

框架锚杆支护黄土边坡大型振动台模型试验研究

叶帅华^{1,2,3}, 赵壮福^{1,2,3}, 朱彦鹏^{1,2}

- (1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;
2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;
3. 兰州理工大学 岩土与地基基础检测中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 设计并完成了相似比为 1:10 的框架锚杆支护黄土边坡的大型振动台模型试验, 通过加载不同波型、加速度峰值和持时的地震波, 探讨了地震作用下模型边坡的动力响应规律, 并对框架锚杆支护结构的抗震性能进行了评价。试验结果表明: 框架锚杆支护结构加固黄土边坡的抗震效果是显著的, 在进行框架锚杆支护结构抗震设计时需要输入不同的地震波来验证其可靠性。框架锚杆支护结构作用下, 黄土边坡对地震波具有明显的滤波作用和频谱放大作用, 边坡加速度响应具有临空面放大作用和垂直放大作用, 随着输入地震波峰值的增大, PGA 放大系数呈减小趋势, 在地震输入加速度峰值较小的情况下, 加速度响应出现“衰减”现象; 在框架锚杆支护下, 黄土边坡的位移得到了有效的约束, 动土压力分布曲线呈现“双曲线型”变化, 动土压力大小沿高程方向从坡脚至坡顶呈倒三角形分布。试验结果可为框架锚杆支护结构加固黄土边坡的抗震设计提供一定的参考。

关键词: 黄土边坡; 框架锚杆; 动力响应; 振动台试验

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 11-4240-09

Large-scale shaking table experiment of loess slope supported by frame anchors

YE Shuai-hua^{1,2,3}, ZHAO Zhuang-fu^{1,2,3}, ZHU Yan-peng^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;
2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;
3. Testing Center of Geotechnical Engineering and Foundation, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: A large-scale shaking table experiment of loess slope supported by frame anchors with a 1:10 similarity ratio was designed and completed. By loading seismic waves of different types, acceleration peaks and durations, the dynamic response laws of model slope under earthquake action were discussed, and the seismic performance of the supporting structure with frame anchors was evaluated. The test results show that the anti-seismic effect of the supporting structure with frame anchors on the loess slope is significant. Different seismic wave inputs are used to verify its stability in the seismic design of the supporting structure with frame anchors. Under the action of the supporting structure, the loess slope has evident filtering effect on seismic waves and amplification effect on frequency spectrum, and the slope acceleration response has the amplification effect on the near-empty surface and vertical amplification effect. The acceleration response exhibits ‘attenuation’ phenomenon when the peak earthquake input acceleration is small. Under the support of frame anchors, the displacement of loess slope is effectively restrained, its dynamic earth pressure distribution curve shows ‘hyperbolic’ change, and the dynamic earth pressure is distributed in an inverted triangle from the foot of the slope to the top along the slope height direction. The test results can provide some reference for the seismic design of the supporting structures with frame anchors of loess slope.

Keywords: loess slope; frame anchors; dynamic response; shaking table test

1 引言

我国西北地区沟壑纵横, 大多为湿陷性黄土地区, 在这些地区修建城市、高速公路、铁路工程等

必然会遇到与黄土相关的边坡问题, 而在黄土地区, 地震对滑坡的诱发作用往往比其他任何地区都要明显。为了防止黄土边坡发生滑坡, 需要用支护结构加以支挡, 框架锚杆支护结构作为一种柔性支挡结

收稿日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51768040)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51768040).

第一作者简介: 叶帅华, 男, 1983 年生, 博士后, 副教授, 主要从事支挡结构、地基处理及岩土工程抗震方面的教学和研究工作。E-mail: yeshuaihua@163.com

构在黄土地区发挥了很大作用，但在抗震方面的研究还较少。

研究地震作用下框架锚杆支护的黄土边坡的动力响应问题，可以有效地预测黄土边坡的变形及破坏，而通过振动台模型试验可以更加直观地反映支护结构的抗震性能。国内外众多学者已通过振动台试验取得了一些成果，叶海林等^[1-2]基于大型振动台试验对抗滑桩在地震作用下的抗震机制和地震作用后土压力分布形式以及抗滑桩的抗震性能进行了研究，同时还对预应力锚索进行了动力响应分析，其研究对象为岩质边坡。文畅平等^[3]通过振动台试验研究了汶川波地震作用下重力式挡墙、桩板式挡墙、锚杆格构式框架和预应力锚索格构式框架护坡的位移模式及变化特性，并且分析了各支挡结构的抗震性能，其试验用土为碎石。何丽平等^[4]为了研究上部采用锚索框架结构、下部设置为桩板墙的组合式支挡结构的抗震性能，开展了大型振动台模型试验，试验用土为花岗片麻岩。付晓等^[5]基于大型振动台模型试验，研究了多级锚索框架梁与双排抗滑桩组合结构加固含软弱夹层岩质边坡的地震动力特性，试验采用碎石+膨润土模拟边坡岩体。赖杰等^[6]利用大型振动台试验研究了双排抗滑桩在地震荷载作用下的抗震性能，通过对比上部锚杆+下部双排桩共同支护与单一桩支护的破坏过程，分析了两种情况下坡体的动力响应与破坏机制，边坡为含有软弱夹层的碎石土。曲宏略等^[7]以大型振动台模型试验为研究手段对桩板式抗滑挡墙进行了研究，揭示了土压力沿桩身分布规律、桩体位移和边坡岩土体加速度的地震响应特征，材料为配制土。范刚等^[8]借助大型振动台试验，通过改变输入地震波特性以及泥化夹层含水状态，对比分析了边坡的动力响应差异，研究了输入地震波特性及泥化夹层饱水情况对顺层岩质边坡动力响应的影响规律。Yasuda 等^[9]通过振动台试验研究了土钉加固边坡在地震荷载下的作用机制；此外，Ye 等^[10-11]就框架锚杆支护边坡的抗震效果展开了研究，并对其可靠度进行了分析。

以上关于边坡振动台试验以及地震响应的研究大多针对非黄土边坡，有关黄土边坡的研究还较少。此外，关于黄土边坡支护的研究涉及不多，尤其是框架锚杆支护黄土边坡的振动台试验和地震响应的研究更是鲜有报道。本文针对黄土边坡设计并完成了大型振动台模型试验，分析了地震作用下黄土边坡的动力响应规律，并对框架锚杆支护结构的抗震性能进行了评价，以期对框架锚杆支护黄土边坡的抗震设计提供经验。

2 振动台模型试验准备

采用振动台缩尺试验模拟高度为 12 m，坡面与水平面夹角为 80° 的原型黄土边坡，模型边坡采用单面坡形式，土体取自兰州市某黄土边坡，呈浅黄色，土质较均匀，边坡支护方式为框架锚杆支护。试验在兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室的三向六自由度电液伺服驱动式地震模拟振动台上进行，采用自行研制的刚性模型箱，其内部净尺寸为：长 3.0 m，宽 1.2 m，高 2.0 m。为了达到直观地观测土体变形的可视化效果，模型箱两侧设置了 12 mm 厚的有机玻璃。结合模型箱尺寸，将模型与原型的几何相似比设定为 1:10，模型各物理量的相似关系式和相似系数依据滑坡模型试验的重力相似律及量纲分析法推导，推导的结果见表 1。由于土体模型和框架结构模型尺寸较小，很难用人工质量的方法考虑重力效应，因此，采用重力失真模型。

表 1 试验模型的动力相似关系
Table 1 Dynamic similarity relationship of test models

	物理量	关系式	相似比	备注
材料特性	应变 ε	$\lambda_\varepsilon = 1.0$	1	—
	应力 σ	$\lambda_\sigma = \lambda_E$	1/3.612	—
	弹性模量 E	λ_E	1/3.612	模型设计控制
	泊松比 μ	$\lambda_\mu = 1.0$	1	—
	密度 ρ	λ_ρ	1	模型设计控制
几何特性	长度 l	λ_l	1/10	模型设计控制
	面积 S	$\lambda_S = \lambda_l^2$	1/100	
	线位移 X	$\lambda_X = \lambda_l$	1/10	
	角位移 β	$\lambda_\beta = 1.0$	1	
荷载	集中力 p	$\lambda_p = \lambda_E \lambda_l^2$	1/361.2	—
	面荷载 q	$\lambda_q = \lambda_E$	1/3.612	—
	质量 m	$\lambda_m = \lambda_\rho \lambda_l^3$	1/1 000	—
动力特性	刚度 k	$\lambda_k = \lambda_E \lambda_l$	1/36.12	—
	时间 t	$\lambda_t = (\lambda_m / \lambda_k)^{1/2}$	0.190	动力荷载控制
	频率 f	$\lambda_f = 1 / \lambda_t$	5.262	
	阻尼 c	$\lambda_c = \lambda_m / \lambda_l$	0.005 26	—
	速度 v	$\lambda_v = \lambda_l / \lambda_t$	0.526	—
	加速度 a'	$\lambda_a = \lambda_l / \lambda_t^2$	2.770	动力荷载控制

在模型箱两侧壁上黏贴 100 mm 厚的聚苯乙烯泡沫塑料板来减小地震波在边界上波动反射或折射以及体系振动形态的变化给试验结果带来的误差；模型箱底部板面上用环氧树脂黏上碎石，使之成为粗糙表面来减少模型箱与黄土接触面的相对位移。

锚杆的模拟材料为直径 5 mm 的预应力混凝土用钢丝，其抗拉强度不低于 1 570 kPa，锚杆锚固段采用水泥砂浆浇注而成，如图 1(a)所示。框架由混

凝土现场浇注,并预留孔洞,其材料采用微粒混凝土,配合比为水泥:粗砂:石灰:水=1: 3.129: 1.342: 0.470。试验中梁、柱以及板的尺寸均由实际框架结构的尺寸按相似关系折算,框架梁柱内钢筋采用镀锌铁丝模拟。黄土边坡模型参数见表 2。

模型土体分层垒入模型箱中,每填筑 10 cm,找平并均匀捣实,确保现场压实率达到 90%。当土层垒至锚杆处时,将锚杆从框架上预留的孔洞由内向外穿出,套上垫板、锚头,再用螺母将其锚定在框架上,使框架紧贴坡面(见图 1(b))。试验模型完成图如图 2 所示。为考虑土的重塑作用,完成后的模型静置 24 h 以上方可进行试验。在制作的模型上取土样进行土工试验,得到模型材料物理力学参数见表 3。试验中采用位移计、加速度传感器、应变传感器及土压力盒量测边坡模型的动力响应,在土

层填筑至监测点设定位置处时埋设相应量测设备,其监测点布置位置见图 3。图中, H 为模型高度, D 为边坡高程, B 为模型边坡顶长度。

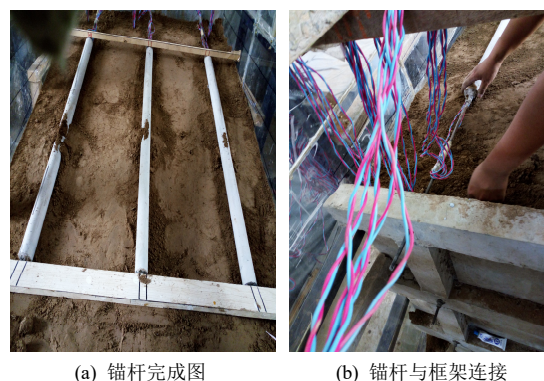


图 1 试验过程图
Fig.1 Experiment process

表 2 模型参数
Table 2 Model parameter

项目	锚杆排数	锚杆竖向间距 /m	锚杆水平间距 /m	坡高 /m	边坡坡度 /m	平面尺寸 /m	横梁截面 /mm	立柱截面 /mm	挡土板厚度 /mm	混凝土
原型	4	4.0	4.0	12.0	80	12.0×24.0	800×800	800×800	150	C20 砼
试验模型	4	0.4	0.4	1.2	80	1.2×2.4	80×80	80×80	15	微粒砼



图 2 模型完成图
Fig.2 Model completion diagram

表 3 黄土参数
Table 3 Parameters of Loess

黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	重度 /(kN/m³)	极限摩阻力 /kPa
18	25	16.4	50

本试验加载了不同波型、加速度峰值以及持时的地震波共 37 个工况。选择 3 种典型地震波为地震激励,台面输入加速度峰值分级递增,图 4~6 为输入加速度峰值为 0.3g 的工况下 El- Centro 波、兰州波和汶川波的加速度时程曲线。

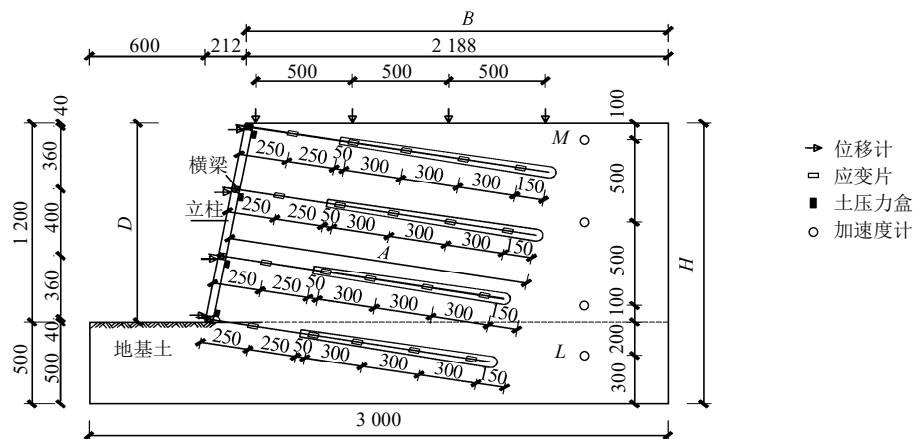


图 3 模型测点布置位置(单位: mm)
Fig.3 Location of model measuring points (unit: mm)

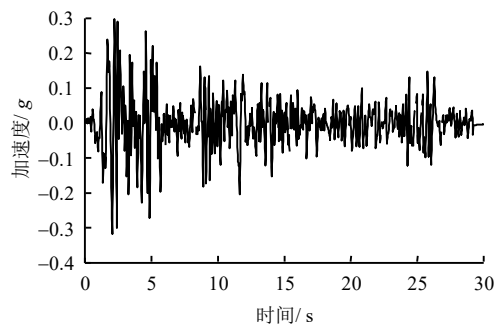


图 4 El-Centro 波时程曲线
Fig.4 Time history curve of El-Centro wave

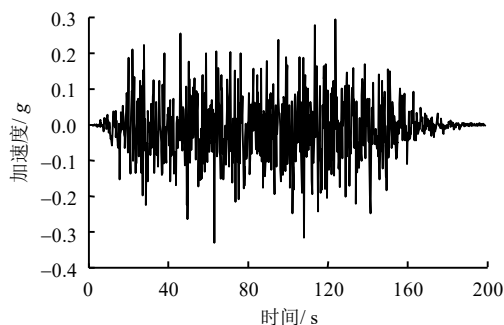


图 5 兰州波时程曲线
Fig.5 Time history curve of Lanzhou wave

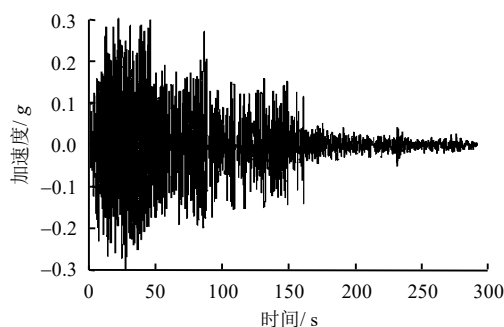


图 6 汶川波时程曲线
Fig.6 Time history curve of Wenchuan wave

为了探讨地震激励峰值大小对框架锚杆和黄土边坡的影响,台面输入加速度峰值分别为 0.05g、0.10g、0.15g、0.20g、0.30g、0.40g。在试验开始前先进行白噪声激励的微震试验,试验中在加速度峰值及地震波类型发生改变时均输入微幅白噪声激励进行扫频处理,以消除上一阶段对模型震动激励的残余影响,试验加载机制见表 4。

表 4 试验加载机制
Table 4 Test loading mechanism

地震波	峰值加速度 /g	持时 /s
El-Centro波		30
兰州波	0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40	200
汶川波		290

3 振动台模型试验结果分析

3.1 模型加速度响应分析

为了反映框架锚杆支护黄土边坡的加速度响应,在坡体内部沿模型高度 H 方向每隔一定距离埋设加速度传感器,根据试验结果,发现在各工况地震波激励下边坡加速度响应应具有相似的变化规律。

图 7 给出了兰州波激励下坡底附近测点 L 点和坡顶附近测点 M 点的加速度反应傅里叶谱。由图可以看出,输入地震波在经过黄土介质后频谱发生了很大的变化,其中 L 点卓越频率集中在 2~4 Hz 和 8~10 Hz 的范围内,而 M 点卓越频率集中在 0~4 Hz,边坡滤波现象较为显著。此外,边坡对傅氏谱值具有放大作用, L 点最大傅氏谱值为 0.035g/Hz,而 M 点则放大至 0.08g/Hz。这是由于黄土是一种具有大孔隙架空结构的土体,地震波输入后,黄土颗粒间发生内摩擦作用致使地震能量快速耗散,颗粒间大孔隙则使得地震波发生多次反射及折射,以致边坡对地震波有明显的滤波作用和频谱放大作用。

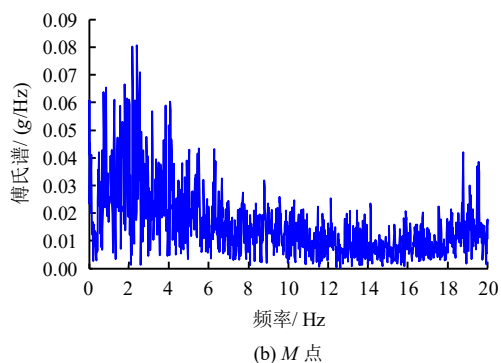
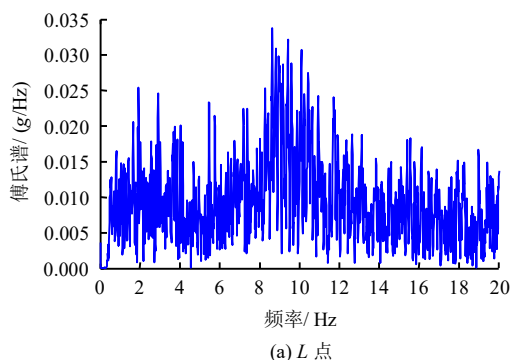
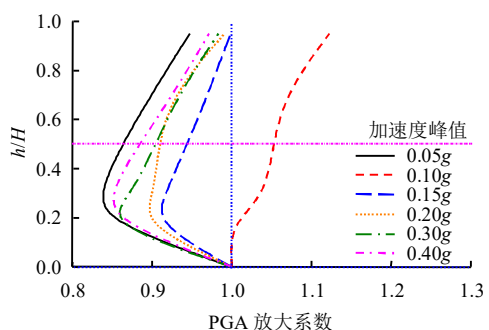


图 7 边坡底面和坡顶加速度的傅氏谱
Fig.7 Fourier spectrum of acceleration on bottom and top of slope

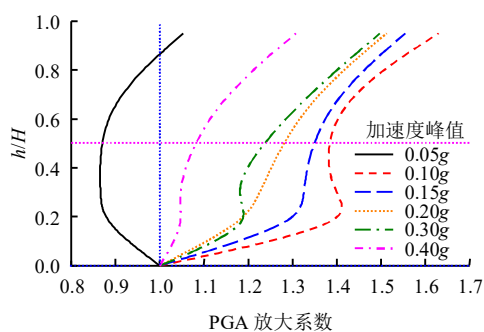
为了更加准确地描述地震作用下边坡加速度响应的规律,一般以各监测点的实测动力响应加速度峰值 PGA 与台面输入加速度峰值的比值作为评定

标准, 以下称为 PGA 放大系数。

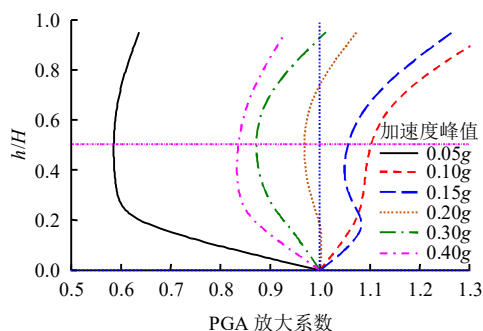
图 8 为 3 种不同类型的地震波在输入加速度峰值分别为 0.05g、0.10g、0.15g、0.20g、0.30g 和 0.40g 时 PGA 放大系数沿 H 方向的变化情况(h 为测点高度)。可以看出当 h/H 为 0.5 时 (即坡体内部), 3 种地震波的 PGA 放大系数均小于坡顶 ($h/H = 1.0$) 处, 这反映了地震波在临空面的放大作用。沿边坡垂直方向, 不同地震波的加速度响应应具有显著差异, 其中 El-Centro 波 PGA 放大系数基本处于小于 1.0 的状态; 兰州波 PGA 放大系数基本处于大于 1.0 的状态; 汶川波在输入加速度峰值为 0.10g 和 0.15g 时 PGA 放大系数大于 1, 放大作用不明显。



(a) El-Centro 波



(b) 兰州波



(c) 汶川波

图 8 坡体内各点 PGA 放大系数变化曲线

Fig.8 Variation curves of PGA amplification factor at various points in slope

分析认为, 黄土是具有微结构的一类特殊土, 在动力作用的过程中, 土体微结构不断损伤演化, 土体动力参数 (共振频率与阻尼比) 随动载的变化不断调整, 而 PGA 放大效应取决于边坡自振频率与荷载主频接近程度, 当二者愈接近, 放大效应越明显, 反之放大效应越弱甚至响应衰减, 会出现放大系数小于 1 的情况^[12]。

由图 8 得出当输入加速度峰值为 0.05g 时, 3 种地震波的 PGA 放大系数均小于 1, 最小值分别为 0.82 (EL 波)、0.86 (兰州波)、0.58 (汶川波), 这表明在输入加速度峰值较小时, 框架锚杆支护的黄土边坡会出现加速度“衰减”现象, 其中汶川波加速度“衰减”现象最明显。从输入加速度峰值为 0.10g 开始, 随着输入地震波峰值的增大, PGA 放大系数基本呈减小趋势, 甚至减小到 1.0 以内。除上述原因外, 徐光兴等^[13]还认为这种现象与土的剪应变增大, 刚度降低和阻尼增大有关。随着地震波振幅逐级增大, 黄土非线性特征愈加明显, 土体滤波作用增强, 加速度峰值逐渐减小。

图 9 给出了输入加速度峰值为 0.15g 时在坡体内部沿 H 方向不同地震波的 PGA 放大系数变形曲线, 可以看出不同的地震波加速度响应具有明显差别。随着高度逐渐接近边坡顶面, 兰州波与汶川波的 PGA 放大系数非线性增大, 对输入地震动具有垂直放大作用。相比之下, 兰州波的响应最为剧烈, PGA 放大系数在坡顶达到 1.645, 即边坡对兰州波的放大作用最明显; 而 El-Centro 波则处于 PGA 放大系数小于 1.0 的状态, 表明该情况下抗震效果最佳。该研究结果说明不同地震波作用下框架锚杆支护黄土边坡的抗震效果不同, 在抗震设计时需要输入不同地震波来验证其可靠性。

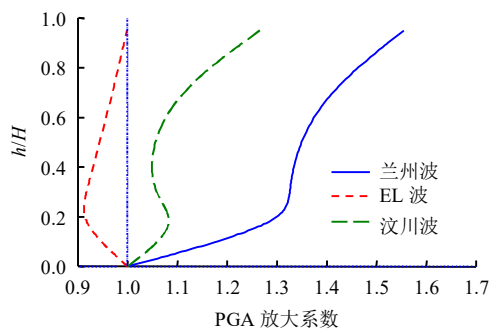


图 9 不同地震波 PGA 放大系数

Fig.9 PGA amplification factor of different seismic waves

3.2 模型动土压力分析

在模型中间的一榀框架后沿 D 方向布置土压力

监测点 (d 为测点高度), 研究地震作用引起的动土压力响应。试验表明, 不同地震波作用下黄土的动土压力分布形式表现出相似的变化规律。由图 10 得: 不同的加速度峰值作用下, 土压力随着高程的增加均表现出递增的趋势; 在地震作用下, 框架锚杆支护的黄土边坡的土压力分布曲线呈“双曲线型”变化, 土压力大小随着高程的增大由坡脚到坡顶呈倒三角形分布, 这与叶帅华^[14]的理论研究成果是一致的。

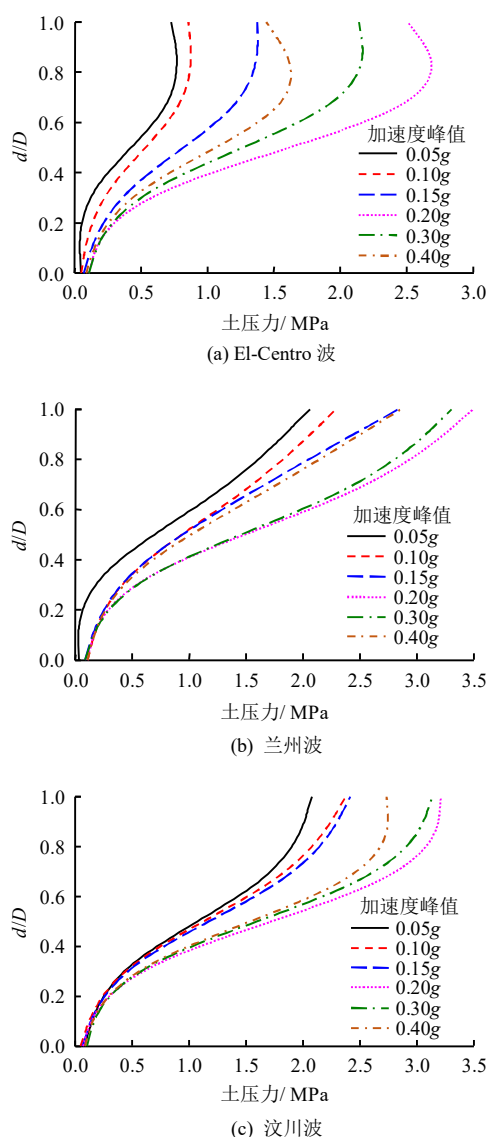


图 10 不同地震波土压力随地震波幅值变化曲线
Fig.10 Variation curves of earth pressure with seismic amplitude for different seismic waves

不同地震波对应土压力峰值出现的位置亦有所不同, 其中 El-Centro 波作用下土压力峰值出现在坡顶以下 1/4 位置处, 土压力最大值为 2.98 MPa; 而兰州波以及汶川波在地震作用下土压力峰值均出现在坡顶位置, 其中兰州波作用下土压力最大值为

3.49 MPa, 汶川波作用下土压力最大值为 3.21 MPa; 这表明在不同地震波作用下, 框架锚杆支护黄土边坡的动土压力响应有一定的差异, 因此, 在抗震设计时输入不同的地震波来校验是必要的。

针对不同类型的地震波激励, 取边坡顶部测点的动土压力响应, 如图 11 所示。可以看出随着输入加速度峰值的增大, 动土压力先增大后减小, 分析认为该现象与地震波输入机制为分级递增有关, 在输入地震波为 0.05g 到 0.20g 时, 动土压力数值随地震波输入加速度峰值的增加而增大。而在输入加速度峰值为 0.20g 后, 由于地震波输入过程中边坡土体不断累积损伤, 导致挡土结构与土体接触处可能出现松弛现象, 土体与压力计接触的作用力减小, 致使土压力盒测读的数据逐渐减小。

对比 3 种地震波可以发现, 兰州波引起的动土压力最大, 汶川波次之, El-Centro 引起的动土压力最小, 即黄土边坡在 El-Centro 波作用下稳定性最好。这与 3 种地震波的频谱特性不同有关: 不同的地震波在黄土介质中的传播规律以及能量损耗也不同, 最终引起的动土压力具有一定的差异性。

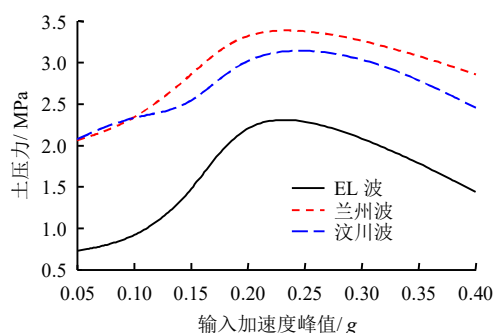


图 11 不同地震波土压力变化曲线
Fig.11 Curves of earth pressure for different seismic waves

3.3 模型位移响应分析

不同地震波作用下边坡的水平位移随 D 的变化曲线, 如图 12 所示, 水平位移随着高程的增加而逐渐增大, 在坡顶处达到最大, 其中兰州波最大水平位移为 0.43 mm, El-Centro 和汶川波分别为 0.38 mm 和 0.40 mm。

由于试验中台面输入加速度峰值分级递增, 每一个试验结果是之前试验工况下试验结果的累积, 所以输入加速度峰值相邻的两条曲线的分布密度可以体现位移增长速率。由图 12 看出, 加速度峰值为 0.05g~0.20g 时位移曲线分布稀疏, 而 0.20g~0.40g 时曲线分布则较密集, 说明随着输入加速度峰值增

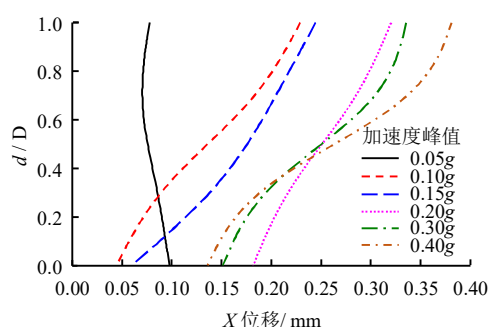
大, 水平位移增长速率在减小。

分析认为, 在输入加速度峰值较小时, 黄土边坡内锚杆尚未进入工作状态, 而黄土的地震易损性明显, 在地震往复荷载作用下土体会逐渐松动, 土体的强度降低, 位移逐渐增大; 随着地震波输入加速度峰值的增大, 边坡产生了较大变形, 黄土被压实, 框架支护结构与黄土边坡之间产生张拉效果, 框架锚杆进入工作状态并约束了黄土变形, 进而减小了位移增加的幅度, 这证明框架锚杆支护黄土边坡的支护形式有效, 抗震效果显著。

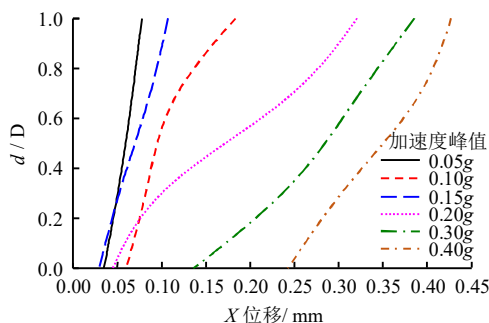
地震作用下黄土边坡的竖向位移可以反映其震陷现象, 图 13 给出了模型边坡顶面沿坡顶长度 B

方向的测点竖向位移的变化曲线 (b 为测点与坡体边缘的距离)。可以看出坡顶处竖向位移达到最大值, 随着距坡体边缘距离 b/B 的增大, 位移峰值呈逐渐减小的趋势, 这说明在框架锚杆支护作用下, 黄土的震陷现象不明显。

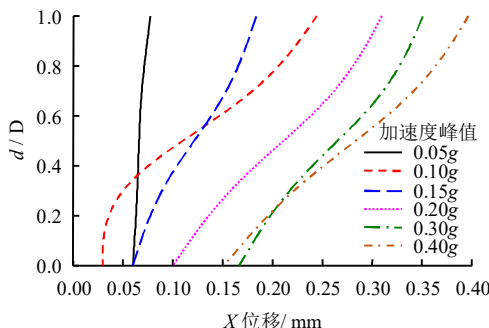
从图 13 可以看出, 边坡不同测点的竖向位移不断增长, 但曲线分布较为密集, 表明竖向位移增长速率较慢。由于边坡的竖向位移表示了结构的附加残余变形, 每一次地震波作用下, 黄土均有一定的损伤, 边坡残余应变会缓慢累积, 黄土逐渐进入非线性塑形耗能阶段, 随着地震波输入加速度峰值的增大, 竖向位移不断增长但增长速率缓慢。



(a) El-Centro 波



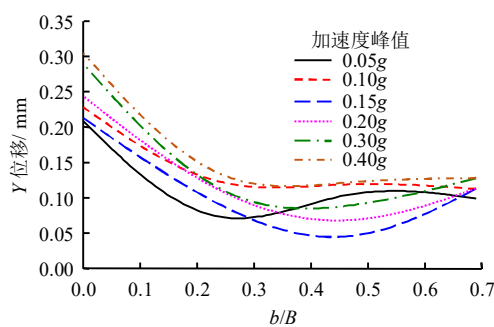
(b) 兰州波



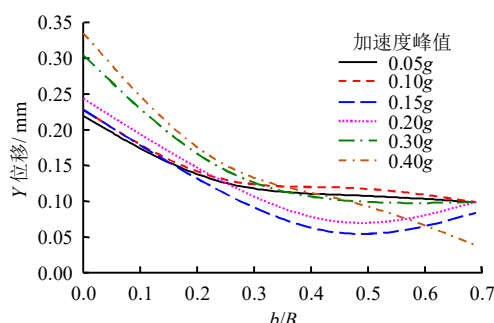
(c) 汶川波

图 12 水平位移变化曲线

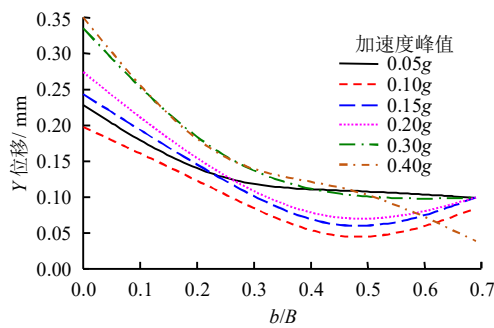
Fig.12 Curves of horizontal displacement



(a) El-Centro 波



(b) 兰州波



(c) 汶川波

图 13 竖向位移变化曲线

Fig.13 Curves of vertical displacement

3.4 锚杆应变响应分析

边坡加固是有效抵抗地震破坏的措施之一, 框

架锚杆支护结构是一种柔性支挡结构, 框架-锚杆-土体系统的空间协同作用使得土体在地震作用下变

形协调一致,具有良好的抗震性能^[15-16],因此,研究地震作用下锚固体系的受力特性对于进一步完善加固措施具有重要意义。

对比锚杆在不同地震波作用下的应变峰值,如图 14 所示,兰州波和 El-Centro 波激励下锚杆应变随地震波输入加速度峰值的增大基本呈减小趋势,在输入加速度峰值为 $0.10g$ 时应变最大,分别为 368.39×10^{-6} (EL 波)、 700.02×10^{-6} (兰州波);而应变在汶川波激励下则呈增大趋势,在 $0.40g$ 时应变值达到 $1\,426.35 \times 10^{-6}$,说明锚杆在汶川波激励下应变在持续增长,此时黄土边坡易产生塑性变形。

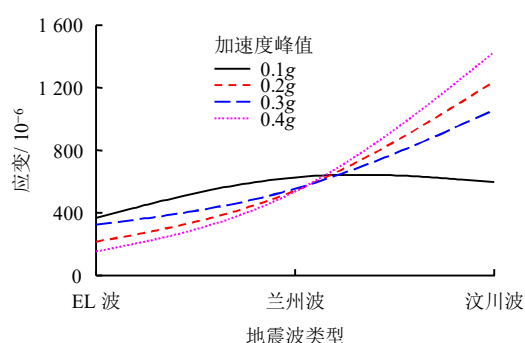


图 14 不同地震波应变曲线
Fig.14 Strain of different seismic waves

以兰州波为例,取中间一榀框架,应变沿锚杆杆长 A 方向分布曲线如图 15 所示(a 为测点与锚杆锚头的距离)。随着输入加速度峰值的增大,锚杆动应变总体上呈减小趋势,在加速度峰值为 $0.10g$ 时应变值最大。应变峰值出现在自由段与锚固段交界处,这与锚杆的受力原理是一致的^[15]:在动荷载作用下,坡体及框架产生相对位移并向外运动,与此同时,将力传至锚杆,再沿锚固段杆长方向逐渐传递至稳定土层,受力过程由外向内,应变值逐渐减小。

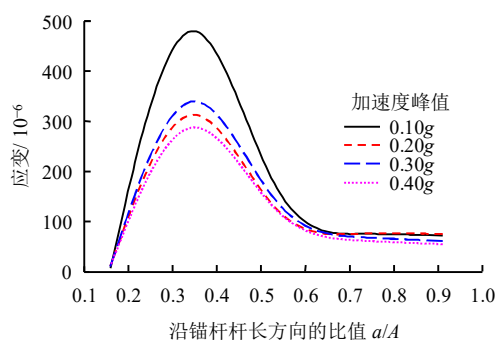


图 15 锚杆杆长方向应变曲线
Fig.15 Strain along the length of anchor rod

4 结 论

(1) 在黄土地区,框架锚杆支护边坡的支护形式是有效的,抗震效果是显著地。框架锚杆支护结构能有效约束土体变形,随着地震波输入加速度峰值的增大,边坡位移不断增长但增长速率缓慢。不同地震波作用下,框架锚杆支护黄土边坡的动力响应是有一定差异的,因此在进行框架锚杆支护抗震设计时需要输入不同的地震波来验证其可靠性。

(2) 框架锚杆支护结构作用下的黄土边坡对地震波有明显的滤波作用和频谱放大作用。黄土颗粒间的内摩擦作用使得地震波能量在传播过程中快速耗散,颗粒间的大孔隙则使地震波发生多次折射,对地震波有显著地滤波作用和频谱放大作用。

(3) 框架锚杆支护结构作用下的黄土边坡对输入地震波峰值具有垂直放大作用以及临空面放大作用。随着输入地震波峰值的增大,PGA 放大系数基本呈减小趋势,甚至减小到 1.0 以内。当输入地震波加速度峰值较小时,出现加速度“衰减”现象。

(4) 在地震作用下,框架锚杆支护黄土边坡的动土压力分布曲线呈现“双曲线型”变化,土压力大小随着高程的增大呈倒三角形分布。因此,地震作用下支护结构在顶部承受土压力较大,在抗震设计时应针对性的加强支挡结构。

参 考 文 献

- [1] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡抗滑桩振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 251—257.
YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, LI An-hong, et al. Shaking table tests on stabilizing piles of slopes under earthquakes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(2): 251—257.
- [2] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡预应力锚索振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2847—2854.
YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, LI An-hong, et al. Shaking table test studies of prestressed anchor cable of slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Suppl.1): 2847—2854.
- [3] 文畅平, 杨果林. 地震作用下挡土墙位移模式的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1502—1512.
WEN Chang-ping, YANG Guo-lin. Shaking table model

- test study of seismic displacement mode of slope with anchor lattice frame structure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(7): 1502—1512.
- [4] 何丽平, 杨果林, 林宇亮, 等. 高陡边坡组合式支挡结构大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1951—1957.
HE Li-ping, YANG Guo-lin, LIN Yu-liang, et al. Large-scale shaking table test study of compound supporting structure of high-steep slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(7): 1951—1957.
- [5] 付晓, 张建经, 周立荣. 多级框架锚索和抗滑桩联合作用下边坡抗震性能的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(2): 462—470.
FU Xiao, ZHANG Jian-jing, ZHOU Li-rong. Shaking table test of seismic response of slope reinforced by combination of anti-slide piles and multi-frame foundation beam with anchor cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(2): 462—470.
- [6] 赖杰, 郑颖人, 刘云, 等. 地震作用下双排抗滑桩支护边坡振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 680—686.
LAI Jie, ZHENG Ying-ren, LIU Yun, et al. Shaking table tests on double-row anti-slide piles of slopes under earthquakes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(4): 680—686.
- [7] 曲宏略, 张建经. 桩板式抗滑挡墙地震响应的振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 743—750.
QU Hong-lue, ZHANG Jian-jing. Research on seismic response of anti-sliding sheet pile wall by shaking table test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 743—750.
- [8] 范刚, 张建经, 付晓, 等. 含泥化夹层顺层岩质边坡动力响应大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(9): 1750—1757.
FAN Gang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao, et al. Large-scale shaking table test on dynamic response of bedding rock slopes with silt intercalation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(9): 1750—1757.
- [9] YASUDA S, HIGUCHI C, ISHII C, et al. Shaking table tests on the mechanism to stabilize slopes by steel nails during earthquakes[J]. **New Horizons in Earth Reinforcement**, 2008: 831—836.
- [10] YE S H, FANG G W, ZHU Y P. Model establishment and response analysis of slope reinforced by frame with prestressed anchors under seismic considering the prestress[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2019, 122: 228—234.
- [11] YE S H, FANG G W, MA X R. Reliability analysis of grillage flexible slope supporting structure with anchors considering fuzzy transitional interval and fuzzy randomness of soil parameters[J]. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2019. DOI:10.1007/s13369-019-03912-9.
- [12] 王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 地震和降雨耦合作用下黄土边坡动力响应的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1287—1293.
WANG Lan-min, PU Xiao-wu, WU Zhi-jian, et al. Shaking table tests of dynamic response of loess slopes under the coupling effects of earthquakes and rainfalls[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(7): 1287—1293.
- [13] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 624—632.
XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 624—632.
- [14] 叶帅华. 黄土地区框架预应力锚杆支护边坡地震作用分析及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
YE Shuai-hua. Seismic analysis and engineering application of frame prestressed anchor supported slope in loess area[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2018.
- [15] 朱彦鹏, 罗晓辉, 周勇. 支挡结构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
ZHU Yan-peng, LUO Xiao-hui, ZHOU Yong. Design of retaining structure[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [16] 叶帅华, 朱彦鹏, 王邓崧, 等. 框架-预应力锚杆-土体系统地震动相互作用分析模型及地震响应分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(5): 102—109.
YE Shuai-hua, ZHU Yan-peng, WANG Deng-qun, et al. Seismic interaction analysis model and seismic response analysis of frame-prestressed anchor-soil system[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2014, 47(5): 102—109.