

基于DIC技术的固废粒料包裹格栅加筋试验研究

谭鹏¹, 李海², 李享平², 顾凡^{2*}, 张军辉²

(1.中国路桥工程有限责任公司,北京市 100011;2.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为了控制高速公路改扩建新老路基拼接后的差异沉降,该文针对老路台阶松散、含水率过高,提出一种层状处置结构,即在老路台阶面设置一层固废层包裹格栅,对比了其与其与砂包裹、掺入消解石灰等措施的处置效果,并采用数字散斑相关技术(DIC)观测加筋影响带,进而确定路基不同层位固废包裹层厚度。进一步分析颗粒旋转与位移情况,验证DIC观测所确定加筋影响带的可靠性与准确性。试验结果表明:①在提高老路台阶筋土界面强度的措施中,效果由优至劣依次为:固废C(粒径为10~20 mm)>固废B(粒径为5~10 mm)>砂>固废A(粒径为1~5 mm)>掺灰6%>掺灰4%,增强效果随包裹固废粒径的增大而提升;②DIC试验结果表明:加筋影响带随法向应力的增大而减小,且格栅上方厚度大于格栅下方,发生旋转的颗粒主要集中在格栅下方3 cm内,格栅上方5 cm内;③基于加筋影响带厚度确定固废包裹层最佳厚度建议值:对于路基中部约为20 cm,路基底部铺设厚度约为15 cm,路基上部铺设层厚度应不小于25 cm。

关键词:路堤;建筑固废;改扩建;数字图像相关技术;土工格栅

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

Experimental Study on Reinforced Geogrid of Construction and Demolition Wastes Based on DIC Technology

TAN Peng¹, LI Hai², LI Xiangping², GU Fan^{2*}, ZHANG Junhui²

(1.China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China; 2.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: In order to control differential settlement caused by new and old subgrade connections after expressway reconstruction and expansion, this paper proposed a layered treatment structure for the loose steps of the old road with high water content. A layer of construction and demolition waste was laid on the step surface of the old road to wrap the geogrid. The treatment effect was compared with that of sand wrapping and lime mixing, and the digital speckle correlation (DIC) was used to observe the reinforced influence zone, so as to determine the thickness of different layers of the subgrade wrapped by construction and demolition wastes. The particle rotation and displacement were further analyzed, and the reliability and accuracy of the reinforced influence zone determined by DIC observation were verified. The test results show that: ① Among the measures to improve the interface strength of reinforced soil in the old road steps, the effect from good to bad is construction and demolition wastes C (particle size of 10–20 mm) > construction and demolition wastes B (particle size of 5–10 mm) > sand > construction and demolition wastes A (particle size of 1–5 mm) > mixed ash of 6% > mixed ash of 4%, and the reinforcement effect increases with the increase in the particle size of the construction and demolition wastes; ② The DIC test results show that the area of the reinforced influence zone

收稿日期:2024-06-27(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52108400);长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(编号:CLSJCX22020);中国路桥工程有限责任公司科技研发项目(编号:P2200001)

作者简介:谭鹏,男,博士,高级工程师.E-mail:tanpeng339@126.com

***通信作者:**顾凡,男,博士,教授.E-mail:fan.gu@csust.edu.cn

decreases with the increase in normal stress, and its thickness above the geogrid is greater than that below the geogrid. The particles that rotate are mainly concentrated within 3 cm below the geogrid and 5 cm above the geogrid; ③ The recommended thickness of the layer wrapped by construction and demolition wastes is determined based on the thickness of the reinforced influence zone: about 20 cm in the middle of the subgrade, about 15 cm in the bottom of the subgrade, and not less than 25 cm in the upper part of the subgrade.

Keywords: embankment; construction and demolition wastes; reconstruction and expansion; digital image correlation technology; geogrids

0 引言

土工格栅作为高速公路改扩建中常用加筋材料,对控制新老路基差异沉降发挥着重要作用。有研究表明:在南方湿热地区高速公路改扩建中,老路基经过多年的自重荷载和行车荷载作用,沉降已趋于稳定,剩余沉降量已经很小,但是刚成型的新路基需经历一个新的沉降过程,从而会造成新老路基间的差异沉降^[1]。而且老路路基含水率会由最初施工时的含水率逐渐上升至平衡含水率,而含水率的变化是路基性能演变的关键。含水率的上升导致新老路基拼接时老路台阶面松散、界面强度薄弱,很大程度制约了格栅强度的发挥,进而降低了新老路基差异沉降控制效果。尽管土工格栅广泛运用于高速公路改扩建项目中,但其加筋机理的研究远远落后于工程应用,故探索土工格栅加筋土筋土界面特性,研究新的土工格栅加筋方式有助于解决台阶松散问题,提高台阶质量,进而提升改扩建工程中新老路基差异沉降的控制效果^[2]。

在南方湿热地区高速公路改扩建中,格栅往往铺设在松散、含水率过高、界面强度薄弱的老路台阶面上,极大地影响了格栅的加筋效果。张锐等^[3]对土工格栅与膨胀土的相互作用进行分析总结,提出了基于筋土变形协调原理,并考虑膨胀土侧向膨胀特性的筋土相互作用分析方法;田林等^[4]研究了土工格栅室形式与填料类型对加固公路地基承载能力的影响,结果表明:土工格栅室的加入,显著提升了结构层承载能力,在最优加固效果下,极限承载能力增加了4~8倍;冯晓静等^[5]对土工格栅在8组不同含水量的红黏土中的拉拔特性进行系统测试,研究发现,土工格栅在黏性填料中主要表现为拔出破坏,含水量对于拉拔力的影响显著,拉拔极限荷载随含水量的增加逐渐降低;陈榕等^[6]研究了含水率与冻融循环作用

对粉质黏土,格栅的拉拔试验,结果表明:含水率对格栅加筋效果影响显著,含水率由20%升高至32%时,筋土间界面摩擦力与嵌挤力降幅均超过60%,与之相反的是,冻融循环作用提高了加筋效果,增幅约为30%;Pant等^[7]借助拉拔试验,研究了煤燃烧残渣中底渣与粉煤灰在加筋土结构中的应用,结果表明:底渣-土工格栅的界面相互作用系数与天然填料相当,而粉煤灰略次于底渣,但均大于规范建议值,能够满足用作加筋填料的要求。更有学者研究证明,土工格栅与粒料接触面强度相较于黏土高,在格栅周围包裹一层粒料可有效增大筋土界面间剪切力^[8-10]。而加筋影响带厚度与格栅横肋厚度、填料性质及法向应力有关。不少学者对影响带厚度进行了定量分析研究,张嘎等^[11]通过在大型模型箱中埋设传感器,观测土工织物拉拔作用下土体的运动;胡幼常等^[12]采用透明拉拔模型箱,在填料不同层位中每间隔1 cm预埋设包裹有大头针的导线,通过对比试验前后导线位置是否发生变化来判断加筋影响带厚度,该方法实现了加筋影响带的可视化,但精度略有不足,当加筋影响带边缘处于相邻层位导线之间时,无法准确确定其厚度,且试验前后需要人工估读位置的变化,具有一定误差,同时耗时较长;聂如松等^[13]以广泛分布在新疆地区的风积沙为填料,研究风积沙-土工格栅界面强度,结果表明:对于难以压实的松散风积沙填料,若想发挥出格栅加筋的效果,需要保证风积沙有较好的压实度,同时需要将格栅埋置于较深的区域。综上所述,虽然国内外在土工格栅加筋路基土的回弹模量和永久变形特性方面开展了一些研究,取得了一些有参考价值的成果。但相关成果存在局限性,主要体现在以下几个方面:①虽然土工格栅加筋机理较为明确,但是现有研究缺乏直接测量横向互锁效应影响区域的方法;②在上述诸多研究中,缺乏针对老路路基台阶面含水率过

高的高效处置方法。

基于此,本文提出一种基于加筋影响带确定包裹厚度的黏土-固废-黏土结构加筋层状结构,采用改扩建工程建设中产生的建筑固体废弃物粒料包裹格栅,利用固废颗粒表面粗糙特性以提高筋土间嵌挤摩擦,从而提升土工格栅加筋效果。同时引入数字图像相关技术DIC(Digital Image Correlation),运用三维数字散斑应变测量系统,又称为光学应变测量系统,该系统借助高速摄像机,建立物体空间三维坐标,可精准测量荷载作用下的位移及应变等数据。借助DIC观测固废拉拔试验加筋影响带范围,基于加筋影响带厚度确定依托工程各工况条件下层状加筋结构的最佳固废包裹厚度,并对颗粒旋转情况进行了分析。该研究为老路台阶面处置提供了一个可行的方案,为土工格栅加筋影响带的确定提供了一个明确的方法。

1 固废包裹格栅加筋试验

1.1 试验材料准备

试验所用建筑固废产生于房屋拆除、道路改建及圬工拆除,破碎成一定粒径后,经过磁选与风选,剔除木屑、塑料、金属等废料,主要包含混凝土、砖块、碎石等。土工格栅网孔尺寸与填料颗粒粒径的合理匹配才能达到有效的加筋效果,使土工格栅与颗粒间的嵌锁作用更佳^[14]。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020),将固废分别过1 mm、5 mm、10 mm、20 mm筛后,得到1~5 mm、5~10 mm、10~20 mm 3档粒径固废填料,分别记为固废A、固废B和固废C(图1)。为去除表面泥土与灰尘,将过筛后固废进行清洗晾干。为保证所用砂具有一定透水性,本试验采用石英砂,将其过1.18 mm筛,取筛上砂作为格栅包裹层用砂。

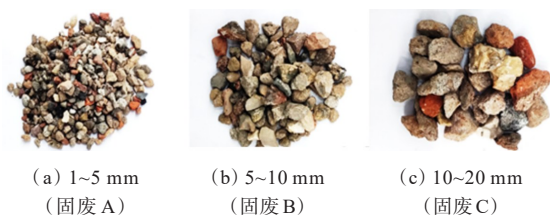


图1 筛分后的建筑固废

Figure 1 Construction and demolition wastes after screening

1.2 试验方案设计

本试验根据现场路基测试及路基填料试验结果,设计含水率确定为25%,压实度取90%,格栅采用双向格栅,法向应力统一采用60 kPa开展拉拔试验,试验结果如图2所示。

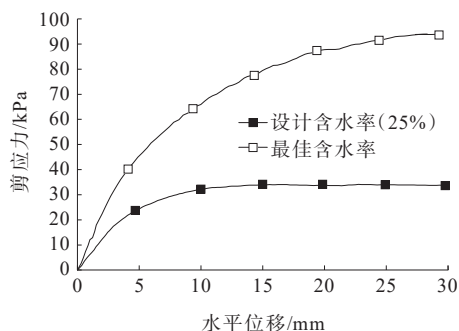


图2 高含水率下拉拔试验对比

Figure 2 Comparison of pull-out test with high water content

由图2可以看出:当黏土含水率由最佳含水率升高至25%时,筋土间峰值剪应力由93.7 kPa下降至33.8 kPa,下降了64%。由此表明,在高速公路改扩建中,若黏土路基老路台阶开挖后,含水率过高或拼宽黏土填料含水率过高,筋土界面强度显著降低,远低于格栅所能承受的极限强度,此时筋土间界面强度不足是制约加筋效果的关键原因,因此降低了新老路基间差异沉降控制效果。针对此问题,本文通过设置黏土、掺灰4%、掺灰6%、(石英)砂包裹、不同档固废(A、B、C)包裹等填料方式进行拉拔试验(含水率:25%、法向应力60 kPa、压实度90%),对比筋土界面强度提升效果,优选最佳处置方式。

1.3 试验过程

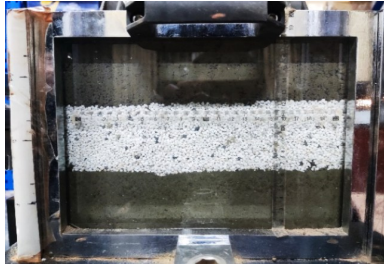
砂包裹层与固废包裹层试件成型时,为贴合工程中湿度迁移,即上下层黏土水分迁移至包裹层,将石英砂与固废烘干后加入相同含水率的水量,并焖料24 h,使其处于潮湿状态,未被吸收的过量水分在成型前倒出。在模型箱底部分层压实预先焖好的25%含水率黏土(3 cm+4 cm),随后,分别在格栅上下面各铺设一层3 cm石英砂/建筑固废并进行压实,砂层压实时,控制法向应力与黏土压实法向应力相当。继续分层成型黏土,直至将模型箱填满,形成层状结构,如图3所示。

1.4 试验结果与分析

拉拔试验结果如表1与图4所示。



(a) 固废包裹层



(b) 砂包裹层

图 3 成型后的试件

Figure 3 Formed specimens

表 1 不同含水率黏土拉拔试验结果

Table 1 Pull-out test results of clay with different water contents

试验编号	填料	最大剪应力/kPa
1	黏土	33.7
2	掺灰 4%	68.2
3	掺灰 6%	82.9
4	黏土-石英砂-黏土	110.5
5	黏土-固废 A-黏土	105.3
6	黏土-固废 B-黏土	117.9
7	黏土-固废 C-黏土	128.6

注:法向应力 60 kPa;含水率 25%;压实度 90%。

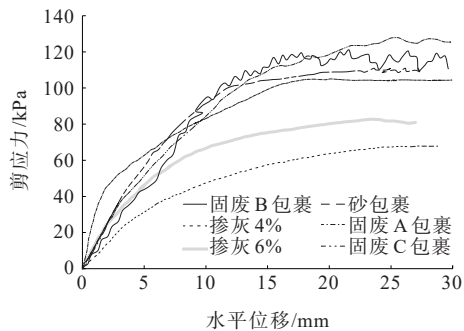


图 4 不同处置方式拉拔试验结果对比

Figure 4 Comparison of pull-out test results with different treatments

由图 4 可知:掺灰、砂包裹、固废包裹均能有效提高筋土间界面剪应力,其中掺灰 4% 和 6%,最大剪应

力分别提高了 102%、146%;砂、固废等粒料包裹效果优于掺灰,当采用固废 A 包裹(1~5 mm)时,界面最大剪应力提高了 212%,采用细砂包裹略优于固废 A,其最大剪应力提升了 228%;随着包裹格栅固废粒径提升,处置效果也随之提升,采用固废 B(5~10 mm)与固废 C(10~20 mm)包裹时,界面最大剪应力分别提升了 250%、281%。

由此表明,在各种处置措施中,处置效果优劣依次为固废 C>固废 B>砂>固废 A>掺灰 6%>掺灰 4%。掺灰后,筋土间界面最大剪应力仍略低于最佳含水率下的最大剪应力。此外,从长远来看,掺灰虽能有效降低台阶面含水率,提高筋土间结合,但老路路基内部含水率并未降低,随着时间推移,路基内部水分迁移,台阶面含水率将会再次升高。而采用粒料包裹后,已超过最佳含水率条件下的最大剪应力,且后期不受路基内部水分迁移影响。粒径相对较大的固废 C 效果略优于粒径相对较小的固废 A,其一部分原因可能是粒径带来的影响,另一部分原因可能是固废 A 相较于固废 C,其砂浆、砖等易破碎的颗粒含量高。

经固废包裹后,拉拔位移逐渐增大时,格栅将由黏土中的拔出破坏转为拉断破坏,如图 5 所示。由此表明,经过固废包裹后,填料-格栅界面强度得以有效增强,从而进一步发挥格栅强度优势。因此,在老路台阶压实度低、含水率高情况下,即使提高格栅强度,筋土界面强度依旧相对较低,加筋效果提升有限,固废包裹后,可采用更高强度的格栅进行加筋,进一步控制新老路基间差异沉降。

2 基于加筋影响带的最佳包裹层厚度

2.1 加筋影响带理论及定量确定

包承刚^[15]提出筋材与土体的相互作用,不仅发生在界面上,而且在筋材上下面一定范围填料内也存在一定厚度的加筋影响带,称为间接影响带,其起着重要的加固作用;丁金华等^[16]通过拉拔试验对该影响带进行了验证。基于加筋影响带理论,采用更换填料以强化筋土界面作用时,更换加筋影响带范围内的填料,其提升效果最为显著,即影响带厚度为本试验固废包裹层的最佳厚度;王家全等^[17]基于 DIC 技术对土工合成材料加筋砂土界面特性进行了拉拔试验研究,通过多变量方法建立了加筋影响带厚度 H 、法向应力 σ_v 、砂土平均粒径 d_{50} 三者之间的函数关系。



(a) 格栅在黏土中的拔出破坏



(b) 固废包裹后的拉断破坏

图5 格栅由拔出破坏转为拉断破坏

Figure 5 Geogrid changing from pull-out failure to tensile failure

本文采用数字图像相关法 DIC (Digital Image Correlation), 运用三维数字散斑应变测量系统 (光学应变测量系统), 借助高速摄像机, 建立物体空间三维坐标, 可精准测量载荷作用下的位移及应变等数据。

三维数字散斑应变测量系统核心思想如下: 基于一系列试样表面的数字散斑图像在试验前后的变化, 通过求解最优化问题, 估计其全场散斑的坐标和位移, 进而得出试件各部分的变形。基本假设: 在试件发生变形时, 试件表面的散斑图案都跟随试样一起变形。在试件表面制作特征点 (散斑图), 通过高速相机捕捉特征点在像素级别的移动, 采用优化的数字图像相关性算法, 为试验提供二维、三维空间内全视野的形貌、位移及应变数据测量。其主要由两个高速摄影机、可调节三脚支架、补光灯、图像处理系统以及其他配件组成, 如图6所示。



图6 三维数字散斑应变测量系统图

Figure 6 Three-dimensional digital speckle strain measurement system

2.2 试验方法与过程

散斑制作作为 DIC 试验的第一步, 散斑质量的优劣是影响后期试验分析的关键因素, 其通常采用白底黑点和黑底白点两种方式。为提高坐标系精准度, 本文尝试了适用于该试验的几种不同的散斑制作方法, 最终选择使用黑色石料专用染料浸泡, 待染料完全风干后, 采用白色修正液在固废颗粒各表面画上白点制作散斑。建筑固废包裹层加筋影响带如图7所示。

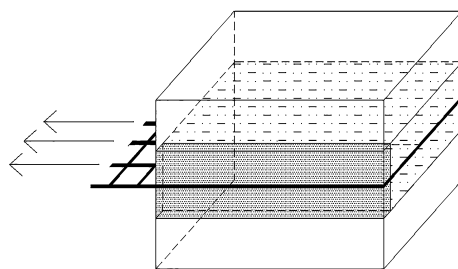


图7 固废包裹层加筋影响带观测示意图

Figure 7 Observation of reinforced influence zone of layer wrapped by construction and demolition wastes

2.3 试验结果与分析

(1) 导入标定信息与试验图像。

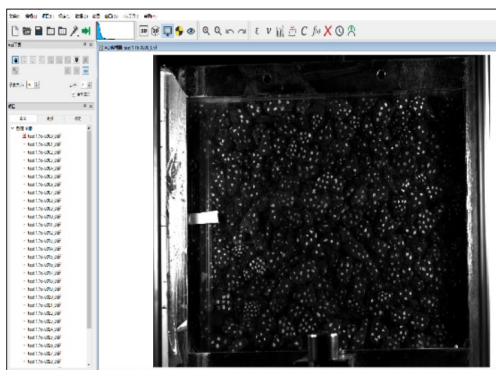
打开 Vic-3D 软件, 导入试验前所分析得到的标定文件, 随后点击散斑图像图标, 将相机所拍得的试验照片导入, 进行图像标定。

(2) 选定分析区域及变量。

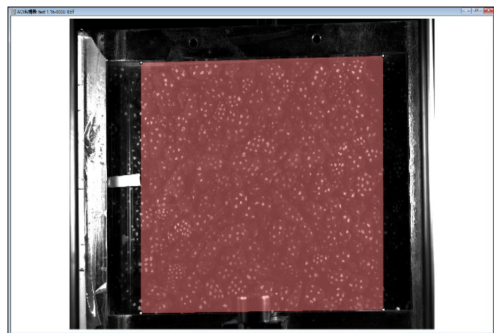
在试验中, 模型箱两侧由于凸出边框的阻挡, 光线相对较暗, 散斑效果略差, 因此在设定分析区域时, 应尽量选取中间光线较优的部分, 同时裁剪观察窗内被模型箱螺丝遮挡部位进行, 分析过程如图8所示。

变量选取时, 若选取竖直位移作为变量, 将会受到试件上方所施加的法向应力影响, 因此本试验选取水平位移作为变量, 得到不同试验时长下的水平位移 2D 云图。当法向应力为 40 kPa 时, 颗粒运动和翻转较大, 易导致散斑图像的大块缺失, 未能得出分析结果。法向应力为 60 kPa 及 80 kPa 的分析结果如图9、10所示。

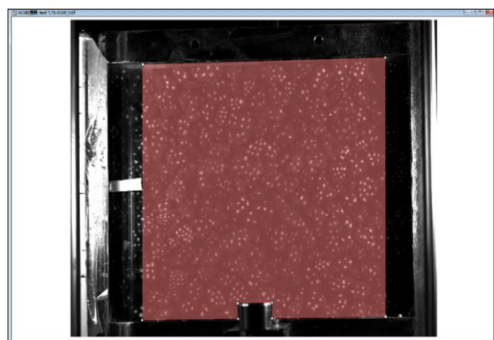
由图9、10可知: 随着拉拔试验的进行, 法向应力为 60 kPa 时, 加筋影响带范围由拉拔端逐渐向自由端延伸, 影响带向试件右上方发展; 当法向应力增大至 80 kPa 时, 加筋影响带则由试件中部开始向周围发展, 并未呈现向试件右上方发展趋势。加筋影响



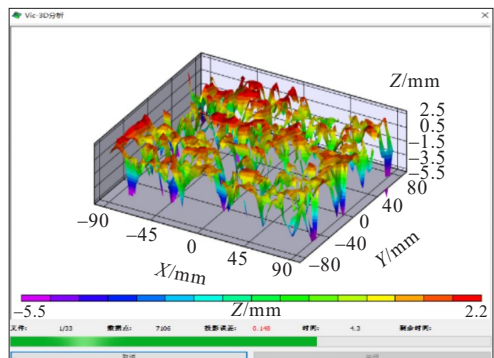
(a) 导入标定图像与散斑图像



(b) 设定分析区域



(c) 分析区域裁剪

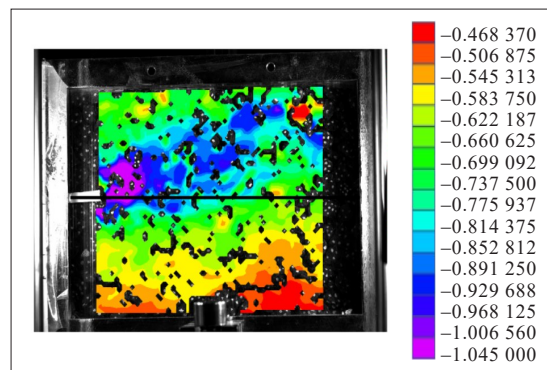


(d) 设置步长及软件分析

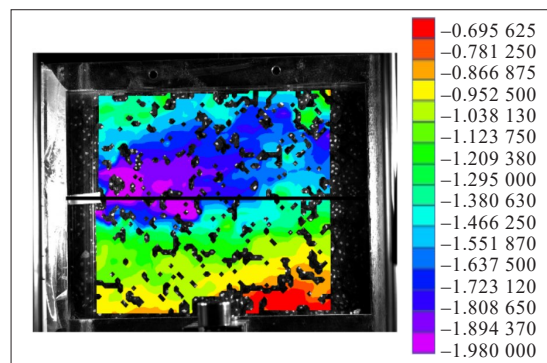
图 8 分析过程

Figure 8 Analysis process

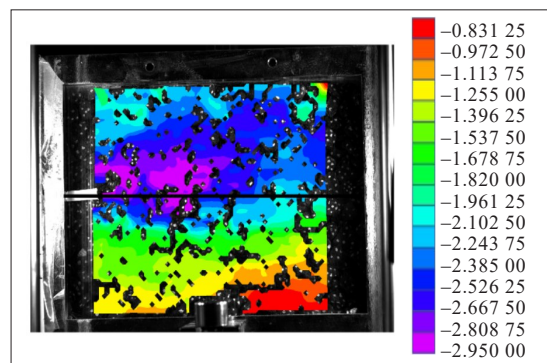
范围也随着拉拔试验的进行逐渐扩大,且由于模型箱底部固定,格栅下方影响带范围小于格栅上方,但



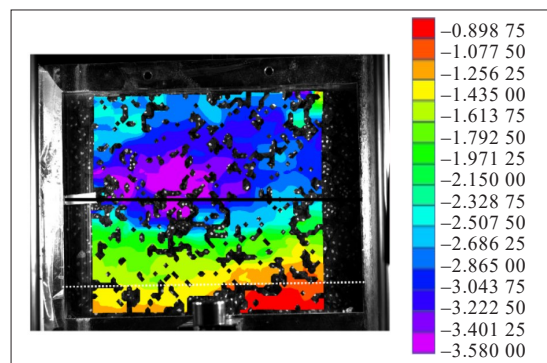
(a) 5 min



(b) 10 min



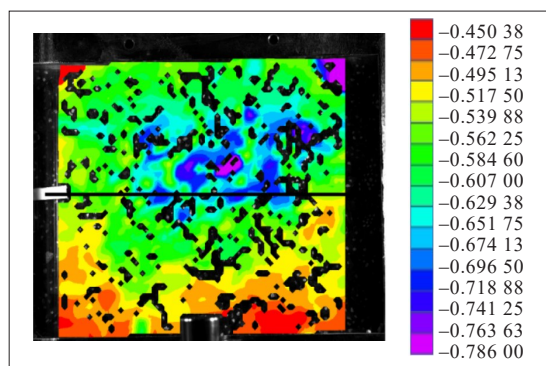
(c) 20 min



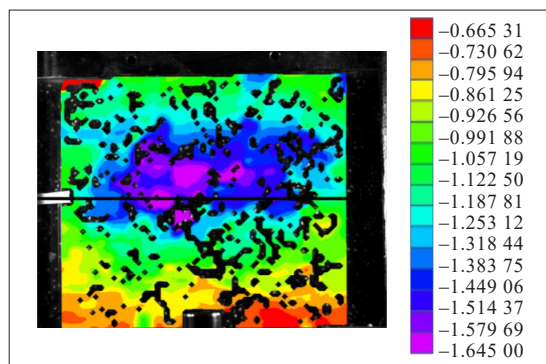
(d) 30 min

图 9 60 kPa 下拉拔试验影响带位移图(单位:mm)

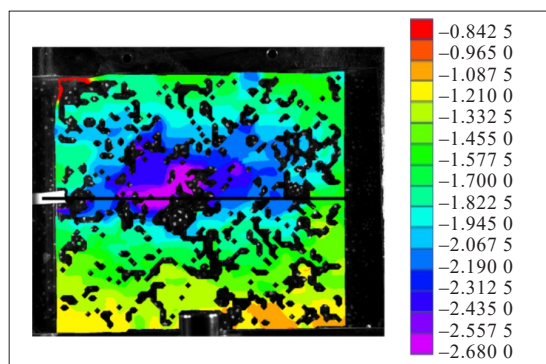
Figure 9 Displacement of influence zone in pull-out test at 60 kPa (unit:mm)



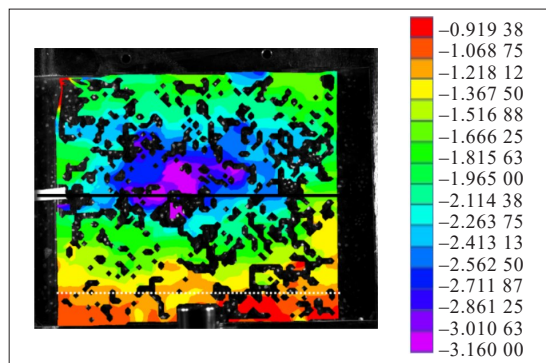
(a) 5 min



(b) 10 min



(c) 20 min



(d) 30 min

图10 80 kPa下拉拔试验影响带位移图(单位:mm)

Figure 10 Displacement of influence zone in pull-out test at 80 kPa (unit:mm)

随着法向应力的增大,由于底部模型箱的束缚作用,格栅下方影响带范围变化较小,而格栅上方加筋影响带范围随法向应力的增大显著减小。由此表明,边界条件对加筋影响带的范围大小和发展趋势有所影响。

本试验中,整个观察窗的粒料均发生了不同程度的位移(观察窗高为17 cm),剔除位移最小两档以判断加筋影响带宽度,格栅下方影响带宽度均为6 cm左右,而对于格栅上方的影响带宽度,60 kPa时已超出模型箱范围,因此不考虑边界条件对超出模型箱外影响带的影响,以格栅下方水平位移云场图预估格栅上方部分。按图片与模型箱实际比例计算影响带范围,60 kPa时格栅上方为12~15 cm,80 kPa时为8~10 cm。固废颗粒位移最大处位于格栅附近,从图9(d)、10(d)中可以明显看出,当拉拔位移逐渐增大后,固废颗粒在随着格栅发生水平位移的同时,部分颗粒也发生旋转,导致散斑图像的缺失。

3 基于数字图像相关技术的粒料旋转情况试验与分析

3.1 试验方法与过程

土工格栅拉拔试验中,当格栅被拔出时,其周围的粒料不仅会随之发生水平位移,同时也会发生一定程度的旋转,本节将进一步研究加筋影响带内粒料的运动情况。

试验时,为方便图像的分析识别,采用类似上文的方法。首先将部分固废颗粒进行染黑处理,随后在其各个面采用修正液画上白线。划线时,根据固废粒径大小判断划线数量,对于粒径较大的颗粒,应在每个面增加划线数量。观测与成型方式与上文类似,划线与试件成型如图11所示。

3.2 试验结果与分析

将试验前照片导入PowerPoint软件中,选取不同位置较为清晰的带白线固废颗粒进行分析,采用黑色线条将颗粒表面白线进行覆盖。随后将试验后照片导入,保持纵横比不变,调整至与试验前照片相同大小并与其重合,然后采用深色线条将之前所选固废颗粒表面线条进行覆盖。对于仅发生了微小位移与转动的颗粒,试验前后线条位置基本重合,未采用深色覆盖。待所有线条均画好后,将照片删除,只保留如图12所示颗粒旋转情况图。



(a) 画白线固废粒料



(b) 试件成形后

图 11 颗粒旋转情况试验图

Figure 11 Test of particle rotation

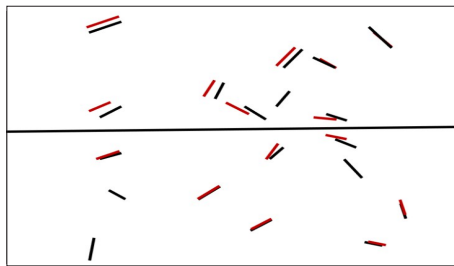
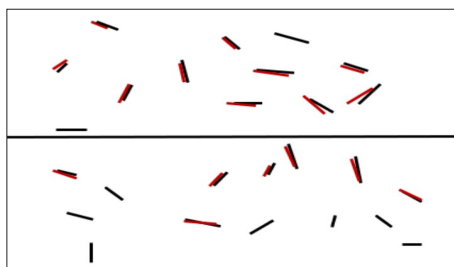
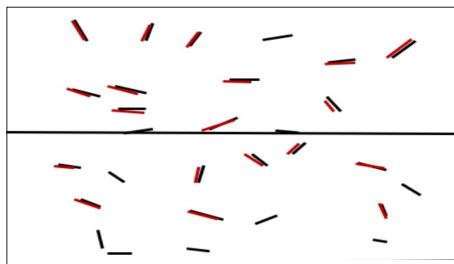
(a) $\delta_n = 40 \text{ kPa}$ (b) $\delta_n = 60 \text{ kPa}$ (c) $\delta_n = 80 \text{ kPa}$

图 12 颗粒旋转情况图

Figure 12 Particle rotation

由图 12 可以看出:随着法向应力的增大,格栅上方颗粒水平位移与转动角度逐渐减小,但发生转动的颗粒范围并无显著区别,主要集中于格栅下方 3 cm 内,格栅上方 5 cm 内,这或许是因为影响最为显著的区域存在一个范围,在该范围内的颗粒随着格栅的拔出才会发生旋转;对于该范围外颗粒,仅发生不同程度的水平位移。此外,对于上文中所确定的影响带范围外的颗粒,颗粒几乎不发生运动,这也进一步验证了 DIC 试验的可靠性与加筋影响带划分的准确性。

4 层状结构设计分析

根据上文试验结果,针对改扩建中老路台阶面含水率过高的问题,推荐采用固废 C 在老路台阶面对加筋格栅进行包裹,形成如图 13 所示的结构。在该结构中,包裹层铺设于老路台阶上部,降低了格栅铺设效果受水分的影响,增强了筋土间相互作用,其作用类似于在老路台阶面设置一个“锚固端”,加强了新老路基间的连接。此外,包裹层的设置,能够提高老路台阶面模量,有利于解决台阶松散问题,提高台阶质量,进而提升改扩建工程中新老路基间差异沉降控制效果。

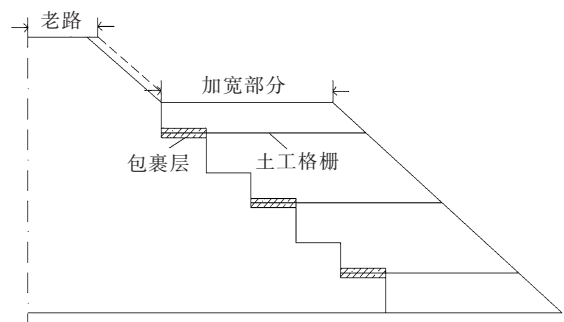


图 13 高速公路改扩建固废包裹层结构示意图

Figure 13 Structure of layer wrapped by construction and demolition wastes after expressway reconstruction and expansion

由上述格栅拉拔试验结果可知:采用建筑固废颗粒包裹格栅,对于铺设于不同层位的格栅,由于上覆荷载的不同,格栅与固废发生相对位移时,加筋影响带的发展方式不同。对于铺设于路基上部(上覆高度小于 5 m)的格栅,当拓宽路基沉降大于老路基沉降时,拓宽路基一侧相当于拉拔试验中的拉拔端,包裹层加筋影响区域由台阶边缘向内部发展,因此

对于该部位,施工时应充分碾压,确保台阶边缘压实度。且加筋影响带厚度随上覆土层的增大而减小,反之,则增大。因此,在进行该层状结构设计时,包裹层厚度由下至上应适当增大。

基于室内试验所观测加筋影响带范围大小,为最大效率发挥包裹层作用,进一步提升安全稳定性,同时减小固废包裹层与上下方路基土填料的相对位移,对于路基中部固废铺设最佳厚度建议值约为20 cm,路基底部铺设厚度约为15 cm;对于路基上部铺设层厚度应不小于25 cm,且铺设时格栅上方固废铺设层厚度应大于格栅下方。

本文所依托工程位于中国东部地区,地势较为平缓,路基填高相对较低。但台阶面含水率过高在中国改扩建工程中广泛存在,尤其是南方湿热地区。对于其他地势起伏较大地区,路基较高,在路基相应层位中铺设土工格栅,格栅上方法向应力增大,新老路基间差异沉降量势必会更大,加筋影响范围也将进一步扩大。因此,对于高填方路基底部铺设格栅,固废包裹层厚度应保持20 cm左右,提高所用格栅强度的同时增加铺设层数,对于该种工况,由于试验模型箱窄缝宽度所限,未能采用更高强度格栅进行试验分析。建议增加依托工程中使用格栅包裹层后的效果分析。

5 结论

本文针对老路台阶面含水率高、台阶松散问题,采用拉拔试验研究了高含水率下筋土界面强度特性,提出采用沿线房屋与圬工拆除所产生的建筑固废在台阶面设置格栅包裹层以提高界面强度,并与采用不同处置措施进行效果对比。此外,采用DIC对加筋影响带进行观测,探索了不同的粒料表面散斑制作方法,基于加筋影响带确定了最佳包裹层厚度,分析了颗粒旋转情况。

(1) 当黏土含水率由最佳含水率升至25%时,筋土界面最大剪应力下降了64%,掺灰、砂包裹、固废包裹均能有效提高筋土间界面最大剪应力,其中掺灰4%、掺灰6%、砂包裹、固废A包裹、固废B包裹与固废C包裹分别提升了102%、146%、228%、212%、250%和281%,处置效果优劣依次为:固废C>固废B>砂>固废A>掺灰6%>掺灰4%,且随包裹固废粒径的增大而提高,粒料包裹后格栅由拔

出破坏转为拉断破坏。

(2) DIC试验结果表明:土工格栅拉拔试验时,格栅上方影响带厚度大于格栅下方,且格栅上方加筋影响带厚度随法向应力增大而减小。当法向应力为60 kPa时,格栅上方影响带厚度为12~15 cm;当法向应力为80 kPa时,格栅上方影响带厚度为8~10 cm,格栅下方影响带厚度与格栅上方相差不大,约为6 cm。当法向应力较小时,影响带由拉拔端逐渐向自由端发展;当法向应力增大时,影响带由试件中部沿格栅向两端发展。

(3) 基于加筋影响带的范围大小,确定包裹层厚度。对于路基中部固废铺设最佳厚度建议值约为20 cm,路基底部铺设厚度约为15 cm,对于路基上部铺设层厚度应不小于25 cm。

(4) 颗粒旋转情况分析结果表明:随着法向应力增大,颗粒水平位移与转动角度减小,但发生转动的范围并无明显区别,对于DIC确定的加筋影响带外颗粒,基本不发生位移和转动。

参考文献:

References:

- [1] 刘志明. 沈大高速公路改扩建工程技术论文集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
LIU Zhiming. Collection of technical papers on reconstruction and expansion project of Shenyang-Dalian Expressway[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] 焦文慧, 王凤池, 张萌杰. 废弃轮胎土工格室加筋路堤承载特性分析[J/OL]. 中外公路, 1-10[2024-05-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240325.1110.002.html>.
JIAO Wenhui, WANG Fengchi, ZHANG Mengjie. Analysis of bearing characteristics of waste tire geocell reinforced embankment[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-10[2024-05-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240325.1110.002.html>.
- [3] 张锐, 龙明旭, 郑健龙, 等. 土工格栅与膨胀土相互作用研究进展及思考[J]. 中外公路, 2020, 40(增刊2): 13-20.
ZHANG Rui, LONG Mingxu, ZHENG Jianlong, et al. Research progress and thinking on interaction between geogrid and expansive soil[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(sup 2): 13-20.

- [4] 田林, 李宁, 王宇, 等. 土工格室形式与填料类型对公路地基承载力的影响[J]. 中外公路, 2022, 42(2): 15-23.
TIAN Lin, LI Ning, WANG Yu, et al. Influence on the type of geocell and filler on bearing capacity for highway road subgrade[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(2): 15-23.
- [5] 冯晓静, 杨庆, 李首龙, 等. 含水量对红黏土中土工格栅拉拔性能影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 4059-4064.
FENG Xiaojing, YANG Qing, LI Shoulong, et al. Experimental study on the influence of water content on the drawing performance of geogrids in red clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(sup 2): 4059-4064.
- [6] 陈榕, 王喜强, 郝冬雪, 等. 季节性冻土中土工格栅加筋特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1101-1107.
CHEN Rong, WANG Xiqiang, HAO Dongxue, et al. Experimental investigation on reinforced characteristics of geogrids in seasonal frozen soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1101-1107.
- [7] PANT A, RAMANA G V, DATTA M, et al. Coal combustion residue as structural fill material for reinforced soil structures[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 232: 417-426.
- [8] ABDI M R, ZANDIEH A R. Experimental and numerical analysis of large scale pull out tests conducted on clays reinforced with geogrids encapsulated with coarse material [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(5): 494-504.
- [9] 崔新壮, 楼俊杰, 王磊, 等. 利用单一级配碎石材料的高强土工格栅-土界面强化方法: 中国, CN103628379B [P]. 2015-07-29.
CUI Xinzhuang, LOU Junjie, WANG Lei, et al. Method for reinforcing interface of high-intensity geogrid and soil through single graded crushed stone material: China, CN103628379B [P]. 2015-07-29.
- [10] 饶钰琳. 筋材-砂土-黏土层状加筋结构双轴、直剪、拉拔试验离散元分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
RAO Yulin. Discrete element analysis of biaxial, direct shear and pulling tests of geogrid-sand-clay layered reinforced structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [11] 张嘎, 张建民. 土与土工织物接触面力学特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 51-55.
ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Experimental study on behavior of interface between soil and geotextile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(1): 51-55.
- [12] 胡幼常, 靳少卫, 宋亮, 等. 基于影响带观测的加筋土坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 228-234.
HU Youchang, JIN Shaowei, SONG Liang, et al. Stability analysis of reinforced soil slopes based on observation of reinforcement-effected strip[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 228-234.
- [13] 聂如松, 谭永长, 郭一鹏, 等. 风积沙-土工格栅界面摩擦特性拉拔试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(11): 3235-3245.
NIE Rusong, TAN Yongchang, GUO Yipeng, et al. Pullout test study of frictional resistance characteristics of geogrids and aeolian sand interface[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(11): 3235-3245.
- [14] 王军, 胡惠丽, 刘飞禹, 等. 粒孔比对筋土界面直剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊2): 115-122.
WANG Jun, HU Huili, LIU Feiyu, et al. Effect of particle-hole ratio on direct shear characteristics of reinforced soil interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(sup 2): 115-122.
- [15] 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, 25(9): 1735-1744.
BAO Chenggang. Study on interface behavior of geosynthetics and soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1735-1744..
- [16] 丁金华, 包承纲, 丁红顺. 土工格栅与膨胀岩界面相互作用的拉拔试验研究[C]// 第二届全国岩土与工程学术大会论文集(下册). 武汉, 2006: 452-459.
DING Jinhua, BAO Chenggang, DING Hongshun. Pull out test study on interaction between geogrid and expansive rock interface [C]// Proceedings of the Second National Geotechnical and Engineering Academic Conference (Volume II), Wuhan, 2006: 452-459.
- [17] 王家全, 祁航翔, 林志南, 等. 基于数字图像分析的土工合成材料加筋砂土拉拔试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3259-3269.
WANG Jiaquan, QI Hangxiang, LIN Zhinan, et al. Pull-out test on geosynthetic reinforced sand based on digital image analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3259-3269.