

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.02.001

土工袋中橡胶砂的隔震效应数值模拟分析

王 将, 刘方成, 周本强, 曾湘华, 戈瑞瑞

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 利用计算平台 MSC. Marc 建立三维整体结构的有限元分析模型, 对土工袋隔震效应进行数值模拟计算, 研究了坚硬场地土工袋中橡胶砂配比和土工袋隔震层高度对上部结构隔震效果的影响。结果表明: 土工袋中橡胶颗粒配比越大, 隔震效果越好, 但是随着橡胶含量的持续增加, 隔震效果减弱, 并发现橡胶颗粒作为隔震材料的最佳添加质量分数为 30%; 随着土工袋隔震层厚度的增加, 隔震效果越明显, 但是考虑到工程造价等问题, 土工袋隔震层在本实验工况条件下的最佳高度为 500 mm。研究表明, 土工袋橡胶砂隔震层是一种具有良好隔震效果、廉价环保的新型基础隔震方法, 适用于建筑成本较低的村镇房屋。

关键词: 橡胶砂; 土工袋; 隔震效应; 数值模拟

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2023)02-0001-08

引文格式: 王 将, 刘方成, 周本强, 等. 土工袋中橡胶砂的隔震效应数值模拟分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(2): 1-8.

Numerical Simulation Analysis of the Isolation Effect of Rubber Sand in Geo-Bags

WANG Jiang, LIU Fangcheng, ZHOU Benqiang, ZENG Xianghua, GE Ruirui

(College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: By using the computing platform MSC. Marc, a finite element analysis model has thus been established of the three-dimensional overall structure, followed by a numerical simulation calculation conducted on the seismic isolation effect of geo-bags, as well as a study on the influence of rubber sand ratio in geo-bags and the height of geo-bag isolation layer on the seismic isolation effect of superstructure. However, the isolation effect is weakened with the continuous increase of rubber content. It is found that the optimum mix proportion of rubber particles as isolation material is 30%; with the increase of the thickness of the geo-bag isolation layer, it is characterized with a more obvious isolation effect. However, with the project cost and other factors taken into consideration, the optimal height of the geo-bag isolation layer under this experimental condition is 500 mm. This study shows that, as a new type of base isolation method, the geo-bag rubber sand isolation layer is characterized with such advantages as good isolation effect, low cost and environmental protection, which is suitable for houses in villages and towns with a low construction cost.

Keywords: rubber sand; geo-bag; isolation effect; numerical simulation

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ6073); 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目 (21A0357)

作者简介: 王 将 (1998-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为橡胶砂岩土隔震,

E-mail: 1309224565@qq.com

通信作者: 刘方成 (1978-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要研究方向为土动力特性, 土-结构动力相互作用及岩土隔震, E-mail: fcliu@hut.edu.cn

0 引言

基础隔震方法自 20 世纪 60 年代提出以来,已成为最具有代表性的隔震新技术,为结构设计和工程抗震提供了新思路^[1]。社会经济高速发展的同时,也给环境带来了不少危害,其中包括废旧轮胎的大量堆积,如何高效利用这些废旧橡胶已成为一个热门话题。相比于纯砂,废旧轮胎橡胶颗粒具有轻密度、低模量、高弹性的特点,被广泛应用于塑胶跑道、路基回填及挡土墙中^[2]。已有研究^[3-5]表明,橡胶砂具有良好的减震性能,是一种廉价的耗能材料^[6-8]。

K. Trevoretal^[9]、S. Youwai^[10]等将橡胶颗粒作为填充材料填置于主、被动挡土墙,通过数值模拟分析得出,使用橡胶颗粒可以减小挡土墙残余位移和地震引起的作用力。S. Tafreshi 等^[11]向地基下面的土壤添加橡胶碎块,试验结果显示最佳配合比、最佳隔震层厚度时的垫层承载能力最大。B. R. Madhusudhan 等^[12]通过循环三轴试验,研究了用于低层建筑基础隔震的砂-橡胶轮胎碎片混合物的特性,得出砂-橡胶轮胎碎片比例为 9:1 的混合物即可满足低层建筑隔震所需的动态特性。郑森等^[13]进行了 1:10 的自由场试验和橡胶砂垫层隔震振动台试验,以此分析橡胶砂垫层的隔震效果,结果表明层状剪切箱可很好地解决平面内的边界效应。Ding Y. 等^[14]通过固结不排水单调和循环三轴试验研究粒化橡胶砂混合料作为新型填料的静态和动态特性,发现橡胶颗粒添加质量分数小于 20% 即可满足与剪切刚度相关的工程要求。

土工袋是将淤泥、砂石、建筑垃圾等物料倒入袋内后所形成的袋状物。近几年,土工袋受到越来越多专家、学者的关注,土工袋的抗压性能和减震性能均较好,在防洪、路基、边坡等^[15-16]方面得到了广泛的使用。刘斯宏等^[17]开展土工袋挡墙大型振动台模型试验,对其地震动力响应特征进行了研究,发现土工袋挡墙在地震时通过自身的变形消散了大部分的动能,整体结构的基础频率随输入地震动峰值加速度的提高而降低,在连续振动作用下,土工袋挡墙的累积残余水平位移较小,在 0.6g 的输入地震动作用下,最大累计位移仅为墙高的 0.29%,说明其抗震能力很强。郑玉风等^[18]应用振动台试验方法,以刚性质量块代替上部结构,研究土工袋加筋橡胶砂垫层的隔震效应,发现该垫层的隔震效应要优于纯砂垫层和橡胶砂垫层,综合考虑隔震效果和经济效益分析,垫层厚度为 21 cm、土工袋填充率为 60% 是比较理想的垫层参数。黄波等^[19]在此常规加筋土“等效围压理论”基础上研究了编织袋张力对袋子内部土体强度和剪

胀特性的影响,发现经编织袋加固后的土体剪缩现象更为明显。A. Sadr 等^[20]通过研究发现用土工袋包裹颗粒土可以明显改善其承载力。

国内外关于橡胶砂的隔震性能已有一些研究,但尚未有涉及橡胶砂的三维数值模型分析,因此,本文以村镇低矮房屋隔震为取向,在场地条件和上部结构不变的情况下,在 MSC. Marc 的基础上建立整体结构的非线性有限元模型,研究土工袋橡胶颗粒配比和土工袋厚度对土工袋隔震层隔震效果的影响,以期为后续相关研究和工程应用提供参考。

1 土工袋隔震体系的有限元模型

1.1 模型的建立

采用 Marc 有限元程序,模型的建立基于土工袋大型振动台隔震试验^[18]。在模型试验中场地土宽度需大于 5 倍基础宽度,以减小边界效应给试验带来不利影响,则基础宽度采用 20 m,相应的场地土长度为 100 m,场地土深度为 10 m,基础为浅埋刚性基础,其埋置深度为 1.0 m。土工袋橡胶砂复合隔震装置近似地采用 Patran 四面体网格单元,上部结构使用 1:2 缩尺比例设计砌体结构模型,其有效高度为 3 m,结构自重为 150 kN。在刚性基础和场地土之间填入土工袋作为隔震层,其厚度为变值。因基于振动台试验模拟,故设置土工袋与橡胶砂之间、土工袋与土工袋之间为粘结关系,而上部结构与隔震层之间存在摩擦,摩擦因数设为 0.8。本文有限元三维模型及剖面图如图 1 所示。

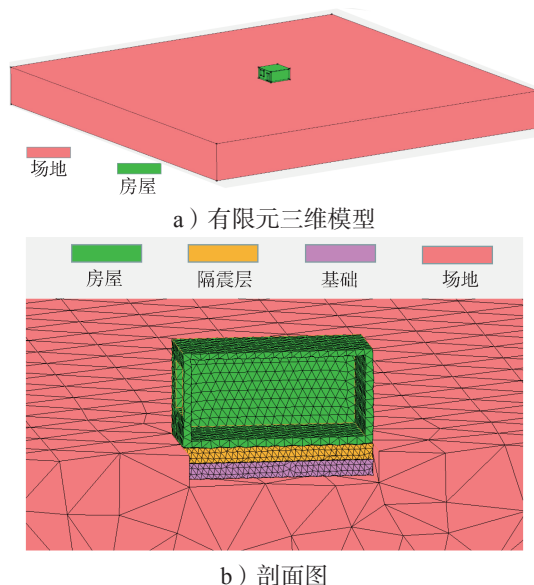


图 1 土工袋隔震体系有限元模型及剖面图

Fig. 1 Finite element model and section of the geo-bag isolation system

1.2 土工袋中橡胶砂材料特性

根据已有文献研究^[21-22]建议, 选择添加质量分数为 30% 的橡胶砂作为隔震垫层材料, 其非线性动剪模量和阻尼比特性参考文献 [23] 的试验曲线, 如图 2 所示。

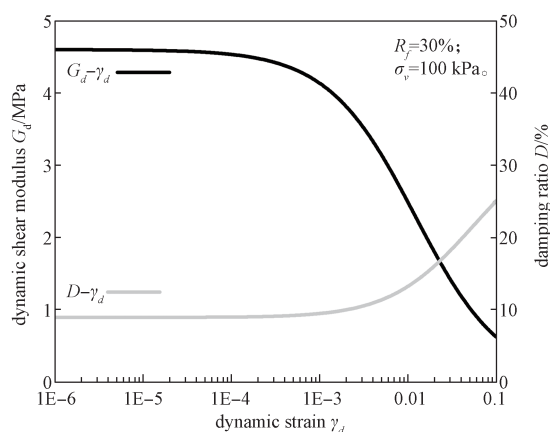


图 2 橡胶砂动力特性曲线

Fig. 2 Dynamic properties of rubber sand

由图 2 可知, 当基底应力增大时, 橡胶砂的最大动剪切模量也随之增大, 动态模量比曲线向右侧移动, 表明模量随动剪应变的增大而减小, 而阻尼比曲线随之下落。普通多层房屋的基底应力一般在 50~150 kPa 以内, 计算过程中为了提高运算效率, 只考虑 100 kPa 的基底应力, 从而进一步研究不同的橡胶颗粒配比和土工袋垫层厚度对复合垫层隔震效应的影响。

在设置材料属性时, 橡胶砂的泊松比根据文献 [24] 取值 0.35, 利用基于阻尼的界面模型^[25]模拟橡胶砂单元的本构行为来模拟橡胶砂的动力特性, 通过 Marc 子程序 Hyperla 实现^[26], 其他材料按常规进行设置。

2 土工袋数值模拟结果分析

2.1 不同橡胶颗粒比对隔震效果的影响

在基底压力为 100 kPa, 土工袋厚度为 500 mm, 地震加速度为 0.32g, 地震波为 OBG 波的情况下, 土工袋中橡胶颗粒添加质量分数为 0%, 30%, 40%, 100% 工况时的输入输出加速度时程曲线 ($t-a$) 和傅氏谱曲线 ($f-a$) 图见附表 1。根据附表 1 的内容, 由输入输出的加速度时程曲线可知:

1) 每个工况下, 输出加速度时程幅值相对于输入加速度时程幅值明显减少, 充分说明地震波经过土工袋隔震层后, 加速度反应被削弱, 加入土工袋隔震层的上部结构地震加速度明显降低, 在房屋基础底部引入土工袋隔震层能对上部分结构起到很好的隔震效果。

2) 输入地震加速度峰值为 2.151 m/s^2 , 输出加速度峰值随橡胶颗粒添加量的增大而减小。橡胶颗粒添加质量分数在 0%~30% 之间下降最快, 在 30%~40% 之间呈小幅度增加, 在 40%~100% 之间下降略为缓慢。因此可以认为橡胶颗粒添加质量分数在 30%~40% 之间时隔震效果大致相同, 从具体隔震效果以及经济性角度来看, 橡胶颗粒添加质量分数为 30% 的土工袋隔震效果较好。

由附表 1 的傅氏谱可知:

1) 输出加速度随着振动频率和橡胶颗粒配比的增大而减小, 且幅度愈加明显, 上部结构的加速度反应在低频阶段出现增加现象, 达到一定频率数值后减小, 这说明土工袋中的橡胶砂对于高频地震波的过滤效果理想。正如陈跃庆等^[27]在讨论不同土性地基对地震波传递的影响时阐述的结论一样, 软土层过滤了大部分高频地震动, 留下了低频成分, 这一分析与本研究相似。

2) 当橡胶颗粒添加质量分数达到 100% 时, 加速度反应在高频阶段出现大面积增加现象, 说明土工袋中全部为橡胶颗粒时减震过滤效果较差, 隔震过滤地震波作用大为降低, 不利于上部结构隔震。

2.2 土工袋厚度对隔震效果的影响

当土工袋中橡胶颗粒的添加质量分数为 30%、地震加速度为 0.32g、地震波为 OBG 波时, 只考虑土工袋厚度对上部结构的隔震效果, 土工袋厚度分别为 100, 200, 300, 500 mm 工况下的输入输出加速度时程曲线 ($a-t$), 以及傅氏谱曲线 ($f-a$), 如附表 2 所示。

由附表 2 可知: 1) 输出加速度幅值都比输入加速度幅值小, 表明土工袋隔震材料具有较好的减震效果, 而且输出加速度峰值随土工袋厚度的增大而减小。从模拟数据来看, 土工袋厚度为 500 mm 时, 其输出加速度峰值为 1.078 m/s^2 , 基本接近输入加速度峰值的一半, 隔震效果十分理想。

2) 输出加速度反应在低频时均呈现出增大趋势, 当到达某一定值后开始降低, 这表明土工袋中橡胶砂能有效地过滤高频地震波。而在低频部分, 输出加速度幅度随土工袋厚度的增加变化较小, 说明土工袋在过滤低频地震波时效果欠佳。

3 土工袋隔震效应分析

为满足土工袋的隔震效应分析, 依据抗震规范 GB 50011—2010, 定义减震系数 β 为

$$\beta = |a_{\text{out}}|_{\text{max}} / |a_{\text{in}}|_{\text{max}} \quad (1)$$

式中: $|a_{\text{out}}|_{\text{max}}$ 为输出加速度峰值; $|a_{\text{in}}|_{\text{max}}$ 为输入加速度峰值。

根据根式(1), 可得输入地震波 OBG 波时土工袋中橡胶砂的减震系数如表 1 所示, 得到不同工况下减震系数随橡胶颗粒配比、土工袋垫层厚度的变化如图 3、图 4 所示。

表 1 土工袋中橡胶砂的减震系数

Table 1 Damping coefficient of rubber sand in geo-bags

垫层厚度 / mm	橡胶颗粒 添加质量分数 /%	输入加速度 峰值 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	输出加速度 峰值 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	减震 系数 β
500	0	2.151	1.411	0.656
	30		1.071	0.498
	40		1.098	0.510
	100		0.801	0.372
100	30	2.151	1.502	0.698
200			1.378	0.641
300			1.286	0.598

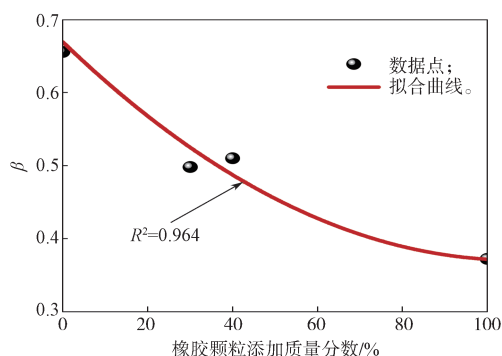


图 3 减震系数与橡胶颗粒配比散点图及拟合曲线

Fig. 3 Scatter diagram with the fitting relationship between damping coefficient and rubber particle ratios

由图 3 可以得出, 随着橡胶颗粒添加量的逐步增加, 减震系数呈非线性减小, 隔震效果逐步增强。减震系数在橡胶颗粒添加质量分数为 0%~30% 时减小明显, 而在 30%~40% 区间出现一定幅度的上升, 再次说明橡胶颗粒添加质量分数为 30% 时对上部结构的隔震效果最好。

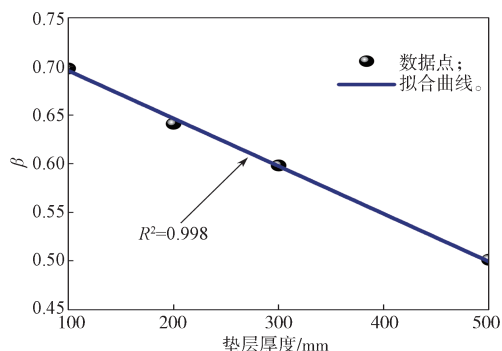


图 4 减震系数与土工袋垫层厚度散点图及拟合曲线

Fig. 4 Scatter diagram with the fitting relationship between damping coefficient and geo-bag thickness

由图 4 可以看出, 不同土工袋垫层厚度下橡胶砂

的减震效果随着垫层厚度从 100 mm 到 500 mm 递增, 减震系数按线性规律逐渐减小, 且拟合值 $R^2=0.998$, 曲线拟合较完美, 表明土工袋厚度越厚, 上部结构的输出加速度反应幅值越小。

为了更好地比较土工袋垫层厚度的增加对减震系数的影响范围, 计算厚度分别为 200, 300, 500 mm 与厚度为 100 mm 的减震系数之比, 得到的比值依次为 92%, 86%, 72%, 可以推断, 当垫层厚度每增大 100 mm 时, 减震系数降低约 7%。

4 土工袋与其它简易隔震方法隔震效应对比

将本文数值模拟所得的土工袋橡胶砂隔震垫层减震系数与土工格栅加筋橡胶砂垫层 (geogrid reinforced rubber sand mixture cushion, GGRSMC)、纯砂垫层 (pure sand cushion, PSC)、橡胶砂垫层 (rubber sand mixture cushion, RSMC) 和土工格室加筋橡胶砂垫层 (geocell reinforced rubber sand cushion, GCRSMC) 减震系数进行对比。其中, 土工格栅加筋橡胶砂垫层的减震系数来自于郑玉风^[28]研究的大范围振动台试验, 试验采用土工格栅加筋的加筋层, 其垫层厚度为 20 cm, 上部配重只有一层, 平均压强分布为 6.67 kPa。纯砂垫层的减震系数同样来自于振动台试验, 窦远明等^[29]研究的砂垫层厚度为 19.9~30.4 cm, 由上部结构质量配重所产生的基底平均压强为 1.1~8.3 kPa。橡胶砂垫层的减震系数取自熊伟等^[30]提出的一种基于土-结构相互作用 (SSI) 及非线性土体反应的新型岩土隔震系统, 即以橡胶-砂土颗粒混合料作为基坑回填材料, 其厚度在 20~30 cm 之间, 由上部结构质量配重所产生的基底平均压强为 50~100 kPa。土工格室加筋橡胶砂垫层的减震系数采用刘方成等^[5]研究的三轴剪切试验和循环单剪试验, 采用了厚度为 20 cm 的垫层, 上部结构质量配重所产生的基底平均压强为 50~100 kPa 之间, 所得的对比结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出, 土工格栅加筋橡胶砂垫层、纯砂垫层、橡胶砂垫层、土工格室加筋橡胶砂垫层的减震系数随输入加速度峰值的增大而变化的规律相近, 均呈现非线性减小趋势。图中局部放大图详细展现了 $2.0\sim 3.0 \text{ m/s}^2$ 区间的输入加速度峰值与减震系数的散点关系图, 在此区间, 土工格室加筋橡胶砂垫层的减震系数始终处于 0.5 附近, 位于较高的位置, 说明其减震效果在这个区间表现不佳。本文土工袋隔震垫层通过数值模拟得出的结果位于 0.5~0.6 之间, 在这 5 种隔震方式中属于中等偏上位置, 减

震效果满足需求, 验证了本文所提出数值模拟方法的正确性。

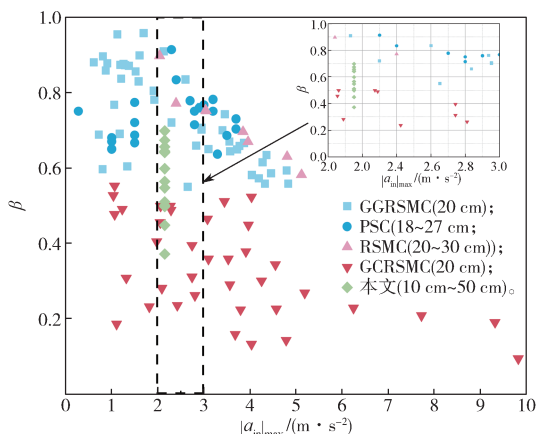


图5 多种隔震方式的减震系数随输入加速度峰值散点图

Fig. 5 Scatter diagram of the damping coefficient variation versus the peak value of input acceleration under various isolation modes

土工袋橡胶砂隔震效果较好, 分析其主要原因: 一方面, 由于土工袋的动力黏滞阻尼增大了基底垫层的耗能能力; 另一方面, 由于土工袋提高橡胶砂垫层的竖向压缩模量, 使其产生的摇摆分量受到抑制。

5 结论

本文主要针对农村低矮住宅的隔震问题, 提出一种新型的上部结构隔震方式, 即在土工布袋中填入橡胶砂, 利用 Marc 有限元软件构建三维结构的有限元分析模型, 对不同配比的橡胶砂和不同厚度的土工袋进行隔震效应研究, 得出以下结论:

1) 当土工袋的垫层厚度为 500 mm 时, 橡胶颗粒添加量增大会降低其减震系数, 从而提高隔震效果, 但随着橡胶颗粒添加量持续增大, 减震系数变化幅度较小, 说明橡胶颗粒在该实验中作为隔震材料的最佳添加质量分数为 30%。

2) 采用 30% 的橡胶颗粒添加质量分数, 在不同的垫层厚度下, 减震系数随着垫层厚度的增加而降低, 这说明垫层越厚, 上部结构加速度反应幅度越小, 隔震效果越显著, 且计算得到垫层厚度每增加 100 mm 时, 减震系数减小 7% 左右。从工程造价、施工难度、结构侧向稳定性、材料价格等方面综合分析, 建议土工袋隔震层厚度不超过 500 mm, 其输出加速度峰值为 1.078 m/s^2 , 相当于输入加速度峰值的一半, 隔震效果十分理想。

3) 土工袋与其它简易隔震方法的比对结果表明土工袋隔震层隔震效果较好, 能有效减小上部结构的地震加速度反应, 同时还可以过滤掉地震波的高频分

量。关于土工袋非线性刚度、阻尼比系数以及土工袋隔震层实例分析是后期研究的重点。

参考文献:

- [1] 朱宏平, 周方圆, 袁 涌. 建筑隔震结构研究进展与分析 [J]. 工程力学, 2014, 31(3): 1-10.
ZHU Hongping, ZHOU Fangyuan, YUAN Yong. Development and Analysis of the Research on Base Isolated Structures [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 1-10.
- [2] LEE J H, SALGADO R, BERNAL A, et al. Shredded Tires and Rubber-Sand as Lightweight Backfill [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(2): 132-141.
- [3] NAKHAEI A, MARANDI S M, KERMANI S S, et al. Dynamic Properties of Granular Soils Mixed with Granulated Rubber [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 43: 124-132.
- [4] 刘方成, 陈 璐, 王海东. 橡胶砂动剪模量和阻尼比循环单剪试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1903-1913.
LIU Fangcheng, CHEN Lu, WANG Haidong. Evaluation of Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Rubber-Sand Mixture Based on Cyclic Simple Shear Tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 1903-1913.
- [5] 刘方成, 张永富, 任东滨. 橡胶砂应力-应变特性三轴-单剪联合试验研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2769-2779.
LIU Fangcheng, ZHANG Yongfu, REN Dongbin. Stress-Strain Characteristics of Rubber-Sand Mixtures in United Triaxial Shear and Simple Shear Tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(10): 2769-2779.
- [6] TSANG H H, LO S H, XU X, et al. Seismic Isolation for Low-to-Medium-Rise Buildings Using Granulated Rubber-Soil Mixtures: Numerical Study [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(14): 2009-2024.
- [7] PITILAKIS D, ANASTASIADIS A, VRATSIKIDIS A, et al. Large-Scale Field Testing of Geotechnical Seismic Isolation of Structures Using Gravel-Rubber Mixtures [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(10): 2712-2731.
- [8] TSANG H H, TRAN D P, HUNG W Y, et al. Performance of Geotechnical Seismic Isolation System Using Rubber-Soil Mixtures in Centrifuge Testing [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(5): 1271-1289.
- [9] ADALIER K, PAMUK A. On the Important Mechanical Properties of Rubber-Sand [J]. Advanced Materials Research, 2013, 685: 8-14.

- [10] YOUWAI S, BERGADO D T. Numerical Analysis of Reinforced Wall Using Rubber Tire Chips-Sand Mixtures as Backfill Material[J]. Computers and Geotechnics, 2004, 31(2): 103-114.
- [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] MADHUSUDHAN B R, BOOMINATHAN A, BANERJEE S. Properties of Sand-Rubber Tyre Shreds Mixtures for Seismic Isolation Applications[C]//Soil Dynamics and Earthquake Geotechnical Engineering, Singapore: Springer, 2019: 267-274.
- [13] 郑 森, 陈浅然, 刘华恩, 等. 橡胶砂垫层隔震效应振动台试验研究 [J]. 广东土木与建筑, 2020, 27(2): 1-4.
ZHENG Sen, CHEN Qianran, LIU Huaen, et al. Shaking Table Tests on the Isolation Effect of Rubber-Sand Mixture Cushion[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2020, 27(2): 1-4.
- [14] DING Y, ZHANG J S, CHEN X B, et al. Experimental Investigation on Static and Dynamic Characteristics of Granulated Rubber-Sand Mixtures as a New Railway Subgrade Filler[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121955.
- [15] 黄 波, 刘斯宏, 吴 平, 等. 土工袋技术在农村地区的应用 [J]. 水利水电技术, 2020, 51 (增刊 2): 401-404.
HUANG Bo, LIU Sihong, WU Ping, et al. Application of Geotextile Bag Technology in Rural Area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(S2): 401-404.
- [16] 王艳巧, 刘斯宏, 林圣德, 等. 土工袋减振效果振动台试验研究 [J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 100-102, 88.
WANG Yanqiao, LIU Sihong, LIN Shengde, et al. Vibrating Platform Test Study of Vibration Reduction Effect of Soil Bag[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(9): 100-102, 88.
- [17] 刘斯宏, 贾 凡, 陈笑林, 等. 土工袋挡墙振动台模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 2): 4338-4347.
LIU Sihong, JIA Fan, CHEN Xiaolin, et al. Shaking Table Model Test on a Retaining Wall of Soilbags[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 4338-4347.
- [18] 郑玉凤, 刘方成, 张友良. 土工袋加筋橡胶砂垫层隔震效应试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(3): 73-83.
ZHENG Yufeng, LIU Fangcheng, ZHANG Youliang. Experimental Study on Isolation Effects of Soilbags Reinforced Rubber-Sand Mixture Cushion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(3): 73-83.
- [19] 黄 波, 李博文, 吴 平, 等. 土工袋袋内土体强度与剪胀特性研究 [J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 158-162.
HUANG Bo, LI Bowen, WU Ping, et al. Study on Strength and Dilatancy Characteristics of Soils Wrapped by Soilbags[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(11): 158-162.
- [20] SADR A, HATAF N. Experimental and Analytical Study on Soilbag and Encased Sand Columns in Loose Sand[J]. Transportation Geotechnics, 2021, 29: 100553.
- [21] 吴延辉, 李玉荣, 施建波. 砂与橡胶粒复合隔震装置分析研究 [J]. 四川建材, 2013, 39(1): 54-55, 57.
WU Yanhui, LI Yurong, SHI Jianbo. Study of Granulated Rubber-Sand Mixed Isolation Device[J]. Sichuan Building Materials, 2013, 39(1): 54-55, 57.
- [22] 岁小溪. 橡胶颗粒-砂混合物的隔震性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
SUI Xiaoxi. The Study on Seismic Isolation Performance of Granulated Rubber-Sand Mixture[D]. Changsha: Hunan University, 2009.
- [23] 刘方成, 杨 峻. 低、多层房屋基底软土垫层隔震研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(3): 245-254.
LIU Fangcheng, YANG Jun. Research on Isolated Low-Rise Buildings Using a Thin Soft Soil Layer[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(3): 245-254.
- [24] 刘方成, 吴孟桃, 刘 娜, 等. 橡胶砂泊松比试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (增刊 1): 3596-3606.
LIU Fangcheng, WU Mengtao, LIU Na, et al. Experimental Study on Poisson's Ratio of Rubber-Sand Mixtures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3596-3606.
- [25] 刘方成, 尚守平, 王海东, 等. 基于阻尼的边界面模型 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(6): 851-858.
LIU Fangcheng, SHANG Shouping, WANG Haidong, et al. Damping Ratio-Based Bounding Surface Model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(6): 851-858.
- [26] 陈火红. MSC.Marc 二次开发指南 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 52-56.
CHEN Huohong. MSC.Marc Secondary Development Guide [M]. Beijing: Science Press, 2004: 52-56.
- [27] 陈跃庆, 吕西林, 侯建国, 等. 不同土性地基中地震波传递的振动台模型试验研究 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2005, 38(2): 49-53.
CHEN Yueqing, LÜ Xilin, HOU Jianguo, et al. Shaking

Table Model Testing on Transfer of Earthquake Wave in Various Ground Soils[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(2): 49–53.

[28] 郑玉风. 土工加筋橡胶砂复合垫层减震振动台试验研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.
ZHENG Yufeng. Experimental Study on Vibration Isolation Table of Geo-Reinforced Rubber Sand Composite Cushion[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2018.

[29] 窦远明, 刘晓立, 赵少伟, 等. 砂垫层隔震性能的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2005, 26(1): 125–128.
DOU Yuanming, LIU Xiaoli, ZHAO Shaowei, et al.

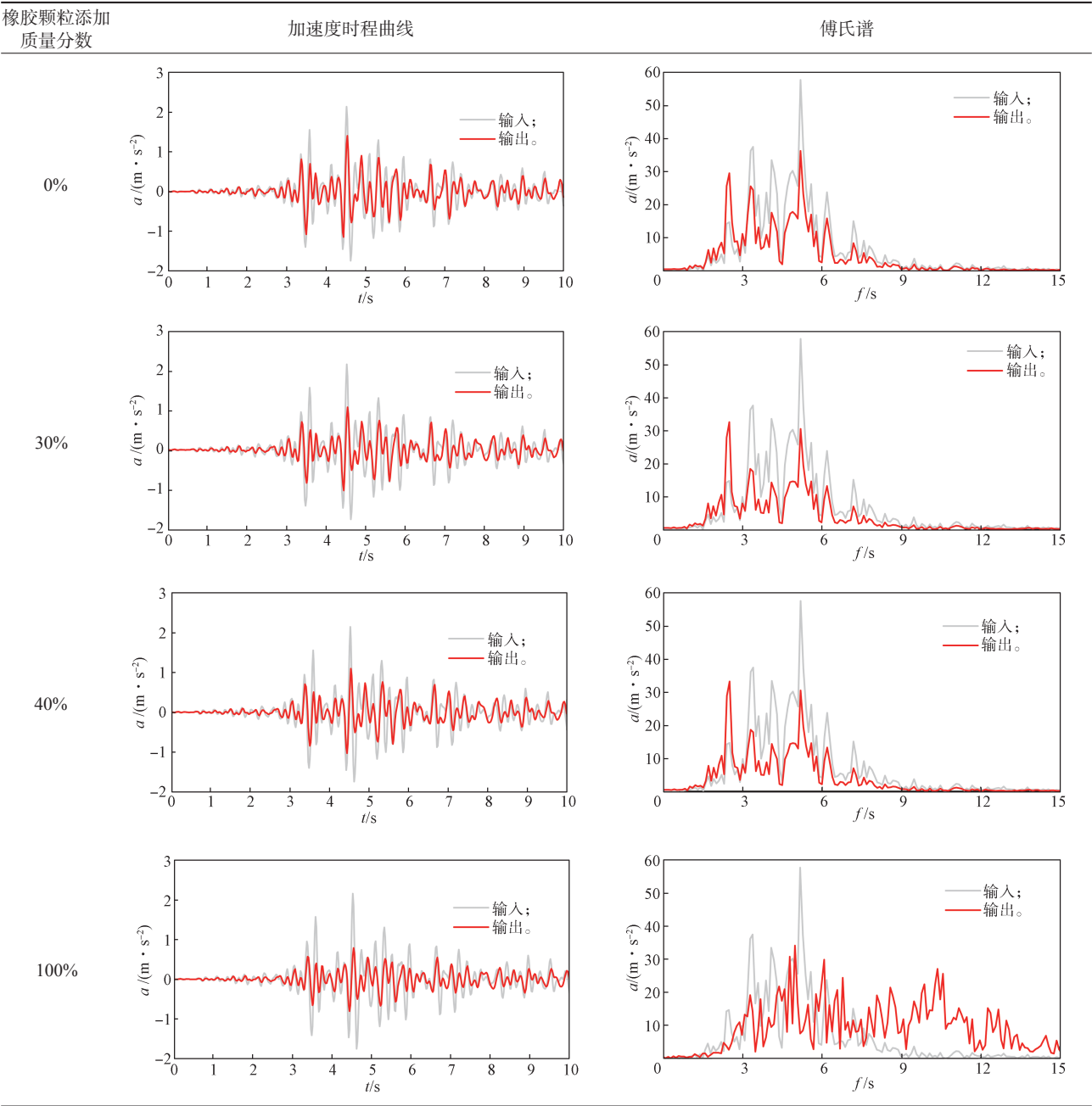
An Experimental Study of Isolating Properties of Sand Cushion[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(1): 125–128.

[30] 熊 伟, 曾庆豪, 尚守平, 等. 新型岩土隔震系统试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增刊 2): 39–45.
XIONG Wei, ZENG Qinghao, SHANG Shouping, et al. Experimental Study on Innovative Geotechnical Seismic Isolation System[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S2): 39–45.

(责任编辑: 姜利民)

附表 1 不同橡胶颗粒配比下的加速度时程曲线及傅氏谱列表

Table 1 Acceleration time history curves and Fourier spectra list under different rubber particle ratios



附表 2 不同土工袋厚度下的加速度时程曲线及傅氏谱列表

Table 2 Acceleration time history curves and Fourier spectra list under different geo-bag thickness

