

土工格栅横肋与砂土接触面的细观试验

周健^{1,2}, 唐群艳^{1,2}, 王家全³, 张姣⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 广西工学院 土木建筑工程系, 广西 柳州 545006; 4. 上海城市管理职业技术学院 土木工程系, 上海 200432)

摘要: 利用拉拔模型试验设备, 在不同法向压力下进行一系列的拉拔试验, 应用数码可视化跟踪技术, 结合土体变形无标点量测技术来研究双向土工格栅横肋与砂土界面相互作用的细观特性. 以数码可视化跟踪技术跟踪拍摄土工格栅横肋与砂土界面的相互作用过程, 并通过量化分析得到界面的运动变化规律. 分析结果表明, 拉拔试验的似摩擦系数与上部法向应力相关, 细观试验表明横肋与砂土接触的上下界面厚度并不一样, 上界面厚度大于下界面厚度, 横肋上界面运动较为剧烈. 细观试验位移应变图显示, 横肋刺入的破坏与 Jewell 提出的计算模式非常相似, 但上部区域略大于下部区域, 基本验证了 Jewell 刺入破坏机理.

关键词: 土工格栅; 横肋; 拉拔试验; 界面; 细观研究

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Mesoscopic Study on Interface Between Transvers Rib of Geogrid and Sand

ZHOU Jian^{1,2}, TANG Qunyan^{1,2}, WANG Jiaquan³, ZHANG Jiao³

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Department of Civil Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China; 4. Department of Civil Engineering and Management, Shanghai Technical College of Urban Management, Shanghai 200432, China)

Abstract: Through a series of pullout tests under different vertical stresses, a study was made of the mesoscopic behavior of the interface between two-way geogrid transverse rib and sand based on digital visual tracking technology and no punctuation soil deformation measurement techniques. The interface being traced with the techniques of no punctuation soil deformation measurement, a quantitative analysis was made of the changes of interface movement. Analysis results show that the apparent friction coefficient is related with the

vertical stress. Mesoscopic results show the upper interface thickness of transverse rib and sand is different from the lower. In whole, the upper thickness is greater than the lower, and the rib on the interface motion is more intense. The mesoscopic displacement strain plot shows the rib damage model of this research is similar to the piercing damage model proposed by Jewell, but the upper part is slightly larger than the lower of the regional area. Jewell piercing damage model is basically authenticated.

Key words: geogrid; transverse rib; pullout test; interface; mesoscopic study

目前研究土工合成材料加筋机理的室内试验包括直剪、拉拔、扭剪和斜板试验. 美国 McGown^[1], 法国 Schlosser^[2] 认为, 拉拔试验的优点在于测试结果能自动反映土体剪胀和压密状态, 更能反映加筋的真实状况, 因此, 国内外学者普遍以拉拔试验研究土与加筋体的相互作用^[3-7].

由于仪器设备的原因, 目前常规的拉拔试验量测的仅仅是界面的宏观反应, 主要集中在应力水平, 边界条件对试验结果的影响并分析了相关的机理, 界面区域内的细观参数不能被量测. 张嘎等^[8-9] 虽然应用研制的细观测量系统测量了土与结构接触面试验中土颗粒的运动. 但其成果还只是初步的, 未对土工合成材料特别是土工格栅拉拔试验的接触面进行系统研究. 周健、孔祥利等^[10] 对土工格栅的界面细观机理做了初步研究, 其主要集中在密砂与松砂条件下格栅拉拔过程中筋土界面厚度以及界面颗粒的微观研究.

土工格栅的拉拔阻力来源于两部分: 格栅表面的摩擦阻力, 格栅横肋对土体的被动阻力. 根据相关

收稿日期: 2009-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879059)

作者简介: 周健(1957—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师. 主要研究方向为土体细观力学模拟和环境岩土工程.

E-mail: tjzj@vip.163.com

文献研究表明^[11-12],横肋的被动阻力承担了75%~90%以上拉拔荷载.因此对横肋的研究显得非常重要.以往学者均是从宏观方面研究横肋的界面阻力发挥,鲜有从细观角度对拉拔过程中横肋与砂土相互作用机理进行研究.本文专门研究横肋在与砂土在拉拔过程中的细观机理,格栅横肋点紧贴在拉拔模型箱的玻璃壁上,通过拉拔试验,利用数码可视化跟踪技术和土体变形无标点量测技术跟踪拍摄横肋与砂土的相互作用.

1 拉拔模型试验概述

1.1 拉拔模型试验装置

模型试验箱为长方体,模型箱尺寸为60 cm×40 cm×37 cm(长×宽×高),骨架采用角钢焊接而成.为了减小侧边的摩擦作用,在三侧边铁板内侧粘上厚度为5 mm的钢化玻璃,并在玻璃的表面涂一层硅脂.模型箱的前侧面为12 mm厚的钢化玻璃,以方便进行拉拔过程中对筋土界面的变化情况进行宏观拍摄.为了减少前面墙体的不利影响,试验中在模型箱的前墙中部开口位置,设置了可以控制开口高度的套筒,其朝箱内方向伸入长度为5 cm.

1.2 试验土样及制备

采用福建平潭标准砂,该砂的物理性质指标如下:颗粒级配为颗粒直径大于0.65 mm的占3%;0.45~0.65 mm的占(40±5)%;0.25~0.4 mm的占(51±5)%;小于0.25 mm的占6%.颗粒比重为 $\rho_s = 2.643 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;最大与最小干密度分别为 $\rho_{d\max} = 1.74 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $\rho_{d\min} = 1.43 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;最大与最小孔隙比分别为 $e_{\max} = 0.848$, $e_{\min} = 0.519$;粒径组成特性参数为: $d_{50} = 0.34 \text{ mm}$, $C_u = 1.542$, $C_c = 1.104$.试验过程中保持砂样干燥.

标准砂采用落雨法(落距60 cm)分层装入模型箱,装砂到指定深度,铺设土工格栅,再继续装砂,直至指定高度.装砂完成后静置6h以上,使装砂产生的不均匀应力消除.经测试,按砂样体积控制方式计算,试验砂样的干密度 $\rho_d = 1.62 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$.

1.3 加载系统及量测设备

加载系统包括法向加载和水平加载系统.法向加载采用油压千斤顶及反力架,通过一厚20 mm加载钢板与20 mm厚的柔性橡胶膜传递到土体上,从而保证土样上覆有效应力的均匀分布.法向加载的反力架由承压横梁及框架组成,均由型钢焊制.在横

梁与千斤顶之间设置压力传感器,通过配套的电阻式应变仪动态采集所加荷载.水平拉拔力由速率可控的拉拔试验机提供,其拉拔速率范围是 $1.0 \sim 6.0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.在电机与夹具之间设置拉力传感器,用以测量水平拉拔力,拉拔力均通过夹具传递给土工合成材料.土工合成材料水平拉拔位移通过大量程电阻式百分表量测.压力传感器、拉力传感器和电阻式百分表均通过导线与YE2539高速静态应变仪相连,并采用计算机自动采集数据.图1给出了土工合成材料拉拔试验装置示意图.

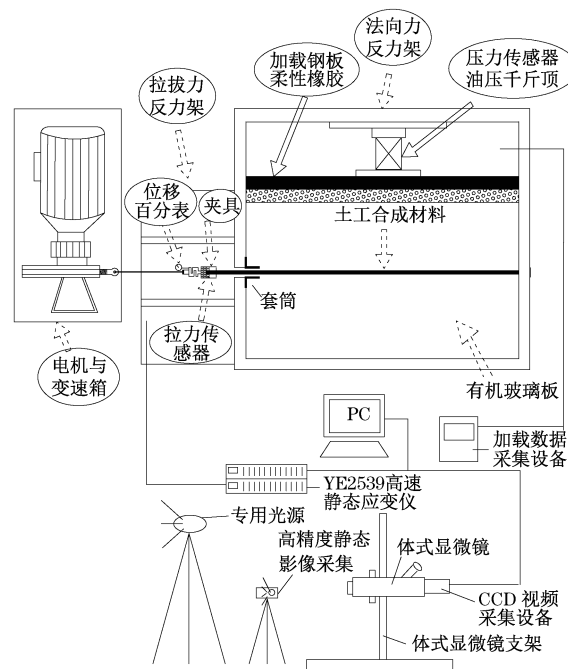


图1 土工格栅拉拔试验装置示意图

Fig.1 Scheme of pullout tests apparatus

1.4 试验图像采集设备

模型试验中的图像采用Olympus(奥林巴斯)体视显微镜(CCD)(放大倍率为10~220倍),结合800万像素、8倍光学变焦的佳能单反相机350D(图像最大分辨率为 3456×2304)进行连续拍摄.同时应用位移跟踪点量测,采用数码照相结合图像分析技术分析接触面的产生、发展及变化规律.对连续的数码照片运用Geodog软件进行分析,可以得到土工格栅拉拔试验过程中接触界面的形成过程.辅助摄像设备有新闻照明灯、三角架、遥控器.

1.5 试验安排

选取双向土工格栅进行拉拔试验,分别采取10, 20, 30和50 kPa的不同法向压力进行拉拔,拉拔过程中利用数码可视化跟踪技术和土体变形无标点量

测技术跟踪拍摄。

2 拉拔试验宏观成果

选取双向土工格栅进行拉拔试验,典型的试验参数见表1,并对试验结果绘图分析(见图2)。格栅长55 cm,宽36 cm, P_R 为土工格栅的最大拉拔阻力。

表1 土工格栅的技术指标

Tab.1 Technique index of geogrid

单位 面积/ 质量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	2%延伸 抗拉 强度/ ($\text{KN} \cdot \text{m}^{-1}$)	5%延伸 抗拉 强度/ ($\text{KN} \cdot \text{m}^{-1}$)	屈服 抗拉 强度/ ($\text{KN} \cdot \text{m}^{-1}$)	屈服 伸长率/ %	最小 碳黑 含量/ %
450.4	13.5	16.5	35	10.5	2

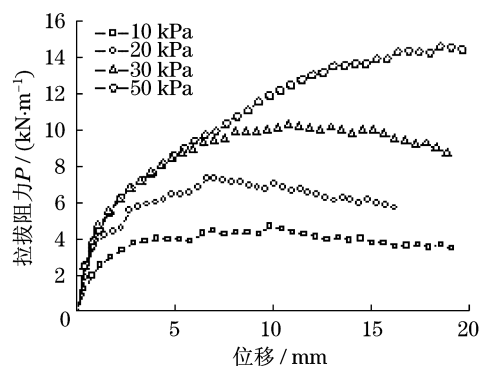


图2 格栅在标准砂中拉拔曲线

Fig.2 Pullout curve of geogrid in standard sand

在低法向压力下格栅均表现出了应变软化的特性,即随着拉拔位移的增加,拉拔阻力达到峰值后,再逐渐下降;而当法向压力大于30 kPa,拉拔阻力表现出来的是持续增大的特性,当拉拔位移远大于其他低法向压力对应的位移时,拉拔阻力才达到峰值状态。分析其原因,拉拔阻力主要来自土工格栅表面与砂土的摩擦力以及格栅孔眼横肋与砂土的相互咬合、嵌锁作用;围压不高时,随着拉拔位移的发展,拉拔阻力增加到一定程度后,随着嵌固在砂土的格栅长度的减少,拉拔阻力开始逐渐降低;而法向压力较大(>30 kPa)时,砂土颗粒相互间较为密实,随着位移的发展,格栅表面与砂土的摩擦力以及格栅横肋对砂土的咬合、嵌固作用力显著增加,尤其是横肋对砂土的被动阻力更为明显,因此拉拔曲线表现出比低法向压力工况下持续增大的特征。

图3给出了筋土界面似摩擦系数随法向压力变化的关系曲线。似摩擦系数随法向压力增大而降低,在0~30 kPa法向压力阶段,似摩擦系数变化幅度很大,过了30 kPa后,似摩擦系数变化幅度趋于缓

和。格栅与标准砂相互作用的似摩擦系数随法向压力的变化趋势可以拟合成为如下的幂函数形式:

$$f^* = 0.8037 \sigma_v^{-0.2802}, \quad R^2 = 0.9347 \quad (1)$$

式中: f^* 为似摩擦系数; σ_v 为法向压力; R 为量纲一相关系数。

似摩擦系数随法向压力变化的规律表明,似摩擦系数并不是一个常量,因而在分析比较土工合成材料的加筋作用时,不能抛开法向压力而仅以似摩擦系数大小评价加筋效果。

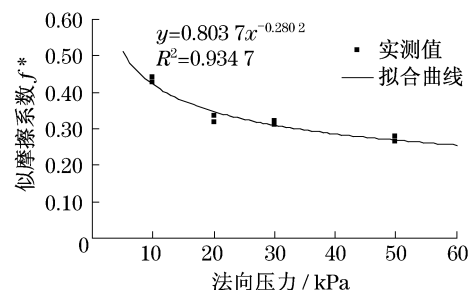


图3 似摩擦系数与法向压力关系曲线

Fig.3 Apparent friction coefficient vs vertical stress

3 拉拔试验微观成果分析

3.1 格栅横肋接触面位移矢量场分析

分析标准砂在法向压力10~50 kPa工况下的位移矢量,图4~图6展示了格栅横肋与标准砂接触面的位矢量变化规律,其中矢量图通过高分辨数码相机拍摄,结合图像分析技术可获取颗粒矢量变化。

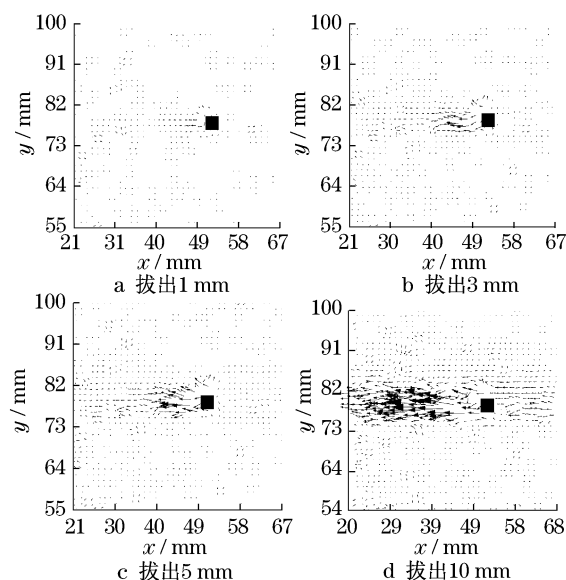


图4 法向应力10 kPa下横肋颗粒位移矢量图

Fig.4 Displacement plot under normal stress of 10 kPa

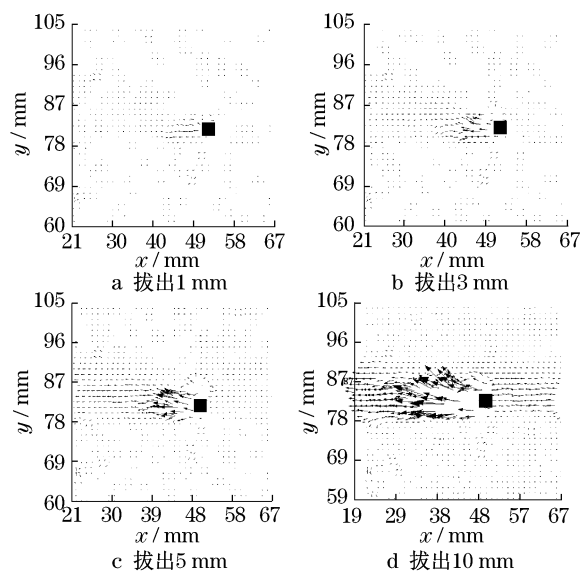


图5 法向应力 30 kPa 下横肋颗粒位移矢量图

Fig.5 Displacement plot under normal stress of 30 kPa

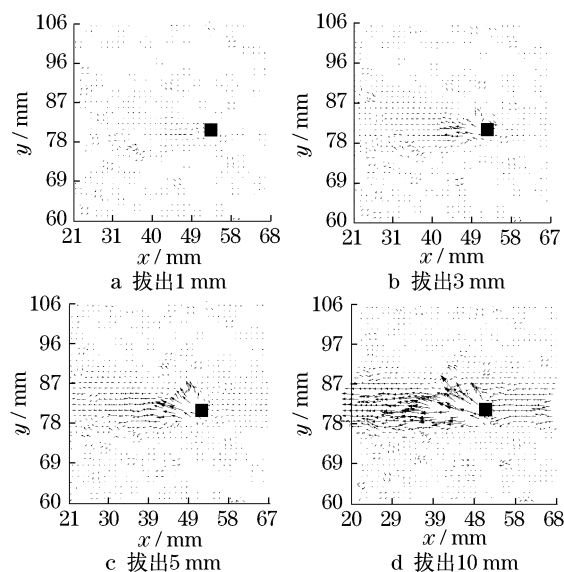


图6 法向应力 50 kPa 下横肋颗粒位移矢量图

Fig.6 Displacement plot under normal stress of 50 kPa

比较各级压力下位移矢量图后发现, 格栅节点突起处引起砂土的较为剧烈的位移运动. 总体而言, 是上部界面颗粒运动较下部界面颗粒明显. 随着上部法向应力的增加, 格栅横肋附近的砂颗粒, 由较为水平的沿拉拔方向运动变化为较为垂直地向上运动. 下界面运动较为缓和.

3.2 格栅横肋接触面厚度分析

分析标准砂在 10, 30 和 50 kPa 三个法向应力下的剪应变场及最大剪应变沿 y 向剖面变化图 (图 7~图 9). 由图可知, 横肋 y 向剖面的最大剪应变也是在中间形成双峰状, 该区域就是接触界面区域所对应的位置. 横肋与砂土接触的上下界面厚度

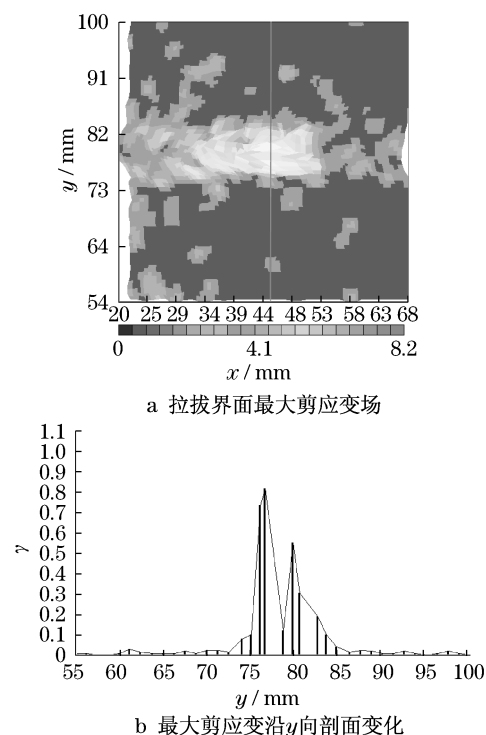


图7 标准砂 10 kPa 法向应力下横肋界面剖面最大剪应变

Fig.7 Maximum shear strain of interface between transverse rib and standard sand under normal stress of 10 kPa

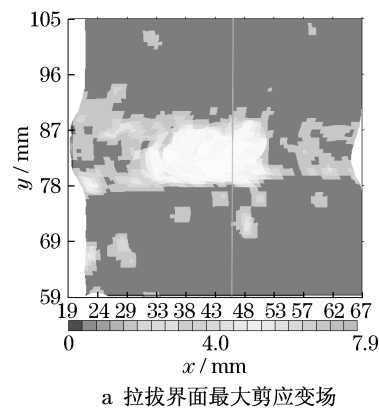


图8 标准砂 30 kPa 法向应力下横肋界面剖面最大剪应变

Fig.8 Maximum shear strain of interface between transverse rib and standard sand under normal stress of 30 kPa

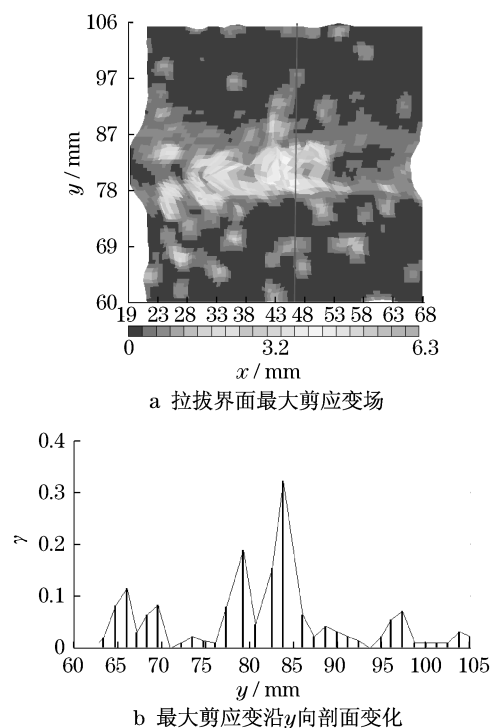


图9 标准砂 50 kPa 法向应力下横肋界面剖面最大剪应变

Fig.9 Maximum shear strain of interface between transverse rib and standard sand under normal stress of 50 kPa

并不一样,总体来看,上界面厚度大于下界面厚度.量化分析结果可以得出,对应于上界面,标准砂 10, 30 和 50 kPa 法向力下横肋上方与砂土界面接触厚度分别为 3.3~3.8 mm, 3.5~4.1 mm 和 3.5~4.1 mm,大约分别相当于标准砂平均粒径 D_{50} 的 10.29, 10.88 和 11.18 倍;对应于下界面,标准砂 10, 30 和 50 kPa 法向力下横肋上方与砂土界面接触厚度分别为 2.1~2.5 mm, 2.5~2.8 mm 和 2.5~2.9 mm,分别相当于标准砂平均粒径的 6.76, 7.65 和 7.35 倍.

3.3 格栅横肋接触面发展过程量化分析

选取横肋接触面周围的不同点进行量化分析,图 10 给出了量化分析的测点位置及编号.对比分析

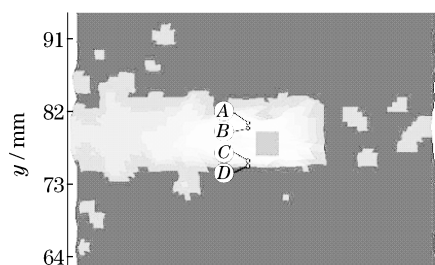


图 10 横肋接触面量化特征点位置示意图

Fig.10 Characteristic points location of rib interface

了不同法向应力工况下特征点的位移规律,为便于表示图中特征点分别用字母 A, B, C, D 表示.

选取 10 kPa 与 50 kPa 法向力作用下横肋接触面进行量化分析.接触面特定点位置坐标见表 2.

接触面上剪胀可以通过接触面上的特征点的法向位移变化来分析,10 kPa 法向力下横肋接触面上特征点法向位移量化分析见图 11.从中可以看出,当拉拔位移达到 4 mm 时,法向位移均较小,界面上部 B 点位移向下运动,表现为颗粒不断压实,此时该特征点位移较小,约为 0.18 mm 左右,过了临界点之后, B 点位移急剧增加,表现为向上位移,有剪胀趋势;而界面下部 C 点位移较大,在开始阶段为向下位移,位移较小,过了临界点后,变为向上运动,有剪缩趋势.距离较远的 A, D 两点,法向位移较小,随着拉拔位移的增加而缓慢增加,所不同的是,界面上部 A 点向下移动,界面下部 D 点向上移动.

表 2 横肋接触面量化特征点坐标

Tab.2 Characteristic points coordinates of rib interface

特征点	测点号	坐标/mm	
		x	y
A	499	43.252	83.855
B	573	43.252	81.371
C	721	43.252	76.314
D	795	43.252	73.785

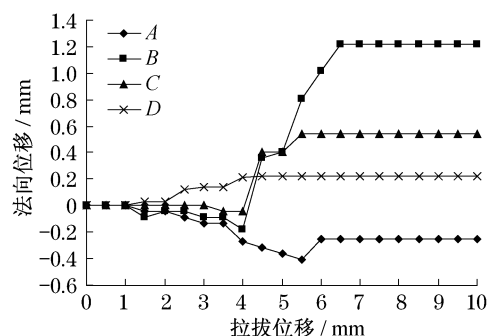


图 11 10 kPa 法向力工况接触面法向位移变化曲线

Fig.11 Curve of normal displacement under 10 kPa normal stress

50 kPa 法向力下横肋接触面上特征点法向位移量化分析见图 12.从中可以看出,当拉拔位移达到 2.5 mm 时,法向位移均较小,界面上部 B 点位移缓慢向上运动,此时该特征点位移较小,约为 0.34 mm 左右,过了临界点之后, B 点位移急剧增加,表现为向上位移,有剪胀趋势;而界面下部 C 点位移在开始

阶段为向下位移,位移较小,过了临界点后,向下位移急剧增大,也表现为剪胀趋势,拉拔位移到7 mm左右,其向外运动剧烈程度甚至超过B点.距离较远的A、D两点,法向位移较小,随着拉拔位移的增加而缓慢增加,所不同的是,界面上部A点向下移动,界面下部D点向上移动.

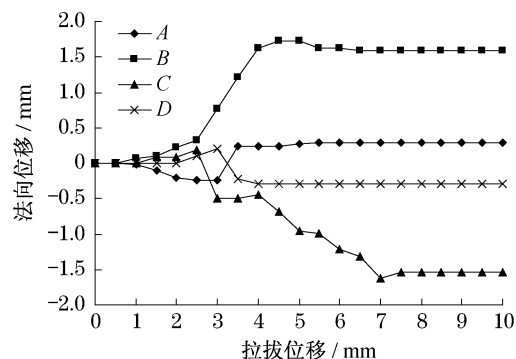


图12 50 kPa 法向力工况接触面法向位移变化曲线
Fig.12 Curve of normal displacement under 50 kPa normal stress

总体而言,单个砂土颗粒的运动没有明显规律性,但表现为法向压力越大,横肋附近砂颗粒运动越剧烈.与界面厚度与法向压力的关系一致.

3.4 格栅横肋刺入破坏机理细观验证

目前对横肋被动承载力的计算理论,主要是利用土力学经典的承载力计算公式进行估算.

$$\sigma_b = \frac{P_b}{nwd} = CN_c + \sigma_v N_q \quad (2)$$

式中: n 为横肋的数目; w 为横肋的宽度; d 为横肋的厚度; C 为粘聚力; σ_v 为法向压力; N_c 和 N_q 为承载力系数.可以看出,承载系数的具体形式取决于破坏模式的假定.

在此基础上众多学者提出了许多不同假设的模型对横肋对土体的被动承载力机理进行解释,其中主要有两种模型较为普及.一种是由 Peterson 和 Anderson^[13]提出的承载力破坏理论(general bearing capacity failure),另一种理论为刺入冲剪破坏理论(punching shear failure),由 Jewell 等^[14]提出,其提出的承载力系数 N_c 与承载力破坏理论相同, N_q 不同,分别表示如下:

$$N_c = \cot \phi (N_q - 1) \quad (3)$$

$$N_q = e^{\left(\frac{\pi}{2} + \phi\right) \tan \phi} \cdot \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (4)$$

式中, ϕ 为砂土内摩擦角.采用的计算横肋模式如图13所示.

Jewell 提出的横肋冲剪破坏计算模式,从图13可以看出,横肋前方的剪切破坏区域,是上下对称分布的,这只能在细小均匀的粒状土里才有可能.从格栅拉拔的行为来看,横肋的被动阻力随着拉拔位移的增加而逐渐发挥,横肋不断地挤压剪切界面附近的砂土,类似于刺入冲剪破坏.

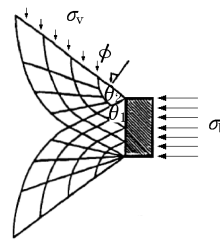


图13 横肋刺入破坏机理图^[14]

Fig.13 Jewell piercing damage model plot

现有的文献中,尚未发现有试验验证 Jewell 提出的计算模式是否正确.本文采用标准砂与格栅横肋进行拉拔验证试验.标准砂颗粒较为均匀光滑,小于0.65 mm 粒径的颗粒约占了97%,其中 $D_{50} = 0.34$ mm,属于较为理想的均匀粒状土,可以标准砂来验证 Jewell 提出的计算模式是否正确,图14为横肋与标准砂形成界面后的最大剪应变图.从图中可以发现,横肋前方形成了横八字的楔形剪应变区域,且在横肋左前方有一个部分剪应变为零的区域,刚好在楔形区的中部,与 Jewell 提出的计算模式(见图13)非常相似.所不同的是,楔形区域并非上下完全对称,而是上部区域略大于下部区域,因而需对其计算模式作进一步修正.

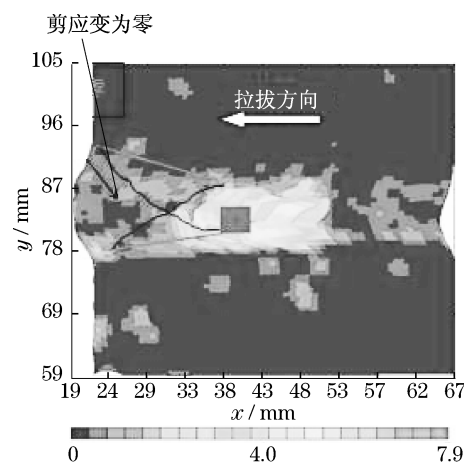


图14 横肋与标准砂界面的最大剪应变图($\sigma_v = 30$ kPa)
Fig.14 Maximum shear strain plot of interface between transverse rib and standard sand under normal stress of 30 kpa

4 结论

采用室内拉拔模型试验的方法对土工格栅横肋与砂土界面的运动模式进行模拟,通过数码可视化技术及土体变形无标点量测技术来研究双向土工格栅横肋与砂土界面相互作用的细观变化规律,得出以下结论:

(1) 似摩擦系数 f^* 不是一个常量,分析比较土工合成材料的加筋作用时,不能抛开法向压力而仅以似摩擦系数大小评价加筋效果.

(2) 格栅横肋与砂土界面处砂土颗粒运动较为剧烈,上部界面颗粒运动较下部界面颗粒明显.随上部法向应力增加,横肋上部附近砂颗粒,由接近水平方向运动逐渐转为垂直地向上运动,而下界面运动仍以沿水平拉拔方向运动为主.

(3) 横肋与砂土接触的上下界面厚度并不一样,上界面厚度约为标准砂平均粒径 D_{50} 的 11 倍;下界面厚度约为标准砂平均粒径的 7 倍,且随上部法向应力增大,界面厚度增大.

(4) 横肋附近单个砂土颗粒的运动没有明显规律性,但表现为法向压力越大,横肋附近砂颗粒运动位移越大,且沿远离格栅方向,砂颗粒运动趋缓.

(5) 横肋剪应变图显示,横肋刺入破坏与 Jewell 提出的计算模式非常相似,但上部区域略大于下部区域,因而需对其计算模式作进一步修正.

参考文献:

- [1] McGown A, Andrawes K Z, Al-Hasani M M. Effect of inclusion properties on the behaviour of sand[J]. Geotechnique, 1978, 28(3): 327.
- [2] Schlosser F, Unterreiner P, Plumelle C. French research program CLOUTERRE on soil nailing [C] // Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, ASCE. New York: Geotechnical Special Publication, 1992, 2(30): 739-750.
- [3] 徐超, 赵春风, 叶观宝. 关于土与土工合成材料界面的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(3): 307.
- XU Chao, ZHOA Chunfeng, YE Guanbao. Research on interface between soil and geosynthetics [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(3): 307.
- [4] Hidetoshi O, Jun O, Shigenori H, et al. The pull-out resistance of geogrids in reinforced soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1996, 14(1): 19.
- [5] Pradhan B, Tham L G, Yue Z Q, et al. Soil-nail pullout interaction in loose fill materials[J]. International Journal of Geomechanics, 2006, 6(4): 238.
- [6] Sugimoto M, Alagiyawannal A M N. Pullout behavior of geogrid by test and numerical analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(4): 361.
- [7] Izzaldin A, Murad A, Khalid F. Geosynthetic reinforcement cohesive soil interface during pullout [J]. Geotechnical Application for Transportation Infrastructure, 2005, 23(1): 40.
- [8] 张嘎, 张建民, 梁东方. 土与结构接触面试验中的土颗粒细观运动测量[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 903.
- ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, LIANG Dongfang. Measurement of soil particle movement in soil-structure interface test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 903.
- [9] Zhang G, Liang D, Zhang J. Image analysis measurement of soil particle movement during a soil-structure interface test[J]. Computers and Geotechnics, 2006(33): 248.
- [10] 周健, 孔祥利, 鞠庆海, 等. 土工合成材料与土界面细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊): 3196.
- ZHOU Jian, KONG Xiangli, JU Qinghai, et al. Mesoscopic study on interface between geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Supplement): 3196.
- [11] Morci N, Recalcati P. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006(24): 220.
- [12] 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, 26(9): 1735.
- BAO Chenggang. Study on Interface behavior of geosynthetics and soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 26(9): 1735.
- [13] Peterson L M, Anderson L R. Pull-out resistance of welded wire mats embedded in soil [D]. Logan: Utah State University. Department of Civil Engineering, 1980.
- [14] Jewell R A, Milligan G W, Sarsby R W, et al. Interaction between soil and geogrids [C] // Proceeding from the Symposium on Polymer Grid Reinforcement in Civil Engineering. London: [s. n.], 1984: 18-30.