侯宪明,靳飞飞,宋飞,等.土工格室挡墙动力响应振动台试验研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1296-1303.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250218003

Hou Xianming, Jin Feifei, Song Fei, et al. Shaking table test of the dynamic response of geocell retaining walls[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1296-1303. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250218003

土工格室挡墙动力响应振动台试验研究

侯宪明[1], 靳飞飞[2,3], 宋 飞[2,3], 刘学军[1], 陈 鑫[1], 王丽丽[4]

(1.新疆建筑科学研究院(有限责任公司),新疆 乌鲁木齐 830002;
2.长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;
3.长安大学 民航机场智慧建造与维养重点实验室,陕西 西安 710064;
4.中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室,甘肃 兰州 730000)

摘要:为研究地震作用下土工格室挡墙的动力响应,以该结构支护的边坡为研究对象,开展大型振动台模型试验,系统研究地震动参数对格室应变和加速度放大系数的影响。结果表明,在不同地震动幅值下,墙面和墙体内部的格室应变分布规律存在差异:墙面格室表现为弯曲-转动的复合变形模式,其中下部应变较大;墙体格室应变受填料与结构的相互作用影响,其中上部应变较大。墙面和墙体的加速度放大系数均表现出沿高程的放大效应:墙面加速度放大系数在高程$H/3$和墙顶处出现峰值,而墙体加速度放大系数的峰值则主要集中于墙顶区域。当输入频率低于4 Hz时,墙面格室应变沿高程近似呈线性变化,墙体格室应变则在墙脚和墙顶附近较大;频率高于4 Hz时,墙面和墙体格室应变均显著增大,对挡墙动力响应影响较大。在抗震设计中,建议在$H/3$、$H/2$和墙顶位置布设拉筋带,通过增强局部区域的刚度以提升整体结构的抗震性能。研究成果对于土工格室挡墙的抗震设计与工程实践具有一定的参考价值。

关键词:土工格室挡墙;振动台试验;应变;加速度放大系数;地震动参数

中图分类号:TU413.6 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1296-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250218003

Shaking table test of the dynamic response of geocell retaining walls

Hou Xianming[1], Jin Feifei[2,3], Song Fei[2,3], Liu Xuejun[1], Chen Xin[1], Wang Lili[4]

(*1.Xinjiang Architectural Research Institute (Co., Ltd.), Urumqi 830002, Xinjiang, China;*
2.School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
3.Key Laboratory of Intelligent Construction and Maintenance of CAAC, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
4.Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of China Earthquake Administration & Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: A large-scale shaking table test was conducted on a geocell retaining wall-supported slope

收稿日期:2025-02-18

基金项目:国家自然科学基金项目(52278328);中建新疆建工科技研发课题(65000022859700210197)

第一作者简介:侯宪明(1971-),男,新疆乌鲁木齐人,高级工程师,主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail:625184594@qq.com。

通信作者:靳飞飞(1991-),男,河南周口人,博士研究生,主要从事边坡工程方面的研究。E-mail:1275881750@qq.com。

to investigate the dynamic response of such walls under seismic action. Additionally, the influences of seismic parameters on geocell strain and acceleration-amplification factors are systematically studied. The results show that the geocell strain distribution patterns across the wall surface and within its body differ under varying ground-motion amplitudes. Wall-face geocells exhibit a composite deformation mode of bending and rotation, with higher strains in the middle-lower section. Conversely, the strains in the wall-body geocells are influenced by the fill-structure interaction, exhibiting higher strains in the middle-upper section. Notably, the wall face and the wall body exert acceleration amplification effects. Specifically, the acceleration amplification factor on the wall face peaks at $H/3$ and the wall top, whereas that of the wall body is primarily concentrated near the wall top. At input frequencies below 4 Hz, strain in the wall-face geocells varies approximately linearly with the elevation, whereas strain in the wall-body geocells exhibits peaks near the wall toe and the wall top. When the input frequency exceeds 4 Hz, strains in both regions increase significantly, substantially influencing the dynamic response of the retaining wall. For seismic design, installing reinforcement belts at $H/3$, $H/2$, and the wall top is recommended to enhance local stiffness and overall seismic performance. These findings provide valuable references for the seismic design and engineering of geocell retaining walls.

Keywords: geocell retaining wall; shaking table test; strain; acceleration amplification factor; ground motion parameter

0　引言

土工格室挡墙是一种由三维格室结构与填料复合构成的轻质支挡结构[1]。凭借其优异的承载性能、有效的沉降抑制能力，以及施工便捷性与生态友好性等多重优势，土工格室挡墙在公路、铁路边坡工程中得到了广泛应用[2]。然而，目前针对其抗震性能的研究仍较为有限，这严重制约了该结构体系在抗震工程中的应用。因此，系统性地开展土工格室挡墙动力响应的研究显得尤为迫切。

在静力性能方面，诸多学者对土工格室挡墙的力学性能进行了深入研究，取得了丰富成果[3-4]。Kurihashi 等[5]通过冲击试验发现，土工格室挡墙作为缓冲系统，其性能较砂土具有显著优势；Song 等[6]基于离心模型试验指出，水平加筋层能显著减小挡墙位移，且加筋区域对挡墙破坏模式有重要影响；梁程等[7]采用极限平衡分析法，研究了格室高度、应力扩散角及界面摩擦系数对路堤临界高度的影响；屈畅姿等[8]通过分级静载荷下的室内模型试验，探讨了挡墙的变形特性、应力分布及加筋层的应变规律。在动力响应方面，靳飞飞等[9-10]利用 FLAC3D 数值软件，研究了土工格室参数和拉筋带位置对挡墙动力响应的影响；Jin 等[11]、Krishnaraj 等[12]与 Ling 等[13]通过振动台模型试验，对土工格室挡墙的动力响应和破坏模式进行了研究。

综上可知，已有关于土工格室挡墙动力响应的研究，大多局限于单一地震波型作用下的分析，针对不同地震动参数条件下挡墙动力响应机制的研究尚不深入，特别是对于格室应变这一关键力学指标的研究仍显不足。鉴于此，本文开展大型振动台模型试验，系统研究地震动参数对格室应变的影响，以期为土工格室挡墙结构的抗震设计提供依据。

1　振动台试验设计

1.1　振动台与模型制作

本次试验于中国地震局兰州地震研究所的振动台上进行。振动台台面尺寸为 6 m（长）×4 m（宽），具有三向六自由度，极限载重为 25 t，工作频率范围为 0.1～70 Hz，台面最大位移为 ±25 cm，可施加的最大加速度为 1.7g，台面最大速度为 1.5 m/s。试验采用内尺寸为 2.8 m×1.46 m×1.8 m（长×宽×高）的刚性模型箱，箱体前后两端均粘贴 50 mm 厚泡沫板以吸收地震波能量，如图 1 所示。

试验模型包括黄土基础与边坡两部分。黄土基础尺寸为 2.7 m×1.46 m×0.2 m（长×宽×高），按 1 600 kg/m^3 的密度夯筑而成。边坡由土工格室挡墙和墙后坡体两部分组成：挡墙由 16 层土工格室及格室内填料构成，采用分层夯实法施工，每层填筑高度为 100 mm；边坡高度为 1.6 m，宽度为 1.46 m，外坡面和内坡面坡比均为 1∶0.25。格室内和坡体填



图 1　试验模型

Fig. 1　Test model

料均采用石英砂。

1.2　材料选取

黄土基础选用兰州地区天然黄土，经筛分、称重后，按照 6% 的含水率进行养护。模型填料根据粒径互补原则[14]，选取 0.42～0.85 mm（细粒组）和 0.86～2.00 mm（粗粒组）两种粒径的石英砂，按质量比 1∶1 均匀混合。细粒组分用于填充孔隙，粗粒组分构建骨架结构，混合后颗粒分布比较均匀，级配良好。三轴剪切试验测得该石英砂的黏聚力 c 为 1.96 kPa，内摩擦角约为 38.03°。筛分试验得到砂样的平均粒径 $d_{30}=0.722$ mm，$d_{60}=1.115$ mm，有效粒径 $d_{10}=0.527$ mm（图 2）；不均匀系数 $C_u=2.12$，曲率系数 $C_c=0.89$。连接件采用 HRB400 钢筋，截取长度为 300 mm。

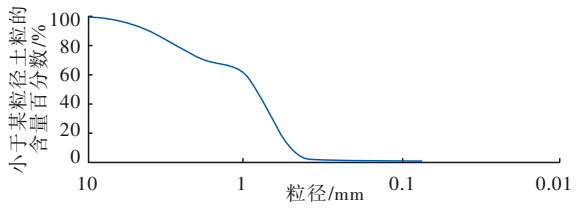


图 2　混合料颗粒级配曲线

Fig. 2　Particle size distribution curve of sand mixture

土工格室由高密度聚乙烯（High-Density Polyethylene，HDPE）片材制成，片材厚度约 1.34 mm，高度 100 mm，格室之间采用超声波焊接工艺连接。每个格室撑开至最大时，其等效直径约为 283 mm。拉伸试验表明，HDPE 条带的极限强度为 33.2 kN/m，节点对拉极限强度为 35.1 kN/m。

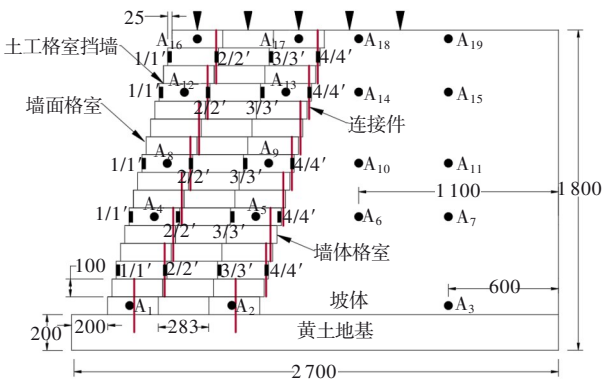
1.3　监测点布设

为测量土工格室应变，在每个格室单元内壁前后对称位置粘贴 4 个应变片，自墙面至墙体依次编号为 1/1′、2/2′、3/3′和 4/4′[图 3(a)]。将最靠近临空面的格室定义为墙面格室，沿坡体方向的第三个格室定义为墙体格室（即与坡体交界处的格室）。数据分析时，取 4 个应变片测试数据的平均值作为该格室的最终应变值。应变监测沿高程布设于第 3、6、9、13 和 15 层。

为获取土工格室挡墙的加速度响应特征，在模型中布置 4 列（共 19 个）加速度监测点[图 3(b)]。其中，第 1 列监测点为 A_1、A_4、A_8、A_{12}、A_{16}（记为墙面加速度监测点）；第 2 列为 A_2、A_5、A_9、A_{13}、A_{17}（记为墙体加速度监测点）；第 3 列为 A_6、A_{10}、A_{14}、A_{18}；第 4 列为 A_3、A_7、A_{11}、A_{15}、A_{19}。



(a) 格室应变粘贴位置



(b) 应变沿高程粘贴位置

图例：● 加速度计　▮ 应变片　▼ 位移计

图 3　模型监测点布置（单位：mm）

Fig. 3　Layout of model monitoring points (unit: mm)

1.4　加载方案

为系统研究地震动参数对土工格室应变响应的影响规律，本试验采用 El-Centro 波、Wolong 波和 Sin 波（正弦波）三种荷载波型。加载方案列于表 1。其中，Sin 波的持时均为 10 s；幅值为 0.2g 的 Sin 波在 X 向和 Z 向施加时，频率取 1、2、3、4、6 和 8 Hz；其余工况下 Sin 波的频率均为 2 Hz。为符合抗震设计规范，在施加 XZ 双向地震波时，以 X 向为基准，Z 向地震动幅值为 X 向的 65%[15]。在每级地震动加载结束后，均施加幅值为 0.05g、持时 235 s 的正弦扫频荷载（幅值为 1.0g 与 1.2g 的强震工况除外，以避免正弦扫频对试验结果造成干扰，并更清晰地观测挡墙

在强震作用下的破坏模式与大变形特征）。

表 1　试验加载方案

Table 1　Test loading scheme

工况	波形	方向	幅值
1,2,3	El-Centro 波	*X*,*Z*,*XZ*	0.1*g*
4,5,6	Wolong 波	*X*,*Z*,*XZ*	0.1*g*
7,8	Sin 波	*X*,*Z*	0.1*g*
9,10,11	El-Centro 波	*X*,*Z*,*XZ*	0.2*g*
12,13,14	Wolong 波	*X*,*Z*,*XZ*	0.2*g*
15	Sin 波	*X*	0.2*g*
16	Sin 波	*Z*	0.2*g*
17,18,19	El-Centro 波	*X*,*Z*,*XZ*	0.3*g*
20,21,22	Wolong 波	*X*,*Z*,*XZ*	0.3*g*
23,24	Sin 波	*X*,*Z*	0.3*g*
25,26,27	El-Centro 波	*X*,*Z*,*XZ*	0.4*g*
28,29,30	Wolong 波	*X*,*Z*,*XZ*	0.4*g*
31,32	Sin 波	*X*,*Z*	0.4*g*
33	El-Centro 波	*X*	0.5*g*
34	El-Centro 波	*X*	0.6*g*
35	El-Centro 波	*X*	0.7*g*
36	El-Centro 波	*X*	0.8*g*
37	El-Centro 波	*X*	0.9*g*
38	El-Centro 波	*X*	1.0*g*
39	El-Centro 波	*X*	1.2*g*

注：表中“方向”若列出多个（如“*X*,*Z*,*XZ*”），其顺序与同一行“工况”的编号顺序一一对应。例如，工况 1、2、3 分别对应施加 *X*、*Z*、*XZ* 方向的 El-Centro 波

2　试验结果分析

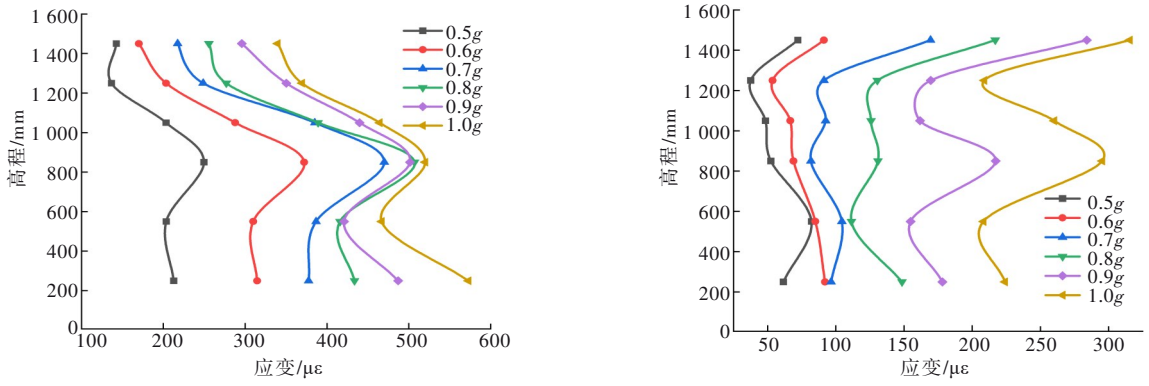
2.1　地震动幅值的影响

2.1.1　格室应变沿高程的变化规律

为研究地震动幅值对挡墙动力响应的影响，以 *X* 向施加的 El-Centro 波为例，选取幅值 0.5*g*、0.6*g*、0.7*g*、0.8*g*、0.9*g*、1.0*g* 进行对比分析，结果如图 4 所示。

由图 4(a)可知，不同幅值下墙面格室应变沿高程均呈非线性变化。当幅值由 0.5*g* 增至 0.8*g* 时，格室应变最大值出现在高程 850 mm 处；幅值增至 1.0*g* 时，最大值出现在高程 250 mm 处，达 572.83 με。这是由于幅值较小时，挡墙主要受墙后土压力作用，其合力点一般位于挡墙中下部；挡墙底部因基础摩阻力和连接件的约束效应而处于相对静止状态，挡墙中部则在墙后土压力作用下呈现外凸的抛物线变形特征。随着幅值增大，层间摩阻力及连接件的约束作用使挡墙外凸趋势减弱，挡墙整体以墙脚为支点发生转动，导致墙脚格室承受显著的挤压作用，应变随之增大。

由图 4(b)可知，不同幅值下墙体格室应变沿高程同样呈非线性变化。当幅值从 0.5*g* 增至 0.7*g* 时，最大应变出现在墙顶格室；当幅值增至 0.8*g* 时，墙顶格室应变持续增加，同时高程 850 mm 和 250 mm 处的应变开始上升；当幅值达 0.9*g* 时，墙顶和高程 250 mm 处的应变进一步增大，而 850 mm 处的应变增幅更为显著，较 0.8*g* 时的 128.53 με 增加了 40.58%；幅值继续增至 1.0*g* 时，墙顶和高程 850 mm 处的应变值分别为 309.62 με 和 295.39 με，二者差值逐渐减小，基本接近。这表明随着幅值增大，挡墙中部受力更为显著。原因在于：挡墙中部的显著外凸变形，导致其与坡体填料间产生相对位移，引起接触面松动，坡体填料向松动区域滑移，同时坡顶发生沉降；格室内部填料受振动影响发生密实下沉，对格室产生明显拉伸作用，最终导致该区域的格室应变显著增长。



(a) 墙面格室应变沿高程变化　　(b) 墙体格室应变沿高程变化

图 4　地震动幅值对应变的影响

Fig. 4　Influence of seismic amplitude on strain

总体而言，墙面和墙体格室的应变分布规律存在本质差异。这源于二者受力机制的显著区别：墙面格室主要表现为土压力主导的弯曲-转动复合变形模式，故应变集中在中下部；墙体格室则更多受填料-结构相互作用控制，其中上部应变更为突出。基于此分布规律，建议在抗震设计中于墙高$H/2$(H为挡墙总高度)处布设拉筋带，以有效提升挡墙的整体稳定性。

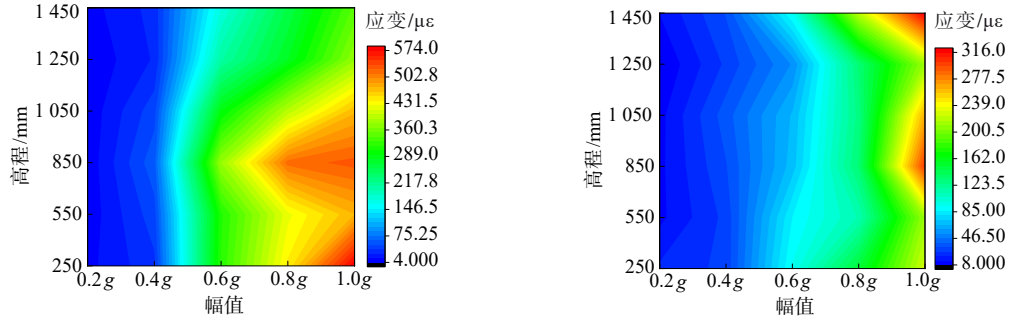
2.1.2 格室应变沿高程分布云图

图5为不同地震动幅值下格室应变沿高程的分布云图。由图可知，对于墙面格室，不同幅值下格室应变最大值均出现墙脚至高程850 mm的范围内；幅值在0.4g以内时格室应变较小，超过0.5g后应变逐渐增大。对于墙体格室，不同幅值下应变最大值均出现在高程850～1 450 mm范围内；幅值在0.6g以内时格室应变较小，超过0.6g后应变增大。

2.1.3 格室应变沿水平向分布云图

为分析格室应变沿水平方向的分布规律，以墙面为起点，分别提取图3(b)中各监测层(对应应变片位置1/1′、2/2′、3/3′和4/4′)的应变数据。将每处两个应变片的读数取算术平均，作为该监测断面的应变值，按距墙面由近及远的顺序依次定义为应变位置1～4。

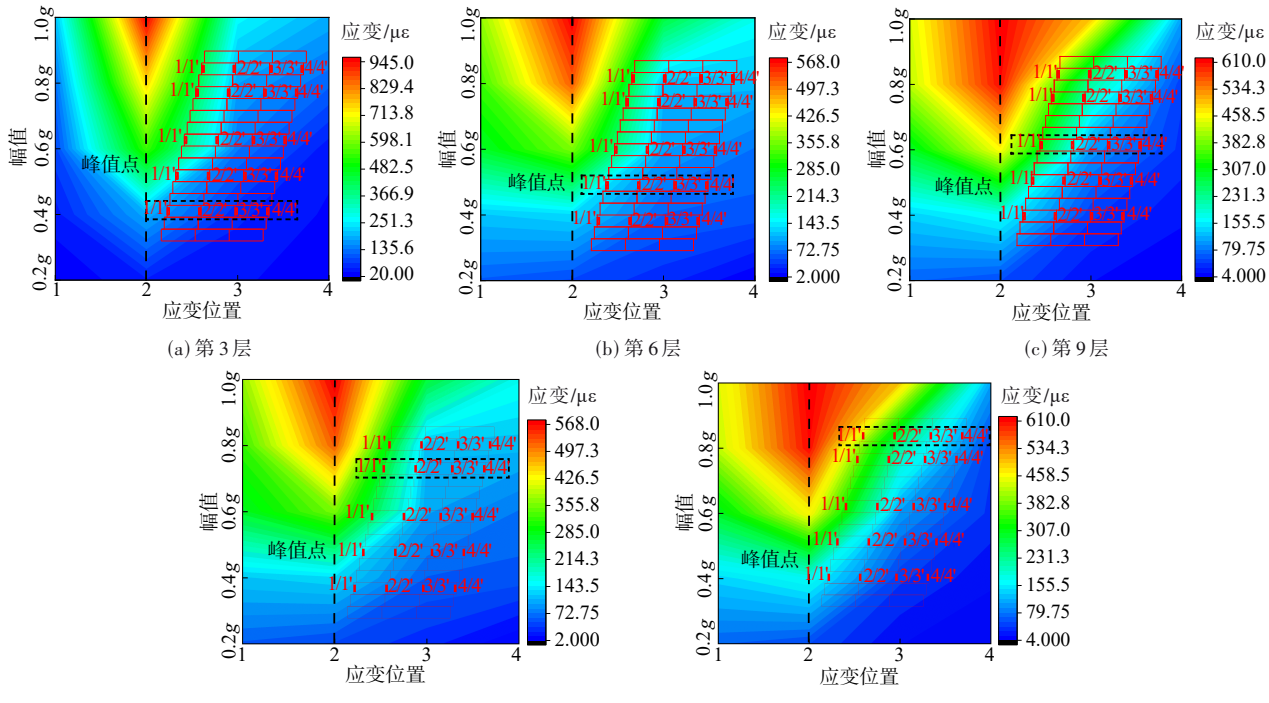
图6给出了不同幅值下格室应变沿水平方向的



(a) 墙面格室应变 (b) 墙体格室应变

图5 不同幅值下格室应变沿高程分布图

Fig. 5 Distribution of geocell strain along elevation under different amplitudes



(a) 第3层 (b) 第6层 (c) 第9层

(d) 第13层 (e) 第15层

图6 不同幅值下格室应变沿水平向分布图

Fig. 6 Horizontal distribution of geocell strain under different amplitudes

分布云图。由图可知，各幅值下各层格室应变沿水平方向均呈现先增大后减小的趋势，应变最大值均出现在位置 2 附近，说明墙面格室受力大于墙体格室。这是由于墙面格室紧邻临空面，其内部填料在振密下沉过程中使格室产生朝向临空面的拉伸变形；而墙体格室受到周边格室及坡体填料的挤压作用，拉伸变形相对较小。

2.1.4　加速度放大系数沿高程的变化规律

加速度放大系数定义为边坡各监测点峰值加速度与 A1 监测点峰值加速度的比值。为探究加速度放大系数沿高程的变化规律，输入 X 向的 El-Centro 波，对 0.2g、0.4g、0.6g、0.8g、1.0g 幅值下墙面和墙体的加速度放大系数进行分析，试验结果如图 7 所示。

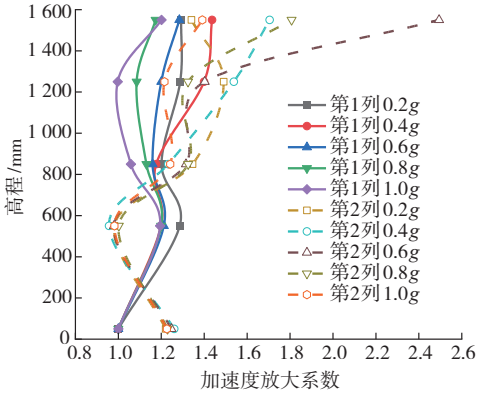


图 7　地震动幅值对加速度放大系数的影响

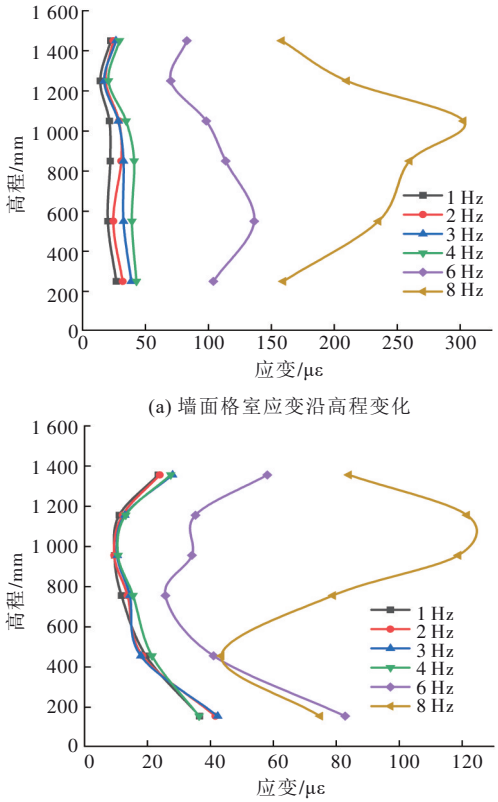
Fig. 7　Influence of seismic amplitude on acceleration amplification factor

图 7 给出了不同幅值下墙面（第 1 列）和墙体（第 2 列）加速度放大系数沿高程的分布规律。由图可知，不同幅值下两者均表现出高程放大效应，但其分布规律存在一定差异。具体而言，墙面加速度放大系数在 H/3 高程和墙顶处出现峰值，而墙体加速度放大系数的峰值则主要集中于墙顶区域。这是因为 H/3 高程附近是墙后土压力的主要作用区域，且墙面格室位于临空面处，导致该区域加速度响应较为显著；而墙顶部位因结构约束相对较弱，其自由振动幅度较大，故加速度放大效应较为突出。

综上，在抗震设计中建议于 H/3、H/2 和墙顶位置布设拉筋带，通过增强局部区域的刚度来提高整体结构的抗震性能，从而确保挡墙在地震作用下的稳定性。

2.2　地震波频率的影响

为研究频率对挡墙动力响应的影响，以幅值 0.2g、X 向输入的 Sin 波为例，选取频率 1、2、3、4、6、8 Hz 进行分析，结果如图 8 和图 9 所示。



(a) 墙面格室应变沿高程变化

(b) 墙体格室应变沿高程变化

图 8　地震波频率对格室应变的影响

Fig. 8　Influence of seismic wave frequency on geocell strain

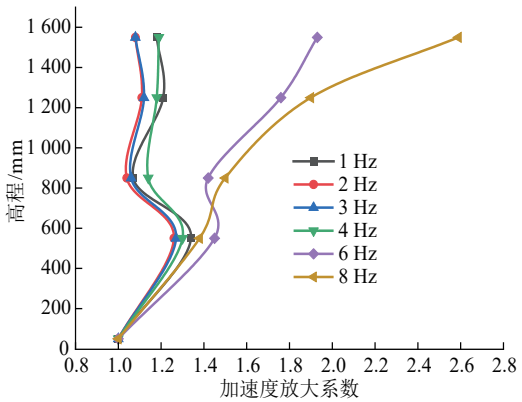


图 9　频率对加速度放大系数的影响

Fig. 9　Influence of frequency on acceleration amplification factor

图 8(a) 和图 8(b) 分别给出了不同频率下墙面和墙体格室应变沿高程的分布规律。由图可知，随频率增加，墙面和墙体格室应变均逐渐增大。对于墙面格室，频率由 1 Hz 增至 4 Hz 时，应变增幅较小，主要集中在挡墙中下部，最大值位于高程 250 mm 处；当频率达到 6 Hz 时，应变增幅较为显著，最大值

位于高程550 mm处，较4 Hz时增加近3.18倍；频率增至8 Hz时，应变最大值转移至高程1 050 mm处。原因在于：石英砂填料具有显著的非线性和离散性，在1～4 Hz低频范围内，振动传播和分布相对均匀，格室受到的动态荷载较小，填料在粒间摩阻力的作用下处于相对静止状态，格室应变较小；频率高于6 Hz后，振动能量向高频转移，格室受到的动态荷载增强，填料振密压实，格室与填料间相互作用增强，应变随之增大。此外，言志信等[16]指出结构自振频率与其密度有密切联系，当地震波从挡墙底部向上传播时，底部填料最先振密压实，导致该区域自振频率升高；当输入波频率接近挡墙自振频率时，结构动力响应增强；随着频率继续升高，上部填料开始振密压实，因此应变最大值呈现向上转移的趋势。对于墙体格室，频率低于4 Hz时，其应变幅值基本不变；频率增至6 Hz时，应变增幅较大，且底部增幅更为明显；频率增至8 Hz时，应变沿高程分布规律发生变化，最大值出现在高程1 250 mm处。

综上，不同频率下墙面和墙体格室应变沿高程分布呈现显著差异。这是由于墙面和墙体不同位置填料的竖向压缩沉降不同，导致侧向变形量不一致，进而使格室受力和变形产生差别；此类不均匀侧向变形通过土-格室相互作用传递至格室结构，导致格室在不同高程位置受力不同，进而使其应变沿高程的分布规律产生差异。

图9展示了不同地震波频率下墙面加速度放大系数沿高程的变化规律。由图可知，当地震波频率由1 Hz增至4 Hz时，加速度放大系数增幅较小，其中高程550 mm处的系数相对较大；频率超过4 Hz后，加速度放大系数显著增大，其中墙顶位置的增幅最为显著。这是由于低频激励下填料的振密压实作用提升了挡墙结构的整体刚度和稳定性，从而抑制了加速度放大效应；而随着激励频率进入高频段，地震动力作用对挡墙结构的破坏机制占据主导地位，导致加速度响应显著增强。

综上所述，在抗震设计中，对于低频地震作用区（1～4 Hz），可适当增加挡墙中下部的强度；对于高频地震区（>4 Hz），除上述措施外，宜在挡墙中上部区域增设水平拉筋带，以增强结构延性并提升其抗震性能。

3 结论

本文通过开展大型振动台模型试验，系统分析了地震动参数对挡墙动力响应的影响，主要结论如下：

（1）不同地震动幅值下，墙面和墙体格室应变分布规律存在差异：墙面格室主要表现为弯曲-转动复合变形模式，其中下部应变较大；墙体格室应变受填料-结构相互作用影响，中上部应变较大。

（2）墙面和墙体的加速度放大系数均表现出高程放大效应。墙面加速度放大系数在$H/3$高程和墙顶处出现峰值，而墙体加速度放大系数的峰值则主要集中于墙顶区域。

（3）当地震波频率低于4 Hz时，墙面格室应变沿高程近似呈线性变化，墙体格室应变则在墙脚和墙顶附近较大；当频率高于4 Hz时，墙面与墙体的格室应变均显著增大，且最大值出现在挡墙中部附近。这表明高频激励对挡墙动力响应的影响更为突出。

（4）在抗震设计中，建议在$H/3$、$H/2$和墙顶位置布设拉筋带，通过增强局部区域刚度来提高整体结构的抗震性能，从而确保挡墙在地震作用下的稳定性。

参考文献（References）

[1] 屈战辉，谢永利，袁福发，等. 土工格室柔性挡墙极限主动土压力计算方法[J]. 交通运输工程学报，2010，10(1)：24-28，35.
Qu Zhanhui，Xie Yongli，Yuan Fufa，et al. Calculation method of active earth pressure under limit state for geocell flexible retaining wall[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2010，10(1)：24-28，35.

[2] 杨晓华，李浩，曾浩，等. 粉细砂填料土工格室柔性挡墙工程性状研究[J]. 中国公路学报，2023，36(6)：24-35.
Yang Xiaohua，Li Hao，Zeng Hao，et al. Engineering behaviors of geocell flexible retaining wall with a fine sand backfill[J]. China Journal of Highway and Transport，2023，36(6)：24-35.

[3] Latha G M，Dash S K，Rajagopal K. Numerical simulation of the behavior of geocell reinforced sand in foundations[J]. International Journal of Geomechanics，2009，9(4)：143-152.

[4] 高昂，张孟喜，朱华超，等. 循环荷载及静载下土工格室加筋路堤模型试验研究[J]. 岩土力学，2016，37(7)：1921-1928，1946.
Gao Ang，Zhang Mengxi，Zhu Huachao，et al. Model tests on geocell-reinforced embankment under cyclic and static loadings[J]. Rock and Soil Mechanics，2016，37(7)：1921-1928，1946.

[5] Kurihashi Y，Oyama R，Komuro M，et al. Experimental study on buffering system for concrete retaining walls using geocell

filled with single-grain crushed stone[J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, 18(10): 1097-1111.

[6] Song F, Liu H B, Hu H B, et al. Centrifuge tests of geocell-reinforced retaining walls at limit equilibrium[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(3): 04018005.

[7] 梁程，徐超. 土工格室加筋土垫层路堤临界高度研究[J]. 岩土力学，2018，39(8)：2984-2990.
Liang Cheng, Xu Chao. Study on critical height of reinforced embankments with geocell layer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2984-2990.

[8] 屈畅姿，李梦竹，刘泽，等. 土工格室加筋土挡墙静载模型试验研究[J]. 岩土力学，2023，44(12)：3424-3434.
Qu Changzi, Li Mengzhu, Liu Ze, et al. Model experimental study on geocell-reinforced soil retaining wall under static loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(12): 3424-3434.

[9] 靳飞飞，宋飞，石磊，等. 拉筋带对地震作用下土工格室挡墙力学性能的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报，2023，55(11)：60-71.
Jin Feifei, Song Fei, Shi Lei, et al. Influence of tensile strip on mechanical properties of geocell retaining wall under earthquake[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(11): 60-71.

[10] 靳飞飞，宋飞，石磊，等. 地震荷载作用下土工格室挡墙力学性能的影响因素[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2024，52(7)：145-160.
Jin Feifei, Song Fei, Shi Lei, et al. Influence factors of mechanical properties of geocell retaining wall under seismic load[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(7): 145-160.

[11] Jin F F. Large-scale shaking table test and numerical analysis of seismic performance of geocell retaining wall[J]. Frontiers in Earth Science, 2025, 13: 1-17.

[12] Krishnaraj P, Manju G S, Latha G M. Physical and numerical shaking table studies on geocell-einforced retaining walls[J]. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering, 2023, 9(5): 62.

[13] Ling H I, Leshchinsky D, Wang J P, et al. Seismic response of geocell retaining walls: experimental studies[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(4): 515-524.

[14] GB/T 50290—2014 土工合成材料应用技术规范[S].
GB/T 50290—2014 Technical code for application of geosynthetics[S].

[15] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S].

[16] 言志信，张学东，张森，等. 基于双向地震作用下边坡共振特性与固有频率研究[J]. 水文地质工程地质，2011，38(2)：46-51.
Yan Zhixin, Zhang Xuedong, Zhang Sen, et al. Study on resonance characteristics and natural frequency of slope under bi-directional seismic action[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2): 46-51.

（本文编辑：赵乘程）