

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.1669

加卸载作用下加筋垫层变形特征试验研究

段君义¹, 杨果林¹, 胡 敏¹, 邱明明², 俞 昀¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘 要: 加筋垫层由于具有诸多优点而被广泛应用于反复加卸载作用下公路、铁路路基等工程构筑物中。为研究加卸载作用下加筋垫层结构的变形特征, 针对加筋与未加筋垫层 2 组模型, 开展了单次加卸载静力试验。测试并获得了不同荷载作用下垫层竖向变形、筋材应变变化规律, 对比分析了加筋与未加筋垫层的变形特征, 并从能量角度对加筋垫层工作机制进行了探讨。结果表明: 与未加筋情况相比, 荷载作用下加筋垫层(加载板处)的沉降变形和残余变形更小。加筋后垫层表面(加载板范围外)的竖向变形及其受影响范围均增大, 且在卸载过程中垫层表面竖向变形的水平分布曲线特征由“凹”型变为“凸”型, 其加卸载曲线呈“∞”型。格宾网筋材应变沿横向呈现非均匀分布特点, 其最大应变小于 0.06%, 筋材始终处于弹性变形状态。加筋垫层中筋材具有储存、释放及横向传递应变能效应, 这使得加筋后垫层具有更好的承载能力与弹性性能, 进而可降低循环加卸载作用下垫层的塑性变形或累计变形。

关 键 词: 加筋垫层; 格宾网筋材; 竖向变形; 筋材应变; 应变能

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 07-2333-09

Experimental study on deformation characteristics of reinforced soil cushion subjected to loading and unloading

DUAN Jun-yi¹, YANG Guo-lin¹, HU Min¹, QIU Ming-ming², YU Yun¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

2. School of Architectural Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: Reinforced cushion has been widely used in engineering structures such as highways and railway subgrades subjected to repeated loading and unloading due to its many advantages. To study the deformation characteristics of reinforced cushion under loading and unloading, a single loading and unloading static test was carried out for the two models of gabion mesh reinforced and unreinforced cushions. Variations of vertical deformation of the cushion and reinforcement strain under different loads were monitored and obtained. The deformation characteristics of the reinforced and unreinforced cushions were compared and analyzed, and the working mechanism of the reinforced cushion was discussed in terms of energy. The results show that the settlement and residual deformations of the reinforced cushion (at the location of the loading plate) under loading are smaller than those without reinforcement. The vertical deformation of the surface of the cushion after reinforcement (outside the range of the loading plate) and its affected range have increased. The shape of the horizontal distribution curve of the vertical deformation during the unloading process changes from concave to convex, and its loading and unloading curve shows a shape of “∞”. The reinforcement strain shows a non-uniform distribution along the transverse direction, and the maximum strain is less than 0.06%. The reinforcements are always in an elastic deformation state. The reinforcement in the reinforced cushion has the effect of storing, releasing and laterally transmitting strain energy, which results in better bearing capacity and elastic property of the reinforced cushion, thereby reducing plastic deformation or cumulative deformation of the cushion under cyclic loading and unloading.

Keywords: reinforced cushion; gabion mesh; vertical deformation; reinforcement strain; strain energy

收稿日期: 2019-09-27

修回日期: 2019-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2019YFC1509800); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51678571, No. 51778641); 中国铁路设计集团有限公司科技开发项目 (No. 721630)。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFC1509800), the National Natural Science Foundation of China (51678571, 51778641) and the Science and Technology Development of China Railway Design Corporation (721630).

第一作者简介: 段君义, 男, 1991 年生, 博士研究生, 主要从事加筋土结构动力特性的研究。E-mail: junyidjy@163.com

通讯作者: 杨果林, 男, 1963 年生, 博士后, 教授, 博士生导师, 主要从事加筋土路基静动力特性的研究。E-mail: yangguolin6301@163.com

1 引言

加筋材料具有高强度、高模量及高弹性等特点,能够显著地改善工程构筑物的服役性能^[1-2]。在公路、铁路路基工程中,常常将加筋材料铺设在路基土体中形成加筋垫层,用以承受上覆路基自重及交通荷载,促使路基土压力扩散和均化,进而降低路基的沉降变形^[3-4]。近年来,许多学者开展了加筋垫层的相关研究工作。如:罗强等^[3]采用加筋砂垫层加固铁路软土地基,指出加筋砂垫层可有效地减小地基沉降变形。Deb 等^[5]研究了多层土工格栅加固碎石垫层的沉降变形,指出采用多层土工格栅能够显著降低沉降。刘毓炘等^[6]对加筋垫层的应力扩散特性进行了数值分析,发现铺设筋材 3 层时效果最佳。Kargar 等^[7]研究了不同加筋材料加固垫层的沉降变形规律,指出在实际工程允许沉降变形水平下加筋垫层的沉降变形不受加筋材料极限拉伸强度的影响。

得益于这些研究,加筋垫层结构得到了不断优化与发展。目前,加筋垫层已广泛应用在公路、铁路路基中^[2,8-9],这类工程构筑物往往承受着反复加卸载作用,故加筋垫层在加卸载过程中的服役性能变得十分重要。Mehrijardi 等^[2]对土工格栅加筋垫层进行了 36 次循环加载试验以分析其沉降变形规律。魏平等^[10]指出列车荷载作用下土工格栅加筋垫层的力学与变形特性会发生改变。Venkateswarlu 等^[11]针对土工格室加筋土进行了振动试验,发现铺设土工格室可有效降低土体动位移,加筋土具有优良的动力特性。Suku 等^[12]针对循环荷载作用下加筋砂中土工格栅的回弹变形与永久变形进行研究,并分析了土工格栅的最佳布置深度。王家全等^[13]研究了动荷载作用下加筋砂土的承载力与累计变形特征。

现有研究较多侧重于循环荷载作用下加筋垫层结构的总体动力与变形特性^[14-15],较少关注垫层本身的变形特征^[4]。然而,还需要指出的是,在公路、铁路路基中的交通荷载涉及到加载与卸载两个过程^[16],而掌握加载、卸载两个过程中加筋垫层自身的力学与变形变化细节特征(特别是卸载过程),能够为循环荷载作用下加筋垫层的工作机制分析提供依据。为此,本文通过加筋与未加筋垫层 2 组模型,以循环荷载中的一个完整加载、卸载过程为参考,通过分级静力荷载来近似模拟循环荷载中的一次加卸载过程,从而开展单次加卸载静力试验,分析加筋与未加筋垫层的变形特征差异,并在此基础上,对加卸载作用下加筋垫层的工作机制进行探讨。上

述静力分级加卸载作用下加筋垫层的研究结果可为循环加卸载作用下加筋垫层优化设计及其工程应用提供支持。

2 试验概况

2.1 试验材料

2.1.1 填料

试验土样为由河沙、圆砾石及黏土按照一定质量比例拌合而成的级配良好的细圆砾土(见图 1),其级配曲线如图 2 所示,其主要物理力学性质如表 1 所示。



图 1 试验填料

Fig.1 Filling used for experiment

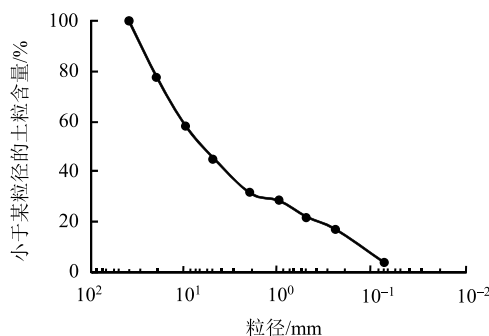


图 2 试验填料的级配曲线

Fig.2 Gradation curve of filling

表 1 试验填料的主要物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical indicators of filling

不均匀 系数 C_u	曲率 系数 C_c	细颗粒含量 (<0.075 mm) /%	黏聚力 /kPa	内摩 擦角 /($^\circ$)	最大干密度 ρ_{dmax} /(g $\cdot$ cm $^{-3}$)	最优含 水率 w_{opt} /%
50.0	1.3	4.2	69.0	37.0	2.430	3.40

2.1.2 格宾网筋材

格宾网筋材(双绞合六边形钢丝网)^[17-18]是一种由六边形网孔构成的生态型网孔结构,其钢丝经热轧拉伸而成,经过镀锌、覆塑等防护处理后,能够具有较好的防锈、防腐蚀能力。同时,格宾网的蜂窝网状结构保证了即使部分钢丝发生断裂,格宾网片也不会彻底丧失承载能力^[19]。试验采用的筋材

为镀锌覆塑处理后的格宾网，网孔尺寸为 80 mm×100 mm，钢丝直径为 2.7 mm，如图 3 所示。其主要力学性能如表 2 所示。此外，由拉拔试验结果得到其筋土界面黏聚力为 25.7 kPa，筋土界面内摩擦角为 32.9°。



图 3 格宾网示意图
Fig.3 Gabion meshes

表 2 格宾网的主要力学性能指标

Table 2 Main mechanical indicators of gabion mesh				
2%伸长率时 单位拉伸力 (kN·m ⁻¹)	5%伸长率时 单位拉伸力 (kN·m ⁻¹)	10%伸长率时 单位拉伸力 (kN·m ⁻¹)	拉伸 强度 (kN·m ⁻¹)	最大负荷 下伸长率 /%
6.04	12.59	29.13	37.46	13.69

2.2 模型试验方案

2.2.1 试验模型结构与元器件布置

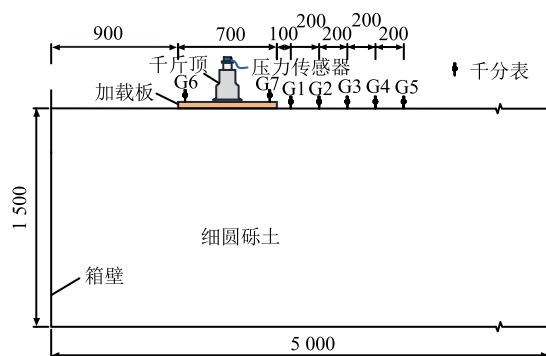
试验共分 2 组，分别为加筋工况与未加筋工况。每组试验模型的长度为 5 m，宽度为 1 m，高度为 1.5 m，箱壁表面涂刷一层润滑油和粘贴光滑聚氯乙烯薄膜，以减小箱壁摩擦对试验结果的影响。整个模型均采用配制的细圆砾土分层填筑，每层填筑压实厚度为 100 mm，并利用夯机进行压实，压实系数为 0.97。如图 4 所示，对于加筋工况，沿垫层表面向下间隔 100 mm 铺设一层格宾网筋材，共 3 层，每层筋材均被施加 2 kN 水平张拉力以消除筋材的褶皱、弯曲等松动现象。其中，第 1 层与第 3 层格宾网筋材表面分别布置了 4 个微型柔性位移计^[13]，编号为 F1~F8，用于测试筋材的压缩/伸长变形，再换算成筋材应变。筋材应变 ε 计算公式如下：

$$\varepsilon = \frac{d_p - d_0}{d + d_0} \quad (1)$$

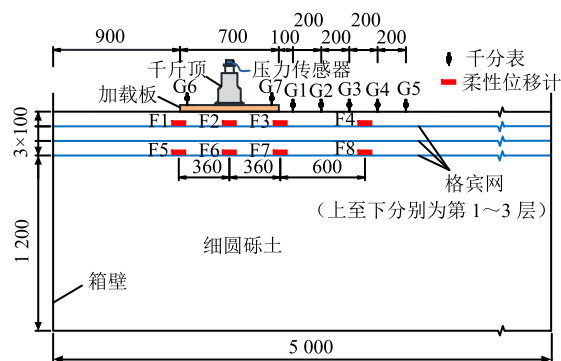
式中： d_p 为荷载 P 作用时柔性位移计读数 (mm)； d_0 为荷载为 0 时柔性位移计初始读数 (mm)； d 为柔性位移计未张拉时长度 (mm)。

填筑完成后静置一周，再将加载板（长度为 700 mm，宽度为 300 mm，厚度为 35 mm，并沿长度方向在其表面焊接 2 道 H 型钢以增加其抗弯刚

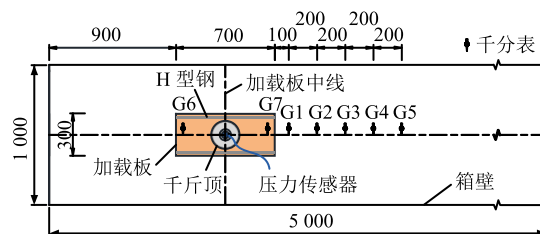
度）放置在垫层表面，垫层与加载板之间用细砂薄层找平。然后，在加载板表面中心放置液压千斤顶与压力传感器，压力传感器用于监测荷载大小。最后，在加载板表面两侧的横向中线处架设了 2 个千分表，编号为 G6、G7。此外，在垫层表面中线上依次架设了 5 个千分表，距加载板边缘的距离分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 m，编号为 G1~G5。需要说明的是，加载板放置在距模型箱左壁的距离为 0.9 m，以使得垫层表面测试一侧距离箱壁较远，从而减小箱壁对垫层表面变形的影响。



(a) 未加筋垫层横断面



(b) 加筋垫层横断面



(c) 俯视图

图 4 加筋与未加筋垫层元器件布置图 (单位: mm)
Fig.4 Component layouts of reinforced and unreinforced cushions (unit: mm)

2.2.2 加卸载实施过程

整个试验过程包括分级加载与分级卸载 2 个过程，具体实施与步骤如下：

(1) 预压阶段: 先采用 2 kN 荷载进行预压, 以消除千斤顶、加载板、垫层之间的间隙, 并使之密贴紧实, 并观察、确认位移计、千分表工作是否正常。之后, 卸掉荷载, 待位移计、千分表恢复至稳定不变。

(2) 分级加载阶段: 首先, 读取位移计、千分表初始读数。然后, 按照分级荷载 0、25、50、75、100、125、150、175、200 kN 进行加载, 每级荷载作用下采集试验数据, 并在千分表读数达到稳定后, 方可施加下一级荷载。千分表读数变化的稳定标准为 0.01 mm/2 h。

(3) 分级卸载阶段: 紧接步骤 (2), 按照分级荷载 200、150、100、50、0 kN 进行卸载, 采集数据与稳定标准要求与步骤 (2) 相同。

3 试验结果及分析

文中规定竖向变形以沉降变形为负值, 以隆起变形为正值。筋材应变以拉应变为正值。另外, 为便于区分编号 G1~G7 的变形, 将编号 G6 与 G7 处的变形称为加载板沉降变形, 将 G1~G5 处的变形称为垫层表面的竖向变形 (即属于加载板以外的范围)。

3.1 加载板沉降变形随荷载的变化规律

根据监测点 G6、G7 的试验数据可得加载板沉降变形的均值, 其结果如图 5 所示。

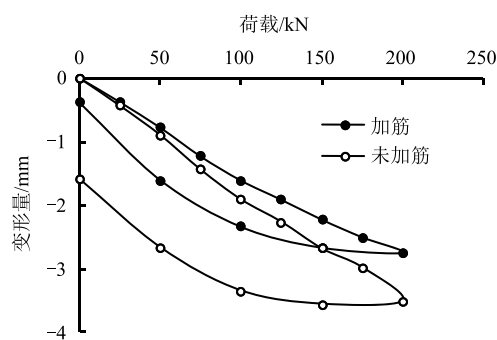


图 5 加载板沉降变形随荷载的变化
Fig.5 Variations of settlement deformation of loading plate with load

图 5 为加载板沉降变形随荷载的变化曲线。由图可知, 随着荷载增大, 垫层沉降变形逐渐增加, 但加筋垫层的沉降量小于未加筋情况的, 且荷载越大, 两者差异更明显, 说明加筋效果在荷载较大时能更好地发挥。当荷载为 200 kN 时, 加筋与未加筋垫层的最大沉降变形分别为 2.749、3.506 mm。在卸载过程中, 加筋与未加筋垫层均产生了回弹变形,

且均有残余变形存在, 但加筋后垫层的残余变形更小。加筋与未加筋垫层的残余变形分别为 0.384、1.586 mm, 对应的回弹变形分别 2.365、1.920 mm, 说明加筋作用可以提高垫层的弹性性能。此外, 加卸载作用下, 加筋垫层沉降变形曲线形成的滞回圈明显小于未加筋时的, 这也说明加筋垫层具有更好的弹性能力。

3.2 垫层表面不同位置处竖向变形的变化规律

3.2.1 垫层表面竖向变形随荷载的变化

图 6 为垫层表面不同位置处竖向变形随荷载的变化曲线。由图可知, 随着荷载增大, 垫层表面不同位置处竖向变形增大。当荷载逐渐减小时, 其竖向变形也相应地减小。其中, 距加载板距离越小, 垫层表面的竖向变形越大。在加卸载过程中, 未加筋垫层表面的竖向变形曲线形成了明显的滞回圈特征, 且随着距加载板距离的减小, 其滞回圈面积呈增大趋势, 即塑性变形增大。然而, 加筋垫层表面的竖向变形曲线并没有形成明显的滞回圈特征, 其曲线形状呈“∞”型。这表明加筋作用能够减小垫层在加卸载过程中的塑性变形。

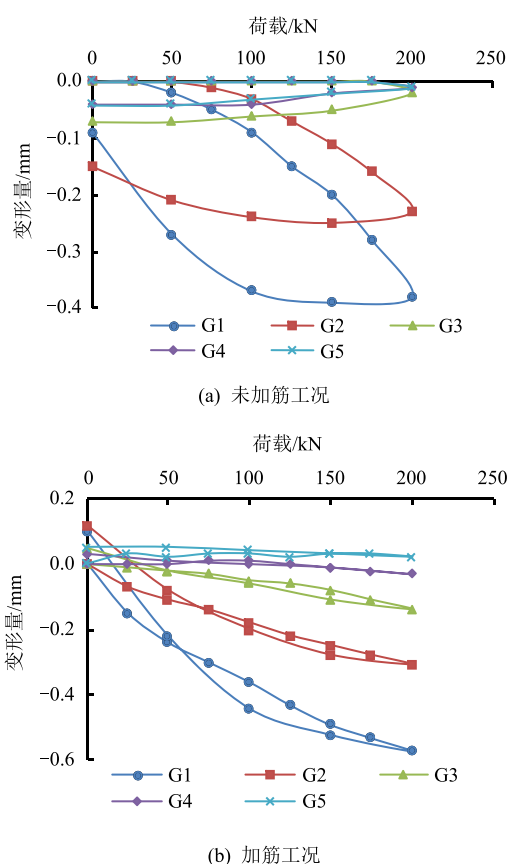


图 6 垫层表面不同位置处竖向变形随荷载的变化
Fig.6 Variations of vertical deformation at different positions on cushion surface with load

3.2.2 加卸载作用下垫层表面竖向变形随水平距离的变化

图7为加卸载作用下垫层表面竖向变形的水平分布曲线。由图7(a)与7(c)可知, 不论是否铺设筋材, 垫层表面的竖向变形均随着荷载的增加而增大, 但对于加筋垫层, 垫层表面变形受荷载影响的范围更大。其中, 加筋垫层在距加载板边缘0.7 m处仍

产生了沉降变形, 而未加筋垫层在距加载板边缘0.5 m处附近的沉降变形基本为0。其原因是荷载作用导致垫层产生沉降变形与筋材出现弯沉变形, 筋材弯沉变形经过横向传递后会对加载板两侧一定范围内土体产生向下的拖拽作用力^[20], 进而使得参与承载的土体范围扩大。其中, 当荷载为200 kN时, 对于加筋与未加筋垫层, 距加载板边缘0.1 m处竖

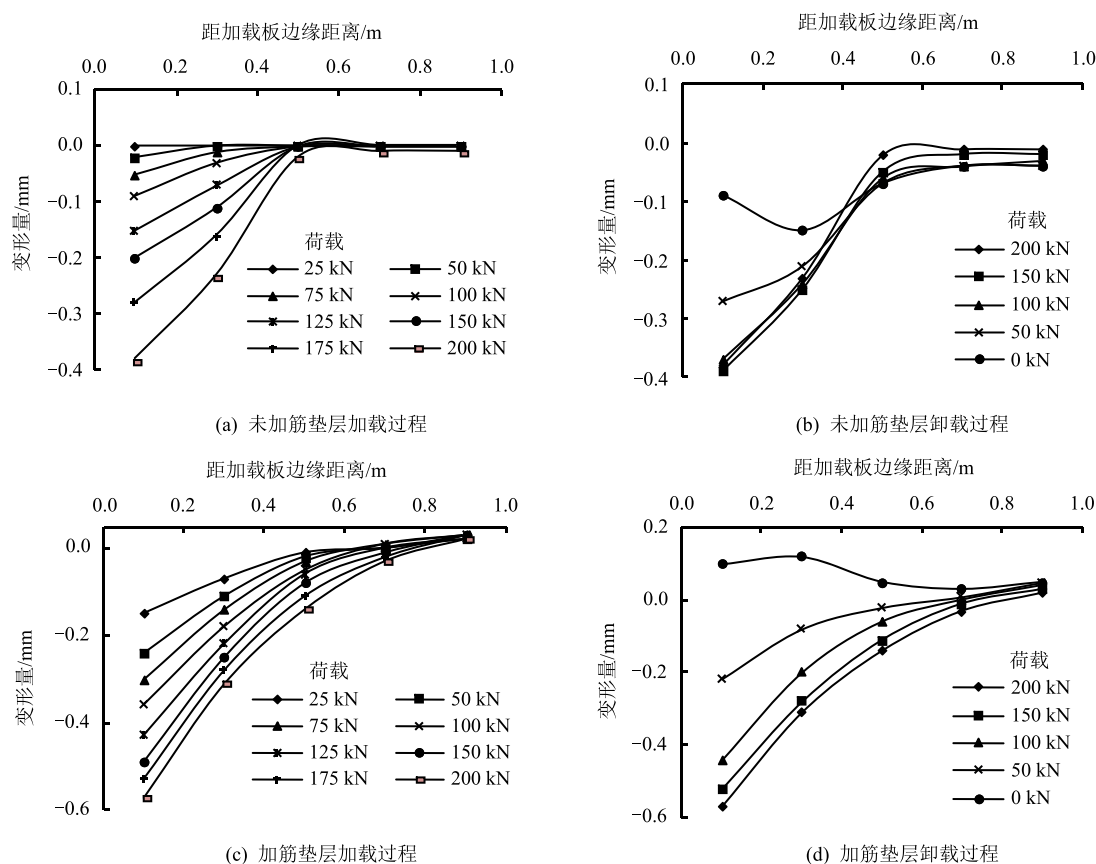


图7 加卸载作用下垫层表面竖向变形的水平分布

Fig.7 Horizontal distributions of vertical deformation on the cushion surface under loading and unloading

向变形分别为0.570、0.380 mm。

由图7(b)与7(d)可知, 在卸载过程中, 加筋与未加筋垫层的表面竖向变形水平分布曲线存在明显差异, 特别是在荷载较小时更为突出。具体而言, 对于未加筋垫层, 其表面竖向变形的水平分布曲线形状呈“凹”型, 而对于加筋垫层, 其表面竖向变形的水平分布曲线形状呈“凸”型。值得注意的是, 对于卸载后的加筋垫层, 在距加载板较近位置产生了小幅度的上拱现象(即隆起变形)。

3.3 格宾网筋材应变的变化规律

3.3.1 筋材应变随荷载的变化

图8为加筋垫层中筋材应变随荷载的变化曲线。由图可知, 加卸载过程中, 格宾网筋材应变不大, 第1、3层筋材的最大应变分别小于0.03%、

0.06%, 筋材处于弹性变形状态。此外, 筋材应变的加卸载曲线非常靠近, 卸载后筋材能够得到较好恢复, 其残余应变非常小, 基本小于0.01%。可见, 格宾网筋材基本处于弹性阶段, 这可以较好地改善垫层的弹性性能, 从而降低反复荷载作用下垫层的塑性变形或累计变形。

3.3.2 加卸载作用下筋材应变随水平距离的变化

图9为加卸载作用下第1层筋材应变的水平分布曲线。由图可知, 第1层筋材应变随着荷载增大而增大, 随着荷载减小而减小。第1层筋材应变在水平方向上呈非均匀分布特点, 且随着荷载增大而更明显。在加载板所在位置的下方, 筋材应变值为负, 而加载板范围外, 筋材应变表现出正值, 说明筋材在加载板周围存在反弯点, 这与白崇喜等^[20]

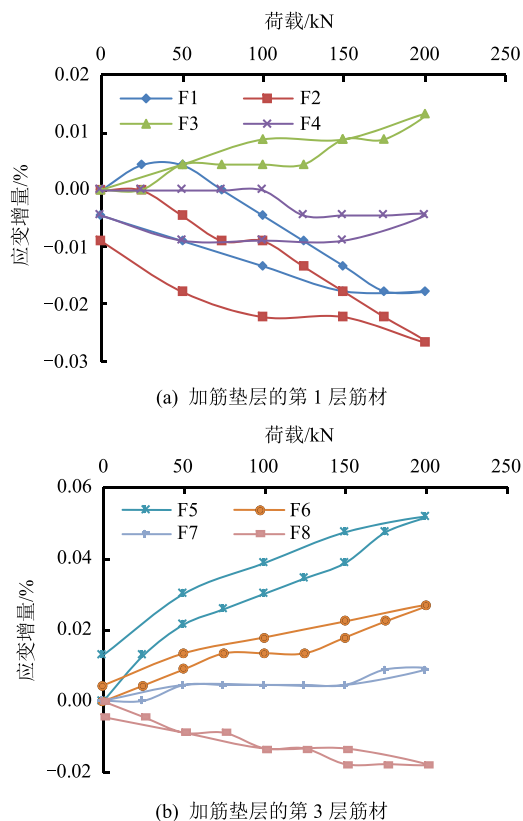


图 8 加筋垫层中筋材应变随荷载的变化
Fig.8 Variations of reinforcement strain with load in reinforced cushion

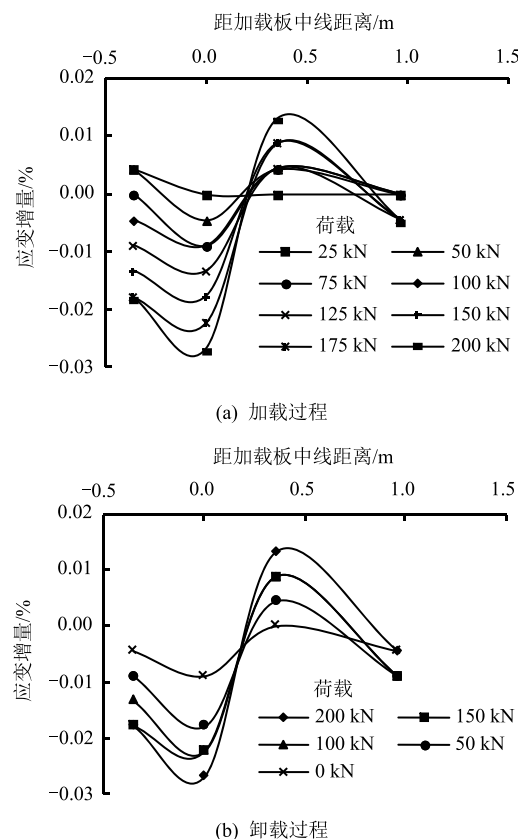


图 9 加卸载作用下第 1 层筋材应变的水平分布
Fig.9 Horizontal distributions of strain of the first layer of reinforcement under loading and unloading

的试验结果具有一致性。

图 10 为加卸载作用下第 3 层筋材应变的水平分布曲线。由图 10 可知,第 3 层筋材应变亦随荷载增大(减小)而增大(减小),特别是卸载后,筋材表现出良好的变形恢复能力。随距加载板中线的距离增大,筋材应变呈现逐渐降低的非均匀分布特征,且随着荷载增大,该非均匀分布特征更显著。第 3 层筋材应变总体上表现为正值,即筋材承受拉力。此外,第 3 层筋材应变总体上大于第 1 层筋材应变,说明第 3 层筋材也发挥了较大的加筋效果。格宾网、土工格栅等筋材具有高强度、高模量及高弹性的特点,铺设于土体中,其不仅可以与土体共同参与变形与受力,使得垫层的承载能力提高、沉降变形减小,还可以改善土体的弹性性能,使得循环荷载作用下垫层的塑性变形降低。

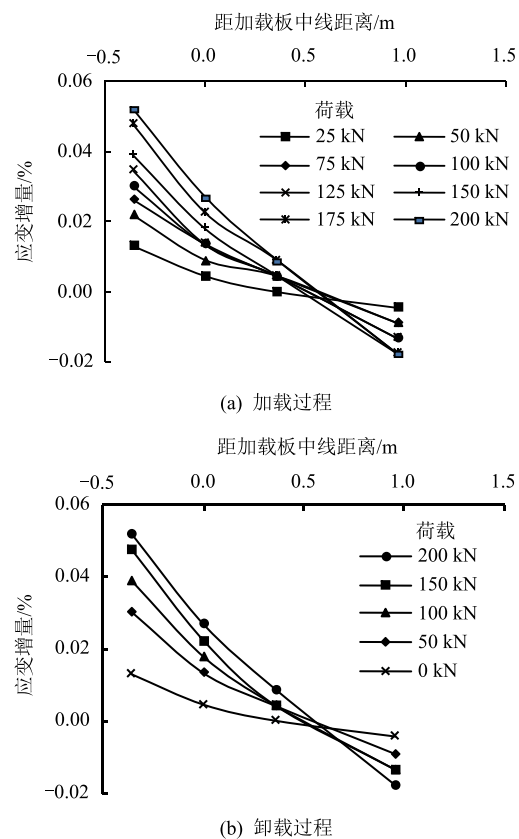


图 10 加卸载作用下第 3 层筋材应变的水平分布
Fig.10 Horizontal distributions of strain of the third layer of reinforcement under loading and unloading

4 加卸载作用下加筋垫层工作机制分析

根据前述试验结果,加卸载作用下加筋与未加筋垫层表面(指加载板范围外)的变形响应机制可描述于图 11。本文从能量角度对加筋垫层的工作机

制进行分析。

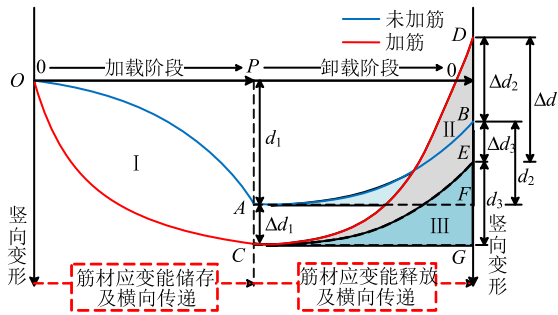


图 11 加卸载作用下垫层表面的竖向变形产生机制
Fig.11 Mechanism of vertical deformation of cushion surface under loading and unloading

在图 11 中, P 为施加的荷载, d_1 为荷载作用下未加筋垫层表面的最大沉降变形量, Δd_1 为荷载作用下加筋垫层与未加筋垫层表面的沉降差值, d_2 为卸荷后未加筋垫层表面的回弹变形量, Δd_2 为卸荷后加筋垫层与未加筋垫层表面的回弹变形差值, d_3 为卸荷后加筋垫层表面土体自身的回弹变形量, Δd_3 为加筋作用引起垫层表面土体变形后的自身不可恢复变形增加量, Δd 为筋材应变能释放引起的垫层表面回弹变形增加量。

加卸载过程可看成是做功过程, 从而引起能量的转化。其中, 做功 W 的计算公式为

$$W = Pd_s \quad (2)$$

式中: d_s 为荷载方向上的变形。

外荷载做功使得筋材产生变形, 进而筋材内储存应变能^[21]。区域 I (OAC) 的面积为应变能经筋材横向传递至加载板范围外筋材中, 再转移至加载板范围外垫层土体中的能量 W_I , 该能量使得垫层表面的竖向变形增加了 Δd_1 。卸载阶段, 垫层与筋材均随荷载减小而回弹, 即变形逐渐恢复, 使得加载板范围外的筋材应变能释放出来, 该释放的应变能的一部分 (即区域 II (CDE) 面积构成的能量 W_{II}) 经筋土界面相互作用转移至垫层土体中, 使得垫层弹性性能增强, 另一分部经横向传递作用传回加载板范围内的筋材中。区域 III (CEG) 的面积为垫层土体自身回弹能力对应的弹性变形能 W_{III} 。

由图 11 可知, 加载时, 垫层产生沉降变形, 进而引起筋材产生弯沉变形和应变。筋材具有高弹性与高模量特点, 故筋材变形后会储存一部分应变能^[21]。相同荷载作用下, 因为筋材可承担部分能量, 故加筋后加载板处沉降变形减小, 如图 5 所示。

筋材的弯沉变形和应变会对加载板周围土体形

成拖拽作用^[22], 且经筋材横向传递后会扩散至周围更广泛的区域, 这能够解释加筋垫层受荷载影响的范围更大的原因。此外, 通过筋材横向传递作用, 一部分应变能将传递至加载板所在范围以外的筋材并储存于其中, 另一分部应变能则传递至加载板范围外的应变能在筋土界面摩擦作用下转化为土体的弹塑性变形能, 即引起加筋垫层表面的竖向变形增大, 使得其大于未加筋垫层表面的竖向变形, 如图 6 所示。

在卸载阶段, 垫层与筋材均产生回弹变形。筋材变形可以得到部分恢复, 使得储存于筋材中的部分应变能得以释放, 该释放的应变能促使垫层的回弹性能增强, 即使得加筋垫层的回弹变形 (弹性变形能) 增大, 而其残余塑性变形 (塑性变形能) 减小, 如图 5 所示。需要指出的是, 对于加载板所在范围, 由于该位置在加载过程中土体产生的塑性变形能较大, 因此, 释放的应变能只够促使加载板处的残余变形减小, 但不能减小至 0; 对于加载板所在范围外 (加筋垫层表面), 由于释放的应变能大于加载过程中土体产生的塑性变形能 (对应变形为 $d_1 + \Delta d_1 - d_3$), 这使得土体回弹能力显著提高 (对应变形增大量为 Δd , 对应的能量为区域 II), 进而导致卸载后加筋垫层表面的竖向变形呈现出隆起现象, 如图 7(d) 所示, 从而使得加筋垫层表面的竖向变形加卸载曲线形状呈“∞”型, 如图 6(b) 所示。然而, 随着距加载板位置的距离增大, 由于应变能将逐渐减小, 故加筋垫层表面的隆起变形也逐渐减小。可见, 铺设筋材后, 垫层内存在筋材应变能的储存、释放以及横向传递效应。在承受反复加卸载作用 (如交通荷载、波浪荷载、胀缩荷载等) 的构筑物中, 可对上述效应加以充分考虑与利用。需要强调的是, 加卸载过程中, 筋材的塑性应变与土体的塑性变形同时存在且可能不断累积, 因此, 能量耗散现象及其累计变化规律也应引起注意。

5 结论与建议

(1) 相比于未加筋情况, 荷载作用下加筋后垫层 (加载板处) 的沉降变形减小, 且当荷载越大, 其减小效果越显著。卸载后加筋垫层的残余变形更小。

(2) 垫层表面 (加载板范围外) 的竖向变形随着距加载板距离的增大而减小。加筋后垫层表面的竖向变形增加, 且其受影响范围扩大。此外, 卸载过程中, 加筋后垫层表面竖向变形的水平分布曲线形状由“凹”型转变为“凸”型, 而其加卸载曲线形状

由滞回圈特征转变成“ ∞ ”型特征。

(3) 加卸载过程中, 格宾网筋材应变沿横向呈现非均匀分布, 且随着荷载增大而更加明显。筋材最大应变小于 0.06%, 筋材基本处于弹性变形状态, 具有良好的变形恢复能力。

(4) 加卸载作用下, 加筋垫层中筋材能够储存、释放及横向传递应变能, 使得加筋垫层具有更好的承载能力与弹性性能, 从而降低其沉降变形和循环加卸载荷载作用下的塑性变形或累计变形。

(5) 筋材应变能的储存、释放与横向传递效应可在一些承受反复加卸载作用的构筑物中充分利用, 但能量耗散现象也应引起重视, 特别是能量耗散随加卸载荷载及其循环次数的变化尚需开展深入研究。

参考文献

- [1] ABU E S, BELAL A M. Bearing capacity of rigid shallow footing on geogrid-reinforced fine sand—experimental modeling[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2018, 11(11): 247-256.
- [2] MEHRJARDI G T, KHAZAEI M. Scale effect on the behaviour of geogrid-reinforced soil under repeated loads[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2017, 45(6): 603-615.
- [3] 罗强, 刘俊彦, 张良. 土工合成材料加筋砂垫层减小软土地基沉降试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2003, 25(6): 710-714.
LUO Qiang, LIU Jun-yan, ZHANG Liang. Application of geosynthetics-reinforced sand blanket to settlement reduction of soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(6): 710-714.
- [4] 李运成, 彭振斌, 何杰. 刚性基础下土工格栅加筋碎石垫层变形特性试验研究[J]. **中南大学学报(自然科学版)**, 2014, 45(9): 3244-3248.
LI Yun-cheng, PENG Zhen-bin, HE Jie. Experimental study on deformation feature of geogrids reinforced gravel cushion with rigid foundation[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2014, 45(9): 3244-3248.
- [5] DEB K, CHANDRA S, BASUDHAR P K. Settlement response of a multilayer geosynthetic-reinforced granular fill-soft soil system[J]. **Geosynthetics International**, 2005, 12(6): 288-298.
- [6] 刘毓斌, 左广洲, 陈福全. 加筋垫层应力扩散特性试验研究[J]. **岩土力学**, 2007, 28(5): 903-908.
- LIU Yu-chuan, ZUO Guang-zhou, CHEN Fu-quan. Numerical research on stress distribution of geosynthetic reinforcement layer[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 903-908.
- [7] KARGAR M, HOSSEINI S M M M. Influence of reinforcement stiffness and strength on load-settlement response of geocell-reinforced sand bases[J]. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2018, 22(5): 596-613.
- [8] 黄俊杰, 王薇, 苏谦, 等. 素混凝土桩复合地基支承路堤变形破坏模式[J]. **岩土力学**, 2018, 39(5): 1653-1661.
HUANG Jun-jie, WANG Wei, SU Qian, et al. Deformation and failure modes of embankments on soft ground reinforced by plain concrete piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(5): 1653-1661.
- [9] 杨果林, 王亮亮. 桩网复合地基加筋垫层土工格栅变形机理研究[J]. **中国铁道科学**, 2011, 32(5): 8-12.
YANG Guo-lin, WANG Liang-liang. Research on the deformation mechanism of the geogrid reinforced cushion for pile-net composite foundation[J]. **China Railway Science**, 2011, 32(5): 8-12.
- [10] 魏平, 魏静, 杨松林, 等. 高速铁路低路基桩网结构土工格栅动力特性[J]. **交通运输工程学报**, 2017, 17(6): 19-27.
WEI Ping, WEI Jing, YANG Song-lin, et al. Geogrid dynamic characteristics of pile-net structure in low subgrade of high-speed railway[J]. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 2017, 17(6): 19-27.
- [11] VENKATESWARLU H, UJJAWAL K N, HEGDE A. Laboratory and numerical investigation of machine foundations reinforced with geogrids and geocells[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2018, 46(6): 882-896.
- [12] SUKU L, PRABHU S S, BABU G L S. Effect of geogrid-reinforcement in granular bases under repeated loading[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2017, 45(4): 377-389.
- [13] 王家全, 张亮亮, 刘政权, 等. 土工格栅加筋砂土地基大模型动载试验研究[J]. **岩土力学**, 2018, 39(10): 3539-3547.
WANG Jia-quan, ZHANG Liang-liang, LIU Zheng-quan, et al. Large model test on geogrid reinforced sand soil foundation under dynamic loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 3539-3547.
- [14] WANG J Q, ZHANG L L, XUE J F, et al. Load-

- settlement response of shallow square footings on geogrid-reinforced sand under cyclic loading[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2018, 46(5): 586-596.
- [15] MAMATHA K H, DINESH S V. Evaluation of strain modulus and deformation characteristics of geosynthetic-reinforced soil-aggregate system under repetitive loading[J]. **International Journal of Geotechnical Engineering**, 2017, 12(6): 546-555.
- [16] 边学成, 陈华晗, 何波, 等. 循环荷载下土工格栅加筋铁路道床累积沉降模型试验研究[J]. **土木工程学报**, 2019, 52(8): 120-128.
- BIAN Xue-cheng, CHEN Hua-han, HE Bo, et al. Experimental study on accumulated settlement of ballasted trackbed reinforced with geogrid under cyclic loading[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2019, 52(8): 120-128.
- [17] 蒋建清, 杨果林. 格宾网加筋红层软岩土石混填路堤力学行为的现场测试与数值模拟[J]. **岩土力学**, 2016, 37(1): 156-165.
- JIANG Jian-qing, YANG Guo-lin. Field test and numerical simulation on mechanical behavior of red bed soil-rock embankment reinforced with gabion[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(1): 156-165.
- [18] THOENI K, LAMBERT C, GIACOMINI A, et al. Discrete modelling of hexagonal wire meshes with a stochastically distorted contact model[J]. **Computers and Geotechnics**, 2013, 49: 158-169.
- [19] 杨果林, 段君义, 张雨. 格宾网筋材的绞边强度特性试验研究[J]. **湖南大学学报(自然科学版)**, 2016, 43(7): 132-138.
- YANG Guo-lin, DUAN Jun-yi, ZHANG Yu. Experimental study on selvage strength characteristics of gabion mesh[J]. **Journal of Hunan University (Natural Sciences)**, 2016, 43(7): 132-138.
- [20] 白崇喜, 张中昊, 邵新妍. 条形基础下水平布置纤维增强聚合物筋材地基试验研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(4): 953-957.
- BAI Chong-xi, ZHANG Zhong-hao, SHAO Xin-yan. An experimental study of strip foundation on the grounds reinforced with horizontal FRP[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(4): 953-957.
- [21] 上官士青, 杨敏, 陈飞, 等. 基于最小势能原理的加筋垫层与路堤桩土相互作用研究[J]. **岩土工程学报**, 2015, 37(7): 1264-1270.
- SHANGGUAN Shi-qing, YANG Min, CHEN Fei, et al. Interaction of reinforced cushion and pile-soil system in embankments based on principle of minimum potential energy[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(7): 1264-1270.
- [22] 王钊, 王协群. 土工合成材料加筋地基的设计[J]. **岩土工程学报**, 2000, 22(6): 731-733.
- WANG Zhao, WANG Xie-qun. Design of foundation reinforced with geosynthetics[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(6): 731-733.
-
- 上接第 2312 页
- [23] ROUAINIA M, MUIR WOOD D. A kinematic hardening constitutive model for natural clays with loss of structure[J]. **Geotechnique**, 2000, 50(2): 153-164.
- [24] SUEBSUK J, HORPIBULSUK S, LIU M D. A critical state model for overconsolidated structured clays[J]. **Computers and Geotechnics**, 2011, 38(5): 648-658.
- [25] 张峰, 叶冠林. 计算土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- ZHANG Feng, YE Guan-lin. Computational soil mechanics[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [26] 胡小荣, 董肖龙, 胡勃阳, 等. 饱和超固结黏性土的三剪弹塑性本构模型研究[J]. **固体力学学报**, 2017, 38(6): 579-590.
- HU Xiao-rong, DONG Xiao-long, HU Bo-yang, et al. The triple-shear elasto-plastic constitutive model for saturated over-consolidated clay[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2017, 38(6): 579-590.
- [27] HYODO M, NAKATA Y, YOSHIMOTO N, et al. Challenge for methane hydrate production by geotechnical engineering[J]. **Soils and Foundations**, 2013, 53(2): 299-314.