

DOI: 10.11779/CJGE202011001

两种岩土隔震系统的振动台试验研究

景立平^{1, 2}, 尹志勇¹, 孙海峰³, 董 瑞¹, 徐琨鹏¹, 李永强⁴

(1. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 防灾科技学院地质工程学院, 河北 三河 065201; 3. 广东省珠海工程勘察院, 广东 珠海 519000; 4. 东华理工大学建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 采用低成本的减隔震技术是降低农村房屋地震灾害的重要途径。近年来, 围绕结构基础与地基土之间使用低模量材料的岩土隔震技术(GSI)引起了广泛的研究兴趣。提出了两种低成本的岩土隔震系统即基于砂垫层的岩土隔震系统(GSI-SC)和基于玻璃珠-砂垫层的岩土隔震系统(GSI-GBSC)。通过考虑场地的大比例振动台模型试验对单层砌体结构模型进行了有、无隔震系统的对比试验, 单层砌体结构模型采用1/4的缩尺比例制作。选取1940年记录到的El-Centro波南北分量作为输入波, 输入加速度幅值分别为0.1g, 0.2g, 0.4g。振动台试验结果表明: 提出的两种低成本的岩土隔震系统均可以减少结构的地震反应, 达到隔震的目的; 在输入加速度幅值为0.4g时, GSI-SC系统使结构屋面板的加速度反应以及结构的层间位移反应的减小率分别达到33%和39%; 而GSI-GBSC系统相应的减小率更是达到了45%和48%。GSI-SC系统和GSI-GBSC系统都具有良好的隔震效果, 且施工简便、成本低廉, 适合在农村地区推广。就隔震效果而言, GSI-GBSC系统较GSI-SC系统更具有优势。

关键词: 岩土隔震; 砂垫层; 玻璃珠-砂垫层; 振动台试验; 叠层剪切箱

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)11-1969-10

作者简介: 景立平(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩土地震工程和工程结构抗震研究。E-mail: jlp_iem@163.com。

Shaking table tests on two geotechnical seismic isolation systems

JING Li-ping^{1, 2}, YIN Zhi-yong¹, SUN Hai-feng³, DONG Rui¹, XU Kun-peng¹, LI Yong-qiang⁴

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of CEA, Harbin 150080, China; 2. School of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China; 3. Zhuhai Engineering Investigation Institute of Guangdong Province, Zhuhai 519000, China; 4. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Applying the low-cost seismic isolation technology is a key way to reduce earthquake disasters of rural houses. Recently, the geotechnical seismic isolation (GSI) which uses low modulus materials between the structural foundation and the foundation soil has aroused widespread research interest. In this study, two low-cost GSI systems are proposed, which include the geotechnical seismic isolation system based on the sand cushion (GSI-SC) and the geotechnical seismic isolation system based on glass bead-sand cushion (GSI-GBSC). Through the large-scale shaking table model tests considering the site, the comparison tests between the single-layer masonry structure model with and without isolation system are carried out. The single-layer masonry structure model is made with a 1/4 scale. The north-south component of the El-Centro waves recorded in 1940 is selected as the input waves, and the peak input acceleration is 0.1g, 0.2g, and 0.4g, respectively. The results of the shaking table tests show that the two proposed low-cost GSI systems can decrease the seismic response of the structures and achieve the purpose of isolation. When the input acceleration amplitude is 0.4g, the GSI-SC system makes the reduction rate of the acceleration response of the structural roofs and the interlayer displacement response of the structures reach 33% and 39%, respectively, while the corresponding reduction rate of the GSI-GBSC system is 45% and 48%. Both the GSI-SC system and the GSI-GBSC system have strong isolation capability, simple construction and low cost, which are suitable for promotion in rural areas. In terms of isolation effect, the GSI-GBSC system has more superiority to the GSI-SC system.

Key words: geotechnical seismic isolation; sand cushion; glass bead-sand cushion; shaking table test; laminated shear box

0 引言

历次地震的震害资料表明, 农村房屋的倒塌是造成农村地区人员伤亡和经济损失最重要的原因之一。

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH16010); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项项目(2017B10)

收稿日期: 2019-11-25

目前, 提高农村房屋抗震能力主要有两个途径: ①抗震加固技术; ②减隔震技术。针对农村房屋的减隔震技术研究绝大部分是以结构基础为研究对象的基底滑移隔震技术, 即在结构基础和上部结构之间设置低摩阻的隔震层, 其特点是通过上部结构与结构基础之间产生相对滑移, 解耦地震动向上部结构的传递。20世纪60年代, 李立^[1]提出在房屋底部设置砂砾的隔震方法, 并于20世纪70年代中后期采用该隔震方法建造了砖混结构房屋。21世纪以来, 学者们又相继提出了不同隔震方法, 如设置玻璃珠-石墨、钢筋-沥青、捆绑橡胶束等^[2-5]。目前, 农村房屋采用隔震技术的很少, 大多为试点工程, 隔震技术在农村房屋中难以推广应用的原因有隔震技术本身成本较高、施工工艺复杂、农村防震减灾意识淡薄、施工不规范质量难以保证等等。

近年来, 隔震系统和装置有了新的概念和发展, 围绕结构基础的使用低模量材料如橡胶-砂混合物(RSM)的岩土隔震(简称GSI)技术引起了广泛的研究兴趣。GSI技术的研究对象为结构基础下面的地基, 即在结构基础与地基土之间设置隔震层。GSI技术最早由曾庆豪提出, 并对其进行了大量的数值计算研究, 取得了优异的成果^[6-9]。橡胶-砂混合物具有模量低、弹性好、阻尼大的特点, 是一种优质廉价的耗能减振材料, 国内外学者相继对橡胶-砂混合物进行了大量的研究^[10-17]。理论研究方面, Saman等^[18]和Abdelhaleem等^[19]首先对采用橡胶-砂垫层换填后的场地地震响应方面进行探索, 其研究表明橡胶-砂垫层换填后房屋的周期将变长, 有利于刚度大的低矮房屋的抗震。Pitilakis等^[20]通过建立考虑土-结构动力相互作用的二维有限元模型, 对比了采用砂土和橡胶-砂混合物作为基底回填材料对钢筋混凝土框架抗震性能的影响, 其研究发现, 对于中高层建筑, 采用橡胶-砂混合物比采用砂土结构的层间位移反应减小30%。Brunet等^[21]采用简化的一维剪切模型对多种不同地震波下、不同橡胶含量和厚度的橡胶-砂垫层减震系数进行了对比分析, 发现橡胶含量为15%~25%、垫层厚度为2~3 m时, 减震效果最好。试验研究方面, 岁小溪等^[22]针对橡胶-砂垫层作为基坑回填材料开展了小型振动台试验, 通过改变橡胶-砂的配比、垫层厚度及上部结构配重, 研究了不同工况下橡胶-砂垫层的隔震效果。刘方成等^[23-24]首次提出了土工格室加筋橡胶-砂的隔震方法, 并通过大尺寸循环单剪试验探讨采用土工格室加筋对橡胶-砂的动力特性的影响; 同时, 采用瞬时冲击和牵引释放的激励方式, 研究了土工格室加筋橡胶-砂垫层的减震性能, 其结果表明土工格室加筋橡胶-砂具有良好的减震性能, 并且改善了橡胶-砂垫层的抗剪强度和整体稳定性。

在以上的研究中, 对基于RSM的GSI系统的有效性, 通过理论和试验证明了GSI系统的良好性能和可行性, 但是考虑场地的大比例振动台模型试验近乎空白。在中国东北季节性冻土地区一直有利用砂土置换冻土以消除冻胀影响的做法, 基于此, 本文结合GSI概念提出基于砂垫层的岩土隔震系统(geotechnical seismic isolation system based on sand cushion, 简称GSI-SC)。同时, 结合基底滑移隔震技术的特点, 提出基于玻璃珠-砂垫层的岩土隔震系统(geotechnical seismic isolation system based on glass beads-sand cushion, 简称GSI-GBSC)。为了验证GSI-SC系统和GSI-GBSC系统的有效性, 对单层砌体结构模型开展了考虑场地的有、无隔震措施的大比例振动台模型试验, 对比分析了有、无隔震措施情况下结构模型的地震反应。

1 两种岩土隔震系统介绍

根据地震波的特性及其传播规律, 剪切波的波速为

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad , \quad (1)$$

式中, V_s 为剪切波速, G 为剪切模量, ρ 为密度。

根据式(1)可知剪切模量越小, 剪切波速越小。对于液体, 因其不能承受剪应力, 故 $G=0$, 它就不能传递剪切波。可见, 对于向上传播水平剪切波分量为主的地震动, 相比较剪切模量大的土层, 在传播途中剪切模量小的土层中的振动量会更小。据此, 本文提出了两种GSI系统即GSI-SC系统和GSI-GBSC系统。GSI-SC系统和GSI-GBSC系统的示意图如图1所示。

图1中, GSI-SC系统和GSI-GBSC系统的结构部分均为砌体结构的砖墙和基础梁。GSI-SC系统和GSI-GBSC系统区别在于土体部分, GSI-SC系统的土体部分包括天然土和砂垫层, 而GSI-GBSC系统的土体部分包括天然土、砂垫层和玻璃珠, 实际是在GSI-SC系统的砂垫层的表面再铺满了一层玻璃珠, 形成玻璃珠-砂垫层。

GSI-SC系统和GSI-GBSC系统的基础回填均采用砂土, 砂土在低应力状态下抗剪强度非常低, 易产生变形, 砂土对结构基础的约束作用主要由砂土颗粒对结构基础的摩擦力提供。在水平地震作用下, GSI-SC系统的砂垫层受到结构基础的作用力易产生剪切破坏, 限制了剪应力从砂垫层到结构的传递, 减小了结构基底的地震动输入, 从而降低上部结构的地震需求。玻璃珠的外形为球形, 具有耐磨损性、抗酸性、硬度高、表面光滑、匀称等特点, 且它们互相之间能够滚动, 具有很好的自由流动性。根据玻璃珠的特点,

笔者进行了砂垫层和玻璃珠-砂垫层与基础梁之间的摩擦试验。试验结果表明, 在砂土的表面铺满一层玻璃珠可以降低砂垫层表面与基础梁之间的摩擦系数。GSI-GBSC 系统选择在砂垫层表面铺满一层玻璃珠, 更加有利于水平地震作用下结构基础与玻璃珠-砂垫层之间产生相对运动, 限制地震动向上部结构的传递。

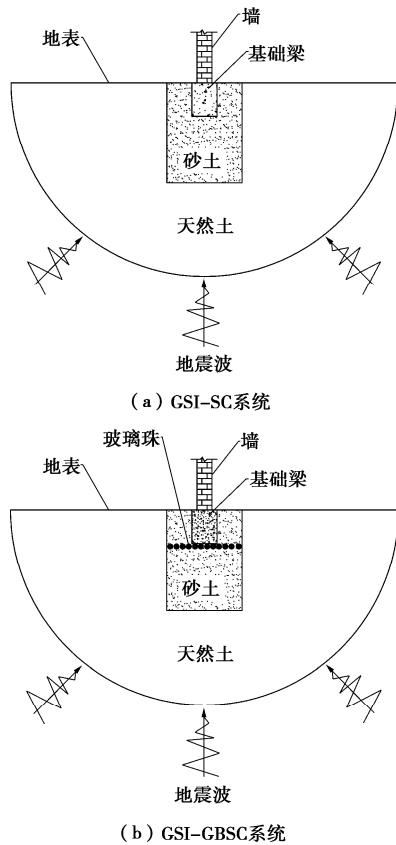


图 1 两种 GSI 系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two GSI systems

目前, 隔震技术应用到农村房屋建设中最大的限制因素之一便是建造成本, 而 GSI-SC 系统和 GSI-GBSC 系统的优势就在于建造成本低, 原因主要有以下两个方面:

(1) 隔震层造价低廉

天然砂土大量存在, 取材方便, 砂土材料建筑工程中最为常见的建筑材料。玻璃珠材料广泛应用于建材、塑料、橡胶、涂料、化学、冶金、航海和航天等领域。实际工程中, 中国寒冷地区农村建房本身有用砂垫层置换冻土的做法, 采用 GSI-SC 系统房屋的隔震层造价相比较普通农村房屋基本没有增加; 参考文献[25]中普通农村房屋的基本造价 800 元/m², 采用 GSI-GBSC 系统房屋的隔震层造价相比较普通农村房屋增加了玻璃珠的费用, 玻璃珠增加的造价约为 28 元/m², 较普通农村房屋成本仅增加了 3.5%。实际工程应用中考虑到由于隔震系统设置, 上部结构的构件

截面以及钢筋、混凝土等材料用量可以适当的减少, 采用隔震系统后增加的成本应更低。

(2) 施工简便

采用 GSI-SC 系统的农村房屋, 在地基处理中只需在基槽内回填砂土, 而采用 GSI-GBSC 系统时, 只要继续在砂土层表面继续铺满一层玻璃珠即可, 最后在基础埋深范围内回填砂土, 整个施工过程简单易操作。农村房屋结构形式大都是低矮的砖砌体结构, 墙体的抗拉强度和抗剪强度较低, 对地基不均匀沉降较敏感。当农村房屋采用 GSI-SC 系统或 GSI-GBSC 系统时, 建议在隔震层的施工过程中, 将砂垫层进行压实, 保证砂垫层的均匀密实, 最大程度的减轻地基不均匀沉降, 以保证房屋平时的安全使用。

2 试验概况

2.1 相似设计

试验模型包括结构模型和地基土模型两个部分。在结构模型的相似比设计中, 选取长度、弹性模量和密度为 3 个基本量。由于振动台及叠层剪切箱的尺寸限制, 长度相似比为 0.25。考虑振动台承载能力及其他试验条件的限制, 采用欠人工质量模型。结构原型的重量约为 80.69 t, 结构模型的重量约为 1.82 t, 设置人工质量约为 0.7 t。

振动台试验在常加速度的情况下, 由于土体材料的特殊性, 土体的重力相似条件很难模拟。国内外进行的土-结构相互作用的振动台试验中, 大都考虑上部结构材料的相似率, 而忽略土体的相似率^[26-28]。本文主要通过对比结构模型的地震反应来分析 GSI-SC 系统和 GSI-GBSC 系统的隔震效果, 故试验中以满足结构模型材料相似比为主忽略土体的相似关系, 且结构模型采用欠人工质量模型近似满足结构地震反应的相似规律。结构模型主要物理量的相似关系见表 1。

表 1 结构模型相似比

Table 1 Similarity ratios of structural model

物理量	相似关系	相似比	备注
长度	S_l	0.25	基本量
弹性模量	S_E	1.00	基本量
密度	S_p	2.00	基本量
应力	$S_\sigma=S_E$	1.00	导出量
应变	S_ϵ/S_E	1.00	导出量
时间	$S_l(S_p/S_E)^{0.5}$	0.35	导出量
频率	$(S_E/S_p)^{0.5}/S_l$	2.83	导出量
加速度	$S_E/(S_l S_p)$	2.00	导出量

2.2 结构模型

结构模型的原型选取为农村地区量大面广的单层

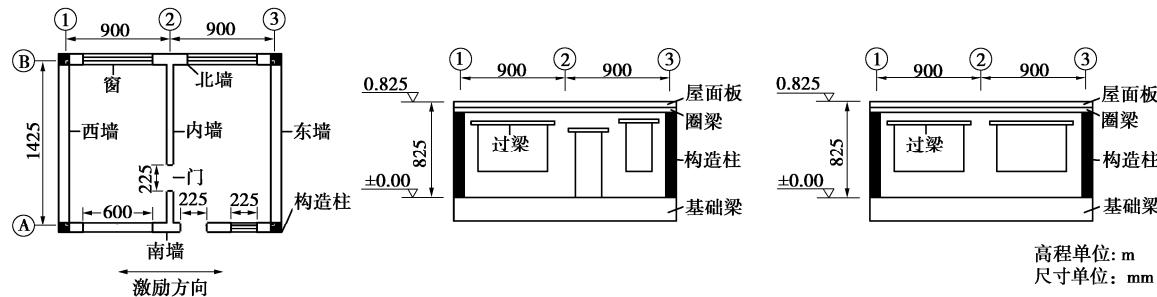


图 2 结构模型

Fig. 2 Structural model

砖砌体结构房屋，设有构造柱、圈梁等抗震措施，平面尺寸为 $7200 \text{ mm} \times 5700 \text{ mm}$ ，房屋高度为 3300 mm ，外墙厚度为 370 mm ，内墙厚度为 240 mm 。根据长度相似关系缩尺后结构模型的平面尺寸为 $1800 \text{ mm} \times 1425 \text{ mm}$ ，总高度为 825 mm 。砖墙包括两道纵墙和三道横墙，构造柱分别设置在房屋的外纵墙与外横墙的交界处。两道外横墙（东墙和西墙）为承重墙，不设门窗洞口；南墙处设有两个窗户和一个门洞其立面尺寸分别为 $600 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 、 $225 \text{ mm} \times 225 \text{ mm}$ 、 $225 \text{ mm} \times 225 \text{ mm}$ ；北墙设有两个尺寸相同的窗户，立面尺寸为 $600 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ ；内墙设有一个门洞，立面尺寸为 $225 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ ，与南墙距离为 300 mm 。结构模型的平面图及立面图如图 2 所示，其中振动方向为东西向。

2.3 地基土模型

为了探讨农村房屋采用 GSI-SC 系统和 GSI-GBSC 系统的隔震效果，本文设计了 3 组试验，分别为无隔震试验、GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验。其中，无隔震试验的试验模型未采取隔震措施，GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验的试验模型分别采用了 GSI-SC 系统和 GSI-GBSC 系统。无隔震试验的作用是为了和 GSI-SC 系统试验以及 GSI-GBSC 系统试验进行对比，便于客观的评价 GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验的隔震效果。

3 组试验的地基土模型如图 3 所示。3 组试验的地基土厚度均为 1000 mm ，结构的基础埋深均为 200 mm 。无隔震试验的地基土全为天然土。GSI-SC 系统试验的地基土是在 1000 mm 厚的天然地基土的基础上继续向下开挖出深度为 600 mm 的基槽，之后在基槽内均匀铺设 400 mm 厚的砂土，基础回填采用砂土。GSI-GBSC 系统试验的地基土是在 GSI-SC 系统试验的地基土的砂层表面再铺满一层玻璃珠，基础回填亦采用砂土。地基土模型的制作在土箱内完成，地基土模型采用分成压实法制备。试验所用的土箱为自行研制的叠层剪切箱^[29]，其箱内尺寸为 $3500 \text{ mm} \times 2200 \text{ mm}$

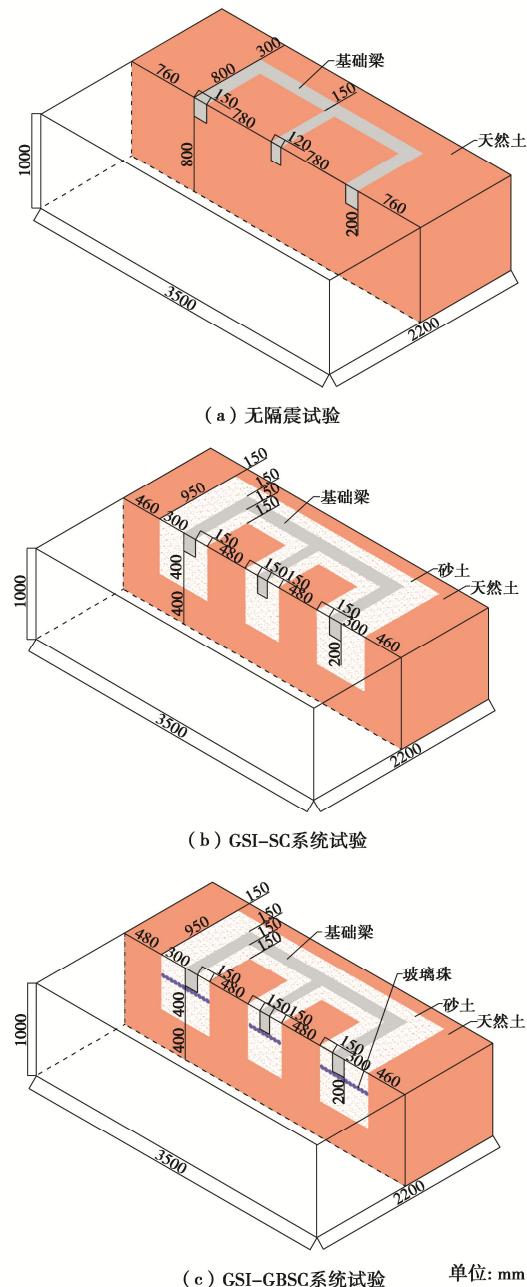


图 3 地基土模型

Fig. 3 Model for foundation soil

mm×1700 mm (图 4)。试验中的地基土模型采用分层压实法, 分层夯实, 刮毛, 每层土厚度为 200 mm, 尽可能保持土层上下均匀一致; 地基土模型制作好后, 静置 48 h; 之后对地基土模型进行若干次自由场试验, 使得地基土趋于均匀和密实。为了解土体振动条件下物理状态的改变情况, 在振动台试验开始之前以及每一级地震动输入后对地基土的不同深度的土体取样, 取土深度分别为 0.0, 0.4, 0.8 m。



图 4 叠层剪切箱

Fig. 4 Laminated shear box

2.4 传感器布置

图 5 为 3 组试验的加速度传感器和位移传感器的布置。加速度传感器采用的是压电式加速度传感器, 布设在土层中的加速度传感器以字母 A 表示。A1 布设在叠层剪切箱底部, 叠层剪切箱的底座通过螺栓与振动台台面固定, 即 A1 测量振动台台面的加速度反应; A2, A3 埋设在土层底部, 测量埋深约为 1 m 处土层的加速度反应; A4, A5 测量埋深约为 0.6 m 处土层的加速度反应; A7, A8 布置在基础梁下方的土层中, 测量埋深约为 0.2 m 处土层即结构基础下方的土层的加速度反应。布设在结构上的加速度传感器以字母 SA 表示。SA1 布设在基础梁的中心位置处, 测量结构基础的加速度反应; SA2 布设在屋面板中心位置处, 测量结构屋面板的加速度反应。

位移传感器采用拉线位移计, 测量方向与振动方向 (东西方向) 一致, 以字母 D 表示。D1 布设在叠层剪切箱的底部, 测量振动台台面的位移反应; D2 布置在与地表高度一致的箱框上, 测量地表处的位移反应; D3 布设在基础梁上, 测量结构基础的位移反应; D4 布设在屋面板边缘处, 测量屋面板处的位移反应。

2.5 地震波选择与加载制度

试验在中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室完成。根据《建筑抗震设计规范》, 原型结构所在场地为 II 类, 选取 1940 年在美国加州记录到的 El-Centro 地震波的南北方向分量作为输入地震动, 对模型进行水平 (东西方向) 激励。将原始的

El-Centro 地震波 (南北分量) 的加速度幅值调整为 1.0g, 根据时间相似关系对持时进行压缩, 调整后的水平向输入地震动的加速度、位移时程曲线及相应的傅里叶谱如图 6 所示。在试验开始和结束时输入白噪声进行扫频, 之后分别按幅值 0.1g, 0.2g, 0.4g 依次输入地震波。加速度相似比即模型结构的加速度与原型结构的比值为 2, 表 2 列出了每个强度水平的加载序列。

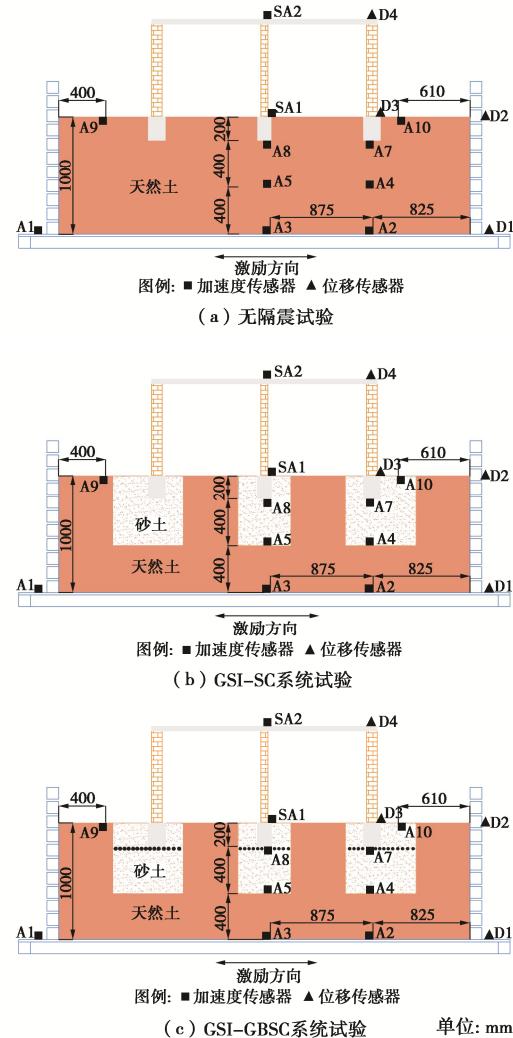


图 5 加速度及位移传感器布置

Fig. 5 Layout of acceleration and displacement sensors

表 2 地震荷载加载顺序

Table 2 Loading sequence of earthquake loads

次序	输入波	输入加速度幅值	输入方向
1	El-Centro 波 南北分量	0.1g	水平 (东西)
2	El-Centro 波 南北分量	0.2g	水平 (东西)
3	El-Centro 波 南北分量	0.4g	水平 (东西)

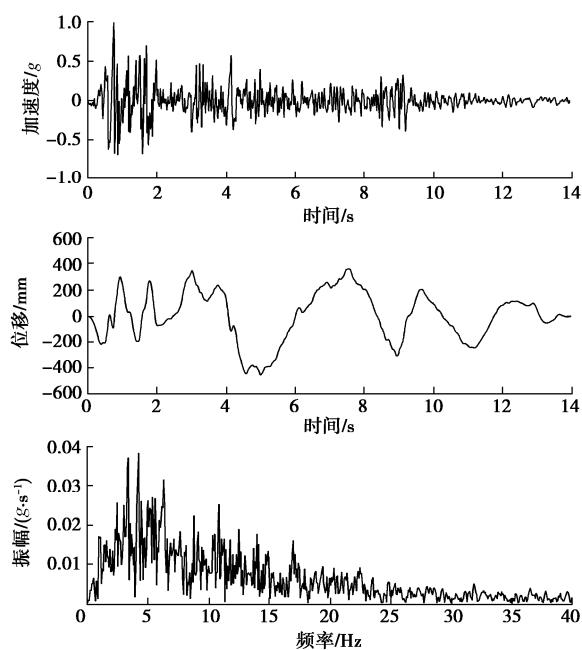


图 6 输入地震动特性

Fig. 6 Characteristics of input waves

3 地基土模型材料

试验中的地基土模型材料包括天然土、砂土和玻璃珠。天然土为取自某施工场地开挖的粉质黏土，砂土和玻璃珠均购于建材市场。图 7 为砂土颗粒累计级配曲线，从图中可知砂土颗粒的不均匀系数为 10.37，曲率系数为 0.0247。表 3 为天然土和砂土的基本物理力学参数。图 8 为地基土的动剪切模量比和阻尼比随剪应变的变化曲线。玻璃珠材料采用直径为 10 mm 的实心玻璃珠（图 9），其硬度大于 720 kg/mm²。

表 3 天然土和砂土基本物理力学参数

Table 3 Basic physical and mechanical parameters of natural soil and sand

土的名称	密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	内摩擦 角/(°)	黏聚力 /kPa
天然土	1.88	17.31	29.36	37.61
砂土	1.60	6.53	29.25	8.16

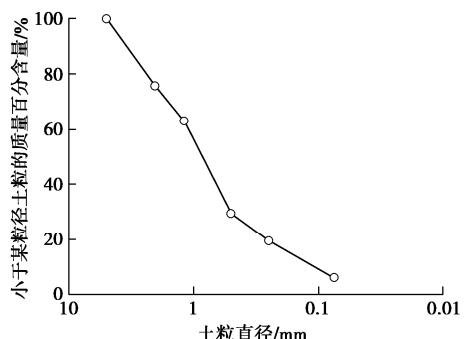


图 7 砂土颗粒累计级配曲线

Fig. 7 Cumulative grading curves of sand particles

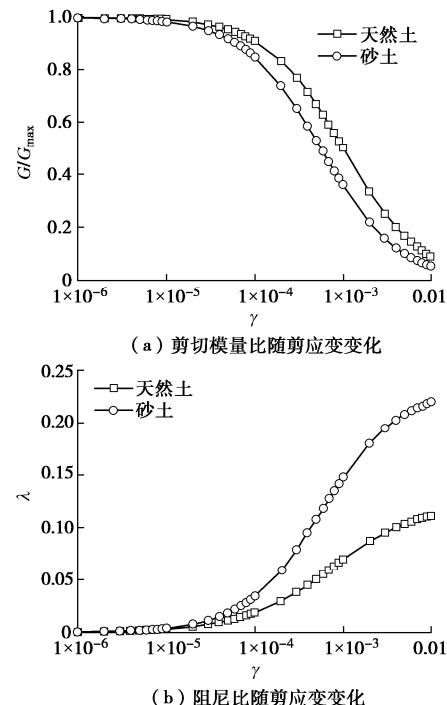


图 8 土的剪切模量比和阻尼比随剪应变变化曲线

Fig. 8 Variation of shear modulus ratio and damping ratio of soil with shear strain



图 9 直径 10 mm 的实心玻璃珠

Fig. 9 Solid glass beads with a diameter of 10 mm

4 试验结果分析

4.1 试验现象

无隔震试验：输入加速度峰值为 0.1g 时，结构模型出现轻微的振动；输入加速度峰值为 0.2g 时，结构模型振动幅度加大，加载结束后未在砖墙上发现肉眼可见的裂缝；输入加速度峰值为 0.4g 时，结构模型振动剧烈，加载结束后在砖墙上门窗洞口等薄弱部位出现了短裂缝（图 10）。整个加载过程中，靠近结构基础的回填土基本没有发生破坏（图 11）。

GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验：在整个加载过程中，GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验的结构模型砖墙未见裂缝产生；在前两级荷载加载完后，两组试验的结构基础与地基土之间都未出现明显的相对错动现象；但在输入加速度幅值为 0.4g 时，GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验结构基础与

地基土之间出现了明显的相对运动现象, 回填砂土受到结构基础的惯性挤压作用产生开裂破坏, 在砂土表面形成裂缝 (图 12, 13)。



图 10 砖墙裂缝

Fig. 10 Cracks in brick walls



图 11 无隔震试验的回填土

Fig. 11 Backfill soil of non-isolation tests



图 12 GSI-GBSC 系统试验的回填土

Fig. 12 Backfill soil of GSI-GBSC system tests

4.2 加速度反应

从试验现象的描述中对比三组试验结构模型的裂缝情况, 可知 GSI-SC 系统和 GSI-GBSC 系统使得结

构地震需求降低。表 4 为 3 组试验模型的加速度峰值, 为了直观地对比 3 组试验的结构地震反应, 分析其隔震效果, 对 3 组试验的屋面板处加速度放大系数进行比较。其中, 屋面板加速度放大系数为屋面板加速度峰值与台面加速度峰值的比值。从表 4 中可知: 输入加速度幅值为 $0.1g$ 时, GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验结构模型屋面板处的加速度放大系数较无隔震试验小, 其减小率分别为 11% 和 14%; 输入加速度幅值为 $0.2g$ 时, GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验结构模型屋面板处的加速度放大系数分别减小了 22% 和 30%; 输入加速度幅值为 $0.4g$ 时, GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验结构模型屋面板处的加速度放大系数分别减小了 33% 和 45%。即 GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验的隔震效果随着输入加速度幅值的增大而增大, 且 GSI-GBSC 系统的隔震效果要明显优于 GSI-SC 系统。



图 13 GSI-SC 系统试验的回填土

Fig. 13 Backfill soil of GSI-SC system tests

4.3 位移反应

(1) 相对位移反应

结构基础与地基土之间的相对位移直观地反映了结构基础与地基土之间相对运动情况。图 14 为输入加速度幅值 $0.4g$ 时, 结构基础与地基土之间的相对位移时程曲线。从图 14 可知, GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验结构基础与地基土之间的相对位移峰值为 3.4 , 6.2 mm, 而无隔震试验的相对位移峰值不足 1 mm, 几乎没有相对位移。GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验中结构基础与地基土之间出现相对位移, 这是隔震系统起作用的结果, 更多的地震能量转化为结构基础与地基土的相对运动。

表 4 模型的加速度峰值

Table 4 Peak accelerations of models

设计输入加速度幅值	无隔震试验			GSI-SC 系统试验			GSI-GBSC 系统试验		
	台面	屋面板	放大系数	台面	屋面板	放大系数	台面	屋面板	放大系数
$0.1g$	$0.106g$	$0.316g$	2.987	$0.106g$	$0.280g$	2.646	$0.110g$	$0.288g$	2.550
$0.2g$	$0.241g$	$0.643g$	2.672	$0.268g$	$0.553g$	2.062	$0.219g$	$0.418g$	1.869
$0.4g$	$0.545g$	$1.000g$	1.836	$0.659g$	$0.795g$	1.206	$0.482g$	$0.496g$	1.012

(2) 层间位移反应

结构的层间相对位移是评价结构变形状态的重要参数。从上述结果分析中可知, 输入加速度幅值为 $0.4g$ 时 GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验中结构的地震反应减小最显著。在这里仅对输入加速度幅值为 $0.4g$ 时, 3 组试验中结构模型的层间位移反应进行分析。图 15 为 3 组试验结构模型的层间位移时程曲线。从图中可知, GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验的层间位移反应明显小于无隔震试验结构模型的层间位移反应; 从层间位移峰值指标对比, 可以发现 GSI-SC 系统试验和 GSI-GBSC 系统试验的层间位移峰值较无隔震试验分别减小了 39% 和 48%。可见, GSI-GBSC 系统对结构模型的层间位移的减小程度更显著。

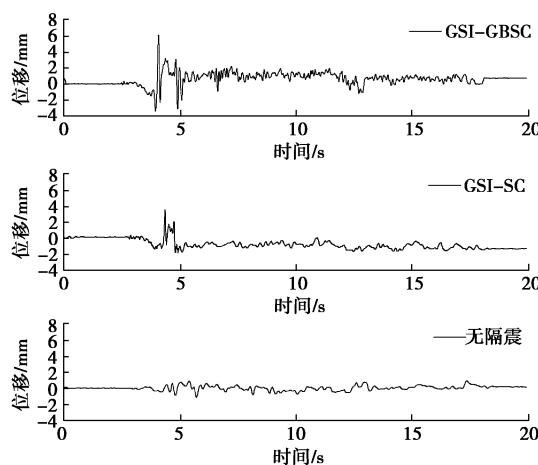


图 14 相对位移时程曲线

Fig. 14 Time-history curves of relative displacement

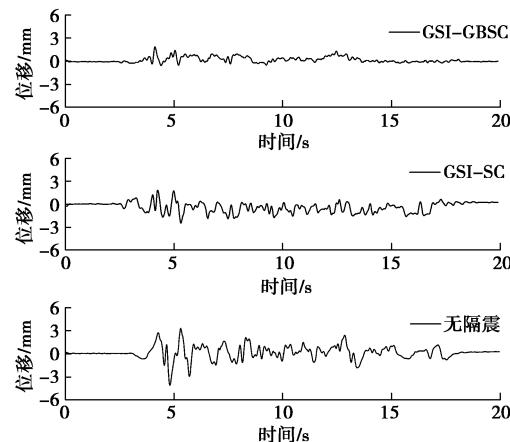


图 15 层间位移时程曲线

Fig. 15 Time-history curves of interlayer displacement

5 结 论

本文提出了两种低成本的 GSI 系统即 GSI-SC 系统和 GSI-GBSC 系统, 对单层砌体结构模型开展了考

虑场地的有、无隔震措施的大比例振动台模型试验, 并对试验结果进行对比分析。

(1) GSI-SC 系统和 GSI-GBSC 系统均可以有效减小结构的地震反应。在输入加速度幅值为 $0.4g$ 时, GSI-SC 系统和 GSI-GBSC 系统的隔震效果最好, 其中结构屋面板的加速度反应峰值减小率分别达到了 33% 和 45%, 结构层间位移峰值减小率分别达 39% 和 48%。

(2) 对比隔震效果, GSI-GBSC 系统较 GSI-SC 系统更具有优势, 原因是在砂垫层表面铺满一层玻璃珠, 更加有利于水平地震作用下结构基础与玻璃珠-砂垫层之间产生相对运动, 限制地震动向上部结构的传递。

(3) GSI-SC 系统和 GSI-GBSC 系统都具有良好的隔震效果, 它们只需要基本的施工技能且建造成本低廉, 适合在经济条件差的农村地区推广。

参考文献:

- [1] 李立. 建筑物的滑动隔震-隔震技术的研究与应用[M]. 北京: 地震出版社, 1991: 50 - 68. (LI Li. Research and Application of Sliding Isolation Technology of Building[M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1991: 50 - 68. (in Chinese))
- [2] 曹万林, 周中一, 王卿, 等. 农村房屋新型隔震与抗震砌体结构振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 209 - 213. (CAO Wan-lin, ZHOU Zhong-yi, WANG Qing, et al. Experimental study on base vibration isolation and anti-seismic masonry structure in rural areas by shaking table test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 209 - 213. (in Chinese))
- [3] 曹万林, 叶炜, 张玉山, 等. 玻璃珠-石墨基础滑移隔震砌体结构工作性能试验研究[J]. 自然灾害学报, 2015(5): 37 - 46. (CAO Wan-lin, YE Wei, ZHANG Yu-shan, et al. Experimental study on working performance of the base sliding isolated masonry structure with glass beads-graphite layer[J]. Journal of Natural Disasters, 2015(5): 37 - 46. (in Chinese))
- [4] 尚守平, 黄群堂, 沈戎, 等. 钢筋-沥青隔震墩砌体结构足尺模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(3): 132 - 139. (SHANG Shou-ping, HUANG Qun-tang, SHEN Rong, et al. Full-scale experimental research on steel asphalt isolation pier[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(3): 132 - 139. (in Chinese))
- [5] 李英民, 卜长明, 刘凯, 等. 简易消能减震砌体结构模型振动台试验[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(6): 46 - 52. (LI Ying-min, BU Chang-ming, LIU Kai, et al. Shaking table

- experiment on a simple energy dissipation masonry structure[J]. Journal of Chongqing University, 2013, **36**(6):46 - 52. (in Chinese))
- [6] TSANG H H. Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2008, **37**(2): 283 - 303.
- [7] TSANGA Hing-Ho, PITILAKISB Kyriazis. Mechanism of geotechnical seismic isolation system: analytical modeling[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **122**: 171 - 184.
- [8] TSANG H H. Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, **37**(2): 283 - 303.
- [9] TSANG Hing-Ho, 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.
- [10] FENG Z Y, SUTTER K G. Dynamic properties of granulated rubber-Sand mixtures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2000, **23**(3): 338 - 344.
- [11] 尚守平, 岁小溪, 周志锦, 等. 橡胶颗粒-砂混合物动剪切模量的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(2): 377 - 381. (SHANG Shou-ping, SUI Xiao-xi, ZHOU Zhi-jin, et al. Experimental study on dynamic shear modulus of rubber-sand mixtures[J]. Soil and Rock, 2010, **31**(2): 377 - 381. (in Chinese))
- [12] SENETAKIS K, ANASTASIADIS A, PITILAKIS K. Dynamic properties of dry sand/rubber (SRM) and gravel/rubber (GRM) mixtures in a wide range of shearing strain amplitudes[J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2012, **33**(1): 38 - 53.
- [13] ANASTASIADIS A, SENETAKIS K, PITILAKIS K. Small-strain shear modulus and damping ratio of sand-rubber and gravel-rubber mixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2012, **30**(2): 363 - 382.
- [14] ANBAZHAGAN P, MAMATHA M, SOUMYASHREE P, et al. Laboratory characterization of tyre crumbs soil mixture for developing low cost damping materials[J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2011, **4**(6): 63 - 66.
- [15] NAKHAE A, MARANDI S M. Reducing the forces caused by earthquake on retaining walls using granulated rubber-soil mixture[J]. IJE Transaction B: Applications, 2011, **24**(4): 337 - 350.
- [16] 刘方成, 杨 峻, 王海东. 大应变下干燥橡胶砂动力特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, **35**(增刊2): 4265 - 4278. (LIU Fang-cheng, YANG Jun, WANG Hai-dong. Experimental study on dynamic characteristics of dry rubber-sand mixture at large strains[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S2): 4265 - 4278. (in Chinese))
- [17] 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 Fang-cheng, CHEN Lu, WANG Hai-dong. Experimental study on dynamic shear modulus and damping ratio of sand-rubber mixture by cyclic simple shear test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(7): 1903 - 1913. (in Chinese))
- [18] SAMAN Y S, MONA R. Effect of seismic isolation by rubber soil mixture on seismic demand of steel moment frame in near fault area[J]. Structure and Steel, 2012, **7**(10): 41 - 60.
- [19] ABDELHALEM A M, EL-SHERBINY R M, LOTFY H, et al. Evaluation of rubber /sand mixtures as replacement soils to mitigate earthquake induced ground motions[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, Paris.
- [20] 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 and Earthquake Engineering, 2015, **79**: 237 - 252.
- [21] BRUNET S, DE LA LLERA J C, KAUSEL E. Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016(85): 134 - 145.
- [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 Xiao-xi. The Study on Seismic Isolation Performance of Granulated Rubber-Sand Mixtur[D]. Changsha: Master Dissertation of Hunan University, 2009. (in Chinese))
- [23] 刘方成, 吴孟桃, 陈巨龙, 等. 土工格室加筋对橡胶砂动力特性影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(9): 1616 - 1625. (LIU Fang-cheng, WU Meng-tao, CHEN Ju-long, et al. Experimental study on influence of geo-cell reinforcement on dynamic properties of rubber-sand

- mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(9): 1616 – 1625. (in Chinese))
- [24] 刘方成, 张永富, 周亚栋. 土工格室加筋橡胶砂垫层隔震试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, **37**(增刊 1): 93 – 100. (LIU Fang-cheng, ZHANG Yong-fu, ZHOU Ya-dong. Experimental study on isolating performance of geo-cell reinforced rubber-sand mixture cushion[J]. Journal of Building Structures, 2016, **37**(S1): 93 – 100. (in Chinese))
- [25] 王飞, 袁康, 郭军林, 等. 简易滑移隔震技术在村镇建筑中的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, **39**(2): 122 – 128. (WANG Fei, YUAN Kang, GUO Jun-lin, et al. Shaking table model testing of structure suppressing vibration control including soil-structure interaction effects[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, **39**(2): 122 – 128. (in Chinese))
- [26] 陈国兴, 王志华, 宰金珉. 考虑土与结构相互作用效应的结构减震控制大型振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, **21**(4): 117 – 127. (CHEN Guo-xing, WANG Zhi-hua, ZAI Jin-min. Shaking table model testing of structure suppressing vibration control including soil-structure interaction effects[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, **21**(4): 117 – 127. (in Chinese))
- [27] 吕西林, 陈跃庆. 高层建筑结构-地基动力相互作用效果的振动台试验对比研究[J]. 地震工程与工程振动, 2002, **22**(2): 42 – 48. (LÜ Xi-lin, CHEN Yue-qing. Study on effect of soil-structure interaction by shaking table test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, **22**(2): 42 – 48. (in Chinese))
- [28] 陈跃庆, 吕西林, 李培振, 等. 不同土性的地基-结构动力相互作用振动台模型试验对比研究[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(5): 57 – 64. (CHEN Yue-qing, LÜ Xi-lin, LI Pei-zhen, et al. Comparative study on the dynamic soil-structure interaction system with various soils by using shaking table model tests[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, **39**(5): 57 – 64. (in Chinese))
- [29] 孙海峰, 景立平, 王宁伟, 等. 振动台多功能叠层剪切箱研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(12): 2498 – 2506. (SUN Hai-feng, JING Li-ping, WANG Ning-wei, et al. Development of multifunctional laminar shear container for shaking table test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(12): 2498 – 2506. (in Chinese))

第 11 届全国工程排水与加固技术研讨会暨港口工程技术交流大会（二号通知）

在“生态优先、绿色发展”理念的指引下, 交通、水利、市政、环境等行业基础设施建设与维护面临转型升级和新的要求, 为港口、水运工程及工程排水与加固领域的技术进步和创新能力带来了新的发展机遇。“十三五”期间, 港口与航道工程建设、软土地基处理、疏浚底泥资源化利用及污染土处置等专业领域取得了一系列高效实用、绿色节能的创新科技成果, 进一步推动了各行业基础设施建设与维护技术的进步。为及时总结港口工程和工程排水与加固领域的科技创新成果, 促进新理论、新技术、新材料、新设备的交流与推广, 搭建广大科研、设计、施工、管理人员的交流平台, 定于 2020 年 11 月 27 日—28 日在南京召开全国工程排水与加固技术研讨会暨港口工程技术交流大会, 欢迎相关专家、学者和工程技术人员踊跃参加。

会议议题: ①“一带一路”绿色港口、航道工程建设及维护加固新技术; ②地基处理新技术、新方法、新设备及测试技

术; ③岛礁建设与加固新技术; ④新型土工合成材料研制与应用; ⑤港口及航道工程建设新结构; ⑥航道与河湖疏浚底泥、城市弃土处治与资源化利用; ⑦城市河道治理及生态护岸新技术; ⑧水域岸线周边污染场地修复及尾矿处置新技术; ⑨重大工程实录与经验交流。

论文交流: 本次会议收到投稿论文 61 篇, 其中 54 篇录入会议论文集, 由中国水利水电出版社出版, 另外会议期间, 将从参加本次会议并做大会交流的论文中评选优秀论文。

联系人: 关云飞 (025-85829506 13770938628); 耿之周 (025-85829563 15850597239);

地 址: 南京市虎踞关 34 号 南京水利科学研究院岩土工程研究所; 北京市东城区国子监街 28 号 中交水运规划设计院有限公司科技部。

信箱: psjgzw@163.com。