

# 水平地震作用下双级加筋土挡墙损伤识别研究

李思汉<sup>1,2,3</sup>, 蔡晓光<sup>1,2,3</sup>, 徐洪路<sup>4</sup>, 景立平<sup>1,4</sup>, 黄鑫<sup>1,2,3,4</sup>, 冯加煜<sup>1</sup>

(1. 防灾科技学院地质工程学院, 河北 三河 065201; 2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 河北 三河 065201; 3. 中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室, 河北 三河 065201; 4. 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:** 因对台阶式加筋土挡墙损伤识别的研究不足, 开展了双级加筋土挡墙的大型振动台试验。采用时域识别方法分析了水平地震作用下模型的动力响应特征, 阐述了上、下级挡墙自振频率、阻尼比的分布规律, 探究了结构损伤程度与自振频率、阻尼比间的对应关系。研究表明: 加载前上、下级挡墙的自振频率基本一致, 阻尼比随墙高的增加而减小; 随着加载工况的累积, 自振频率逐渐减小, 阻尼比逐渐增大。采用数学方法对自振频率和阻尼比分布曲线进行多项式拟合, 对比分析可得: 当自振频率减小 0~15.41%、阻尼比增大 0~299.35% 时, 结构处于基本完好阶段; 当自振频率减小 15.41%~18.92%、阻尼比增大 299.35%~360.07% 时, 结构处于轻微破坏阶段; 当自振频率减小 18.92%~21.29%、阻尼比增大 360.07%~398.21% 时, 结构处于中等破坏阶段; 当自振频率减小 21.29%~29.60%、阻尼比增大 398.21%~532.99% 时, 结构处于毁坏状态。

**关键词:** 双级加筋土挡墙; 损伤识别; 振动台试验; 时域识别方法; 阻尼比

**中图分类号:** U417.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)08-1423-08

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.08.016

## 引言

加筋土挡墙因施工简单<sup>[1]</sup>、碳排放量低<sup>[2-3]</sup>、抗震性能优越<sup>[4]</sup>等优势被广泛应用于公路、铁路、机场等基础设施建设领域。单级挡墙的设计高度不宜超过 10 m<sup>[5]</sup>, 因此对于高边坡填方工程(例如, 承德机场中高达 80 m 的边坡工程、锦屏水电站 66 m 高的棉沙沟边坡工程), 宜采用分级台阶式加筋土挡墙。

随着“交通强国”战略的实施, 多级加筋土挡墙不可避免地建设在高烈度区。例如, 汶川地震中国道 G213 上一座双级加筋土挡墙发生了局部破坏, 严重影响了道路交通。震后对加筋土挡墙服役状态快速评估, 可为应急救援规划路线提供帮助。目前, 对于加筋土挡墙的损伤评估方法, 部分学者<sup>[6-9]</sup>提出采用墙体变形指数对损伤状态进行划分。

变形是加筋土挡墙损伤状态的外观表现, 而损伤也会引起加筋土挡墙固有特性的改变。自振频率是加筋土结构的关键参数之一, 利用自振频率的异常变化判断损伤程度和部位, 已被应用于机械、航天、建筑结构、岩土工程领域<sup>[10-11]</sup>。例如杜岩等<sup>[10]</sup>采用自振频率对滑坡损伤进行定量判断, 并阐述了自

振频率方法的可行性。

众多学者利用振动台试验<sup>[12-13]</sup>、数值模拟<sup>[14-15]</sup>和理论分析<sup>[16-20]</sup>对加筋土挡墙的自振频率解析式、影响因素进行了研究。朱宏伟等<sup>[12]</sup>对土工袋加筋土挡墙进行振动台试验, 发现随着加载的持续进行, 模型的自振频率减小, 阻尼比增大; 输入的地震动越强, 自振频率的减小幅度越大。Huang<sup>[13]</sup>通过 6 Hz 和 10 Hz 正弦波对一系列返包式加筋土挡墙自振频率进行了研究, 验证了输入频率与自振频率之比在 0.6~1.0 时结构发生共振响应的研究成果的正确性。伍永胜<sup>[14]</sup>利用 ANSYS 对不同高度的加筋土挡墙自振频率进行分析, 归纳了自振频率与墙高的基本关系。Hatami 等<sup>[15]</sup>总结了部分自振频率计算公式(如文献[16]方法), 对影响加筋土挡墙模型自振频率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。

综上, 目前尚未见自振频率在地震作用下分布规律的相关研究。对于资料欠缺或变形不易观测的加筋土挡墙, 可借鉴杜岩等<sup>[10]</sup>利用固有特性对滑坡进行判断的思路。然而目前对于自振频率和阻尼比的分布规律尚不清楚, 其变化幅度与加筋土挡墙损伤状态之间的对应关系尚未掌握。

因此, 本文采用时域识别方法对双级加筋土挡

**收稿日期:** 2022-08-16; **修订日期:** 2022-11-24

**基金项目:** 地震科技星火项目(XH23067YA, XH204402); 中央高校基本科研业务费资助项目(ZY20215107, ZY20220208)。

墙的自振频率和阻尼比进行分析,探究不同损伤程度下的自振频率和阻尼比的变化幅度。

### 1 振动台试验

#### 1.1 试验概述

振动台试验因其重复性好,是研究岩土体结构地震性能的主流方式<sup>[21-22]</sup>。模型试验在防灾科技学院的土木工程试验中心进行,试验模型如图1所示。模型箱为3.0 m(长)×1.5 m(宽)×2.0 m(高)的刚性箱,模型箱沿长度方向两侧镶嵌有机玻璃,便于在试验中观察挡墙和墙后回填土的变化。同时,为了尽量减少刚性边界的反射波影响,在振动方向上,刚性箱与回填土接触处布置50 mm厚的海绵。振动台设备的主要参数<sup>[23-27]</sup>为:台面尺寸为3.0 m×3.0 m;双水平向地震模拟;最大位移:X向±100 mm, Y向±100 mm;最大加速度:X向1g(满载), Y向1g(满载);最大承载质量为20 t。



图1 试验模型  
Fig. 1 Test model

考虑振动台的承载能力和模型箱尺寸,试验模型相似比设定为1:10,按照Iai<sup>[28]</sup>提出的相似关系推导得出模型的主要相似参数,如表1所示。图2为双级加筋土挡墙模型试验设计图:(1)模型总高度为1.8 m,上级墙和下级墙高各为0.9 m,平台宽度为0.18 m;(2)筋材水平等长布置,长度为0.9 m,层间距

表1 模型主要相似参数

Tab. 1 The main similarity parameters of model

序号	物理量	相似关系	相似常数 (原型/模型)
1	长度 $L$	$C_L$	10
2	弹性模量 $E$	$C_E=1$	1
3	密度 $\rho$	$C_\rho=1$	1
4	应力 $\sigma$	$C_\sigma=C_E=1$	1
5	时间 $t$	$C_t=C_L^{0.5}$	3.16
6	速度 $v$	$C_v=C_L^{0.5}$	3.16
7	加速度 $a$	$C_a=1$	1
8	重力加速度 $g$	$C_g=1$	1
9	频率 $\omega$	$C_\omega=C_L^{-0.5}$	0.316

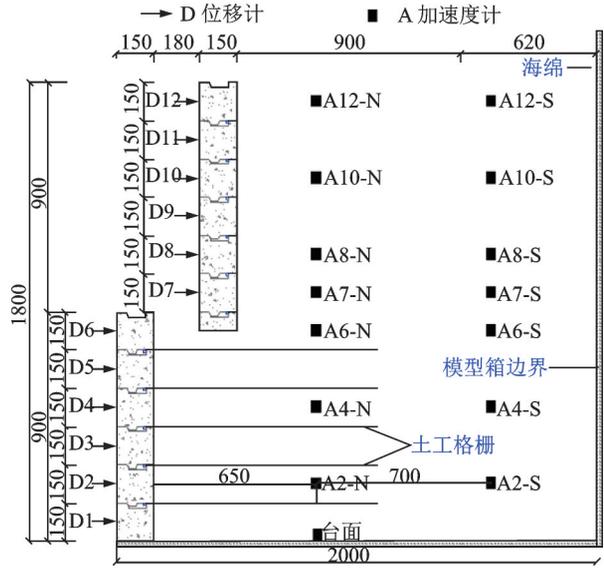


图2 模型试验设计图(单位:mm)

Fig. 2 Model test design (Unit:mm)

为0.15 m;(3)模型外侧布置12个顶杆位移计用于量测墙体的动态位移变化,内部布置14个加速度计用于采集加筋区和非加筋区不同高度处的加速度响应;(4)沿振动方向在模型箱外侧布置2个加速度计,用于记录台面输入加速度时程。

为测试加筋土挡墙的抗震性能,试验过程中单向输入经过处理的卧龙波(WL)和El-Centro波(EI)。同时,为了获取加筋土挡墙的动力特性,在每次地震动输入前后均采用白噪声(WN)进行微震,试验工况如表2所示。

表2 试验工况

Tab. 2 Test conditions

序号	输入波	加速度/g	相似比	工况
1	WN	0.05	1	WN1
	WL	0.2	10	WL0.2g
2	WN	0.05	1	WN2
	EI	0.2	10	EI0.2g
3	WN	0.05	1	WN3
	WL	0.4	10	WL0.4g
4	WN	0.05	1	WN4
	EI	0.4	10	EI0.4g
5	WN	0.05	1	WN5
	WL	0.8	10	WL0.8g
6	WN	0.05	1	WN6
	EI	0.8	10	EI0.8g
7	WN	0.05	1	WN7
	WL	1.2	10	WL1.2g
8	WN	0.05	1	WN8
	EI	1.2	10	EI1.2g
9	WN	0.05	1	WN9
	WL	1.6	10	WL1.6g
10	WN	0.05	1	WN10

## 1.2 试验材料

回填土采用级配不良的中砂,其颗粒级配曲线如图 3 所示。回填土的物理参数如表 3 所示。在相对密实度为 70% 的设定下,回填土采取分层填筑夯实。

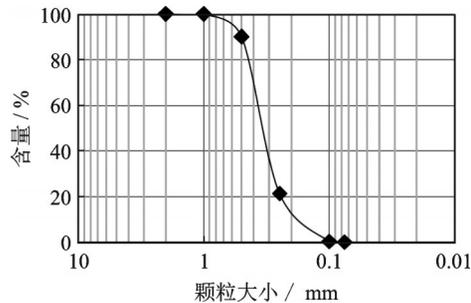


图 3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain size distribution curve

表 3 填料物理参数

Tab. 3 Physical parameters of fillings

参数	符号	取值
粒径大小/mm	$D_{10}$	0.18
	$D_{30}$	0.29
	$D_{60}$	0.37
曲率系数	$C_c$	1.262
不均匀系数	$C_u$	2.055
密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$\rho$	1.82
最大干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$\rho_{d\max}$	1.99
最小干密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	$\rho_{d\min}$	1.52
比重	$G_s$	2.86
内摩擦角/( $^\circ$ )	$\varphi$	41

筋材采用高密度聚乙烯单向土工格栅,拉伸单元长度为 22.5 cm,横肋间距为 2.22 cm。参考 ASTM D6637<sup>[29]</sup>进行拉伸试验,可得土工格栅的拉伸强度分别为  $T_{2\%}=17.4$  kN/m,  $T_{5\%}=32.7$  kN/m 及  $T_{ult}=50$  kN/m。

面板采用预制砌块错缝搭接而成,采用的模块尺寸分别为 0.25 m(长) $\times$ 0.15 m(宽) $\times$ 0.15 m(高)和 0.125 m(长) $\times$ 0.15 m(宽) $\times$ 0.15 m(高)。土工格栅与模块通过塑料卡扣进行连接,如图 4 所示。



图 4 面板搭建

Fig. 4 Panel construction

## 2 试验结果

### 2.1 动力特性

加筋土挡墙的动力特性主要有频率、阻尼及振型<sup>[15-16,30]</sup>。在模型试验时输入白噪声的目的是获得其动力特性,判断结构的自振频率是为了避免结构与场地频率接近产生共振。Richardson 等<sup>[16]</sup>采用简化公式  $F = \frac{1}{HC}$  预测自振频率,其中,  $H$  为墙高,  $C$  为系数(其值在 0.02~0.033 之间变化)。伍永胜<sup>[14]</sup>采用 ANSYS 分析墙高(3, 6, 9, 12, 15 m)与自振频率的关系,通过统计分析建议采用  $F = \frac{38}{H} + 0.4$  ( $H$  为墙高)进行自振频率的估算。

对于动力特性求解的计算理论主要有频域识别方法和时域识别方法两种。时域识别方法<sup>[31]</sup>具有可直接使用实测响应信号、处理简单便捷、识别精度高等优势。因此,本文采用时域识别方法对白噪声工况(WN4 工况下 A2-N 的加速度时程曲线如图 5 所示)进行自振频率和阻尼比的计算。其处理步骤为:(1)对输入数据进行预处理;(2)采用节时时域方法(STD 法)进行动力特性识别。

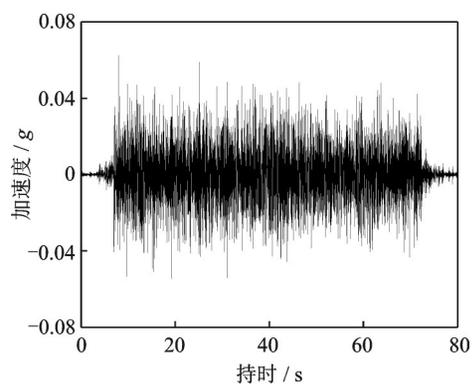


图 5 A2-N 的加速度时程曲线

Fig. 5 Acceleration time-history curve of A2-N

双级加筋土挡墙加筋区内上级墙、下级墙在不同位置、不同加载阶段的自振频率和阻尼比分布如图 6 所示。由图 6(a)数据可知:(1)加载前(即 WN1 工况时),不同位置处的自振频率基本一致(上级墙的自振频率在 19.84~20.23 Hz 范围内,下级墙的自振频率在 20.07~20.21 Hz 范围内);加载阶段,上、下级挡墙各位置处的自振频率开始减小;(2)加载过程中,下级挡墙整体自振频率呈逐渐减小趋势;上级挡墙自振频率整体亦呈逐渐减小趋势,与下级挡墙整体分布规律一致;(3)对比上、下级挡墙可知,下级挡墙自振频率小于上级挡墙自振频率。由图 6(b)

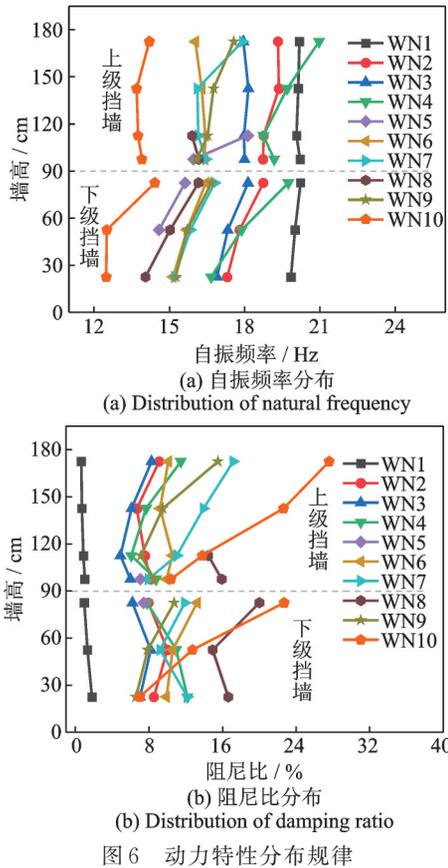


图6 动力特性分布规律

可知:(1)加载前,上、下级挡墙的阻尼比随着墙高的升高而减小,这是土体剪应变随埋深增加而逐渐增大导致的<sup>[32]</sup>,如下式所示:

$$\tau(z) = \frac{\pi G}{4H} u_{\max} \sin \frac{\pi z}{2H} = G\gamma \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\pi}{4H} u_{\max} \sin \frac{\pi z}{2H} \quad (2)$$

式中  $z$  为土层距地表深度; $\tau(z)$  为深度  $z$  处的剪应力; $G$  为动剪切模量; $u_{\max}$  为地表最大水平位移; $\gamma$  为剪应变。由式(2)可知:(1)剪应变是随深度变化的正弦函数,剪应变越大则越易出现塑性变形,塑性变形大则滞回耗能强,进一步说明了阻尼增大。(2)随着加载工况的积累,各位置处的阻尼比不断增大,上、下级挡墙阻尼比最大值出现在各级挡墙顶部位置,其原因为各级墙体顶部水平位移增加导致挡墙后部土体变形和剪应变增大。

将加筋区内(上级墙(A7-N, A8-N, A10-N, A12-N)、下级墙(A2-N, A4-N, A6-N))各测点的自振频率和阻尼比取平均值,作为上级挡墙、下级挡墙的自振频率和阻尼比,如图7所示。由图7可知:(1)上、下级挡墙的自振频率分布规律、阻尼比分布规律基本一致:随着加载工况的累积,自振频率逐渐减小、阻尼比逐渐增大;(2)开始加载后,下级挡墙的自振频率始终小于上级挡墙自振频率;(3)在 WN7 工

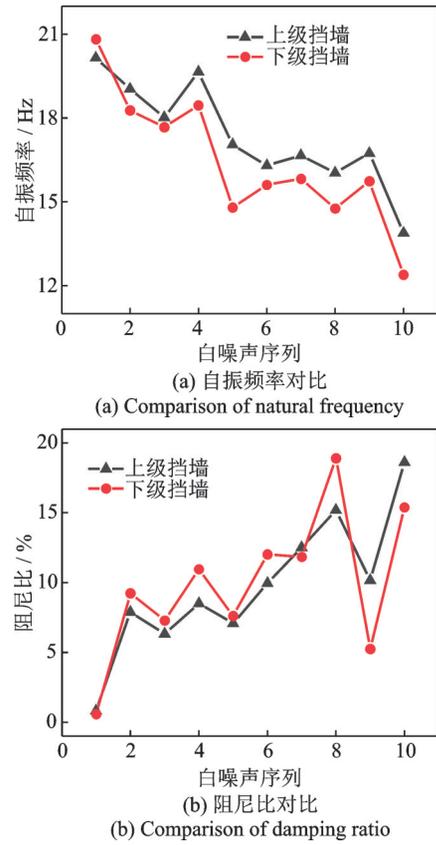


图7 上下级挡墙动力特性对比

况前,下级挡墙阻尼比略大于上级挡墙阻尼比,这与不同深度处的土体剪应变不同有关;WN8 工况后,下级挡墙阻尼比小于上级挡墙阻尼比,其原因是上级挡墙墙体的水平位移较大,导致上部挡墙的土体变形和剪应变值大于下部挡墙。

将图7中上、下级挡墙的自振频率和阻尼比取平均值,作为双级挡墙整体结构的自振频率和阻尼比,如图8所示。由图8数据可知:(1)自振频率幅值由 20.10 Hz(WN1 工况)降至 13.57 Hz(WN10 工况),各阶段幅值均比文献[14]的预测值低,在文献[16]预测的限值附近波动。其原因是文献[14]及

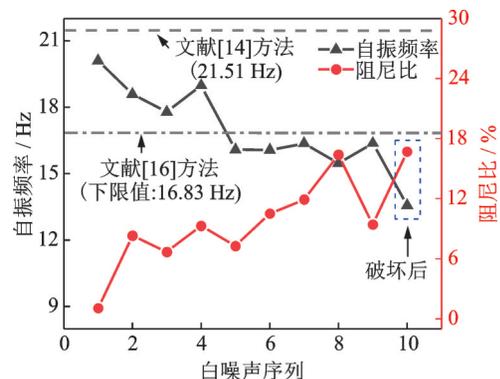


图8 自振频率和阻尼比分布

Fig.8 Distribution of natural frequency and damping ratio

文献[16]的方法均为不同高度的单级挡墙的计算结果拟合所得,整体性较好,而双级挡墙中台阶的存在导致双级挡墙的整体性变差。(2)阻尼比呈逐渐增大趋势(由 1.06% 增至 16.70%),变化范围较大。

### 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,因此文献[6-9]均提出了相关的位移指数。结合 Li 等<sup>[9]</sup>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。双级挡墙加载工况与损伤程度的对应关系如表 4 所示。

表 4 加载工况与损伤程度对应关系

Tab. 4 Correspondence between loading conditions and damage degree

工况	墙高比/%	损伤程度
WN1	0	完好
WN2	0.04	基本完好
WN3	0.06	
WN4	0.59	
WN5	0.68	
WN6	1.63	轻微破坏
WN7	1.85	
WN8	2.91	中等破坏
WN9	3.85	毁坏
WN10	>3.85	

注: 墙高比为累计水平永久位移与总墙高的比值。

由表 4 数据可知:(1)WN2~WN5 工况时,最大墙高比为 0.68%,挡墙结构属于基本完好;(2)WN6~WN7 工况时,挡墙发生轻微破坏;(3)WN8 工况时,最大墙高比在 1.85%~3.8% 之间,挡墙处于中等破坏状态;(4)WN9 工况时,最大墙高比超过了 3.8%,此时模型砖并未掉落,为保守评估安全性,将其定义为破坏状态;(5)WN10 工况时,顶部模型砖掉落,部分位移计被击中导致部分位移数据失真,模型出现宏观破坏现象。挡墙不同损伤程度下的试验照片如图 9 所示。

### 2.3 损伤识别

将表 4 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 10 所示。

由于数据的离散性,直接利用数据推测加筋土

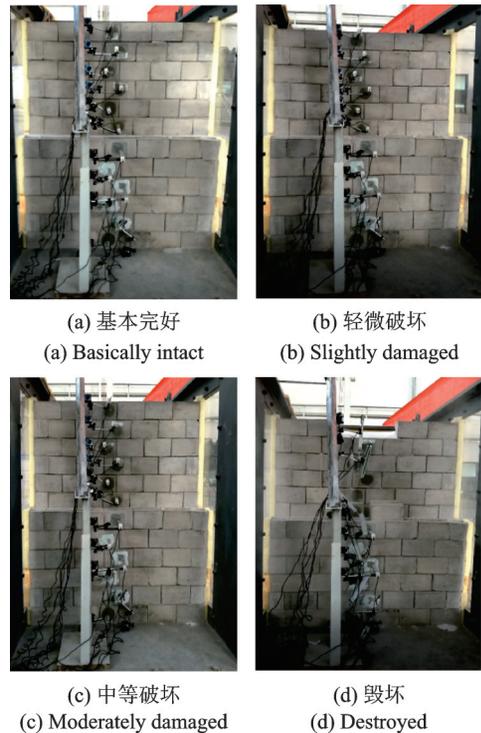


图 9 模型损伤程度

Fig. 9 Damage degree of model

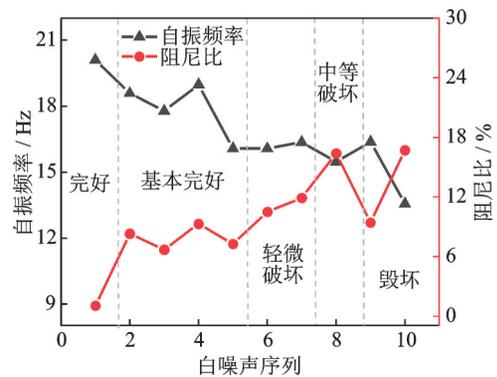


图 10 动力特性与损伤程度的对应关系

Fig. 10 Correspondence between dynamic characteristics and damage degree

挡墙的损伤程度存在困难。因此,采用动力特性探知挡墙损伤程度的步骤如下:(1)对双级加筋土挡墙的动力特性分布规律进行三次多项式数据拟合;(2)利用拟合公式求解各工况下的动力特性(自振频率和阻尼比)数值;(3)以 WN1 工况时的动力特性(自振频率和阻尼比)的结果作为模型结构的基准值,求解各工况下结构的动力特性变化率;(4)结合各工况所处的损伤阶段,确定各损伤状态下动力特性的变化率,明确动力特性变化率对应的损伤程度。

图 11 为双级加筋土挡墙的自振频率与阻尼比的数据拟合结果。由图 11 数据可知:(1)由于自振频率和阻尼比数据较离散,两条拟合曲线的判定系数  $R^2$  分别为 0.83 和 0.72;(2)相对于基准值,自振频率拟合曲线呈整体减小的趋势,减小幅度分别为 0~15.41%

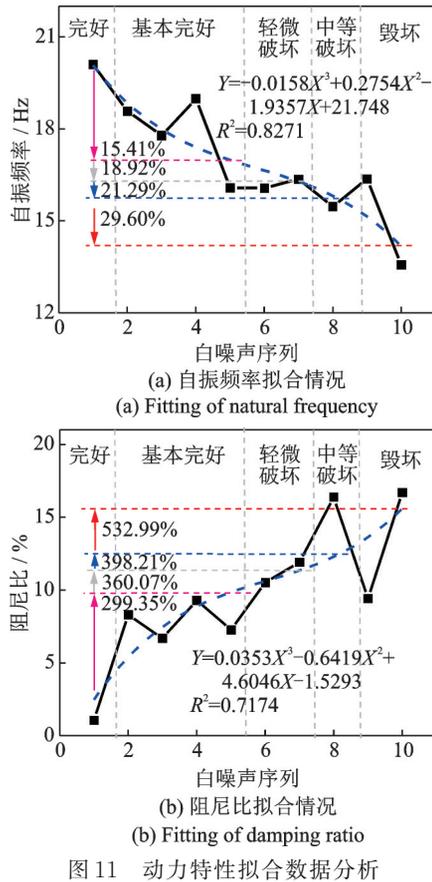


图11 动力特性拟合数据分析

Fig. 11 Dynamic characteristics fitting data analyses

(基本完好)、15.41%~18.92% (轻微破坏)、18.92%~21.29% (中等破坏)、21.29%~29.60% (毁坏);(3)阻尼比拟合曲线呈整体增大趋势,结构处于基本完好、轻微破坏、中等破坏和毁坏阶段时,阻尼比的增大幅度分别为0~299.35%,299.35%~360.07%,360.07%~398.21%,398.21%~532.99%。

### 3 结论

本文采用时域识别方法,研究了水平地震作用下双级加筋土挡墙的自振频率和阻尼比的分布规律,分析了自振频率和阻尼比变化特征与加筋土挡墙损伤识别的关系。具体结论如下:

(1)加载前,各位置处的自振频率基本一致,阻尼比随着墙高的升高而减小;加载开始后,自振频率逐渐减小,阻尼比逐渐增大。

(2)按照变形控制指数,将加载阶段的加筋土挡墙损伤程度划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏和毁坏四个阶段。

(3)对自振频率分布曲线进行数据拟合,并与自振频率基准值进行对比:当自振频率减小0~15.41%时,结构处于基本完好状态;当自振频率减小15.41%~18.92%时,结构处于轻微破坏状态;当自振频率减小18.92%~21.29%时,结构处于中等破坏状

态;当减小21.29%~29.60%时,结构处于毁坏状态。

(4)对阻尼比分布特征进行多项式拟合,并与基准值进行对比分析:当阻尼比增幅分别为0%~299.35%,299.35%~360.07%,360.07%~398.21%和398.21%~532.99%时,可认为加筋土挡墙分别处于基本完好、轻微破坏、中等破坏和毁坏状态。

利用自振频率和阻尼比变化率对震后加筋土挡墙的损伤状态进行识别,这种方法可行的关键之一是初始状态时自振频率和阻尼比的确定。目前的研究主要针对单级挡墙,对于台阶式加筋土挡墙的自振频率和阻尼比的精确确定,还需进一步考虑台阶宽度、台阶阶数的影响。

### 参考文献:

- [1] Han J, Jiang Y, Xu C. Recent advances in geosynthetic-reinforced retaining walls for highway applications[J]. ASCE Journal Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2017, 12(2): 239-247.
- [2] Bizjak K F, Lenart S. Life cycle assessment of a geosynthetic-reinforced soil bridge system—a case study [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46 (5): 543-558.
- [3] Zhu Yuming, Zhang Fei, Jia Shilin. Embodied energy and carbon emissions analysis of geosynthetic reinforced soil structures[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 370: 133510.
- [4] Kuwano J, Miyata Y, Koseki J. Performance of reinforced soil walls during the 2011 Tohoku earthquake[J]. Geosynthetics International, 2014, 21(3): 179-196.
- [5] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路路基支挡结构设计规范:TB 10025—2019[S]. 北京:中国铁道出版社有限公司,2019.  
China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. Code for design of retaining structures of railway earthworks: TB 10025—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing Co., Ltd., 2019.
- [6] 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 Environmental Engineering, 2009, 135(1): 74-83.
- [7] 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.
- [8] 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 aseismic design method for gravity retaining walls—

- large scale shaking table tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 416-423.
- [9] Li Sihan, Cai Xiaoguang, Jing Liping, 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.
- [10] 杜岩, 谢谟文, 蒋宇静, 等. 基于固有振动频率的滑坡安全评价新方法[J]. 工程科学学报, 2015, 37(9): 1118-1123.
- DU Yan, XIE Mowen, JIANG Yujing, et al. A new method for landslide safety assessments based on natural vibration frequency[J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(9): 1118-1123.
- [11] 孟鑫, 刘鹏辉, 王巍, 等. 地震作用下高速铁路桥梁动力响应试验分析[J]. 振动工程学报, 2021, 34(6): 1250-1256.
- MENG Xin, LIU Penghui, WANG Wei, et al. Dynamic responses test analysis of high-speed railway bridges under earthquake action[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(6): 1250-1256.
- [12] 朱宏伟, 姚令侃, 陈晓龙, 等. 土工格栅返包土工袋加筋土挡墙的地震响应分析及设计建议[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(2): 319-326.
- Zhu Hongwei, Yao Lingkan, Chen Xiaolong, et al. Seismic behaviors and design recommendations of ecological bag-reinforced retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(2): 319-326.
- [13] Huang C C. Seismic response of vertical-face wrap-around reinforced soil walls[J]. Geosynthetics International, 2019, 26(2): 146-163.
- [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. The research on the dynamical property and anti-seismic design method of reinforced earth retaining walls[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [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] Richardson G N, Lee K L. Seismic design of reinforced earth walls[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(2): 167-188.
- [17] Ghanbari A, Hooman E, Mojallal M. An analytical method for calculating the natural frequency of retaining walls[J]. International Journal of Civil Engineering, 2013, 11(1): 1-9.
- [18] Sarbishei S, Fakher A. Energy-based horizontal slice method for pseudo-static analysis of reinforced walls[J]. Geosynthetics International, 2012, 19(5): 370-384.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 罗东雨, 孙建刚, 柳春光, 等. 桩-土-LNG储罐振动台试验与数值仿真分析[J]. 振动工程学报, 2021, 34(3): 515-527.
- LUO Dongyu, SUN Jiangang, LIU Chunguang, et al. Pile-soil-LNG storage tank shaking table test and numerical simulation analysis[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(3): 515-527.
- [22] 蔡晓光, 王学鹏, 李思汉, 等. 复合格宾土工格栅加筋土挡墙模型振动台试验[J]. 振动工程学报, 2023, 36(3): 767-775.
- CAI Xiaoguang, WANG Xuepeng, LI Sihan, et al. Shaking table test on the model of reinforced soil retaining wall with composite Gabion and geogrid[J]. Journal of Vibration Engineering, 2023, 36(3): 767-775.
- [23] 蔡晓光, 李思汉, 黄鑫. 双级加筋土挡墙动力特性振动台试验[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 200-207.
- CAI Xiaoguang, LI Sihan, HUANG Xin. Shaking table tests on dynamic characteristics of two-stage reinforced soil-retaining wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 200-207.
- [24] 蔡晓光, 李思汉, 黄鑫. 水平地震作用下双级加筋土挡墙格栅应变及破裂面分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(8): 1528-1534.
- CAI Xiaoguang, LI Sihan, HUANG Xin. Geogrid strain and failure surface of two-stage reinforced soil retaining wall under horizontal seismic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(8): 1528-1534.
- [25] 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]. 三河: 防灾科技学院, 2018.
- Li Sihan. Test study and numerical analysis on dynamic response of block reinforced soil retaining walls[D]. Sanhe: Institute of Disaster Prevention, 2018.
- [26] Li Sihan, Cai Xiaoguang, Jing Liping, et al. Reinforcement strain and potential failure surface of geogrid reinforced soil-retaining wall under horizontal seismic loading[J]. Shock and Vibration, 2020(3): 8864256.
- [27] Cai Xiaoguang, Li Sihan, Xu Honglu, et al. Shaking table study on the seismic performance of geogrid reinforced soil retaining wall[J]. Advances in Civil Engineering, 2021(4): 6668713.
- [28] Iai S. Similitude for shaking table tests on Soil-Structure-Fluid model in 1g gravitational field[J]. Soils and

- Foundations, 1989, 29(1): 105-118.
- [29] Standard test method for determining tensile properties of geogrids by the single or multi-rib tensile method: ASTM D6637[S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2015.
- [30] 魏明, 罗强, 蒋良滩, 等. 悬臂式加筋土复合支撑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 on cantilever reinforced soil retaining walls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 607-618.
- [31] 王济, 胡晓. MATLAB在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [32] 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. Study on pseudo-static seismic analysis method of underground structures and pushover test [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019.

## Damage identification of two-tiered reinforced soil retaining wall under horizontal seismic loading

LI Si-han<sup>1,2,3</sup>, CAI Xiao-guang<sup>1,2,3</sup>, XU Hong-lu<sup>4</sup>, JING Li-ping<sup>1,4</sup>,  
HUANG Xin<sup>1,2,3,4</sup>, FENG Jia-yu<sup>1</sup>

(1. College of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China;  
2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, China;  
3. Key Laboratory of Building Collapse Mechanism and Disaster Prevention, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China; 4. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In allusion to inadequate research on damage identification of multi-tiered reinforced soil retaining wall, a large shaking table test of two-tiered reinforced soil retaining wall was carried out. The time domain identification method was used to analyze the dynamic response characteristics of the model under horizontal seismic loading, and the distribution laws of the natural frequency and damping ratio of the upper and lower retaining walls were expounded. The corresponding relationship between the structural damage degree and the natural frequency and damping ratio was explored. The results show that the natural frequencies of the upper and lower retaining walls are basically the same before loading, and the damping ratio decreases with the increase of wall height. With the accumulation of loading conditions, the natural frequency gradually decreases and the damping ratio gradually increases. The distribution curves of natural frequency and damping ratio are fitted by polynomial method. The comparative analysis shows that when the natural frequency decreases by 0~15.41% and the damping ratio increases by 0~299.35%, the structure is basically intact. When the natural frequency decreases 15.41%~18.92% and the damping ratio increases 299.35%~360.07%, the structure is slight damage. When the natural frequency decreases by 18.92%~21.29% and the damping ratio increases by 360.07%~398.21%, the structure is in the middle damage stage; when the natural frequency decreases by 21.29%~29.60% and the damping ratio increases by 398.21%~532.99%, the structure is destroyed.

**Key words:** two-tiered reinforced soil retaining wall; damage identification; shaking table test; time domain identification method; damping ratio

作者简介: 李思汉(1992—),男,博士,讲师。E-mail: lisihan@st.cidp.edu.cn。

通讯作者: 蔡晓光(1979—),男,博士,教授。E-mail: caixiaoguang123@163.com。