

不同土性地基考虑 SSI 效应的隔震结构 地震响应分析

陈启冬¹, 许立英², 刘阳¹, 吴应雄³

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010;
3. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 为探究不同土性地基的 SSI 效应对层间隔震结构影响机理与动力响应规律, 选取一个典型层间隔震结构, 对其简化并制作缩尺模型, 采用振动台试验的方法, 分别在硬土、软土这两种地基上单向输入 4 条地震波来研究模型的动力响应。结果表明: 土体具有明显的放大效应, 随着地基土由硬变软, 隔震结构周期延长倍数降低。隔震结构在硬土地基上能发挥较好的减震效果, 而软土地基上减震效果明显减弱。软土地基上塔楼的动力响应较硬土地基增大, 塔楼容易成为薄弱部位, 其抗震设计应重点关注。

关键词: SSI 效应; 层间隔震; 硬土地基; 软土地基; 振动台试验

中图分类号: TU352.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2021)02-0149-06

Seismic Response Analysis of Isolated Structure Considering Soil-structure Interaction on Various Soil Foundations

CHEN Qidong¹, Xu Liying², LIU Yang¹, WU YingXiong³

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China;

3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to explore the influence mechanism and dynamic response law of soil-structure interaction (SSI) of various soil foundations on the inter-story isolated structure, a typical isolated structure was selected to develop a small-scale model. The method of shaking table test is used to analyze the dynamic response of the model by inputting 4 ordinary ground motions in one direction of hard soil and soft soil respectively. The results show that soil has obvious amplification effects. As the soil foundation changes from hard to soft, the period extension ratio of the isolated structure decreases. The isolation structure can play a better damping effect on the hard foundation, while the damping effect on the soft foundation is obviously weakened. The dynamic response of the tower on soft soil foundation is larger than that on hard soil foundation, which makes the tower easy to become a weak part, therefore close attention should be paid on its seismic design.

Keywords: soil-structure interaction; inter-story isolation; hard soil foundation; soft soil foundation; shaking table test

结构隔震设计通常没有考虑土-结构动力相互作用效应(简称 SSI 效应)^[1-3]。实践和研究表明,

收稿日期:2020-12-27

修稿日期:2020-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51778149);福建省自然科学基金杰出青年项目(2020J06020);福建省住建厅科技研究项目(2020-K-64)

作者简介:陈启冬(1999-),男,本科生,专业方向为工程结构抗震。E-mail:625613382@qq.com

通讯作者:许立英(1981-),女,博士,讲师,主要从事工程结构新材料理论研究及工程设计应用方面的工作。E-mail:lying_xu@126.com

由于 SSI 效应的存在,改变了地震动特性和结构的动力特性等,将导致在刚性地基假定下设计的结构与实际土层地基上的结构动力反应产生差异^[4-5]。

Constantinou 等^[6]对单自由度基础隔震体系进行分析,指出 SSI 效应使结构的基频发生了明显变化。Saha 等^[7]等在软黏土地基上进行了桩-土-结构的振动台试验,结果表明结构的自振周期延长。杜东升等^[8]对高层隔震结构进行分析,认为 SSI 效应增大了隔震层位移。李昌平等^[9]对高层隔震模型进行振动台试验,得出软土地基上隔震结构能够有效减轻结构地震反应,但隔震效果有降低。陈跃庆等^[10]通过振动台试验研究高层结构在不同土性地基条件下的响应,结果表明不同土性地基的 SSI 效应存在较大差异。刘伟庆等^[11]研究不同土性地基上高层隔震结构的响应规律,指出 SSI 效应改变了结构体系的阻尼比,软土地基上体系的阻尼比增加。Zhuang 等^[12-13]和于旭等^[14]等通过振动台试验探究不同地基上 SSI 效应对基础隔震结构的影响机理,发现当软土地基考虑 SSI 效应后,地基土质对隔震效果的影响显著。

《建筑抗震设计规范》^[15](GB 50011—2010)指出,隔震结构建设在软土地基上应进行专门研究。目前少见不同土性地基的 SSI 效应对层隔结构的影响机理与动力响应规律研究,以及桩-土-层隔结构的振动台试验研究。本文选择典型的大底盘单塔楼层隔结构作为研究对象,通过缩尺模型开展试验研究,探究层隔结构在硬土、软土这两种不同地基土条件下,SSI 效应对其动力特性的影响机理及响应规律。

1 试验设计

1.1 模型相似关系

选取一个典型的大底盘单塔楼建筑,经过合理简化后的设计信息有:结构长向为三跨、短向为单跨,底盘 2 层,层高 4.8 m,柱网尺寸为 7.2 m × 7.2 m 和 7.2 m × 3.6 m。中间塔楼 6 层,层高 3.3 m,建筑总高度为 29.4 m。塔楼与底盘的平面面积比为 2。

对典型结构进行缩尺,采用钢框架模型,考虑到模型土箱净尺寸和振动台载荷为 22 t,将长度相似比定为 1/12。缩尺结构模型 X 向为 1 200 mm (300 mm + 600 mm + 300 mm),Y 向为 600 mm,模型介绍详见下一节。桩基承台尺寸为 1 400 mm × 800 mm。承台与土箱面积比为 1.0: 5.7,土箱和模型平面尺寸见图 1。

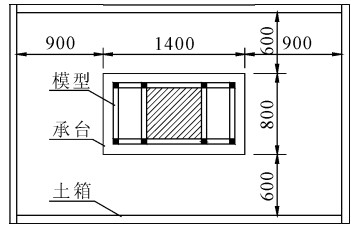


图 1 模型平面图(单位:mm)

试验中涉及到多种材料,根据试验目的选出对试验起决定作用的参数,主要参数相似比完全统一。其中模型设计考虑前二阶振型和高宽比的相似性,而模型土层考虑剪切模量的相似性。根据黏土最大剪切模量经验公式、土体性质和围压等计算^[12-14],确定模型土的模量相似比约为 1/4。考虑到隔震支座应力以及土体动力反应的相似,选取加速度、长度、弹性模量相似比为基本相似参数,其他参数根据 Buckingham π 定律导出,相似关系有:长度、线位移为 1/12;弹性模量、等效密度、应力、加速度为 1;质量为 1/144;时间为 0.288。

1.2 试验模型和土箱

模型设计和完成图见图 2,梁柱均采用 Q235 级 50 mm × 50 mm × 3 mm 空心方钢管。塔楼考虑到隔震上部结构在地震作用下基本表现为平动,将六层简化为三层,层高为 550 mm。楼板均采用 10 mm 厚钢板。振动台试验的激振方向为 X 向,其高宽比为 2.75。试验中模型每层配重 0.4 t,总重量为 3.3 t。

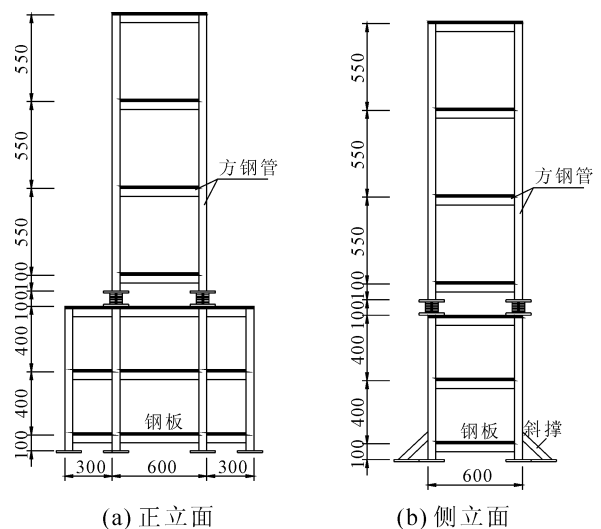


图 2 模型设计图(单位:mm)

模型下部的承台和桩基采用 C30 混凝土,其设计信息见图 3,为确保试验过程中群桩桩基不能破坏,加强了桩基承载力。承台中预留了孔洞,便于对承台下土体进行夯实及埋设传感器。

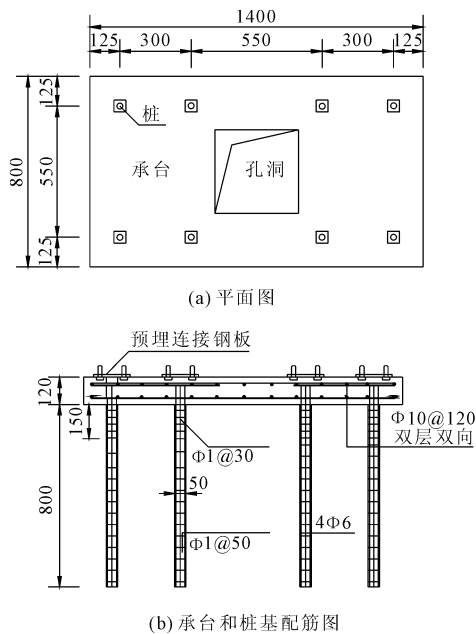


图 3 桩基和承台(单位:mm)

结构动力相互作用振动台试验,国内外采用了多种类型土箱,其中陈国兴等^[16]研制的土箱,已被证明可较好地消除边界效应。本文参照文献[3]设计制作了剪切型土箱,见图 4,本文课题组在试验前对土箱进行测试,表明土箱能有效地消除边界效应的影响。

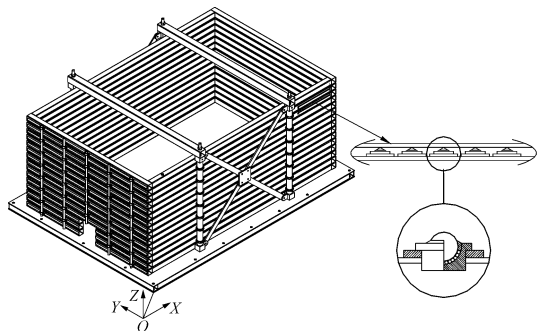


图 4 剪切型土箱(单位:mm)

1.3 隔震支座设计测试

综合考虑国内相关试验成果^[12-14,17-18],确定试验采用直径为 70 mm 的铅芯橡胶支座(LRB70-5),橡胶剪切模量为 0.392,算得竖向面压为 1.02 MPa,其参数见表 1。委托生产制作 8 个同等规格的支座。对 8 个隔震支座进行压剪试验,支座的滞回曲线见图 5,选择两组误差较小的 4 个 LRB 用于后续试验。

1.4 测点布置

试验采用 DH610 型加速度传感器和 BL80-V 型拉线位移计来测量结构响应。共布置 11 个加速

度传感器和 7 个位移传感器,见图 6。

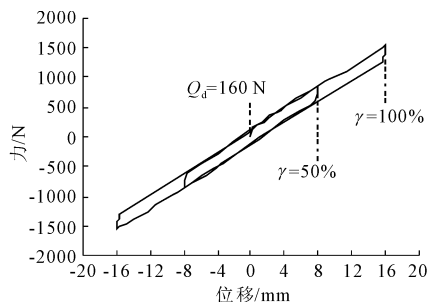


图 5 隔震支座滞回曲线

表 1 LRB70-5 隔震支座性能参数

橡胶层厚度 /mm	钢板厚度 /mm	屈服前刚度 /($N \cdot mm^{-1}$)	屈服后刚度 /($N \cdot mm^{-1}$)	屈服力 /N	水平刚度 ($\gamma = 50\%$ 和 100%) /($N \cdot mm^{-1}$)
1.6 (10 层)	2 (9 层)	1071	89	160	103,91

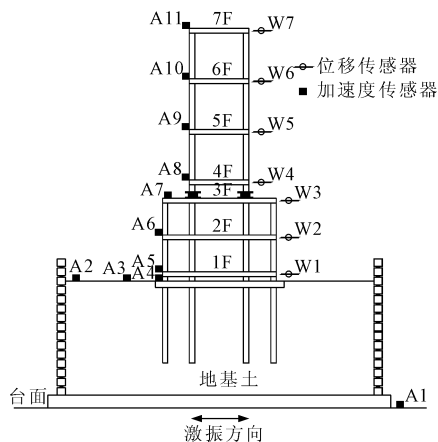


图 6 传感器布置图

1.5 土体制备及模型组装

两种地基土均采用颗粒级配良好的黏性土来制备,采用人工分层装填的方法:每层土厚度 150 mm,加水后静置 7 d,再采用电动冲击夯夯实至预设深度。在试验前后分别对试验土体进行取样,综合给出模型试验软土、硬土的各项物理指标,见表 2。模型组装连接后见图 7。

表 2 地基土样物理性质

土样	密度 /($kg \cdot m^{-3}$)	含水率 /%	塑限 I_p	液限 I_L	状态
硬土	1910	23.71	21.86	0.213	硬塑
软土	1780	32.93	21.86	0.635	可塑

1.6 地震波选取和试验工况

分别选取 II、III 类场地常用的 El Centro 波、Taft 波、Kobe 天然波以及常用的人工合成 Tongan 波,将

这 4 条波加速度峰值分别调幅至 0.2g 和 0.4g, 分别对应烈度为 8 度时的设防地震与罕遇地震时的加速度峰值。将原始地震波进行压缩, 边界输入 (X 向)。数值计算中工况见表 3。

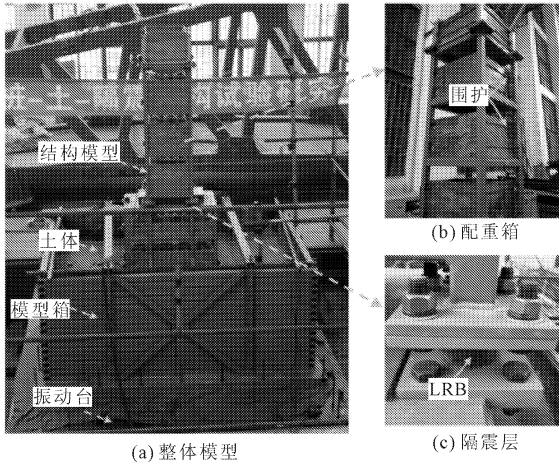


图 7 模型组装

表 3 试验工况表

地基	加速度/g	不同地震波工况			
		El Centro 波	Taft 波	Kobe 波	Tongan 波
硬土	0.20	A1	A3	A5	A7
	0.40	A2	A4	A6	A8
软土	0.20	B1	B3	B5	B7
	0.40	B2	B4	B6	B8

2 试验结果分析

通过振动台试验结果对比, 对建立在硬土、软土地基的结构进行动力响应分析, 探究隔震结构在地震作用下的自振周期、加速度和位移反应规律。

为分析隔震结构的减震效果, 引入地震反应减震率 θ , 定义:

$$\theta = (1 - \frac{\Delta_i}{\Delta}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: Δ_i 为隔震结构的响应峰值; Δ 为所对应的抗震结构的响应峰值。

为直观表达土放大作用对结构加速度响应的影响规律, 引入加速度放大系数 λ 概念, 定义:

$$\lambda = \frac{a_s}{a} \quad (2)$$

式中: a_s 为各测点的加速度峰值; a 为地震波输入的加速度峰值。

2.1 试验现象

试验结束后, 钢结构模型未出现损伤。在软土地基上, 桩基承台表面产生明显的不均匀沉降, 模型

结构发生轻微的倾斜现象。在硬土地基上, 则只产生轻微沉降, 上部结构未发生倾斜, 如图 8、图 9 所示。随着试验多工况的进行, 软土地基上发现有少量水析出, 其土表变得略微湿润; 而在硬土地基上没有观察到此现象。

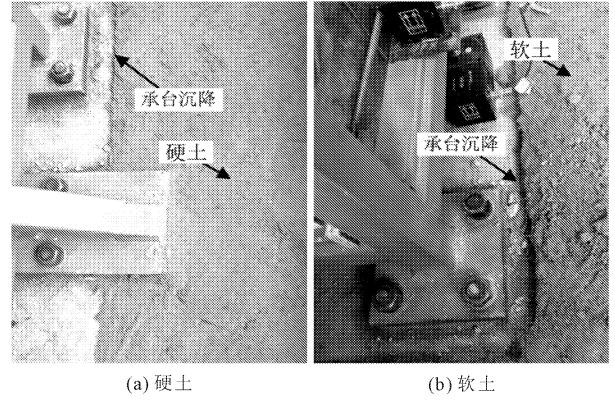


图 8 承台沉降

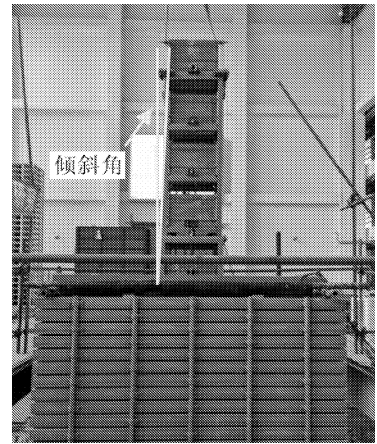


图 9 模型倾斜

2.2 土 - 结构模型的动力特性

表 4 给出了模型在不同地基上的自振周期对比, 可得到: 两种地基土隔震结构的自振周期较抗震结构均有延长, 延长倍数随着地基的变柔而减小。硬土地基上, 隔震结构自振周期较抗震结构延长 2.36 倍; 软土地基上为 1.98 倍。表明地基土性的软硬程度对隔震结构的隔震效果会产生一定影响。

表 4 结构自振周期

地基	周期/s	
	隔震	抗震
硬土	0.474	0.201
软土	0.480	0.243

2.3 土表加速度响应分析

表 5 和表 6 列出了地震波在硬土和软土地基土

表加速度峰值放大系数,从中可以看出不同地基土的放大效应存在差异,规律有:

(1) 均匀黏土形成的两种不同地基上地震动峰值均是放大的。总体来看,4 条地震波在土表的加速度放大系数均分布在 1.22 ~ 2.32 之间。

(2) 地震波在不同地基上的土表加速度放大程度具有差异。El Centro 波和 Tongan 人工波在硬土地基土表的放大效应更大,而 Taft 波和 Kobe 波在软土地基土表更大,这表明地基土的放大作用与地震波特性有关。

(3) 地基土的放大效应与地震波强度有关。随着输入地震波加速度峰值增加,两种地基的土表加速度放大系数减小。

表 5 硬土地基土表加速度对比

地震波	基底输入加速度/g	土表加速度/g	放大系数
El Centro	0.20	0.463	2.32
	0.40	0.881	2.20
Taft	0.20	0.354	1.77
	0.40	0.621	1.55
Kobe	0.20	0.272	1.36
	0.40	0.489	1.22
Tongan	0.20	0.355	1.78
	0.40	0.721	1.80

表 6 软土地基土表加速度对比

地震波	基底输入加速度/g	土表加速度/g	放大系数
El Centro	0.20	0.344	1.72
	0.40	0.623	1.56
Taft	0.20	0.382	1.91
	0.40	0.661	1.65
Kobe	0.20	0.412	2.06
	0.40	0.732	1.83
Tongan	0.20	0.329	1.65
	0.40	0.630	1.58

2.4 结构加速度响应分析

结构在不同地基上的加速度绝对响应,按照式(1)计算上部结构的加速度减震率,减震率分析中的“1”层为模型中底盘第二层楼面,结果见表 7。

由表 7 可得,层隔结构在不同地基上减震率存在差异,规律有:

(1) SSI 效应对层隔结构加速度减震效果的影响与地基土性密切相关。硬土地基上塔楼减震率明显高于软土地基,表明地基土越软,隔震结构的减震效果变差。

表 7 加速度减震率对比

楼层	硬土地基加速度减震率/%		软土地基加速度减震率/%	
	0.2g	0.4g	0.2g	0.4g
6	73.93	76.52	63.46	54.62
5	72.96	75.50	61.72	51.92
4	63.44	69.44	36.54	30.46
3(隔)	58.45	63.85	31.49	24.07
2	-37.29	-44.98	-13.24	-29.89
1	-22.16	-31.35	-15.57	-25.66

(2) 不同地基上考虑 SSI 效应对加速度减震效果的影响与输入地震动强度有关。输入地震波峰值越大,硬土地基上结构的减震效果越好;软土地基上楼层减震率反而降低。

综上,软土地基减震率较差可推断为:软土地基使隔震结构的自振周期延长,可能增强结构与地震波的长周期分量产生共振效应,使隔震结构地震反应增大。上述分析结果说明了软弱地基上考虑 SSI 效应的必要性,基于刚性假定得出的计算结论可能不安全。

2.5 结构位移响应分析

将两种模型在不同地基上的层间位移响应按照式(1)计算上部结构的层间位移减震率,最终结果见表 8。

表 8 层间位移减震率对比

楼层	硬土地基层间位移减震率/%		软土地基层间位移减震率/%	
	0.2g	0.4g	0.2g	0.4g
6	73.33	70.26	54.89	48.44
5	67.63	67.45	54.80	46.58
4	67.52	69.19	55.88	47.67
3(隔)	—	—	—	—
2	35.47	38.37	38.20	36.34
1	33.02	37.12	43.66	33.46

从表 8 分析可得:

(1) 隔震结构的层间位移减震效果与地基土的性质相关。建立在硬土地基上隔震结构的层间位移减震率优于软土地基。

(2) 隔震结构的层间位移减震效果与地震动强度相关。随着输入地震波加速度峰值的增大,硬土地基减震率有所提升,而软土地基减震率出现下降。

(3) 随着地震波加速度峰值的增大,硬土地基上层间位移减震率基本不变,而软土地基上减震率明显降低,表明随着激振的不断增强,软土地基上隔震结构的减震效果变差。

3 不同土地地基 SSI 效应分析

为定量分析考虑 SSI 效应后硬土地基和软土地基对层隔结构地震响应影响程度,引入 SSI 效应影响率 μ 来进行考量,定义其表达式为:

$$\mu = \left(\frac{R_s}{R_h} - 1 \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: μ 为 SSI 影响率; R_s 为软土地基上结构响应; R_h 为硬土地基上结构响应。

分别对加速度和层间位移响应均值进行 SSI 效应分析,将软土地基上层隔结构的 SSI 效应影响率列于表 9 和表 10。限于篇幅仅列出输入峰值 0.4g 作用下的数值。

表 9 输入峰值 0.4g 作用下 SSI 效应加速度影响率

楼层	硬土加速度/g	软土加速度/g	影响率/%
7	0.289	0.534	84.78
6	0.203	0.292	43.84
5	0.233	0.286	22.75
隔	0.305	0.496	62.62
3	1.316	0.974	-25.99
2	0.872	0.823	-5.62
1	0.642	0.675	5.14

表 10 输入峰值 0.4g 作用下 SSI 效应层间位移影响率

楼层	硬土位移/mm	软土位移/mm	影响率/%
6	0.53	1.16	118.87
5	0.74	1.42	91.89
4	0.72	1.29	79.17
隔	9.68	10.64	9.92
2	0.62	0.83	33.87
1	0.64	0.91	42.19

由表 9 和表 10 可得,SSI 效应对隔震结构影响明显,可归纳为:

(1) 从加速度响应分析,软土地基对结构塔楼的影响明显,影响率为 22.75% ~ 84.78%,隔震层影响率达到 62.62%。底盘影响率为负值,表明相比于硬土地基,软土地基对底盘的加速度响应具有减小作用。地基土由硬变软,塔楼容易成为薄弱部位。

(2) 从层间位移响应分析,软土地基对层隔结构的影响率均为正值,表明随着地基土变软,层间位移增大。其中软土对塔楼的影响显著,影响率达到 118.87%。

4 结 论

(1) 地基土性对结构的自振周期影响明显,随着地基土由硬变软,隔震结构周期延长倍数降低。

(2) 地基土体对地震波存在明显的放大作用,与地基土性质和地震波特性和均相关。硬土地基和软土地基的土表加速度峰值相对于输入峰值均增大。

(3) 隔震结构的减震效果与地基土性有关。硬土地上隔震结构的减震率高于软土地基,能发挥较好的隔震效果,而软土地上隔震结构的减震效果较差。

(4) 软土地基对隔震结构塔楼的放大作用显著。地基土由硬变软,塔楼的加速度、层间位移响应逐渐增大,塔楼容易成为薄弱部位。

参考文献:

- [1] 庄海洋,于旭.土-桩-隔震结构动力相互作用[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2] Wu Y, Lu J, Qi A. Shaking table test and numerical analysis of mid-story isolation eccentric structure with tower-podium[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019,11(1):168781401881956.
- [3] 吴应雄,郑泽炜,颜桂云,等.远场长周期地震动下桩-土-层间隔震结构体系振动台试验研究[J].建筑结构学报,2021,45(1):1-15.
- [4] Hokmabadi A S, Fatahi B, Samali B. Assessment of soil-pile-structure interaction influencing seismic response of mid-rise buildings sitting on floating pile foundations[J]. Computers and Geotechnics, 2014,55(JAN.):172-186.
- [5] Durante M G, Di Sarno L, Mylonakis G, et al. Soil-pile-structure interaction: experimental outcomes from shaking table tests[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016,45(7):1041-1061.
- [6] Constantinou M C, Kneifati M C. Effect of soil-structure interaction on damping and frequencies of base-isolated structures[J]. Proceedings of Third US National Conference on Earthquake Engineering, 1988,114(1):211-221.
- [7] Saha R, Pandey A, Sharma R P. An experimental study on seismic Soil-Pile Foundation-Structure Interaction in soft clay[C]//Indian Geotechnical Conference (IGC), 2016.
- [8] 杜东升,刘伟庆,王曙光,等.SSI效应对隔震结构的地震响应及损伤影响分析[J].土木工程学报,2012(5):26-33.
- [9] 李昌平,刘伟庆,王曙光,等.软土地上高层隔震结构模型振动台试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(7):72-78.

- 源开发与管理,2019(4):12-15.
- [3] 周琴娅. 小型水利工程建设管理中存在的问题与对策分析[J]. 低碳世界,2015(7):87-88.
- [4] 徐宏宇. 水库运行管理[C]//大坝技术及长效性能国际研讨会论文集二. 中国河南郑州:中国水力发电工程学会,2011:21-22.
- [5] 刘 华. 水库工程标准化管理实践与思考[J]. 科技资讯,2019,17(7):85-86.
- [6] 孙 涛. 大连市金普新区小型水库运行管理评价[J]. 黑龙江水利科技,2020,48(1):206-209,229.
- [7] 周志维,马秀峰,黎凤赓. 基于神经网络的水库标准化管理体系与评估[J]. 江西水利科技,2020,46(2):145-150.
- [8] Wu Q. Social stability risk evaluation of major water conservancy projects in fragile eco-environment regions[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(4).
- [9] Rafique A, Burian S, Hassan D, et al. Analysis of operational changes of tarbela reservoir to improve the water supply, hydropower generation, and flood control objectives[J]. Sustainability, 2020,12.
- [10] 彭月平,黎凤赓. 江西水利工程标准化管理长效机制探讨[J]. 水利技术监督,2020(4):18-20.
- [11] 顾 贺. 甘肃小型水库运行管理体制深化改革探讨[J]. 甘肃水利水电技术,2016,52(12):59-61.
- [12] 文富勇. 基于云服务的大坝安全监测信息管理与分析研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):251-255,260.
- [13] 陈 曦,曾亚武. 基于层次分析法和模糊理论水库大坝安全综合评价[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(6):95-100.
- [14] 卜跃先,安贞煜,李晓东,等. 湖南省生态水库工程评价指标体系构建与实例研究[J]. 人民长江,2020,51(6):69-72,178.
- [15] 徐 婧,刘伊生. 基于 AHP-物元可拓法的装配式建筑综合效益评价[J]. 建筑经济,2020,41(8):98-102.
- [16] 李华欣. 朱隈水库水环境质量综合评价[J]. 黑龙江水利科技,2020,48(3):238-242.
- [17] 侯 丽,邢精连,杨 帆,等. 基于改进 DHGF 算法与物元理论的大坝安全评价模型研究[J]. 水利规划与设计,2020(2):83-87.
- [18] 张媛媛. 尾矿库溃坝风险评价模型与风险防控研究[D]. 北京:首都经济贸易大学,2016:55-59.
- [19] 曹 亮. 基于 AHP 的新疆中小型水库健康评价分析[D]. 西安:西安理工大学,2020:18-20.
- [20] 郭利刚,冯珍珍,刘 庚,等. 基于物元模型的汾河流域土地生态安全评价[J]. 生态学杂志,2020,39(6):2061-2069.

(上接第 154 页)

- [10] 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.
- [11] 刘伟庆,李昌平,王曙光,等. 不同土性地基上高层隔震结构振动台试验对比研究[J]. 振动与冲击,2013,32(16):128-133,151.
- [12] Zhuang H Y, Yu X, Zhu C, et al. Shaking table tests for the seismic response of a base-isolated structure with the SSI effect [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2014,67(6):208-218.
- [13] Zhuang H Y, Fu J, Yu X, et al. Earthquake responses of a base-isolated structure on a multi-layered soft soil foundation by using shaking table tests[J]. Engineering Structures, 2019,179(JAN. 15):79-91.
- [14] 于 旭,朱 超,庄海洋,等. 不同场地多层基础隔震结构振动台试验对比研究[J]. 防灾减灾工程学报,2016,36(5):758-765.
- [15] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [16] 陈国兴,王志华,左 熹,等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报,2010,32(1):89-97.
- [17] Xu L Y, Lin Y Q, Wu Y X. Seismic response analysis of a first-story isolated reinforced concrete frame building with independent columns[J]. Advances in Structural Engineering,2020,23(12):136943322093346.
- [18] 吴应雄,林友勤,黄 净,等. 不同支座布置下复合基础隔震结构的隔震性能振动台试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2017,25(6):1222-1235.