

DOI: 10.11779/CJGE2015S2033

# 条形荷载下土工格室加筋砂土路堤模型试验研究

孙 州<sup>1</sup>, 张孟喜<sup>1</sup>, 姜圣卫<sup>2</sup>

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200072; 2. 江苏省仪征市佳和土工材料有限公司, 江苏 仪征 211401)

**摘 要:** 为了探讨不同土工格室加筋方式对路堤应力变形特性和不均匀沉降的控制效果, 分别对纯砂路堤边坡和土工格室加筋路堤进行多组模型试验, 研究了土工格室焊距、埋深、加筋层数以及压实度对路堤承载力特性和变形特性的影响, 同时结合土工格室材料应变的变化规律和加筋路堤的坡面变形状态分析了土工格室加筋路堤的破坏模式。试验结果表明: 格室加筋效果随着焊距、加筋深度的减小而增加, 随着压实度、加筋层数的增加而增加; 土工格室加筋路堤承载力是纯砂的 2.5 倍左右, 提高了路堤的极限承载力, 减小了路堤沉降, 并且土工格室加筋路堤坡面侧向位移比纯砂路堤减小了 75%。

**关键词:** 土工格室; 加筋路堤; 模型试验; 压实度; 侧向变形

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2015)S2-0170-06

**作者简介:** 孙 州(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事新型土工加筋技术方面的研究工作。E-mail: sunzhouss@163.com。

## Model tests on sand embankment reinforced with geocell subjected to strip loading

SUN Zhou<sup>1</sup>, ZHANG Meng-xi<sup>1</sup>, JIANG Sheng-wei<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Jiahe Geosynthetics Company, Yizheng 211401,

China)

**Abstract:** A series of model tests are carried out on pure embankment and reinforced embankment with geocell to study the effect of the different reinforced types of geocell on variation characteristic of stress and differential settlement in embankment. The influences of welded spacing, single-layer reinforcement depth, reinforcement layers and soil compaction on the bearing capacity and deformation of the embankment are investigated. At the same time, the failure mode of reinforced embankment is analyzed according to the distribution of tensile strain of geocell and the failure state of embankment slope. The results show that the effect of reinforcement increases with the decrease of geocell welded spacing and single-layer geocell depth, moreover, the effect of reinforcement increases with the increase of reinforcement layers and the embankment compaction. The bearing capacity of reinforcement embankment is about 2.5 times that of the pure sand, improves the bearing capacity and reduces the settlement of reinforcement embankment, and the lateral displacement of embankment slope is reduced by 75% than that of the pure sand embankment.

**Key words:** geocell; reinforced embankment; model test; degree of compaction; lateral deformation

## 0 引 言

土工格室作为一种新型土工合成材料, 在施工过程中可以张拉成网格状, 具有抗拉强度高, 耐磨性好, 质量轻等特点, 可以有效的增加路堤边坡的整体性和稳定性, 减小路堤的不均匀沉降和侧向变形<sup>[1-2]</sup>, 因此被广泛应用于铁路、公路、水利等各个领域。

Bergado等<sup>[3]</sup>用试验和模拟等手段对软基上的路堤进行研究, 结果表明加筋后不仅可以提高路堤的填筑高度还可以减小路堤的塑性变形。Leshchinsky和Ling<sup>[4]</sup>通过一系列的模型试验认为在碎石路堤上铺设土工格室可以提高碎石路基的刚度和减小路堤的竖向沉降。Latha等<sup>[5]</sup>通过模型试验研究了土工格室的抗拉

强度、高度以及筋材的长度对路堤承载力以及变形的影响。刘金龙等<sup>[6]</sup>采用有限元法对土工织物加固软土路基机理进行研究, 结果表明土工织物可以明显减小路基侧向位移, 增加路堤的稳定性。杨庆等<sup>[7]</sup>对土工格栅加筋路堤边坡进行模型试验, 研究了路堤边坡结构在坡顶荷载作用下边坡与土工格栅的变形规律。朱湘和黄晓明<sup>[8]</sup>对加筋路堤进行室内试验研究, 认为土工格栅的加入可以减小地基中的附加竖向应力和沉降。张良等<sup>[9]</sup>设计了3种不同垫层结构的软土地基路堤

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41372280)

收稿日期: 2015-03-26

离心模型试验, 认为加筋垫层中筋带拉力的分布的大小和范围与路堤基底压力、地基极限承载力有关。孙亮富等<sup>[10]</sup>对新型加筋形式对加筋砂垫层加固道路软基进行了模型试验研究, 试验结果表明单向网格状带齿加筋砂垫层可以提高软基承载力, 减小软基不均匀沉降。然而大部分文献主要集中于对路堤承载力和变形特性方面的研究, 对于路堤破坏过程中筋材的受力和加筋方式对路堤的破坏模式的影响研究相对较少。

本文主要研究了土工格室加筋路堤在条形荷载作用下的路堤边坡承载力以及变形特性, 通过采取控制路堤边坡的压实度、加筋层数、加筋位置以及格室焊距等方法来分析路堤的承载力以及路堤边坡的侧向变形等情况, 同时分析了土工格室在条形荷载作用下沿路堤横截面方向的应变变化规律, 并在模型试验的基础上分析了土工格室加筋路堤的破坏模式, 以期土工格室加筋路堤工程设计提供借鉴。

1 模型试验

1.1 试验材料

(1) 筋材

加筋材料采用网带纵向抗拉强度 $\geq 244$  MPa 的聚丙烯土工格室, 如图 1 所示。土工格室高度  $H=50$  mm, 网带连接点抗拉强度 $\geq 244$  MPa。

(2) 砂土

通过重型击实试验测得路堤填土的最大干密度为  $1.97\text{ g/cm}^3$ , 经过室内土工试验所测得的砂土的物理特性参数指标如表 1 所示。

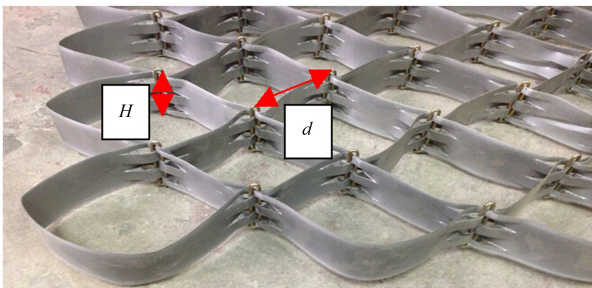


图 1 土工格室示意图

Fig. 1 Sketch of geocells

表 1 砂土的物理特性参数

Table 1 Physical characteristic parameters of sand

比重 $G_s$	含水率 $w/\%$	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$
2.64	0.11	3.12	0.82

1.2 试验装置与加载

(1) 模型箱布置

本试验模拟条形荷载下砂土路堤表面和侧面的变

形情况, 属于平面应变问题。为了减小边界效应的影响, 试验采用  $1400\text{ mm}\times 640\text{ mm}\times 1100\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的矩形模型箱, 同时在侧壁上画有标记线, 以便进行分层填土、筋材铺设以及观察路堤边坡的坡面变形情况, 试验装置如图 2 所示。

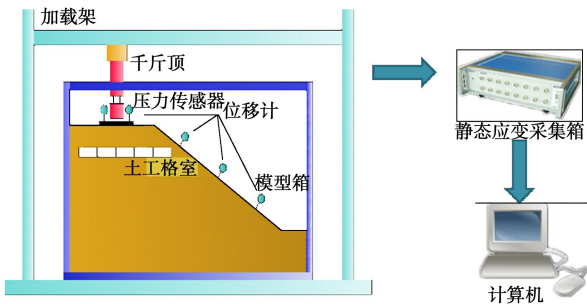


图 2 模型试验装置示意图

Fig. 2 Device of model tests

(2) 试验加载布置

试验加载设备采用 BZ70-1 型量程为  $100\text{ kN}$  的油压千斤顶, 加载速度通过油压千斤顶的加压阀门控制, 竖向荷载可以由连接在千斤顶端部的压力传感器测得, 路堤模型尺寸及布筋参数如图 3 所示。

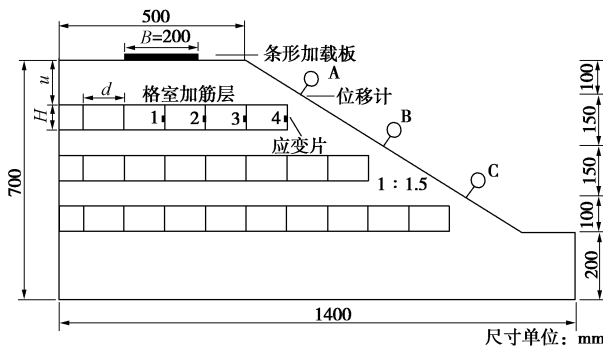


图 3 路堤模型尺寸及布筋参数示意图

Fig. 3 Illustration of model sizes and parameters of reinforced embankment

1.3 试验步骤

本文主要试验步骤包括模型制作、测量装置的布置、试验加载和数据采集等工作。通过控制落距和击实次数将砂土预压到规定的压实度, 层层填筑砂土直至达到要求的边坡高度。

试验的破坏标准, 按照《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)<sup>[11]</sup>中对加载变形破坏标准的规定, 承压板周边的土体出现明显的侧向挤出, 路堤的沉降量急剧增大, 承载力出现峰值或者在曲线未出现明显峰值之前, 但总沉降量与承压板直径(或边长)之比超过 0.06, 即沉降量达到 12 mm。

1.4 试验方案

为了研究不同加筋方式(加筋层数、焊距、埋深、密实度)对路堤边坡承载力以及变形特性的影响, 揭

示土工格室加筋路堤的沉降变化规律和加筋路堤的破坏模式，试验采用模型几何相似比为 1：12 模拟高 6 m，路面宽为 12 m 的二级公路，进行了平面应变下土工格室加筋路堤室内模型试验研究。由于路堤具有对称性，取路堤的半结构进行试验，路堤边坡坡度 1：1.5，加载板位置距离坡边 125 mm。试验共设计了 9 种工况（见表 2）。工况 2，7 用来对比加筋层数对加筋路堤边坡的影响，层间距为 0.5*B*，即 10 cm。压实度是路基质量控制的重要指标之一，压实度是指试验时路堤模型实际达到的干密度与室内标准击实试验所得最大干密度的比值，工况 2，8，9 为了研究压实度对加筋路堤边坡的影响，试验时路堤砂土的压实度 *K* 所对应的砂土密度分别为 1.67，1.77，1.87 g/cm<sup>3</sup>。

表 2 试验工况

Table 2 Test cases					
工况	加筋类型	格室 焊距 <i>d</i>	格室 埋深 <i>u</i>	路堤 压实度 <i>K</i> /%	模型 示意图
1	纯砂			90%	
2	格室 (1 层)	0.5 <i>B</i>	0.5 <i>B</i>	90%	
3	格室 (1 层)	0.75 <i>B</i>	0.5 <i>B</i>	90%	
4	格室 (1 层)	<i>B</i>	0.5 <i>B</i>	90%	
5	格室 (1 层)	0.5 <i>B</i>	1.25 <i>B</i>	90%	
6	格室 (1 层)	0.5 <i>B</i>	2.25 <i>B</i>	90%	
7	格室 (2 层)	0.5 <i>B</i>	0.5 <i>B</i>	90%	
8	格室 (1 层)	0.5 <i>B</i>	0.5 <i>B</i>	85%	
9	格室 (1 层)	0.5 <i>B</i>	0.5 <i>B</i>	95%	

2 试验结果及分析

2.1 不同工况下加筋路堤的 *p* - *s* 曲线对比

图 4 给出了所有工况下的加筋路堤竖向荷载与沉降之间的关系曲线。随着荷载的增大，纯砂路堤 *p* - *s* 曲线表现为曲线状，纯砂出现快速破坏，沉降量快速增加，这是由于路堤达到极限承载力后，路堤内的土体结构发生破坏，路堤失去稳定性，而加筋路堤由于土工格室兜住了筋材上方的土体，限制了土体的侧向变形，土工格室的加筋路堤的承载力显著提高，沉降量明显减小。不同工况下路堤极限承载力如表 3 所示。

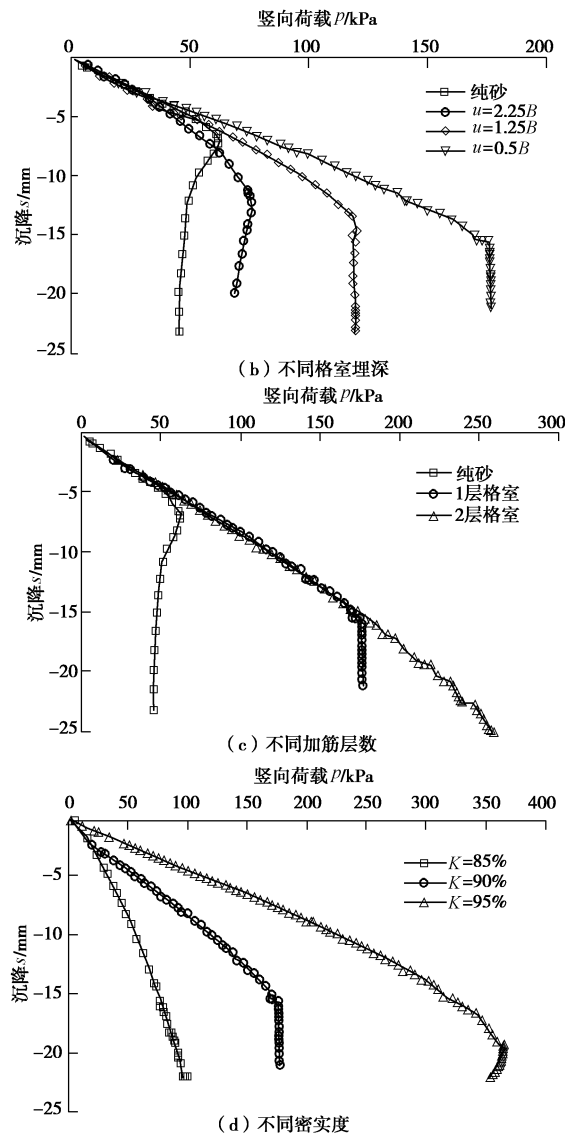
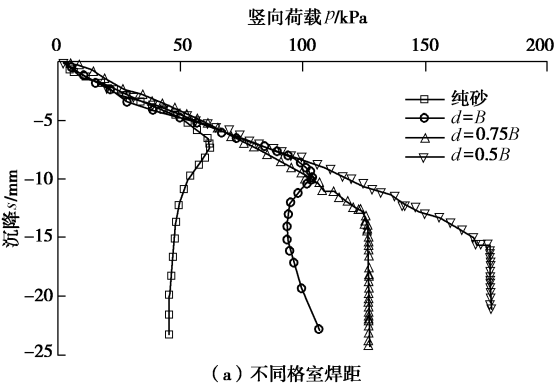


图 4 不同工况下加筋路堤 *p* - *s* 曲线  
Fig. 4 Curves of *p* - *s* for reinforced embankment with different test cases

表 3 路堤极限承载力结果对比

Table 3 Comparison of ultimate bearing capacities of embankment		
工况	极限承载力 <i>p</i> /kPa	提高率/%
纯砂	61.90	—
<i>d</i> =0.50 <i>B</i>	139.68	125.65
<i>d</i> =0.75 <i>B</i>	126.03	103.60
<i>d</i> =1.00 <i>B</i>	103.79	67.68
<i>u</i> =0.50 <i>B</i>	139.68	125.65
<i>u</i> =1.25 <i>B</i>	110.79	78.98
<i>u</i> =2.25 <i>B</i>	75.80	22.45
格室 (1 层)	139.68	125.65
格室 (2 层)	140.95	127.70
<i>K</i> =85%	67.60	9.20
<i>K</i> =90%	139.68	126.65
<i>K</i> =95%	265.30	328.59

## 2.2 影响因素分析

图 4 (a) 研究了纯砂与单层土工格室焊距分别为  $B$ ,  $0.75B$ ,  $0.5B$  时的  $p-s$  曲线, 加筋后路堤极限承载力比未加筋路堤都有不同程度的增加, 若沉降量到达  $0.06B$  ( $s=12\text{ mm}$ ) 之前, 曲线出现拐点, 取拐点处的值作为路堤的极限承载力, 若沉降量到达  $0.06B$  ( $s=12\text{ mm}$ ) 之前, 曲线未出现拐点, 取  $s=0.06B$  的值作为路堤的极限承载力, 与纯砂相比, 焊距为  $B$ ,  $0.75B$ ,  $0.5B$  的土工格室加筋路堤的承载力分别提高了 67.68%, 103.60%, 125.65%。可以看出, 格室焊距越小, 格室发挥加筋效果越好, 加筋路堤的抗变形能力越强。土工格室加筋路堤在不同埋深的  $p-s$  曲线如图 4 (b) 所示, 随着格室内的土体被逐渐压密, 其加筋效果更为显著。承载力随着加筋深度的增加而降低。这是由于如果筋材埋得太深, 作用在土体上的荷载还没有充分传递到格室上, 格室还没有充分发挥它的侧限作用, 土体就已经开始向坡面滑动, 路堤就开始发生破坏。

由图 4 (c) 曲线可以看出, 铺设 1 层与 2 层土工格室的曲线在前段几乎重合, 因为在加载前期, 主要是第 1 层土工格室发挥作用, 随着荷载的增加, 加载板缓慢下沉, 由于第二层土工格室的存在, 加载板没有突然下沉, 土体也没有出现突然向坡面滑动的现象, 这是由于铺设在第 2 层的土工格室限制了土体的滑动, 发挥了格室与土体之间的筋土摩擦作用。故当铺设多层土工格室时, 路堤顶部的土工格室间距应相对减小, 上部是主要的受力区, 中间和底部的可以适当加大, 主要是为了防止路堤边坡的骤然滑坡。分析图 4 (d) 曲线, 得出随着压实度的增加,  $p-s$  曲线的斜率逐渐减小, 在 85% 的压实度时, 由于密实度比较小, 随着荷载的增加, 土体被压密, 土体的体积缩小, 出现剪缩现象, 对于压实度为 95% 的  $p-s$  曲线在加载后期, 砂土相对比较密实, 砂土对格室的挤压作用较大, 格室的侧限作用增强, 加筋效果好。格室加筋随着密实度的增加, 格室的侧向约束作用越明显, 显著提高了路堤的承载力。

## 2.3 加筋路堤模型侧向变形分析

路堤边坡各测点 (坡顶、坡中、坡脚) 在 3 种工况下竖向荷载与侧向位移的关系曲线如图 5 所示。在纯砂路堤到达极限荷载 61.9 kPa 时, 未加筋路堤坡顶侧向位移为 4.05 mm, 而一、二层土工格室加筋同测点侧向位移分别减小了 79.26%、80.24%, 坡中侧向位移分别减小了 63.33%、67.61%, 坡脚侧向位移分别减小了 82.99%、84.35%。可见, 土工格室在路堤中可以有效地限制土体的侧向变形, 而加两层材料与加一层材料相比, 侧限效果相差不大, 主要是因为根据条形荷载下土中附加应力解答, 水平附加应力和侧向变形

主要分布在地基的浅层部位, 故第二层土工格室难以发挥作用。

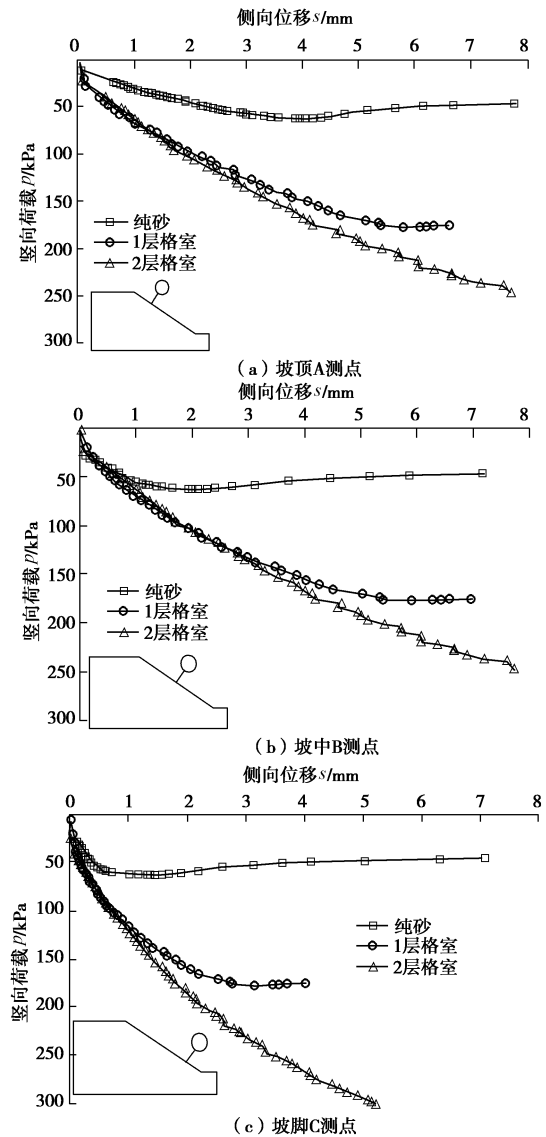


图 5 竖向荷载 - 侧向位移曲线

Fig. 5 Curves between vertical loading and lateral displacement

## 2.4 格室应力应变分析

在埋深为  $0.5B$ , 焊距宽度为  $0.5B$  的情况下, 由加载板中心到坡面选取 4 个位置的格室, 贴上应变片如图 3 所示, 绘制竖向荷载与格室拉应变的关系曲线如图 6 所示。由图可知, 格室拉应变随着路堤顶部的荷载的增大而增大, 当荷载达到 40 kPa 时, 格室拉应变开始增大, 此时格室对土体产生侧限摩擦作用, 格室拉应变由加载中心向坡边逐渐递减。通过万能试验机测得土工格室的拉伸模量  $E=3430\text{ MPa}$ , 加载板底部的最大拉应变为 0.16%, 所对应加载板正下方位置 1 处的格室最大拉压力为 5488 kPa, 格室并没有发生破坏, 只有加载板底部区域格室向下产生弯曲变形。主要是由于格室本身的抗拉强度高, 格室并没有充分发挥材料本身的抗拉强度。



图 7 研究了在不同竖向荷载作用下, 格室所受拉力沿路堤横断面的分布情况, 在加载板最下方格室拉应力最大, 沿路堤横断面方向格室拉应力迅速降低。格室所承受的拉应力反作用于土体上, 限制土体的侧向变形, 防止路堤发生滑动破坏。

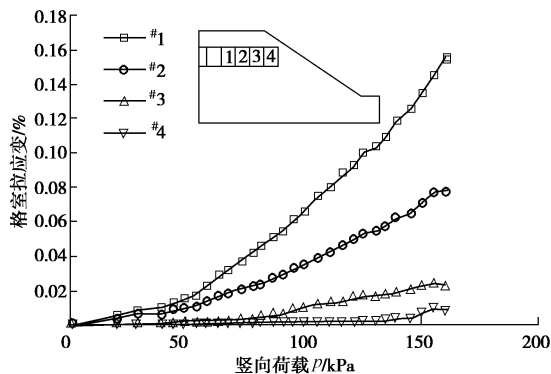


图 6 格室拉应变随竖向荷载变化

Fig. 6 Tensile strain variation of geocell with different loads

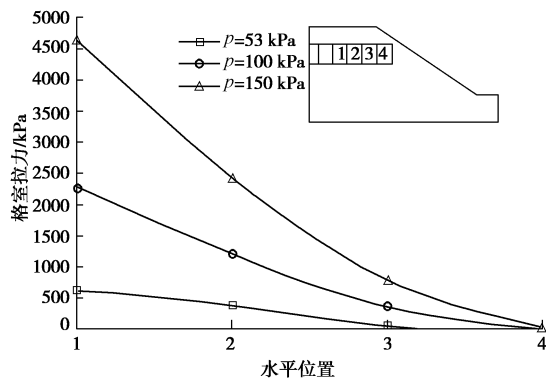


图 7 格室拉力沿路堤横断面分布

Fig. 7 Distribution of tensile force along cross-section of embankment

## 2.5 土工格室加筋路堤破坏模式分析

在不同的加筋形式下, 路堤的破坏模式不同。在纯砂、顶层和底层加筋的路堤模型中, 路堤沉降均远大于坡面水平侧向位移, 坡顶侧向位移大, 坡角小, 但两者的差值没有超过 2 倍, 表明路堤模型破坏是由垂直荷载作用下的地基稳定性发生破坏引起的, 主要是由于路堤边坡采用坡高比为 1:1.5, 坡角较小, 且加载中心距离路堤边缘为 22.5 cm, 所以此时的路堤属于地基失稳破坏模式。由图 8 可以看出: 纯砂路堤沿加载板边缘滑动, 贯穿到路堤底部。当格室放置在路堤顶层时, 路堤破裂位置比未加筋路堤的破裂位置更靠近路堤中部, 破裂面角度也比未加筋时大, 分析其原因, 一是由于土体有向下和向外运动的趋势, 格室内的土体被压密, 土工格室的受到的侧向土压力随之增大, 土体与格室的摩擦作用也随之增大, 另一方面, 由于土工格室的加固作用, 在加筋位置形成结构层, 对上部的荷载进行重新分配, 将上部荷载传递到主要加载区域之外, 避免了基底压力应力集中现象, 有利

于有效应力的扩散。由于土工格室的侧限和摩擦作用, 显著减小了加筋路堤的侧向变形。



(a) 加载前模型状态



(b) 纯砂破坏状态



(c) 顶层加筋破坏状态



(d) 中间层加筋破坏状态



(e) 底层加筋破坏状态

图 8 不同加筋形式下的路堤破坏模式

Fig. 8 Failure modes of embankment with different reinforcement forms

当格室位于路堤中部时, 路堤垂直位移与坡顶的侧向位移接近, 虽然侧向变形仍然是坡顶大, 坡角小, 但坡顶的变形远大于坡角的变形, 由于加筋位置距离

上部荷载较远, 土工格室与土的复合强度较小, 土体在加筋层上方沿坡面滑动, 主要是因为筋材的存在改变路堤边坡圆弧滑动面的发展, 导致边坡中上部发生破坏, 属于加筋路堤边坡的失稳破坏。而加筋层下方的土体滑动并不明显, 加筋层将上部荷载均匀传递到路堤下部。当格室位于路堤底部时, 路堤承载力和破坏模式与未加筋路堤相近, 主要是因为下部土工格室还没有发挥承载和传递作用时, 上部土体在荷载作用下已经发生破坏, 但铺在路堤底部的格室可以兜住整个路堤上方的土体, 限制路堤底部土体的侧向变形, 防止路堤在荷载作用下路堤坡脚发生破坏, 有利于维护整个路堤的稳定性。

### 3 结 论

本文通过 9 种工况路堤的模型试验研究了土工格室加筋路堤承载力和变形特性。初步结论与建议如下:

(1) 不同形式的土工格室加筋均可以提高路堤的承载力, 减小路堤的不均匀沉降, 限制了土体的侧向变形, 本次试验结果表明: 土工格室加筋路堤承载力是纯砂的 2.5 倍左右, 路堤坡面侧向位移比纯砂路堤减小了 75%。

(2) 影响土工格室路堤承载力的权重因素从大到小依次是压实度、格室埋深、焊距和加筋层数。路堤的受力区主要位于中上部, 当铺设土工格室时可以在中上部适当减小层间距, 虽然随着加筋层数的增加不能大幅提高路堤的极限承载力, 但其有利于限制土体的侧向变形和提高路堤的整体稳定性。

(3) 分析了不同加筋形式下土工格室加筋路堤的破坏模式, 主要是由于土工格室在加筋位置处, 形成结构层, 有利于有效应力的扩散, 同时提供的摩擦力和侧向约束力限制了土体向下和外部移动, 从而提高了路堤的承载力, 减小了路堤的沉降量和侧向变形。

### 参考文献:

- [1] ALAWAJI H A. Settlement and bearing capacity of geogrid-reinforced sand over collapsible soil[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, **19**(2): 75 - 88.
- [2] EL SAWWAF M A. Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2007, **25**(1): 50 - 60.
- [3] BERGADO D T, LONG P V, SRINIVASA MURTHY B R. A case study of geotextile-reinforced embankment on soft ground[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2002, **20**(6): 343 - 365.
- [4] LESHCHINSKY B, LING H. Effects of geocell confinement on strength and deformation behavior of gravel[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(2): 340 - 352.
- [5] MADHAVI LATHA G, RAJAGOPAL K, KRISHNASWAMY N R. Experimental and theoretical investigations on geocell supported embankments[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2006, **6**(1): 30 - 35.
- [6] 刘金龙, 栾茂田, 王吉利, 等. 土工织物加固软土路基的机理分析[J]. *岩土力学*, 2007, **28**(5): 1009 - 1014. (LIU Jing-long, LUAN Mao-tian, WANG Ji-li, et al. Mechanism of road embankment reinforced with geotextile[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, **28**(5): 1009 - 1014. (in Chinese))
- [7] 杨 庆, 季大雪, 栾茂田, 等. 土工格栅加筋路堤边坡结构性能模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, **26**(8): 1243 - 1246. (YANG Qing, JI Da-xue, LUAN Mao-tian, et al. Studies on structural performance of embankment slopes reinforced by geogrids with model tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(8): 1243 - 1246. (in Chinese))
- [8] 朱 湘, 黄晓明. 加筋路堤的室内模拟试验和现场沉降观测[J]. *岩土工程学报*, 2002, **24**(3): 386 - 388. (ZHU Xiang, HUANG Xiao-ming. Laboratory simulating test and field settlement observation of reinforced embankment[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, **24**(3): 386 - 388. (in Chinese))
- [9] 张 良, 罗 强, 陈 虎, 等. 基于离心模型试验的软基路堤基底压力和垫层筋带拉力分析[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(9): 2772 - 2779. (ZHANG Liang, LUO Qiang, CHEN Hu, et al. Analysis of tensile force in reinforced cushion and pressure at bottom of soft soil foundation embankment based on centrifugal model tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(9): 2772 - 2779. (in Chinese))
- [10] 孙亮富, 张孟喜, 林永亮, 等. 单向网格状带齿加筋砂垫层加固道路软基的变形特性研究[J]. *土木工程学报*, 2011, **44**(增刊): 13 - 17. (SUN Liang-fu, ZHANG Meng-xi, LIN Yong-liang, et al. Study on deformation characteristics of sand cushion reinforced by uniaxial grid reinforcement of dent-inclusions on soft ground[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, **44**(S0): 13 - 17. (in Chinese))
- [11] GB50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. (GB50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese))