

DOI: 10.11779/CJGE201702016

# 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

朱宏伟<sup>1</sup>, 姚令侃<sup>2</sup>, 陈晓龙<sup>3</sup>, 项琴<sup>4</sup>

(1. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621010; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031;  
3. 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 四川 成都 610017; 4. 四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 610031)

**摘要:** 为了研究土工袋加筋土挡墙在地震作用下的抗震性能, 开展了大型的振动台模型试验。结果表明: 随着加载的持续进行, 挡墙模型的自振频率降低, 阻尼比增加; PGA 放大系数随输入地震动峰值加速度的增大而减小, 墙高对 PGA 放大系数的影响反倒不大。土工袋加筋土挡墙的峰值动土压力呈现“中间小, 两头大”的分布规律, 且墙高越高, 输入地震动峰值加速度越大, 峰值动土压力越大, 而不同地震波形的频谱差异对土压力量值和分布的影响较小。通过数值模拟研究了坡度对土工袋加筋土挡墙力学特性的影响, 认为土工袋加筋土挡墙墙后侧向土压力和筋材的拉应力随着墙体坡度的增大而增大, 当墙体坡度小于 1:0.75 时, 侧向土压力较小; 当墙体坡度大于 1:0.75 时, 墙后土压力迅速增加, 土压力的分布图式类似呈三角形分布。筋材的拉应力沿长度方向呈单峰型分布, 各层筋材的拉应力随上覆填土厚度的增加而增大, 但增加的幅度逐渐减小。另外, 土工袋加筋土挡墙的剪应变增量、活动区范围以及位移均随墙体坡度的增大而增大。

**关键词:** 土工袋加筋土挡墙; 抗震性能; 墙体坡度; 力学特性; 设计建议

中图分类号: U418.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)02-0319-08

作者简介: 朱宏伟(1982-), 男, 甘肃人, 博士, 讲师, 从事岩土工程抗震方面的教学和科研工作。E-mail: zhw-1-zhw@163.com。

## Seismic behaviors and design recommendations of ecological bag-reinforced retaining wall

ZHU Hong-wei<sup>1</sup>, YAO Ling-kan<sup>2</sup>, CHEN Xiao-long<sup>3</sup>, XIANG Qin<sup>4</sup>

(1. School of Environment and Resources, Southwest Science and Technology University, Mianyang 621010, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu 610017, China; 4. Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China)

**Abstract:** In order to study the earthquake seismic behaviors of ecological bags-reinforced wall, the large-scale shaking table model tests are performed. It is shown that the frequency decreases and the damping ratio increases with the increase of external loading. The PGA amplification factor decreases with the increase of earthquake magnitude, and the wall height has little effect. The distribution of horizontal peak dynamic soil pressures along height is of large value at both ends and small value at the middle for the ecological bag-reinforced wall, and the peak dynamic earth pressures increase as the PGA and wall height increase, the effect of frequency content characteristics of ground motions on the amount and distribution of peak dynamic earth pressures is little. The effect of slope rate on mechanical characteristics of ecological bag-reinforced wall is studied through numerical simulation. The results show that the lateral soil pressures and tensile stresses of the tied reinforcement increase with the increasing slope rate. When the slope rate is less than 1:0.75, the lateral soil pressures increase a little, while it is greater than 1:0.75, the lateral soil pressure increase quickly and are triangular-distributed approximately. The tensile stress of the tied reinforcement is unimodal distribution along the length, and increases with the increase of backfill depth. Moreover, the shear stress increment, sliding range and displacement increase with the increasing slope rate.

**Key words:** ecological bag-reinforced wall; seismic behavior; slope rate; mechanical characteristic; design recommendation

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172321); 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2014G004-A-6)

收稿日期: 2015-12-11

## 0 引言

随着国家生态文明建设步伐的加快,“建设美丽中国”的理念已深入人心,在工程建设领域,各种生态护坡技术相继出现。土工格栅返包土工袋加筋土挡墙(以下简称“土工袋加筋土挡墙”)是一种集柔性、生态、环保、节能四位一体的新型支挡结构,在土木建筑、堤防工程、市政交通和水土保持等领域应用广泛<sup>[1-4]</sup>。随着国家“一带一路”战略规划的深入推进,越来越多的交通基础设施将修建在西部高地震烈度山区,土工袋加筋土挡墙的抗震性能是值得关注的问题。

由于土工袋加筋土挡墙还未大规模应用,对其抗震性能的研究也只有零星成果。刘斯宏等通过小型振动台试验,研究了土工袋挡墙在水平地震作用下的位移、加速度和土压力的响应特征,认为土工袋挡墙有良好的抗震性能<sup>[5-6]</sup>;王艳巧等通过小型振动台模型试验,研究了地震三要素对土工袋挡墙动力特性的影响,并分析了水平位移、加速度和动土压力的变化规律<sup>[7]</sup>;笔者同时开展了格宾挡墙和土工袋挡墙的大型振动台模型试验,认为依据现行规范对此类柔性挡墙进行抗震设计时,应适当折减墙后土压力<sup>[8-9]</sup>;另外,刘泽等测试了土工袋加筋土挡墙在重复交通荷载作用下的加速度、动土压力、位移及筋材应变,研究了其动力特性和位移响应规律<sup>[10]</sup>。上述研究有助于深入了解土工袋挡墙的动力特性,但由于小型振动台受承载能力和台面尺寸的限制,存在模型相似比、由模型试验结果推算原型抗震性能的可靠性等问题,模拟工况偏少,难以获得系统的认识。

由于缺乏系统的理论指导和支持,土工袋加筋土挡墙依然采用普通加筋土挡墙的设计方法<sup>[11-12]</sup>。相比传统的砌块式加筋土挡墙,土工袋加筋土挡墙的墙面刚度更小,更易产生变形,依据常规方法设计显然存在问题。另外,当堆叠的土工袋坡度较大时,其主要作用是挡土,而当坡度较小时,土工袋主要起护坡作用,不同坡度下的土工袋究竟是按挡墙设计还是按照护坡考虑,也困扰着设计人员。

鉴于此,本文通过大型的振动台模型试验研究土工袋加筋土挡墙在地震作用下的破坏特征、动土压力及水平加速度的响应规律,揭示土工袋加筋土挡墙的抗震机制;通过数值模拟研究不同墙体坡度下土工袋加筋土挡墙的力学特性,并给出合理的设计建议,以期为此类柔性挡墙的设计提供理论支持。

## 1 土工袋加筋土挡墙的振动台模型试验

试验在高速铁路线路工程教育部重点实验室的单向电液伺服驱动式大型振动台上进行。系统的最大加

速度为  $1.2g$ ,水平向振动有效负荷质量为 25 t,最大振幅为  $\pm 10$  cm。试验采用的钢制模型箱,尺寸为  $3.5\text{ m}$  长  $\times 1.5\text{ m}$  宽  $\times 2.1\text{ m}$  高,质量约 2.7 t。为消除模型箱侧壁的摩擦约束,在模型箱两侧壁各粘贴一层透明薄膜来减小摩擦,且便于观察模型表观变形的情况。模型箱后壁垫 3 cm 土工泡沫以尽量消除边界反射。

### 1.1 试验模型的制作及监测点布置

试验采用的土工格栅为 CATTX50 型钢塑土工格栅,刚度为  $600\text{ kN/m}$ ,为了尽量满足模型相似率的要求,对试验用的土工格栅进行了裁剪处理,剔除了部分横肋。土工格栅共铺设 6 层,竖向间距为  $0.4\text{ m}$ ,采用满铺的形式,返包长度为  $0.5\text{ m}$ 。

土工袋采用普通尼龙编织袋,袋中充填的填料与墙背填料相同。该填料取自西部高地震烈度山区某高速公路施工现场,为全/强风化花岗岩(无黏聚力)。填料的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 填料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of backfill

最大干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	最优含水率/%	内摩擦角/(°)	不均匀系数	曲率系数
2.15	5.4	42.3	40.9	1.2

试验采用的传感器包括加速度传感器和土压力传感器,分别测试地震作用下土工袋加筋土挡墙不同高度处的水平地震加速度和水平动土压力。两种传感器均沿墙高每隔  $40\text{ cm}$  布置一个(见图 1, 2)。

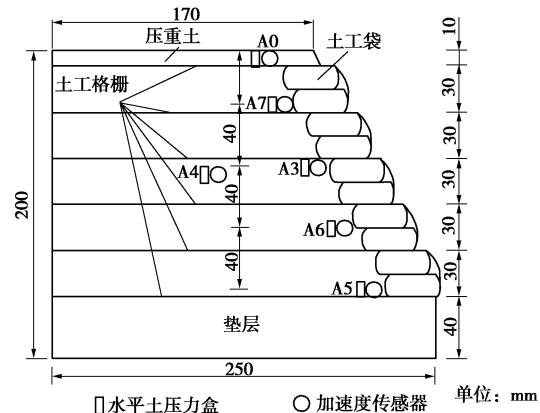


图 1 振动台模型试验设计

Fig. 1 Model design of shaking table tests

### 1.2 模型试验的相似关系

根据基于振动性态和破坏相似的振动台模型试验相似律,为保证模型几何尺寸缩小后的频谱相似和地震波行波效应的相位差相似,台面输入的地震波须在时间轴进行压缩(提高频率),即满足激振模拟相似。因此,输入地震波的时间轴压缩比越大,所模拟的墙高越高<sup>[13-15]</sup>。考虑到设备的负载能力,拟定的几何比尺为 1:4 和 1:6,用来分别模拟 8 m 和 12 m 高的原

型挡墙。以模型尺寸、填土压实度、加速度、时间为控制量, 按 Bockingham  $\pi$  定理导出了各物理量之间的相似关系。试验的主要相似参数见表 2。



图 2 振动台试验模型

Fig. 2 Model of shaking table test

表 2 模型试验的主要相似参数

Table 2 Primary similitude coefficients of model

物理量	相似关系	相似常数(12 m)	相似常数(8 m)
长度 $L$	$C_l$	6	4
密度 $\rho$	$C_\rho$	1	1
加速度 $a$	$C_a$	1	1
速度 $v$	$C_v = C_\rho^{1/4} C_l^{3/4}$	3.83	2.83
黏聚力 $c$	$C_c = C_\rho C_l$	6	4
内摩擦角 $\varphi$	$C_\varphi = 1$	1	1
时间 $t$	$C_t = C_\rho^{1/4} C_l^{3/4}$	3.83	2.83
频率 $\omega$	$C_\omega = C_\rho^{-1/4} C_l^{3/4}$	0.26	0.35

### 1.3 输入的地震波及加载制度

试验输入的单向水平地震波为大瑞人工合成波(代号 DR), El-Centro 波(1940, N-S 向, 代号 EL)和 Kobe 波(1995, N-S 向, 代号 KB)。加速度峰值分别设定为 0.085g(小震), 0.312g(中震)和 0.616g(大震), 分别对应于 50 a 超越概率为 63%, 10% 和 2% 的地震。图 3 所示的是 PGA 为 0.312g, 时间压缩比为 1, 主频在 0.3~6 Hz 之间的 El-Centro 波时程。

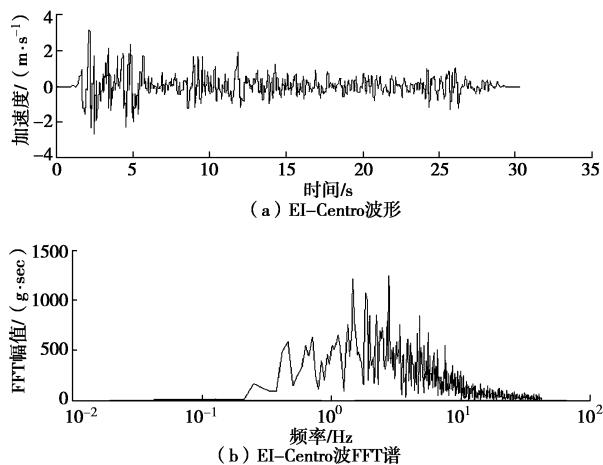


图 3 输入的 El-Centro 波波形

Fig. 3 Input El-Centro waves

每次试验前先进行时间长度不小于 30 s 的高斯平稳白噪声激励的微振试验(加速度峰值约为 0.03g~0.05g), 并观察模型动力特性的变化情况。将白噪声

过程和地震波穿插进行测试, 振动台模型的加载方式(未列出白噪声的加载工况)见表 3。

表 3 振动台模型的加载方式

Table 3 Loading rules of shaking table tests

试验序号	波形代号	PGA/g	压缩比	模拟墙高/m
1, 2, 3	DR, EL, KB	0.085	3.83	12
4, 5, 6	DR, EL, KB	0.085	2.83	8
7, 8, 9	DR, EL, KB	0.085	1.00	2
10, 11, 12	DR, EL, KB	0.312	3.83	12
13, 14, 15	DR, EL, KB	0.312	2.83	8
16, 17, 18	DR, EL, KB	0.312	1.00	2
19, 20, 21	DR, EL, KB	0.616	3.83	12
22, 23, 24	DR, EL, KB	0.616	2.83	8
25, 26, 27	DR, EL, KB	0.616	1.00	2

## 2 试验结果分析

### 2.1 宏观震害现象

在 0.085g 的地震作用下, 土工袋加筋土挡墙的破坏特征并不明显; 在 0.312g 的地震作用下, 距墙体后缘 2 m 处出现了羽状的不规则细小裂缝, 最大宽度约为 5 mm; 在 0.616g 的地震作用下, 张拉裂缝宽度不断加宽, 增至 10 mm 左右(见图 4)。另外, 墙体在地震作用下产生了鼓胀变形, 变形量约 60 mm。



图 4 土工袋加筋土挡墙的宏观震害现象

Fig. 4 Damage characters of reinforced ecological wall

可见, 作为柔性挡墙, 土工袋加筋土挡墙在地震作用下会产生较大的变形, 在变形控制要求较高的场合并不适用。但因其可植性较好, 作为护坡工程不但可以营造绿色景观, 而且造价低廉。另外, 由于土工袋可就地取材, 对于路基塌方等应急抢险工程, 可快速恢复交通, 也具有较强的适用性。再者, 土工袋加筋土挡墙在地震作用下虽产生了较大的变形, 但墙体既未倾覆, 也没有滑移。由此推断, 作为柔性挡墙, 土工袋挡墙的抗震设计除了要进行稳定性检算外, 还应重点检算其变形量是否满足要求。

### 2.2 自振频率和阻尼比变化

图 5, 6 所示的是模型第一阶自振频率和第一阶阻尼比随加载历程的变化情况。可以看出, 随着加载的持续进行, 模型的自振频率和阻尼比的变化趋势恰好相反, 前者呈明显下降趋势, 而后者总体呈上升趋势。其中, 自振频率从加载前的 12.04 Hz 降至加载完成后

的 9.05 Hz, 降幅 24.8%; 阻尼比从加载前的 10.08% 升至加载完成后的 12.24%, 升幅 21.4%。

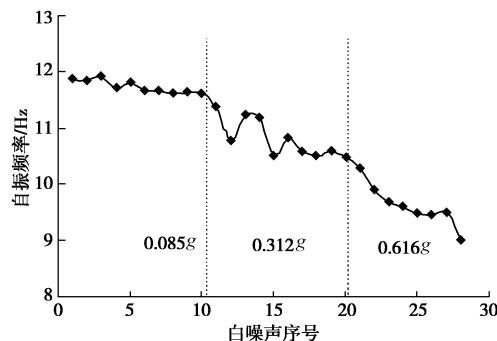


图 5 自振频率随加载时程的变化

Fig. 5 Relationship between natural frequency and loading schedule

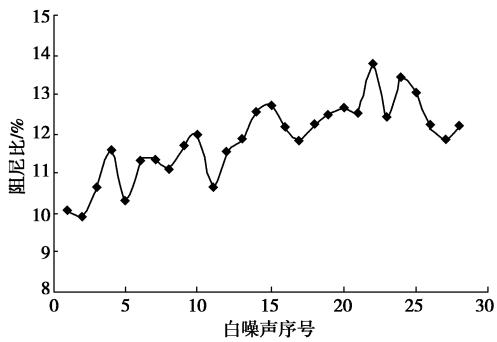


图 6 阻尼比随加载时程的变化

Fig. 6 Relationship between damping ratio and loading schedule

从图 5 还可以看出, 输入的地震波幅值对自振频率的降低也有较大影响。在 0.085g, 0.312g 和 0.616g 的地震波作用完后, 模型的自振频率降幅分别为 2.3%, 3.4% 和 14%; 可见, 输入的地震动越强, 对模型造成的损伤越大, 自振频率下降的幅度也就越大。

输入的地震波频率对模型的自振频率也有一定影响, 在压缩比为 2.83 的 El-Centro 波作用下, 模型自振频率降幅最大, 这是因为其卓越频率涵盖了模型的第一阶自振频率。此外, 经过大瑞人工波和 El-Centro 波作用后, 同量级的 Kobe 波对模型自振频率降幅的影响较小。

### 2.3 加速度放大率响应

定义各测点的地震加速度峰值与台面地震加速度峰值的比值为 PGA 放大系数。图 7 反映的是在 El-Centro 波作用下, 8 m 高的土工袋加筋土挡墙在不同的地震量级下 PGA 放大系数沿墙高的分布规律。总体来看, 地震加速度沿墙高存在放大效应, 但同时, 随输入地震量级的增大, 放大率有所减小, 呈现“量级饱和”的规律。原因主要是由于受岩土非线性特性的影响, 台面输入的地震加速度越大, 动应力水平越高, 剪切模量越低, 阻尼比越大, 岩土的隔(减)震

作用越强, 进而 PGA 放大系数反而变小。

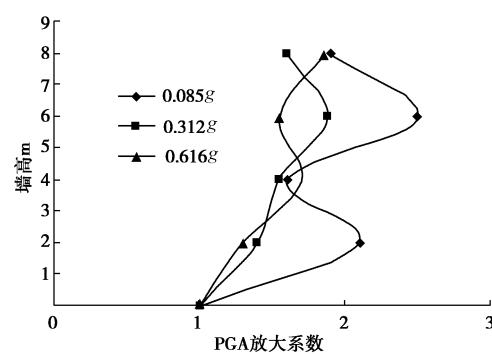


图 7 加速度放大率与 PGA 的关系

Fig. 7 Relationship between PGA amplification factor and earthquake magnitude

图 8 所示的是在 0.312g 的 El-Centro 波作用下, 不同高度的土工袋加筋土挡墙 PGA 放大系数沿墙高的变化情况。可以看出, 挡墙的 PGA 放大系数与墙高的相关性较差, 12 m 高的挡墙放大率反而要比 8 m 的挡墙小, 而与 1.5 m 的挡墙相当。可见, 对于高大挡墙, 由于地震波沿墙体向上传播的路径较长, 波动能量损耗较多, 进而使其地震加速度的放大效应减弱。

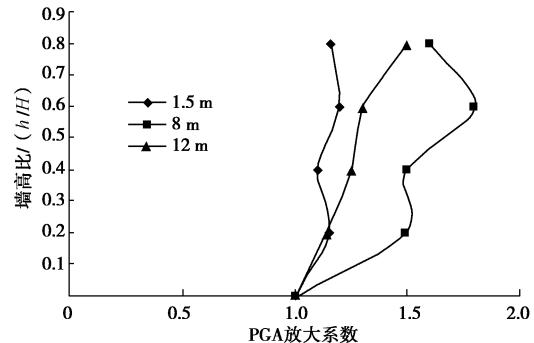


图 8 加速度放大率与墙高的关系

Fig. 8 Relationship between PGA amplification factor and height of retaining wall

### 2.4 动土压力响应

图 9 所示的是土工袋加筋土挡墙模型在 0.312g 的 El-Centro 波作用下, 监测点 A3 得到的土压力时程信号。可以看出, 墙背土压力时程与输入的地震波时程具有对应关系, 即动土压力的大小随地震加速度的增大而增大, 随地震加速度的减小而减小。

图 10 所示的是 8 m 高的土工袋加筋土挡墙在地震作用下 (0.312g) 峰值动土压力沿墙高的分布情况。可以看出土工袋加筋土挡墙的峰值动土压力呈“中间小, 两头大”的分布规律。

笔者所在的课题组同时开展了重力式挡墙的振动台模型试验, 发现其峰值动土压力沿墙高呈钟形曲线分布, 即挡墙顶部和底部的峰值动土压力较小, 中部较大, 另外, 重力式挡墙墙背的动土压力也远大于土

工袋挡墙<sup>[16]</sup>。认为产生这种现象的原因与挡墙的抗震机制有关, 由于土工袋加筋土挡墙在地震作用下的变形主要集中于墙体中部, 正是这种变形耗散了部分地震能量, 使得动土压力减小; 对于重力式挡墙而言, 墙体在地震作用下不会产生塑性变形, 这样, 地震波可较为直接地作用于墙背, 进而产生了较大的动土压力。

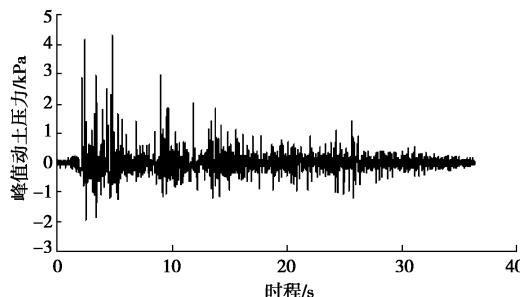


图 9 A3 测点的动土压力时程

Fig. 9 Dynamic pressure and seismic acceleration history of A3

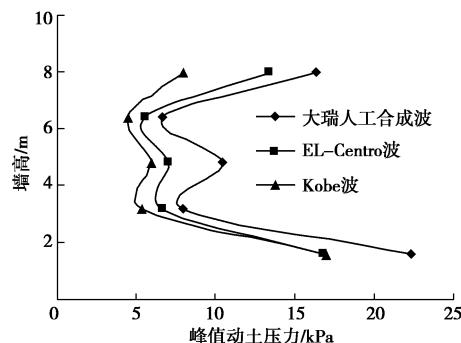


图 10 不同地震波作用下的挡墙峰值动土压力

Fig. 10 Distribution of peak dynamic earth pressure under different earthquake waves

图 11 反映的是在 0.616g 的 El-Centro 波作用下, 不同墙高的挡墙峰值动土压力沿墙高的分布情况, 可以看出, 墙高越高, 峰值动土压力越大。通过对汶川震区挡墙的震害调查, 发现极震区高墙的破坏率远远大于矮墙, 这是因为挡墙自振频率随着墙高的增加而减小, 当挡墙频率接近地震波的主频时, 更容易导致墙身的共振破坏。

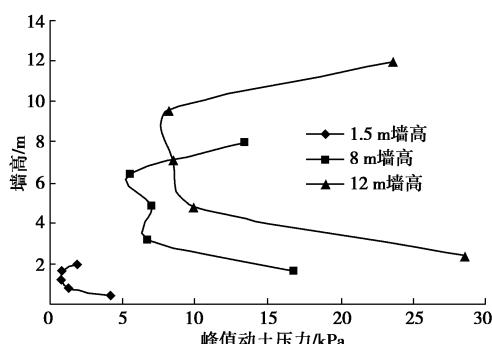


图 11 不同墙高的挡墙峰值动土压力分布

Fig. 11 Distribution of peak dynamic earth pressure along height of retaining wall

图 12 反映的是在 El-Centro 波作用下, 8 m 高的

土工袋加筋土挡墙在不同的 PGA 作用下墙背峰值动土压力的分布情况。可以看出, 地震峰值加速度越大, 峰值动土压力也越大, 地震峰值加速度是影响动土压力大小的主控因素, 结合图 10 可知, 地震波的频谱差异对土压力值和分布的影响相对较小。

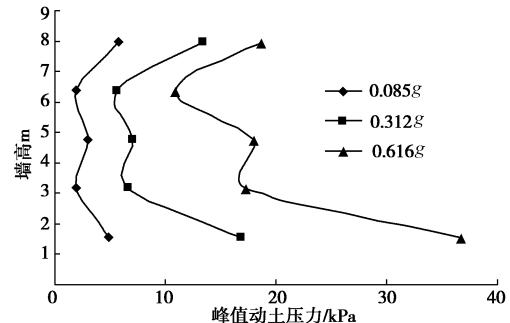


图 12 不同震级作用下的挡墙峰值动土压力

Fig. 12 Distribution of peak dynamic earth pressure under different earthquake magnitudes

### 3 不同坡度的土工袋挡墙力学特性分析

#### 3.1 数值分析模型的建立

为了研究坡度对土工袋加筋土挡墙力学特性的影响, 采用FLAC<sup>3D</sup>建立了相应的数值分析模型。考虑到边界条件的影响, 地基土厚度和墙体高度均取为 10 m, 筋材沿墙高等长布设, 长度为 10 m, 坚向间距为 1 m, 图 13 所示的是坡度为 1:0.5 的土工袋加筋挡墙模型。

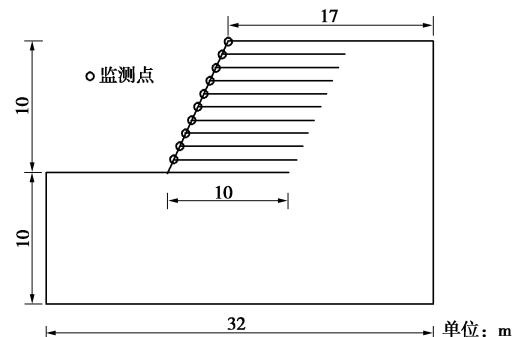


图 13 数值计算模型

Fig. 13 Numerical model

筋材的弹性模量为  $3.0 \times 10^5$  kPa, 泊松比为 0.33, 剪切刚度为  $8 \times 10^7$  kPa, 黏聚力为  $1 \times 10^4$  kPa, 内摩擦角为  $20^\circ$ , 厚度为 2 mm。阻尼采用瑞利阻尼 (Rayleigh damping), 临界阻尼比为 0.15, 墙后填土、地基以及墙面系的物理力学参数如表 4 所示。

表 4 各材料的物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of materials

材料	体积模量 /GPa	剪切模量 /GPa	重度 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )
填土/地基	23	4	2130	0	42.3
墙面	25	6	2000	0	0

### 3.2 计算结果分析

为了校核计算模型的正确性, 图 14 给出了在 0.312g 的 El-Centro 波作用下, 试验挡墙峰值动土压力的实测值和数值模拟结果的对比情况, 可以看出, 二者总体上是吻合的, 表明建立的数值分析模型能比较准确地反映实际试验工况。

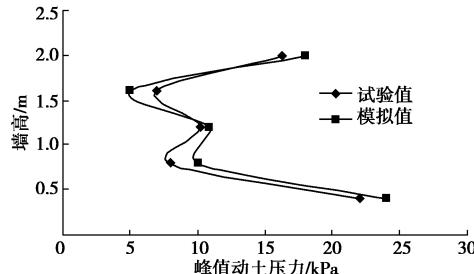


图 14 数值模拟结果与实测值的对比

Fig. 14 Comparison between experimental results and numerical simulation results

#### (1) 侧向土压力分布

图 15 所示的是不同坡度下墙背侧向土压力沿墙高的变化情况, 可以看出, 不同墙体坡度下土工袋加筋土挡墙的侧向土压力分布各异。首先, 随着填土高度的增加, 挡墙底部的侧向土压力明显大于顶部。其次, 墙体越陡, 侧向土压力越大, 如墙体坡度为 1:1.5 时, 最大侧向土压力为 10.5 kPa, 而当墙体坡度为 1:0 (直立) 时, 最大侧向土压力则达 39.8 kPa。

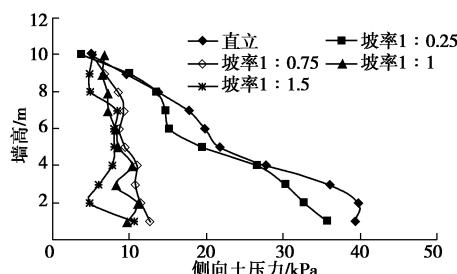


图 15 不同坡度下挡墙的侧向土压力分布

Fig. 15 Distribution of lateral earth pressure of retaining wall under different slope rates

另外, 当墙体坡度小于 1:0.75 时, 墙后侧向土压力的沿墙高近似均匀分布, 不同高度处土压力的大小变化不大; 当墙体坡度大于 1:0.75 时, 墙后土压力迅速增加, 侧向土压力类似刚性挡墙呈三角形分布。可见, 坡度不同的土工袋加筋土挡墙应采用不同的设计方法, 对于墙体坡度小于 1:0.75 的土工袋加筋土挡墙, 由于墙后土压力分布均匀且较小, 可以按照加筋土路堤设计, 即不考虑墙后土压力的作用, 只需检算土坡的稳定性; 对于墙体坡度大于 1:0.75 的土工袋加筋土挡墙, 土压力的分布已接近挡墙的分布图式, 此时应按照挡墙的设计方法检算挡墙的稳定性, 结合前述的试验现象, 还应对墙体的变形量进行检算并控制。

#### (2) 筋材应力

土工袋加筋土挡墙在土压力的作用下会产生一定的变形, 与之相连的筋材与填土相互摩擦使得筋材产生拉应力, 图 16 (a) ~ (d) 所示的是不用坡度下土工袋加筋土挡墙筋材拉应力沿长度方向的分布规律。可以看出, 每层拉筋的拉应力沿长度方向的分布规律大致相同, 呈单峰曲线分布, 各层的拉筋应力随上覆填土厚度的增加而增大, 但增加的幅度逐渐减小。如第十层筋材的峰值拉应力为 15.88 kPa, 第八层拉筋的峰值拉应力为 29.34 kPa, 第六层筋材峰值拉应力为 35.64 kPa, 而第四层和第二层筋材的峰值拉应力则分别为 39.45 kPa 和 37.4 kPa。

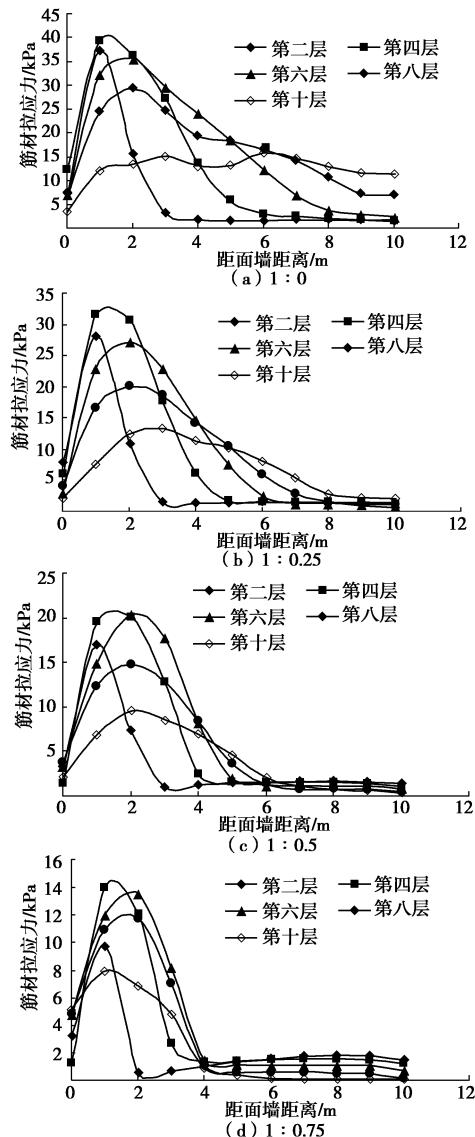


图 16 不同坡度下筋材应力分布

Fig. 16 Distribution of stress of reinforcement under different slope rates

以直立的土工袋加筋土挡墙为例 (图 16 (a)), 由于墙后一定范围的土体稳定性较差, 会产生一定的滑动, 此时筋一土作用较强, 筋材的拉应力在此范围内增加较快, 最终达到峰值; 活动区范围以外的筋材与填土的摩擦作用减弱, 拉应力也逐渐减小。另外,

随着挡墙墙面坡度的增加, 筋材的拉应力也逐渐增大。原因在于墙体坡度越大, 墙后的侧向土压力越大, 较大的侧向土压力使得墙体产生较大变形, 与之相连的拉筋也会产生较大的拉应力。

### (3) 剪应变增量

图 17 (a) ~ (f) 所示的是不同墙体坡度下挡墙的剪应变增量云图。通过计算得知, 随着墙体坡度的减小, 土工袋加筋土挡墙的剪应变增量亦在减小, 如直立挡墙的最大剪应变增量达到了  $2.6 \times 10^{-2}$ , 而坡度为 1:1.5 的土工袋加筋土挡墙的最大剪应变增量则只有  $4.1 \times 10^{-3}$ 。另外, 随着墙体坡度的减小, 活动区的范围也在减小, 滑裂面形状也在发生变化。直立的土工袋挡墙活动区的范围最大, 基本按照  $0.3H$  法确定的滑裂面向墙顶延伸, 坡度为 1:1.5 的土工袋挡墙活动区的范围最小, 无明显的破裂面, 只在坡表出现了剪应变集中, 其余坡度的土工袋挡墙活动区的范围均随墙体坡度的增大而增大, 滑裂面呈圆弧形。

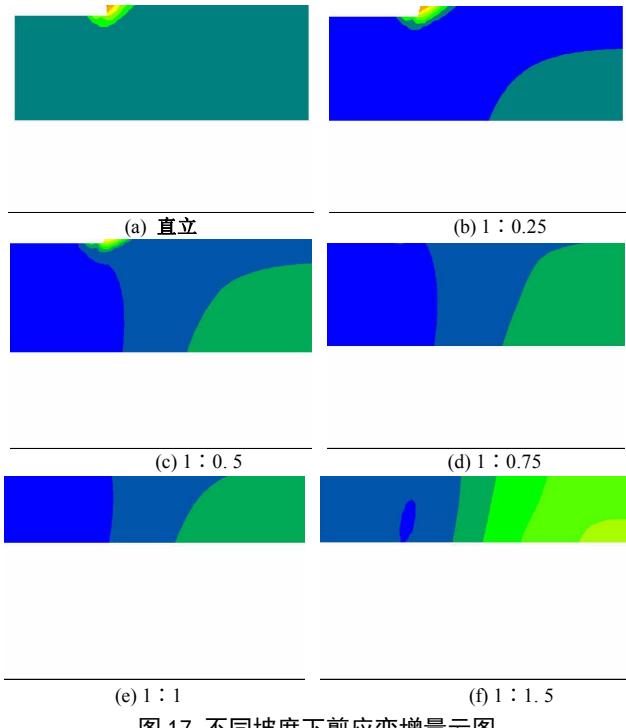


图 17 不同坡度下剪应变增量云图

Fig. 17 Shear strain increment under different slope rates

由此可见, 不同坡度的土工袋挡墙, 土工袋起的作用并不一样。坡度较大时土工袋主要起挡土作用, 而坡度较小时则主要起护坡作用, 这也体现了针对不同坡度的土工袋加筋土挡墙采用不同设计方法的必要性。

### (4) 最大位移

图 18 所示的是不同坡度下土工袋加筋土挡墙墙体的水平位移沿墙高的分布情况, 可以看出, 墙体坡度越大, 水平位移越大。再者, 最大位移基本均出现在墙体的中上部, 主要是由于下部土工袋的压重增大, 墙体刚度增大, 进而位移减小。因此, 对于土工袋挡

墙, 墙体的中上部应是位移控制的重点部位。虽然放坡可以有效减小挡墙的水平位移, 但会占地, 经济和社会效益较差, 可以通过调整筋材的布置方式、加厚墙体、改善填料工程特性等途径来控制墙体的位移。

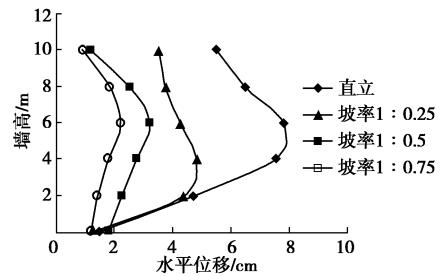


图 18 不同坡度下挡墙水平位移分布

Fig. 18 Horizontal displacements of retaining wall under different slope rates

## 4 结 论

(1) 土工袋加筋土挡墙在地震作用下会产生较大的变形, 但墙体并未发生整体破坏, 抗震性能比较优越。土工袋加筋土挡墙的设计不能直接套用普通加筋土挡墙的设计方法, 而应以控制其变形量为重点, 通过调整筋材的布置方式、加厚墙体、改善填料特性等方式均可控制墙体的变形量。

(2) 随着加载的持续进行, 模型的自振频率降低, 阻尼比增大, 且输入的地震动越强, 自振频率的下降幅度越大; 随输入地震量级的增大, 土工袋加筋土挡墙的 PGA 放大系数有所减小, 但墙高对其影响较小。挡墙的峰值动土压力呈现“中间小, 两头大”的分布规律, 且墙高越高, 震级越大, 峰值动土压力越大。其中, PGA 是动土压力的主控因素, 不同地震波形的频谱差异对土压力量值和分布的影响较小。

(3) 当墙体坡度小于 1:0.75 时, 侧向土压力较小; 当墙体坡度大于 1:0.75 时, 墙后侧向土压力迅速增加, 类似呈三角形分布。对于墙体坡度小于 1:0.75 的生态袋挡墙, 可不考虑土工袋的挡土作用, 按照加筋土路堤进行设计; 对于墙体坡度大于 1:0.75 的土工袋加筋土挡墙, 则应按照加筋土挡墙的设计思路进行设计, 另外, 还需检算其变形量是否超限。

(4) 土工袋加筋土挡墙的筋材拉应力、剪应变增量、活动区范围以及水平位移均随着墙体坡度的增加而增大。筋材的拉应力沿长度方向呈单峰曲线分布, 各层的拉筋应力随上覆填土厚度的增加而增大, 但增加的幅度逐渐减小。挡墙的水平位移沿墙高呈“鼓肚型”分布, 对于坡度较大的土工袋挡墙, 应重点限制墙体中上部的水平位移。

## 参考文献:

- [1] 周德培, 张峻云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通

- 出版社, 2003. (ZHOU De-pei, ZHANG Jun-yun. Bio-geotechnical technology of vegetation[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 王维, 黄向京. 加筋格宾结构分析理论与工程应用新技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (WANG Wei, HUANG Xiang-jing. Analysis theory and engineering application technology of reinforced gabion structures[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [3] MATSUOKA H, LIU Si-hong. A new earth reinforcement method using soilbags[M]. London: Taylor & Francis Group, 2006.
- [4] 段晓明, 苗增健, 刘连新, 等. 生态护坡应用及护坡植物群落的选择[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(31): 15327 - 15329. (DUAN Xiao-ming, MIAO Zeng-jian, LIU Lian-xin, et al. Ecological application of ecological slope protection and vegetation community selection for slope production [J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2009, 37(31): 15327 - 15329. (in Chinese))
- [5] 刘斯宏, 王艳巧, 金远征. 土工袋基础减震隔振试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 87 - 90. (LIU Si-hong, WANG Yan-qiao, JIN Yuan-zheng. Experimental study on vibration reduction and isolation of bases with soilbags[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1): 87 - 90. (in Chinese))
- [6] 刘斯宏, 李玲君, 张雨灼. 土工袋挡土墙小型振动台试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 236 - 243. (LIU Si-hong, LI Lin-jun, ZHANG Yu-zhuo. Small-scale shaking table tests on retaining wall constructed with soilbags[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 43(3): 236 - 243. (in Chinese))
- [7] 王艳巧, 刘斯宏, 林圣德, 等. 土工袋减震效果振动台试验研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 100 - 103. (WANG Yan-qiao, LIU Si-hong, LIN Sheng-de, et al. Vibrating platform test study of vibration reduction effect of soil bag [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(9): 100 - 103. (in Chinese))
- [8] 朱宏伟, 姚令侃, 刘兆生. 地震作用下柔性挡墙的变形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 2829 - 2838. (ZHU Hong-wei, YAO Ling-kan, LIU Zhao-sheng. Research on seismic deformation characteristics of flexible wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2829 - 2838. (in Chinese))
- [9] 朱宏伟, 姚令侃, 张绪海. 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 Hong-wei, YAO Ling-kan, ZHANG Xu-hai. 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))
- [10] 刘泽, 史克友, 雷勇. 重复荷载作用下土工格栅包生态袋加筋土挡墙动力特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(9): 88 - 94. (LIU Ze, SHI Ke-you, LEI Yong. Model test on dynamic characteristics of geogrid reinforced earth retaining wall packet ecological bag under repeated loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(9): 88 - 94. (in Chinese))
- [11] GB50011—2006 铁路工程抗震设计规范[S]. 2006. (GB50011—2006 Code for seismic design of railway engineering[S]. 2006. (in Chinese))
- [12] JT/T B02—01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 2008. (JT/T B02—01—2008 Guide lines for seismic design of highway bridges[S]. 2008. (in Chinese))
- [13] 蒋良滩, 姚令侃, 王建. 基于振动性态和破坏相似的边坡振动台模型实验相似律[J]. 交通科学与工程, 2009, 25(2): 1 - 7. (JIANG Liang-wei, YAO Ling-kan, WANG Jian. Similitude for shaking table model test on side slope relating to dynamic characteristics and strength[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2009, 25(2): 1 - 7. (in Chinese))
- [14] 张建经, 冯君, 肖世国. 支挡结构抗震设计中的 2 个关键技术问题[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 321 - 325. (ZHANG Jian-jing, FENG Jun, XIAO Shi-guo. Discussions on two key technical problems for seismic design of retaining wall[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(6): 321 - 325. (in Chinese))
- [15] 汪闻韶, 金崇磐, 王克成. 土石坝的抗震计算和模型实验及原型观测[J]. 水力学报, 1987(12): 1 - 16. (WANG Wen-shao, JIN Chong-pan, WANG Ke-cheng. Earthquake resistance computation and model test of earth-rock dam and its prototype observation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(12): 1 - 16. (in Chinese))
- [16] 朱宏伟, 姚令侃, 蒋良滩. 考虑变形影响的重力式挡墙地震压力分布[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(6): 1035 - 1044. (ZHU Hong-wei, YAO Ling-kan, JIANG Liang-wei. Distribution of seismic earth pressure on gravity retaining walls considering influence of deformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(6): 1035 - 1044. (in Chinese))