

DOI: 10.11779/CJGE201604017

# 新型可视土工拉拔试验仪的研发与应用

王家全, 周岳富, 夏雨, 黄世斌

(广西科技大学土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006)

**摘要:** 研制了一台新型可视自动采集数据的土工拉拔试验装置, 可用于多种土工材料和填料作用下的拉拔试验。该装置改进了加载系统和反力系统, 实现了拉拔界面的可视与数据采集的自动化, 并可量测土工材料不同嵌固长度处的位移, 获取土工材料变形值, 探索筋土作用过程中筋材受力机理及界面土体位移变化规律。使用新研制的试验装置开展了以砾类粗粒土为填料的格栅拉拔试验, 结果表明: 上覆荷载增大, 土中格栅的应变变小, 土体与格栅的界面摩擦和嵌固作用越显著; 筋土界面处土体颗粒存在平移及转动两种运动模式, 且界面处土体形成稳定的位移集中带。

**关键词:** 拉拔试验; 可视; 格栅位移; 格栅应变

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)04-0718-08

**作者简介:** 王家全(1981-), 男, 广西南宁人, 博士, 教授, 主要从事加筋结构、细观岩土力学、地基基础等方面的教学与研究工作。E-mail: wjquan1999@163.com。

## Development and application of new visual pullout test apparatus for geosynthetics

WANG Jia-quan, ZHOU Yue-fu, XIA Yu, HUANG Shi-bin

(College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

**Abstract:** A new visual pullout test model device is developed, which can be used to carry out pullout tests on geosynthetics and soil. The device improves the loading system and the reaction system, and realizes the pullout interface visualization and data acquisition automation. It can measure the displacements of geosynthetics with different embedment lengths, and obtain the deformation values of geosynthetics. The reinforcement mechanism and displacement evolution of interface soil in the process of reinforcement soil interface interaction are studied. The newly developed test equipment is used to carry out the pullout tests on coarse grained soil and geogrid. The results show that the greater the vertical pressure, the smaller the soil grid strain, the more significant the interfacial friction between soil and geogrid and the embedment effect. Two modes of translational and rotational displacements can be found on the reinforcement soil interface, and the interface particles form a stable soil displacement concentrated zone.

**Key words:** pullout test; visualization; geogrid displacement; geogrid strain

## 0 引言

近年来, 加筋土已经广泛应用于水利、公路、建筑等工程中。土工合成材料与填料的相互作用可以视为加筋土复合材料, 筋材的约束增大了土体侧向压力, 加筋作用提高了土的抗压强度和抗剪强度<sup>[1]</sup>。法国 Schlosser 等<sup>[2]</sup>认为, 加筋机理的拉拔试验能体现土体剪胀和压密状态, 并较好模拟筋材在土体内部的工作条件。国内外学者普遍以拉拔试验研究土与加筋体的相互作用<sup>[3]</sup>。Moraci 等<sup>[4]</sup>以土工格栅拉拔试验研究了不同的影响因素, 包括加筋体刚度、加筋体的结构形式、埋入长度及竖向有效应力。Abdel-Rahman 研究了土工格栅在拉拔试验中的受力机制, 并推导了界面剪应力的相关表达式<sup>[5]</sup>。现场实测结果已证明, 拉拔试验能较好地模拟加筋土结构中筋材的加筋行为,

为现行的加筋结构物设计获得合适的界面参数提供了一种方法<sup>[6]</sup>。近年来, 针对已有设备的不足, 土工合成材料与土相互作用的相关试验装置得到不断研发<sup>[7-8]</sup>。徐林荣等<sup>[9]</sup>研制加工了一套专门用于膨胀土与土工格栅界面相互作用的室内模型试验装置, 其试验箱体由木材及角钢制成, 竖向加载采用油压千斤顶, 水平拉力由滑轮和电机、变速箱提供; 施有志<sup>[10]</sup>进行土工格栅与填料的拉拔试验, 采用的装置为一台小型拉拔仪, 是在直剪试验设备的基础上改装而成, 水平剪切力采用砝码控制。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51469005, 51009030); 广西自然科学基金项目 (2015GXNSFAA139257); 广西科技大学博士基金项目 (院科博 1011)

收稿日期: 2015-02-27

目前所公开的拉拔试验设备尺寸一般都相对较小, 拉拔试验受到室内模型尺寸效应的限制, 关于筋土界面相互作用的研究不可避免地受到边界效应的影响; 另一方面, 现有试验设备进行拉拔试验仅能够得到筋土界面相互作用过程的宏观力学响应, 诸如筋材的拉拔力及位移等, 但对于筋土作用过程中界面砂土细观组构变化较少涉及, 如界面的接触数、接触法向及孔隙率等细观参量限于仪器原因难以获取, 从而无法从颗粒介质层面揭示筋土界面作用的细观机理, 不利于加筋技术的深入研究。同时当前所公开的土工合成材料拉拔试验设备在拉拔试验过程中只测量加筋材料的前端位移, 没有对加筋材料的不同嵌固长度处位移进行测量, 无法深入研究筋材受力的全过程及筋土作用机制。此外, 试验数据的读取、记录和处理, 也存在着许多缺陷, 容易产生人为误差, 无法获得精确的试验结果。

基于以上分析, 研制了一台新型可视自动采集数据的土工拉拔试验装置, 解决了现有试验装置存在的若干问题。利用新研制的试验装置开展了土工格栅与粗粒土的拉拔试验, 实现筋土界面作用分析可视化, 获取界面参数, 分析筋土拉拔作用机理, 取得了良好的试验效果。

## 1 拉拔试验装置的研制

### 1.1 模型试验箱

本试验箱内径尺寸为  $600\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 500\text{ mm}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高), 如图1所示, 比一般试验箱的尺寸要大, 减弱了拉拔试验受到的尺寸效应和边界效应影响, 同时, 也使得试验装置具备了粗颗粒试验的功能。如图2实物试验箱所示在正面增设钢化玻璃, 钢化玻璃前面架设有用于拍摄并记录试验过程中筋土界面作用的体视显微镜及高清数码摄录装置, 由数字图像细观结构分析软件统计得到拉拔试验荷载传递过程中筋土界面区域颗粒接触数、粒间接触法向、颗粒长轴定向、局部孔隙率等主要细观组构参量的变化规律, 并获取加筋拉拔试验过程中筋土界面附近土体颗粒的位移场和应变场变化, 研究分析筋土界面作用的细观机理。试验箱的大型化与可视为筋土拉拔试验可靠的数据来源奠定了基础。此外, 为了方便大型试验箱装卸土料, 在试验箱的底部设置滚轮, 减小了额外摩擦力, 并在侧面增设导向滚轮, 使其在固定轨道上滑行。

### 1.2 竖向加载系统

在以往的界面试验设备里, 竖向荷载的施加, 多为堆载重物的方法, 而本试验装置对施加竖向荷载装置进行优化, 利用油压法取代法码堆载式加载, 使荷

载可调, 并卸载简单, 减少了大量体力工作, 提高了试验操作的便捷性。竖向加载系统主要由液压电动机及油泵、液压加载板和液压控制系统构成。其中液压电动机采用三相异步电动机配合油泵使用。液压加载板如图3所示, 与液压杆的连接为类球型链接, 使得液压加载板可以自由转动, 减小施加荷载造成的偏心误差。

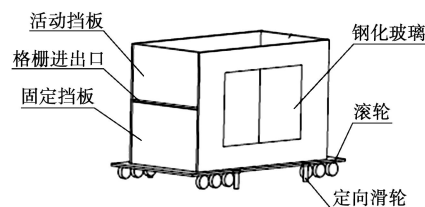


图1 模型箱

Fig. 1 Model casing



图2 模型箱（实物）

Fig. 2 Photo of model casing

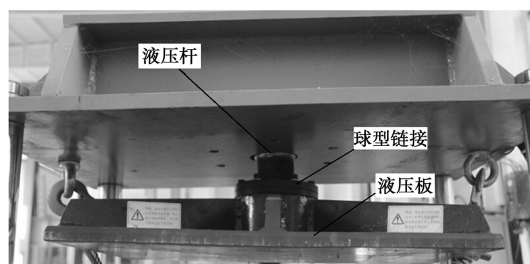


图3 液压加载板

Fig. 3 Hydraulic panel

液压控制系统由液压表、操作杆及压力调节旋钮构成, 液压表如图4所示采用耐震精密油压表。通过液压表的反算与标定, 把围压对应的液压值附在液压表旁边, 以便施加荷载时对照。图4右侧的压力调节旋钮控制可调节油缸压力大小, 即控制竖向应力的大小。

### 1.3 水平伺服控制系统

本试验装置通过增设承重台的方式, 巧妙地把拉拔力与反作用力通过承重台联接在一起, 相互抵消, 避免增设以往在装置两端均设置提供试验需要的反力挡墙构件。如图5所示在施加水平载荷的拉压电机和

拉拔夹具之间安装有拉压传感器，试验箱末端安装有位移传感器。拉拔试验时，试验箱中试样的前端与拉拔夹具连接，根据需要，试样的不同位移测设点通过钢绞丝与位移传感器连接。

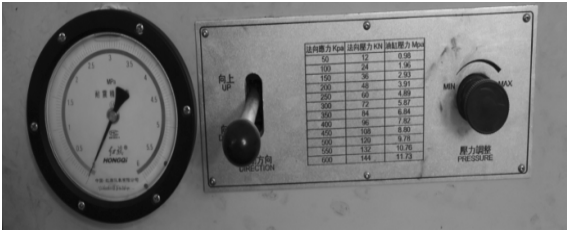


图 4 液压表

Fig. 4 Hydraulic pressure indicator

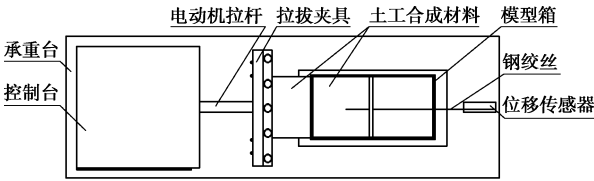


图 5 水平伺服控制系统

Fig. 5 Horizontal servo control system

(1) 拉压电机

拉压电机如图 6 所示，可根据需要设定不同推拉速度。

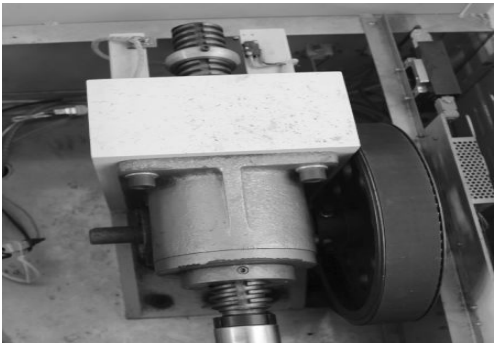


图 6 拉压电机

Fig. 6 Tension and compression motor

(2) 拉压传感器

拉压传感器如图 7 所示，与推拉电机通过内接螺栓连接，精确量测推拉过程受到的作用力。



图 7 拉压传感器

Fig. 7 Tension compression load cells

(3) 拉拔夹具

为了方便简捷地夹紧和松开夹具取出土工合成材料试样，本装置设计了如图 8 所示的拉拔夹具，该滑

动夹具包括夹板和滑动支座。夹板由移动夹板和 2 块固定夹板组成，该移动夹板与其上方的固定夹板之间通过弹簧螺栓安装有弹簧。为防止拉拔夹具过重下沉从而影响与其连接土工合成材料的正常水平拉拔测试，通过增设了滚轮的滑动支座，可保证夹具能自由的沿拉拔方向滑动，并有效地减小夹具支座与承台的摩擦。

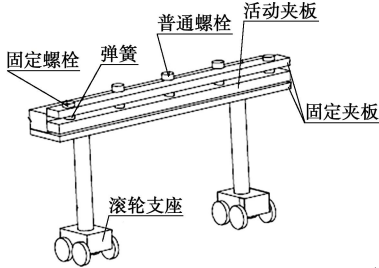


图 8 拉拔夹具

Fig. 8 Pullout perch

(4) 位移传感器

拉拔试验过程需获取土工合成材料的精确拉拔位移，位移传感器如图 9 所示，其通过钢绞丝与土工合成材料试样的位移测设点进行连接，采集拉拔试验过程中的筋材位移变化量。

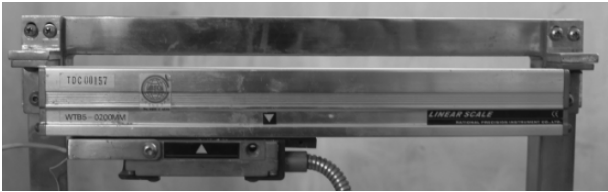


图 9 位移传感器

Fig. 9 Displacement sensor

1.4 控制台系统

为了减少人工读数记录结果的繁杂工作与误差，如图 10 所示试验装置设置了控制台，对数据进行自动化采集。该控制台中设有集成电板和控制面板，在拉拔试验过程中，可以将试验结果实时反映在控制台的液晶面板上，并通过与个人计算机联接来进行数据分析和后处理，不仅使得试验的结果一目了然，还可以实时监控试验的进展并及时发现问题，为试验的优化提供参考。此外，还可以通过控制台的可输入式控制面板对试验中各参数进行精确的设置，进一步减少试验过程中的人为误差。



图 10 控制面板

Fig. 10 Control panel

### 1.5 试验装置实现过程

本试验装置的研发与组装,如图 11 所示包括脚支座、承重台、控制台、拉压电机、拉压传感器、拉拔夹具、位移传感器、试验箱、液压板、液压杆、液压电动油泵。

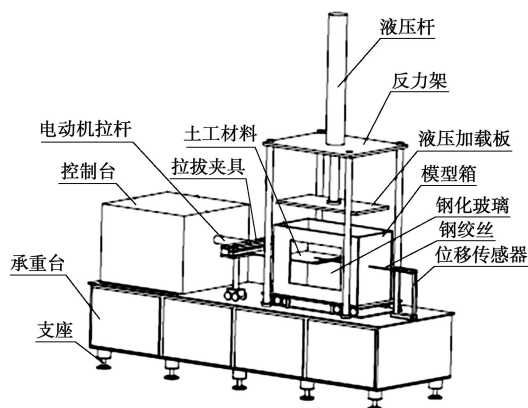


图 11 试验装置

Fig. 11 Test devices

试验开始前,在试验箱中埋设碎石、砂土、黏性土等土工填料,将需要试验的格栅等土工材料试样前端与拉拔夹具固定,并穿过试验箱的开口,把其位移测点通过钢绞丝与位移传感器连接。在试样上合适覆土填料,由液压系统通过阀门控制液压板进行围压,此时,必须保证在试验箱的钢化玻璃处,能清晰看到试样的痕迹,以便拍摄保证可视化数据的获得。试验箱围压稳定后,通过控制台的液晶控制面板设定各项试验参数(法向压力、加筋嵌入长度及宽度、拉拔位移等),然后进行试验实现拉拔试验数据采集的自动化。拉拔过程中利用钢化玻璃前的高清数码相机和体视显微镜对拉拔试验箱钢化玻璃区域内筋土界面土体颗粒进行实时摄录。当每一次拉拔试验结束后,试验装置可通过与控制台相连的打印机将当前试验的结果打印出来,包括当前试验的拉拔速度、测点处位移与最大拉拔力等试验数据,并联接个人计算机完成试验数据的采集、分析和后处理。

### 1.6 试验装置的技术特点

研发的土工拉拔试验装置相比国内外同类型的拉拔试验装置有如下的技术特点:

(1)试验装置可开展各种土工合成材料与土的拉拔试验,包括土工格栅、土工网、土工格室、土工带及土工垫,能精确测试筋材与土的抗拉强度、峰值拉应变和拉应力-应变曲线。

(2)根据试验需要可量测试验过程中筋材不同嵌入长度处的位移(本文试验测量了前端、中部和末端位移),有助于分析拉拔过程中筋材的各部位受力特征

及其变形规律,从而深入研究筋土相互作用机制。

(3)巧妙设计了夹具及试验箱拉拔开口,解决了以往筋材与夹具连接不牢的问题,同时实现了试验箱拉拔开口自由调节高度,适应不同厚度的筋材进出。

(4)通过伺服控制系统,可对筋材施加  $0.5 \sim 10 \text{ mm/min}$  范围内拉拔位移恒定速率,对试验箱土样可精确控制施加恒定法向压力。

(5)拉拔试验箱的可视,采用高清数码和体视显微镜对钢化玻璃区域内筋土界面土体颗粒进行实时摄录,获取加筋土拉拔试验过程中筋土界面附近土体颗粒的位移及孔隙率变化规律。

(6)拉拔试验箱尺寸的大型化,远大于常规试验箱尺寸,受到尺寸效应的影响较小,试验结果更贴合实际,同时试验装置可施加高达  $0 \sim 600 \text{ kPa}$  的高压竖向荷载,可实现从普通黏土到砂土及粗粒土的加筋拉拔试验。

(7)通过控制台实现了试验数据采集的自动化,既可实时显示和打印拉拔试验曲线,亦可通过将控制台与个人计算机联接来进行数据分析和后处理,避免了人工读数的缺陷。

## 2 拉拔试验装置的初步应用

### 2.1 试验填料

试验土料是砾类粗粒土,该粗粒土具体的物理性质指标为:有效粒径  $d_{10} = 0.58 \text{ mm}$ ,中值粒径  $d_{30} = 1.36 \text{ mm}$ ,限制粒径  $d_{60} = 3.06 \text{ mm}$ ,不均匀系数  $C_u = 5.24$ ,曲率系数  $C_c = 1.04$ ,粒径大于  $5 \text{ mm}$  的颗粒(P5)质量百分比为  $18\%$ 。土料颗粒级配曲线见图 12 所示。

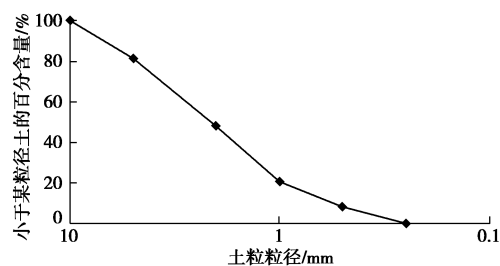


图 12 土颗粒级配曲线

Fig. 12 Grading curve of soil

### 2.2 加筋材料

加筋材料是由山东省肥城市肥城联谊工程塑料有限公司生产的双向土工格栅,型号为 TGSG—30,见图 13,该土工格栅的具体技术指标见表 1,根据试验方案,土工格栅在拉拔试验箱中的嵌入长度  $L$  为  $45 \text{ cm}$ 。



2.3 试验步骤

采用选好的砾类粗粒土，根据 1.5 节中试验操作步骤，进行不同竖向压力下土工格栅与砾类粗粒土拉拔试验，如图 14 所示。图 15 为试验箱的正面拍摄到的筋土拉拔界面照片，可以清晰看到土工格栅与粗粒土的接触位移情况。



图 13 土工格栅

Fig. 13 Geogrid

表 1 土工格栅具体技术指标

Table 1 Specific technical indices of geogrid

每延米纵向 拉伸屈服力 /(kN·m <sup>-1</sup> )	每延米横向 拉伸屈服力 /(kN·m <sup>-1</sup> )	纵向屈服 伸长率 /%	横向屈服 伸长率 /%	网孔 尺寸 /(mm×mm)
32.8	32.5	13.7	11.2	40×30



图 14 试验仪器

Fig. 14 Test instrument

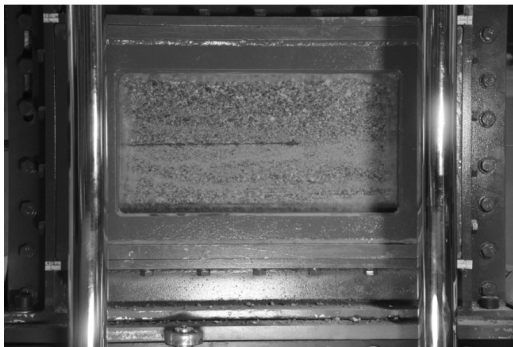


图 15 格栅拍照

Fig. 15 Photo of grille

2.4 试验结果分析

(1) 格栅试样的破坏形式

土工格栅在拉拔试验中是否破坏与嵌入长度和竖向压力有关。试验中，土工格栅嵌入粗粒土的长度为 45 cm，在竖向压力达到 75 kPa 时，土工格栅的破坏出现在试验箱拉拔开口处的格栅位置，断裂处基本在同一横格内，如图 16 所示，相同工况的多组试验破坏结果较为类似，表明土工格栅嵌入段受到土体的约束包裹，与拉拔口外露空气的格栅段相比，格栅变形较小，夹具端到拉拔口位置的土工格栅未受到土体包裹约束，变形较为明显，故土工格栅破坏均集中在试验箱拉拔开口位置。



图 16 土工格栅破坏

Fig. 16 Destruction of geogrid

(2) 竖向压力变化对拉拔曲线的影响

图 17 为不同竖向压力下土工格栅拉拔曲线变化情况。分析 3 种竖向压力下的拉拔阻力特征，拉拔过程由启动阶段和拉拔阶段组成，在启动段，格栅变形均由拉拔端向内扩展，此时，3 种竖向压力下拉拔阻力变化趋势相近，直至进入拉拔阶段，格栅沿土体滑动，不同竖向压力对其影响明显。从图中可以发现，竖向压力从 25 kPa 增加到 50 kPa 和 75 kPa，土工格栅的拉拔阻力依次增大，其中竖向压力 75 kPa 时，土工格栅拉拔过程中发生断裂破坏，其拉拔阻力峰值之后数值急剧下降。在竖向压力 25 kPa 下，土工格栅均匀拔出，格栅并无拉裂破坏，其拉拔阻力来源于格栅纵横肋表面与粗粒土的界面摩擦力及横肋与粗粒土的嵌固作用力；而竖向压力 50 kPa 和 75 kPa 下，土工格栅的拉拔特征较为相似，土工格栅拉拔过程中，格栅断裂破坏，造成拉拔阻力提前达到峰值，该阻力峰值与竖向压力 25 kPa 下的拉拔阻力峰值有明显区别，由于断裂，土工格栅与粗粒土的摩擦作用及横肋的嵌固咬合作用均未完全发挥出来，故该峰值不能作为绘制摩尔库仑曲线计算界面作用参数。在不改变试验格栅强度的情况下，需要求取界面参数绘制莫尔库仑曲线时，应当采用合适竖向压力下采集的试验数据，确保格栅能沿界面发生整体移动而不拉断。

在实际的加筋工程中，确实亦存在两种破坏形式，一种为土工格栅滑动位移过大造成加筋结构破坏；另

一种为土工格栅直接拉断造成加筋结构破坏; 对于前者, 设计验算采用筋土界面参数进行, 而对于后者, 则需直接验算筋材本身的强度。

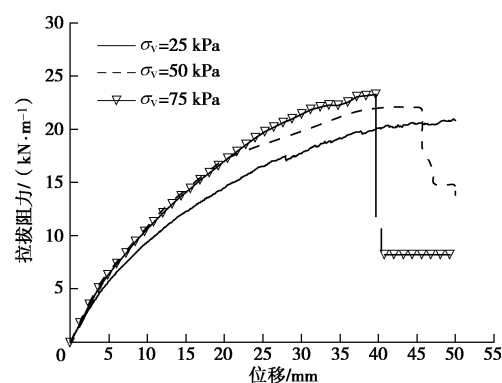


图 17 不同竖向压力下土工格栅拉拔试验结果

Fig. 17 Pullout test results of geogrid under different vertical pressures

(3) 筋材在土体中的变形规律

通过位移传感器采集数据, 获得拉拔试验时土工格栅在土体中的中部和末端位移, 并经过数据处理得到土工格栅在土体中的变形规律。图 18 为土工格栅拉拔试验各测点位置示意图, 图中标出了量测格栅中部位移及末端位移的具体位置和计算格栅变形区域。图 19 为 3 种竖向压力下格栅变形与拉拔阻力的关系曲线。

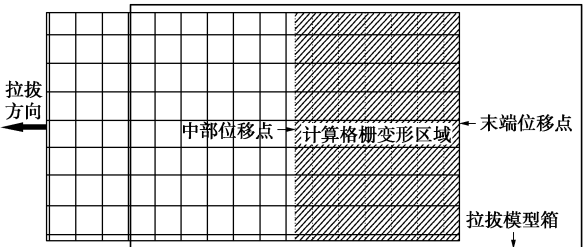


图 18 拉拔试验中格栅各测点布置示意图

Fig. 18 Layout of measuring points of geogrid in pullout tests

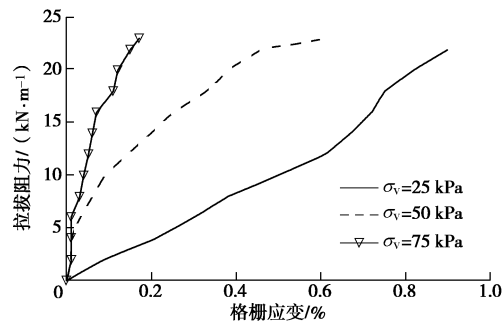


图 19 拉拔阻力与格栅变形关系曲线

Fig. 19 Curve of pullout resistance and grid deformation

由图 19 分析, 格栅应变 (变形量) 随着拉拔阻力的增大而增大, 但并非成正比关系, 与竖向压力大小有密切关系, 在竖向压力 25 kPa 时, 格栅正常拔出,

格栅没有断裂破坏, 所测得土中格栅的应变达到了 0.9%, 而在竖向压力分别为 50 kPa 和 75 kPa 时, 对应位置的土工格栅应变仅为 0.6% 和 0.2%, 远小于竖向压力 25 kPa 时的应变, 表明竖向压力越大, 嵌固在土中的格栅应变愈小, 即在相同的拉拔力作用下, 竖向压力越大, 埋在土中的土工格栅变形越小, 说明土体与格栅的界面作用与竖向压力密切相关, 竖向压力越大, 土体越密实, 土体与格栅的嵌固作用越显著, 从而大大限制了土中格栅的自身变形。

在竖向压力为 50 kPa 和 75 kPa 时, 土中格栅的变形增长较为缓慢, 拉拔过程中格栅达到极限强度在夹持处附近断裂, 土体中的格栅受力仍未达到峰值。竖向压力 50 kPa 时土中格栅的应变值为 0.6%, 远小于其屈服伸长率指标 (13.7%), 亦表明格栅的变形受到土体嵌固影响明显, 能显著降低其伸长率。

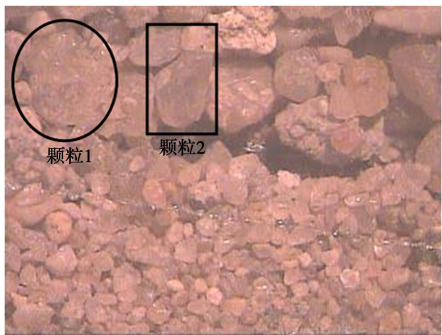
(4) 试样筋土接触面的位移变化规律

采用体式显微镜和数码摄录设备, 对可视的拉拔试验模型箱进行数码追踪拍摄, 得到拉拔试验过程中筋土界面处土体颗粒的位移变化及位移集中带的形成过程。

图 20 为拉拔试验时土工格栅筋土界面处颗粒位移变化图。从图 20 中可以看到, 格栅从右向左拉拔, 筋土界面处的土体被格栅带动发生位移, 其中特征颗粒 1 与特征颗粒 2 在发生平动位移的同时, 也发生了顺时针的旋转位移, 结合图中界面处其他颗粒位移情况, 筋土界面处的颗粒位移具有两个特征: 一是格栅带动界面区域土体发生平动位移, 同时部分颗粒还发



(a) 拉拔开始时刻



(b) 拉拔时间 30 s



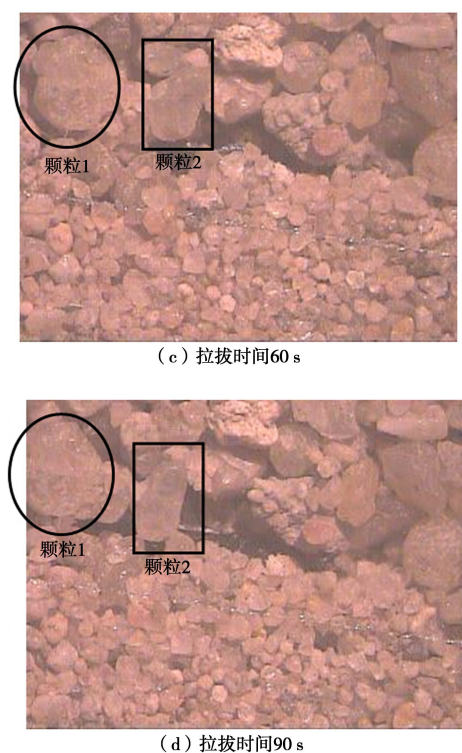


图 20 格栅筋土界面土体颗粒位移变化图

Fig. 20 Displacement evolution of particles on geogrid-reinforced soil interface

生旋转位移，愈靠近界面，颗粒位移愈显著；二是上界面颗粒位移较下界面颗粒位移明显，主要因为格栅拉拔剪切土体，格栅网孔的存在使得土颗粒不断的跌落格栅横肋后方的孔隙，从而造成上界面位移波动较为显著。

图 21 为高清数码相机拍摄获得的筋土拉拔界面土体位移场集中带形成图。从图中可以分析，当拉拔位移达到 27 mm 后，已形成了较为明显的筋土界面位移集中带，表明筋土界面区域土体位移较为显著，且形成了稳定的界面厚度，但界面厚度并非处处均匀，初步判定其与格栅横肋剪切土体及界面处土体发生剪胀变形有关。

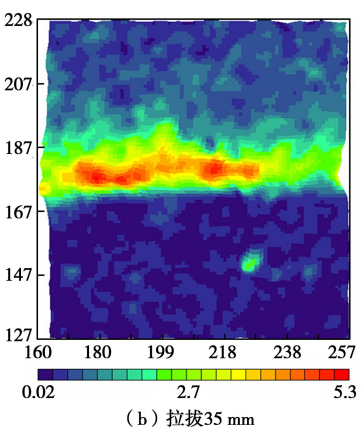
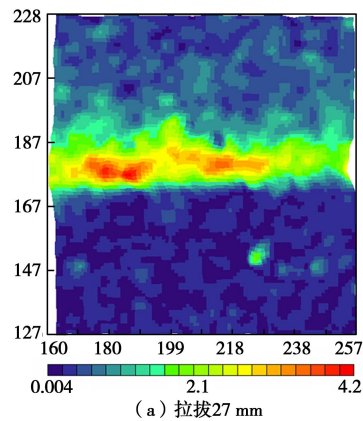


图 21 筋土拉拔界面位移场集中带形成图

Fig. 21 Formation of displacement field concentration zone of reinforced soil pullout interface

### 3 结 论

(1)研制了一台新型可视自动采集数据的土工拉拔试验装置，可用于各种土工材料和填料，尤其是粗颗粒土作用下的拉拔试验。该装置改进了加载系统和反力系统，实现了界面的可视与数据采集的自动化。在试验手段与测试技术方面，具有以下新特点：①试验箱的可视，提供了新的分析方法；②试验箱尺寸的大型化，满足了粗颗粒土的试验条件；③液压加载方式使得荷载可控与便捷；④承重平台替代了反力墙；⑤中部和末端位移测量减小了误差，提供了土工材料变形的计算值；⑥滑动夹具方便土工材料的卸取；⑦实现了数据采集自动化。

(2)土工格栅与粗粒土拉拔试验结果表明，在相同的拉拔力作用下，竖向压力越大，土体与格栅的界面摩擦和嵌固作用越显著，格栅应变由拉拔口处往后逐步减小；当竖压达到一定数值，格栅由整体剪切位移拔出变为格栅自身断裂破坏，分别对应两种典型的工程破坏状况；筋土界面处土体颗粒存在平移及转动两种位移模式，且界面土体形成前厚后薄的位移集中带。

#### 参考文献：

[1] 杨果林. 现代加筋土技术应用与研究进展[J]. 力学与实践, 2002, 24(1): 9 - 17. (YANG Guo-lin. Research progress on reinforced earth[J]. Mechanics and Practice, 2002, 24(1): 9 - 17. (in Chinese))

[2] SCHLOSSER F, UNTERREINER P, PLUMELLE C. French research program clouterre on soil nailing[C]// Bordenrh, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, ASCE. New

- York: Geotechnical Special Publication, 1992: 739 - 750.
- [3] 甘采华, 梁寿忠, 李春英. 土工合成材料老化指标的研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2007, **32**(3): 243 - 247. (GAN Cai-hua, LIANG Shou-zhong, LI Chun-ying. The research of geosynthetic materials aging indicators[J]. Journal of Guangxi University (JCR Science Edition), 2007, **32**(3): 243 - 247. (in Chinese))
- [4] MORACI N, RECALCATIB P. Factors affecting the pullout behaviour of extruded geogrids embedded in a compacted gran-ularsoil[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**(4): 220 - 242.
- [5] AHMED Hosny Mohammed Abdel-Rahman. Modeling of soil-geosynthetic interaction in reinforced earth works[D]. New Orleans: Tulane University, 1997.
- [6] ABU-FARSAKH M Y, FARRAG K, ALMOH'D I, et al. Evaluation of interaction between geosynthetics and marginal cohesive soils from pullout tests[C]// Geo Jordan 2004, Irbid, Jordan @ sAdvances in Geotechnical Engineering with Emphasis on Dams, Highway Materials, and Soil Improvement. Irbid, ASCE, 2004: 299 - 310.
- [7] 张绪涛, 张强勇. 土工直接拉伸试验装置的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(7): 1309 - 1315. (ZHANG Xu-tao, ZHANG Qiang-yong. Development and application of geotechnical direct tensile test device[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(7): 1309 - 1315. (in Chinese))
- [8] 吴海民, 束一鸣. 土工合成材料双向拉伸多功能试验机的研制与初步应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 170 - 175. (WU Hai-min, SHU Yi-ming. Geosynthetic materials development and preliminary application of two-way stretch multi-function testing machine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 170 - 175. (in Chinese))
- [9] 徐林荣, 凌建明, 刘宝琛. 土工格栅与膨胀土界面摩擦阻力系数试验研究[J]. 同济大学学报, 2004, **32**(2): 172 - 176. (XU Lin-rong, LING Jian-ming, LIU Bao-chen. Experiment on interface friction coefficient parameters between geogrids and expansive soil[J]. Journal of Tongji University, 2004, **32**(2): 172 - 176. (in Chinese))
- [10] 施有志. 土工合成材料的拉拔试验研究[J]. 岩土工程界, 2003, **6**(10): 75 - 78. (SHI You-zhi. Pulling-experimental study of geotechnical composite material[J]. Geotechnical Engineering World, 2003, **6**(10): 75 - 78. (in Chinese))