

双向和三向土工格栅筋土界面特性对比试验研究

曹文昭^{1,2}, 郑俊杰^{1†}, 周燕君³

(1.华中科技大学 土木工程与力学学院,湖北 武汉 430074;

2.中冶建筑研究总院(深圳)有限公司,广东 深圳 518055;3.中国冶金地质总局二局,福建 福州 350108)

摘要:以双向土工格栅SS20和三向土工格栅TX160为对象,通过开展室内直剪试验和拉拔试验,并对拉拔试验中土工格栅试样4个断面的位移进行量测,研究了SS20和TX160的变形及筋土界面特性,对比分析了SS20和TX160方案的筋土界面剪应力发挥过程和作用机制、土工格栅变形、筋土界面剪胀(缩)特性和强度参数,同时探讨了试验方法对试验结果的影响.研究表明:拉拔试验中,TX160的筋土相互作用集中在拉拔端附近,而SS20沿试样全长均能较好地发挥其作用;相比于SS20,增大竖向压力可以更好地增强TX160与周围填料颗粒的相互作用;SS20方案的峰值摩擦角和残余摩擦角均大于TX160方案,但黏聚力刚好相反;竖向压力对直剪试验和拉拔试验所得筋土界面强度参数均有明显影响,实际工程应用中应根据土工格栅的实际应力状态确定合理的试验竖向压力.

关键词:土工格栅;筋土界面特性;直剪试验;拉拔试验;筋土界面参数

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Comparative Experimental Investigation of Geogrid-soil Interface Behavior of Biaxial and Triaxial Geogrid

CAO Wenzhao^{1,2}, ZHENG Junjie^{1†}, ZHOU Yanjun³

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Central Research Institute of Building and Construction(Shenzhen) Co Ltd, MCC Group, Shenzhen 518055, China;

3. No.2 Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Laboratory direct shear test and pullout test were conducted focusing on biaxial geogrid (SS20) and triaxial geogrid(TX160) to investigate the deformation and geogrid-soil interface behavior. The displacements of geogrid specimens were recorded at 4 sections in the pullout test. The development of geogrid-soil interface shear stress, geogrid deformation, shear dilatancy/shrinkage behavior and interface parameters were analyzed, and the effect of test methods on the testing results was also investigated. The results show that the interaction between the geogrid and soil of TX160 concentrates at the vicinity of pullout end. However, this interaction is well developed along the full length of SS20 specimens. Meanwhile, this interaction of TX160 can be better enhanced with the increase of vertical stress compared with that of SS20. Both the peak and residual friction angles of SS20 case are greater than

* 收稿日期:2018-03-15

基金项目:长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2017513/KY),CRSRI Open Research Program(CKWV2017513/KY);国家重点研发计划项目(2016YFC0800200),National Key R & D Program of China(2016YFC0800200);中国博士后科学基金资助项目(2017M612459),China Postdoctoral Science Foundation(2017M612459)

作者简介:曹文昭(1990—),男,江西瑞昌人,华中科技大学助理研究员,博士

† 通讯联系人,E-mail:zhengjj@hust.edu.cn

that of TX160 case, while the cohesion is just opposite. The vertical stress has obvious effect on the geogrid-soil interface strength parameters obtained from both the direct shear test and pullout test. Thus, the vertical stress adopted in the test should be determined based on the actual stress status of the geogrid for engineering application.

Key words: geogrid; geogrid-soil interface behavior; direct shear test; pullout testing; geogrid-soil interface parameters

土工格栅的加筋作用必须通过对周围填料的影响来实现,因此,土工格栅与填料之间的筋土界面特性是土工格栅加筋机理研究的中心问题,直接影响着加筋土结构的稳定性和耐久性^[1],在加筋土结构设计和分析中至关重要.三向土工格栅由聚丙烯(PP)板材经整体冲孔、拉伸而成,与矩形网孔的双向土工格栅相比,三向土工格栅独特的三角形网孔、肋条截面和节点构造使其具有更稳定的结构形式和更好的节点有效性,提高了土工格栅网孔对周围填料颗粒的约束和嵌锁作用,进而较大程度地改善了其加筋性能^[2-3].现有关于土工格栅筋土界面特性的研究多以单向和双向土工格栅为对象,而针对双向和三向土工格栅的筋土界面特性及作用机理开展的对比研究很少见诸于文献,仅有的部分数值模拟工作也集中于土工格栅拉伸特性的研究^[2,4].

目前,国内外学者主要采用直剪试验和拉拔试验研究土工格栅的筋土界面特性.马时冬^[5]通过分析土工格栅与粗粒土(砂土、砂砾和残积土)拉拔过程中的界面强度,指出土工格栅配合砂砾石的加筋效果最佳,工程应用中应注意填料粒径与土工格栅网孔尺寸的配合从而保证嵌锁作用的充分发挥.Teixeira等^[6]分别对土工格栅纵肋和横肋的拉拔阻力和变形特征进行了研究,指出拉拔阻力的构成及发挥程度与拉拔位移密切相关.史旦达等^[7]通过直剪试验和拉拔试验研究了砂土和黏性土与单、双向土工格栅的界面特性,发现双向土工格栅对填料颗粒的咬合嵌锁能力大于单向土工格栅,填料密实度和法向应力对筋土界面剪切特性影响较大.郑俊杰等^[8]考虑两种不同拉拔方向,研究了拉拔试验中三向土工格栅的筋土界面特性,包括筋土界面摩阻力分布、土工格栅变形与破坏模式及筋土界面剪切强度等.周芬等^[9]通过无侧限压缩试验,研究了黏土压实度对圆柱体加筋土试样竖向变形的影响,发现压实度的提高可以使筋材的约束作用得到更充分的发挥.

虽然直剪试验和拉拔试验在筋土界面特性研究中的应用均十分广泛,但由于试验原理的差异,

直剪试验和拉拔试验所得筋土变形特征和界面强度参数仍有很大不同^[10].文献[11]建议对于刚度较小的土工合成材料采用直剪试验,对刚度较大的土工合成材料则适合采用拉拔试验.包承纲^[12]认为拉拔试验可以清晰反映筋土界面剪切演变过程,特别是竖向压力较低时,拉拔试验的成果比直剪试验更加充分和清晰.刘文白等^[13]建议筋土相对位移较小时采用直剪试验,当土工格栅两面都发生较大相对位移时,认为拉拔试验更为合适.

本文以双向和三向土工格栅为研究对象,分别开展直剪试验和拉拔试验,对比分析试验过程中双向和三向土工格栅的变形和筋土界面特性,探讨试验方法对试验结果的影响,以指导双向和三向土工格栅的加筋机理研究和工程应用优选.

1 直剪试验和拉拔试验

1.1 试验设备

试验采用长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室的直剪仪和拉拔仪.直剪仪为美国 Geocomp 公司研制的 ShearTrac-II 室内大型直剪仪,拉拔仪由长江科学院自主设计研制.两种试验设备均主要由水平和竖向荷载加载系统、剪切盒、应力传感器和位移传感器组成,其中直剪仪采用微步进电机进行加载,拉拔仪为液压伺服加载,两者均可通过操作面板在试验准备阶段对剪切盒或夹具的初始位置进行快速调整.根据应力传感器和位移传感器的反馈,两套试验设备均可通过计算机程序实时显示和控制试验过程,并由应力传感器、位移传感器及配套软件对试验数据进行自动采集.直剪仪上盒有效尺寸为 305 mm×305 mm×100 mm,下盒比上盒长 115 mm,以避免试验过程中因试样剪切面积不断减小而引起的试验误差^[14].拉拔仪的上、下剪切盒尺寸均为 600 mm×300 mm×150 mm,盒宽与直剪仪相近.

1.2 试验材料

试验用砂为公路灌砂法标准用砂,具体技术指标见表 1,最大颗粒粒径不超过 1 mm,试验过程中保持砂样的干燥清洁.通过砂的相对密度试验,获得标准砂的最小干密度为 1.329 g/cm³,最大干密度为 1.646 g/cm³.为了提高试验结果的可比性,土工格栅试样分别选用整体冲孔拉伸的高密度聚乙烯(HDPE)双向土工格栅 SS20 和聚丙烯(PP)三向土工格栅 TX160,由坦萨公司提供,2 种土工格栅的各项技术指标见表 2.由表 2 可知:SS20 和 TX160 的网

孔肋条长度和单位面积质量均非常接近;肋条截面均为矩形,但 TX160 的肋条厚度约为肋条宽度的 1.2~1.6 倍,且大于 SS20 的肋条厚度,而 SS20 的肋条宽度约为厚度的 2~3 倍;TX160 的节点厚度小于 SS20,但节点效率却比 SS20 高.

表 1 标准砂技术指标

Tab.1 Technical indices of standard sand

| 限制粒径 | 中值粒径 | 有效粒径 | 不均匀系数 | 曲率系数 | 最大孔隙比 | 最小孔隙比 |
|--------------------|--------------------|--------------------|----------|---------|---------------|---------------|
| d_{60}/mm | d_{30}/mm | d_{10}/mm | 系数 C_u | 数 C_c | 隙比 e_{\max} | 隙比 e_{\min} |
| 0.48 | 0.41 | 0.25 | 1.92 | 1.40 | 0.994 | 0.610 |

表 2 土工格栅技术指标

Tab.2 Technical indices of geogrid specimens

| 格栅类型 | 肋条长度/mm | | | 肋条宽度/mm | | | 肋条厚度/mm | | | 节点厚度/mm | 肋条截面 | 网孔形状 | 单位面积质量/(kg·m ⁻²) | 节点效率/% |
|-------|---------|----|----|---------|-----|-----|---------|-----|-----|---------|------|------|------------------------------|--------|
| | 纵向 | 横向 | 对角 | 纵向 | 横向 | 对角 | 纵向 | 横向 | 对角 | | | | | |
| SS20 | 39 | 39 | — | 2.2 | 2.4 | — | 1.1 | 0.8 | — | 4.1 | 矩形 | 矩形 | 0.230 | 95 |
| TX160 | — | 40 | 40 | — | 1.3 | 1.1 | — | 1.5 | 1.8 | 3.1 | 矩形 | 三角形 | 0.228 | 100 |

1.3 试验方案

依据《土工合成材料试验规程》(以下简称《规程》)[15]分别开展直剪试验和拉拔试验,对比土工格栅 SS20 和 TX160 的筋土界面剪切特性及土工格栅变形特征.拉拔试验中,为量测土工格栅试样沿拉拔方向的变形随拉拔过程的变化规律,在土工格栅试样的 4 个断面上选取若干测点,采用钢弦连接电阻位移计(LVDT)或百分表来量测各测点的位移[8],并通过静态应变采集仪实现位移数据的自动采集,如图 1 所示.

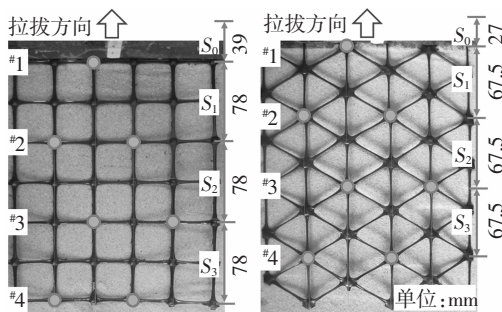
两种试验中均采用分层压实制样,通过严格控制每层填砂的质量和厚度,使填砂相对密实度保持一致,均为 0.9,对应的干密度为 1.608 g/cm³.直剪试验中,上、下剪切盒内均为压实砂土,土工格栅试样铺设于上、下剪切盒之间,且长度大于下盒长,以保证直剪试验过程中土工格栅试样的剪切面积不发生变化.拉拔试验中,为避免拉拔过程中土工格栅试样过早发生破坏,开展了系列预备性试验,以确定合理的试验所用土工格栅试样尺寸及竖向压力 σ_v .试验方案见表 3,为确保试验结果的可靠性,各级 σ_v 对应的直剪试验和拉拔试验均重复多次.

表 3 试验方案

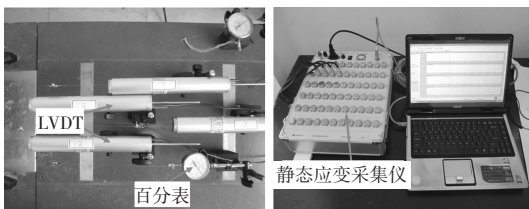
Tab.3 Testing program

| 试验方法 | 格栅类型 | 竖向压力/kPa | 试样尺寸/(mm×mm) |
|------|-------|-------------------|--------------|
| 直剪试验 | SS20 | 50, 100, 150, 200 | 305 × 275 |
| | TX160 | 50, 100, 150, 200 | 305 × 255 |
| 拉拔试验 | SS20 | 10, 20, 30, 40 | 235 × 195 |
| | TX160 | 10, 20, 30, 40 | 225 × 195 |

注:试样尺寸仅为土工格栅试样实际埋入砂土内的尺寸(长×宽).



(a)土工格栅试样测点布置



(b)土工格栅试样测点位移量测

图 1 土工格栅试样测点布置与位移量测

Fig.1 Layout and displacement measurement of the monitoring nodes on geogrid specimens

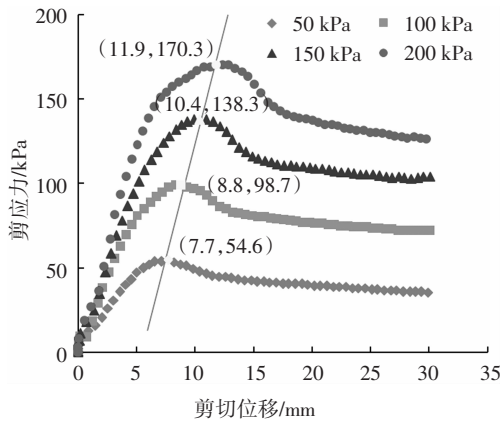
试验速率对筋土界面特性的影响较大,试验速率越大,筋土界面的剪切阻力增大,则试验结果偏高.《规程》建议的直剪试验剪切速率为(1±0.2) mm/min,拉拔速率视土性而定,一般采用 0.2~3.0 mm/min,对砂性土可采用 0.5 mm/min;但徐超等[16]发现只要直剪速率不超过一定界限,就对筋土界面强度的影响不大;史旦达等[7]也发现拉拔速率对双向土

工格栅与砂土界面强度的影响不大,当拉拔速率从 0.53 mm/min 增加到 5.2 mm/min 时,剪应力峰值甚至出现了略微下降.因此,本文直剪试验和拉拔试验中的水平荷载均采用应变控制加荷,直剪速率和拉拔速率均为 1 mm/min,最大直剪位移为 30 mm,最大拉拔位移为 20 mm.

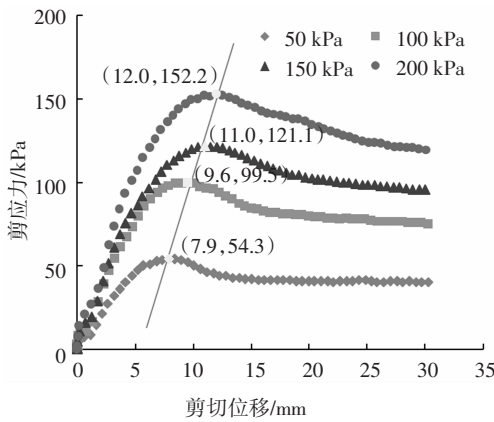
2 试验结果分析

2.1 剪应力-剪切/拉拔位移关系

图 2 为直剪试验所得 SS20 和 TX160 方案的筋土界面剪应力-剪切位移($\tau-\delta$)关系曲线.2 种方案的 τ 均先随 δ 的增大而快速增大,峰值剪应力 τ_p 非常显著,随后 τ 呈现明显的软化特征, σ_v 越大,软化程度也越大.SS20 方案的剪应力软化速率在 σ_v 较小时较为均匀,随 σ_v 的增大,剪应力软化速率先快后缓的趋势越明显,但 TX160 方案刚好相反, τ 在 σ_v 较小时先快速软化,然后缓慢减小, σ_v 越大,剪应力软化速率则越均匀.



(a)SS20 方案



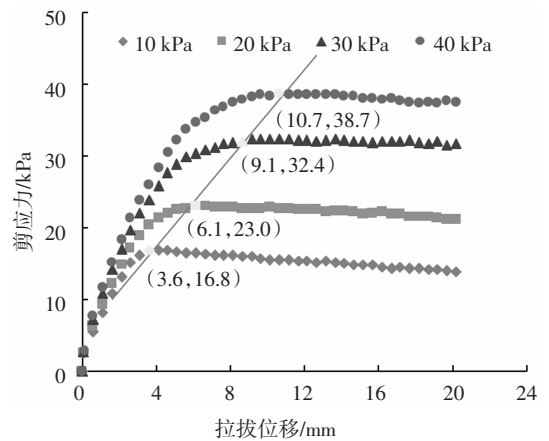
(b)TX160 方案

图 2 直剪试验剪应力-剪切位移关系曲线

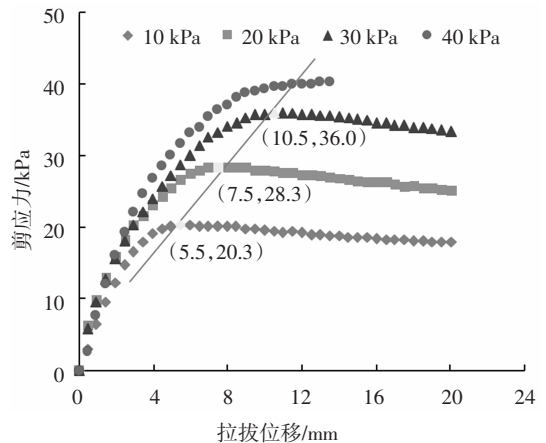
Fig.2 Relation between shear stress and shear displacement of direct shear test

2 种方案的 τ_p 对应的剪切位移 δ_p 均随 σ_v 的增大而增大,两者之间呈现良好的线性关系, σ_v 相同时,SS20 方案的 δ_p 均略小于 TX160 方案,总体而言,2 种方案的 δ_p 均不大, $\sigma_v = 200$ kPa 时,SS20 和 TX160 方案的 δ_p 分别为 11.9 mm 和 12.0 mm.假设筋土界面的剪切变形沿剪切方向均匀分布,根据直剪试验中剪切面的长度,即上剪切盒的盒长(305 mm),将 δ_p 换算成剪切应变,仅分别为 3.90%和 3.93%.

拉拔试验中,根据土工格栅试样埋入砂土内的面积,将拉拔力换算成筋土界面剪应力,图 3 为拉拔试验所得 SS20 和 TX160 方案的筋土界面剪应力-拉拔位移($\tau-d$)关系曲线.2 种方案的 τ 均先随 d 的增大而快速增大,不同的是,SS20 方案仅在 $\sigma_v = 10$ kPa 时有较明显的 τ_p 和软化特征,其他 σ_v 下的 τ 则随 d 的增大而逐渐趋于稳定,而 TX160 方案在不同 σ_v 下的 τ 均先快速增大,然后缓慢减小,有明显的 τ_p 和一定程度的峰后软化,但软化速率较小,且非常均匀. $\sigma_v = 40$ kPa 时,TX160 方案的土工格栅试样在剪应力到达峰值之前被拉断.



(a)SS20 方案



(b)TX160 方案

图 3 拉拔试验剪应力-拉拔位移关系曲线

Fig.3 Relation between shear stress and pullout displacement of pullout test

2 种方案的 δ_p 均随 σ_v 的增大而增大,两者之间同样存在良好的线性关系, σ_v 相同时,SS20 方案的 δ_p 均略小于 TX160 方案,且 σ_v 越小,2 种方案的 δ_p 之间的差值越大. 总体而言,2 种方案的 δ_p 均不大, $\sigma_v = 30 \text{ kPa}$ 时,SS20 和 TX160 方案的 δ_p 分别为 9.1 mm 和 10.5 mm,分别接近直剪试验中 $\sigma_v = 100 \text{ kPa}$ 和 150 kPa 时的 δ_p . 根据拉拔试验中实际剪切面的长度,即土工格栅试样埋入砂土内的长度(由于土工格栅试样发生了拉伸变形,因此可以不考虑拔出部分的影响),将 δ_p 换算成剪切应变,分别为 3.9% 和 4.7%,表明拉拔试验中到达筋土界面峰值剪应力需要更大的剪切应变,这是由于 SS20 和 TX160 均为柔性筋材,拉拔试验过程中,筋土界面剪应力沿拉拔方向逐渐向后传递,分布极为不均,而直剪试验中筋土界面的剪切几乎同时发生,剪应力分布较为均匀.

2.2 土工格栅拉伸变形与应变

由于拉拔试验中土工格栅试样的部分测点位移采用百分表量测,且为人工读数,读数频率为 2 min/次,对应的拉拔位移间隔为 2 mm,相比于电阻位移计较高的读数频率,人工读数的拉拔力峰值可能并不是真正意义上的峰值,因此采用“峰值拉拔力”表示,并选取“峰值拉拔力”对应的土工格栅试样各断面的位移进行分析.图 4 为拉拔试验中“峰值拉拔力”对应的 SS20 和 TX160 方案中土工格栅试样的 4 个断面及夹具位移,对于有多个测点的断面,取平均位移进行分析,其中格栅长度指各测试断面距夹持断面的距离.

图 4 中,2 种方案各断面位移均随格栅长度的增加而明显减小, σ_v 越大,各断面位移减小的幅度也越大,即土工格栅试样拉伸变形越大.不同的是,SS20 方案各断面位移均随 σ_v 的增大而明显增大,而 TX160 方案 #2、#3 和 #4 断面的位移增幅较小,甚至有所减小,这是由于 σ_v 增大后,远离拉拔端的 TX160 土工格栅试样受到的砂土约束也越大,此时 TX160 土工格栅试样的拉伸变形主要发生在夹具和 #2 断面之间. 上述分析表明 SS20 方案中土工格栅试样的拉力比 TX160 方案更容易向土工格栅试样末端传递,从而带动 #2、#3 和 #4 断面的位移.

图 5 为 $\sigma_v = 30 \text{ kPa}$ 时 SS20 和 TX160 方案的土工格栅试样分段应变随拉拔位移的变化曲线. 由于 2 种方案中土工格栅试样埋入砂土内的长度均有限,因此在拉拔位移仅为 2 mm 时即可量测到 S_3 段应变.2 种方案的土工格栅试样各分段应变均随拉

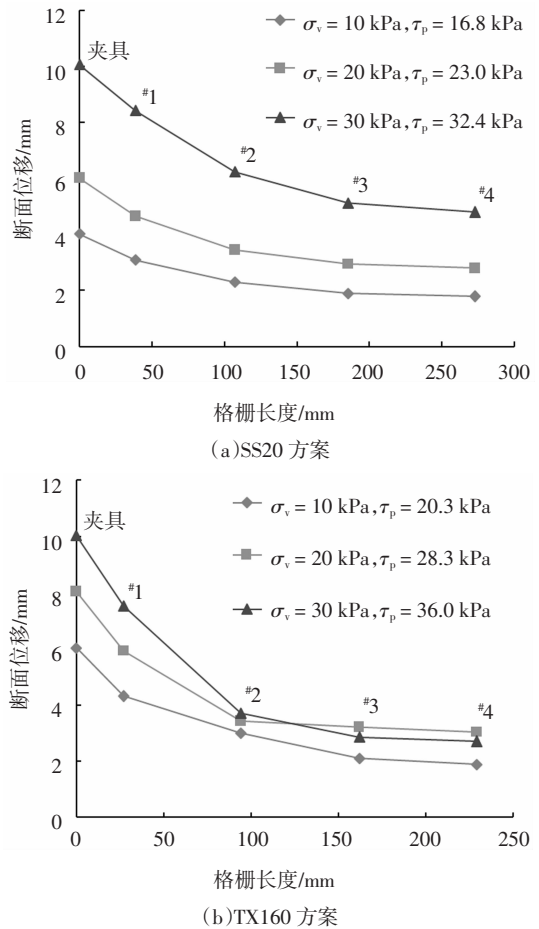


图 4 “峰值拉拔力”对应的土工格栅试样断面位移
Fig.4 Section displacement of geogrid specimens at the “peak fullout force”

拔位移的增大而增大,大小顺序依次为 $S_0 > S_1 > S_2 > S_3$ (图 1),不同之处在于 SS20 方案各分段应变的增大速率较为均匀,而 TX160 方案的 S_0 和 S_1 段应变远大于 S_2 和 S_3 段,且差值随拉拔位移的增大而持续扩大.当拉拔位移为 10 mm 时,即“峰值拉拔力”对应的拉拔位移,SS20 方案的 S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 段应变依次为 4.2%、2.8%、1.4%和 0.42%,而 TX160 方案各分段应变则分别为 9.3%、5.6%、1.3%和 0.2%.上述分析进一步表明 SS20 方案的 S_2 和 S_3 段土工格栅明显受拉,相应位置的筋土相互作用得到了较好的发挥,而 TX160 方案的土工格栅受力集中于 S_0 和 S_1 段, S_2 和 S_3 段主要为平动,受拉不明显,筋土相互作用较弱.

值得注意的是,“峰值拉拔力”后,2 种方案中,除 TX160 方案的 S_0 有所下降之外,其余各分段应变均随拉拔位移的增大而继续增大,且部分分段的应变增幅较大.分析原因,是由于 #1 断面从砂土内被拉出,使 S_1 段土工格栅部分失去砂土的约束,虽然

此时拉拔力保持不变甚至有所减小,但 S_1 段的应变仍持续增大. 各分段应变随拉拔位移的增大而增大也验证了土工格栅加筋砂土界面摩阻力的发挥跟筋土相对位移直接相关,特别是土工格栅横肋的承载阻力取决于其位移幅度,发挥较晚.

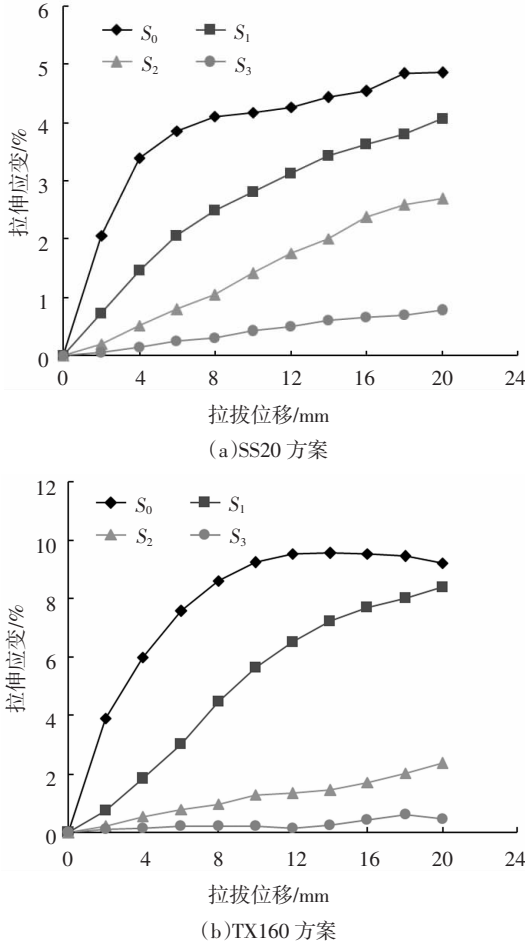


图5 土工格栅试样分段应变变化曲线($\sigma_v = 30$ kPa)
Fig.5 Variation of segmented tensile strain of geogrid specimens ($\sigma_v = 30$ kPa)

缩,随 δ 继续增大,则迅速由剪缩转为剪胀,当 δ 达 15 mm 时,剪胀量随 δ 的增大而减小或趋于稳定.拉拔试验与直剪试验类似,2 种方案的筋土界面均先发生小幅剪缩,当 δ 大于 4 mm 后则全部转为剪胀,并一直处于增长状态,没有明显的峰值.

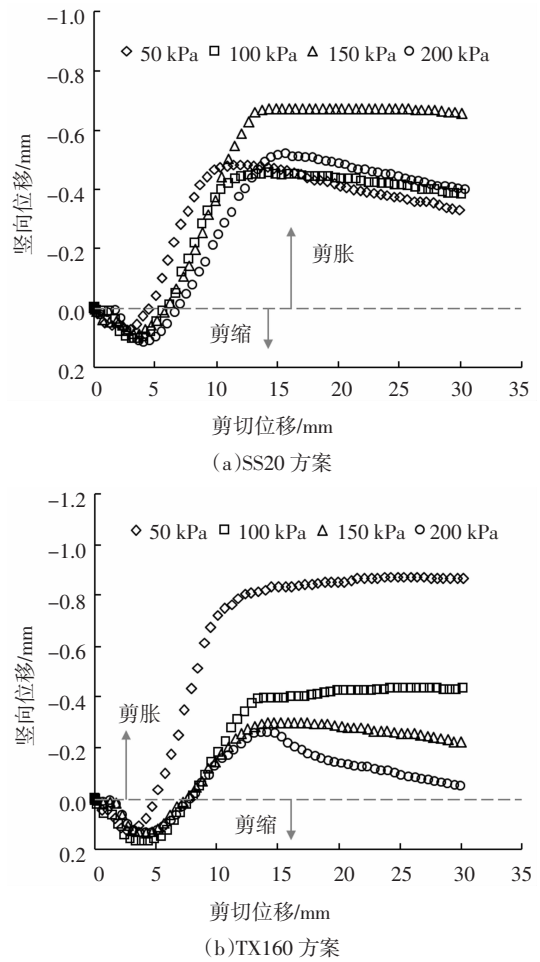


图6 直剪试验剪胀(缩)曲线
Fig.6 Shear dilatancy/shrinkage curves of direct shear test

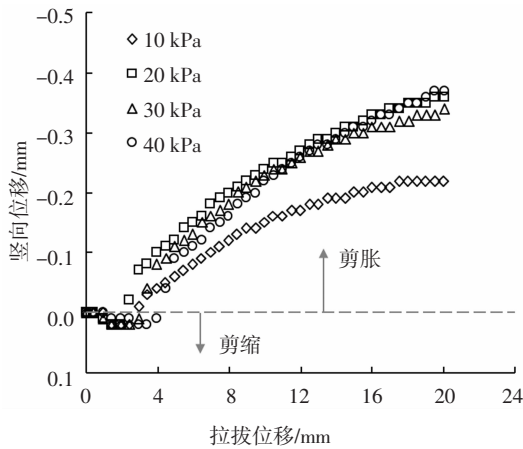
3 筋土界面剪胀特性与强度参数

3.1 筋土界面剪胀特性

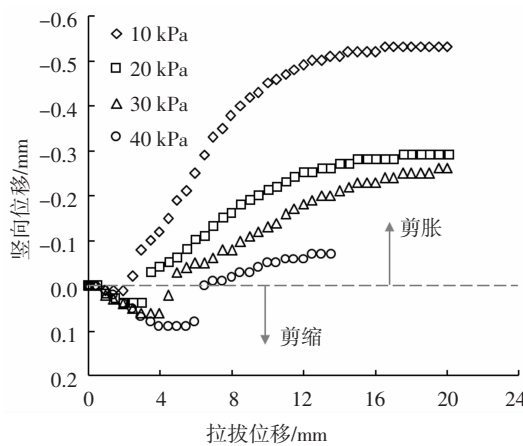
筋土界面发生剪切位移时,土工格栅节点及肋条带动嵌锁的砂土颗粒,使筋土界面附近的土颗粒位置不断发生错动和调整,从而表现出剪胀(缩)特性,在宏观上即表现为剪切盒中荷载板的竖向位移发生变化.本文以荷载板竖向位移向下(+)表示剪缩,向上(-)表示剪胀.

图6和图7分别为直剪试验和拉拔试验所得SS20和TX160方案的剪胀(缩)曲线.直剪试验中, δ 小于 5 mm 时,2 种方案的筋土界面均发生了小幅剪

对比图6和图7中SS20和TX160方案的剪胀(缩)曲线,可以发现,不同 σ_v 时 SS20 方案的剪胀(缩)曲线在直剪试验和拉拔试验全过程中的分布均较为集中,而 TX160 方案的剪胀(缩)曲线随 σ_v 的变化较大,较为分散, δ 越大,剪胀量差异也越大.2 种试验中,不同 σ_v 时 SS20 方案的剪缩量均小于 TX160 方案,但剪胀量则刚好相反.上述分析表明 TX160 方案的筋土界面剪胀(缩)特性受 σ_v 变化的影响比 SS20 方案更明显,相同条件下,增大 σ_v 可以更好地增强 TX160 与周围填料颗粒的相互作用,改善筋土界面特性.



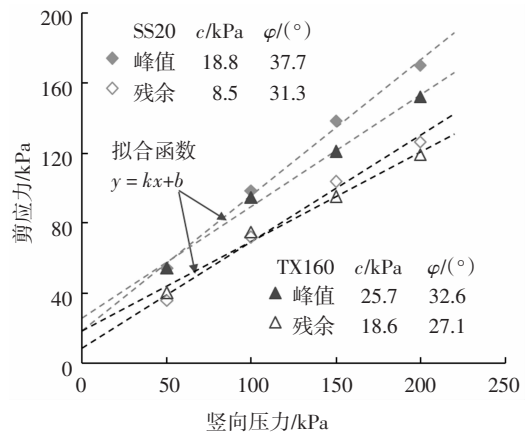
(a)SS20 方案



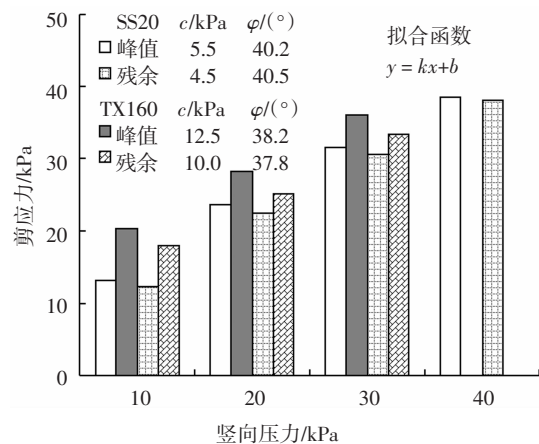
(b)TX160 方案

图 7 拉拔试验剪胀(缩)曲线

Fig.7 Shear dilatancy/shrinkage curves of pullout test



(a)直剪试验



(b)拉拔试验

图 8 筋土界面强度参数

Fig.8 Shear strength parameters of geogrid-soil interface

3.2 筋土界面强度参数

为了获取筋土界面强度参数,假定直剪试验和拉拔试验中 SS20 和 TX160 方案的筋土界面 τ 均匀分布,采用 Mohr-Coulomb 强度准则^[7]分别对筋土界面的峰值剪切力和残余剪切力与竖向压力进行线性拟合,得到筋土界面峰值强度(c_p, φ_p)和残余强度(c_r, φ_r),如图 8 所示。

由图 8 可知:2 种试验中 SS20 方案的 φ_p 和 φ_r 分别大于 TX160 方案 ($\Delta\varphi_p = 2.0^\circ \sim 5.1^\circ, \Delta\varphi_r = 2.7^\circ \sim 4.2^\circ$),但 SS20 方案的 c_p 和 c_r 均分别小于 TX160 方案 ($\Delta c_p = 6.9 \sim 7.0$ kPa, $\Delta c_r = 5.5 \sim 10.1$ kPa),表明 TX160 的三角形网孔对周围砂土颗粒的约束作用大于 SS20 的矩形网孔。值得注意的是,直剪试验得到的 SS20 和 TX160 方案之间的筋土界面强度参数差异,以及同一方案中峰值强度参数和残余强度参数的差异均比拉拔试验的大。

对比图 8(a)和(b),可知对于 SS20 和 TX160 方案的峰值强度和残余强度,直剪试验所得黏聚力均

大于拉拔试验($\Delta c = 4.0 \sim 13.3$ kPa),但摩擦角刚好相反,直剪试验所得摩擦角均小于拉拔试验($\Delta\varphi = 2.5^\circ \sim 10.7^\circ$)。马时冬^[5]通过开展单向和经编土工格栅与砂砾、粗砂和残积土的直剪试验和拉拔试验,也得到了类似的结论。但史旦达等^[7]发现试验方案相同时,采用直剪试验可以获得比拉拔试验更高的摩擦角,对于双向拉伸塑料土工格栅,采用砂土填料时摩擦角差值为 5.2° ,而黏性土填料时摩擦角差值可达 12° 。分析原因,是由于本文和文献[5]中直剪试验所施加的最大 $\sigma_v = 200$ kPa 均远大于拉拔试验(约为 5 倍),而文献[7]中直剪试验和拉拔试验所施加的各级 σ_v 均保持一致(50 ~ 200 kPa),从而导致了上述差异。上述分析表明 σ_v 对直剪试验和拉拔试验所得筋土界面强度参数均有明显的影响, σ_v 越大,则 2 种试验所得 c 越大而 φ 越小。因此,在工程应用中,为获取合理的筋土界面强度参数,应根据加筋土结构中土工格栅的实际应力状态来确定合理的试验竖向压力。

4 结论

1)SS20 和 TX160 方案的剪应力-剪切/拉拔位移关系曲线的变化规律总体相似,但在峰值剪应力后的软化速率和软化过程上存在明显差异,特别是在直剪试验中,这种差异尤为突出。

2)拉拔试验中,SS20 的筋土相互作用沿土工格栅试样全长均能较好地发挥,而 TX160 的筋土相互作用主要集中在拉拔端附近,土工格栅试样自由端的筋土相互作用较弱。

3)TX160 的筋土界面剪胀(缩)特性受竖向压力的影响更明显,相同条件下,增大竖向压力可以更好地增强 TX160 与周围填料颗粒的相互作用,从而改善筋土界面特性。

4)SS20 方案的峰值摩擦角和残余摩擦角均大于 TX160 方案,但黏聚力刚好相反,SS20 方案的峰值黏聚力和残余黏聚力均小于 TX160 方案。竖向压力对 2 种试验所得筋土界面强度参数均有明显的影响,工程应用中应根据土工格栅的实际应力状态来确定合理的试验竖向压力。

参考文献

- [1] 杨广庆,李广信,张保俭.土工格栅界面摩擦特性试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(8):948—952.
YANG G Q,LI G X,ZHANG B J. Experimental studies on interface friction characteristics of geogrids [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(8):948—952.(In Chinese)
- [2] DONG Y L,HAN J,BAI X H. Numerical analysis of tensile behavior of geogrid with rectangular and triangular apertures[J]. Geotextiles and Geomembranes,2011,29(2):83—91.
- [3] QIAN Y,HAN J,POKHAREL S K,*et al.* Performance of triangular aperture geogrid-reinforced base courses over weak subgrade under cyclic loading [J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2013,25(8):1013—1021.
- [4] CHEN C, MCDOWELL G R, THOM N H. Discrete element modeling of cyclic loads of geogrid-reinforced ballast under confined and unconfined conditions [J]. Geotextiles and Geomembranes,2012,35:76—86.
- [5] 马时冬.土工格栅与土的界面摩擦特性试验研究[J].长江科学院院报,2004,21(1):11—14.
MA S D. Testing study on soil interface characteristics of geosynthetics [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2004,21(1):11—14.(In Chinese)
- [6] TEIXEIRA S H C, BUENO B S, ZORNBERG J G. Pullout resistance of individual longitudinal and transverse geogrid ribs[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2007,133(1):37—50.
- [7] 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.
- [8] SHI D D,LIU W B,SHUI W H,*et al.* Comparative experimental studies of interface characteristics between uniaxial/biaxial plastic geogrids and different soils[J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(8):2237—2244.(In Chinese)
- [8] 郑俊杰,曹文昭,周燕君,等.三向土工格栅筋-土界面特性拉拔试验研究[J].岩土力学,2017,38(2):317—324.
ZHENG J J,CAO W Z,ZHOU Y J,*et al.* Pull-out test study of interface behavior between triaxial geogrid and soil [J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(2):317—324.(In Chinese)
- [9] 周芬,周智敏,杜运兴.压实度对加筋土竖向变形影响的试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(5):73—79.
ZHOU F,ZHOU Z M,DU Y X. Experimental study on influence of compaction degree on vertical deformation of reinforced soil [J]. Journal of Huan University(Natural Sciences),2017,44(5):73—79.(In Chinese)
- [10] 徐林荣.筋土界面参数测试方法合理选择研究 [J]. 岩土力学,2003,24(3):458—462.
XU L R. Research on selection of measuring method of interface parameters between reinforcements and soils [J]. Rock and Soil Mechanics,2003,24(3):458—462.(In Chinese)
- [11] 土工合成材料工程应用手册编写委员会.土工合成材料工程应用手册[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2000:95—100.
Editorial Board of the Handbook about Application of Geosynthetics in Engineering.The handbook about application of geosynthetics in engineering [M]. 2nd ed.Beijing:China Architecture and Building Press,2000:95—100.(In Chinese)
- [12] 包承纲.土工合成材料应用原理与工程实践[M].北京:中国水利水电出版社,2008:142—147.
BAO C G. The principle and application of geosynthetics in engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press,2008:142—147.(In Chinese)
- [13] 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)
- [14] 刘飞禹,王攀,王军,等.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 F Y,WANG P,WANG J,*et al.* 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.(In Chinese)
- [15] SL 235—2012 土工合成材料试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,2012:80—85.
SL 235—2012 Specification for test and measurement of geosynthetics [S]. Beijing: China Water & Power Press,2012:80—85.(In Chinese)
- [16] 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 C,MENG F X. Effects of shear rate and material properties on shear strength of geosynthetic-soil interface [J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(10):3101—3106.(In Chinese)
- [17] 杜勇立,高礼,杨果林.不同掺土量加筋煤矸石的界面摩擦试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2014,41(4):54—60.
DU Y L,GAO L,YANG G L. Experimental study of the interface friction characteristics between coal gantue and reinforcement with different qualities of soil[J]. Journal of Huan University (Natural Sciences),2014,41(4):54—60.(In Chinese)