

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.150

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



废弃橡胶轮胎-砂土复合体的承载试验研究

王凤池^a, 田裴裴^b, 刘甜甜^b

(沈阳建筑大学 a.交通工程学院; b.土木工程学院, 沈阳 110168)

摘要:为探索地基加固新方法,解决废弃橡胶轮胎堆放引起的环境问题,提出了一种废弃橡胶轮胎环箍散体材料的新型复合地基。通过橡胶轮胎条拉伸试验,得到废弃橡胶轮胎的弹性模量;通过废弃橡胶轮胎-砂土复合体轴压试验,分析加载制度和侧限条件对地基承载力的影响规律、轮胎内壁的应力分布规律及复合体内部土应力变化规律。结果表明:与快、慢速加载制度相比,单向往复加卸载时,复合体的承载性能和自恢复能力最优;有侧限条件下复合体的承载性能较好,但侧限条件对复合体的自恢复能力没有影响;在有、无侧限条件下,轮胎内壁的应力分布规律存在较大差异;同一径向平面上,距复合体中心处越近,受橡胶轮胎环箍效应的影响越小,土应力值越大。

关键词:废弃轮胎;复合地基;承载性能;环箍效应;自恢复能力

中图分类号: TU472.99 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2020)01-0039-09

Experimental study on the load bearing capacity of waste rubber tire-sand composite

Wang Fengchi^a, Tian Peipei^b, Liu Tiantian^b

(a. School of Transportation Engineering; b. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 100168, P. R. China)

Abstract: In order to explore a new method of foundation reinforcement and solve the environmental problems caused by waste rubber tire stacking, a new type of foundation with the waste rubber tire hooping granular material was proposed. The elastic modulus of discarded rubber tire was obtained by carrying out tensile testing on rubber tire strip. By using axial compression test on waste rubber tires-sand composite, the rules were discussed, including the influence of loading system and lateral conditions on the foundation bearing capacity, stress distribution of inner wall of tire, and soil stress inside the laminated body. The results show that, compared with fast and slow loading system, the sedimentation of the superposition is the smallest, and the self-recovery ability and bearing capacity are optimal when loading and unloading in one direction. The bearing capacity of the composite is higher when under confined condition, but the self-recovery ability of the composite is not affected by confined condition. Under the condition of no or no limitation, The stress distribution around the inner wall of the tire is quite different. In the same radial plane, the closer to the center of the superposition, the smaller the effect of rubber tire ring, and the greater the soil stress.

Keywords: waste tire; composite foundation; bearing capacity; hoop effect; self-recovery ability

收稿日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(51578348)

作者简介: 王凤池(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事地基处理、固体废弃物处理等研究, E-mail: cefcwang@sjzu.edu.cn。

Received: 2019-05-10

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51578348)

Author brief: Wang Fengchi (1970-), professor, doctoral supervisor, main research interests: foundation treatment and solid waste treatment, E-mail: cefcwang@sjzu.edu.cn.

废弃橡胶轮胎的循环再利用是一个热门课题,其主旨在于减轻汽车工业发展带来的环境压力,核心是以较少的二次能源投入和较低的碳排放将废弃橡胶轮胎变废为宝。目前,废弃橡胶轮胎的主要利用途径有:旧轮胎翻新、生产胶粉、生产再生胶、热裂解和土法炼油等,但效果都不理想^[1-2]。将废弃橡胶轮胎整体或物理破碎后作为工程材料,引入土木工程领域,有效解决了废弃橡胶轮胎与环保之间的矛盾。

整体利用方面,将废弃橡胶轮胎内填充不同的散体材料,应用于挡土墙、边坡、路基、筑堤等工程中。Garga 等^[3]、O'shaughnessy 等^[4]使用废弃橡胶轮胎作为挡土墙和斜坡建筑的加固,对填充了黏土和砂的废弃轮胎加筋结构进行了大量拉拔试验,结果表明,轮胎垫增强材料的抗拔力主要取决于土壤的有效剪切强度;王凤池等^[5]、兰海洋等^[6]提出一种废弃橡胶轮胎环箍散体材料的复合地基形式,通过室内模型试验,研究不同因素对其承载能力和变形特点的影响;鲁洋等^[7]、王耀明等^[8]提出一种采用废旧轮胎柱的加筋土结构,通过室内试验研究了此结构的水平循环剪切和竖向激振特性,并进一步研究了不同填充材料对废旧轮胎柱加筋体循环剪切性能的影响;李丽华等^[9]通过室内模型试验,研究了废旧轮胎与土工格室加筋路堤边坡的性能。破碎再利用方面,将废弃橡胶轮胎碎片用作挡土墙回填材料^[10-11],或将橡胶颗粒掺入到砂土^[12-13]、水泥土^[14-15]、黏土^[16]、沥青^[17]等材料中,制成新型土工材料加以应用。

目前,村镇建筑普遍存在因地基基础不均匀沉降而导致的建筑倾斜、墙体开裂等现象。地基基础已经成为影响村镇建筑安全性能的关键因素之一。鉴于此,笔者提出了一种面向村镇建筑整体利用废弃轮胎的新型人工地基体系——废弃橡胶轮胎复合地基,如图 1 所示。村镇建筑设计等级一般为丙级,根据建筑地基基础设计规范,此类建筑物地基承载力为 80~300 kPa,方可满足要求。

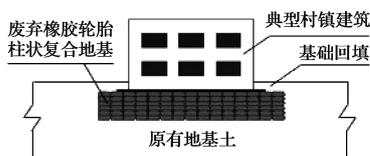


图 1 废弃橡胶轮胎复合地基

Fig.1 Waste rubber tire composite foundation

废弃橡胶轮胎复合地基的承载力主要来源于柱状布置的废弃橡胶轮胎-散体材料复合体,研究废弃

橡胶轮胎-砂土复合体的竖向载荷性能,为复合地基的实际应用奠定基础。

1 试验设计

1.1 试验材料与测试元件

共设计两类试验:橡胶轮胎条拉伸试验和橡胶轮胎-砂土复合体轴压试验。试验所用轮胎为废弃橡胶轮胎,外径 577.6 mm,内径 355.6 mm,胎面高度 185 mm,橡胶轮胎内部含有钢丝束束层,构造如图 2 所示。



图 2 轮胎的构造尺寸

Fig.2 Structural dimension of tire

试验加载模型箱的尺寸(长×宽×高)为 1 300 mm×1 000 mm×800 mm,箱体选用 10 mm 厚的钢板焊制而成,以确保进行有侧限条件下的轴压试验时,模型箱不发生鼓胀甚至破坏。

试验散体材料选用颗粒级配良好的厦门 ISO 标准砂(泊松比 $\nu_s = 0.33$, $E = 200$ MPa);土应力选用直径 17 mm、量程 2 MPa 的土压力盒进行量测;应变选用 BX120-3AA 型号的应变片进行量测;位移选用量程 100 mm 的位移传感器进行量测;试验加载板选用 30 mm 厚的钢板,加载板直径与轮胎外径相同;为克服模型箱对复合体的刚性环箍作用,将 10 mm 厚橡胶板粘贴在模型箱内,用以模拟地基土半无限空间状态。

1.2 试件制作

1.2.1 橡胶轮胎条制作过程 用角磨机将轮胎沿胎面纹路切割成条带,保证切割面平整光滑。为避免橡胶轮胎条与拉力机夹具咬合时发生条带脱落或受力不均等情况,将试验条带制作成哑铃状。橡胶轮胎条尺寸如图 3 所示(单位:mm)。

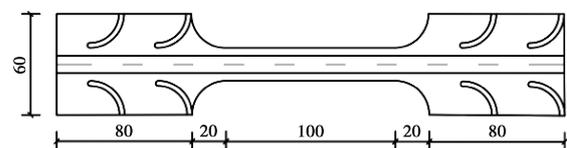


图 3 橡胶轮胎条(单位:mm)

Fig.3 Rubber tire strip(unit:mm)

1.2.2 橡胶轮胎-砂土复合体制作步骤

1) 橡胶轮胎-砂土复合体由 3 层轮胎叠加组成, 首先, 使用酒精对中间层轮胎内测进行擦拭、除油处理, 使得被测点表面平整清洁, 以保证应变片与胎壁共同变形。待酒精挥发后, 进行应变片粘贴, 粘贴后的应变片使用 704 硅橡胶进行防水处理。

2) 将标准砂分 3 层填充至模型箱内, 每层厚 50 mm, 并进行逐层击实(击实度为 90%), 以避免复合体在承受竖向载荷时下部土体产生过大的压缩变形。

3) 将底层轮胎放入底部填有 150 mm 厚的标准砂模型箱中, 并置于中心位置, 把标准砂按照其最优含水率(10%)进行配制, 配制好后, 分层填充到轮胎中。每次填充胎高的 1/3, 并充分夯实。随后, 把粘贴好应变片的中间层轮胎垂直叠加到底层轮胎上, 将应变片导线从内部引出。当填充到中间层轮胎胎高的 1/2 时, 在相应位置埋放土压力盒。完成中间层轮胎制作后, 对土压力盒进行测量, 替换失准的土压力盒。最后, 进行顶层轮胎的制作, 工序与底层轮胎相同。

4) 对于胎周有侧限的试验, 底层轮胎按照第 3) 步制作好后, 待轮胎周围空间填充完成后, 再进行中间层轮胎的叠加制作, 依此完成复合体及轮胎周围空间的填充。

1.3 试验加载

1) 橡胶轮胎条拉伸试验加载装置如图 4 所示, 选用电子万能材料试验机, 试验机最大负荷 100 kN, 试验分别采用 2、20、200 mm/min 这 3 种加载速率。

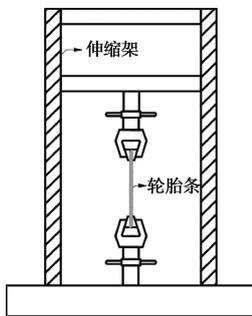
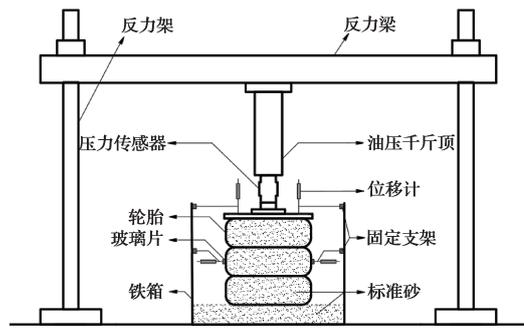


图 4 橡胶轮胎条拉伸试验加载装置

Fig.4 Tensile test device for rubber tire strip

2) 橡胶轮胎-砂土复合体轴压试验加载装置如图 5、图 6 所示, 选用试验室 9 m 高反力架, 竖向承载力为 1 200 kN, 配套选用 600 kN 千斤顶, 最大行程为 400 mm。图 5 为无侧限轴压试验加载装置, 图 6 为有侧限轴压试验加载装置。

为确保试件能够均匀受压, 在弹性范围内进行预载, 加载至 10 kN 后持载, 待读数稳定再卸载至



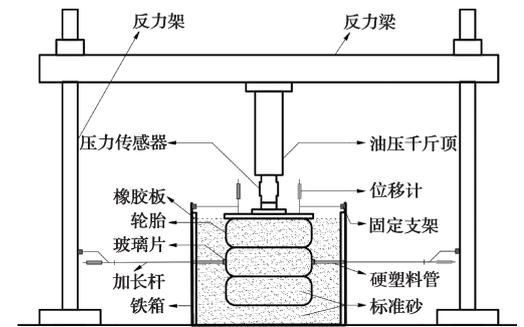
(a) 示意图



(b) 试验图

图 5 无侧限试验加载装置

Fig.5 Unconfined test loading device



(a) 示意图



(b) 试验图

图 6 有侧限试验加载装置

Fig.6 Confined test loading device

0, 同时, 将各测试原件读数清零。

试验采用分级加载制, 无侧限轴压试验共进行 3 组试验研究, 为对比研究加载制度对复合体承载能力的影响, 分别在不同的加载制度下进行; 有侧限轴压试验难度大, 因此, 只做了 1 组试验, 采用在慢速加载制度下进行。采用慢速加载, 是因为在侧限试验前已经完成了无侧限约束试验, 慢速加载取得

了较好的试验效果。图 7 为不同加载制度下的时间-荷载设计曲线。

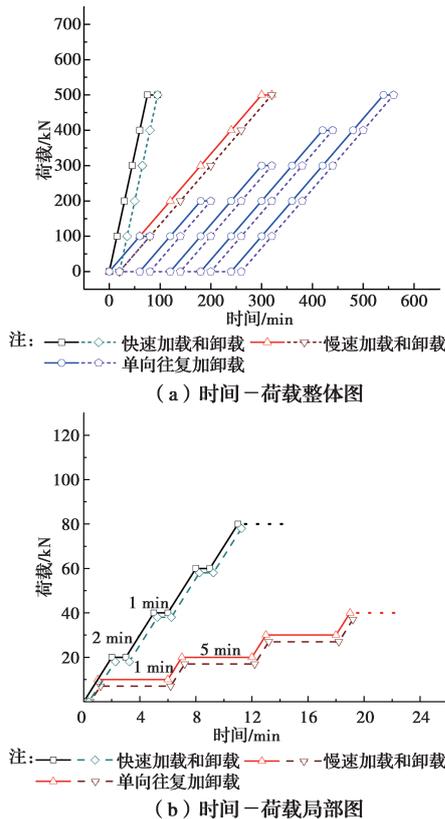


图 7 不同加载制度下的时间-荷载设计曲线

Fig.7 Time-load design curves under different loading system

1)慢速加载:每级匀速加载 10 kN,每级加载完成后持载 5 min 再进行下一级加载,累加至 500 kN 时进行持载,待位移不再产生变化方可进行卸载。卸载依旧按照每级 10 kN 的方式进行,直至竖向荷载卸载至 0 kN。

2)快速加载:每级匀速加载 20 kN,每级加载完成后持载 1 min 再进行下一级加载,同样,累加至 500 kN 时进行持载,待位移不再产生变化后,进行卸载。依旧按照每级 20 kN 的方式进行卸载,直至卸载至 0 kN。

3)单向往复加载:每级匀速加载 10 kN,每级加载完成后持载 5 min 再进行下一级加载,累加至 100 kN 时,进行持载,待位移不再产生变化方可进行卸载,再按照 10 kN 每级进行卸载,直至卸载到 0 kN。随后,继续施加荷载,即按照 level1(0 kN-100 kN)-level2(0 kN-200 kN)-level3(0 kN-300 kN)-level4(0-400 kN)-level5(0 kN-500 kN)的方式进行单向循环加卸载。

1.4 测试元件布置及作用

土压力盒与应变片均布置于中间层轮胎中,具体分布位置如图 8 所示。胎壁上侧、中测、下侧各放

置一个土压力盒,胎高 1/2 平面上等间距的水平放置 5 个土压力盒,分别量测试件不同位置处的土压力。胎壁内测共粘贴有 18 枚应变片,包括 9 枚环向应变片和 9 枚径向应变片,分别用以量测轮胎内壁的环向应变和径向应变。

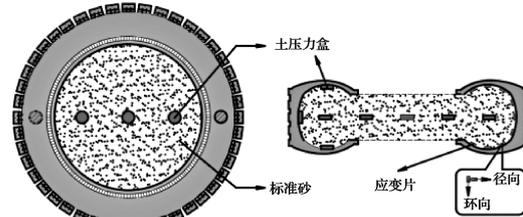


图 8 土压力盒与应变片布置

Fig.8 Layout of earth pressure cell and strain gauge

试验加载装置中,加载板上的两个位移计量测橡胶轮胎-砂土复合体的纵向沉降量,中间的位移计量测橡胶轮胎-砂土复合体的径向位移。

2 两个重要定义

2.1 环箍效应

橡胶轮胎-砂土复合体在竖向荷载作用下,胎内砂土沿加荷方向发生竖向沉降的同时,也因泊松效应产生横向膨胀,外部橡胶轮胎对砂土的横向膨胀起约束作用,这种约束作用称为环箍效应。受荷时,砂土处于三向受压状态,橡胶轮胎也受三向应力作用,示意图如图 9 所示。在竖向荷载 F 作用下,砂土对轮胎内壁的侧向压力为 q_r ;橡胶轮胎所受的三向应力为竖向应力 σ_z 、径向应力 σ_r 、环向应力 σ_θ ;橡胶轮胎的环向位移为 u_θ ,径向位移为 u_r 。

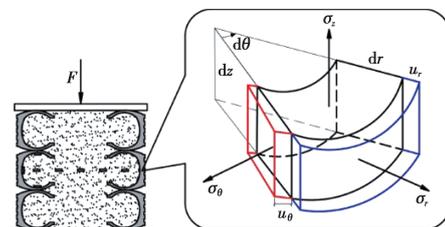


图 9 复合体应力单元

Fig.9 Stress element of composite body

2.2 自恢复能力

在竖向荷载 F 作用下,复合体产生竖向沉降和侧向鼓胀变形,散体材料更加密实,使周围弹塑性的橡胶轮胎受压变形并储存弹性势能;当外荷载卸去后,变形的橡胶轮胎能恢复部分形变,并带动已发生塑性变形的散粒材料共同运动,将储存的弹性势能以动能的形式释放出来。将这种复合体可恢复部分形变的能力定义为自恢复能力,自恢复能力系数为 K 。

$$K = (\Delta - \Delta_i) / \Delta \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中: Δ 为加载完成时复合体的沉降量, mm; Δ_i 为卸载完成时, 复合体的沉降量, mm, 如图 10 所示。自恢复能力系数越接近于 1, 说明复合体的自恢复性能越好。

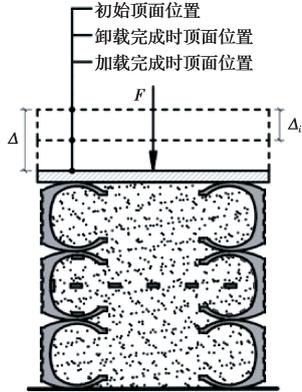


图 10 自恢复力计算方法示意图

Fig.10 Calculation method of self-recovery

3 试验结果及分析

3.1 橡胶轮胎的弹性模量

如图 11 所示, 弹性模量取应力-应变曲线原点的切线与横轴夹角的正切值。而应力-应变曲线上的任一点 C 与原点连线和横轴夹角的正切值称为割线模量。从图 12 中可以看出, 橡胶轮胎条的 σ - ϵ 曲线经历了典型的弹性阶段和破坏阶段, 而塑性破坏阶段并不明显。因此, 将不同加载速率下应力-应变曲线峰值点与原点连线, 并将其均值线与横轴夹角的正切值作为轮胎橡胶的弹性模量, 即式(2)。

$$E = E_C = \frac{\sigma_C}{\epsilon_C} = \tan \alpha \quad (2)$$

式中: α 为割线与横坐标的夹角; σ_C 为总应力; ϵ_C 为总应变。将曲线的割线弹性模量取平均值, 得到橡胶轮胎的弹性模量 $E = 130.3 \text{ MPa}$ 。

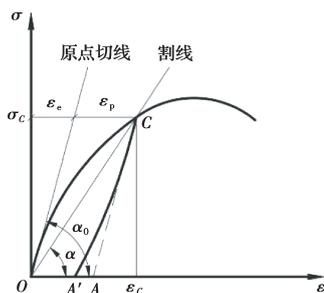


图 11 模量选取方式示意图

Fig.11 Schematic diagram of modulus selection method

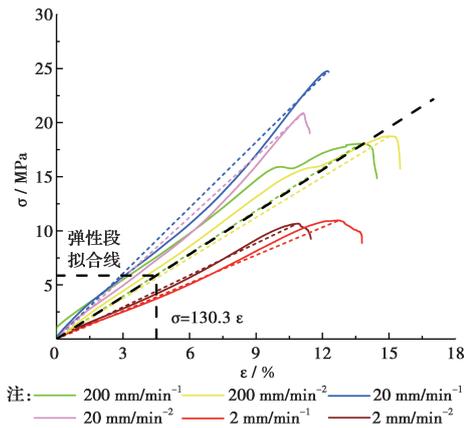


图 12 橡胶轮胎条的应力-应变曲线图

Fig.12 Stress-strain curves of rubber tire strip

3.2 加载制度对复合体承载能力影响

图 13 为不同加载制度下的 p - s 曲线。从复合体受压的轴向荷载-沉降曲线分析, 前期加载阶段曲线成线性变化, 外部橡胶轮胎与胎内散粒体发生协同变形, p - s 成正比关系; 后期加载阶段, 随着荷载的增大沉降略有减小, 呈现出下凹的趋势, 说明内部散粒体被压的愈发紧密, 孔隙已经难以被压缩; 前期卸载阶段, 随着荷载逐渐减小, 复合体的沉降量无明显变化, 表明此阶段复合体所承受的竖向荷载始终大于自恢复所产生的回弹力; 后期卸载阶段, 当竖向荷载小于 0.4 MPa 时, 沉降量随荷载的减小而减少, 当卸载完成时, 复合体无法回弹到初始状态, 说明其变形为弹塑性变形。

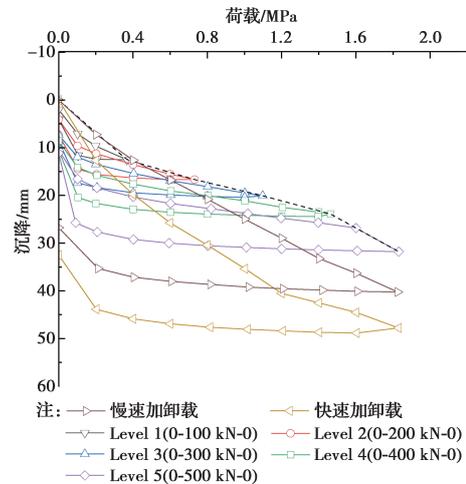


图 13 不同加载制度下的 p - s 曲线图

Fig.13 p - s curves under different loading system

从 p - s 曲线整体分析, 相同荷载作用时, 不同加载制度下, 复合体的沉降量由大到小依次为: 快速加卸载、慢速加卸载、单向往复加卸载。快速加卸载时, 每级加载完成后持载时间为 1 min , 胎内砂土未能充分流动, 砂土中应力扩散不均匀, 对轮胎产生的

侧向压力 q_r 较小, 轮胎的环箍效应未能充分发挥, 故复合体的沉降量较大。慢速加卸载时, 每级加载完成后持载时间为 5 min, 此阶段胎内砂土得以充分流动, 砂土中应力扩散充分, 砂土的径向膨胀使轮胎发生拉伸变形, 橡胶轮胎产生环箍应力作用到砂土上, 进一步增强了砂土的围压, 减少了砂土的竖向沉降。单向往复加卸载时, 复合体最终沉降量最小, 由波克罗夫斯基提出的接触理论可知, 散粒体颗粒彼此的接触不是沿着它们的整个表面, 而是单个接触点, 接触点数越多, 散粒体抵抗作用力就越大, 在该力作用下的变形越小。与另外两种加载制度相比, 单向往复加卸载下, 胎中散粒体最为密实, 颗粒间接触点数最多, 故沉降量最小。

快速加载制度下, $\Delta = 47.78$ mm、 $\Delta_i = 32.5$ mm、自恢复能力系数 $K = 0.32$; 慢速加载制度下, $\Delta = 40.26$ mm、 $\Delta_i = 26.76$ mm、 $K = 0.34$; 单向往复加卸载制度下, $\Delta = 31.8$ mm、 $\Delta_5 = 11.16$ mm、 $K = 0.65$ 。单向往复加卸载制度下复合体的自恢复性能最好。

图 14 为单向往复加卸载制度下各级沉降量图, 由图 14 可看出, 各级加载完成时, 试件的沉降量随加载等级的提高而增加, 荷载越大, 沉降量越大。已有试验表明^[5], 3 胎叠合体的极限承载力接近 6 MPa, 2 MPa 荷载前, 沉降基本呈线性变化, 与试验基本相吻合。各级卸载完成时, 试件的沉降增量随等级的提高而不断减小, 因为橡胶轮胎不是弹性材料, 每次卸载为 0 时, 塑性变形不能恢复, 即存在一定的残余变形, 随着加卸载次数的增加, 塑性变形耗尽, 所以, 经过多次加卸载后, 试件的沉降量会趋于一个定值。

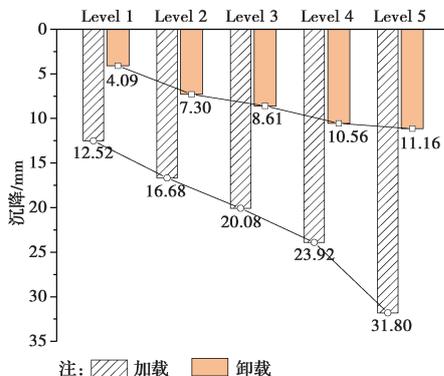


图 14 单向往复加卸载下各级沉降量图

Fig. 14 Settlement of each level under one-way reciprocating loading and unloading system

3.3 侧限约束对复合体承载能力影响

图 15 为不同侧限条件下的 $p-s$ 曲线。从单一曲线分析: 加载阶段, $p-s$ 成正比关系, 外部橡胶轮

胎与胎内散粒体发生协同变形; 前期卸载阶段, 由于竖向荷载远大于复合体自恢复回弹力, 故沉降量无明显变化; 后期卸载阶段, 随着荷载的减小, 沉降量变化逐渐明显。从整体曲线分析: 同一竖向荷载作用时, 与无侧限条件相比, 有侧限条件下, 复合体的沉降量更小。其原因是, 有侧限条件下, 复合体受荷发生膨胀变形时, 胎周土体会产生的被动土压力阻止复合体侧向变形。

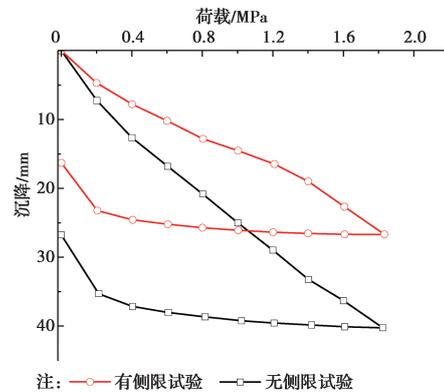


图 15 不同侧限条件下的 $p-s$ 曲线图

Fig. 15 $p-s$ curves under different confined condition

图 16 为不同侧限条件下的时间-沉降曲线图, 横坐标以卸载开始时间为起点, 纵坐标以加载最终沉降量为起点。卸载开始时, 有、无侧限条件下复合体的沉降量分别为 26.68、40.26 mm; 卸载完成后 (300 min), 复合体的弹性变形恢复, 剩余的塑性变形未能恢复, 此时, 有、无侧限条件下, 复合体的沉降量分别为 16.29、26.76 mm; 卸载完成后, 虽然外力已全部撤去, 但橡胶轮胎中仍存在部分残留的弹性势能, 散粒体之间也存在着未完全扩散的应力。随着时间的推移, 轮胎中的弹性势能转化为动能带动散粒体运动, 少部分塑性变形慢慢恢复, 待数值稳定后, 有、无侧限条件下, 复合体的最终沉降量分别为 14.67、21.66 mm。

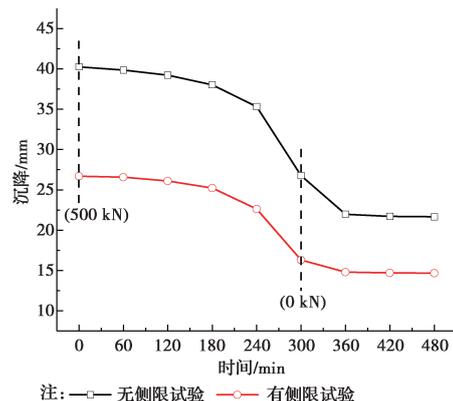


图 16 不同侧限条件下的时间-沉降曲线图

Fig. 16 Time-settlement curves under different confined condition

由表 1 可知,有、无侧限条件下,试件的自恢复能力系数分别为 0.45、0.46,两者差异较小,说明橡胶轮胎-砂土复合体的自恢复能力与胎周环境无关。

表 1 不同侧限条件下的自恢复能力

Table 1 Self-recovery under different confined condition

试验分类	加载最终沉降值/mm	卸载最终沉降值/mm	自恢复能力系数
无侧限	40.26	21.66	0.46
有侧限	26.68	14.67	0.45

图 17 为橡胶轮胎-砂土复合体与胎周土体关系图。在竖向荷载 F 作用下,复合体发生鼓胀变形,作用于胎周土体的侧向压力 q_u 产生了不可恢复的塑性变形。其原因是随着荷载开始施加并逐渐增大,侧向压力 q_u 也随之增大,胎周土体从弹性变形状态逐步进入塑性变形状态,且塑性区不断发展,当达到峰值荷载时,塑性区半径为 r_p ,复合体半径由 r_0 扩大到 r_u ;当卸去荷载时,变形的橡胶轮胎带动内部的散粒材料恢复部分形变,而胎周土体由于发生塑性变形而无法恢复到原来的状态。故复合体自恢复形变时,胎周土体并没有发挥作用。因此,柱状构造的废弃轮胎复合地基,可采用 Winkler 地基模型计算。

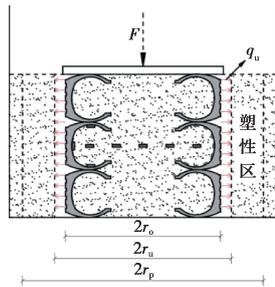


图 17 复合体与胎周土体关系图

Fig.17 Relationship between the composite and surrounding soil

3.4 荷载-径向变形关系

图 18 为不同侧限条件下的荷载-径向位移关系曲线。加载初始,胎内散粒体因竖向荷载作用被压实,主要发生竖向位移沉降,故此阶段径向位移 u_r 的数值较小,且有、无侧限条件下的荷载-径向位移曲线相互重合。当竖向荷载 F 越来越大时,胎内散粒体开始产生横向膨胀,散粒体对轮胎内壁产生的侧向压力 q_r 越来越大,橡胶轮胎发挥其环箍效应,约束散粒体横向变形。卸载阶段,从开始卸载到卸至 0.4 MPa 时,由于竖向荷载远大于复合体自恢复回弹力,故胎周位移计读数始终无明显变化;当竖向荷载小于 0.4 MPa 时,橡胶轮胎发挥其环箍作用,复合体不断恢复形变。

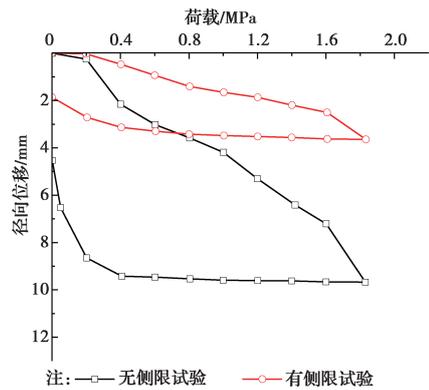


图 18 不同侧限条件下的荷载-径向位移曲线图

Fig.18 Load-radial displacement curves in different confined condition

3.5 胎体应力分布场

根据胎内壁应变片量测得到的数据绘制荷载-环向应变曲线(图 19、图 20)可以看出,荷载-应变曲线呈线性关系。因此,可以根据式(2)计算胎中应力。

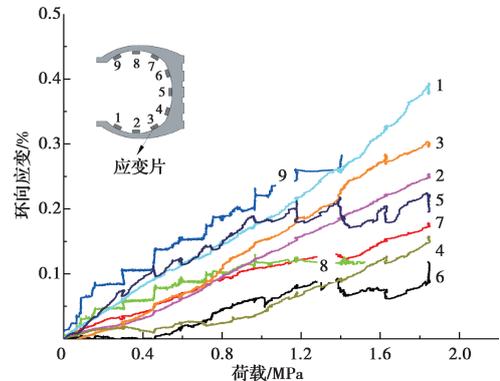


图 19 无侧限条件下荷载-环向应变曲线

Fig.19 Load-circumferential strain curves under unconfined conditions

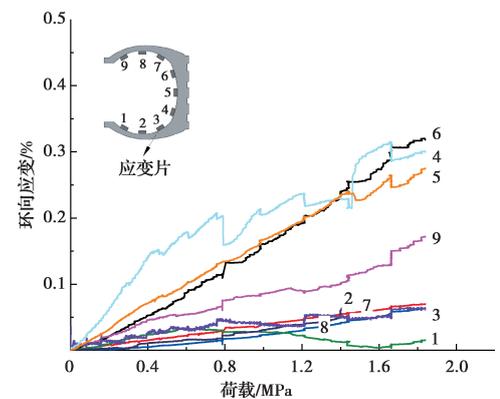


图 20 有侧限条件下荷载-环向应变曲线

Fig.20 Load-circumferential strain curves under confined conditions

利用橡胶轮胎拉伸试验测得的弹性模量,计算相同竖向荷载作用下,不同位置的应力,绘出图 21、

图 22 应力分布图(内部数字表示胎壁位置)。

图 21 为无侧限条件下轮胎各部位环向应力分布,各部位应力均随着竖向荷载增大而增大,其中,9号与1号位置的应力最大,在轮胎边缘处,由于应力集中,环向应力较大。胎壁侧5号位置既要承受上部荷载,又要承受内部散体材料的侧向挤压作用,因此,其应力值仅次于9号和1号。图 22 为有侧限条件下轮胎各部位环向应力分布,胎壁环向应力相对较大,随着竖向荷载的增大,胎壁各处应力在胎周土体的约束作用下趋于等值。上、下胎侧处应力值较小,由于胎周土体对复合体产生被动土压力,抑制复合体发生形变。

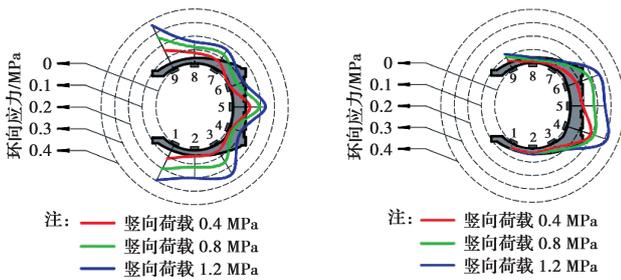


图 21 无侧限条件下
环向应力分布

图 22 有侧限条件下
环向应力分布

Fig.21 Circumferential stress distribution under unconfined conditions Fig.22 Circumferential stress distribution under confined conditions

3.6 胎体内土应力分布规律

图 23 为同一径向平面上竖向荷载-土应力关系曲线,胎内土应力随荷载整体呈线性变化。同一荷载作用下,胎内中心处土应力始终小于两侧散粒体的土应力,说明橡胶轮胎发挥了环箍效应,距离复合体中心处越近,受橡胶轮胎环箍效应的影响越小,土应力值越大。

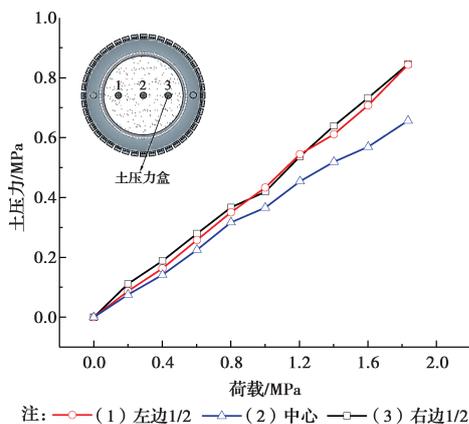


图 23 竖向荷载-土应力关系曲线

Fig.23 relationship between vertical load and soil stress

4 结论

1)废弃橡胶轮胎-砂土复合体复合地基,依靠橡胶轮胎的环箍效应可形成较好的承载体,能满足村镇建筑对地基承载力的要求。

2)废弃橡胶轮胎-砂土复合体的承载能力与加载制度有关。与快速加载及慢速加载相比,单向往复加卸载条件下,复合体的沉降量最小,自恢复能力和承载能力最优。

3)废弃橡胶轮胎-砂土复合体的承载能力与胎周环境有关。有侧限条件下,复合体的承载性能较好,但复合体的自恢复能力与胎周环境无关。

4)废弃橡胶轮胎-砂土复合体承受上部荷载时,轮胎内壁不同位置处的环向应力各不相同,有无侧限条件下的应力分布规律也不同。

5)废弃橡胶轮胎-砂土复合体中橡胶轮胎的环箍效应具有一定的影响范围,即同一径向平面上,距离复合体中心处越近,受橡胶轮胎环箍效应的影响越小,土应力值越大。

参考文献:

- [1] 杨广巍. 我国废轮胎循环利用现状研究[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2018(1): 42-47.
YANG G W. Research on recycling status of waste tires in China[J]. China Tire Resources Recycling, 2018(1): 42-47. (in Chinese)
- [2] TSAI W T, CHEN C C, LIN Y Q, et al. Status of waste tires' recycling for material and energy resources in Taiwan[J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2017, 19(3): 1288-1294.
- [3] GARGA V K, O'SHAUGHNESSY V. Tire-reinforced earthfill. Part 1: Construction of a test fill, performance, and retaining wall design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 75-96.
- [4] O'SHAUGHNESSY V, GARGA V K. Tire-reinforced earthfill. Part 2: Pull-out behaviour and reinforced slope design[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 97-116.
- [5] 王凤池, 高寰, 张倍川, 等. 内填散体材料废弃轮胎叠合体承载能力研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(1): 72-77.
WANG F C, GAO H, ZHANG B C, et al. Bearing capacity of composite columns of waste tires filled with granular material[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016, 14(1): 72-77. (in Chinese)

- [6] 王凤池, 兰海洋, 董明, 等. 轮胎桩单桩复合地基承载力的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(5): 1289-1295.
WANG F C, LAN H Y, DONG M, et al. Experimental study on the bearing capacity of the rubber tires pile composite foundation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(5): 1289-1295.(in Chinese)
- [7] 鲁洋, 刘斯宏, 张雨灼, 等. STC 加筋砂水平循环剪切与竖向激振特性试验研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 494-499.
LU Y, LIU S H, ZHANG Y Z, et al. Experimental study on horizontal cyclic shear and vertical excitation behavior of STC reinforced sand[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(2): 494-499. (in Chinese)
- [8] 王耀明, 鲁洋, 王涛, 等. 不同填充材料的 STC 加筋体水平循环剪切试验及数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 117-122.
WANG Y M, LU Y, WANG T, et al. Experimental and numerical study of scrap tire columns filled with different geomaterials under cyclic shear[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(1): 117-122.(in Chinese)
- [9] 李丽华, 崔飞龙, 肖衡林, 等. 轮胎与格室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)
- [10] DJADOUNI H, TROUZINE H, GOMES CORREIA A, et al. Life cycle assessment of retaining wall backfilled with shredded tires [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2019, 24(3): 581-589.
- [11] SHRESTHA S, RAVICHANDRAN N, RAVEENDRA M, et al. Design and analysis of retaining wall backfilled with shredded tire and subjected to earthquake shaking [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 90: 227-239.
- [12] ZORNBERG J G, CABRAL A R, VIRATJANDR C. Behaviour of tire shred-sand mixtures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(2): 227-241.
- [13] REDDY S B, KRISHNA A M. Recycled tire chips mixed with sand as lightweight backfill material in retaining wall applications: an experimental investigation [J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2015, 1(4): 31.
- [14] WANG F C, SONG W. Effects of crumb rubber on compressive strength of cement-treated soil [J]. Archives of Civil Engineering, 2015, 61(4): 59-78.
- [15] WANG F C, PING X W, ZHOU J H, et al. Effects of crumb rubber on the frost resistance of cement-soil [J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 120-132.
- [16] 何俊, 李勇, 阮晓晨. 废旧轮胎胶粉-黏土混合土的强大性质[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(Sup2): 4366-4372.
HE J, LI Y, RUAN X C. Strength properties of ground rubber of waste tire and clay mixtures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup2): 4366-4372.(in Chinese)
- [17] 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(Sup2): 361-368.
ZHANG Z F, LIU S Y, CAI G H, et al. Research progress of scrap tires used in road engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(Sup2): 361-368.(in Chinese)

(编辑 邓云)