

废旧轮胎格栅加筋风化砂路堤承载特性研究

金龙¹ 李声虎¹ 刘亚珍² 刘志鲲² 刘清源¹ 张宏博²

(1. 葛洲坝集团交通投资有限公司, 湖北武汉 430074; 2. 山东大学齐鲁交通学院, 山东济南 250002)

【摘要】 废旧轮胎具有高摩阻、高强度特性, 对于加筋细粒土、风化料、软岩等路基具有良好的应用前景。为揭示竖向荷载作用下废旧轮胎格栅加筋路基承载特性并建立承载力计算方法, 设计开展了加筋路堤室内加载试验, 研究了不同加筋层数下废旧轮胎格栅加筋路堤承载特性及变形特性。试验结果表明: 废旧轮胎格栅可有效提高路堤结构的整体性, 减小其坡顶沉降与侧向位移, 有效提升路堤的极限承载能力, 最高可达 70%; 路堤内部应力沿深度方向逐渐衰减, 且上层格栅承担应力明显大于下层格栅; 对比格栅层数的影响, 可知加筋层数越多, 轮胎格栅的网垫效应越明显, 应力集中现象减弱。根据试验结果分析, 确定了废旧轮胎加筋风化料路基的极限承载力计算公式及参数。研究结果可为废旧轮胎格栅工程应用提供理论支撑。

【关键词】 废旧轮胎格栅; 路堤结构; 承载特性; 计算方法

【中图分类号】 TU43; U416.1

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0149

Bearing characteristics of reinforced weathered material embankment with waste tyre grating

JIN Long¹ LI Shenghu¹ LIU Yazhen² LIU Zhikun² LIU Qingyuan¹ ZHANG Hongbo²

(1. GEZHOUBA Group Transportation Investment Co., Ltd., Wuhan 430074, Hubei, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, Shandong, China)

【Abstract】 Waste tyres have high friction resistance and high strength characteristics, and have good application prospects for reinforced fine-grained soil, weathered material, soft rock and other embankments. To reveal the bearing characteristics of reinforced embankment with waste tyre grating under vertical load and establish the calculation method of bearing capacity, we designed and carried out the indoor loading test of reinforced embankment, and studied the bearing characteristics and deformation characteristics of reinforced embankment with waste tyre grating under different number of reinforcing layers, and the results show that: scrap tyre grating can effectively improve the structural integrity of the embankment, and reduce the settlement and lateral displacement of the top of the slope and effectively enhance the ultimate bearing capacity of the embankment, up to 70%; embankment internal stress along the depth of the direction of gradual attenuation, and the upper layer of grating to bear the stress is obviously greater than the lower layer of grating; compared with the impact of the number of layers of grating, it can be seen that the more the number of reinforcing layers, the more obvious the effect of the tyre grating mesh pads, the phenomenon of stress concentration weakened. According to the analysis of the test results, the ultimate bearing capacity calculation formula and parameters of the waste tyre grating reinforced weathering material roadbed are determined, and the study results can provide theoretical support for the application of waste tyre grating engineering.

【Key words】 waste tyre grating; embankment structure; bearing characteristics; calculation method

0 引言

随着我国交通基础设施建设的高速发展, 丘陵山区路网密度日益增大, 高陡路基工程越来越多, 由此引起的路堤横纵向不均匀沉降、路面开裂、路堤滑塌等现象屡见不鲜, 严重影响生命财产安全。为提高路堤的整体稳定性, 各种支挡结构、复合地基及土工加筋等技术在工程中均得到了普遍应用, 取得了良好

的应用效果^[1]。Yoosuk 等^[2]将绿色塑料材质作为加筋材料置于土体内部, 研究其承载能力提升情况, 取得良好效果, Bhattacharya^[3]在地基内部设置锚杆, 研究其抗拉特性。

相比较, 土工加筋技术由于具有经济性好、施工便捷、质量可靠等技术特点, 在工程中取得了良好的应用效果^[4-6]。然而, 当土工加筋用于土石混填路基、

作者简介: 金龙, 男, 1988 年生, 大学本科, 工程师, 主要从事高速公路建设研究。E-mail: 250176073@qq.com

通信作者: 刘亚珍, 女, 1998 年生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事路堤加固技术研究。E-mail: liuyazhen@sdu.edu.cn

风化料路基等不规则硬质填料时,施工碾压极易造成格栅损伤,严重影响加筋效果。黄 博等^[7]通过现场试验研究了施工损伤工况下双向经编土工格栅强度折减的影响因素。胡汉兵等^[8]通过现场足尺试验研究了保护层设置对单向土工格栅强度损伤的影响。Jeon 等^[9]通过对 5 种不同类型土工格栅的长期性能开展研究,发现经编土工格栅受施工损伤强度折减最为严重,塑料土工格栅强度折减最少。因此,对于此类工程建设条件,有必要研发一种新的加筋材料。

已有研究表明,废旧轮胎具有高弹性、高摩阻、难降解等技术特性,可被加工成为格栅材料而替代土工格栅,并取得了良好的应用效果。李晓亮等^[10]针对废旧轮胎格栅拉拔特性开展试验研究,研究成果验证了废旧轮胎条带作为加筋材料的可行性,为进一步开展理论研究及工程应用奠定了基础;郭宇康等^[11]通过开展模型试验,研究整胎加筋路基承载变形特性,研究发现轮胎加筋层有利于附加应力的扩散,并且随着荷载增大,轮胎加筋层扩散应力的作用逐渐增强;Alamshahi 等^[12]对格栅和格锚加筋的边坡进行承载力试验,结果表明格栅加筋可有效提升边坡承载能力,且格锚加筋技术可提升格栅拉拔性能且降低边坡沉降。然而,废旧轮胎格栅加筋路基将承受交通荷载的作用,有关其承载特性值得关注,目前针对该方面的研究较少,应提出更为适用的承载力计算方法。

因此,为揭示废旧轮胎格栅加筋路基竖向承载特性,构建承载力计算方法,本研究设计开展了室内缩尺模拟试验,考虑不同加筋层数及竖向加载水平,埋设土压力传感器、位移计等监测元件,研究了废旧轮胎格栅加筋路堤极限承载力、土压力分布规律,并在此基础上建立了加筋路堤极限承载力计算方法。研究结果可为废旧轮胎格栅工程应用提供理论基础。

1 废旧轮胎格栅加筋路堤模型试验方案

1.1 试验材料

1.1.1 填料

为满足试验要求回填料选用风化砂,参照《公路土工试验规程》(JTJ 3430—2020)^[13]试验过程对所填填料烘干后进行筛分试验,填料的颗粒级配曲线见图 1,填料最小干密度为 1.52 g/cm^3 ,最大干密度为 1.81 g/cm^3 ,土粒比重为 2.65,相对密实度为 0.7,不均匀系数为 6.6,曲率系数为 0.73,内摩擦角为 38.19° ,压缩模量 7.55 MPa ,属于级配不良粗砂。

1.1.2 废旧轮胎格栅

(1)条带拉伸特性

根据市场调研结果,选取 175/70R14 型号轮胎,

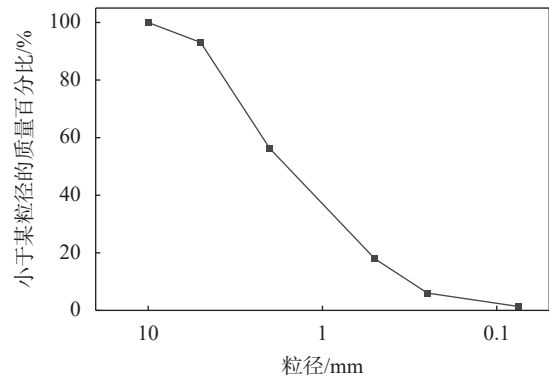


图 1 风化砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curve of weathered sand

分离轮胎胎壁与胎面得到完整胎面,胎面纵向断开得到轮胎条带。为测试轮胎条带的拉伸性能,选取 5 条长度为 60 cm,宽度为 8 cm,厚度为 1.5 cm 的条带,进行拉伸试验,条带的拉伸力-应变数据见表 1。

表 1 轮胎条带拉伸-应变值

Tab. 1 Tensile force-strain values of tire strips

应变/%	2	5	10	15	20
拉伸力/kN	2.5	5.3	10.9	16.7	21.5

(2)废旧轮胎格栅结构形式

为适应模型试验,选取横肋与纵向条带的宽度为 0.08 m,网孔净尺寸为 $0.22 \text{ m} \times 0.22 \text{ m}$,由上至下每层筋材的总长度为 0.8, 1.1, 1.4 m,各层轮胎格栅设置见图 2。

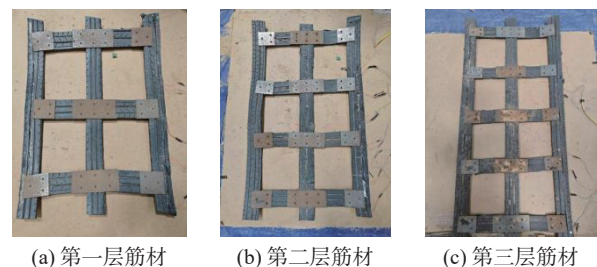


图 2 轮胎格栅尺寸图

Fig. 2 Dimension drawing of tire geogrid

1.2 试验模型设计

1.2.1 试验装置

为保证在受力过程中不发生侧向变形以满足加筋路堤的平面应变条件,试验箱选用侧壁具有足够刚度的矩形刚体,根据路堤几何相似比 $1:5$,换算得到试验模型槽尺寸为 200 cm (长) $\times$ 100 cm (宽) $\times$ 120 cm (高)。为便于观察土体变形,正面采用高强钢化玻璃,模型实物图见图 3。试验采用作动器对 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 的方形刚性承载板进行加载,最大竖向位移可

达 100 mm,最大轴向力 500 kN。



图3 模型实物图
Fig. 3 Physical diagram of the model

格栅制备过程中为避免格栅在拉拔和受荷过程中从节点处断裂,按照设定尺寸切割得到轮胎条带横肋与纵向条带,然后在横纵肋连接处附近预定位置做好标记并钻孔;最后,在横纵肋连接处上下各放置一层铁板,根据宽度不同,使用 3~6 个螺栓进行固定。

1.2.2 试验模型

基于平面应变及轴对称原理,为简化试验工作量,模型试验设计采用 1/2 路堤模型,几何相似比为 1:5。由此,设定路堤几何尺寸为:路堤高度为 80 cm、地基深度为 40 cm、路堤顶宽 80 cm,坡比 1:1.5。

路堤内设计 3 层废旧轮胎格栅,埋设位置距离路堤顶面分别为 20, 40, 60 cm,路堤模型尺寸及监测元件布置见图 4。

试验填料采用风化砂,控制相对密实度 $D_r=0.7$ 分层填筑风化砂。

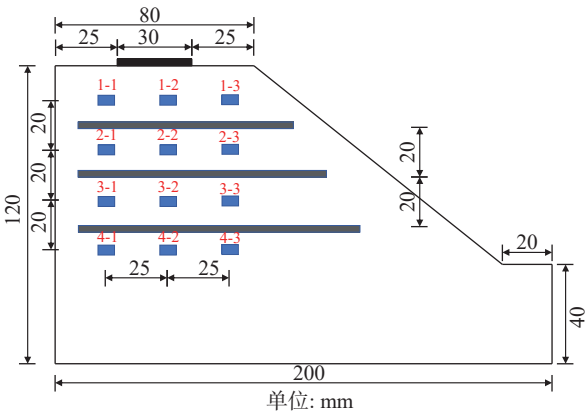


图4 路堤模型尺寸及监测元件布设设计图
Fig. 4 Design drawing of embankment model dimensions and monitoring component layout

1.2.3 试验监测方案

为监测堤顶竖向加载过程中路堤内部土压力及路基表面位移,设置土压力计及表面位移计,如图 5 所示。

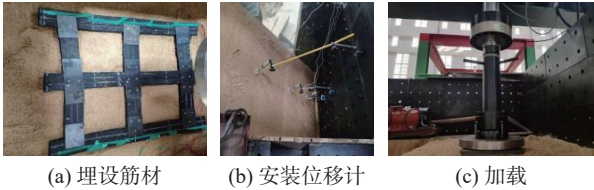


图5 试验过程
Fig. 5 Test process

(1)土压力计分 4 层布设,各层距路堤顶面距离分别为 10, 30, 50, 70 cm,每层布设 3 支,共计 12 支。土压力传感器量程为 0~1000 kPa,准确度误差为 $\leq 0.01 F \cdot S$ 。

(2)表面位移计布设于坡面,距离坡顶分别为 $1/4L$ 、 $1/2L$ 、 $3/4L$ (L 为坡面长度)。表面位移计量程为 0~50 mm。

1.2.4 试验工况

为确定废旧轮胎加筋格栅极限承载力及土压力变化规律,试验采用分级加载,分级数量为 8~12 级,静载条件下的试验工况如表 2 所示。

表2 静载条件下的试验工况
Tab. 2 Test conditions under static loading

加载方式	加载分级数量	每级荷载增量/kN	加筋层数	备注
路堤顶部竖向分级加载	8~12级	4.5	0	无加筋工况
			1	
			2	
			3	

1.2.5 试验流程

(1)试验准备:试验中路堤的相对密实度控制在 $D_r=0.7$,此时模型填料干密度为 1710 kg/m^3 ;加工制作废旧轮胎格栅筋材,测试验证监测元件正常工作。

(2)路堤填筑:模型分 6 层填筑,每层高度为 20 cm。计算每层填料质量,缓慢均匀倒入模型槽并压实至指定高度,并取样测试相对密实度。循环往复,填筑过程中在设定位置安装筋带和土压力传感器,如图 5(a)所示。

(3)安装位移测量装置:路堤填筑完成后,按照坡度要求进行削坡,并连接固定表面位移计,如图 5(b)所示。检查验证所有监测元件的连通性及数据可靠性。

(4)施加竖向荷载:①对模型表面整平处理以 5 N 的压力进行预加载(见图 5(c)),预加载结束后,将各通道数值清零,开始逐级施加荷载,记录数据;②根据《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015),每级荷载施加后,进行持续沉降观测,当坡顶沉降速率小

于 0.6 mm/30 min 时, 进行下一级荷载的加载; ③当荷载达到某一级时, 路堤沉降量迅速增大并出现坡面裂缝时, 停止加载, 进行荷载-位移曲线数据处理, 计算确定极限承载力。

2 试验结果与分析

2.1 路堤极限承载力变化

图 6 为不同加筋条件下路堤的竖向荷载-位移曲线。由图可知, 对任一加筋类型, 荷载-位移曲线均呈现出 3 种典型的变化阶段: ①线性增长阶段: 4 类路堤的线性增长阶段基本相同, 但加筋层数增多, 变形量减小; ②塑性变形阶段: 即随着荷载的增加, 累积变形量明显增大, 同时, 加筋层数增多, 该阶段对应荷载增量增大, 但同一荷载等级时的塑性变形量减小, 因此, 路堤极限承载能力明显提高; ③破坏阶段: 当达到极限值时, 均呈现出明显的位移增长趋势, 加筋路堤发生破坏。

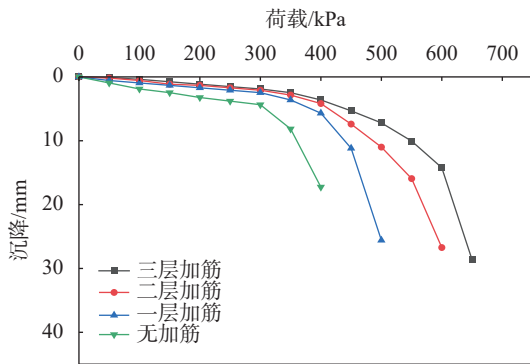


图 6 不同加筋层数对应路堤竖向荷载-沉降曲线

Fig. 6 Vertical load-settlement curves of embankment with different reinforcement layers

进一步将各加筋工况下路堤极限承载力汇总如表 3 所示。

表 3 各加筋工况下极限承载力与对应沉降值
Tab. 3 Ultimate bearing capacity and corresponding settlement value under various reinforcement conditions

加筋条件	极限承载力/kPa	承载力提高幅度/% (($P_t - P_0$)/ $P_0 \times 100\%$)	对应沉降/mm
无加筋 P_0	350	0	8.159
一层加筋 P_1	450	28.57	11.256
二层加筋 P_2	550	57.14	15.856
三层加筋 P_3	600	71.43	14.084

风化砂路堤承受承载板传递的附加应力后会在路堤内部产生剪应力, 使得风化砂颗粒产生向下和向外运动的趋势。对于无加筋情况, 由于没有筋带的阻隔效应, 随着荷载的增加, 将在承载板底部形成连续的破裂区, 如图 7(a)所示。而当设置废旧

轮胎格栅后, 如图 7(b)所示, 由于其具有较高的抗拉强度及界面承载效应, 从而产生了明显的筋带阻隔效应, 并将路堤上的竖向荷载转化为筋带附加侧向力, 改变了荷载作用方向, 降低了筋带下方土体的剪应力值, 从而降低了路堤的实际负荷, 有效地控制了滑裂面向深处发展, 显著提升其承载能力。

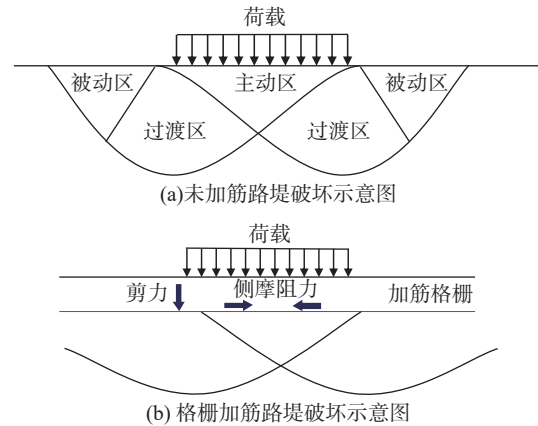


图 7 路堤破坏示意图

Fig. 7 Schematic diagram of embankment failure

2.2 路堤侧向位移变化

根据路堤坡面的表面位移传感器, 可测量得出坡顶、坡中和坡脚处的侧向累积变形, 如图 8 所示。

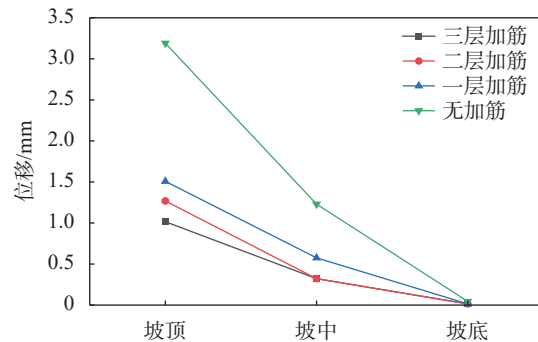


图 8 不同加筋层数下路堤侧向变形

Fig. 8 Lateral deformation of embankment under different reinforcement layers

由图 8 可知, 在坡顶和坡中位置, 加筋各工况在路堤破坏时的坡面水平位移均小于未加筋工况, 并且随着加筋层数的增加而减小。分析可知, 不同加筋层数的坡面累积变形相比于未加筋工况在坡顶处分别下降了 52.6%, 60.0%, 68.1%, 在坡中处分别下降了 53.8%, 74.9%, 72.6%。由此说明, 废旧轮胎格栅加筋可以有效减小路堤的侧向变形。这是由于轮胎格栅界面粗糙, 可有效提高界面摩阻力; 同时, 格栅横肋的存在将产生明显的端阻力, 限制了土颗粒的水平移动, 使坡顶和坡中位置处的土颗粒水平位移有效减小, 如图 9 所示。

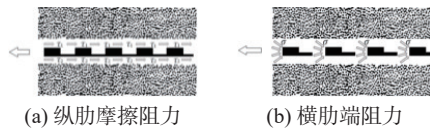


图9 废旧轮胎格栅-土体界面承载机理图
Fig. 9 Bearing mechanism diagram of waste tire geogrid-soil interface

2.3 加筋路堤内部土压力变化规律

2.3.1 路堤内部土压力与荷载等级的关系

图10为无加筋与单层加筋两类不同工况下路堤内部土压力与荷载等级的关系曲线。由图可知,无论有无加筋,随荷载等级的增加,路堤内部土压力均随之近似呈线性增加。进一步对比图10(a)、图10(b)可知,单层加筋条件下的土压力值略小于无加筋路堤土压力。初步分析认为,铺设加筋格栅会使筋-土之间由于界面摩擦及端阻效应而形成锚固效应,这使得轮胎格栅发挥网兜效应(见图11)。

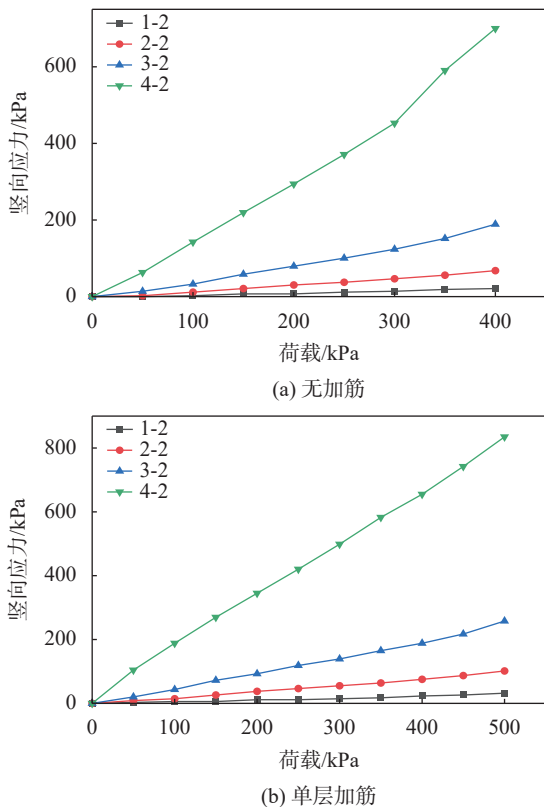


图10 路堤内部土压力与荷载等级的关系
Fig. 10 Relationship between internal earth pressure of embankment and load level

2.3.2 路堤内部土压力沿深度分布规律

为了分析设置筋带后埋深的影响,以单层加筋及无加筋条件下土压力数据为例,进一步整理得到不同荷载等级时路堤内部土压力沿深度的分布规律,如图12所示。

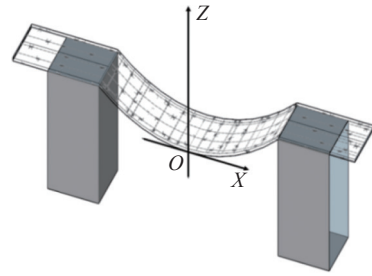


图11 废旧轮胎格栅张拉膜效应示意图
Fig. 11 Schematic diagram of tensile membrane effect of waste tire geogrid

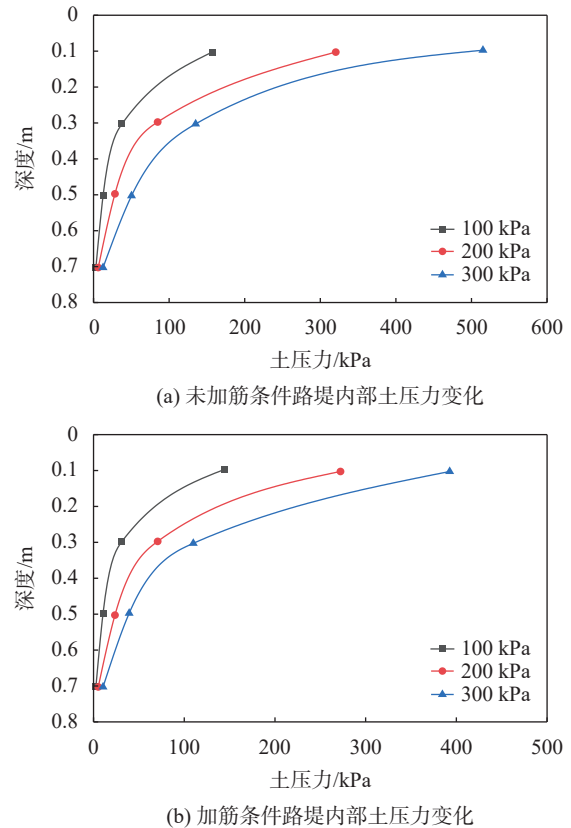


图12 路堤内部土压力沿深度变化规律
Fig. 12 Variation law of internal earth pressure in embankment along depth

由图12可知,上覆荷载越大,附加应力越大;无论有无加筋条件,随路堤深度的增加,土压力数值均显著降低,其主要衰减区深度为1倍的承载板宽度。进一步对比有无加筋条件可知,外荷载为300 kPa时,未加筋路堤其内部土压力达到513 kPa,而单层加筋路堤内部相同位置承担土压力为393 kPa,土压力数值明显降低。经分析其原因为:在承受外部荷载时,格栅的横肋与纵肋和土体协同变形,共同承受外力的剪切作用,使得外荷载分散,从而降低了土体承受的压力,有效提高其承载能力。

2.3.3 路堤内部土压力沿水平面分布规律

为对比土压力沿水平面的分布规律,选取竖向

荷载等级为 350 kPa, 不同加筋条件下的土压力分布规律如图 13 所示。由图可知, 承载板正下方的附加应力远大于两侧, 但随着深度的增加, 二者的差值逐渐减小; 同时, 加筋层数增多, 差值越小。这是由于随着深度的增加, 承载板传递下来的附加应力在路堤内部扩散, 同时, 格栅的多层网兜效应更为显著, 因此, 同一水平面上的应力均匀性增强。

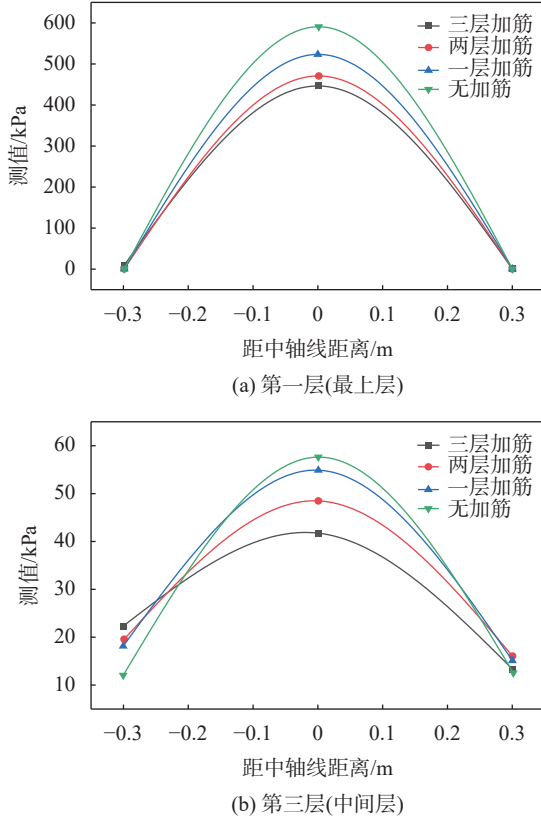


图 13 同一荷载水平下路堤内部应力在同一高度分布规律
Fig. 13 Distribution law of internal stress in embankment at the same height under the same load level

2.3.4 加筋层数的影响

为了对比不同加筋层数对路堤内部土压力的影响, 选择荷载等级为 350 kPa 时承载板底土压力数据, 分析不同加筋层数条件下路堤不同深度处土压力数值, 如图 14 所示。由图可知, 不加筋时最上层土体(1#测点)压应力为 590.39 kPa, 而对于单层、二层及三层加筋条件下附加应力值分别为 583.38, 469.62, 445.87 kPa, 分别减小了 1.19%, 20.46%, 24.48%, 且单层加筋时各深度处土压力的数值相较双层、三层加筋条件下更大。这表明加筋层数越多, 轮胎格栅的网兜效应越明显, 将应力分布在更广的区域, 使得应力集中现象减弱, 有利于控制不均匀沉降变形。

2.3.5 轮胎格栅加筋路堤承载力公式

由上述分析可知, 废旧轮胎格栅用于路堤加筋

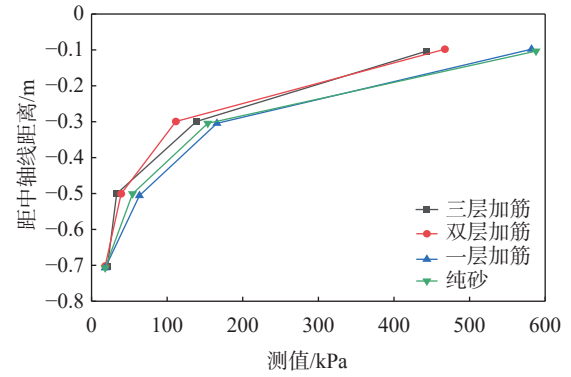


图 14 路堤内部附加应力随加筋层数变化规律
Fig. 14 Variation law of additional internal stress in embankment with the number of reinforcement layers

时存在三类提升效应: 张拉膜效应、应力扩散调整效应及破裂面阻隔效应。为了确定废旧轮胎格栅加筋处治后路堤承载计算方法, 参考文献 [14] 提出的路堤承载力计算方式, 考虑应力扩散、筋材横、纵向拉力等作用影响, 计算公式如下:

$$\Delta f_1 = f_a - \left(\frac{B f_a}{B + 2Z \tan \theta} + \gamma Z \right) = \frac{2 f_a Z \tan \theta}{B + 2Z \tan \theta} - \gamma Z \quad (1)$$

$$\Delta f_2 = \frac{2 T_{ab} \sin \beta}{K(B + 2Z \tan \theta)} \quad (2)$$

$$\Delta f_3 = \frac{2 T_{ab} \cos \beta}{KZ} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\theta}{2} \right) \quad (3)$$

$$f'_a = f_a + \Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3 \quad (4)$$

式中: f_a 为地基承载力特征值; Δf_1 为应力扩散作用增加的路堤承载力; Δf_2 为筋材拉力向上的分力而增加的路堤承载力; Δf_3 为筋材拉力的水平分力而增加的路堤承载力; B 为基础底面宽度; Z 为垫层地基厚度; f'_a 为加筋地基承载力特征值; γ 为基础底面土体重度; T_{ab} 为地基宽度方向的筋材拉力; β 为土工合成材料拉力与水平面夹角; θ 为地基应力扩散角, 取值通过试验确定; K 为安全系数, 根据经验取值, 取值范围为 2.5 ~ 5.0。

根据模型试验结果, 以单层加筋路堤结构为例, 可以确定上述公式参数如表 4 所示。

应用式(1)~式(4)计算可知, 扩散角 θ 按经验取值为 18°时, 单层加筋路堤承载力理论计算数值为 453.23 kPa, 与表 2 中单层加筋路堤承载能力极限值 450 kPa 非常接近, 计算公式具有较好的计算精度。

3 结论

为揭示废旧轮胎格栅加筋路堤竖向承载特性, 考虑不同加筋层数及荷载等级, 设计了加筋路堤承载

表 4 承载力计算参数
Tab. 4 Calculation parameters for bearing capacity

Δf_1					Δf_2			Δf_3		
f_u/kPa	B/m	Z/m	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$\theta/(^{\circ})$	T_{ab}/MPa	$\beta/(^{\circ})$	K	T_{ab}/MPa	$\beta/(^{\circ})$	K
350	0.3	0.2	17.1	30	2.6	81.42	5	2.6	81.42	5

力试验,分析了加筋路堤极限承载力及内部应力分布特性,得出如下结论:

(1)基于竖向静载作用下废旧轮胎格栅加筋路堤承载特性试验,确定了不同加筋层数时路堤极限承载力,揭示了轮胎格栅加筋对极限承载力具有显著的提升效应,本试验中最大提高幅度可达 70% 以上。

(2)通过监测废旧轮胎格栅加筋路堤内部应力分布及坡面位移变化,揭示了废旧轮胎格栅的加入对于路堤整体刚度的提升作用,减小了路堤坡顶沉降及侧向位移。

(3)基于试验数据分析,揭示了轮胎格栅加筋路堤具有张拉膜效应、应力扩散调整效应及破裂面阻隔效应,从而可以调整路堤不均匀受力及变形,并提出了承载力计算公式。

(4)通过对路堤进行加筋,其极限承载力得到了明显的提高,随加筋层数的增多,其提高幅度亦逐渐降低。对于不同高度路堤加筋,存在路堤加筋效果与经济性的优化问题,在工程应用中可根据实际情况及工程需要进行比选。

参 考 文 献

[1] 杨 静,李 磊,武 明,等. 山区公路路基病害类型及成因分析 [J]. 路基工程, 2012(6): 15-18. (LI J, LI L, WU M, et al. Analysis on type and genesis of subgrade diseases of highway in mountainous area[J]. Subgrade Engineering, 2012(6): 15-18. (in Chinese))

[2] YOOSUK P, SUKSIRIPATTANAPONG C, THUMRONGVUT J, et al. Pullout resistance of fiberglass-reinforced plastic reinforcement embedded in cohesionless soils[J]. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 2025, 12(1): 71.

[3] BHATTACHARYA P. Pullout capacity of shallow inclined anchor in anisotropic and nonhomogeneous undrained clay[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2017, 13(5): 825-844,

[4] 刘丽芳, 储才元. 国内外土工合成材料的发展 [J]. 青岛大学学报 (工程技术版), 2002, 17(2): 50-53. (LIU L F, CHU C Y. Development actualities and prospects on geosynthetics in china and abroad[J]. Journal of Qingdao University (Engineering & Technology Edition), 2002,

17(2): 50-53. (in Chinese))

[5] 李丽华, 崔飞龙, 肖衡林, 等. 轮胎与格室加筋路堤性能及承载力研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 81-88. (LI L H, CUI F L, XIAO H L, et al. Performance and bearing capacity of embankments reinforced with waste tires and geocells[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 81-88. (in Chinese))

[6] 李丽华, 崔飞龙, 肖衡林, 等. 废旧轮胎条与格栅加筋土剪切性能对比研究 [J]. 人民黄河, 2016, 38(2): 117-120. (LI L H, CUI F L, XIAO H L, et al. Shear comparison of waste tyres and biaxial/triaxial geogrid reinforced soil[J]. *Yellow River*, 2016, 38(2): 117-120. (in Chinese))

[7] 黄 博, 赵 宇, 李明逵. 经编土工格栅施工损伤现场试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(2): 284-287. (HUANG B, ZHAO Y, LI M K. Investigation of installation damage on warp knit type geogrid using field tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(2): 284-287. (in Chinese))

[8] 胡汉兵, 姜志全, 蔡汉利. 土工格栅施工损伤现场足尺试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 906-910. (HU H B, JIANG Z Q, CAI H L. Full-scale field tests on installation damage of geogrids[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 906-910. (in Chinese))

[9] JEON H Y, KIM S H, LYOO W S, et al. Evaluation of the long-term performance of geosynthetic reinforcements from their reduction factors[J]. *Polymer Testing*, 2006, 25(3): 289-295.

[10] 李晓亮, 刘 源, 李玉鑫, 等. 砂土介质中废旧轮胎加筋条带拉拔特性 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2021, 51(4): 54-60,70. (LI X L, LIU Y, LI Y X, et al. The pullout features of reinforced strips of waste tires in sandy media[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(4): 54-60,70. (in Chinese))

[11] 郭宇康, 贾亚飞, 谢明星, 等. 废旧轮胎整胎加筋路基的承载变形特性模型试验研究 [J/OL]. 土木与环境工程学报 (中英文), 1-9. (2025-02-25)[2025-03-26]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20250224.1735.002>. (GUO Y K, JIA Y F, XIE M X, et al. Model tests on the load bearing deformation behavior of reinforced subgrades using waste whole tires[J/OL]. Journal of Civil

- and Environmental Engineering, 1-9. (2025-02-25)[2025-03-26]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20250224.1735.002>. (in Chinese))
- [12] ALAMSHAHI S, HATAF N. Bearing capacity of strip footings on sand slopes reinforced with geogrid and grid-anchor[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2009, 27(3): 217-226.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: People's Communications Publishing House, 2020. (in Chinese))
- [14] 董彦莉. 土工格栅加筋砂土的特性研究及加筋垫层的承载力计算 [D]. 太原: 太原理工大学, 2011. (DONG Y L. Analysis on characteristics of geogrid reinforced sand and bearing capacity of geosynthetics reinforced cushion[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011. (in Chinese))

收稿日期: 2025-04-01