

顺层边坡组合式支挡结构加速度响应 数值分析及振动台试验*

杨果林¹, 申权^{1,2}, 易岳林¹, 邱明明¹

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075;

2. 湖南城市学院土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘要: 大理至瑞利(大瑞)铁路沿线存在大量的顺层岩质边坡需要支护。以大瑞铁路沿线顺层边坡组合式支挡结构(锚杆框架梁+重力式挡墙)为研究对象,以压缩汶川波作为输入地震波,对顺层边坡支挡结构动力响应进行振动台试验及数值分析,研究顺层边坡在压缩汶川波激励下支挡结构加速度响应,对比分析数值分析结果与振动台试验结果。研究表明:数值分析结果与振动台试验结果的变化规律基本一致,证明振动台模型试验结果的合理性,也证明数值分析方法的可靠性。

关键词: 顺层边坡; FLAC^{3D}数值分析; 振动台试验; 组合式支挡结构; 加速度响应

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2017)01-0028-08

Acceleration characteristics of supporting structures supported bedding slopes by numerical analysis and shaking table experiment

YANG Goulin¹, SHEN Quan^{1,2}, YI Yuelin¹, QIU Mingming¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: Based on support structure project of the railway from Dali to Ruili, dynamic characteristics of retaining structures against bedding slopes are studied by numerical analysis and shaking table experiment. It mainly contains acceleration response on retaining structure under Wen-chuan earthquake XZ-excitation. Both of the numerical simulation and the shaking table experiment prove that the results are generally similar to each other. It is found that horizontal /vertical acceleration amplification factor is decreased with the increase of input field vibrations. The shaking table model test conforms well to the numerical simulations, validating that the results of shaking table model test are reasonable and the numerical simulation method is reliable.

Key words: bedding slopes; FLAC^{3D} numerical analysis; a shaking table test; combination retaining structures; acceleration

5.12 汶川地震造成了大量的山体崩塌、边坡滑塌,严重危害人民的生命和财产安全,严重损坏公路和铁路交通^[1-5]。在建的大瑞铁路,将穿行于青藏高原南东缘横断山脉中段和南西端的滇西高

原,沿途地形地质极其复杂,地震频发,沿线存在大量的顺层岩质边坡,往往采用组合式支挡结构对其进行治理。边坡的动力响应分析是研究边坡的破坏机理、动力稳定性的重要研究手段,因此,有必

* 收稿日期: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(51478484, 51278499, 51308551, 51678571)

作者简介: 杨果林(1963年生),男;研究方向:道路与铁道工程、岩土工程和结构工程;E-mail: guoling@mail.csu.edu.cn

通信作者: 申权(1987年生),男;研究方向:土体工程特性及数值试验;E-mail: shenquan123456@126.com

要对组合式支挡结构支护顺层边坡进行地震响应特性研究，其研究方法主要有数值分析和振动台试验。课题组以大瑞铁路顺层边坡为工程背景，采用组合支挡结构（上部锚杆框架梁 + 下部重力式挡土墙）对顺层边坡进行支护，利用振动台模型试验和数值分析软件研究此种组合式支挡结构的加速度响应特性，对比分析二者结果，所得研究成果将为该地区铁路及公路建设提供借鉴。

众多学者对边坡及其支挡结构在地震荷载作用下的动力响应规律进行研究。董金玉等^[6]根据动力模型试验的相似关系，设计制作了顺层模型边坡，并完成了大型振动台试验，试验结果表明，在坡体表面和内部竖直方向上，加速度放大系数随着坡体高程增加而增大，并且随着高程增加，加速度放大系数增大的速度加快。Lin 等^[7]在研究砂土边坡地震稳定性时，采用 FLAC 软件进行了数值分析，并与振动台试验结果进行了对比分析，研究表明：动力加速度为 $0.4 g$ 时，边坡为线性响应，动力加速度增加到 $0.5 g$ 时，边坡为非线性响应。于玉贞等^[8]为研究砂土边坡的地震响应规律，在 50 倍重力加速度条件下进行边坡的动力离心模型试验，研究表明：边坡自下而上存在地震响应放大现象。董建华等^[9]考虑土体与支护结构相互作用及其协同工作建立三维有限元模型，分析双向地震激励下框架锚杆支护边坡的动力响应，结果表明：框架锚杆支护边坡延性大、有很好的抗震性能，框架内力和土压力在地震作用下明显增大。文畅平等^[10-12]同样对高陡边坡特殊支挡结构进行大型振动台试验，研究支挡结构的动力响应规律。周洪燕^[13]利用 FLAC^{3D} 软件，采用时程分析法，分别计算边坡在地震峰值加速度，研究表明，在水平地震波单独作用下，边坡对输入地震波存在显著的垂直放大效应和水平放大效应；地震峰值加速度放大系数随高程增加逐渐增大，一般在坡顶处达到最大值；同一高程处，由坡内至坡面，加速度放大系数呈增大趋势，在坡面处存在显著的临空面放大效应。彭宁波^[14]采用 FLAC^{3D} 对一锚固顺层岩质边坡进行了数值模拟研究，通过对地震作用下锚固岩质边坡的位移、加速度进行研究，研究表明：不同地震作用下，同一边坡的动力响应不同，岩层界面是动力响应特征的分界面，边坡的结构特征是边坡动力响应特性的主导因素，锚杆对岩质边坡的锚固作用主要是改善了边坡的结构特征。

叶海林等^[15]采用振动台进行预应力锚索支护岩质边坡模型试验，研究结果表明：随着输入地震

波峰值的增大，锚索预应力损失呈先增大后减小的趋势，达到临界值后，不再发生预应力损失。叶海林等^[16]通过监测桩后土压力、边坡坡面加速度和位移响应，研究抗滑桩在地震作用下边坡抗震机制和地震作用桩后土压力分布形式和抗滑桩的抗震性能。叶海林等^[17]采用大型振动台模型试验，输入幅值逐级增大的地震波，得到边坡动力破坏特征：上部拉裂缝和下部剪切滑移面形成贯通的破裂面，采用 FLAC 动力差分软件模拟模型边坡振动台试验过程，证实拉裂缝与剪切滑移面贯通是边坡动力破坏的必要条件，位移和加速度响应突变可以作为边坡动力破坏的判据。黄润秋等^[18]通过大型振动台试验，研究反倾和顺层两类结构岩体边坡在强震条件下的地震动力响应，结果表明：强震条件下，斜坡对水平地震动力的响应要远超过垂直地震动力，前者所导致的加速度响应峰值（PGA）放大系数是后者的 2~3 倍。在水平地震动力作用下，斜坡的地震动响应具有显著的高程效应和结构效应。许强等^[19]以输入加速度峰值 $0.3 g$ 为例，分析不同岩性组合模型斜坡在单向天然地震波作用下的同向加速度动力响应规律，研究表明，加速度沿竖直和水平方向的响应都呈现明显的非线性特征；总体上，高程对地震波具有明显的放大效应。

1 振动台试验

根据振动台负载能力，工作频率范围，以几何尺寸、密度和加速度作为本模型试验的控制量，模型与原型尺寸的相似比为 1:8，顺层边坡模型尺寸、模型试验及加速度元器件布置如图 1 所示。顺层边坡振动台模型基座采用现浇 C25 号混凝土模拟基质岩层，基座上面依次安放厚度为 10 cm 的 5 号砂浆块，2 cm 厚两面打磨的花岗岩片，在基座与砂浆块之间、砂浆块与花岗岩片之间分别铺设厚度为 1 cm 的粘性土层，用来模拟不同材料之间的接触关系。基座为便于安放挡墙，预留了 150 cm × 43 cm × 15 cm（长 × 宽 × 高）凹槽，重力式挡墙周围空隙部分以碎石土填充并夯实。振动台试验填料的填筑均按最佳含水量以及 90% 压实度控制。

振动台试验将地震波加速度峰值调整为铁路规范地震烈度 7~10 度所对应的 0.1、0.2、0.4 和 0.6 g 。振动台试验采用汶川波（双向代号 WC_XZ，单向代号 WC_X 等）作为输入地震波，幅值分别调整为 7~10 度抗震设防，输入地震波按时间压缩比 2.83 进行压缩。压缩的汶川波加速度时程曲线和傅氏谱分别如图 2、图 3 所示，边坡试验工况如表 1 所示。

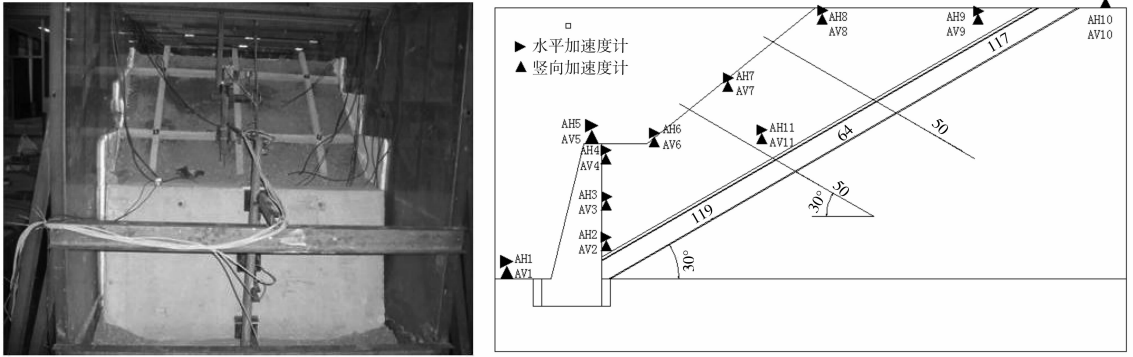


图 1 顺层边坡模型及加速度计布置

Fig. 1 The model size and location of accelerometer in bedding rock slope

表 1 试验工况

Table 1 Test conditions

序号	工况代号	加速度幅值/ g			时间压缩比
		x	y	z	
1	WC_XZ-1 (30)	0.1	/	0.067	2.83
2	WC_XZ-2 (30)	0.2	/	0.133	2.83
3	WC_XZ-3 (30)	0.4	/	0.267	2.83
4	WC_X-4 (30)	0.6			2.83
5	WC_Z-4 (30)			0.4	2.83
6	WC_XZ-4 (30)	0.6	/	0.4	2.83
7	WC_XZ-4 (20)	0.6	/	0.4	2.83
8	WC_XZ-4 (40)	0.6	/	0.4	2.83

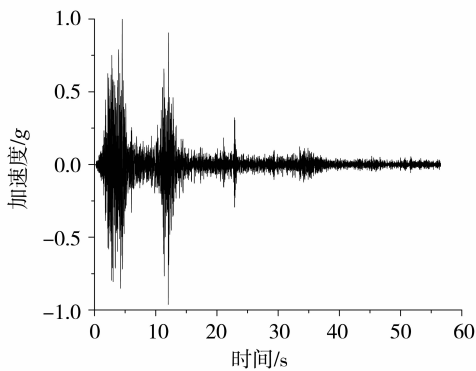


图 2 压缩汶川波加速度时程曲线

Fig. 2 The time-history curve of compressed wen-chuan wave

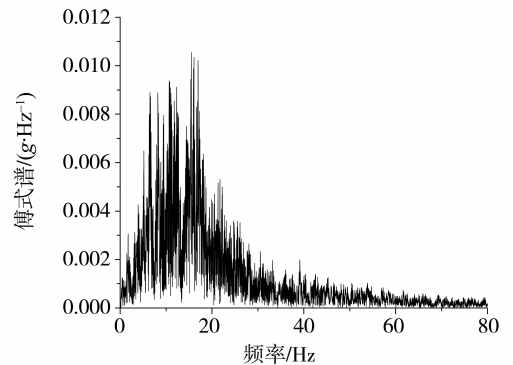


图 3 压缩汶川波加速度傅氏谱

Fig. 3 The fourier spectra of compressed wen-chuan wave

2 数值模型分析

采用有限差分软件 FLAC3D 进行数值分析, 顺层边坡数值模型与振台试验模型尺寸一致, 它包含: 基座, 顺层岩体, 挡墙和填土, 锚杆框架梁。在基座与顺层岩体、顺层岩体与填土、填土与挡墙、顺层岩体与挡墙、基座与挡墙之间分别设立接触面, 顺层边坡试验的网格、接触面及支护结构分

布分别见图 4, 各部分参数见表 2 和表 3。本次数值分析采用振动台试验中的压缩汶川波, 考虑压缩汶川波持时过长, 时程曲线如图 2 所示, 在数值计算中截取压缩汶川波能量集中的前 15 s 进行输入。本次数值分析设置局部阻尼, 并考虑 5% 的临界阻尼比。FLAC3D 数值分析计算监测点布置与振动台试验一致, 对监测点的水平加速度、垂直加速度等动态参量进行了监测。

表 2 顺层边坡数值模拟参数
Table 2 The parameters of bedding slope model

名称	本构模型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	K/Pa	G/Pa	c/Pa	$\phi/(\text{°})$	备注
基座	elastic	2 500	2.67×10^{10}	1.67×10^{10}			C25 混凝土
顺层岩体	elastic	2 000	2.67×10^9	1.67×10^9			5 号砂浆
挡墙(重力式)	elastic	2 400	1.67×10^{10}	1.20×10^{10}			C25 混凝土
填土	m - c	1 700	1.20×10^7	1.00×10^7	10	35	碎石土

表 3 模型接触面参数
Table 3 The parameters of contact surface in model

名称	c/Pa	$\phi/(\text{°})$	$k_s/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	$k_n/(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	备注
Interface1	10	15	1.5×10^9	1.5×10^9	基座—顺层岩体
Interface2	10	40	1.5×10^8	1.5×10^8	顺层岩体—填土
Interface3	5	20	1.5×10^8	1.5×10^8	填土—挡墙
Interface4	5	20	1.5×10^8	1.5×10^8	顺层岩体—挡墙
Interface5	5	10	1.5×10^{10}	1.5×10^{10}	基座—挡墙

3 振动台试验结果

图 5、图 6 分别为重力式挡墙、框架梁水平向加速度放大系数振动台试验结果；图 7 为框架梁竖向加速度放大系数振动台试验结果。图中，AH -2、AH -3、AH -4 分别表示为 2、3、4 号测点（分别距离台面 46、77、108 mm 处测点，见图 1）的水平加速度，AV -2、AV -3、AV -4 分别表示为 2、3、4 号测点的垂直加速度，各测点位置见图 1。

由图 5 可知，在压缩汶川波 XZ 双向激振下，输入加速度峰值在 0.1 ~ 0.2 g 时，加速度放大系数随着输入地震动的增大而变化较大；输入加速度峰值在 0.2 ~ 0.6 g 时，加速度放大系数随着输入地震动的增大而变化较小；重力式挡墙的水平向加速度放大系数沿墙高度的增大而增大。

由图 6 可知，在压缩汶川波 XZ 双向激振下，随着监测点高度的增加，锚杆框架梁水平向加速度放大系数逐渐增大；输入加速度峰值在 0.2 ~ 0.6 g 时，水平向加速度放大系数随着输入加速度峰值的增大而减小，由此说明，在一定范围内，地震动越大，锚杆框架梁锚固的顺层边坡的能耗越大，抗震性能越好，其原因可能在于锚杆拉力作用。综合图 5 和图 6 可知，顺层边坡自下而上存在地震响应放大现象。

由图 7 可知，在压缩汶川波 XZ 双向激振下，锚杆框架梁竖向加速度放大系数随着监测点高度的增加而逐渐增大。输入加速度峰值在 0.1 ~ 0.6 g 时，锚杆框架梁竖向放大系数随着输入加速度峰

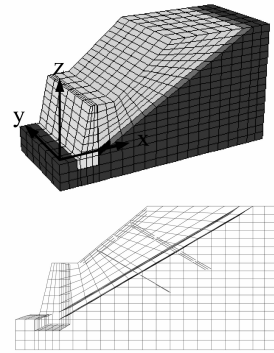


图 4 顺层边坡网格、接触面及支护结构软件模拟图
Fig. 4 bedding slope software simulation

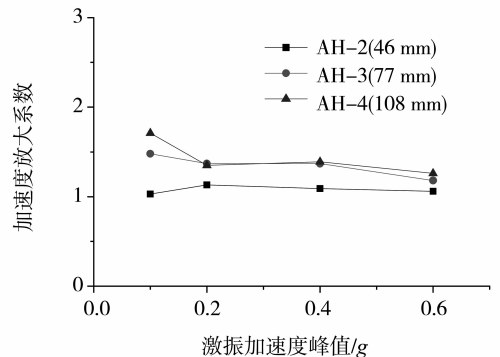


图 5 重力式挡墙水平向加速度放大系数
Fig. 5 Horizontal acceleration amplification coefficient of gravity retaining wall

值的增大而呈非线性减小的趋势，减小的速率先快后缓。

为对比压缩汶川波在 X 单向、Z 单向作用下支

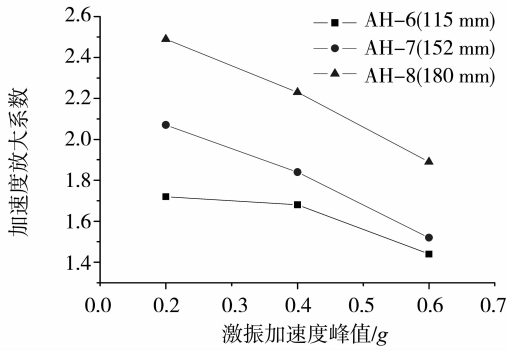


图 6 框架梁水平向加速度放大系数

Fig. 6 Horizontal acceleration amplification coefficient of framed girder

挡结构水平加速度放大系数的特点, 此处以 30° 顺层岩质边坡, 输入 $0.6 g$ X 向汶川波、 $0.4 g$ Z 向汶川波为例比较。图 8 为不同激振方向下重力式挡墙水平向加速度水平放大系数振动台试验结果, 图中, 2、3、4 代表重力式挡墙监测点的位置。由图 8 可知, 在 Z 方向地震波激振下, 也产生 X 方向的加速度; 挡墙水平向加速度放大系数两端大中间小, 呈折线分布; X 单向地震波激振与 Z 单向地震波激振下, 重力式挡墙水平向加速度放大系数差别不大, 原因在于输入地震动越大, 加速度放大系数越小, Z 单向地震动加速度峰值为 $0.4 g$, 而 X 单向地震动加速度峰值为 $0.6 g$ 。

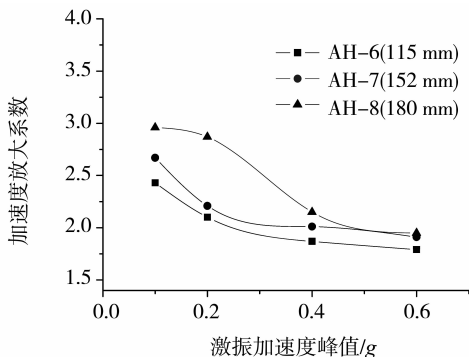


图 7 框架梁竖向加速度放大系数

Fig. 7 vertical acceleration amplification coefficient of framed girder

图 9 为不同激振方向下框架梁水平向加速度放大系数振动台试验结果, 图中, 6、7、8 代表框架梁上监测点的位置 (见图 1)。由图 9 可知, 不同方向荷载激振下, 框架梁加速度水平放大系数数值分析结果与振动台试验结果亦接近。在 Z 向地震波激振下, 也将产生 X 方向的加速度; 挡墙水平向加速度放大系数两端大中间小, 呈折线分布。

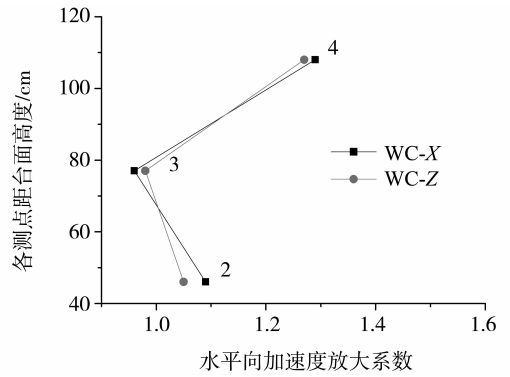


图 8 不同激振方向下挡墙水平加速度放大系数

Fig. 8 Horizontal acceleration amplification coefficient of gravity retaining wall under different direction excitation

为分析不同倾角的支挡结构顺层边坡抗震性能, 采用 3 种不同倾角的顺层边坡进行试验研究, 分别为 20° 、 30° 、 40° , 输入 $0.6 g$ 双向 (XZ) 汶川波。图 10 为不同倾角顺层边坡重力式挡墙水平向加速度放大系数结果。由图 10 可知, 在压缩汶川波 XZ 双向激振下, 重力式挡墙水平向加速度放大系数随着墙高而增大, 在墙顶处最大。挡墙水平加速度放大系数随着顺层边坡的倾角增大而增大。

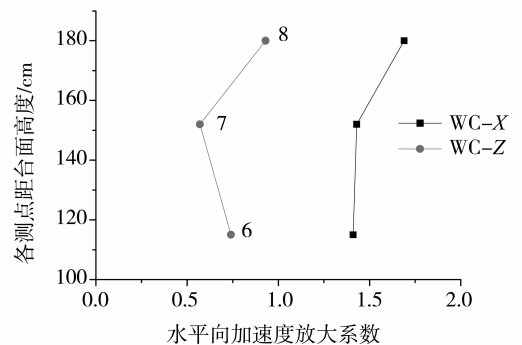


图 9 不同激振方向下框架梁加速度放大系数

Fig. 9 Horizontal acceleration amplification coefficient of framed girder under different direction excitation

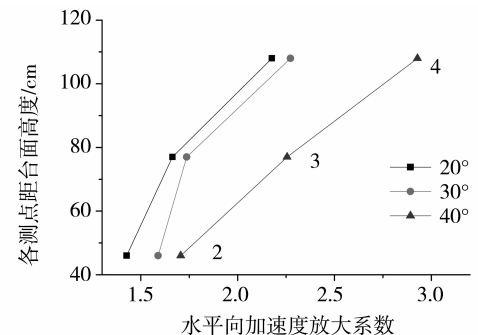


图 10 三种倾角下挡墙水平向加速度放大系数

Fig. 10 Horizontal acceleration amplification coefficient of gravity retaining wall under three degrees slope

4 数值分析结果

图 11、图 12 分别为重力式挡墙、框架梁水平向加速度放大系数数值分析结果；图 13 为框架梁竖直向加速度放大系数数值分析结果。

由图 11 可知，由于监测点 2 位于墙脚，离台面高度 (46 mm) 较小，所以其加速度放大系数随地震动峰值加速度的变化不大；对于监测点 3 (墙腰)、和监测点 4 (墙顶)，在压缩汶川波 XZ 双向激振下，其加速度放大系数随着输入地震动的增大而减少；重力式挡墙的水平向加速度放大系数沿墙高度的增大而增大。对比图 11 和图 5 可知，振动台试验结果与数值分析结果的变化规律基本一致，振动台模型试验与数值分析得到了较好的相互验证，证明振动台模型试验结果的合理性，也证明数值分析方法的可靠性。然而，数值分析结果比振动台试验结果偏大。原因在于，其一，数值分析中土体是一种连续材料，而实际土体是散体材料；其二，振动台试验测试受很多因素的影响，如土的含水率，压实度等，而数值分析条件比较理想；其三，数值分析输入阻尼比为 5%，其取值比实际值偏小。

由图 12 可知，在压缩汶川波 XZ 双向激振下，输入地震动峰值加速度在 0.2 ~ 0.6 g 时，水平向加速度放大系数随着输入峰值加速度的增大而减小，坡脚 (AH-6) 减少的速度先快后慢，坡腰 (AH-7) 和坡顶 (AH-8) 减少的速度较快。对比图 11 和图 12 可知，监测点 4 和监测点 6 所处的位置相近，变化规律一致。输入地震动峰值加速度在 0.2 ~ 0.4 g 时，随着监测点高度的增加，锚杆框架梁水平向加速度放大系数逐渐增大。对比图 12 和图 6 可知，振动台试验结果与数值分析结果的变化规律基本一致。

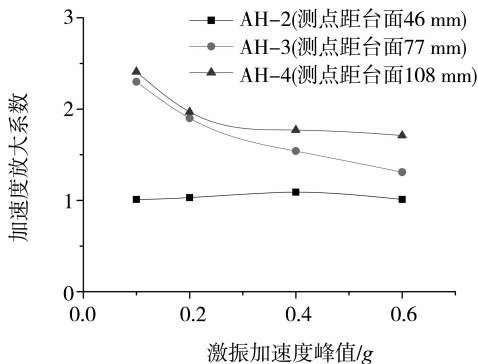


图 11 重力式挡墙水平向加速度放大系数

Fig. 11 Horizontal acceleration amplification coefficient of gravity retaining wall

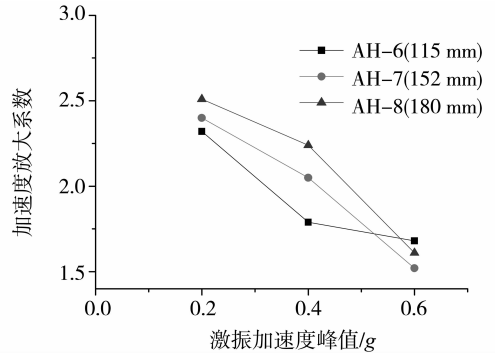


图 12 框架梁水平向加速度放大系数

Fig. 12 Horizontal acceleration amplification coefficient of framed girder

由图 13 可知，在压缩汶川波 XZ 双向激振下，输入地震动峰值加速度在 0.1 ~ 0.6 g 时，锚杆框架梁竖直向放大系数随着输入加速度峰值的增大而呈非线性减小的趋势，减小的速率先快后缓。对比图 13 和图 7 可知，振动台试验结果与数值分析结果的变化规律基本一致。

图 14、图 15 分别为不同激振方向下重力式挡墙、框架梁水平向加速度放大系数数值结果。由图 14 可知，在 Z 单向激振下，挡墙也产生 X 方向的加速度；挡墙水平向加速度放大系数两端大中间小，呈折线分布。对比图 8 和图 14 可知，不同激振方向下，框架梁加速度水平放大系数数值分析结果与振动台试验结果变化规律一致。

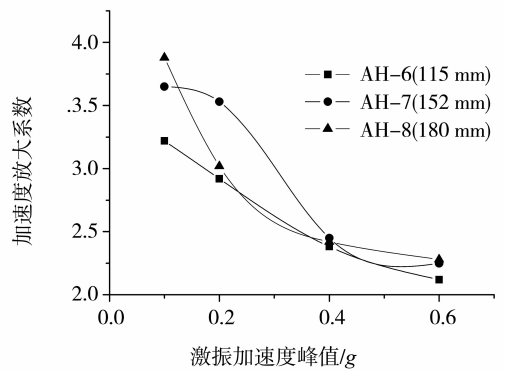


图 13 框架梁竖直向加速度放大系数

Fig. 13 vertical acceleration amplification coefficient of framed girder

由图 15 可知，在竖 (Z) 向地震波激振下，也将产生水平 (X) 方向的加速度；挡墙水平向加速度放大系数两端大中间小，呈折线分布。对比图 14 和图 15 可知，输入 0.4 g Z 向汶川波荷载作用下，框架梁水平加速度放大系数比其他两种波的值相差较

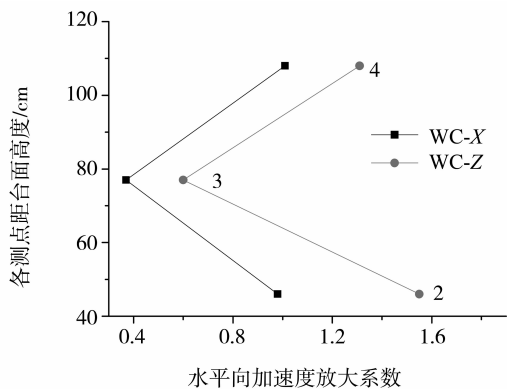


图 14 不同激振方向下挡墙水平加速度放大系数

Fig. 14 Horizontal acceleration amplification coefficient of gravity retaining wall under different direction excitation

大,比重力式挡墙的区别更明显。原因在于框架梁挡墙位于顺层坡上,与水平向呈一定夹角,而重力式挡墙是直立式,其次,重力式挡墙比框架梁挡墙体积大、重量大,因此,Z 方向荷载对框架梁影响较大。

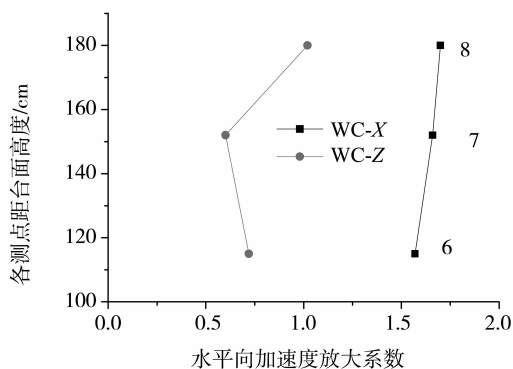


图 15 不同激振方向下框架梁加速度放大系数

Fig. 15 Horizontal acceleration amplification coefficient of framed girder under different direction excitation

图 16 为不同倾角顺层边坡重力式挡墙水平向加速度放大系数数值结果。由图 16 可知,挡墙水平加速度放大系数随着顺层边坡的倾角增大而增大。对比图 10 和图 16 可知,在压缩汶川波 XZ 双向激振下,重力式挡墙加速度水平向放大系数数值分析结果和振动台试验结果变化趋势一致,数值分析的值略大于振动台试验值。

5 结论

以大瑞铁道沿线顺层边坡为研究对象,采用振动台模型试验对复合支挡结构顺层边坡的加速度动力响应进行研究,通过输入汶川地震波,研究了重力式挡墙+框架梁支挡顺层边坡的在地震荷载作用

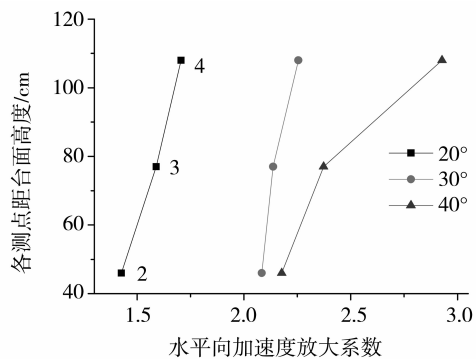


图 16 三种倾角下挡墙水平向加速度放大系数

Fig. 16 Horizontal acceleration amplification coefficient of gravity retaining wall under three degrees slope

下的加速度响应规律,并与数值分析结果进行对比,得出以下结论:

1) 数值分析结果与振动台试验结果的变化规律基本一致,振动台模型试验与数值分析得到了较好的相互验证,证明振动台模型试验结果的合理性,也证明数值分析方法的可靠性。

2) 在压缩汶川波 XZ 双向激振下,重力式挡墙水平向加速度放大系数随着输入地震波的增大而减少;水平向加速度放大系数沿墙高度的增大而增大,顺层边坡自下而上存在地震响应放大现象。

3) 锚杆框架梁竖直向放大系数随着输入加速度峰值的增大而呈非线性减小的趋势,减小的速率先快后缓。

4) 在 X 向、Z 向压缩汶川波作用下,重力式挡墙和框架梁加速度水平放大系数两端大中间小,呈折线分布。在 Z 向地震波激振下,也产生 X 方向的加速度。

5) 重力式挡墙水平加速度放大系数随着顺层边坡倾角增大而增大。

参考文献:

- [1] SHEN L L, XU C, LIU L Y. Interaction among controlling factors for landslides triggered by the 2008 Wenchuan, China Mw 7.9 earthquake[J]. Front Earth Sci-Pr, 2016, 10(2): 264-273.
- [2] CHEN X L, ZHOU B G, RAN H L, et al. Influence of rock masses properties on the slope stabilities; a study based on slope failures during the 2008 wenchuan earthquake [C]// Engineering Geology for Society and Territory, Vol 2: Landslide Processes, 2015: 1219-1223.
- [3] HOU T S, WANG X G, PAMUKCU S. Geological characteristics and stability evaluation of Wanjia Middle School slope in Wenchuan earthquake area[J]. Geotech-

- nical and Geological Engineering, 2016, 34(1): 237 – 249.
- [4] XIAO S G, FENG W K. Numerical analysis method for dynamic stability of a high and steep rock slope in the Sichuan Wenchuan earthquake [J]. Adv Mater Res-Switz, 2011, 261/262/263: 1182 – 1190.
- [5] LI Y F, WANG Z Y, SHI W J, et al. Slope debris flows in the Wenchuan earthquake area [J]. J Mt Sci-Engl, 2010, 7(3): 226 – 233.
- [6] 董金玉, 杨国香, 伍法权, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2977 – 2982.
- DONG Jinyu, YANG Guoxiang, WU Faquan, et al. The large-scale shaking table test study of dynamic response and failure mode of bedding rock slope under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2977 – 2982.
- [7] LIN Meeiling, WANG Kuolung. Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test [J]. Engineering Geology, 2006, 86(2/3): 118 – 133.
- [8] 于玉贞, 邓丽军, 李荣建. 砂土边坡地震动力响应离心模型试验 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 6: 789 – 792.
- YU Yuzhen, DENG Lijun, LI Rongjian. Centrifuge model test of the seismic response behavior of a sand slope [J]. Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2007, 6: 789 – 792.
- [9] 董建华, 朱彦鹏. 框架锚杆支护边坡地震响应分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2008, 2: 118 – 122.
- DONG Jianhua, ZHU Yanpeng. Analysis of response of slope supported with framed anchor to earthquake [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2008, 2: 118 – 122.
- [10] 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, 7: 1502 – 1512.
- WEN Changping, YANG Guolin. Large-scale shaking table tests study of seismic displacement mode of retaining structures under earthquake loading [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 7: 1502 – 1512.
- [11] 文畅平, 杨果林. 格构式框架护坡地震位移模式的振动台试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 10: 2076 – 2083.
- WEN Changping, YANG Guolin. Shaking table tests study seismic displacement mode of slope with anchor lattice frame structure [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 10: 2076 – 2083.
- [12] 文畅平, 江学良, 杨果林, 等. 桩板墙地震动力特性的大型振动台试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 5: 976 – 985.
- WEN Changping, JIANG Xueliang, YANG Guolin, et al. Large-scale shaking table tests study of seismic displacement mode of sheet-pile retaining wall [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 5: 976 – 985.
- [13] 周洪燕. 边坡地震响应及动力稳定性分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- ZHOU Hongyan. Seismic response and dynamic stability analysis of slopes [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [14] 彭宁波. 锚固岩质边坡地震动力响应及锚固机理研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2014.
- PENG Ningbo. seismic dynamic response and anchoring mechanism of anchorage rock slope [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [15] 叶海林, 郑颖人, 李安洪. 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, 2: 251 – 257.
- YE Hailin, ZHENG Yingren, LI Anhong. Shaking table tests on stabilizing piles of slopes under earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 2: 251 – 257.
- [16] 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(S1): 2847 – 2854.
- YE Hailin, ZHENG Yingren, LI Anhong, et al. Shaking table test study of prestressed anchor cable of slope under earthquake [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012(S1): 2847 – 2854.
- [17] 叶海林, 郑颖人, 杜修力, 等. 边坡动力破坏特征的振动台模型试验与数值分析 [J]. 土木工程学报, 2012, 9: 128 – 135.
- YE Hailin, ZHENG Yingren, DU Xiuli, et al. Shaking table model test and numerical analysis on dynamic failure characteristics of slope [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 9: 128 – 135.
- [18] 黄润秋, 李果, 巨能攀. 层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 5: 865 – 875.
- HUANG Runqiu, LI Guo, JU Nengpan. Shaking table test on strong earthquake response of stratified rock slopes [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 5: 865 – 875.
- [19] 许强, 刘汉香, 邹威, 等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 12: 2420 – 2428.
- XU Qiang, LIU Hanxiang, ZOU Wei, et al. Large-scale shaking table test study of acceleration dynamic responses characteristics of slopes [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 12: 2420 – 2428.