

DOI: 10.11779/CJGE201701006

轮胎与格室加筋路堤性能及承载力研究

李丽华, 崔飞龙, 肖衡林*, 马 强, 任增乐, 罗诗哲

(湖北工业大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 为研究废旧轮胎与土工格室加筋路堤边坡的性能, 分别对废旧轮胎、土工格室加筋路堤边坡开展了室内模型试验, 并考虑了填料两种不同相对密度的影响。试验结果表明: 相对素土路堤而言, 废旧轮胎和土工格室加筋路堤均能有效地提高承载力, 增强其稳定性, 减小不均匀沉降。加筋后均有效地增大了附加应力的扩散角, 使得附加应力分布更为均匀, 并且素土路堤与加筋路堤中轴线上附加应力差值随路堤深度增大而减小。中轴线以外的质点侧向位移随路堤深度的增加, 呈现出先增大后减小的趋势, 几种路堤中, 废旧轮胎加筋路堤侧向位移最小。加筋效果随相对密度增大而减小, 在低相对密度条件下, 加筋后承载力能达到素土路堤2倍以上, 而在高相对密度下却不足2倍。最后根据土工格室加筋地基承载力计算方法及对废旧轮胎加筋机理分析, 提出了关于废旧轮胎加筋地基承载力计算方法。

关键词: 废旧轮胎; 土工格室; 相对密度; 加筋路堤; 承载力; 沉降量

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)01-0081-08

作者简介: 李丽华(1980-), 女, 湖北孝感人, 教授, 硕士生导师, 主要从事地基处理、边坡加固、土工材料、模拟月壤、环境岩土等方面的研究工作。E-mail: researchmailbox@163.com。

Performance and bearing capacity of embankments reinforced with waste tires and geocells

LI Li-hua, CUI Fei-long, XIAO Heng-lin, MA Qiang, REN Zeng-le, LUO Shi-zhe

(School of Civil Engineering and Architecture, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: In order to investigate the performance of with embankment slopes reinforced waste tires and geocells, the model tests on reinforced the embankment slopes with waste tires and geocells are carried out respectively, and the two different relative densities are considered. The results show that compared with the unreinforced soil embankment, the embankments reinforced with both waste tires and geocells can evidently improve bearing capacity and stability and reduce uneven settlement. The reinforced embankments effectively increase the diffusion angle of the additional stress, which makes the distribution of the additional stress become more uniform, and the difference between the additional stress on the center axis of the unreinforced soil embankment and that of the reinforced embankments decreases with the increase of the depth of embankment. The lateral displacements of the unreinforced and reinforced embankments firstly increase and then decrease with the increase of the depth of embankment, and the lateral displacement of the embankment with waste tires is the smallest. The reinforcement effect of waste tires and geocells decreases with the increase of the relative density, and the bearing capacity of the reinforced embankment is over 2 times higher than that of the unreinforced soil embankment under lower density, but less than 2 times under higher density. Finally, the relevant method for calculating bearing capacity of waste tires-reinforced foundation is proposed based on the method for calculating bearing capacity of geocell-reinforced foundation and the analysis of the reinforcement mechanism of waste tires.

Key words: waste tire; geocell; relative density; reinforced embankment; bearing capacity; settlement

0 引言

土具有一定的抗压强度, 但不能承受拉力。类似钢筋混凝土, 将抗拉材料布置在土的拉伸变形区域就构成了一种混合建筑材料, 可以增强土体的强度和稳定性, 这就是加筋土的概念^[1], 常用的加筋材料有土工格栅、土工格室、土工布等。

国内外已有许多学者通过模型试验和数值模拟对

基金项目: 湖北省教育厅重点项目(D20151402); 国家自然科学基金项目(51308197, 51678224); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金项目(Z014011)

收稿日期: 2015-09-02

*通讯作者 (E-mail: xiao-henglin@163.com)

不同土工合成材料加筋路堤边坡性能进行了相关研究，并得出土工合成材料加筋可以有效改善路堤边坡性能的结论。比如，孙州等^[2]对条形荷载下土工格室加筋砂土路堤边坡进行模型试验研究，发现土工格室不但可以提高路堤边坡的极限承载力，还可以降低路堤沉降量。Saeed Alamshahi 等^[3]对土工格栅加筋边坡进行了相关试验研究，得出格栅加筋边坡可提高边坡极限承载力的结论。王志斌等^[4]通过室内模型试验研究斜坡地基上加筋路堤的工作性能，试验结果显示加筋路堤边坡的极限承载力是未加筋路堤边坡的1.3倍左右。王一鸣^[5]等通过数值分析交通荷载下H-V加筋路堤的加筋效果，得出了H-V加筋路堤可以有效减少路堤竖向和侧向位移的结论。

废旧轮胎在岩土工程中作为筋材使用，力学性能优良，其原理类似于土工合成材料加筋，目前国际上已有较多应用实例^[6]。Yeo Won Yoon 等^[7]把废旧轮胎胎边和胎面编织成平面结构，对其加筋地基性能进行研究，结果表明可以有效提高其承载力。Yeo Won Yoon 等^[8]对“8”形轮胎立体结构加筋地基进行试验研究也得到相似的结论。S N Moghaddas Tafreshi 等^[9]通过模型试验详细的研究了废旧轮胎碎片含量、加筋层厚度以及埋置深度对地基承载力的影响。此外，A Edincliler 等^[10]对废旧轮胎橡胶颗粒含量、废旧轮胎橡胶条的含量及纵横比对地基承载力比率的影响进行了试验研究，试验结果显示橡胶条的纵横比对加筋地基性能影响比较显著。本试验在前人对轮胎加筋土研究的基础上，更深入的对废旧轮胎加筋路堤边坡力学性能及其加筋工作机理进行了研究，并与土工格室加筋路堤和素土路堤性能进行对比分析。

在加筋地基承载力分析研究方面，J O Avesani Neto 等^[11]根据格室加筋层对附加应力的扩散作用和格室侧壁的侧限作用提出了土工格室加筋地基承载力的新方法。王协群等^[12]在美国R K Koerner^[13]所推导的土工格室加筋地基承载力计算公式上进一步改进，推导出较为精确的承载力计算公式。本文在素土和土工格室加筋地基承载力计算方法的基础上，在理论上对废旧轮胎加筋地基承载力计算公式进行了推导。

1 试验仪器、材料和试验方法

1.1 试验仪器

试验设备有武汉毅能锻压机械有限责任公司生产的压力机、江苏东华测试技术股份有限公司生产的DH3816 静态应变仪、江苏海岩工程材料仪器有限公司生产的型号为XTR-2030 的微型应变式土压力计、自行研制的模型箱、测试位移的钢珠、游标卡尺和数据采集系统。模型箱的尺寸为长200 cm×宽80 cm×

高76 cm，模型箱的正侧面由钢化玻璃组成，如图1所示，以便观察路堤的变形及钢珠的位移。因路堤模型具有对称性，故土压力计和钢珠只需埋设在试验模型左半部分。钢珠（图2中黑点）紧贴钢化玻璃埋置，相互之间的间距均为15 cm，其分布如图2所示。在与钢化玻璃平行的路堤模型中间剖面处，且与B1、B3、C1、C3、D1、D3 对应的水平位置埋置土压力计。由于模型的对称性，分析过程中，相关附加应力图和位移图直接根据对称性作出。试验模型箱和路堤边坡模型分别如图1、2所示。



图1 试验模型箱

Fig. 1 Model tank

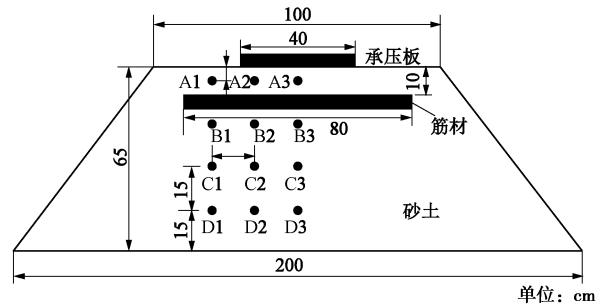


图2 路堤边坡模型图

Fig. 2 Model of embankment slope

1.2 试验材料

本试验材料包括武汉地区的砂土、土工格室和电动车的整幅废旧轮胎，其中废旧轮胎相互连接成网状。砂土颗粒级配曲线、土工格室、废旧轮胎分别如图3~5所示，砂土参数：最大干密度=1.89 g/cm³，最小干密度=1.65 g/cm³，含水率=6%，土的比重=2.67，不均匀系数 $C_u=5.4$ ，曲率系数 $C_c=1.4$ ，最大孔隙比=0.62，最小孔隙比=0.41。废旧轮胎参数：轮胎外直径=40 cm，胎面厚度=1 cm，胎边厚度=0.6 cm，弹性模量=2.0×10⁵ kPa，泊松比=0.33，胎面宽度=5 cm，胎边宽度=4 cm，抗拉强度=20 MPa。土工格室的参数：型号为TGGS-50-400 格室长度=12.5 m，格室宽度=4 m，格室边长=400 mm，格室片厚度=1 mm，格室高度=50 mm，格室片抗拉强度=24 MPa，焊点强度=100 N/cm。

1.3 试验方法

本试验中的路堤边坡模型横断面为等腰梯形，尺寸为上底100 cm×下底200 cm×高65 cm。分层压实试样，并保持每层填料的相对密度相同，每组试验的

表1 试验方案表

Table 1 Test schemes of tests

工况编号	筋材种类	相对密实度	筋材埋置深度/cm	筋材层数	筋材长度/cm
A1	素土	0.45	—	—	80
A2	废旧轮胎	0.45	10	1	80
A3	土工格室	0.45	10	1	80
B1	素土	0.11	—	—	80
B2	废旧轮胎	0.11	10	1	80
B3	土工格室	0.11	10	1	80

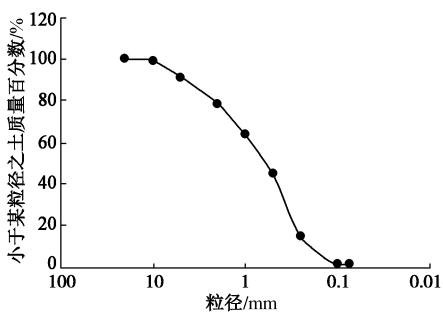


图3 砂土颗粒级配曲线

Fig. 3 Curve of particle size distribution



图4 土工格室

Fig. 4 Geocell



图5 废旧轮胎

Fig. 5 Waste tires

筋材种类和填料的相对密度如表1所示。施加静荷载采用应力控制方式, 分级加压荷载, 每0.5 MPa为一级, 通过承压板(长790 mm×宽400 mm×厚14 mm)将荷载传递给路堤边坡。当荷载达到某一级, 路堤边坡模型的沉降量迅速增大并出现明显裂纹时, 停止加载, 并及时采集相关数据, 试验结束。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

(1) 对承载力和沉降量的影响

素土和加筋路堤的 $p-s$ 曲线如图6所示, 通过对比分析可知: 施加荷载的前期, 6条 $p-s$ 曲线均几乎呈线性变化, 而在后期, 曲线明显变陡, 沉降量迅速增大, 特别是在低相对密度条件下尤为显著。说明随施加荷载的增大, 路堤边坡模型的变形由弹性变形逐渐过渡到塑性变形, 最后失稳破坏, 同时又是路堤刚度逐渐减小的一种表现。素土路堤 $p-s$ 曲线的拐点比加筋路堤较为明显, 由此可知, 素土路堤加筋后, 增大了路堤的塑性, 使路堤由原来的冲切、局部剪切破坏变为整体剪切破坏。

定义: 承载力比率=加筋路堤承载力/素土路堤承载力, 用数学式表示: $BCR=Q_R/Q_U$, Q_R 为加筋路堤承载力, Q_U 为素土路堤承载力。

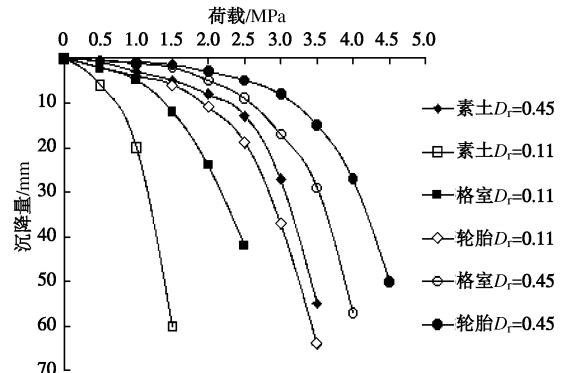
图6 不同工况下加筋路堤与素土路堤的 $p-s$ 曲线

Fig. 6 Pressure-settlement curves of reinforced and unreinforced embankments under different conditions

分别以 $s=0.03B$ ($s=12$ mm) 和 $s=0.05B$ ($s=20$ mm) (B 为承压板宽度) 对应的荷载代表 $D_r=0.11$ 的素土、加筋路堤承载力, 对于 $D_r=0.45$ 的路堤, 则分别以 $s=0.06B$ ($s=24$ mm)、 $s=0.075B$ ($s=30$ mm) 对应的荷载代表素土、加筋路堤承载力。在两种不同相对密度条件下, 废旧轮胎和土工格室加筋路堤的承载力及其比率如表2所示。由表2可知, 在同一相对密度条件下, 废旧轮胎和土工格室两种加筋路堤的承载力明显大于素土路堤承载力。在两种不同相对密度条件下, 均是废旧轮胎加筋路堤的承载力最大, 土工格室次之, 与素土路堤承载力相比, $D_r=0.11$ 时分别提高了271%,

表2 路堤的承载力及其比率表

Table 2 Bearing capacity and bearing capacity ratio of embankments

类型	承载力/MPa ($D_r=0.11$)	承载力比率($D_r=0.11$)	承载力/MPa ($D_r=0.45$)	承载力比率($D_r=0.45$)
素土路堤	0.7	1.0	2.8	1.0
废旧轮胎加筋路堤	2.6	3.7	4.1	1.5
土工格室加筋路堤	1.8	2.6	3.5	1.3

表3 路堤的沉降量及其减少率

Table 3 Settlement reducing ratio of embankments

类型	$(D_r=0.45)$ 沉降量/mm		$(D_r=0.11)$ 沉降量/mm		$(D_r=0.45)$ 减少率/%		$(D_r=0.11)$ 减少率/%	
	2.5 MPa	3 MPa	1 MPa	1.5 MPa	2.5 MPa	3 MPa	1 MPa	1.5 MPa
素土路堤	13	27	20	60	0	0	0	0
废旧轮胎加筋路堤	5	8	4	6	62	70	80	90
土工格室加筋路堤	9	17	5	12	31	37	75	80

157%，当 $D_r=0.45$ 时则分别提高了 46%，25%。此外，由图 6 可知，在同一相对密度且同级荷载作用下，废旧轮胎加筋路堤沉降量最小，土工格室次之，素土路堤沉降量最大。

由表 2 还可知，加筋路堤的承载力随相对密度增加而增大，但其承载力比率却随相对密度增加而减小；废旧轮胎加筋路堤的承载力及其比率均大于土工格室加筋路堤。由此可知，在相对密度较小条件下，废旧轮胎和土工格室加筋后对路堤承载力和沉降量的改善效果更显著。

定义：沉降量减少率 = (素土路堤沉降量 - 加筋路堤沉降量) / 素土路堤沉降量。用数学式表示：SRR = $(S_u - S_r) / S_u$ 。式中， S_r 为加筋路堤沉降量， S_u 为素土路堤沉降量。

当 $D_r=0.11$ 时，用荷载为 1.0, 1.5 MPa 时的路堤沉降量作为对比。当 $D_r=0.45$ 时，因荷载为 1, 1.5 MPa 时的路堤沉降量较小，不易显示出加筋路堤减少沉降量的作用，故选用荷载为 2.5, 3 MPa 时的沉降量作为对比。

素土与两种加筋路堤沉降量及其减少率如表 6 所示。由表 3 可知，在两种不同相对密度下，加筋路堤沉降量及其减少率均随着荷载的增大而增大；废旧轮胎加筋路堤沉降量减少率明显大于土工格室路堤沉降量减少率。由此可知，加筋路堤在较大荷载作用时，能更有效地显示出减少沉降量的作用。

同时还可知在高相对密度下且在高荷载作用时的路堤沉降量减少率小于在低相对密度下有低荷载作用的沉降量减少率。在同级荷载作用时，低相对密度下的沉降量减少率远大于在高相对密度下的沉降量减少率。说明轮胎和土工格室加筋路堤都是在低相对密度下更能显示出减少沉降量的作用。

(2) 对附加应力的影响

相对于素土路堤，加筋路堤内部附加应力的分布

也有了很大变化，以 1.5 MPa 荷载作用时路堤内部 B_1 , B_3 两点的附加应力分布为例。由图 7 可知，几种路堤内部附加应力的分布均成抛物线形状，但加筋路堤内部附加应力分布比较均匀，其中废旧轮胎加筋路堤的附加应力分布最为均匀。这是因为加筋路堤中的加筋结构层使得附加应力的扩散角增大，荷载向路堤内部传递附加应力的过程中，附加应力的分布范围扩大，从而使路堤内部的附加应力分布比较均匀。

对比两种相对密度下素土与加筋路堤内部的附加应力分布可知，相对于高相对密度而言，在低相对密度条件下，加筋路堤的附加应力峰值强度减小的幅度更大，说明加筋路堤在低相对密度下更能有效地降低路堤中轴线上的附加应力。对比同一种路堤在不同相对密度下的附加应力分布曲线可知，在高相对密度下的曲线比在低相对密度下的曲线均匀，说明在高相对密度下更有利附加应力的扩散，这也是增大相对密度可以提高路堤承载力的重要原因之一。

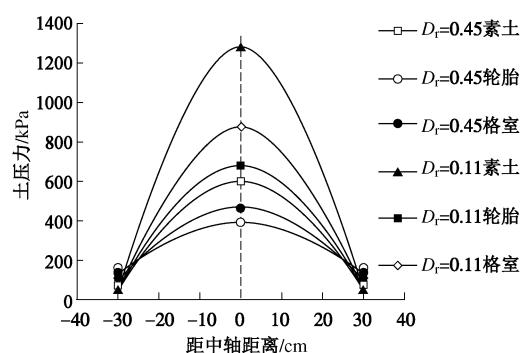


图 7 距离路堤表 20 cm 附加应力随位置变化

Fig. 7 Variation of additional stress 20 cm below embankment surface

相对于素土路堤，加筋路堤内部附加应力不仅在水平方向的分布有了很大变化，而且在竖向的分布也有了明显变化。以 1.5 MPa 荷载作用时路堤中轴线上

B_3 , C_3 , D_3 三点的附加应力分布为例。由图8可知,无论是素土路堤还是加筋路堤的附加应力均是随着路堤深度的增加逐渐减小,并且加筋路堤与素土路堤的附加应力差值也是随着路堤深度的增加而减小,尤其是在低相对密度下更为明显。由此试验现象可知,筋材对附加应力的扩散作用主要集中在筋材附近,对于远离筋材的区域,所起到的扩散作用较小。

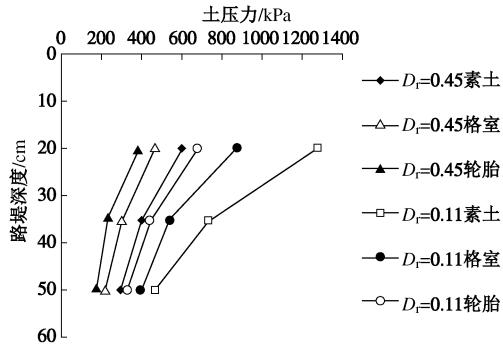


图8 附加应力随路堤深度的变化

Fig. 8 Variation of additional stress with depth of embankment

(3) 对位移的影响

加筋路堤中由于筋材的存在,对路堤内部质点的位移也产生了很大的影响。对于相对密度分别为0.45, 0.11的路堤, 分别以3.0, 1.5 MPa荷载作用时 B_1 , B_2 , B_3 三点竖向位移为例。由图9可知,与素土路堤相比,加筋路堤的竖向位移明显减小且分布比较均匀;废旧轮胎加筋路堤比土工格室加筋路堤能更有效地减小路堤不均匀沉降。

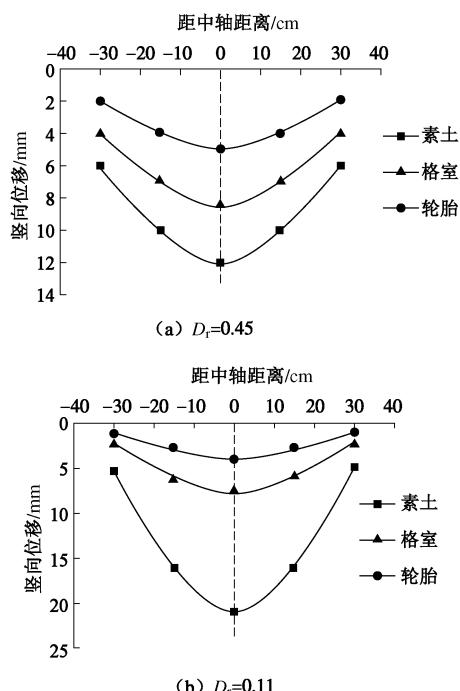


图9 距离路堤表20 cm 竖向位移随位置变化

Fig. 9 Variation of vertical displacements 20 cm below embankment surface

试验结果显示路堤中轴线上的质点侧位移为零,对于中轴线外的质点侧位移以 A_1 , B_1 , C_1 , D_1 四点侧向位移为例,侧向位移图如图10所示。由图10可知,加筋路堤、素土路堤的质点侧向位移与所埋深度的关系表现一致,均是随所埋深度的增大呈现出先增大后减小的关系,但加筋路堤比素土路堤质点侧向位移明显减小。几种路堤中,废旧轮胎加筋路堤的侧向位移最小。

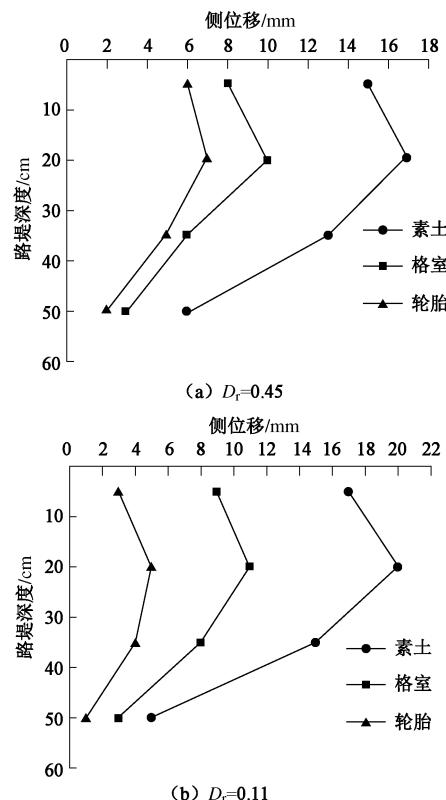


图10 侧向位移随路堤深度分的变化

Fig. 10 Variation of lateral displacements with depth of embankment

2.2 加筋机理及稳定性分析

通过以上试验结果对比分析可知,加筋路堤的性能明显优越于素土路堤。加筋路堤的性能与加筋材料特性有着密切关系,无论是废旧轮胎还是土工格室所形成的加筋路堤刚度均显著大于素土路堤刚度,增加了路堤抵抗变形的能力,这是加筋路堤能够提高承载力、增强稳定性、降低沉降量的重要原因之一。此外,加筋路堤在受到荷载作用时,相互连接起来的网状废旧轮胎和土工格室能够产生网兜作用,使附加应力分布更为均匀、广泛,有效地提高了路堤的承载力和减少了不均匀沉降,同时也增强了路堤的稳定性。网兜作用的产生可以通过观察加筋路堤变形特征得以验证。加筋路堤在受压过程中,透过钢化玻璃可以观察到筋材中间部位的沉降量大于两端,呈现出网兜形状,如图11所示。

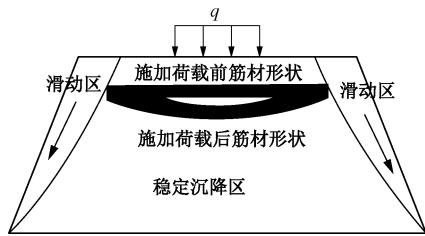


图 11 加筋路堤破坏图

Fig. 11 Failure of reinforced soil embankment

对比素土与加筋路堤的破坏图可知, 素土路堤破坏时裂纹从承压板两边侧沿远离路堤中轴线的斜下方发展, 两条裂纹成“八”字形, 如图 12 所示。虽然加筋路堤破坏时的裂纹形状与素土路堤破坏时的裂纹形状相似, 但加筋路堤破坏时裂纹几乎从筋材两端沿远离路堤中轴线的斜下方向发展, 且形成的“八”字形区域远大于素土路堤破坏时的“八”字形区域, 如图 11 所示。主要因为路堤加筋后, 增大了筋材附近区域的抗剪强度, 迫使破坏裂纹向强度较小的未加筋区域发展, 增大了路堤稳定沉降区, 减小了滑动区, 从而达到增强稳定性的目的。

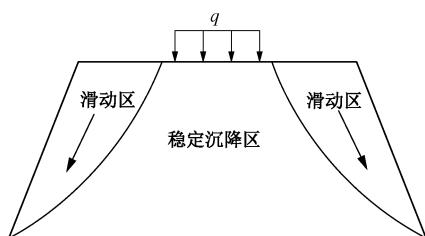


图 12 素土路堤破坏图

Fig. 12 Failure of unreinforced soil embankment

试验结果表明, 加筋路堤沉降量减少率随着荷载的增大而增大, 这是因为在较小荷载作用时, 路堤自身所具有的刚度足以抵抗外界荷载所引起的变形, 此时加筋路堤中的筋材几乎发挥不出加筋作用。而在较大荷载作用时, 外部荷载能使路堤产生较大的变形, 甚至失稳破坏, 这时加筋路堤中的筋材展现出较大的加筋作用, 限制路堤的侧向变形, 从而达到减少沉降量的效果。

虽然废旧轮胎和土工格室两种不同筋材的加筋原理相似, 但在起到加筋作用时, 还是有一定的差别。废旧轮胎比土工格室多出两个胎边, 且轮胎胎面比土工格室侧壁表面粗糙, 这种外形的差别导致了两种筋材的加筋效果不同。土工格室主要是通过格室侧壁对土体的侧向约束力和侧壁与土体的竖向摩擦力起到加筋作用。而废旧轮胎除了这两种作用力外, 轮胎胎边不仅能够通过与土体的水平摩擦力限制土体的侧向变形, 还可以起到一定程度的筏板作用, 扩散了附加应力。此外, 轮胎胎面的花纹与土体之间的咬合力增大了加筋路堤的整体性, 也有助于提高路堤的承载力和

增强其稳定性。

由以上试验结果得知, 相对密度对加筋效果有明显的影响。承载力比率随相对密度增大而减小, 并且在低相对密度下, 筋材对附加应力的扩散作用表现的更为明显, 说明筋材在低相对密度条件下更能发挥出加筋作用。这是因为在低相对密度条件下路堤抵抗破坏、变形的能力都较低, 需要筋材及时发挥其加筋作用, 以弥补路堤强度低、刚度小、稳定性差的缺陷。特别是在施加荷载的后期, 路堤因产生较大的变形而几乎失稳, 此时路堤依靠筋材强大的侧限作用约束其变形以抵抗外界荷载, 此时筋材的加筋作用发挥到了极限, 从而显示出较好的加筋效果。而在高相对密度下路堤抵抗破坏、变形的能力都较高, 即使在较大荷载作用时, 路堤还有一定的抵抗力, 此时筋材不能充分发挥其极限, 致使在高相对密度条件下, 筋材的加筋效果不如在低相对密度条件下显著。

3 地基承载力理论分析

由上述试验可知, 土工格室和相互连接的网状整幅轮胎也可以提高路堤所在的地基承载力。因路堤所在的地基与条形地基相似, 均属于平面应变问题, 所以, 路堤所在地基承载力计算方法可以用条形地基承载力计算方法代替。废旧轮胎与土工格室结构相似, 利用纯理论分析, 在土工格室加筋地基承载力计算公式的基础上对废旧轮胎加筋地基承载力计算公式进行理论推导。

3.1 素土、格室加筋地基承载力

文献[13]中的 Koerner 根据 Terzaghi^[14]理论提出了土工格室加筋地基承载力的计算, 认为土工格室的侧限约束作用使得地基破坏面向下延伸, 扩大了滑动区域的范围, 素土地基和土工格室加筋地基的破坏形式如图 13, 14 所示, 承载力计算公式分别为式(1)、(2)。文献[14]中的王协群又在 Koerner 所推导的土工格室地基承载力计算公式上进一步改进, 最终推导出的土工格室地基承载力计算公式为式(3)所示。

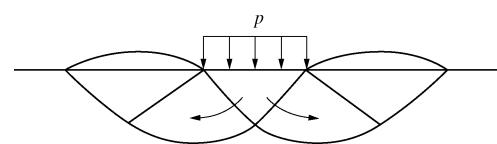


图 13 素土地基破坏

Fig. 13 Failure of unreinforced soil foundation

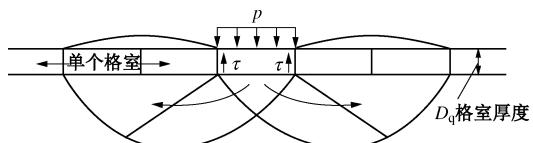


图 14 土工格室加筋地基破坏

Fig. 14 Failure of geocell-reinforced foundation

素土地基承载力计算公式为

$$p_u = cN_c\zeta_c + 0.5\gamma bN_\gamma\zeta_\gamma \quad . \quad (1)$$

土工格室加筋地基承载力计算公式为

$$p_u = 2\tau + cN_c\zeta_c + qN_q\zeta_q + 0.5\gamma bN_\gamma\zeta_\gamma \quad , \quad (2)$$

$$p_u = 2D_q\tau/r + cN_c\zeta_c + qN_q\zeta_q + 0.5\gamma bN_\gamma\zeta_\gamma \quad . \quad (3)$$

式中 p_u 为地基极限承载力; c 为黏聚力; q 为旁侧荷载 ($q=\gamma_q D_q$); γ_q 为土工格室内土的重度; D_q 为土工格室的厚度; r 为土工格室铺设充砂后呈圆形, 圆环的半径; γ 为破坏区土的重度; b 为基础宽度; τ 为土工格室侧壁与其间土的抗剪强度 (对粗粒土有 $\tau=\sigma_h \cdot \tan \varphi_{sg}$); σ_h 为土工格室内土的平均水平应力 ($\sigma_h=p_u K_a$); K_a 为主动土压力系数; N_c , N_q , N_γ 为承载力系数 (与内摩擦角有关); ζ_c , ζ_q , ζ_γ 为考虑基础为条形基础假设的误差, 基础底面形状修正系数, 建议采用魏锡克 (Vesic) 地基极限承载力公式中给出的基础形状因素计算公式; φ_{sg} 为土与土工格室侧壁的摩擦角。

令式 (3) ~ (1) 得:

$$\Delta p_u = 2D_q\tau/r + qN_q\zeta_q \quad , \quad (4)$$

式中, $2D_q\tau/r$ 为土与土工格室侧壁摩擦所增加的承载力, $qN_q\zeta_q$ 为土工格室的侧限作用所增加的承载力。

3.2 废旧轮胎加筋地基承载力

把相互连接成网状整幅废旧轮胎加筋地基的受力区域分割成多个相等的单元区域, 每个单元区域的荷载分布及单元区域内轮胎内外侧竖向摩擦力如图 15 所示。由于胎边比半径小的多, 其扩散作用不显著, 所以推导其承载力计算公式时只考虑胎边的摩擦阻力, 忽略其扩散作用。根据以上分析可知, 废旧轮胎加筋地基承载力计算公式主要包括以下 3 部分, 推导过程如下。

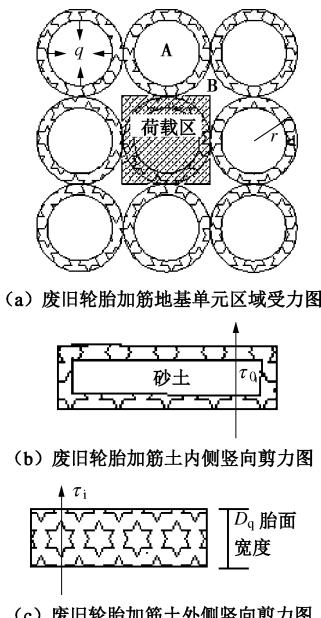


图 15 废旧轮胎加筋地基受力分析图

Fig. 15 Stress analysis of waste tires-reinforced foundation

(1) 废旧轮胎的上下两个胎边与土体相互摩擦对

土体侧向变形的约束作用 (切应力为 τ) 可以等效为增加的围压 $\Delta\sigma_3$ 。胎边两侧与土体的摩擦力为 $2p_u\pi[r^2-(r-d)^2]=\tan\delta$, 荷载覆盖的滑动区圆柱表面积为 $2\pi r D_u$, 所以增加的围压 $\Delta\sigma_3=2p_u\pi[r^2-(r-d)^2]=\tan\delta/(rD_u)$ 。荷载所覆盖的区域在地基破坏时为主动滑动区, 根据土的极限平衡理论可得所增加的承载力 Δp_{u1} (即 $\Delta\sigma_1$) 为

$$\Delta p_{u1} = p_u\pi[r^2-(r-d)^2] = \tan\delta \tan^2(45^\circ + \varphi/2)/(rD_u) \quad . \quad (5)$$

(2) 根据式 (4) 推导出废旧轮胎的侧限作用所增加的承载力为

$$\Delta p_{u1} = qN_q\zeta_q \quad . \quad (6)$$

(3) 废旧轮胎内外部空隙处填满填料并压实后, 所形成的轮胎-砂土加筋结构中, 区域 A 即轮胎内侧的竖向剪应力由砂土与砂土之间的摩擦形成 (切应力为 τ_0 , 图 15 (b) 所示), 废旧轮胎的胎边厚度与整个胎面宽度相比忽略不计。而区域 B 即轮胎外侧的竖向剪应力由砂土与胎面竖向相互摩擦形成 (切应力为 τ_1 , 图 15 (c) 所示)。

根据竖向静力平衡有:

$$\Delta p_{u3}(2r)^2 = 2\pi(r-d)D_q\tau_0 + 2\pi r D_q\tau_1 \quad . \quad (7)$$

轮胎-砂土加筋结构因与土体竖向摩擦作用所增加的承载力为

$$\Delta p_{u3} = \pi(r-d)D_q\tau_0 + \pi r D_q\tau_1/(2r^2) \quad , \quad (8)$$

综上所述: $\Delta p_u = \Delta p_{u1} + \Delta p_{u2} + \Delta p_{u3} \quad , \quad (9)$

废旧轮胎加筋地基承载力计算公式为

$$p_u = cN_c\zeta_c + 0.5\gamma_b N_r \zeta_r + \Delta p_u \quad . \quad (10)$$

式中 p_u 为地基极限承载力; δ 为土与废旧轮胎胎边的摩擦角; φ 为加筋土的摩擦角; r 为轮胎半径; d 为轮胎胎边宽度; D_q 为轮胎胎面宽度; $\tau_0 = \sigma_h \cdot \tan \varphi_0$, $\tau_1 = \sigma_h \cdot \tan \varphi_{sg}$, σ_h 为轮胎内外侧土的平均水平应力 ($\sigma_h=p_u K_a$), φ_0 为土的摩擦角, φ_{sg} 为土与废旧轮胎胎面的摩擦角; D_u 为滑动面最大深度^[15]; 其他参数所代表的意义与式 (1) ~ (3) 中的相同。

根据以上分析, 废旧轮胎加筋地基破坏形式可以由图 16 表示。

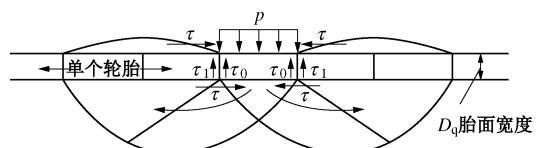


图 16 废旧轮胎加筋地基破坏

Fig. 16 Failure of waste tires-reinforced foundation

上述公式是从纯理论的角度分析得出, 推导出的废旧轮胎加筋地基承载力计算公式根据土工格室加筋地基承载力计算公式演化而来, 主要适用于筋材长度大于地基滑动区水平长度的情况。

4 结 论

(1) 本试验表明, 相对于素土路堤, 废旧轮胎和土工格室加筋路堤的承载力均显著增加, 废旧轮胎加筋路堤的承载力最大, 土工格室次之, 并且废旧轮胎加筋比土工格室加筋能更有效地减少路堤不均匀沉降。

(2) 废旧轮胎和土工格室加筋均有效地增大了附加应力的扩散角, 使得附加应力的分布更为均匀, 并且素土路堤与加筋路堤中轴线上的附加应力差值随路堤深度增大而减小, 上述特征废旧轮胎加筋路堤最为明显, 轮胎和土工格室对附加应力的扩散作用主要集中在筋材附近区域, 对远离筋材的区域影响比较小。

(3) 除路堤中轴线上的质点侧向位移为零外, 中轴线以外的质点侧向位移随着路堤深度的增加, 呈现出先增大后减小的趋势, 几种路堤中, 废旧轮胎加筋路堤的侧向位移最小。

(4) 相对密度是影响加筋效果的一个重要因素, 加筋路堤的承载力随着相对密度的增加而增大, 但加筋效果却随着相对密度增加而减小, 在低相对密度条件下, 加筋后的承载力能达到素土路堤 2 倍以上, 而在高相对密度下却不足 2 倍。

(5) 从理论角度所推导出的网状整幅废旧轮胎加筋地基承载力计算公式由土工格室加筋地基承载力公式演化而来, 该公式主要包括 3 个部分, 主要适用于筋材长度大于滑动区水平长度的情况。

参 考 文 献:

- [1] 王 刹. 土工合成材料[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. (WANG Zhao. Geosynthetic materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 孙 州, 张猛喜, 姜卫圣. 条形荷载下土工格室加筋砂土路堤模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 170 - 175. (SUN Zhou, ZHANG Meng-xi, JIANG Sheng-wei. Model tests on sand embankment reinforced with geocell subjected to strip loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 170 - 175. (in Chinese))
- [3] ALAMSHAH Saeed, HATAL Nader. Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and grid-anchor[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2009(27): 217 - 226.
- [4] 王志斌, 李 亮, 邹金锋, 等. 斜坡地基上加筋路堤工作性状及稳定性研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2189 - 2192. (WANG Zhi-bin, LI Liang, ZHOU Jin-feng, et al. Study on performance of reinforced embankment on mountain slope with full-scale model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(8): 2189 - 2192. (in Chinese))
- [5] 王一鸣, 张孟喜, 邱成春, 等. 交通荷载下 H-V 加筋路堤效果的数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(9): 1459 - 1463. (WANG Yi-ming, ZHANG Meng-xi, QIU Cheng-chun, et al. Numerical analysis of embankment reinforced with H-V reinforcement under traffic loading[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(9): 1459 - 1463. (in Chinese))
- [6] LI Li-hua, TANG Hui-ming, XIAO Ben-lin. Discarded tire implications in reinforced slope[C]// 4th International Conferenceon Technology of Architectureand Structure. 2011: 1430 - 1433.
- [7] YOON Yeo Won, CHEON Sung Han, KANG Dae Seong. Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands[J]. Geotextile and Geomembranes, 2014, 22: 439 - 453.
- [8] YOON Yeo Won, HEO Seung Beom, KIM Keun Soo. Geotechnical performance of waste tires for soil reinforcement from chamber tests[J]. Geotextile and Geomembranes, 2008, 26: 100 - 107.
- [9] MOGHADDAS TAFRESHI S N, NOROUZI A H. Bearing capacity of a square model footing on sand reinforced with shredded tire-An experimental investigation[J]. Construction and Building Materials, 2012(35): 547 - 556.
- [10] EDINCLILER A Cagatay. Weak subgrade improvement with rubber fibre inclusions[J]. Geosynthetics International, 2013, 20(1): 39 - 46.
- [11] AVESANI NETO J O, BUENO B S, FUTAI M M. A bearing capacity calculation method for soil reinforced with a geocell[J]. Geosynthetics International, 2013, 20(3): 129 - 142.
- [12] 王协群, 王 陶, 王 刹. 土工格室加筋地基的承载力[J]. 长江江科学院院报, 2004, 21(2): 60 - 62. (WANG Xie-qun, WAO Tao, WANG Zhao. Bearing capacity of foundation reinforced With geocell[J]. Journal of Yangtze River Science Research Institute, 2004, 21(2): 60 - 62. (in Chinese))
- [13] KOERNER R M. Designing with geosynthetics[M]. 4th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [14] 东南大学. 土力学[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. (Southeast University. Soil mechanics[M]. 2th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese))
- [15] 王 刹, 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. (in Chinese))