

废弃轮胎-砂构造地基滞回曲线分析

聂晓梅^{1,2}, 王凤池¹, 赵晗宇¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳大学建筑工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

摘要 目的 分析废弃轮胎-砂构造地基的抗震性能,探索废弃轮胎-砂构造地基用于村镇建筑地基的可行性。方法 通过低周反复加载试验研究轮胎空间组砌形式和轮胎埋深对废弃轮胎-砂构造地基滞回曲线的影响,得到构造地基内各层轮胎的滞回曲线分布规律。结果 废弃轮胎-砂构造地基内每层轮胎的滞回曲线饱满,不同轮胎空间组砌形式对构造地基的抗震性能有较大影响,构造地基内各层轮胎的耗能情况不同;构造地基中每层轮胎的滞回曲线的倾斜程度 k 随着水平荷载的增加而衰减,每层轮胎的滞回曲线的饱满程度 s 随着水平荷载的增大逐渐增大;试件在加、卸载阶段的3个拟合参数演化趋势类似。结论 轮胎-砂构造地基的整体抗震性能和塑性变形能力强,轮胎和砂土在地基中能较好的共同工作,参与耗能。

关键词 废弃轮胎;轮胎-砂构造地基;滞回曲线;耗能

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Analysis on Hysteresis Curve of Scrap Tire-Sand Composite Foundation

NIE Xiaomei^{1,2}, WANG Fengchi¹, ZHAO Hanyu¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Shenyang University, Shenyang, China, 110044)

Abstract: This paper examines the seismic performance of scrap tire-sand composite foundation, and explores the feasibility of scrap tire-sand composite foundation used in rural building foundation. Laboratory tests are conducted to preliminarily study the influence of tire space assembly form and tire depth on the hysteretic curve of scrap tire-sand composite foundation, and the distribution law of hysteretic curve of tires in each layer of composite foundation is obtained. The results show that the hysteretic curve of tires in each layer of composite foundation is full; The different tire space assembly forms have great influence on the seismic performance of the composite foundation; The energy dissipation of tires in each layer of composite foundation is different. The overall slope k of the hysteretic curve of each layer of tire in the foundation

收稿日期:2021-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51578348);辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1802018);辽宁省高等学校创新团队项目(LT2019011)

作者简介:聂晓梅(1986—),女,博士研究生,主要从事地基处理方面研究。

decreases with the increase of the horizontal load, and the plumpness s of the hysteretic curve of each layer of tire gradually increases with the increase of the horizontal load. The evolution trend of the three fitting parameters is similar in the loading and unloading stages. The overall seismic performance and plastic deformation ability of the scrap tire-sand composite foundation are well. The tire and sand can work together in the foundation and participate in energy dissipation.

Key words: scrap tire; scrap tire-sand composite foundation; hysteretic curve; energy dissipation

废弃轮胎不容易生物降解,每年废弃橡胶轮胎储存的增加是一个严重的环境问题,其积累会导致严重的环境失衡和经济资源浪费,再利用废弃轮胎已迫在眉睫^[1]。目前,国内外对废弃轮胎的再利用方式主要为将其二次加工成橡胶轮胎颗粒和橡胶轮胎碎片,然后与土壤材料等混合在土工应用中使用^[2],或者将完整轮胎用于边坡、景观设计等领域。然而,对轮胎的二次加工会造成一定的资源浪费和经济损失,完整轮胎的再利用情况却很低。

另外,将废旧轮胎简易加工成废旧轮胎隔震垫或者废旧轮胎原形直接使用,如 H. K. Mishra 等^[3]采用拟动力试验和数值模拟相结合的方法,验证了废旧轮胎橡胶垫隔震结构的抗震性能。A. Laura 等^[4]通过回收的汽车轮胎来实现一个新的垫层,以取代结构下的大面积周围土壤。鲁洋等^[5]初步探究废弃轮胎叠合体作为基础减隔振材料的可行性。王耀明等^[6]研究了不同填充材料对废旧轮胎加筋体剪切性能的影响。试验结果表明内填散体材料主要起“消能”作用,废弃轮胎则主要起“加筋”作用。王凤池等^[7]通过试验和理论分析,推导出轮胎对内填砂土的环向应力与竖向荷载的函数关系。

近几年,地震后村镇地区的房屋倒塌受损的问题逐渐引起了有关部门的关注,轻微地震就能引发房屋的重大经济损失,增强村镇地区房屋的抗震性能,已成为目前的村镇建筑急需解决的一个难题^[8]。目前,大多数抗震系统的应用仅限于城市建筑和少数村镇关键建筑,如医院、学校等。同时,对于住房不健全的农村地区来说,地震期间结构安全的重要性

往往被忽视或几乎没有得到重视^[9]。目前村镇建筑的安全问题需要引起足够关注^[10],针对村镇建筑进行地基处理而改变其抗震性能的研究较少,而利用废弃轮胎加固村镇建筑地基从而改变其抗震性能的研究几乎没有。鉴于此,笔者将废弃轮胎-砂构造地基应用于村镇建筑地基,通过改善地基基础来达到抗震效果,此方法值得深入研究,以其结果为研究废弃轮胎处理村镇建筑地基基础提供参考。研究表明:这种抗震技术使用轮胎-土壤混合物来降低结构对地震的反应,不仅可以为欠发达地区的建筑提供经济的安全结构,而且还可能消耗大量的废弃轮胎。

1 试验概况

试验共计3组轮胎-砂构造地基,地基长 \times 宽 \times 高为 $1.25\text{ m}\times 1.25\text{ m}\times 0.4\text{ m}$ 。试验是在一矩形钢制模型箱中进行的,模型箱的长 \times 宽 \times 高为 $2\text{ m}\times 2\text{ m}\times 1.6\text{ m}$,钢板厚度为 10 mm 。选用的废弃轮胎为生活中常用的尺寸,轮胎外形完整(见图1(a)),轮胎表面无明显破损,轮胎的外径、内径和高度依次为 250 mm 、 234 mm 和 70 mm 。轮胎的最大弹性模量为 3.6 MPa ,泊松比为 $0.28^{[11]}$ 。本研究使用了福建标准砂(见图1(b)),其泊松比为 0.33 ,弹性模量为 200 MPa ,含水量为 10% 。根据土工试验标准^[12],在试件制作过程中用自制的振捣锤对砂土进行振捣填充^[13],轮胎内使用标准砂,轮胎间和轮胎-砂构造地基周围使用建筑砂。构造地基的内部由五层组成,每层含 5×5 轮胎-砂单元体(图1(c)),使用的轮胎总数为125个。试验的具体设计参数如表1所示。



图1 试验材料

Fig. 1 Test materials

表1 试验设计参数

Table 1 Design parameters of specimens			
试件编号	竖向应力/kPa	组砌形式	附加横向联系
F1	200	柱状叠合	无
F2	200	单向错缝	无
F3	200	双向错缝	无

本试验的加载板用 40 mm 厚的钢板焊制而成。使用垂直液压千斤顶在试件上施加竖向荷载。通过一个横向液压执行机构将水平荷载施加到加载板端部。试验过程中,在构造地基模型的每层轮胎侧面通过位移计测量各层轮胎的水平位移,在加载板顶端四个边角放置位移计测量地基沉降。试验的加载装置如图 2 所示。



图2 加载装置

Fig. 2 Testing apparatus

在试验过程中,按照试验规程(JGJ 101—1996)^[14],加载分两个阶段进行(见图 3):第一阶段,施加竖向荷载,加载至试验设计的初始竖向荷载值后持载,依据竖向位移计的读数,待试件沉降稳定后开始施加水平荷载;第二阶段,水平荷载采用力-位移双控

原则施加。力控制阶段,每级 20 kN,往复循环一次,直至试件屈服并记录屈服位移(Δ_y)。试件屈服后加载方式改为位移控制加载,控制位移 $\Delta = \Delta_y$,级距为 1 倍 Δ ,每级循环两次。当试件的水平承载力下降至峰值荷载的 85% 或者试件的水平位移大于试件水平尺度的 10% (125 mm),停止试验。

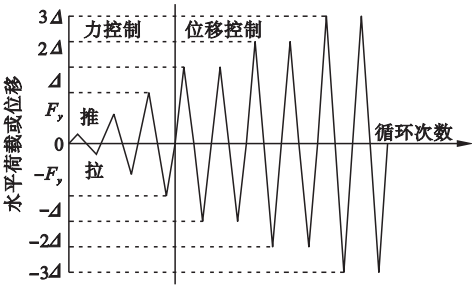


图3 水平荷载加载方式

Fig. 3 Loading mode of lateral load

2 构造地基的滞回曲线

滞回曲线的形态特征包含了试件的变形、刚度变化和能量耗散等动力特性情况,因此对试件的滞回曲线进行分析具有重要的意义。编号 F1-1 代表试件 F1 的地基中的第一层轮胎,其余试件编号所表示的含义同上。图 4~图 6 给出了试验所得的各个构造地基内每层轮胎的滞回曲线。

由图可以看出:各构造地基内第一层轮胎的受力过程都经历了弹性、带滑移工作和破坏 3 个阶段。各层轮胎的滞回曲线比较饱满,结构的塑性变形能力较强,抗震性能和耗能能力良好。

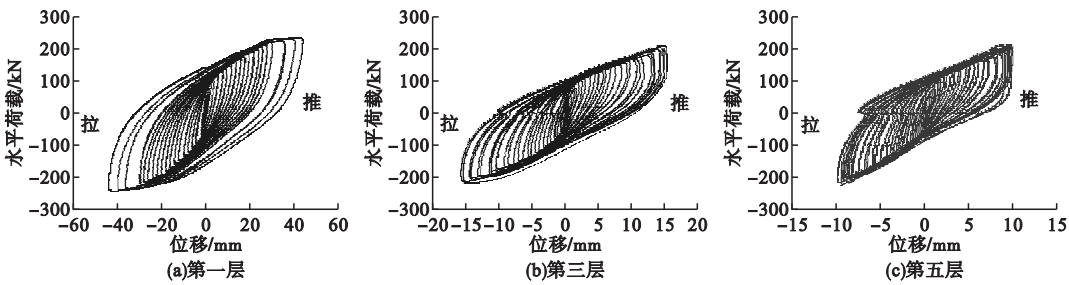


图 4 试件 F1 滞回曲线

Fig. 4 Hysteretic curve of specimen F1

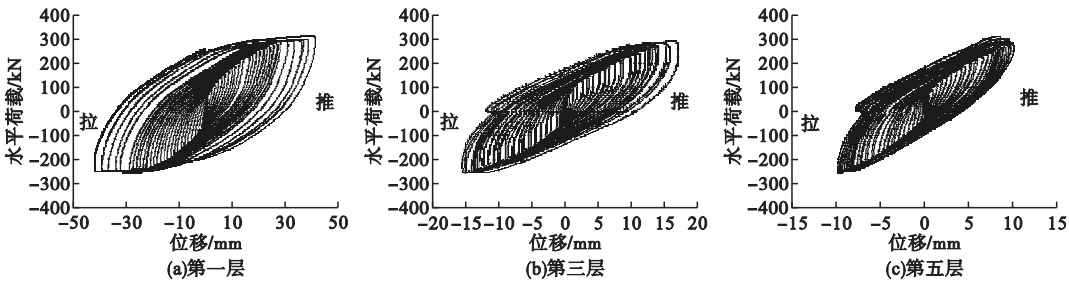


图 5 试件 F2 滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic curve of specimen F2

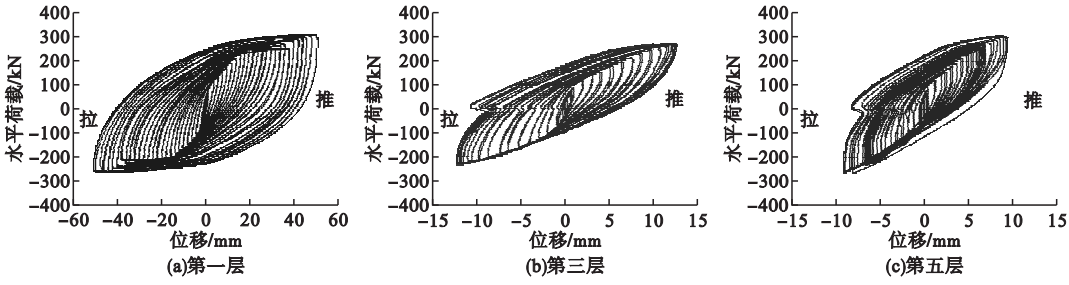


图 6 试件 F3 滞回曲线

Fig. 6 Hysteretic curve of specimen F3

地基内每层轮胎的峰值荷载相差不大,水平位移和耗能随着层深由浅及深逐渐减小。试件最终破坏时,3 个地基内第一层轮胎的整体水平位移都超过 40 mm,第三层和第五层轮胎的水平位移都在 15 mm 和 10 mm 左右。试件 F3 的第一层轮胎的破坏位移最大,第五层轮胎的破坏位移最小,说明轮胎双缝搭接的埋置方式,有利于地基内各层轮胎参与耗能。

随着轮胎错缝搭接维度的增大,试件的水平承载能力越大,地基耗能能力越大,说明增加轮胎间的搭接方式,增大轮胎间的附属

联系,有利于地基的“加筋”作用^[15]。

3 构造地基的滞回曲线形态变化特征

为进一步描述地基内各层轮胎的滞回曲线的变化形态随荷载的变化规律,参考文献 [16] 的研究方法,引入曲线的倾斜程度 k 和饱满程度 s 两个定量参数(见图 7)。如图 7 所示,滞回曲线两端点 A_n 和 B_n 的荷载差值 $(F_B - F_A)$ 与其对应的位移差值 $(D_B - D_A)$ 的比值 k 表示滞回曲线的倾斜程度。加载过程中,一个循环滞回圈的饱满程度 s 为任一

滞回圈的面积。

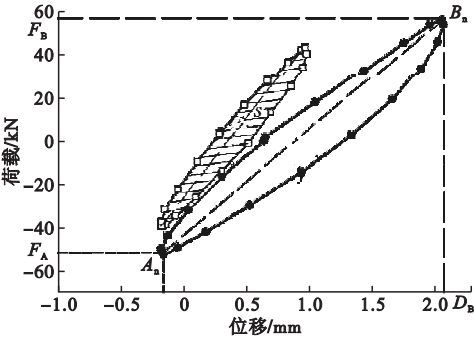


图7 滞回曲线定量参数示意图

Fig. 7 Schematic diagram of quantitative parameters of hysteresis curve

3.1 滞回圈的倾斜程度 k 的变化

滞回曲线的倾斜程度越小,代表刚度越小,弹性模量越低,因此研究各试件的滞回曲线的 k 值对地基抗震性能研究至关重要。各试件中每层轮胎的滞回曲线的倾斜程度 k 随水平荷载的变化关系曲线,如图8所示。

由图8可知,构造地基中每层轮胎的滞回曲线的整体斜率随着水平荷载的增加而衰减,在水平荷载达到150 kN前衰减较快,后期衰减速率逐渐减弱,最后趋于平缓;试件的刚度随着水平荷载的增加逐渐降低,尤其是在试件屈服之后,轮胎间出现滑移,试件的

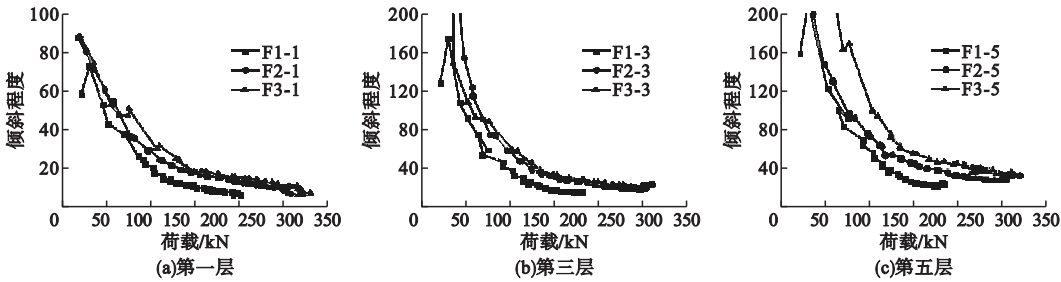


图8 滞回曲线的倾斜程度 k 随水平荷载的变化关系曲线

Fig. 8 The inclination degree k of hysteretic curve with changing horizontal load

刚度衰减越来越明显;随着轮胎埋置深度由浅及深,底层轮胎的滞回曲线的整体倾斜程度曲线一直位于浅层轮胎的上方。

轮胎的错缝埋置搭接有利于延缓地基中每层轮胎的刚度减小速度;试件F2和试件F3的峰值荷载明显比试件F1大,并且各试件破坏时,试件F2和试件F3地基内各层轮胎的最终 k 值要大于试件F1的 k 值,说明轮胎错缝搭接,增大了轮胎-砂构造地基的整体刚度,这主要是由于轮胎错缝搭接增大了构造地基整体的稳定性。

3.2 滞回圈的饱满程度 s 的变化

滞回圈的饱满程度越大,此1个循环内材料耗能越大。滞回曲线的饱满程度 s 随水平荷载的变化情况,如图9所示。

由图9可知,各试件的每层轮胎的滞回曲线的饱满程度 s 随着水平荷载的增大逐渐

增大;构造地基内各层轮胎的耗能情况不同,随着轮胎埋置深度由浅及深,此层轮胎的滞回圈的饱满程度越小,即耗能越小;第一层轮胎的耗能远大于其他层的轮胎,第三到第五层轮胎的耗能前期相差不大,后期浅层轮胎参与更多耗能。

由图可知,轮胎搭接维度改善了地基内各层轮胎的耗能能力。试验前期,各试件的滞回曲线饱满程度 s 平缓发展,能量耗散少;水平荷载超过100 kN之后,试件中每层轮胎的单个循环内的耗能逐渐增大,试件F3的耗能增长速度最快;试件F2和试件F3的每层轮胎的滞回曲线的饱满程度在水平荷载达到225 kN前,有一段重合,后期试件F3的饱满程度更好,这说明轮胎双缝搭接的埋置方式,有利于地基内各层轮胎参与耗能。

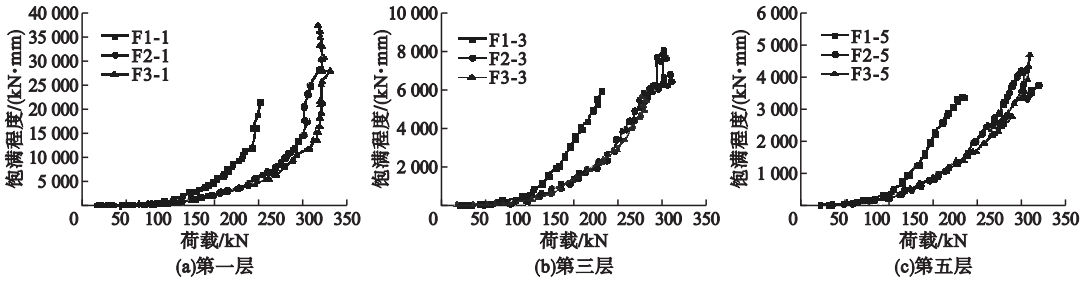


图 9 滞回曲线的饱满程度 s 随水平荷载的变化关系曲线

Fig. 9 The fullness s of hysteresis curve with changing horizontal load

4 构造地基的滞回曲线演化规律

为进一步描述地基内各层轮胎的滞回曲线的演化规律,参考文献[17]的研究方法,将滞回曲线分为加载段和卸载段,并根据两个阶段的变化趋势,引入二次方程进行拟合:

$$F=A\mu^2+B\mu+C.$$
 (1)

式中: F 为水平荷载; μ 为水平位移; A 、 B 和 C 为拟合参数。

图 10 给出了各加卸载阶段拟合参数 A 、

B 和 C 随循环次数变化的趋势。由图可知,试件 F1 和试件 F2 的各拟合参数的变化从第 15 次循环起逐渐稳定;第一层轮胎的 3 个拟合参数相对于其他层轮胎波动幅度明显最小;随着轮胎埋置深度由浅及深,此层轮胎的 3 个拟合参数的波动趋势更加明显;试件 F1 和试件 F2 的 3 个拟合参数的趋势变化情况类似,因此试件在加、卸载阶段的 3 个拟合参数演化趋势类似。说明轮胎-砂构造地基的整体抗震性能和塑性变形能力强,此轮胎和砂土在地基中能较好的共同工作,参与耗能。

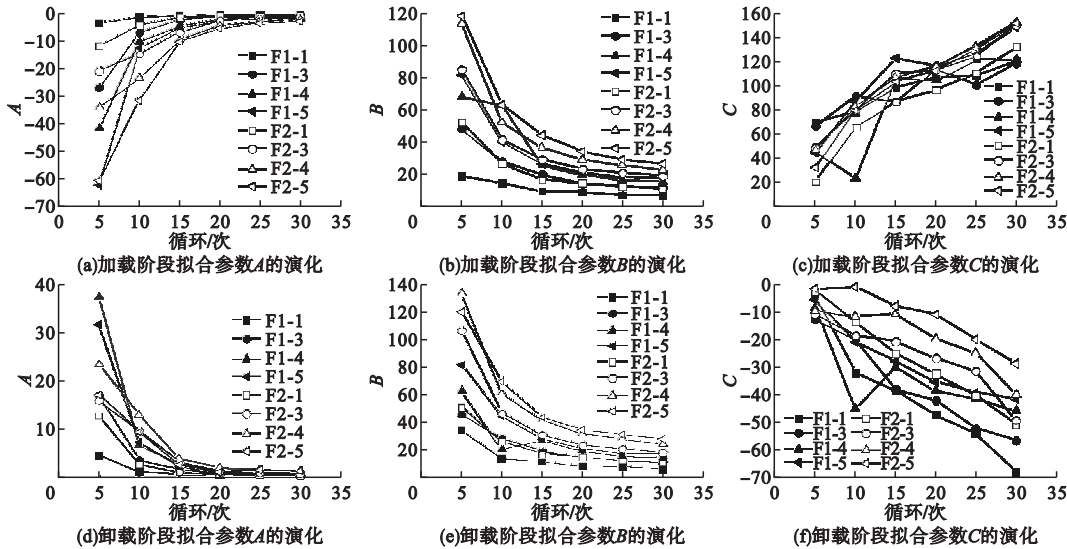


图 10 试件 F1 和 F2 的拟合参数随循环次数的变化规律

Fig. 10 The fitting parameters of specimen F1 and F2 with different cycles

5 结 论

(1)构造地基内各层轮胎的滞回曲线比较饱满,结构的塑性变形能力较强,抗震性能和耗能能力良好,轮胎双缝搭接的埋置方式,

有利于地基内各层轮胎参与耗能。

(2)地基内每层轮胎的峰值荷载相差不大,水平位移和耗能随着层深由浅及深逐渐减小;构造地基中每层轮胎的滞回曲线的整体倾斜程度 k 随着水平荷载的增加而衰减,

每层轮胎的滞回曲线的饱满程度 s 随着水平荷载的增大逐渐增大。

(3) 轮胎错缝搭接, 增大了轮胎-砂构造地基的整体刚度; 试件在加、卸载阶段的 3 个拟合参数演化趋势类似; 轮胎-砂构造地基的整体抗震性能和塑性变形能力强, 此轮胎和砂土在地基中能较好的共同工作, 参与耗能。

参考文献

- [1] MADHUSUDHAN B R, BOOMINATHAN A, BANERJEE S. Factors affecting strength and stiffness of dry sand rubber tire shred mixtures [J]. *Geotechnical and geological engineering*, 2019, 37(2): 1-18.
- [2] PITILAKIS K, KARAPETROU S, TSAGDI K. Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber-sand mixtures [J]. *Soil dynamics & earthquake engineering*, 2015, 79: 237-252.
- [3] MISHRA H K, IGARASHI A. Experimental and analytical study of scrap tire rubber pad for seismic isolation [J]. *International journal of civil and environmental engineering*, 2012, 6(2): 107-113.
- [4] LAURA A, ANTONIO B, GIUSEPPE D. Mechanical characterization of recycled tire rubber to be used as seismic isolation of the structure [J]. *IABSE symposium report*, 2014, 102(22): 1125-1131.
- [5] 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 Yang, LIU Sihong, ZHANG Yuzhuo, 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.)
- [6] 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 Yaoming, LU Yang, WANG Tao, 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.)
- [7] 王凤池, 田裴裴, 冯旭宁, 等. 废弃橡胶轮胎构造地基有限元分析 [J]. *沈阳建筑大学学报 (自然科学版)*, 2019, 35(5): 867-874.
(WANG Fengchi, TIAN Peipei, FENG Xuning, et al. Finite element analysis on construction foundation by waste rubber tire [J]. *Journal of Shenyang jianzhu university (natural science)*, 2019, 35(5): 867-874.)
- [8] 宣彦波. 村镇建筑地震破坏调查与抗震设计实践 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
(XUAN Yanbo. Destruction investigation of villages earthquake and practice of seismic design [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.)
- [9] 刘挺, 张平顺, 雷静, 等. 村镇建筑抗震设防与建造习惯调查研究 [J]. *建筑结构*, 2017, 47(增刊 1): 583-585.
(LIU Ting, ZHANG Pingshun, LEI Jing, et al. Investigation and research on seismic performance and construction habits for rural buildings [J]. *Building structure*, 2017, 47(S1): 583-585.)
- [10] 王凤池, 田裴裴, 刘甜甜. 废弃橡胶轮胎-砂土复合体的承载试验研究 [J]. *土木与环境工程学报 (中英文)*, 2020, 42(1): 39-47.
(WANG Fengchi, TIAN Peipei, LIU Tianian. Experimental study on the load bearing capacity of waste rubber tire sand composite [J]. *Journal of civil and environmental engineering*, 2020, 42(1): 39-47.)
- [11] 刘甜甜. 废弃橡胶轮胎环箍散体材料承载机理研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
(LIU Tianian. Research on bearing mechanism of waste rubber tire ring-hoop bulk material [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
(Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method: GB/T 50123-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.)
- [13] WANG F C, NIE X M, HU H M, et al. Dynamic performance of tire-granular material composite foundation subjected to axial and low frequency horizontal cyclic reversed loadings [J]. *European journal of environmental and civil engineering*, 2020 (51): 1-29.
- [14] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101-1996 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
(China Academy of Building Research. Specification of testing methods for earthquake resistant building: JGJ 101-1996 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997.)
- [15] 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.
- [16] 黄娟, 彭立敏, 袁铁映, 等. 分级加载条件下泥炭质土滞回曲线演化规律试验研究 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2018, 49(7): 1753-1759.
(HUANG Juan, PENG Limin, YUAN Tieying, et al. Experimental study on evolution law of hysteretic curves of peaty soil under stepped axial cyclic loading [J]. *Journal of central south university (science and technology)*, 2018, 49(7): 1753-1759.)
- [17] 许江, 杨秀贵, 王鸿, 等. 周期性载荷作用下岩石滞回曲线的演化规律 [J]. *西南交通大学学报*, 2005(6): 754-758.
(XU Jiang, YANG Xiugui, WANG Hong, et al. Evolution law of hysteresis curve of rock under cyclic loading [J]. *Journal of southwest jiaotong university*, 2005(6): 754-758.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)