

DOI: 10.11779/CJGE2023S20013

模块式加筋土挡墙震后健康状态识别研究

李思汉^{1,2,3}, 蔡晓光^{*2,3,4}, 景立平^{1,5}, 蔡博渊^{1,3}, 黄鑫^{1,2,3}, 徐洪路⁵

(1. 防灾科技学院地质工程学院, 河北 廊坊 065201; 2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北 廊坊 065201; 3. 廊坊市加筋土结构研发与应用重点实验室, 河北 廊坊 065201; 4. 中国地震灾害防御中心, 北京 100029; 5. 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, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 采用时域识别方法分析了加筋土挡墙大型振动台模型试验在不同工况下动力特性(自振频率和阻尼比)分布规律, 介绍了加筋土挡墙不同位置处动力特性的变化特征, 阐述了不同损伤程度下加筋土挡墙动力特性分布规律, 探究了动力特性变化幅值与加筋土挡墙损伤程度的定量关系。结果表明: 加载阶段前期, 加筋土挡墙各位置处的自振频率基本相同, 阻尼比随着墙高的上升而减小; 加载后期, 挡墙自振频率明显下降、阻尼比大幅上升。采用数理方法获得了单级挡墙自振频率和阻尼比的分布曲线, 得出了基本完好、轻微破坏、中等破坏和毁坏4个阶段自振频率和阻尼比变化幅度; 当自振频率下降幅度为6.75%~16.43%, 阻尼比上升幅度106.14%~243.09%时, 可认为加筋土挡墙处于中等破坏阶段; 当自振频率下降幅度为16.43%~31.59%、阻尼比上升幅度243.09%~462.04%时, 可认为加筋土挡墙处于毁坏阶段。

关键词: 振动台试验; 模块式加筋土挡墙; 时域识别方法; 健康状态识别; 动力特性

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0116-06

作者简介: 李思汉(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事支挡结构抗震方面的研究工作。E-mail: lisihan@st.cidp.edu.cn。

Health status identification of modular-block-reinforced soil retaining walls after earthquakes

LI Sihan^{1,2,3}, CAI Xiaoguang^{2,3,4}, JING Liping^{1,5}, CAI Boyuan^{1,3}, HUANG Xin^{1,2,3}, XU Honglu⁵

(1. College of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, China; 2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Langfang 065201, China; 3. Langfang City Key Laboratory of Research and Application of Geosynthetic Reinforced Soil Structure, Langfang 065201, China; 4. China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China; 5. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: Distribution of dynamic characteristics (natural frequency and damping ratio) of large-scale shaking table model tests on a reinforced soil retaining wall (RSRW) under different working conditions is analyzed by using the time-domain identification method. The variation characteristics of dynamic characteristics at different positions of the RSRW are introduced, and the distribution laws of its dynamic characteristics under different damage degrees are expounded. The quantitative relationship between the amplitude of dynamic characteristics and the damage degree of the RSRW is explored. The results show that at the early stage of loading stage, the natural frequencies are basically the same, and the damping ratio decreases with the increase of wall height. At the later stage of loading, the natural frequency of the RSRW decreases obviously, and the damping ratio increases greatly. The distribution curves of the natural frequency and damping ratio are obtained by the mathematical methods. The variation amplitudes of the natural frequency and damping ratio are obtained for the following four stages: basic intact, slight damage, moderate damage and destruction. When the decrease amplitude of the natural frequency is 6.75 % ~ 16.43 % and the increase amplitude of the damping ratio is 106.14 % ~ 243.09 %, it can be considered that the RSRW is at the middle failure stage. When the decreasing amplitude of the natural vibration frequency is 16.43 % ~ 31.59 % and the increasing amplitude of the damping ratio is 243.09 % ~ 462.04%, it can be considered that the RSRW is at the destruction stage.

基金项目: 河北省高等学校科学研究计划项目(BJK2024034); 廊坊市科学技术研究与发展计划项目(2023013205); 地震科技星火项目(XH23067YA); 江苏省地质工程环境智能监控工程研究中心开放基金项目(2023-ZNKKJ-06); 中央高校基本科研业务费专题项目(ZY20220208)

收稿日期: 2023-11-30

***通信作者** (E-mail: caixiaoguang123@163.com)

Key words: shaking table test; modular-block reinforced soil retaining wall; time domain identification method; health status identification; dynamic characteristic

0 引言

加筋土挡墙因施工快速简单^[1]、碳排放量低^[2]、抗震性能优越^[3]等优势而被广泛应用于公路、铁路、市政等基础设施建设领域。作为一种柔性结构,加筋土挡墙具有极强的变形协调能力,而变形过大则会影响结构的使用功能。例如, Koerner 等^[4]分析了美国 320 座加筋土挡墙破坏原因,其中 99 座是由于变形过大造成破坏;除此之外,汶川地震^[5]、Chi-Chi 地震^[6]也出现加筋土挡墙因变形过大而发生破坏。

墙体变形是加筋土挡墙破坏的外在表现型式,同时,破坏也会造成结构内部动力特性的改变。这种情况类似于中医诊病中“望(观察外在表现)”和“切(利用仪器了解内部变化)”。对于加筋土挡墙,如何将墙体变形破坏与内部动力特性变化进行对应呢?首先需要明确的是内部指数的计算方法、变化规律。

自振频率是加筋土挡墙结构的关键参数之一。自振频率的变化意味着结构刚度和整体性的改变,结构健康状态出现了变化,这一判别方法已广泛应用于机械故障排查和结构健康诊断方面^[7]。众多学者利用振动台试验^[8-9]、理论分析^[10-13]和数值模拟^[14-15]三种手段对自振频率的解析式、影响因素进行了相关研究。

伍永胜^[14]利用 ANSYS 归纳了加筋土挡墙的一阶频率($F=38/H+0.4$, H 为墙高)。Hatami 等^[15]总结部分自振频率计算公式(如 Richardson 和 Lee 公式: $F=1/HC$, H 为墙高, C 为 0.02~0.033 之间变化的系数),对影响加筋土挡墙模型基频的一些结构设计参数进行了研究和讨论,认为共振频率与地震动强度有关。分析可知,众多学者将自振频率视为加筋土挡墙的整体频率,没有明确加筋土挡墙在不同高度、不同部位处的频率是否存在差别。共振频率随着地震动强度的变化规律并不清晰。

随着“交通强国”战略的提出,加筋土挡墙不可避免地应用于地震高烈度区。为保证道路通畅,地震后对结构的健康状态进行诊断是十分必要的。目前尚未有利用内部指标变化规律判别加筋土结构损伤程度的方法,因此本文基于模块式加筋土挡墙振动台试验,采用时域识别方法计算不同振动阶段加筋土挡墙的自振频率、阻尼比变化规律,探究自振频率、阻尼比分布规律与变形破坏程度间的对应关系,确定加筋土挡墙的健康状态。研究结果可丰富加筋土挡墙的破坏等级判别评定体系,为欠缺原始资料和墙体变形不易准确判断的加筋土结构提供新的判别思路。

1 试验概述

振动台试验在防灾科技学院的中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室进行,振动台、模型箱等设备参数已在文献[5, 16~18]进行了介绍。根据振动台承载能力和模型箱尺寸,单级加筋土挡墙相似比设定为 1:4 和 1:2。模型所用回填土、筋材、面板的具体介绍可见文献[19]。

试验模型设计如图 1 所示,在单级挡墙模型中设立 13 个加速度计:6 个加速度计布设在加筋区、6 个加速度计布设在非加筋区、1 个加速度计布设在墙面板顶部。此外,在模型箱底部附加 2 个加速度计用于记录输入加速度时程。

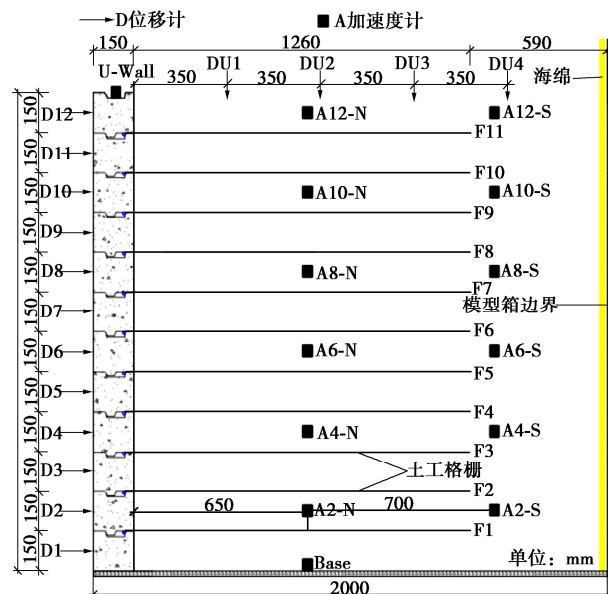


图 1 模型设计图

Fig. 1 Model design

试验中输入单向卧龙波(WL)、EI-Centro 波(EL)和白噪声(WN)三种地震动,输入波形可见文献[5, 16~18]。加载工况见表 1 所示。

2 试验结果

2.1 动力特性

本文采用时域识别方法(STD 法)进行自振频率和阻尼比计算。不同加载阶段,加筋土结构不同位置、不同高度处的自振频率和阻尼比如图 2 所示。由图 2 (a)可知:①在 WN9 工况(WL1.6g)前,顶部模型砖(U-Wall)处所得自振频率与加筋区土体内(A2、A4、A6、A8、A10 及 A12)处自振频率基本一致,

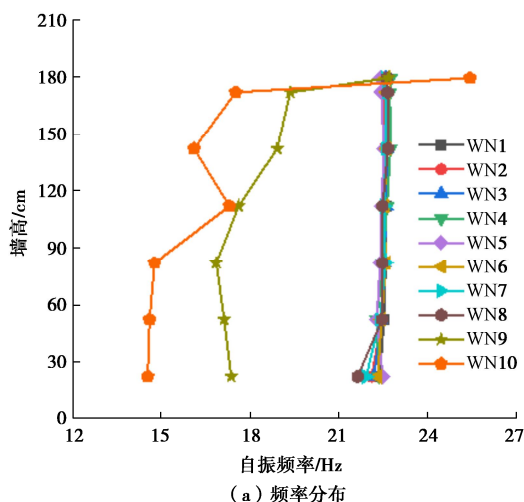
表 1 试验工况

Table 1 Loading conditions

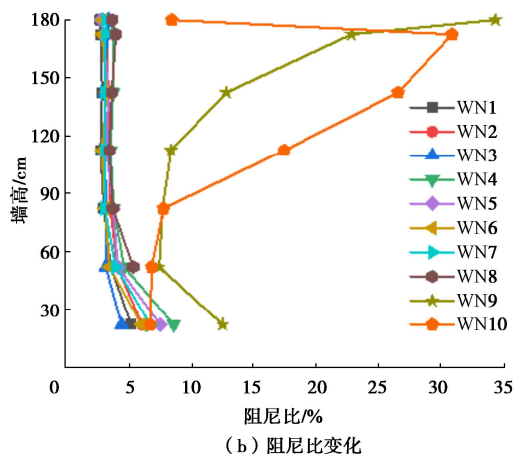
序号	输入波	加速度/g	相似比	工况代号
1	WN	0.05	1	WN1
	WL, EL	0.1	4,2	/
2	WN	0.05	1	WN2
	WL, EL	0.2	4,2	/
3	WN	0.05	1	WN3
	WL, EL	0.4	4,2	/
4	WN	0.05	1	WN4
	WL, EL	0.6	4,2	/
5	WN	0.05	1	WN5
	WL, EL	0.8	4,2	/
6	WN	0.05	1	WN6
	WL, EL	1.0	4,2	/
7	WN	0.05	1	WN7
	WL, EL	1.2	4,2	/
8	WN	0.05	1	WN8
	WL	1.6	4,2	/
9	WN	0.05	1	WN9
	WL	2.0	4,2	/
10	WN	0.05	1	WN10

这与魏明等^[20]试验结果一致。②WN9 和 WN10 工况时, 顶部模型砖处与加筋区土体自振频率出现较大差异, 顶部模型砖自振频率略有上升; 其原因是多次振动导致顶部模型砖位移过大, 在 WN10 工况时, 顶部模型砖已掉落, 与加筋土结构分离, 所测自振频率已失真。③WN9 和 WN10 工况时, 加筋区土体内各位置处自振频率明显降低; 其原因是多次震动后墙体外倾, 导致土体颗粒重新排列、结构整体刚度下降、结构内部出现损伤。

由图 2 (b) 所示: ①在 WN1~WN8 工况时, 阻尼比整体较稳定, 未见明显波动; 阻尼比随着墙高的升高而减小, 其原因为土体的剪应变随着埋深增加而逐渐增大导致^[21]。②WN9 和 WN10 工况时, 阻尼比最大部位已由加筋土结构底部 (A2 处) 逐渐转移至顶部 (A12 处), 原因是地震动多次输入后, 结构上部土体变形较大, 土体耗能能力加强。



(a) 频率分布



(b) 阻尼比变化

图 2 动力特性分布规律

Fig. 2 Distribution laws of dynamic characteristics

将加筋结构内各测点 (A2、A4、A6、A8、A10、A12) 的自振周期及阻尼比取平均值, 作为结构整体的自振频率和阻尼比, 其各加载阶段的分布规律见图 3 所示。

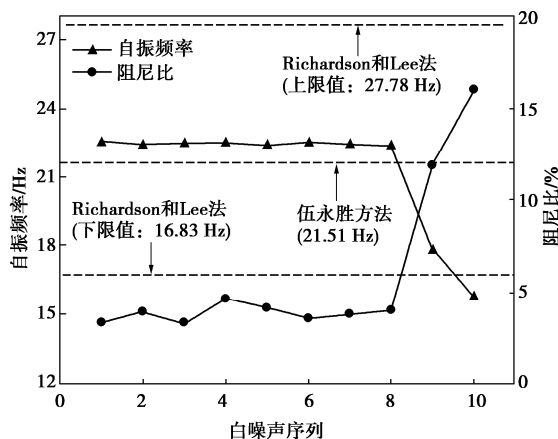


图 3 自振频率与阻尼比分布

Fig. 3 Distribution of natural frequency and damping ratio

由图 3 可知: ①在 WN1~WN8 加载阶段, 自振频率相对稳定, 幅值在 22.40~22.55 Hz 间波动, 整体处于 Richardson 和 Lee 方法的预测区间内, 且与伍永胜方法计算值接近; 阻尼比呈现非线性分布, 整体区间在 3.31%~4.63%, 振动后各阶段的阻尼比略大于振动前数值。②WN9 和 WN10 阶段, 自振频率与阻尼比变化范围均出现较大变动, 自振频率由 22.40 Hz 降至破坏时的 15.79 Hz, 阻尼比由 3.98% 升至 16.02%。可知, 加筋土结构的破坏引发了自振频率和阻尼比的变化, 采用自振频率和阻尼比的变化幅值确定结构的损伤状态具有可行性。

2.2 破坏等级

墙体变形大小是判断加筋土挡墙是否产生损伤及损伤程度的直观指标, 因此 Huang 等^[23]、张建经等^[24]、

表 2 工况与损伤程度对应情况
Table 2 Conditions corresponding to damage degree

工况	WN1	WN2	WN3	WN4	WN5	WN6	WN7	WN8	WN9	WN10
位移指数/%	0	0.07	0.10	0.32	0.73	1.05	1.59	2.38	3.34	>3.8
损伤程度	完好			基本完好			轻微破坏	中等破坏		毁坏

注：位移指数为累计水平永久位移与总墙高的比值。

Yazdandoust^[21]、Li 等^[5]均提出了相关的位移指数。结合 Li 等^[5]所提出的 0~1.5%(基本完好), 1.5%~1.85% (轻微破坏), 1.85%~3.8% (中等破坏), >3.8% (毁坏) 四级模块式加筋土挡墙损伤评估指标, 对各自噪声工况对应的挡墙位移指数及损伤程度进行细化分类。单级挡墙加载工况与损伤程度的对应关系见表 2 所示。

由表 2 数据可知：①在 WN2~WN6 阶段，墙体水平位移的最大位移指数为 1.05%，在 0~1.5%区间内，挡墙结构属于基本完好；②WN7 工况时，位移指数处于 1.5%~1.85%范围内，挡墙发生轻微破坏；③WN8~WN9 工况时，挡墙处于中等破坏状态；④WN10 工况时，顶部模型砖掉落击中了正在采集数据的位移计，导致部分位移数据失真，故仅知此时位移指数大于 3.8%，此时挡墙发生毁坏。

2.3 损伤识别

将表 2 中损伤程度与结构自身特性相结合，尝试根据加筋土挡墙动力特性的变化范围判断结构的损伤程度，动力特性与损伤程度的对应关系如图 4 所示。

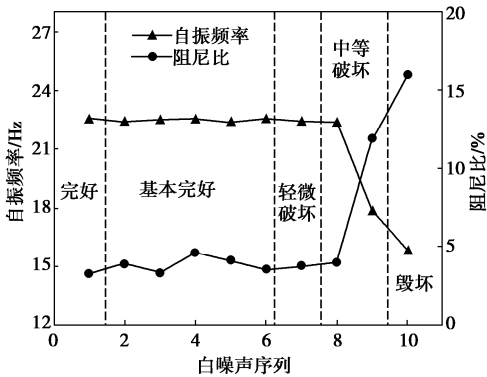


图 4 动力特性与破坏程度间的对应关系

Fig. 4 Corresponding relationship between dynamic characteristics and damage degree

图 5 为单级加筋土挡墙自振频率和阻尼比的数据拟合情况。分析数据可知：①两条数据拟合公式的判定系数 R^2 均为 0.94，拟合效果较好；②结构处于基本完好和轻微破坏阶段，自振频率和阻尼比均成上升下降的波动趋势，数值变化较小，由数据很难单独区分出基本完好和轻微破坏状态；③结构处于中等破坏状态时，以 WN1 工况结果为基准值，自振频率下降幅度为 6.75%~16.43%，阻尼比上升幅度为 106.14%~

243.09%；④结构发生毁坏时，自振频率降幅达 31.59%，阻尼比上升幅度为 462.04%。

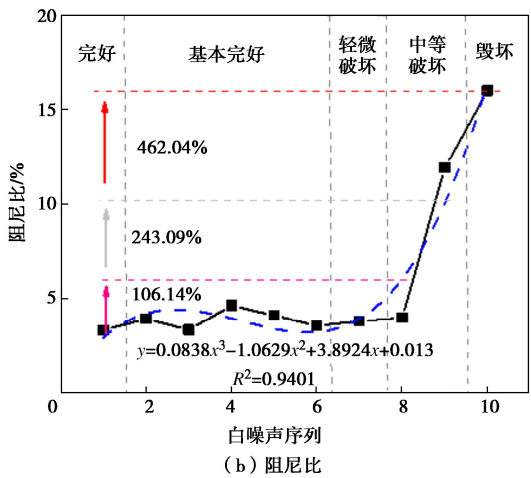
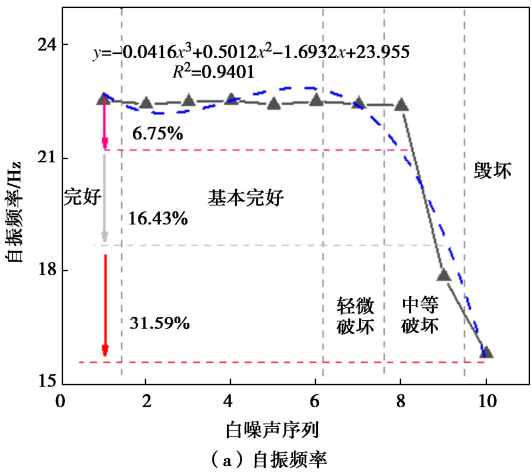


图 5 数据拟合分析

Fig. 5 Data fitting analysis

3 结 论

利用振动台试验，研究了模块式加筋土挡墙的动力特性分布规律和损伤方法，得到了自振频率和阻尼比的响应特征，得到了不同破坏阶段自振频率和阻尼比的变化范围。

(1) 挡墙在振动前期 (WN8 工况以前)，不同位置处自振频率稳定在 22.40~22.55 Hz，阻尼比随着墙高上升而减小，整体区间在 3.31%~4.63%；加载后期 (WN9 工况以后)，自振频率明显下降，阻尼比迅速增长。

(2) 根据挡墙位移指数对应的损伤程度, 将不同工况下自振频率和阻尼比分布规律与损伤程度进行了对应; 采用数理方法对挡墙自振频率和阻尼比分布规律进行多项式拟合, 分析了不同损伤阶段自振频率和阻尼比的变化幅度。

(3) 当自振频率下降幅度 6.75%~16.43%, 可认为单级挡墙处于中等破坏状态; 当自振频率下降 16.43%~31.59%时, 可认为结构处于毁坏状态。

(4) 当阻尼比上升幅度为 106.14%~243.09%, 可认为挡墙处于中等破坏状态; 当阻尼比上升幅度在 243.09%~462.04%时, 可认为结构处于毁坏状态。

研究结果可为震后结构的健康诊断提供数据支持、拓宽损伤评估的研究思路。值得注意的是, 采用动力特性的变化范围判定结构的健康状态是否成功的关键之一是初始状态时自振频率和阻尼比的准确确定。目前, 众多学者^[10-15]考虑不同因素(挡墙墙高、面板刚度、面板弹模、回填土刚度、回填土剪切波速、筋材刚度、边界约束条件等)对自振频率的影响, 提出了不同的计算公式。然而, 目前还未见公认的自振频率计算公式, 对此还需深入研究。同时, 阻尼比也未见有公认的描述方式, 需进一步探究。

参考文献:

- [1] HAN J, JIANG Y, XU C. Recent advances in geosynthetic-reinforced retaining walls for highway applications[J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2018, **12**(2): 239-247.
- [2] ZHU Y M, ZHANG F, JIA S L. Embodied energy and carbon emissions analysis of geosynthetic reinforced soil structures[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **370**: 133510.
- [3] KUWANO J, MIYATA Y, KOSEKI J. Performance of reinforced soil walls during the 2011 Tohoku earthquake[J]. *Geosynthetics International*, 2014, **21**(3): 179-196.
- [4] KOERNER R M, KOERNER G R. An extended data base and recommendations regarding 320 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2018, **46**(6): 904-912.
- [5] LI S H, CAI X G, JING L P, et al. Lateral displacement control of modular-block reinforced soil retaining walls under horizontal seismic loading[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, **141**: 106485.
- [6] LING H I, LESHCHINSKY D, CHOU N N S. Post-earthquake investigation on several geosynthetic-reinforced soil retaining walls and slopes during the Ji-Ji earthquake of [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, **21**(4): 297-313.
- [7] CAWLEY P. Structural health monitoring: closing the gap between research and industrial deployment[J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, **17**(5): 1225-1244.
- [8] 朱宏伟, 姚令侃, 张旭海. 两种加筋土挡墙的动力特性比较及抗震设计建议[J]. *岩土工程学报*, 2012, **34**(11): 2072-2080. (ZHU Hongwei, YAO Lingkan, ZHANG Xuhai. Comparison of dynamic characteristics between netted and packaged reinforced soil retaining walls and recommendations for seismic design[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, **34**(11): 2072-2080. (in Chinese))
- [9] HUANG C C. Seismic responses of vertical-faced wrap-around reinforced soil walls[J]. *Geosynthetics International*, 2019, **26**(2): 146-163.
- [10] 徐鹏, 蒋关鲁, 胡耀芳, 等. 整体刚性面板加筋土挡墙基频影响因素计算分析[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(12): 4475-4481. (XU Peng, JIANG Guanlu, HU Yaofang, et al. Calculation of fundamental frequencies of reinforced retaining walls with full-height rigid facing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(12): 4475-4481. (in Chinese))
- [11] ABBASI O, GHANBARI A, HOSSEINI S A A. An analytical method for calculating the natural frequency of reinforced retaining walls with soil-structure interaction effect[J]. *Geosynthetics International*, 2014, **21**(1): 53-61.
- [12] SARBISHEI S, FAKHER A. Energy-based horizontal slice method for pseudo-static analysis of reinforced walls[J]. *Geosynthetics International*, 2012, **19**(5): 370-384.
- [13] RAMEZANI M S, GHANBARI A, HOSSEINI S A A. Analytical method for calculating natural frequencies of geosynthetic-reinforced wall with full-height concrete facing[J]. *Geosynthetics International*, 2017, **24**(1): 1-13.
- [14] 伍永胜. 加筋土挡墙动力特性及抗震设计方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006. (WU Yongsheng. Study on Dynamic Characteristics and Seismic Design Method of Reinforced Earth Retaining Wall[D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese))
- [15] HATAMI K, BATHURST R J. Effect of structural design on fundamental frequency of reinforced-soil retaining walls[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000, **19**(3): 137-157.
- [16] 李思汉. 模块式加筋土挡墙动力反应试验研究及数值分析[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2018. (LI Sihan. Experimental

- Study and Numerical Analysis of Dynamic Response of Modular Reinforced Earth Retaining Wall[D]. Langfang: Institute of Disaster Prevention, 2018. (in Chinese))
- [17] LI S H, CAI X G, JING L P, et al. Reinforcement strain and potential failure surface of geogrid reinforced soil-retaining wall under horizontal seismic loading[J]. Shock and Vibration, 2020, **2020**: 8864256.
- [18] CAI X G, LI S H, XU H L, et al. Shaking table study on the seismic performance of geogrid reinforced soil retaining walls[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, **2021**: 6668713.
- [19] 李思汉, 蔡晓光, 景立平, 等. 基于位移的模块式加筋土挡墙抗震设计方法研究[J]. 地震工程学报, 2023, **45**(5): 1066-1074. (LI Sihan, CAI Xiaoguang, JING Liping, et al. Displacement-based seismic design methods of a modular reinforced soil retaining wall[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2023, **45**(5): 1066-1074. (in Chinese))
- [20] 魏 明, 罗 强, 蒋良淮, 等. 悬臂式加筋土复合支挡结构振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(3): 607-618. (WEI Ming, LUO Qiang, JIANG Liangwei, et al. Shaking table tests of cantilevered reinforced soil retaining walls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(3): 607-618. (in Chinese))
- [21] YAZDANDOUST M. Investigation on the seismic performance of steel-strip reinforced-soil retaining walls using shaking table test[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, **97**: 216-232.
- [22] 徐琨鹏. 地下结构拟静力抗震分析方法及推覆试验研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019. (XU Kunpeng. Quasi-static Seismic Analysis Method and Pushover Test of Underground Structures[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese))
- [23] HUANG C C, WU S H, WU H J. Seismic displacement criterion for soil retaining walls based on soil strength mobilization[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(1): 74-83.
- [24] 张建经, 韩鹏飞. 重力式挡墙基于位移的抗震设计方法研究: 大型振动台模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(3): 416-423. (ZHANG Jianjing, HAN Pengfei. Displacement based seismic design method for gravity retaining walls-Large scale shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(3): 416-423. (in Chinese))

(编校: 孙振远)