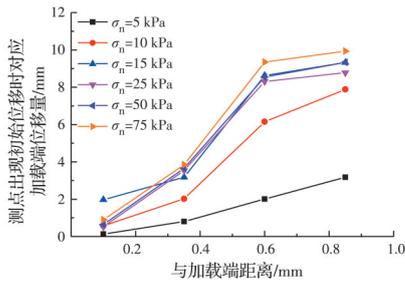
图 6 不同测点的位移与加载端位移的关系曲线

Fig. 6 Relationship of displacement at loading end with the displacement of different measuring points

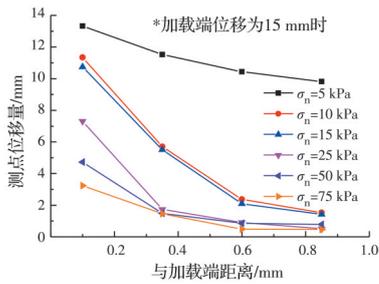
另外,取相同的加载端位移(如 15 mm),分析不同界面正应力下筋材沿长度方向的位移分布,如图 7(b)所示,由图可知,随着界面正应力增加,相同测点处的位移呈现递减趋势,这主要是由于法向荷载增加,一定程度上限制了筋材受力向远端传递,距加载端越远,筋材各点位移减少明显。因此,实际工程中允许加筋土结构适度变形,这有利于筋材沿全长受力并充分发挥筋材的作用。

针对界面正应力 $\sigma_n=5$ 、10、15 kPa,加载端位移为 30 mm 时对应的不同测点位移量进行分析发现,界面正应力 $\sigma_n=5$ 、10、15 kPa 时,相邻位置测点位移量差值随与加载端距离的增加逐渐减小,且当界面正应力较小如 5 kPa 时,相邻位置测点位移量差值较小,拉力沿筋材全长传递,而当界面正应力增大

到 10 kPa 时,相邻位置测点位移差值呈现明显的两极特性,即筋材距自由端较近测点差值明显小于距加载端较近测点差值,表明拉力沿筋材传递呈现出了明显的滞后特性,且界面正应力 $\sigma_n$ 在 5~10 kPa 之间的变化说明界面正应力对拉力沿筋材传递的影响显著。对比界面正应力 $\sigma_n$ 从 5 kPa 增为 10 kPa 和从 10 kPa 增为 15 kPa,图 3 中 1~4 号测点位移量差值依次为 1.65、5.65、10.28、11.68 mm 和 1.55、2.35、1.79、2.15 mm,可以看到界面正应力 $\sigma_n$ 由 5 kPa 增至 10 kPa 时,不同测点位移量差值并不稳定,而由 10 kPa 增至 15 kPa 时,不同测点位移量差值则表现为较稳定,说明当界面正应力增至一定程度后,相同拉拔力下不同测点位移量变化基本呈同步线性变化。



(a) 测点位移时对应的加载端位移



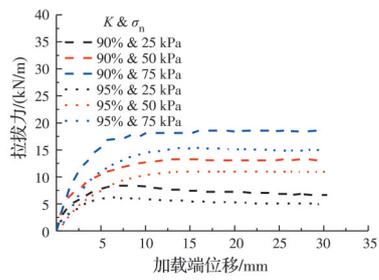
(b) 加载端位移相同时各测点位移

图 7 测点出现初始位移时对应的加载端位移

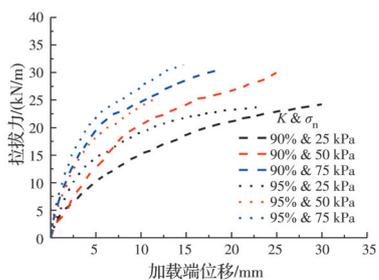
Fig. 7 Displacements at loading end corresponding to the initial displacement of measured points

### 2.2 压实度对筋材位移分布演化及拉拔特性的影响

选取筋材拉拔速率  $v=0.5 \text{ mm/min}$ 、不同界面正应力  $\sigma_n$  和  $w=0\%$  (干砂) 时, 针对两种压实度  $K=90\%$  和  $95\%$ , 分析填土压实度  $K$  对筋-土界面特性的影响。图 8 给出了拉拔试验中不同压实度和界面正应力下筋材拉拔力与加载端位移的关系曲线。



(a) 拔出破坏



(b) 拉断破坏

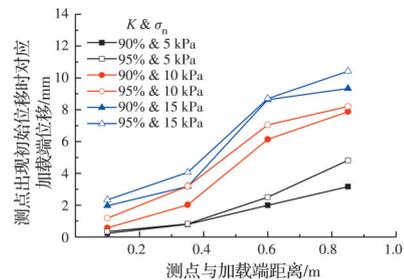
图 8 不同压实度和界面正应力下拉拔力-加载端位移关系曲线

Fig. 8 Relationship of pullout force and displacement at loading end for different compaction degree

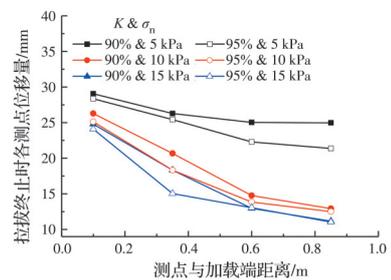
由图 8 可知, 在相同界面正应力下, 压实度  $K$  越大, 即填土压实程度越高, 达到相同加载端位移时所需要拉力越大, 表明压实度越高, 筋-土界面约束越强。

试验发现, 当界面正应力  $\sigma_n \leq 15 \text{ kPa}$  时, 两种压实度下筋材拉拔破坏以拔出破坏为主, 且在拉拔初始阶段拉拔力增长迅速, 随后拉拔力增长速率降低, 直至达到稳定, 如图 8(a) 所示; 而当界面正应力  $\sigma_n > 15 \text{ kPa}$  时, 筋材拉力增长迅速, 且相同拉力作用下加载端位移总体小于低界面正应力工况, 此时筋材拉拔破坏以拉断破坏为主, 如图 8(b) 所示。总体上, 同等条件下, 压实度越高, 拉拔力峰值越大。

为分析拉拔过程中筋材沿长度方向的位移变化特点, 图 9 给出了不同压实度和界面正应力下测点出现初始位移时对应的加载端位移, 以及拉拔终止时测点位移量。显然, 当  $\sigma_n$  相同时, 压实度  $K$  越大, 各测点出现初始位移时所对应的加载端位移越大, 这种现象在界面正应力较大时表现更加明显, 如图 9(a) 所示, 且测点距加载端越远, 出现初始位移所对应的加载端位移越大, 表明压实度越大, 筋-土嵌固咬合作用越明显, 筋材拔出困难, 导致距离拉拔端越远的测点的相对位移变化越小。



(a) 测点初始位移-端部位移



(b) 测点最终位移量

图 9 不同压实度和界面正应力下测点位移变化

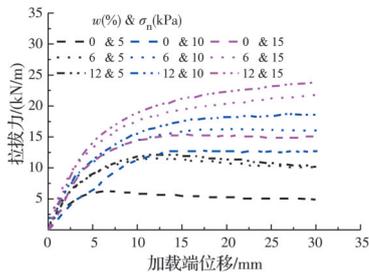
Fig. 9 Displacements of measuring points varied with compaction degree

另外, 由图 9(b) 可知, 随着压实度  $K$  增加, 不同位置的测点最终位移量逐渐减小, 表明随着压实度的增加, 沿筋材长度方向各测点位移的最大值减小, 尤其是界面正应力越高时, 距加载端越远, 沿筋材长度方向的最终位移值越小, 相比之下, 当  $\sigma_n=5 \text{ kPa}$

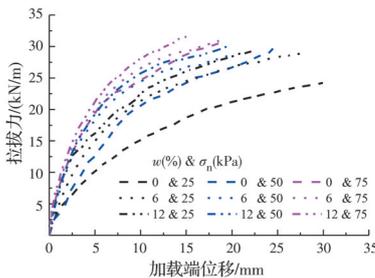
时,各测点位移相差较小,表明筋材拉力沿长度方向传递较均匀,筋材易于被拉拔破坏。然而,当界面正应力较小如 5 kPa 时,随着压实度  $K$  增加,填土越易于限制筋材位移,而当界面正应力较大时,填土压实度对筋材各测点位移的影响减弱。

### 2.3 含水率对拉拔特性及筋材位移分布规律的影响

选取筋材拉拔速率  $v=0.5 \text{ mm/min}$ 、不同界面正应力  $\sigma_n$  和压实度  $K=90\%$ , 针对砂土含水率  $w=0\%$  (干砂)、 $6\%$  和  $12\%$ , 分析砂土含水率变化对筋-土界面拉拔特性的影响。图 10 给出了砂土不同含水率下筋材拉拔力与加载端位移关系曲线。



(a) 拔出破坏



(b) 拉断破坏

图 10 砂土不同含水率下拉拔力与加载端位移关系曲线

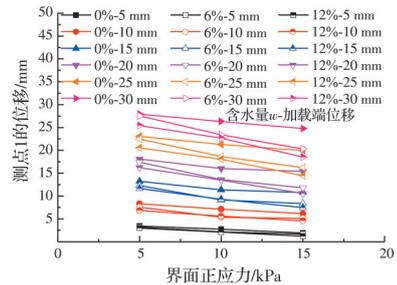
Fig. 10 Relationship of pullout force and displacements at loading end for different water contents

由图 10(a) 可知,当界面正应力较小且筋材以拔出破坏为主时,随含水率  $w$  增加,筋材拉拔力峰值逐渐增大,达到拉拔力峰值时,对应的加载端位移量也增加,表明当干砂遇水即含水率增加时,砂土黏聚力会适当增加,一定程度上增强了筋-土界面的吸附作用及相互作用,从而使筋材拔出所需拉拔力增加,如砂土含水量由  $0\%$  增至  $6\%$  时,界面黏聚力增加明显,但含水率继续增加时,如当  $w=12\%$  时,相比  $w=6\%$ ,增加幅度明显放缓,表明当含水率增大到一定程度时,筋-土界面的相互咬合会减弱。因此,在实际加筋土挡墙设计中,应严格控制回填土含水率,并做好挡墙的防排水措施。

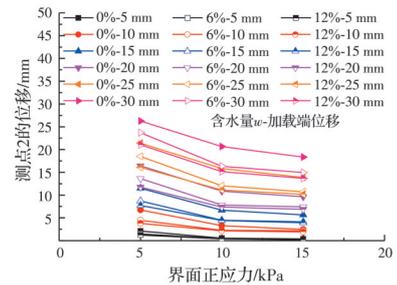
对比界面正应力较大且筋材以拉断破坏为主的情况,筋材拉拔力峰值随含水率的增加而增大,试验结束对应的加载端位移量不断减小,而且随着

界面正应力增加,含水率对界面特性的影响减弱,如  $\sigma_n=75 \text{ kPa}$  时,3 种含水率下筋材拉拔力与加载端位移曲线在拉拔破坏前基本重合,表明此时界面正应力会极大影响筋-土界面的拉拔特性。

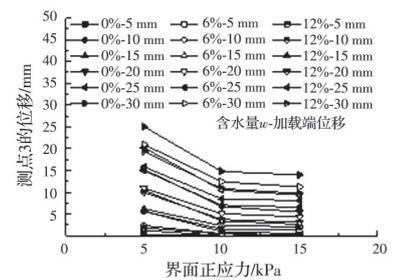
此外,图 11 给出了筋材测点位移随加载端位移的变化。显然,当含水率  $w$  由  $0\%$  (干砂) 相继增至  $6\%$  和  $12\%$  时,且加载端位移相同时,格栅各测点位移不断减小,即随着含水率增加且未明显大于最佳含水率时,埋置于土中的格栅越难拉出,相应位移量也越小。进而,图 12 给出了含水率为  $0\%$  (干砂)、 $6\%$  和  $12\%$ , 界面正应力  $\sigma_n=5、10、15 \text{ kPa}$  时,各测



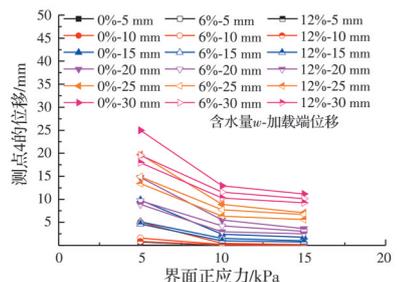
(a) 测点 1 (距加载端 0.1 m)



(b) 测点 2 (距加载端 0.35 m)



(c) 测点 3 (距加载端 0.6 m)



(d) 测点 4 (距加载端 0.85 m)

图 11 不同含水率下筋材不同位置处位移变化

Fig. 11 Measured displacement varied with water content

点发生初始位移和拉拔终止时的位移量与对应的加载端位移的关系曲线。

由图 12(a)可知,在相同位置处测点,随着填土含水率增大,筋材初始移动对应加载端位移量增加,即筋材初始移动时刻后延,增加填土含水率导致筋材抗拔破坏能力增强,因此,对于相同位置处测点,试验终止时筋材最终位移量随着含水率增加而减小,如图 12(b)所示。

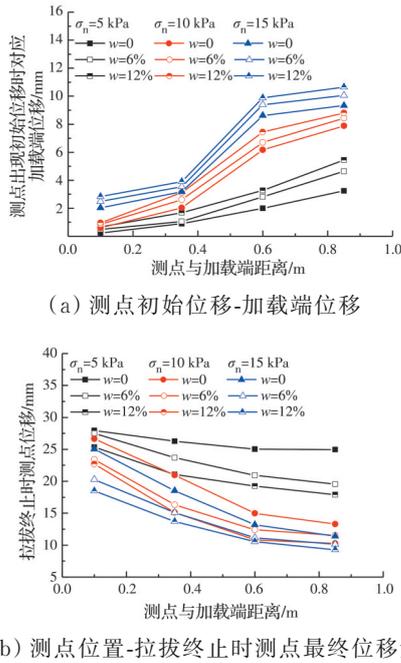


图 12 测点位移与此加载端位移变化曲线  
Fig. 12 Variation curves of measured displacement with pullout end displacement

### 2.4 拉拔速率对筋材位移分布及拉拔特性的影响

选取界面正应力  $\sigma_n=15$  kPa、压实度  $K=90\%$  和砂土含水率  $w=0\%$  (干砂),采用拉拔速率  $v=0.5、1.0、1.5$  mm/min 来研究其对界面特性的影响。

图 13(a)给出了不同拉拔速率下拉拔力与加载端位移的关系曲线。由图可知,随着拉拔速率增加,加载端位移相同时,对应拉拔力不断增加,且筋材拉拔力增加幅度逐渐减小,加载端位移曲线存在软化现象。当拉拔速率增加时,筋材拔出破坏时间缩短,致使所需拉拔力有所增大,拉拔力峰值相应增加,这一点通过图 13(b)所示的拉拔力峰值与拉拔速率的关系可以清晰看出。

图 14给出了不同拉拔速率下格栅测点初始位移及最终位移量的变化曲线。由图 14(a)可知,随着拉拔速率增加,筋材发生移动时所对应的加载端位移量随之减小,即筋材更快被拉出,且拉拔速率增加至一定程度后这种影响并不明显。由图 14(b)

可知,随着拉拔速率增加,筋材测点最终位移量呈增大趋势,但增幅随着测点位置与加载端距离的增加而减缓。

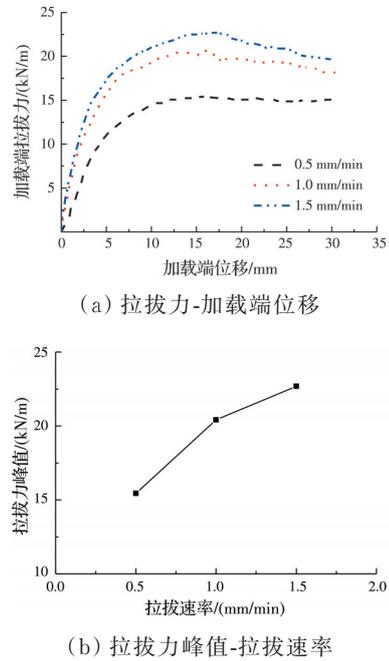


图 13 不同拉拔速率对筋-土拉拔特性影响

Fig. 13 The effect of pullout velocity on the interface properties of reinforcement and sand

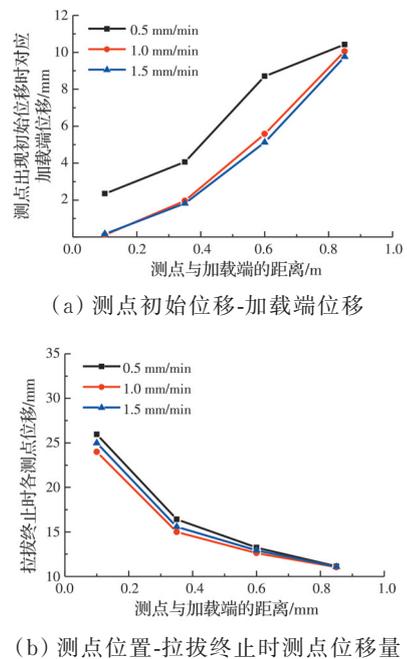


图 14 测点位移与加载端位移变化曲线

Fig. 14 Variation curves of measured points displacement with pullout end displacement

图 15给出了加载端位移相同时不同拉拔速率下,筋材位移沿长度的分布规律。由图 15可知,当拉拔速率和加载端位移相同时,距加载端越远,筋

材位移越小,且呈现出一种非线性减小趋势,主要是由于沿筋材长度方向拉力传递不均匀所致。

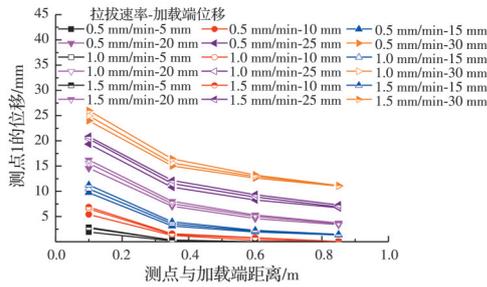


图 15 筋材位移沿长度方向的分布

Fig. 15 Distribution of geogrids displacement

同样可知,与加载端相同距离的位移测点,其位移值随拉拔速率增大而略微增加,且增幅随着测点与加载端距离增加而减小,这是因为随着拉拔速率的增加,荷载沿筋材长度方向的传递速度加快,表明拉拔速率在 0.5~1.5 mm/min 范围内变化时,对距加载端较远处的筋材位移影响较小。

2.5 拔出破坏模式时多因素对筋材变形量的影响

拉拔试验中筋材以拔出破坏和拉断破坏为主,其中拔出破坏时,筋材位移主要由筋材移动和筋材拉伸变形组成,拉断破坏时筋材位移则主要为筋材拉伸变形累积,试验结果表明拉断破坏时筋材内部变形量较小,即破坏时表现为加载端筋材拉伸变形直至端部筋材被拉断破坏,以下主要分析多因素对拔出破坏模式下筋材不同分段的变形量,由此进一步分析筋-土界面作用机理。

用 A<sub>1-2</sub>段、B<sub>2-3</sub>段和 C<sub>3-4</sub>段依次表示图 4 所示测点 1、2、3 和 4 处相邻测点间筋材,选取筋材拉拔速率  $v=0.5$  mm/min、含水率  $w=0\%$  和压实度  $K=90\%$ ,针对界面正应力  $\sigma_n=5、10$  和  $15$  kPa,分析界面正应力对筋材分段变形量影响。图 16 给出了砂土不同界面正应力下筋材不同分段变形量与加载端位移关系曲线。由图 16 可知,当界面正应力相同时,随着筋材分段位置与拉拔端距离增加,筋材变形量逐渐降低,说明随筋材位置后移,应力传递逐

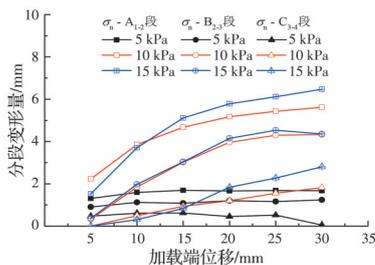


图 16 不同界面正应力下筋材分段变形量与加载端位移关系曲线

Fig. 16 The effect of normal stress  $\sigma_n$  on the relationship between section deformation and displacement at load end

渐减弱,相应变形量降低。且随界面正应力  $\sigma_n$  的增加,同一分段筋材变形量增加,这主要是因为筋材移动阻抗作用随界面正应力的增加得到加强,筋材更偏向于拉伸。

选取筋材拉拔速率  $v=0.5$  mm/min、不同界面正应力  $\sigma_n=5、10$  kPa 和含水率  $w=0\%$ ,针对填土压实度  $K=90\%$  和  $95\%$ ,分析压实度变化对筋材分段变形量的影响,结果如图 17 所示。由图可知,随着压实度  $K$  的增加,相同分段的筋材变形量增加,主要原因与界面正应力影响机理相同,即增加压实度,筋-土界面摩擦作用得到增强,同时提升土颗粒和格栅网孔的咬合能力,筋材难以发生移动,反而促进了筋材拉伸,即筋材分段变形量得到增加。

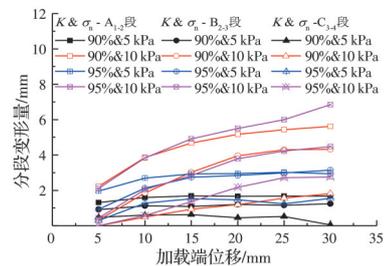


图 17 不同压实度下筋材分段变形量与加载端位移关系曲线  
Fig. 17 The effect of compaction degree on the relationship between the section deformation and the end displacement

选取筋材拉拔速率  $v=0.5$  mm/min、不同界面正应力  $\sigma_n=5$  kPa 和压实度  $K=90\%$ ,针对砂土含水率  $w=0\%$  (干砂)、 $6\%$  和  $12\%$ ,分析砂土含水率变化对筋材分段变形量的影响,结果如图 18 所示。由图 18 可知,随着含水率  $w$  增加,相同分段的筋材变形量基本呈增加趋势,而当  $w=6\%$  和  $12\%$  时, B<sub>2-3</sub>段变化趋势的差异性是由试验数据的量测误差导致的,因为所用砂土的最佳含水率  $w_{opt}$  约为  $11\%$ ,随着含水率由  $0\%$  增至  $12\%$ ,砂土黏聚力提升,从而增强了筋-土界面的吸附作用和相互作用,进而有利于限制筋材移动,在拉拔力不断提升情况下,反而提升了筋材的拉伸变形量。

2.6 筋-土界面强度参数分析

为分析不同因素影响下的筋-土界面强度参数,

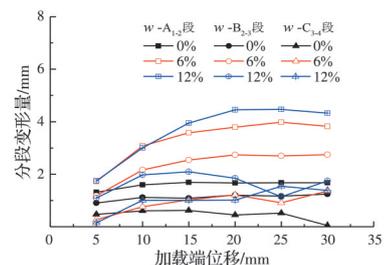


图 18 不同含水率下筋材分段变形量与加载端位移关系曲线  
Fig. 18 The effect of moisture content on the relationship between section deformation and the end displacement

基于不同工况下筋材拉拔力峰值来获得界面剪应力,并结合界面正应力确定筋-土界面强度参数,即筋-土界面的摩擦角  $\varphi_{sg}$  和黏聚力  $c_{sg}$ ,考虑到界面正应力  $\sigma_n=50、75$  kPa 时筋材是拉断破坏,其破坏模式与  $\sigma_n=5、10、15、25$  kPa 时不同,因此,选取界面正应力  $\sigma_n=5、10、15、25$  kPa 时确定界面强度参数,图 19 给出了 3 种填土含水率时筋-土界面强度参数的拟合曲线。

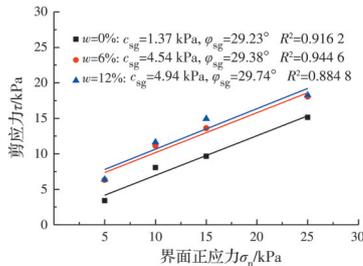


图 19 不同含水率下筋-土界面强度参数拟合曲线

Fig. 19 Fitting curves of the shear strength parameters of reinforcement-soil interface under different water contents

由图 19 可知,界面剪应力  $\tau$  和正应力  $\sigma_n$  的关系曲线拟合程度较好,由此确定含水率  $w=0\%、6\%$  和  $12\%$  时,对应的筋-土界面黏聚力  $c_{sg}=1.37、4.54、4.94$  kPa,界面摩擦角  $\varphi_{sg}=29.23^\circ、29.38^\circ$  和  $29.74^\circ$ 。显然,随着填料含水率增加,筋-土界面黏聚力呈增加趋势,这也是图 10 中填土含水率增加导致拉拔力峰值提高的主要原因,当填土含水率由  $6\%$  增至  $12\%$  时,筋-土界面黏聚力增幅明显减小,事实上,既有研究表明当含水率接近填土最佳含水率时,筋-土界面黏聚力达到较大<sup>[18]</sup>,本文研究成果符合当前研究结论。然而,填土含水率对筋-土界面摩擦角的影响相对较小,由基于拟合曲线确定的界面摩擦角  $\varphi_{sg}$  可知,筋-土界面摩擦系数  $\tan \varphi_{sg}$  约为  $0.78 \tan \varphi$ ,略小于规范针对粗集料所推荐的界面摩擦系数  $0.8 \tan \varphi$ <sup>[19]</sup>。

已有研究结果表明,含水率对筋-土界面强度参数的影响明显,筋-土界面黏聚力随含水率增大呈现先增大后减小趋势,即存在界限含水率,在达到界限含水率之前,黏聚力呈增大趋势,高于界面含水率时则呈现递减趋势<sup>[20]</sup>,且研究结果表明该界限含水率与填料最佳含水率密切相关,笔者研究结果符合筋-土界面强度参数在含水率逐步增加到界限含水率时亦增加的结论。

此外,图 20 给出了不同压实度下筋-土界面强度参数。由图 20 可知,当填土压实度  $K$  由  $90\%$  增至  $95\%$  时,筋-土界面黏聚力增加约  $31\%$ ,即由  $1.38$  kPa 增至  $1.81$  kPa,而界面摩擦角  $\varphi_{sg}$  由  $29.23^\circ$  增至  $31.10^\circ$ ,表明提高填土压实度,使格栅与填土间

的嵌固咬合作用增强,有利于增强筋-土界面强度。因此,提高压实度有助于提升加筋土结构的整体稳定性。

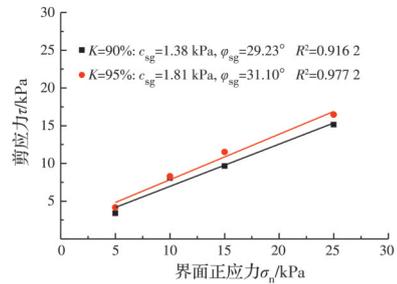


图 20 不同填土压实下筋-土界面强度参数曲线

Fig. 20 Fitting curves of the shear strength parameters of reinforcement-soil interface under different compaction degree

### 3 结论

1)拉拔过程中筋材位移与至加载端的距离密切相关,距加载端越远则位移越小,呈现出显著的非线性递减趋势,即土中筋材各点初始位移均不同程度地滞后于加载端位移。

2)筋-土界面正应力、填土压实度和含水率对筋材位移分布影响明显,增加界面正应力、填土压实度或含水率,各点位移滞后性越明显,且相同拉拔力下,距加载端越远,对筋材位移影响越弱;增加拉拔速率,筋材各点最终位移略微增加。

3)格栅拉拔力峰值随界面正应力、填土压实度与含水率和拉拔速率增加而递增,且筋材拉拔以整体拔出和拉断破坏两种模式为主。当筋材拔出破坏时,拉拔力峰值与加载端位移呈近似线性关系。

4)筋材拔出破坏模式下,筋材变形量随界面正应力、含水率、压实度的增加而递增,当筋材在拉力作用下发生移动时,筋材位移为筋材移动累积量,当筋材相对难以移动时,反而一定程度上增加了筋材自身的拉伸变形量。

5)增加填土压实度和含水率,筋-土界面嵌固咬合能力增强,界面黏聚力和摩擦角增加,但摩擦角增幅较小,且当填土接近最佳含水率时,界面黏聚力较强。因此,实际挡墙中应适当控制填料含水率。

### 参考文献

[1] ABD A H, UTILI S. Design of geosynthetic-reinforced slopes in cohesive backfills [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(6): 627-641.  
 [2] AFZALI-NEJAD A, LASHKARI A, SHOURIJEH P T. Influence of particle shape on the shear strength and dilation of sand-woven geotextile interfaces [J].

- Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(1): 54-66.
- [3] KOERNER R M. Design with geosynthetics [M]. 5th Edition. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc, 2010.
- [4] MARTINEZ A, FROST J D. The influence of surface roughness form on the strength of sand-structure interfaces [J]. Géotechnique Letters, 2017, 7(1): 104-111.
- [5] MCGOWN A, ANDRAWES K Z, AL-HASANI M M. Effect of inclusion properties on the behaviour of sand [J]. Géotechnique, 1978, 28(3): 327-346.
- [6] 徐超, 廖星越. 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 C, LIAO X Y. Researches on interaction mechanism between geogrid and sand by pull-out tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2): 423-428. (in Chinese)
- [7] TAVAKOLI MEHRJARDI G, KHAZAEI M. Scale effect on the behaviour of geogrid-reinforced soil under repeated loads [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(6): 603-615.
- [8] 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 W B, ZHOU J. Experimental research on interface friction of geogrids and soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 965-970. (in Chinese)
- [9] PUNETHA P, MOHANTY P, SAMANTA M. Microstructural investigation on mechanical behavior of soil-geosynthetic interface in direct shear test [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, 45(3): 197-210.
- [10] ABDI M R, SADRNEJAD S A, ARJOMAND M A. Clay reinforcement using geogrid embedded in thin layers of sand [J]. International Journal of Civil Engineering, 2009, 7(4): 224-235.
- [11] 万亮, 杨和平. 影响格栅加筋膨胀土拉拔试验的新因素分析[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(2): 412-419.  
WAN L, YANG H P. Analysis on new factors affecting geogrid pullout test in expansive soil [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 412-419. (in Chinese)
- [12] 郑俊杰, 周燕君, 曹文昭, 等. 不同网孔形状格栅加筋土界面特性试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(3): 482-488.  
ZHENG J J, ZHOU Y J, CAO W Z, et al. Experimental study of interface behavior of geogrids with different aperture shapes [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(3): 482-488. (in Chinese)
- [13] LIU F Y, YING M J, YUAN G H, et al. Particle shape effects on the cyclic shear behaviour of the soil-geogrid interface [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 991-1003.
- [14] 刘续, 唐晓武, 申昊, 等. 加筋土结构中筋材拉拔力的分布规律研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 800-804.  
LIU X, TANG X W, SHEN H, et al. Stress distribution of reinforcement of reinforced soil structures under drawing force [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 800-804. (in Chinese)
- [15] 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 J Q, ZHOU Y F, LU M L, et al. Pull-out test and analysis on geogrid mechanical characteristics [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2016, 41(1): 134-140. (in Chinese)
- [16] 王孝存, 孔祥利, 周健. 筋土界面变形破坏模式细观试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(4): 804-809.  
WANG X C, KONG X L, ZHOU J. Mesoscopic study of the interface failure modes between soil and geosynthetics [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(4): 804-809. (in Chinese)
- [17] 李丽萍, 赖丰文, 陈福全. 土工合成材料加筋土界面渐进拉拔行为的理论解析[J]. 有色金属(矿山部分), 2016, 68(4): 74-80.  
LI L P, LAI F W, CHEN F Q. A simple analysis solution to predict progressive pullout behavior of geosynthetics in reinforced soil [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2016, 68(4): 74-80. (in Chinese)
- [18] 肖成志, 冯晓静. 土工格栅-黏性土界面特性的拉拔试验分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(3): 47-51, 83.  
XIAO C Z, FENG X J. Pullout-test analysis on properties of interface between geogrid and clay [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(3): 47-51, 83. (in Chinese)
- [19] BERG R B, BARRY R C, NARESH C S. Design of mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes-Volume I: Report No. FHWA-NHI-10-024 [R]. National Highway Institute Federal Highway Administration, Washington, D. C., USA. 2009.
- [20] 谢宝琮, 张向东, 杜常博. 不同含水率下尾矿与土工格栅界面特性的试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(1): 127-133.  
XIE B J, ZHANG X D, DU C B. Experimental study of interface characteristics between geogrid and tailings with different water contents [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(1): 127-133. (in Chinese)