DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.129
开放科学(资源服务)标识码OSID:

废旧轮胎整胎加筋路基的承载变形特性模型试验研究

郭宇康[1],贾亚飞[1],谢明星[2],张军[3],郑俊杰[1],郑烨炜[1]
(1. 武汉大学 土木建筑工程学院,武汉 430072; 2. 太原理工大学 土木工程学院,太原 030024;
3. 山西交通科学研究院集团有限公司,太原 030032)

摘　要:废旧轮胎形成的黑色污染日益加剧,将废旧轮胎回收再利用是消纳轮胎的途径之一。废旧轮胎具备强度高、耐腐蚀等良好的土建材料特性,研究其在路基中的作用对于指导废旧轮胎加筋路基工程建设具有重要意义。但现有研究主要集中在轮胎碎片的再利用,对废旧轮胎整胎再利用的研究较少。为进一步探究填料类型与土工格栅加筋对整胎加筋路基的影响,开展3组模型试验,研究废旧轮胎加筋路基的承载变形特性,分析竖向荷载作用下路基的顶面位移、内部土压力分布以及轮胎应变。结果表明:轮胎加筋层有利于附加应力的扩散,并且随着荷载的增大,轮胎加筋层扩散应力的作用逐渐增强;在轮胎加筋层下方布设土工格栅能有效提高加筋区的整体刚度,减小路基变形,二者共同作用使加筋区附近土体附加应力的扩散角增大,且土工格栅分担了部分竖向荷载,使轮胎变形减小。

关键词:路基工程;废旧轮胎;整胎;土工格栅;变形
中图分类号:TU411.3　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-6717(2026)04-0108-08

Model tests on load-bearing deformation behavior of reinforced subgrades using waste whole tires

GUO Yukang[1], *JIA Yafei*[1], *XIE Mingxing*[2], *ZHANG Jun*[3], *ZHENG Junjie*[1], *ZHENG Yewei*[1]
(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China; 3. Shanxi Transportation Research Institute Group Co., Ltd., Taiyuan 030032, P. R. China)

Abstract: The large number of waste tires has led to increasingly severe pollution. The engineering application of waste tires is one of the ways to dispose of them. Waste tires have good engineering properties, such as high strength and corrosion resistance. Studying their role in subgrade construction is of great significance for guiding the construction of reinforced subgrades with waste tires. However, existing research mainly focuses on the

收稿日期:2024-10-23
基金项目:国家自然科学基金(52078392、52338007、52478358);国家重点研发计划(2022YFC3080400)
作者简介:郭宇康(1999-),男,主要从事路基加固研究,E-mail:guoyukang@whu.edu.cn。
郑烨炜(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:yzheng@whu.edu.cn。
Received: 2024-10-23
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52078392, 52338007, 52478358); National Key R&D Program of China (No. 2022YFC3080400)
Author brief: GUO Yukang (1999-), main research interest: subgrade reinforcement, E-mail: guoyukang@whu.edu.cn.
ZHENG Yewei (corresponding author), professor, doctorial supervisor, E-mail: yzheng@whu.edu.cn.

reuse of tire fragments, and there is insufficient research on the reuse of whole tires. In order to further investigate the influences of filler types and geogrid reinforcement on whole waste tire reinforced subgrades, three model tests were conducted to analyze their load-bearing deformation behavior. Subgrade top-surface displacements, vertical soil pressures, and tire strains under different stress levels were analyzed. The research results indicate that the tire reinforcement layer is conducive to the distribution of additional stress, and as the load increases, the role of the tire reinforcement layer in distributing stress gradually enhances. Laying geogrids below the tire reinforcement layer effectively increases the overall stiffness of the reinforced zone and reduces subgrade deformations. The combined effects of the tire and geogrid increase the distribution angle of additional stress in the soil near the tire reinforced zone, and geogrids share some loads, reducing tire deformations.

Keywords: subgrade engineering; waste tire; whole tire; geogrid; deformation

中国每年产生的废旧轮胎超过3亿条，回收利用率不足65%[1]，堆积的废旧轮胎占用大量土地，并形成黑色污染。废旧轮胎具备强度高、耐腐蚀等优良特性，在道路工程中有较广泛的应用前景[2-3]。废旧轮胎胶粉作为改性材料掺入沥青混合料中，可显著提高沥青路面的低温抗裂性、高温稳定性、耐久性和黏附性[4-5]。废旧轮胎空腔内填充砂土或黏土，将其叠放形成重力式挡土墙墙面，具有价格低廉、绿色环保和抗震性能好等优点[6]。

关于废旧轮胎在道路工程中的应用，很多学者聚焦于废旧轮胎破碎体。Abbaspour等[7]、Khan等[8]和李丽华等[9]将废旧轮胎碎片掺入土体，对混合土的无侧限抗压强度(UCS)、加州承载比(CBR)等进行试验研究，结果表明，轮胎碎片有效提升了土体的物理力学性能。刘源[10]通过室内模型试验研究了废旧轮胎条带加筋边坡的承载特性，结果表明，轮胎条带能有效提高边坡的承载能力，在相同荷载作用下可减少基础沉降。Moghaddas Tafreshi等[11]通过室内模型试验也得出了相似的结论。然而，生产废旧轮胎破碎体所需的粉碎和研磨等二次加工工序复杂，并且造成环境污染，因此直接利用废旧轮胎整胎是更理想的消纳途径。

目前，废旧轮胎整胎加筋技术仍在探索中，Yoon等[12-13]把废旧轮胎制成二维轮胎垫或“8”字形土工格室，对其加筋砂土的承载能力进行试验研究，结果表明，轮胎垫和轮胎格室均显著提升了砂土的承载能力。然而，将废旧轮胎加工为轮胎垫或轮胎格室的工序复杂，难以在实际工程中推广。李丽华等[14-17]将整胎相互绑扎并置于路堤模型中，研究整胎加筋对路堤性能及承载力的影响，结果表明，废旧轮胎加筋可有效提高路堤承载能力、减小不均匀沉降与侧向位移，增大附加应力扩散角，使附加应力分布更均匀，并缩小剪切破坏面范围，且效果优于土工格室加筋。李丽华等[18]通过FLAC3D开展数值模拟，对地震作用下路堤边坡的加速度响应进行探讨，结果表明，相比素土边坡，废旧轮胎加筋能有效降低路堤边坡地震加速度的放大效应和减小路堤边坡的位移，显著提高路堤在地震作用下的稳定性。以上研究表明，整胎加筋路堤具有良好的力学性能，且结构简单，易于在工程中应用。

基于以上研究，笔者进一步探究整胎加筋中填料类型的影响，并在轮胎层下方铺设土工格栅，以增强其整体性，以此探索废旧轮胎整胎加筋的优化布置方式。本文以废旧轮胎整胎加筋路基为研究对象，通过大型室内模型试验研究其在竖向荷载作用下的路基顶面位移、竖向土压力分布、土压力传递效率及轮胎应变。通过不同轮胎连接方式以及不同填料工况的对比分析，重点研究填料类型和土工格栅加筋对整胎加筋路基性能的影响。

1　模型试验

1.1　材料

选用级配良好的砂土作为路基填料，相对密实度D_r为58%。通过25、50、100 kPa围压下的三轴压缩试验得到了砂土的强度参数。砂土的物理力学参数见表1。

表1　砂土的物理力学参数

Table 1　Physico-mechanical parameters of sand

比重	孔隙比	相对密实度	天然重度/(kN/m³)	内摩擦角/(°)
2.65	0.532	0.58	17.3	42.5

碎石填料为机械破碎角砾，最大粒径为1.3 cm。通过筛分试验得到碎石的颗粒级配曲线，如图1所示。采用浮力法测得碎石的比重G_s为2.75，试验中控制碎石的相对压实度D_r为70%，得到碎石的对应密度为1.80 g/cm³。通过法向压力分别为50、100、200、300 kPa的直剪试验，测得碎石的内摩擦角φ为48°。

试验采用的土工格栅为钢塑双向土工格栅。

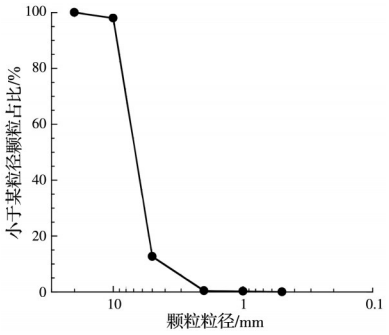


图 1 碎石颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curve of gravel

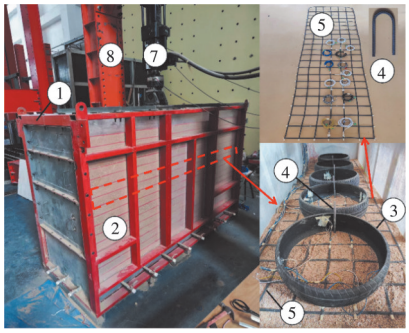
通过 3 组单肋格栅拉伸试验得到土工格栅的平均极限抗拉强度为 81.6 kN/m,2% 应变对应的拉伸刚度为 2 914.3 kN/m,处于实际工程中常用的土工格栅拉伸刚度范围内。

试验采用《轿车轮胎规格、尺寸、气压与负荷》(GB/T 2978—2014)中规定的 60 系列轿车子午线轮胎 195/60R1486H 为标准轮胎进行分析,轮胎规格近似为断面宽度 H=200 mm,外直径 D_o=600 mm,内直径 D_i=400 mm。根据文献中报道的相关试验,测得取自胎冠中心处宽度为 6 cm、厚度为 1.5 cm 的轮胎试样的最大拉伸强度为 23.5 MPa,对应的断裂伸长率为 18.9 %[19]。

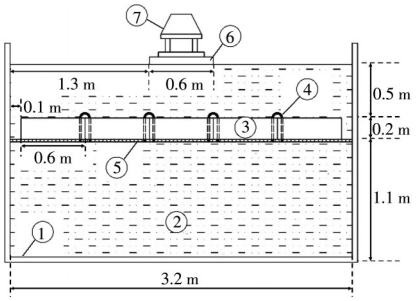
1.2 试验方案

试验模型及其几何尺寸如图 2 所示。模型箱由钢板和有机玻璃制成,其内部尺寸为长 3.2 m、宽 1 m、高 2 m。为了减少土体与箱壁之间的摩擦,在箱壁内侧粘贴了一层聚四氟乙烯膜。

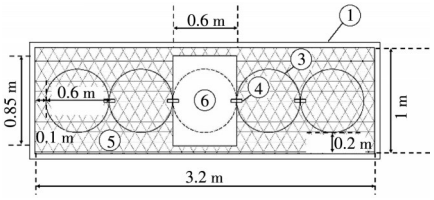
为了研究不同填料以及土工格栅在废旧轮胎加筋路基承载性能中发挥的作用,试验设置 3 组工况。试验模型如图 3 所示。基准工况 G1 为轮胎加筋路基,路基填料为砂土,高 1.8 m,轮胎加筋层厚 0.2 m,上下分别为 0.5、1.1 m 砂土。轮胎加筋层由 5 个轮胎组成,相邻轮胎使用 U 形钉连接,轮胎沿横截面轴线对称布置。对比工况 G2 为钢塑格栅-轮胎加筋路基,在基准工况轮胎层下方布置一层土工格栅。对比工况 G3 为碎石换填的轮胎加筋路基,将基准工况轮胎加筋层及上下 0.1 m 范围的填料替换为碎石。



(a) 试验系统



(b) 模型正视图

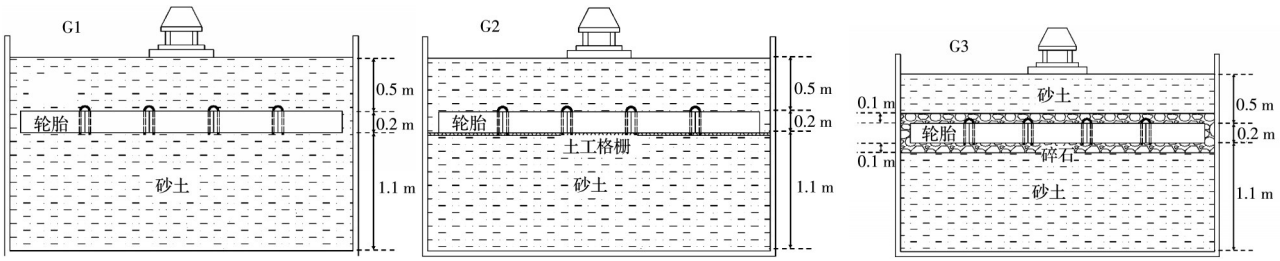


(c) 模型俯视图

①模型箱;②砂土;③废旧轮胎;④U 型钉;⑤土工格栅;⑥加载板;⑦作动器;⑧反力架。

图 2 试验模型及尺寸

Fig. 2 Test model and dimensions



(a) 轮胎加筋-砂土 (b) 轮胎-钢塑格栅加筋-砂土 (c) 轮胎加筋-碎石

图 3 试验模型

Fig. 3 Test models

1.3 模型建造与加载

路基模型采用分层压实填筑方法进行施工,每层 0.1 m,共 18 层。为了保证每层填料的相对密实度相同,依据体积与相对密实度计算每层填料的质量,将填料填入模型箱中,人工压实,使每层填料的高度为 0.1 m,表面整平后重复填筑下一层。轮胎

层施工时，将废旧轮胎切除侧壁后紧密排布在填料表面，使用U型钉固定相邻轮胎。路基填筑完成后，对路基表面整平，随后将0.6 m宽的加载板放置于路基顶部中心位置，正好位于中间轮胎的正上方。

在加载阶段，控制作动器缓慢接近加载钢板，作动器与加载钢板接触后逐级施加静力荷载。每级荷载增加50 kPa，首先，在180 s内匀速增加，达到预设值后维持900 s，待路基表面沉降与内部应力保持稳定后再施加下一级荷载，如图4所示。由于作动器最大荷载的限制，总共施加11级荷载，最大荷载达到550 kPa。采集仪的采集频率为1 Hz，即每1 s采集一次数据。

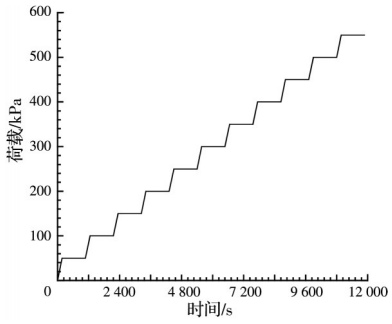
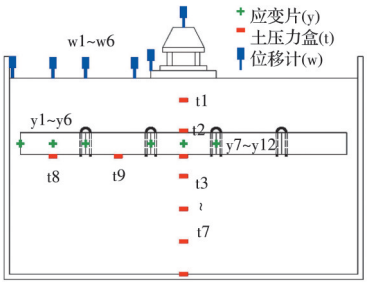


图4　加载曲线

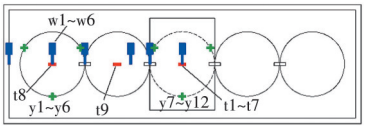
Fig. 4　Loading curve

1.4　监测

布置土压力盒、位移计和应变片3种传感器，如图5所示。由于路基模型和荷载都对称，因此只在一侧布设传感器。其中位移计w1～w6位于路基顶面中心横断面，测量路基顶面位移。土压力盒t1～t9位于路基轴线以及各个轮胎的下方，测量土压力在不同位置的分布。应变片y1～y3布置在中间轮胎内侧，测量轮胎沿环向的应变，3个应变片平行监测，监测结果取三者的平均值。



(a) 剖面图



(b) 俯视图

图5　监测方案

Fig. 5　Instrumentation

2　试验结果与分析

2.1　路基表面位移

图6所示为轮胎加筋工况G1(基准工况)对应的路基表面位移分布。在竖向荷载作用下，路基顶面加载板附近区域有较大沉降，远离加载板的区域有小幅度隆起。随着荷载的增大，加载板附近区域沉降与远离加载板区域隆起不断增加。当荷载达到550 kPa时，路基顶面最大沉降为89.4 mm，最大隆起为4.8 mm。

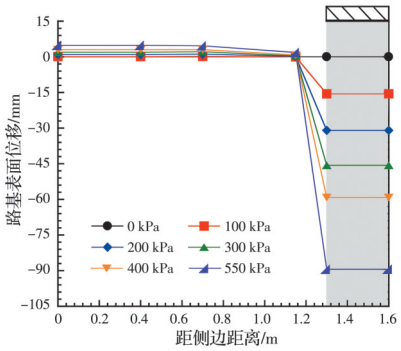


图6　工况G1路基表面位移分布

Fig. 6　Displacement distributions on the subgrade surface for case G1

在各级竖向荷载作用下，3组工况路基表面位移分布趋势相同，选取3组工况中对应位移最大的竖向荷载550 kPa进行分析。图7所示为为3组工况在550 kPa竖向荷载作用下的路基表面位移分布。在竖向荷载作用下，3组工况路基表面变形趋势相同，均在加载板下方区域沉降最大，在远离加载板区域轻微隆起。

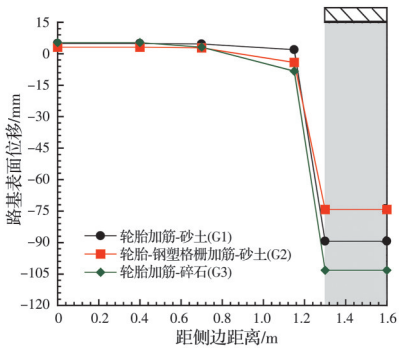


图7　竖向荷载 q=550 kPa时路基表面位移分布

Fig. 7　Displacement distributions on the subgrade surface under vertical load q=550 kPa

对比填料相同的轮胎加筋工况G1与轮胎-钢塑格栅加筋工况G2，G2表面隆起与沉降均小于G1。G2表面最大隆起为3.1 mm，最大沉降为74.2 mm。相比轮胎加筋工况G1，轮胎-钢塑格栅加筋工况G2表面的最大隆起与沉降分别减少了35.4%和17.0%。以上结果表明，土工格栅的加入增加了加

筋区的整体刚度,因此在相同荷载作用下路基变形更小。

对比相同加筋方式的砂土工况 G1 与碎石工况 G3,G3 的表面隆起与 G1 接近,沉降大于 G1。G3 表面最大隆起为 5.3 mm,最大沉降为 103.2 mm。相比砂土工况 G1,碎石工况 G3 表面的最大隆起与沉降分别增加了 10.0% 和 15.4%。对于相同的加筋方式,碎石加筋层路基的表面位移大于砂土加筋层路基,这是由于碎石的孔隙相对较大,在加载过程中逐渐被压实,并且碎石上下方的砂土被压入碎石孔隙中。

图 8 所示为 3 组试验路基表面最大沉降随荷载的变化曲线。在试验施加的竖向荷载范围内(0~550 kPa),3 组不同工况的沉降曲线基本都呈线性变化,沉降量近似线性增大。对比 3 组工况路基的最大沉降,轮胎加筋碎石路基最大,轮胎加筋砂土路基次之,轮胎-钢塑格栅加筋砂土路基最小。上述结果表明,土工格栅联合废旧轮胎共同作用增加了加筋区的整体刚度,显著减小了路基顶面沉降。作为轮胎加筋层填料,相较于碎石,砂土孔隙较小,密实度较高,控制沉降的效果更好。

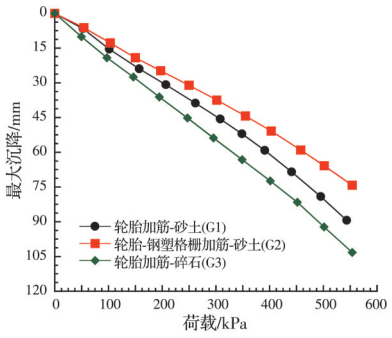


图 8 路基表面最大沉降

Fig. 8 Maximum settlements on the subgrade surface

2.2 路基竖向应力分布

图 9 为轮胎加筋工况 G1(基准工况)路基中线处竖向应力沿高度的分布。路基内部由竖向荷载引起的附加应力自上而下逐渐减小,在经过轮胎加筋层后,曲线出现明显拐点,附加应力大幅减小,在路基底部减小到最小值。

随着竖向荷载的增大,路基内部附加应力随之增大,曲线在轮胎层高度附近拐点更加明显,附加应力减小更为迅速。当 q=100 kPa 时,轮胎层上方附加应力为 54.1 kPa,下方为 52.5 kPa;而当 q=550 kPa 时,轮胎层上方附加应力为 433.5 kPa,下方大幅减小至 315.5 kPa。上述结果表明,轮胎加筋层有利于附加应力的扩散,并且随着荷载的增大,轮胎加筋层扩散应力的作用逐渐增强。

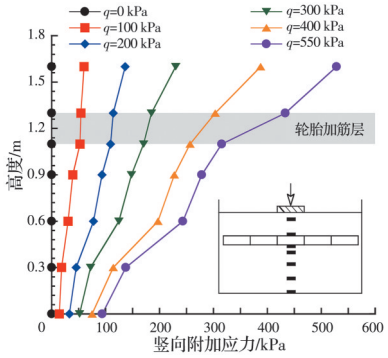


图 9 工况 G1 路基竖向附加应力的分布演化

Fig. 9 Evolution of vertical additional stress distributions in the subgrade for case G1

在各级竖向荷载作用下,3 组工况路基竖向附加应力分布趋势相同,选取 3 组工况中应力分布差距最大的竖向荷载 550 kPa 进行分析。图 10 为 q=550 kPa 时 3 组工况下路基中线处应力沿高度的分布以及按照应力扩散角法计算的路基中附加应力理论值。在竖向荷载作用下,3 种路基内部附加应力变化趋势相同,自上而下逐渐减小,其中,在经过轮胎加筋层后大幅减小。理论值与试验值曲线变化趋势相同,在轮胎加筋层上方,理论值低于试验值,这是由于模型箱侧壁对土体具有一定约束,限制了附加应力的扩散;在 1.1~1.3 m 的区域内,理论值的减小量远低于试验值,这是由于 3 组试验均为轮胎加筋路基,轮胎加筋层有效扩散了竖向附加应力。

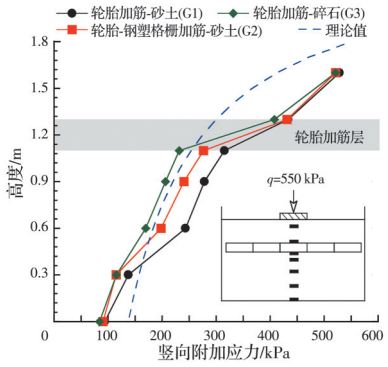


图 10 竖向荷载 q=550 kPa 时路基竖向附加应力分布

Fig. 10 Vertical additional stress distributions in the subgrade under vertical load q=550 kPa

对比填料相同的轮胎加筋工况 G1 与轮胎-钢塑格栅加筋工况 G2,G1 轮胎层上方附加应力为 433.4 kPa,下方附加应力为 315.4 kPa,减少了 27.2%,G2 轮胎层上方附加应力为 431.0 kPa,下方附加应力为 276.8 kPa,减少了 35.7%。上述结果表明,土工格栅与轮胎加筋层形成整体,通过筋材的拉伸作用分担部分竖向荷载,二者共同作用使得加筋区域轮胎加筋上下方 0.1 m 范围内土体附加应

力的扩散角增大。在路基底部，两种工况的附加应力几乎相同，表明土工格栅对应力的扩散作用主要集中在加筋区域附近，对于远离加筋的区域影响较小。

对比相同加筋方式的砂土工况G1与碎石工况G3，G3轮胎层上方附加应力为407.8 kPa，下方附加应力为231.6 kPa，减少了43.1%，G3的附加应力减小量远大于G1。上述结果表明，应力在碎石中的扩散效果优于砂土，这是由于碎石的颗粒更大，更容易形成力链，有利于应力扩散。在路基底部，两种工况的附加应力相近，表明碎石层对附加应力的扩散作用主要集中在碎石层，对远离碎石层的区域影响较小。

为了探明轮胎加筋层对荷载传递的影响效果，分别计算3组工况下荷载降低效率随竖向荷载的变化，并且按照应力扩散角法计算路基中附加应力降低效率的理论值，如图11所示。其中，荷载降低效率E_r的定义为轮胎加筋层上下的附加应力差值与轮胎层上方附加应力的比值，可由式(1)计算。

$$E_r=(\Delta\sigma_u-\Delta\sigma_d)/\Delta\sigma_u \tag{1}$$

式中：$\Delta\sigma_u$为轮胎层上方的竖向附加应力；$\Delta\sigma_d$为轮胎层下方的竖向附加应力。

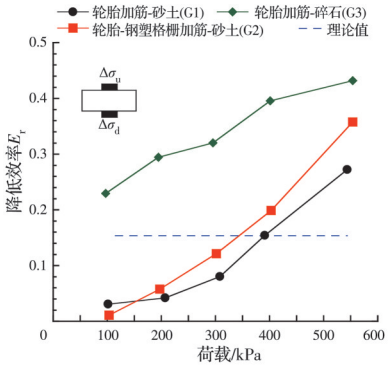


图11　轮胎加筋层荷载降低效率的演化

Fig. 11　Evolution of load reduction efficiency of the tire reinforced layer

总体而言，3组工况下荷载降低效率均随竖向荷载的增加而增大，其中G1与G2工况下曲线在荷载较大时明显变陡，降低效率迅速增大，G3工况下随竖向荷载的变化相对较小，但其初始降低效率远大于另外两组工况，而理论值不随荷载变化。对于轮胎加筋的砂土工况G1，q=100 kPa时荷载降低效率仅为3.1%，远低于理论值15.3%，300 kPa时荷载降低效率增加到8.0%，550 kPa时荷载降低效率大幅提高到27.2%，高于理论值。上述结果表明，轮胎加筋路基的荷载降低效率随荷载的增加而增加，并且增加的速率也随荷载的增加而增加。这是由于荷载的增大使得轮胎变形增大，轮胎本身承受更大的应力，从而减小了传递到下部的应力。

对比加筋形式相同的G1与G2工况，G2工况下降低效率稍大于G1，这是由于土工格栅通过拉伸变形承担了部分荷载，从而减小了传递到轮胎加筋层下部的应力。对比3组工况下轮胎加筋层的荷载降低效率，碎石工况G3远大于另外两组砂土工况，这是由于碎石颗粒较大，比较容易形成稳定力链，有利于应力扩散。

图12为轮胎加筋工况G1(基准工况)轮胎层下方竖向附加应力分布的演化。在模型中线位置附加应力最大，且随着与中线距离的增大而减小。随着竖向荷载的增大，中线处附加应力迅速增大，当竖向荷载从100 kPa增加到550 kPa时，该处的附加应力从55.1 kPa大幅增加到315.4 kPa。随着与加载区域距离的增加，由于受荷载的影响，附加应力的变化逐渐减小，在距离中线1.2 m处附近，基本不受荷载的影响。

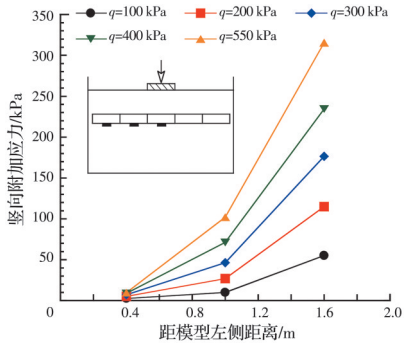


图12　工况G1路基竖向附加应力的水平分布

Fig. 12　Horizontal distributions of vertical additional stresses in the subgrade for case G1

图13为3组试验工况下q=550 kPa时路基轮胎层下方的附加应力分布。对比加载板下方中线处的附加应力，工况G1最大，工况G2次之，工况G3最小。工况G3加筋碎石层的附加应力分布最均匀，这是由于相较于砂土，碎石颗粒尺寸更大，可以将附加应力扩散到更大范围的土体中。工况G2的

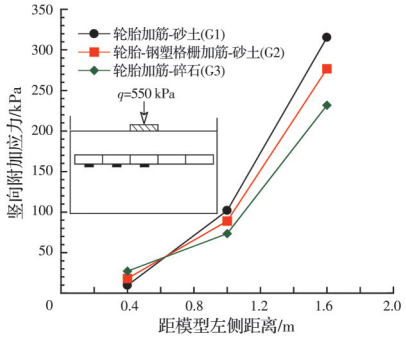


图13　竖向荷载q=550 kPa时路基竖向应力的水平分布

Fig. 13　Horizontal distributions of vertical additional stresses in the subgrade under vertical load q=550 kPa

附加应力分布比工况G1更均匀,这是由于土工格栅分担了部分荷载,其与废旧轮胎形成整体,使附加应力扩散到更大区域。

2.3 轮胎应变

图14为3组试验工况下路基中加载板正下方轮胎的环向应变。随着荷载的增大,加载板正下方的轮胎环向应变大致呈线性增长。这是由于在竖向荷载作用下,填料受压后发生侧向变形,导致轮胎的径向变形增大,对填料产生径向的约束作用。其中,工况G3采用碎石填料,轮胎环向应变大于另外两组采用砂土的工况,这是由于碎石填料颗粒较大,产生的变形更大。工况G2轮胎环向应变小于G1,这是因为工况G2中土工格栅在平面方向受到拉伸,分担了部分竖向荷载。

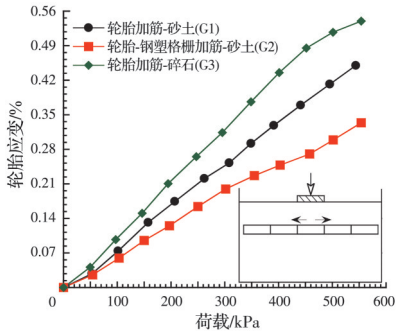


图14 中心轮胎环向应变

Fig. 14 Circumferential strain of the center tire

3 结论

开展3组废旧轮胎整胎加筋路基的承载变形模型试验,对不同加筋方式以及不同填料工况下的路基顶面位移、内部土压力分布、轮胎应变进行对比分析,得到以下主要结论:

1)废旧轮胎加筋路基在荷载作用的区域沉降最大,在远离荷载作用的区域隆起。在轮胎加筋层下方铺设土工格栅能有效增加加筋区的整体刚度,使路基在相同荷载作用下变形更小。作为轮胎加筋层填料,相较于碎石,砂土孔隙较小,密实度较高,控制沉降的效果更好。

2)轮胎加筋层有利于附加应力的扩散,且随着荷载的增大,轮胎加筋层扩散应力的作用逐渐增强。在轮胎加筋层下方铺设土工格栅,二者共同作用,使得加筋区域附近土体附加应力的扩散角增大。碎石的颗粒比砂土更大,更容易形成稳定力链,相比砂土,使用碎石作为路基填料更有利于附加应力的扩散。

3)在竖向荷载作用下,填料受压后发生侧向变形,导致轮胎的环向应变增大,对填料产生径向的约束作用。在轮胎加筋层下方铺设土工格栅,土工格栅分担了部分竖向荷载,减小了轮胎变形。

参考文献

[1] 张云超, 王毅, 蔡锦凯. 废轮胎的资源化利用技术及其问题探讨[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(7): 163-165.
Zhang Y C, Wang Y, Cai J K. Research and discussion on utilization technology of waste tire and its problems [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2024, 37(7): 163-165. (in Chinese)

[2] 张正甫, 刘松玉, 蔡光华, 等. 废旧轮胎在道路工程中的研究进展[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊2): 361-368.
Zhang Z F, Liu S Y, Cai G H, et al. Research progress of waste tires in road engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 361-368. (in Chinese)

[3] 岳红亚, 毕玉峰, 徐润, 等. 废旧轮胎在道路工程中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 76-86.
Yue H Y, Bi Y F, Xu R, et al. An applicational review on scrap tires used in road engineering[J]. Materials Reports, 2022, 36(16): 76-86. (in Chinese)

[4] Yu H Y, Zhu Z H, Leng Z, et al. Effect of mixing sequence on asphalt mixtures containing waste tire rubber and warm mix surfactants[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246: 119008.

[5] 张得文. 橡胶沥青在公路工程中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
Zhang D W. Study on the application of rubber asphalt in highway engineering[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)

[6] Hossain S, Jayawickrama P W. Use of whole tires in earth retaining structures[R]. Center for Multidisciplnary Research in Transportation Texas Tech University, 2000.

[7] Abbaspour M, Aflaki E, Moghadas-Nejad F. Reuse of waste tire textile fibers as soil reinforcement[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 1059-1071.

[8] Khan B J, Ahmad I, Jameel H. Evaluation of pull out behavior of plain and deformed steel bars in tire shred-sand mixture using large scale model[J]. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2022, 26: 101010.

[9] 李丽华, 肖衡林, 唐辉明, 等. 轮胎碎片-砂混合土抗剪性能优化试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1063-1067.
Li L H, Xiao H L, Tang H M, et al. Shear performance optimizing of tire shred-sand mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1063-1067. (in Chinese)

[10] 刘源. 废旧轮胎条带加筋土力学特性及在边坡中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
Liu Y. Study on mechanical properties of waste tire strip

reinforced soil and its application in slope[D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)

[11] 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.

[12] Yoon Y W, Cheon S H, Kang D S. Bearing capacity and settlement of tire-reinforced sands[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2004, 22(5): 439-453.

[13] Yoon Y W, Heo S B, Kim K S. Geotechnical performance of waste tires for soil reinforcement from chamber tests[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(1): 100-107.

[14] 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)

[15] Li L H, Cui F L, Ferreira P, et al. Experimental study of embankments with different reinforcement materials and spacing between layers[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019, 47(4): 477-482.

[16] 李丽华, 余长道. 废旧轮胎加筋土性能试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(11): 1-6.
Li L H, Yu C D. Properties of soil reinforced by waste tire[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(11): 1-6. (in Chinese)

[17] 李丽华, 肖衡林, 郑俊杰, 等. 废旧轮胎加筋路堤边坡模型试验研究[J]. 工程力学, 2015, 32(11): 79-85.
Li L H, Xiao H L, Zheng J J, et al. The model test of waste tire reinforced slope[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(11): 79-85. (in Chinese)

[18] 李丽华, 杨超, 肖衡林, 等. 废旧轮胎加筋路堤边坡数值模拟计算分析[J]. 公路工程, 2017, 42(1): 4-8.
Li L H, Yang C, Xiao H L, et al. Numerical simulation analysis of waste tires reinforced embankment slope[J]. Highway Engineering, 2017, 42(1): 4-8. (in Chinese)

[19] 袁雪峰. 基于TDA复合土的废旧轮胎条带加筋路堤承载特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
Yuan X F. Study on bearing characteristics of waste tire strip reinforced embankment based on TDA composite soil[D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)

(编辑　王秀玲)