

DOI: 10.11779/CJGE201905021

刚性与柔性顶部边界下筋土界面特性的细观数值研究

王志杰^{1, 2, 3}, 杨广庆¹, 王 贺¹, 刘伟超¹

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 亚琛工业大学岩土工程研究所, 德国 亚琛 52074;

3. 河北省大型基础设施防灾减灾协同创新中心(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043)

摘 要: 土工格栅拉拔试验被认为是研究土工格栅与土相互作用行为最直接有效的方法。在土工格栅拉拔试验中, 常采用刚性或柔性顶部边界条件施加竖向荷载。为了研究刚性与柔性顶部边界条件对拉拔试验结果的影响, 基于离散元数值模拟, 从细观层面深入分析了刚性与柔性顶部边界条件下土工格栅与土的力学响应。研究表明: 在拉拔位移较小的情况下, 刚性与柔性顶部边界条件对拉拔试验结果几乎没有影响; 随着拉拔位移的增大, 顶部边界条件对拉拔试验结果的影响逐渐明显, 刚性顶部边界条件下的最大拉拔阻力略大于柔性顶部边界条件下的最大拉拔阻力; 土工格栅张力与试样内部土颗粒间接触力分布情况、试样内部土颗粒旋转情况以及顶部加载板颗粒的竖向位移分布规律直观地展现了顶部边界条件对拉拔试验结果的影响。本研究结果有望为规范土工格栅拉拔试验方法提供科学依据。

关键词: 土工格栅; 拉拔试验; 边界条件; 筋土界面; 离散元

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)05-0967-07

作者简介: 王志杰(1985—), 男, 讲师, 博士, 主要从事土工合成材料加筋土技术方面的研究工作。E-mail: zwang@stdu.edu.cn。

Mesoscopic numerical studies on geogrid-soil interface behavior under rigid and flexible top boundary conditions

WANG Zhi-jie^{1, 2, 3}, YANG Guang-qing¹, WANG He¹, LIU Wei-Chao¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering,

RWTH Aachen University, Aachen, North Rhine-Westphalia 52074, Germany; 3. Cooperative Innovation Center of Disaster Prevention

and Mitigation for Large Infrastructure in Hebei Province (Shijiazhuang Tiedao University), Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The pullout tests on geogrids have been regarded as the most direct way to investigate the geogrid-soil interaction. In the pullout tests on geogrids, either a rigid or a flexible top boundary is commonly used for applying the vertical loads. In order to investigate the influence of rigid and flexible top boundaries on pullout test results, discrete element modeling is carried out to deeply analyze the mechanical response of geogrids and soils under rigid and flexible top boundary conditions from the mesoscopic scale. The results show that the rigid and flexible top boundaries have almost no effects on the pullout test results when the pullout displacement is small. With the increasing pullout displacement, the influences of the top boundaries on the pullout test results become obvious. The maximum pullout resistance under the rigid top boundary conditions is slightly larger than that under flexible ones. Moreover, the influences of the top boundaries on the pullout test results can be visualized by the tensile force distribution of geogrids, the contact force distribution of soil particles in the specimens, the rotations of soil particles and the vertical displacement distribution of top loading particles. The investigation results in this study may provide scientific references for regulating the pullout test methods for geogrids.

Key words: geogrid; pullout test; boundary condition; geogrid-soil interface; discrete element method

0 引 言

作为一种重要的土工合成材料, 土工格栅广泛应用于各类加筋土工程实践^[1-3]。土工格栅的加筋效果是由土工格栅与其周围土体相互作用而产生的, 土工格栅与土之间的界面作用特性直接影响着加筋土结构的安全与稳定性。因此, 探究土工格栅与土之间的相互

作用机理在加筋土结构设计与应用中至关重要^[4]。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51709175); 河北省自然科学基金青年基金项目(E2017210148); 中国博士后科学基金面上项目(2018M631759); 河北省高等学校科学技术研究项目(QN2017134)
收稿日期: 2018-06-25

*通讯作者(E-mail: yanggq@stdu.edu.cn)

为了探究土工格栅的加筋机理,国内外专家、学者进行了大量的试验研究工作。在众多的试验方法中,土工格栅拉拔试验被认为是一种最简单、最直接的研究筋土界面特性的试验方法。通过该方法,可获取加筋土结构设计所需的相关参数。因此,众多的研究人员采用土工格栅拉拔试验进行了大量的研究工作,获得了格栅埋设长度^[5]、格栅刚度与土料类型^[6]、界面正应力与黏性土含水率^[7]以及格栅纵横肋数量等^[8-9]对拉拔试验结果的影响。

随着测试技术的发展,研究人员在试验仪器的改造与新设备的研发方面进行了大量探索。Ezzein 等^[10]采用透明土技术研制了一个新型的拉拔试验设备,可获取拉拔过程中土工格栅与土在水平方向的相对位移,对土工格栅与土之间的荷载传递进行可视化研究。王家全等^[11]研制了一台新型可视化自动采集数据的土工拉拔试验装置,通过开展以粗粒土为填料的土工格栅拉拔试验,对筋土的界面特性进行了可视化研究。

与常规的试验研究相比,离散单元法对于描述土工格栅与土的相互作用具有独特的优势,采用该方法可以从细观层面深入揭示土工格栅与土的力学行为与位移特征^[12]。郑俊杰等^[13]通过开发细观组构统计程序,记录了格栅拉拔过程中各区域砂土细观组构演化,探讨了砂土颗粒的接触法向、接触力分量的各向异性演化规律及其与试样宏观抗剪强度之间的关系。王家全等^[14]探讨了拉拔界面细观参数的演变及荷载传递机理,揭示了细观参数的演化规律及其与宏观力学性质之间的关系。Wang 等^[9]基于离散元细观统计分析程序,量化了拉拔荷载作用下土工格栅与土的力学响应,获得了土工格栅平面内法向应力的分布规律。Miao 等^[15]基于离散元数值模拟,研究了道砟颗粒形状对土工格栅拉拔试验结果的影响。

在上述拉拔试验与离散元数值模拟中,法向荷载通过刚性或柔性顶部边界施加。虽然 Palmeira 等^[16]基于室内拉拔试验研究了拉拔试验顶部边界对筋土界面作用特性的影响,但由于试验条件的限制,其研究结果仅为初步的对比分析,现有的研究成果暂未对规范土工格栅拉拔试验方法提出建议。这使得现有的拉拔试验在采用何种顶部边界条件(刚性或柔性)上仍存在着一定的争议,例如 Huang 等^[17]建议采用柔性顶部边界,而许多研究团队采用刚性顶部边界也获得了合理的、令人信服的研究结果^[9, 18-19]。在测试规范方面,美国的测试规范 ASTM D6706—01 建议采用柔性顶部边界^[20],而中国的《公路工程土工合成材料试验规程》(JTG E50—2006)与《土工合成材料测试规程》(SL 235—2012)则规定采用刚性顶部边界^[21-22]。

基于此,本文将开展离散元数值模拟,深入探究

刚性与柔性顶部边界条件对筋土相互作用的影响,系统阐述刚性与柔性顶部边界条件下土工格栅与土的力学响应与位移发展变化模式。本研究结果有望为规范土工合成材料拉拔试验方法提供科学依据、为优化加筋土结构设计提供理论支持。

1 土工格栅拉拔试验介绍

本研究中刚性顶部边界条件下的离散元数值模拟基于室内土工格栅拉拔试验。因此,本节对拉拔试验设备、试验方法以及试验材料等进行简要介绍。

土工格栅拉拔试验在德国亚琛工业大学岩土工程研究所进行,拉拔试验设备示意图如图 1 所示。拉拔试验箱四壁、底板、顶板均由钢板组成,其内部尺寸为长×宽×高=435 mm×300 mm×200 mm。竖向荷载经由拉拔试验箱顶部钢板直接施加在土样上,故该顶部边界条件可视为刚性荷载边界条件。需要注意的是,底板和顶板所承受竖向荷载大小可由压力传感器获得,二者的平均值被认为是作用在土工格栅平面内的法向应力。同时,拉拔试验过程中,时时调整施加于顶板上的竖向荷载,以使土工格栅平面内的法向应力保持恒定不变。拉拔端夹具的水平位移速率为 1 mm/min。试验过程中,可自动记录拉拔力、拉拔位移以及土工格栅各处位移发展变化情况。

试验所采用的土料为砾石,其相关参数指标如表 1 所示。通过开展直剪试验,测得该土料的内摩擦角为 40.9°。研究中所采用的土工格栅为德国 NAUE 公司提供的双向焊接聚丙烯(PP)土工格栅,其相关参数指标如表 2 所示。更多的关于本拉拔试验及试验结果等见 Wang 等^[9]。

表 1 土料相关参数

Table 1 Related parameters of soils				
粒径范围	中值粒径	相对密实度	干密度	含水率
/mm	d_{50}/mm	D_r	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w/\%$
2-8	4.5	0.85	1.56	0

2 离散元数值模拟

尽管二维离散元模拟存在某些固有缺陷,但采用二维软件可在合理的计算时间内获得土工格栅与土相互作用的基本原理。因此,本研究采用 PFC^{2D}进行离散元数值模拟。

在土工格栅拉拔试验的数值模拟中,拉拔试验箱的长度和高度与室内试验箱尺寸一致,即长度为 435 mm,高度为 200 mm。土颗粒之间无胶结作用,采用线性接触刚度模型;土工格栅采用黏结颗粒,颗粒间采用分段线性模型,以表征土工格栅的非线性拉伸特

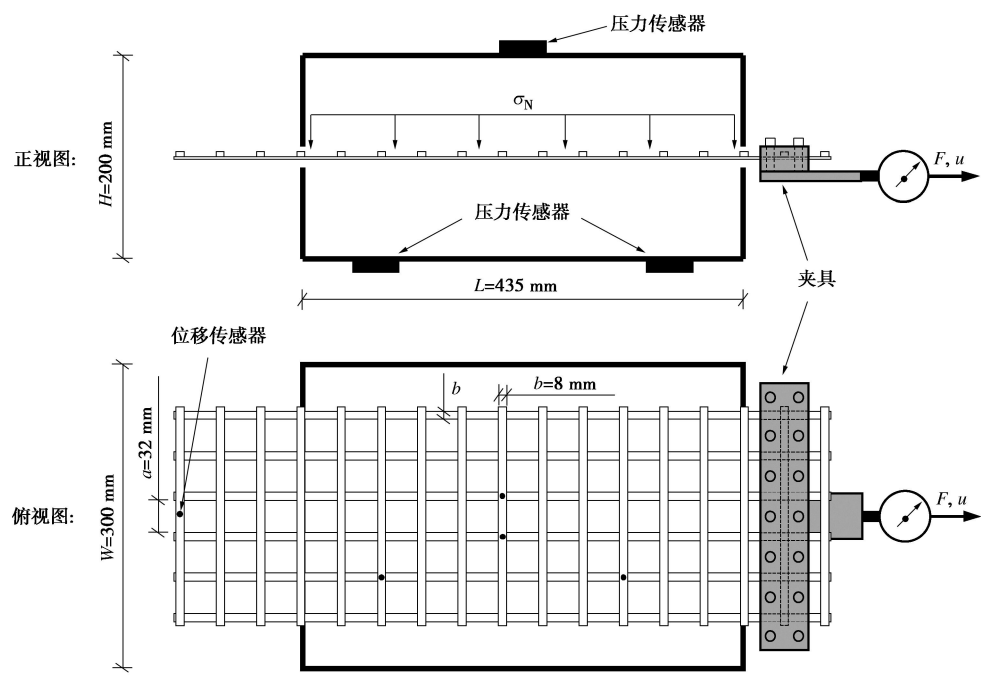


图 1 土工格栅拉拔试验仪示意图^[9]

Fig. 1 Sketch of pullout test apparatus for geogrids^[9]

表 2 土工格栅相关参数

Table 2 Related parameters of geogrids

网孔尺寸 /(mm×mm)	单肋宽度 /mm	单肋厚度 /mm	极限抗拉强度 /(kN·m ⁻¹)	断裂延伸率 /%	不同伸长率时的拉伸强度/(kN·m ⁻¹)	
					2%	5%
32×32	8	1	30	7	12	24

性^[23]。按照文献[24]中离散元数值模拟确定二维孔隙率的方法,本模拟中试样的二维孔隙率为 $n_{2D}=0.17$ 。实际的三维土工格栅样品在数值模拟中简化为具有相对较高结点的二维离散元模型,该较高结点可模拟土工格栅横肋在筋土相互作用中的贡献。

在离散元数值模拟中,试样顶部采用一串水平向黏结颗粒施加竖向荷载,颗粒间采用平行黏结模型。在刚性顶部边界条件下,黏结颗粒间不能产生相对转动;而对于柔性顶部边界条件,黏结颗粒可以自由转动,如图 2 所示。需要说明的是,对顶部颗粒所施加的竖向荷载与底板所承受的竖向荷载的平均值即为筋材平面内的法向应力。本研究采用伺服机制对顶部颗粒直接施加竖向荷载,以使筋材平面内的法向应力 $\sigma_N=50\text{ kPa}$ 保持不变。在数值模拟中,筋材的拉拔速率为 1 mm/min ,与室内拉拔试验一致。

标定离散元模拟细观参数时,土料与土工格栅的细观参数分别通过土料的直剪试验与筋材的拉伸试验进行标定。标定过程中采用迭代调整细观参数的方法,直至数值模拟结果与试验结果较为接近。在拉拔试验的数值模拟中,采用无格栅横肋的筋材拉拔试验标定

筋土界面的摩擦系数,采用有一根横肋的筋材拉拔试验标定二维离散元数值模拟中筋材结点的高度。详细的标定过程及标定结果见 Wang 等^[9],标定后的离散元模拟细观参数如表 3 所示。

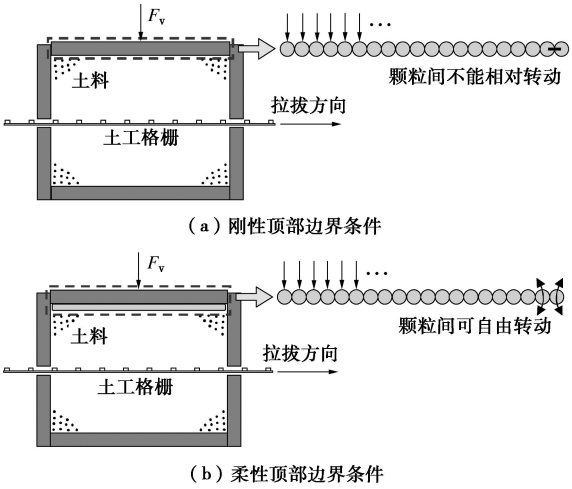


图 2 离散元模拟中不同顶部边界条件加载方式

Fig. 2 Loading methods for different top boundaries in DEM simulations

表 3 离散元模拟细观参数

Table 3 Mesoscopic parameters of DEM investigations

类型	参数	数值
土料	颗粒密度 $\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2650
	粒径范围 d/mm	2~8
	$d_{50} = 4.5$	
	法向接触刚度 $k_{n,b} / (10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	6
	切向接触刚度 $k_{s,b} / (10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	6
土工 格栅	摩擦系数 f_b	5
	颗粒直径 d_g / mm	1
	平行黏结半径系数 λ	0.0005
	平行黏结法向刚度	76, 47, 38
	$\bar{k}_{ng,i} / (10^{14} \text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	33, 0
	平行黏结切向刚度	
	$\bar{k}_{sg,i} / (10^{14} \text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	20, 0
	平行黏结抗拉强度	
	$\bar{\sigma}_{cg} / (10^{14} \text{Pa})$	4
	平行黏结抗剪强度	
	$\bar{\tau}_{cg} / (10^{14} \text{Pa})$	4
	法向接触刚度 $k_{ng} / (10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	4
	切向接触刚度 $k_{sg} / (10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	4
	摩擦系数 f_g	0.3
边界 墙体	法向接触刚度 $k_{n,w} / (10^7 \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1
	切向接触刚度 $k_{s,w} / (10^7 \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	1
	摩擦系数 f_w	2.5
顶部 边界 胶结 颗粒	颗粒直径 d_m / mm	1
	平行黏结半径系数 λ	0.0005
	平行黏结法向刚度 $\bar{k}_{nm} / (10^{14} \text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	76
	平行黏结切向刚度 $\bar{k}_{sm} / (10^{14} \text{Pa} \cdot \text{m}^{-1})$	20
	平行黏结抗拉强度 $\bar{\sigma}_{cm} / (10^{14} \text{Pa})$	4
	平行黏结抗剪强度 $\bar{\tau}_{cm} / (10^{14} \text{Pa})$	4
	法向接触刚度 $k_{nm} / (10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	4
	切向接触刚度 $k_{sm} / (10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	4
	摩擦系数 f_m	2.5

3 模拟结果与分析

3.1 拉拔阻力 - 拉拔位移关系

基于离散元数值模拟，刚性与柔性顶部边界条件下土工格栅拉拔阻力与拉拔位移关系曲线如图 3 所示。由图 3 可以看出，在拉拔位移较小时，刚性与柔性顶部边界条件对拉拔试验结果影响较小；随着拉拔位移的增大，顶部边界条件对拉拔试验结果影响逐渐显现，刚性顶部边界条件下土工格栅的最大拉拔阻力略大于柔性边界条件下土工格栅的最大拉拔阻力。在数值模拟中，由于土料粒径较大，土颗粒沿筋材（尤其是格栅横肋处）发生滑动和转动，使得在拉拔过程中不断形成新的较为密实的颗粒排列状态，进而产生

拉拔阻力波动的现象，这一现象在刚性顶部边界条件下更为明显。

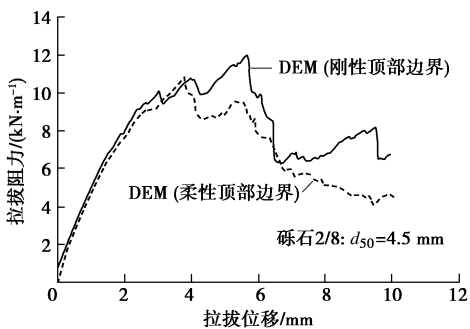


图 3 顶部边界条件对拉拔试验结果影响

Fig. 3 Influences of top boundaries on pullout test results

Palmeira 等^[16]基于室内拉拔试验获取了刚性与柔性顶部边界条件下土工格栅拉拔阻力与拉拔位移关系曲线，如图 4 所示。对比图 3，4 可以看出，本文的离散元数值模拟结果与文献中的试验结果规律性基本一致。因此，基于目前的离散元数值模拟，本文开展了进一步的分析工作，以探究刚性与柔性顶部边界条件对拉拔荷载作用下筋土界面特性的影响规律。

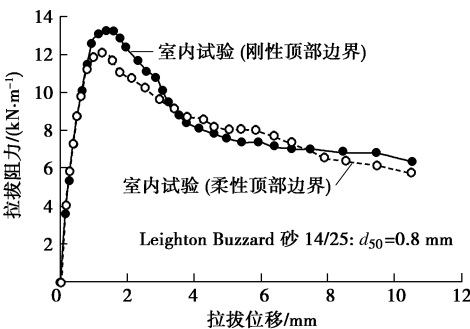


图 4 文献中顶部边界条件对拉拔试验结果影响^[16]

Fig. 4 Influences of top boundaries on pullout test results from Reference^[16]

3.2 土工格栅张力与试样内部接触力分布规律

本文对刚性与柔性顶部边界条件下不同拉拔位移时土工格栅张力以及试样内部土颗粒间接触力的分布规律进行了可视化分析，如图 5 所示。试样内红色的线代表了土工格栅张力，而黑色的线代表了土颗粒间的接触力。线的粗细程度表征了力的大小。此外，基于离散元细观统计分析程序，本文还获取了各工况条件下土工格栅张力沿土工格栅位置分布的定量结果，如图 5 所示。

在各工况条件下，由于土工格栅与土颗粒间的摩擦与阻抗作用，土工格栅张力由拉拔端向自由端逐渐减小，在土工格栅横肋位置处，土工格栅张力出现骤降。在拉拔过程中，荷载由土工格栅逐渐传递至土颗粒，从而引起土颗粒间接触力方向发生偏转。

当拉拔位移较小时 ($u=2 \text{ mm}$)，刚性与柔性顶部

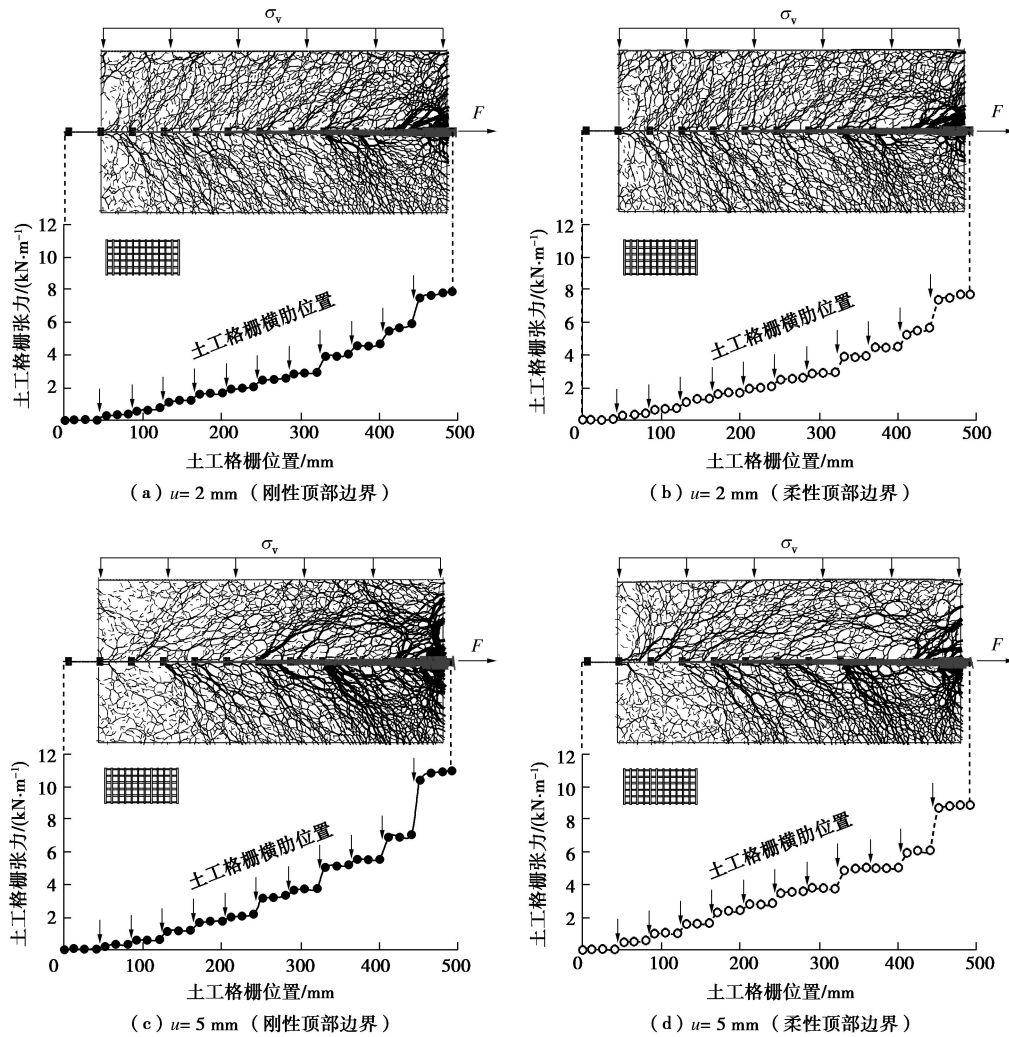


图5 顶部边界条件对土工格栅张力与试样内部接触力分布规律影响

Fig. 5 Influences of top boundaries on tensile force distribution along geogrids and contact force distribution in specimens

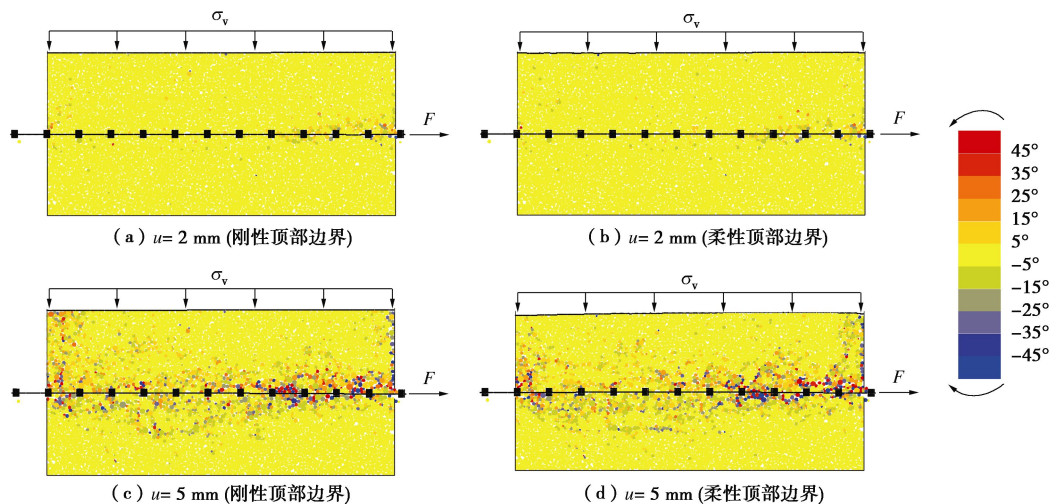


图6 试样内部土颗粒旋转情况

Fig. 6 Rotations of soil particles in specimens

边界条件下土工格栅张力以及试样内部土颗粒间接触力的分布规律几乎完全一致(见图5(a)、5(b))。随着拉拔位移的增大,顶部边界条件对土工格栅张力

与试样内部接触力分布规律影响逐渐明显。当拉拔位移 $u=5\text{ mm}$ 时,刚性顶部边界条件下拉拔前端土工格栅张力大于柔性顶部边界条件下拉拔前端土工格栅张

力。由于土工格栅张力的差异分布,进而引起不同顶部边界条件下试样内部土颗粒间接触力的分布情况也产生一定的差异(见图5(c)、5(d))。

3.3 试样内部土颗粒旋转情况

为了进一步探究刚性与柔性顶部边界条件对筋土荷载传递规律的影响,本文对各工况条件下试样内部土颗粒的旋转情况进行了记录,如图6所示。拉拔荷载施加前,试样内部土颗粒的颜色全部设定为黄色。随着拉拔过程中筋土界面荷载的传递,土颗粒将产生不同程度的旋转。根据土颗粒不同的旋转方向与角度,可将颗粒分别调整为不同的颜色(见图6)。与土工格栅张力以及试样内部接触力分布规律类似,当拉拔位移较小时($u=2\text{ mm}$),两种顶部边界条件下试样内部土颗粒的旋转情况比较接近,即主要分布在土工格栅拉拔前端。当拉拔位移较大时($u=5\text{ mm}$),土颗粒的旋转情况更为明显。相比两种顶部边界条件下土颗粒的旋转情况可以看出,刚性边界条件下拉拔末端格栅上部土颗粒的旋转情况更为明显(图6(c))。该现象可结合下一节顶部加载板颗粒的竖向位移分布特征进行解释。

3.4 顶部加载板颗粒竖向位移分布规律

离散元数值模拟中采用水平向黏结的颗粒施加竖向荷载,各工况条件下加载板颗粒的竖向位移分布规律如图7所示。当拉拔位移较小时($u=2\text{ mm}$),刚性与柔性顶部边界条件下加载板颗粒的竖向位移分布规律比较接近,拉拔末端和中部加载板颗粒的竖向位移几乎重合。随着拉拔位移的增大,刚性与柔性顶部边界条件下加载板颗粒的竖向位移分布特征差别逐渐明显。当拉拔位移较大时($u=5\text{ mm}$),刚性顶部边界条件下加载板颗粒间的竖向位移差约为 0.7 mm ;而柔性顶部边界条件下加载板颗粒间的竖向位移差约为 3.6 mm ,是刚性顶部边界条件下加载板颗粒间的竖向位移差的5倍,柔性顶部边界条件下加载板颗粒的最大竖向位移发生在靠近拉拔前端的位置(见图7)。

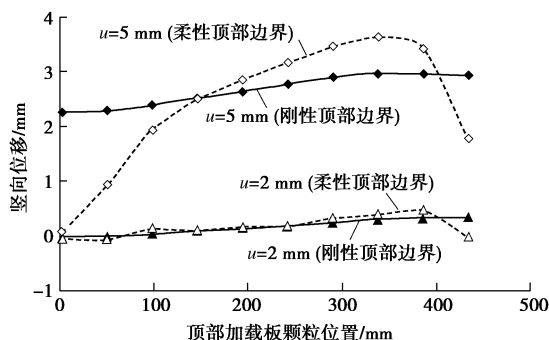


图7 顶部加载板颗粒竖向位移分布情况

Fig. 7 Vertical displacements of top loading particles

结合图5(c)、5(d)拉拔位移 $u=5\text{ mm}$ 时刚性与柔性顶部边界条件下土颗粒间接触力的分布情况以及图6(c)、6(d)拉拔位移 $u=5\text{ mm}$ 时刚性与柔性顶部边界条件下土颗粒的旋转情况,可以发现,柔性顶部边界条件使试样内部土颗粒间接触力分布更为均匀,同时也限制了拉拔末端土颗粒的旋转。因此,当拉拔位移较大时,建议采用柔性顶部边界施加法向垂直荷载。

4 结 论

采用PFC^{2D}软件,模拟了刚性与柔性顶部边界条件下土工格栅拉拔试验,从细观层面分析研究了顶部边界条件对筋土界面特性的影响。主要得出以下结论:

(1)刚性顶部边界条件下最大拉拔阻力略大于柔性顶部边界条件下最大拉拔阻力。基于离散元细观统计分析程序,获得了各工况条件下筋土荷载传递规律,实现了刚性与柔性顶部边界条件下筋土界面特性的可视化。

(2)揭示了各工况条件下加载板颗粒的竖向位移分布特征规律。当拉拔位移较大时,柔性顶部边界条件使试样内部土颗粒间接触力分布更为均匀,限制了拉拔末端土颗粒的旋转。

(3)当拉拔位移较小时,刚性与柔性顶部边界条件对拉拔试验结果的影响可忽略不计;但当拉拔位移较大时,建议采用柔性顶部边界施加法向垂直荷载。

参考文献:

- [1] HAN J, THAKUR J K. Sustainable roadway construction using recycled aggregates with geosynthetics[J]. Sustainable Cities and Society, 2015, 14: 342 - 350.
- [2] 陈福全, 赖丰文. 抗土洞塌陷的低填方加筋路基荷载传递机制及设计方法[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1180 - 1189. (CHEN Fu-quan, LAI Feng-wen. Load transfer mechanisms and design method of low geosynthetics-reinforced embankments subjected to localized sinkholes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7): 1180 - 1189. (in Chinese))
- [3] 介玉新, 秦晓艳, 金鑫, 等. 加筋高边坡的稳定分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 660 - 666. (JIE Yu-xin, QIN Xiao-yan, JIN Xin, et al. Stability of high reinforced soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 660 - 666. (in Chinese))
- [4] 包承纲, 汪明远, 丁金华. 格栅加筋土工作机理的试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 34 - 41. (BAO Cheng-gang, WANG Ming-yuan, DING Jin-hua. Mechanism

- of soil reinforced with geogrid[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, **30**(1): 34 - 41. (in Chinese))
- [5] MORACI N, RECALCATI P. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**(4): 220 - 242.
- [6] 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 Guang-qing, LI Guang-xin, ZHANG Bao-jian. Experimental studies on interface friction characteristics of geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(8): 948 - 952. (in Chinese))
- [7] 徐超, 廖星樾. 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 Xing-yue. Researches on interaction mechanism between geogrid and sand by pull-out tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(2): 423 - 428. (in Chinese))
- [8] 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 Cheng-zhi, FENG Xiao-jing. 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))
- [9] WANG Z, JACOBS F, ZIEGLER M. Experimental and DEM investigation of geogrid - soil interaction under pullout loads[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, **44**(3): 230 - 246.
- [10] EZZEIN F M, BATHURST R J. A new approach to evaluate soil-geosynthetic interaction using a novel pullout test apparatus and transparent granular soil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, **42**(3): 246 - 255.
- [11] 王家全, 周岳富, 夏雨, 等. 新型可视土工拉拔试验仪的研发与应用[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(4): 718 - 725. (WANG Jia-quan, ZHOU Yue-fu, XIA Yu, et al. Development and application of new visual pullout test apparatus for geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(4): 718 - 725. (in Chinese))
- [12] STAHL M, KONIETZKY H, TE KAMP L, et al. Discrete element simulation of geogrid-stabilised soil[J]. Acta Geotechnica, 2014, **9**(6): 1073 - 1084.
- [13] 郑俊杰, 周燕君, 赖汉江, 等. 格栅加筋砂土拉拔试验界面特性的离散元模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, **42**(8): 104 - 108. (ZHENG Jun-jie, ZHOU Yan-jun, LAI Han-jiang, et al. DEM analysis of characteristic of interface between geogrid and sand in pullout test[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, **42**(8): 104 - 108. (in Chinese))
- [14] 王家全, 周健, 吴辉琴, 等. 加筋土拉拔界面作用的离散元细观模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, **35**(7): 839 - 845. (WANG Jia-quan, ZHOU Jian, WU Hui-qin, et al. Discrete element mesoscopic simulation of the reinforced soil pullout test interface effect[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, **35**(7): 839 - 845. (in Chinese))
- [15] MIAO C X, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. DEM modeling of pullout behavior of geogrid reinforced ballast: The effect of particle shape[J]. Computers and Geotechnics, 2017, **81**: 249 - 261.
- [16] PALMEIRA E M, MILLIGAN G W E. Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand[J]. Géotechnique, 1989, **39**(3): 511 - 542.
- [17] HUANG B, BATHURST R J. Evaluation of soil-geogrid pullout models using a statistical approach[J]. Geotechnical Testing Journal, 2009, **32**(6): 489 - 504.
- [18] ABDI M R, ARJOMAND M A. Pullout tests conducted on clay reinforced with geogrid encapsulated in thin layers of sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, **29**(6): 588 - 595.
- [19] JACOBS F, ZIEGLER M, VOLLMERT L, et al. Explicit design of geogrids with a nonlinear interface model[C]// Proceedings of 10th International Conference on Geosynthetics. Berlin, 2014.
- [20] ASTM D6706-01 Standard test method for measuring geosynthetic pullout resistance in soil[S]. 2013.
- [21] JTG E50—2006 公路工程土工合成材料试验规程[S]. 2006. (JTG E50—2006 Test methods of geosynthetics for highway engineering[S]. 2006. (in Chinese))
- [22] SL 235—2012 土工合成材料测试规程[S]. 2012. (SL 235—2012 Specification for test and measurement of geosynthetics[S]. 2012. (in Chinese))
- [23] WANG Z, JACOBS F, ZIEGLER M. Visualization of load transfer behaviour between geogrid and sand using PFC2D[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, **42**(2): 83 - 90.
- [24] WANG Z, RUIKEN A, JACOBS F, ZIEGLER M. A new suggestion for determining 2D porosities in DEM studies[J]. Geomechanics and Engineering, 2014, **7**(6): 665 - 678.