

抗滑桩和锚杆联合支护下边坡抗震性能 振动台试验研究

赖杰^{1,5} 郑颖人^{1,2} 刘云³ 李秀地¹ 阿比尔的^{2,4}

(1. 后勤工程学院, 重庆 401311; 2. 重庆市地质灾害防治工程技术研究中心, 重庆 400041;
3. 重庆工业职业技术学院, 重庆 401120; 4. 中科院武汉岩土力学研究所, 湖北武汉 430071;
5. 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 重庆 401311)

摘要: 为研究抗滑桩和锚杆联合支护下边坡的地震响应规律及破坏过程, 开展了相应的振动台模型试验。通过输入三种不同地震波, 不断增大地震波的峰值, 得到了支挡结构的动应力分布规律及加固机理。试验表明: ① 坡体裂缝的产生对其加速度响应规律影响很大, 在裂缝产生后, 常规的响应规律将发生突变。② 在高烈度地震波作用下, 深层次的基岩也会受到一定程度的损伤破坏, 深层次的破坏可能使得对边坡失稳模式的常规设防(针对滑动面)变得失去意义。③ 在地震过程中, 由于坡体向外滑动, 同一锚杆的不同位置发挥最大抗力的时间具有先后顺序, 靠近坡面的锚杆段首先达到最大值, 依次为后面的自由段、锚固段。④ 在地震作用较小时, 桩后动土压力近似成抛物线分布, 桩前动土压力成矩形分布; 随着地震作用的增大, 靠近滑带处的桩前、桩后动土压力增长较快。试验结果为该支挡形式的抗震设计提供有益的参考。

关键词: 抗滑桩和锚杆; 地震; 振动台试验; 裂缝; 动土压力

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-431X(2015)09-0096-08

Shaking table test study on anti-slide piles and anchor bars of slope under earthquake

Lai Jie^{1,5} Zheng Yingren^{1,2} Liu Yun³ Li Xiudi¹ Abi Erdi^{2,4}

(1. Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironment Protection, Chongqing, 400041, China; 3. Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing, 401120, China; 4. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 5. Chongqing Engineering and Technology Research Center of Geological Hazard Prevention and Treatment, Chongqing 401311, China)

Abstract: In practice, to make a study on the seismic response and dynamic effects of anti-slide piles and anchor bars, shaking table test was applied. Seismic performance and dynamic stresses distribution of the retaining structure were investigated by, constantly increasing the peak values of input three different earthquake waves. The experimental results indicate that: ① Crack makes a great influence on slope dynamic response: when there are cracks, the traditional dynamic response of the slope would change significantly. ② When high intensity seismic wave is applied, bedrock would get damaged, which leads to the conventional seismic fortification useless. ③ Earthquake would lead to slope sliding, the time for reaching maximum resisting force in different locations of the same anchor bar is not the same, the section near slope surface first, followed by free-field section and anchorage zone. ④ When the input seismic load is low, the distribution of dynamic stress is parabola for soil after pile and rectangle before pile; when the input seismic load gets greater, the dynamic stress near smooth zone grows fast. The test results provide valuable references for aseismic design of this retaining form in slope engineering.

Keywords: anti-slide piles and anchor bars; earthquake; shaking table test; crack; dynamic earth pressure

E-mail: 513516059@qq.com

基金项目: 国家重点研究发展计划(973)(2011CB013600, 2011CB710603)、国家自然科学基金(51378496)和重庆自然科学基金(cstc2013jcyjys0002, cstc2012jjys0001)

作者简介: 赖杰, 博士研究生

收稿日期: 2014-05-04

引言

近年来四川地区相继发生了汶川、芦山地震, 地震造成大量的山体滑坡, 给人民的生命财产造成了重

大损失^[1]。保障边滑坡抗震安全已经成为我国社会、经济发展的迫切需求。由于锚杆(预应力锚索)和抗滑桩能够与支护坡体形成一个整体,在地震作用下变形能够协调一致,这种支挡结构具有很好的抗震性能,已经在汶川地震中得到了检验^[2]。过去对此支挡结构的抗震试验研究集中在单一的抗滑桩或锚杆^[3-9]上,两者共同作用的大型动力试验尚未见报道,主要是通过理论推导及数值模拟^[10-11]来分析动力特性,由于地震的复杂性,使得计算结果同实际具有较大差异性,锚杆和抗滑桩联合支护的受力情况、抗震性能以及边坡的破坏过程尚缺乏大型试验论证,相关研究难以满足实践的需要。

边坡动力模型试验的方法主要有 3 种:离心模型试验、爆炸模型试验及振动台模型试验。由于振动台试验能准确输入实际的地震波、较为精确地采集试验数据,在满足相似律条件下能较真实、直观地反映支护边坡的动力响应和破坏机制,尽管存在难以解决重力相似问题,但因试验规模较大,可重复性好,较准确地模拟地震作用而被广大科研人员所应用。本文首次开展了抗滑桩和锚杆联合支护下抗震性能的振动台试验,通过输入汶川、El Centrol、Taft 三种地震波,不断地增大地震波的峰值,得到了边坡的锚杆和抗滑桩的受力特点以及边坡的动力响应规律、破坏过程。试验结果为抗滑桩与锚杆的联合支挡结构工程运用提供一定的基础。

2 模型试验基本概况

2.1 试验设备基本情况

试验是在中国地震局工程力学研究所开放试验室的振动台上进行,该振动台为三向电液伺服驱动式,其基本参数为:最大负重 30t;在 Z 方向能达到的最大位移为 50mm, X、Y 方向 100mm;振动台台面尺寸为 5m × 5m;在三个方向的最大速度为 50cm/s;最大加速度大小在 Z 方向为 0.7g, X、Y 方向为 1.5g;试验时 X 向与边坡坡面的倾向一致, Z 为竖向。振动台的正常工作频率从 0.5Hz ~ 50Hz。

2.2 试验相似比的选取

在地下工程的力学模型中常采用定律分析法、量纲分析法和方程分析法这 3 种方法进行相似关系推导。本次试验采用重力相似律及量纲分析法^[12-14]进行推导,选取密度、加速度、长度作为基本控制量,其中 $S_\rho = 1$, $S_a = 1$, $S_l = 20$,其余物理量利用 π 定理导出,最终得到材料的相似比,具体见表 1。

表 1 模型主要相似常数

物理量	相似关系	相似常数
密度	S_ρ	1
长度	S_l	20
弹性模量	$S_E = S_\rho S_l$	20
应变	$S_\epsilon = 1$	1
加速度	$S_a = S_E / (S_l S_\rho)$	1
内摩擦角	$S_\phi = 1$	1
黏聚力	$S_c = S_\rho S_l$	20
时间	$S_t = S_l (S_\rho / S_E)^{1/2}$	4.472
频率	$S_f = 1 / S_t$	0.223

2.3 试验模型的设计

试验模型为高度 1.8m 的双排桩锚杆支护边坡,坡面分为两个,紧挨坡顶的坡面标为 2#,两桩之间的坡面标为 1#,2#边坡坡率为 1:1.04,1#边坡坡率为 1:1.11,如图 1 所示。2#坡面共设 5 排锚杆,锚杆端头设置在坡面上,锚杆水平、竖向间距为 0.125m,锚杆的锚固段长度为 0.3m,锚杆总长度为 0.4 ~ 0.59m。第一排桩长 0.35m,第二排桩长 0.65m,桩的截面尺寸为 0.06m × 0.08m,桩间距 0.25m。

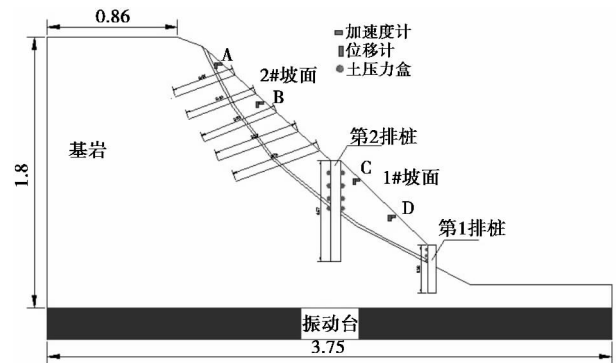


图 1 边坡模型坡面图(侧视)

Fig. 1 Schematic diagram of slope model test (side view)

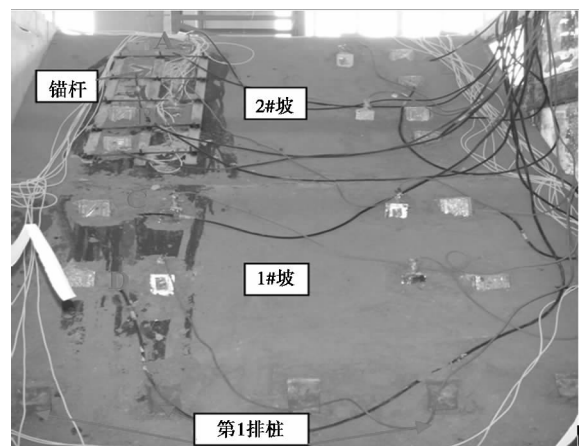


图 2 试验前边坡的最终模型(正视图)

Fig. 2 Final model of slope before experiment (Front view)

试验相似材料采用标准砂、石膏粉、滑石粉、水泥、水为基本材料,按照正交设计,通过在实验室进行相关试验来确定材料参数,最终选择配合比如表2所示。

表2 模型材料配合
Table 2 The model material mix

模型	材料配合比(%)					
	石英砂	石膏	滑石粉	水泥	水	甘油
软弱夹层	70.5	10	9.1	0	10.2	0.2
上部碎石土	70.5	11.2	7.8	0.05	10.2	0.25
基岩	70.5	12	7	0.13	10.2	0.17

在现阶段的振动台模拟试验中,模型箱主要有三种形式:层状剪切变形模型箱、圆筒型柔性容器及普通刚性箱。为减小模型箱边界对入射波的反射,削弱“模型箱效应”,本试验中采用普通刚性箱在四周边界加内衬的方式进行^[14]。通过控制相似材料相似密度,在放入模型箱后进行分层碾压,制作完成后的模型如图2所示。将制作完成的模型试样进行材料参数试验,最终相似材料的参数如表3所示。

表3 模型材料物理力学参数

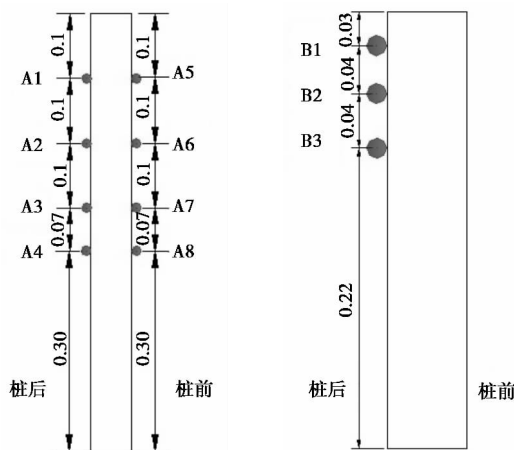
Table 3 Physical-mechanical parameters of slope model

材料	重度 ($kN \cdot m^{-3}$)	弹性 模量 (MPa)	泊松比	黏聚力 (kPa)	内摩 擦角 ($^{\circ}$)	抗拉 强度 (kPa)
基岩	23.5	53	0.25	30	39	20*
滑体	23	20	0.30	18	33	9*
软弱夹层	22	6	0.33	4	28.5	3*
桩	25	1.18E3	0.2*	弹性材料处理		
锚杆	25	2.0E3	0.2*	弹性材料处理		

注:带*为经验值。

为了研究试验中坡面的加速度及位移响应,在模型坡面上布置了4个垂直方向加速度计、4个水平方向加速度计及4个水平位移计,各监测仪器分别布设在两个坡面上,同一高度处的加速度计及位移计位于坡面的同一位置,用监测点A、B、C、D表示,如图1、图2所示。同时为进一步分析双排桩及锚杆的动力受力情况,分别在桩及锚杆上设置了土压力盒及应变片,具体布置及编号详见图3(监测点A4、A8及B3位于软弱夹层处)、图4所示。

加速度计的工作频率0.1~100Hz、量程5g。水平位移传感器分辨率为0.1mm,记录的是相对于振动台台面的相对位移。试验选择汶川、EI Centrol、Taft三种地震波作为地震响应的激励,输入峰值从0.1g开始逐



(a) 第二排桩土压力盒布置 (b) 第一排桩土压力盒布置

图3 土压力盒的布置图

Fig. 3 Layout of soil pressure cell sensors

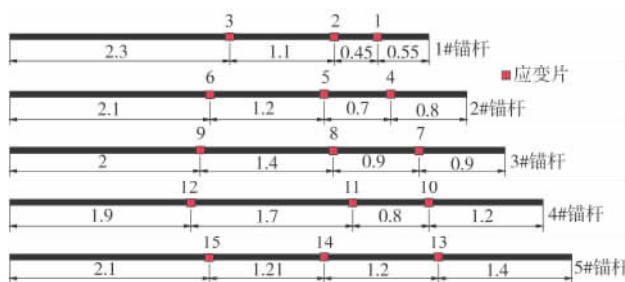


图4 锚杆应变片布置图

Fig. 4 Layout of strain foil on anchor bolt

级施加,直到1.0g,以此来探讨地震加速度峰值大小的影响。输入的双向地震波(XZ向)均取自现场监测数据,其中水平向(X向)为边坡倾向方向。由于统计资料表明地震动峰值加速度竖向与水平向比值接近2/3^[15],因此试验竖向加速度峰值按水平向峰值折减2/3后加载。将所有的地震波按照时间压缩比为 $1:\sqrt{20}$ 进行了压缩,压缩后的波形如图5所示,各工况信息如表4所示。

表4 输入地震波信息

Table 4 Information of input seismic waves

工况	地震波类型	地震波加速度峰值 (g)	工况	地震波类型	地震波加速度峰值 (g)
1	白噪声	0.05g	9	EL Centrol	0.4gXZ
2	汶川波	0.2gXZ	10	Taft	0.4gXZ
3	EL Centrol	0.2gXZ	11	汶川波	0.5gXZ
4	Taft	0.2gXZ	12	汶川波	0.6gXZ
5	汶川波	0.3gXZ	13	汶川波	0.7gXZ
6	EL Centrol	0.3gXZ	14	汶川波	0.8gXZ
7	Taft	0.3gXZ	15	汶川波	0.9gXZ
8	汶川波	0.4gXZ	16	汶川波	1.0gXZ

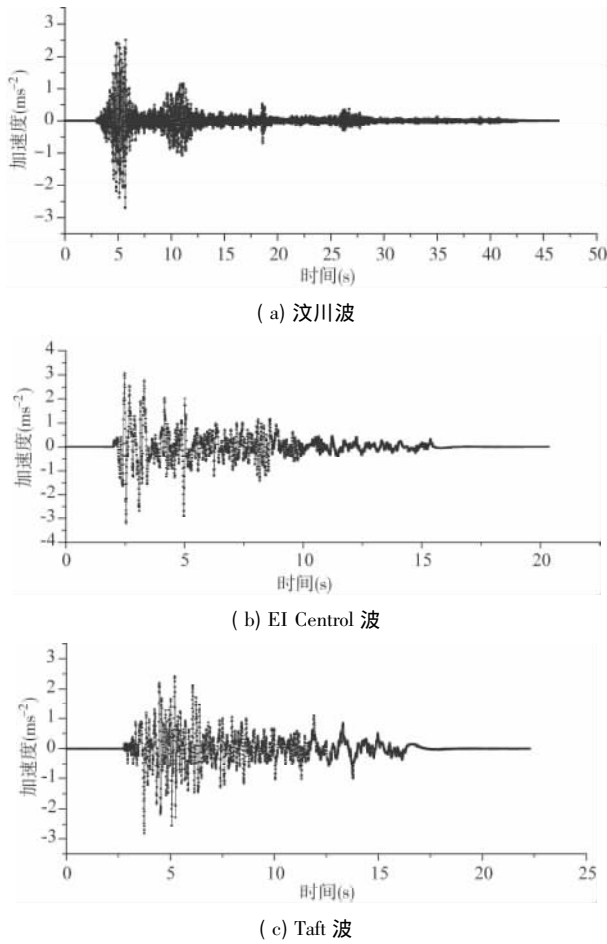


图 5 模型试验输入的水平向加速度曲线

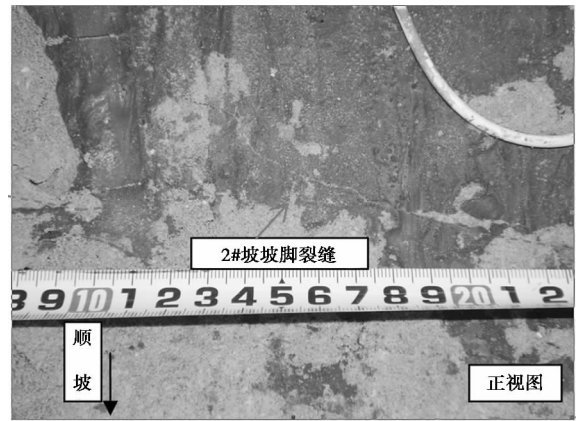
Fig. 5 Horizontal seismic acceleration-time curve

3 模型试验现象

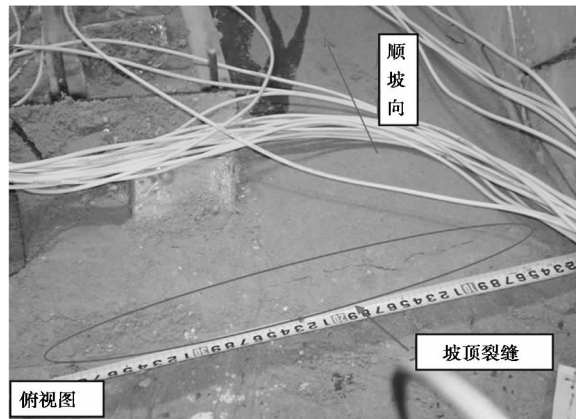
当输入地震波峰值为 0.2 ~ 0.3g 的三种地震波时,坡面的响应均不明显,没有看到任何裂缝产生。当峰值为 0.4g 汶川波时,2#坡的坡脚土体出现了一定的松动现象,但并没有产生裂缝。当峰值为 0.6g 汶川波时(见图 6(a)),在 2#坡坡脚处出现一道裂缝,长度约 30cm,宽约 2mm,但坡顶没有产生裂缝。

当输入地震波峰值为 0.9g 时,在 2#坡靠近坡顶的坡面第一次出现一道横向裂缝,裂缝较为细小,宽度约 1 ~ 2mm,滑体可能临近破坏。

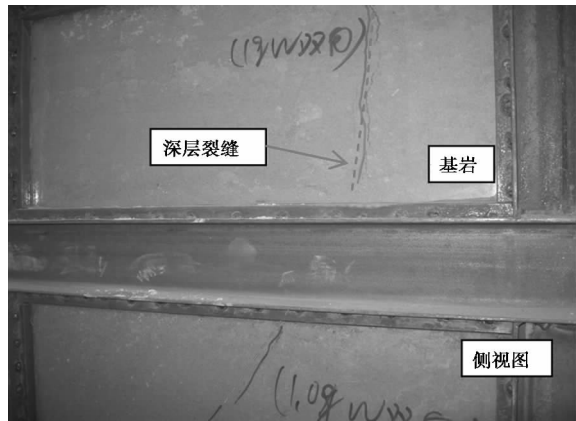
当输入地震波峰值为 1.0g 汶川波时,原有裂缝扩展明显,破裂面位置更加清晰;基岩也首次出现了宽度约 2mm 的竖向裂缝,如图 6(c) 所示。该裂缝与前面出现在滑体的浅层裂缝并不相同,此次产生的是位于基岩内部的深层裂缝。试验现象表明:在高烈度地震波作用下,深层次的基岩也会受到一定程度的损伤破坏,深层的破坏可能使得我们对边坡失稳模式的常规设防(针对滑动面)变得失去意义,这在抗震设计实践中是危险的,必须引起重视。



(a) 汶川波 0.6g



(b) 汶川波 0.9g(俯视图)



(c) 汶川波 1.0g

图 6 各工况地震后边坡破坏状态图

Fig. 6 Failure state diagrams of model after earthquake(1.0g)

以上分析呈现了锚杆和抗滑桩联合支护边坡在地震作用下完整的破坏过程:即首先在 2#坡的坡脚产生剪切裂缝,随着地震的增大,裂隙向上发展,同时靠近坡顶的坡面产生竖向裂缝,二者随着地震持续增大可能贯通,形成完整的破裂面,将地震完后各阶段产生的裂缝绘出如图 7 所示。

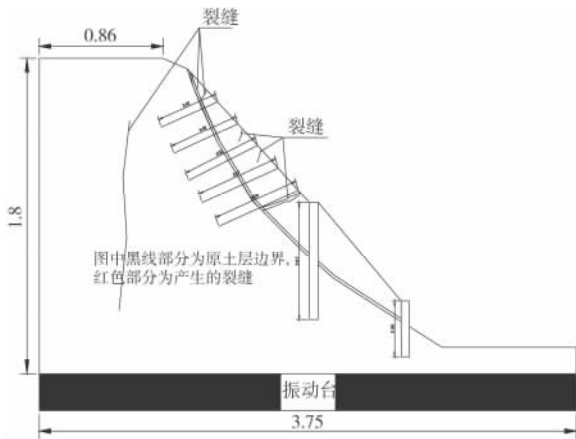
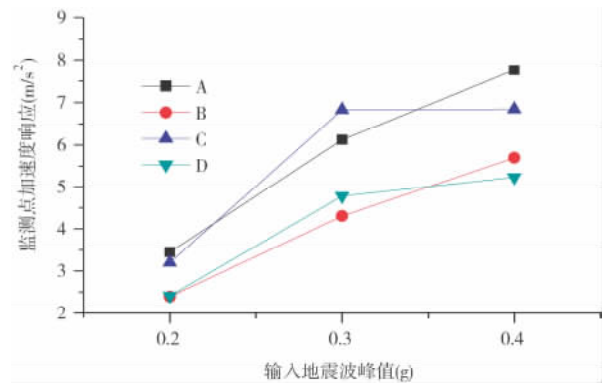


图 7 边坡动力破裂面示意图(侧视)

Fig. 7 Dynamic failure surface of slope (side view)



(c) EI 波

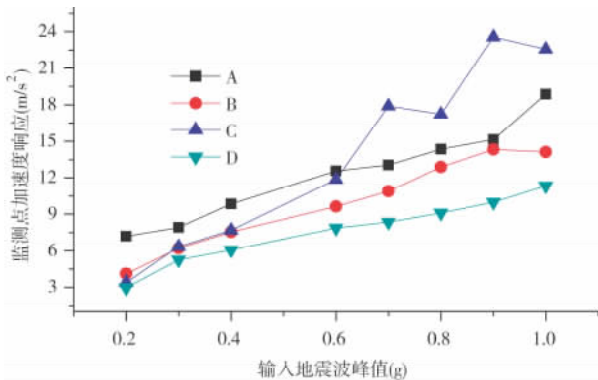
图 8 不同地震波下各监测点水平加速度峰值

Fig. 8 Peak horizontal acceleration of of key points under different seismic wave

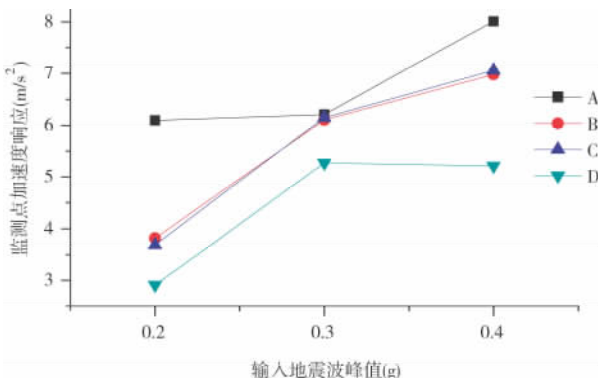
4 动力响应分析

4.1 坡面加速度响应

将不同地震波下监测点的加速度峰值进行统计,如图 8 所示。可以看出 随着地震作用的增大,监测点的加速度响应越明显,监测点在坡面上的位置越高,加速度响应越大;但在 0.7g 以后,坡面加速度响应却出现了突变,监测点 C 的加速度大小超过了监测点 A、B,并且还出现了响应加速度下降的情况。加速度响应发生突变的工况同裂缝产生的工况较为吻合,由于地震时边坡破坏是一个渐进的过程,从监测点加速度数据异常可以推断,在 0.7g 以后坡体已经进入该过程。



(a) 汶川波



(b) Taft 波

4.2 桩身动应力分布

值得指出的是:由于试验时,输入地震幅值由小到大,位移及桩身动力响应存在一定的累积效应,为避免这种效应带来的影响,本文所列图表的数值大小都为扣除上一步加载工况后的值。

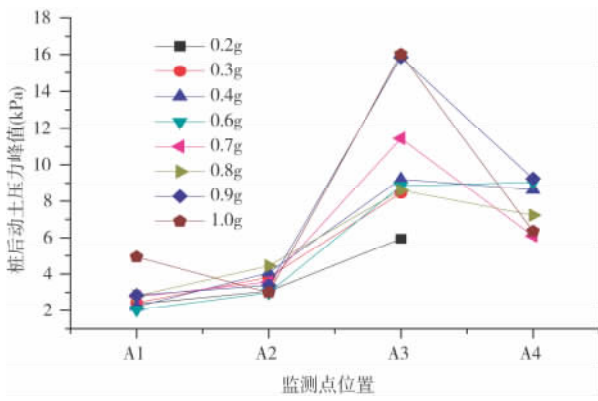
图 9 为峰值时刻不同地震波作用下桩前动土压力分布情况。可以看出,桩后动土压力随着地震作用的增大,响应也越大,其中监测点 A1、A2 的应力水平较低,最大值出现在靠近软弱夹层的测点 A3 附近,桩后动土压力近似成抛物线分布,该分布形式与文献 [4] 的试验结果较为接近。

图 10 为峰值时刻不同地震波作用下桩后动土压力分布情况,图示表明:输入加速度峰值 0.2 ~ 0.3g 时,桩前动土压力近似成矩形分布;随着地震作用的增大,靠近软弱夹层的监测点 A7、A8 的动土压力不断增大,而靠近桩顶部分的 A5、A6 变化很小,桩前抗力最大值在软弱夹层附近(监测点 A8)。

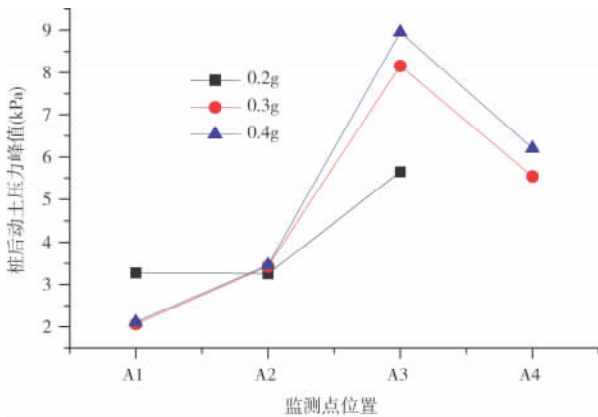
从图 9、图 10 还可以看出:不同地震波作用下,抗滑桩的动土压力响应并不相同(本试验中 Taft 波 > 汶川波 > EI Control 波),因此采用传统的拟静力法进行抗滑桩动力设计是偏于危险的,无法考虑地震波类型的影响;无论是桩前还是桩后,靠近滑带处的动土压力的水平都较高,因此在进行抗滑桩的抗震设计时该部分桩体应进行加强处理,以保证安全。

4.3 锚杆动力响应

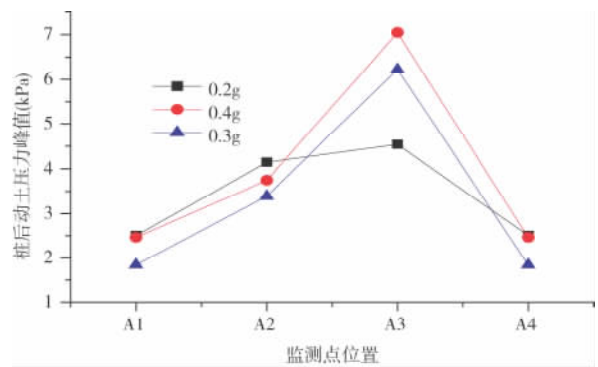
将锚杆监测点位置从坡面向内依次定为监测点 1 ~ 监测点 15(见图 4)。图 11 为输入地震波峰值 0.6g 时,坡面第一排锚杆的自由段(测点 1、测点 2)与锚固段(测点 3)的轴力时程曲线。可以看出,监测点 1 锚杆轴力峰值出现在 4.78s,监测点 2 的锚杆轴力峰值出现在 5.35s,监测点 3 的锚杆轴力峰值出现在 5.47s,



(a) 汶川波



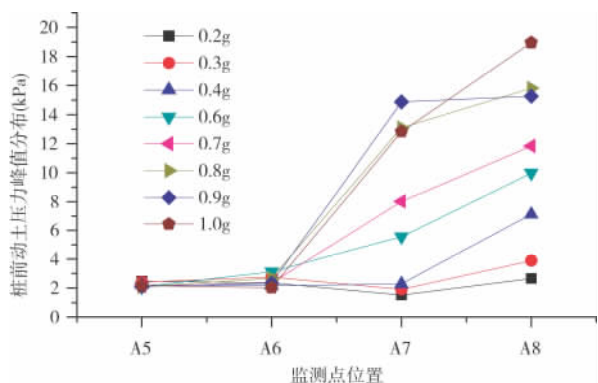
(b) Taft 波



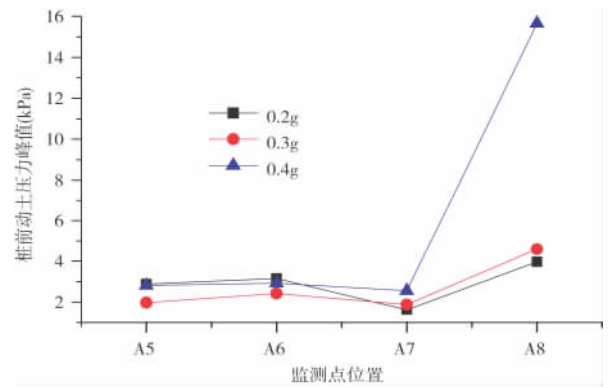
(c) EI Control 波

图 9 不同地震波下桩后动土压力分布

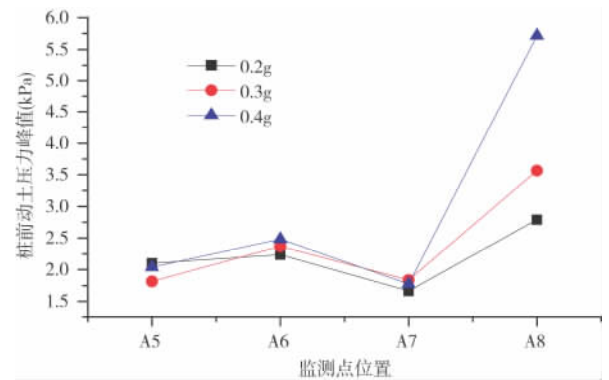
Fig. 9 Dynamic soil pressure distribution of key points after pile under different seismic wave



(a) 汶川波



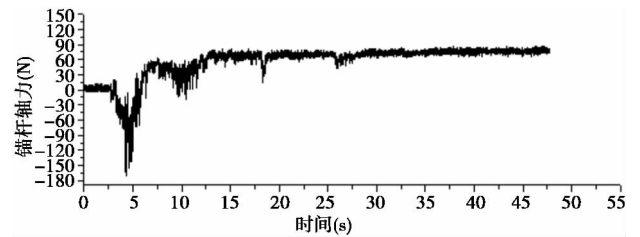
(b) Taft 波



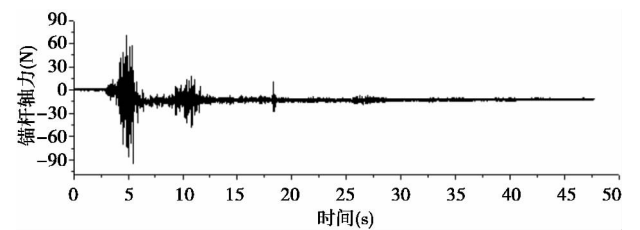
(c) EI Control 波

图 10 不同地震波下桩前动土压力分布

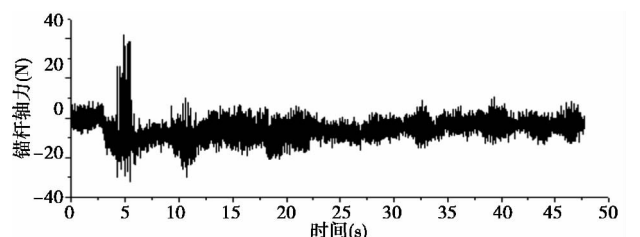
Fig. 10 Dynamic soil pressure distribution of key points before pile under different seismic wave



(a) 监测点 1



(b) 监测点 2



(c) 监测点 3

图 11 第一排桩各监测点轴力时程曲线(汶川 0.6g)

Fig. 11 Axial force-time curve for monitoring points on the first pile

表 5 各排锚杆不同位置处受力峰值统计表

Table 5 Statistical table of the peak force of anchor bolts under different location

地震波 类型	第一排监测点 位置(N)			第二排监测点 位置(N)			第三排监测点 位置(N)		第四排监测点 位置(N)		第五排监测点 位置(N)		
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7	测点 8	测点 11	测点 12	测点 13	测点 14	测点 15
Taft 0.2g	22.058	44.296	12.867	23.666	86.114	22.747	65.704	24.854	30.789	77.662	98.861	29.411	33.546
Taft 0.3g	36.304	79.401	17.462	42.048	96.224	19.301	79.55	91.449	41.588	152.747	135.105	30.789	31.249
Taft 0.4g	81.288	121.398	18.841	72.148	130.539	30.099	107.193	91.908	64.565	147.003	165.714	55.604	54.685
EI 0.2g	13.556	77.892	14.476	23.207	64.745	16.773	57.552	21.828	22.517	38.141	88.911	24.585	30.471
EI 0.3g	44.356	65.434	20.679	25.734	79.211	20.22	72.118	41.219	41.359	42.278	113.506	27.113	28.721
EI 0.4g	76.284	109.999	16.084	40.899	90.879	15.395	95.204	78.811	36.993	74.165	151.189	32.857	39.52
汶川 0.2g	23.21	18.40	14.48	35.16	29.78	33.09	10.73	59.97	24.82	36.76	89.61	25.96	19.99
汶川 0.3g	51.70	26.93	16.31	35.61	83.57	44.58	14.31	98.80	42.28	81.80	147.05	47.79	36.99
汶川 0.4g	88.00	47.42	23.21	58.36	98.20	45.04	69.14	101.79	77.20	148.43	143.92	42.05	62.73
汶川 0.6g	135.72	95.45	42.05	130.05	63.42	41.59	83.80	165.43	50.55	257.80	152.09	95.13	87.31
汶川 0.7g	133.50	115.67	58.82	153.26	55.51	64.106	138.27	248.61	68.24	204.27	166.92	136.02	89.84
汶川 0.8g	66.40	126.24	65.26	157.62	53.58	86.85	116.9	213.46	64.57	231.84	199.37	211.39	107.53
汶川 0.9g	88.46	137.22	68.70	151.65	40.26	114.43	173.2	174.86	93.06	186.80	213.90	209.32	113.51
汶川 1.0g	139.93	115.78	71.69	161.31	74.01	117.41	181.6	258.262	97.26	150.27	275.42	195.76	118.53

注:第三排的测点 9 及第四排的测点 10 已坏, EI 表示 EI Centrol 波。

其他锚杆试验数据除少数不同外也有类似的时间先后顺序。此次试验及锚杆-土体动力相互作用理论^[16]都表明:由于地震作用下坡面处土体动力响应最为敏感,位移最大,靠近坡面的锚杆段同土体相互作用,变形协调,内力首先达到最大值,随着地震的进行,坡体变形向内发展,靠后的锚杆自由段和锚固段受力也依次达到最大值。

将各排锚杆不同位置处受力峰值进行统计,如表 5 所示。可以看出,随着地震作用的增强,锚杆的受力一般越来越大,坡面不同位置锚杆、同一锚杆的不同监测点处的轴力并不相同。在三种地震波峰值加速度 0.2~0.4g 作用时,滑体尚未破坏,坡面加速度响应随着高度增加存在明显的放大效应,靠近坡顶处锚杆的动力响应更为剧烈,坡面各排锚杆轴力在坡面位置主要呈现两头大中间略小的特点,这和传统支护“强腰固脚”并不一样。在 0.6~1.0g 高烈度地震波下,由于裂缝的产生,滑体下滑趋势更加明显,第五排锚杆轴力增长迅速,此时滑体推力主要由处于坡面中下部的锚杆承担。

5 结论

本文开展抗滑桩和锚杆联合抗震性能振动台试验,主要得到了以下结论:

(1) 试验现象表明,在高烈度地震波作用下,深层次的基岩也会受到一定程度的损伤破坏,深层的破坏可能使得我们对边坡失稳模式的常规设防(针对滑动面)变得失去意义,这在抗震设计实践中是危险的,必须引起重视。

(2) 振动台试验揭示了抗滑桩和锚杆联合支护下边坡在地震作用下的破坏过程:首先在坡脚薄弱处产生剪切裂缝,随着地震的增大,裂隙向上发展,最后坡顶产生裂缝,两者贯通,形成完整的破裂面。同时,坡体裂缝的产生对其加速度响应规律影响很大,在裂缝产生后,常规的响应规律将发生突变。

(3) 桩承受的动土压力大小及分布形式受地震加速度峰值大小及桩身位置影响很大。在地震作用较小时,桩后动土压力近似成抛物线分布,桩前动土压力成矩形分布;随着地震作用的增大,靠近滑带处的桩前、桩后动土压力增长较快。

(4) 在地震过程中,由于坡体向外滑动,同一锚杆的不同位置发挥最大抗力的时间具有先后顺序,靠近坡面的锚杆段首先达到最大值,依次后面的自由段、锚固段。在较小的地震作用下,坡面各排锚杆的轴力呈现两头大中间略小的特点;当地震作用较高时,中下部锚杆轴力增长迅速,此时滑体推力主要由处于坡面中下部的锚杆承担。

参考文献

- [1] 黄润秋,李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2591(Huang Runqiu, Li Weile. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585-2591(in Chinese))
- [2] 周德培,张建经,汤涌. 汶川地震中道路边坡工程震害分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 565-576 (Zhou Depei, Zhang Jianjing, Tang Yong. Seismic damage analysis of road slopes in Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 565-576(in Chinese))
- [3] 叶海林,郑颖人,陆新,等. 边坡锚杆地震动特性的振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S1): 152-157 (Ye Hailin, Zheng Yingren, Lu Xin, et al. Shaking table test on anchor bars of slope under earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(S1): 152-157 (in Chinese))
- [4] 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 Hailin, Zheng Yingren, Li Anhong, et al. Shaking table tests on stabilizing piles of slopes under earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(2): 251-257(in Chinese))
- [5] 李荣建. 土坡中抗滑桩抗震加固机理研究[D]. 北京: 清华大学, 2008(Li Rongjian. A study on the aseismic reinforcing mechanism of stabilizing piles in soil slope [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008(in Chinese))
- [6] Satoh H, Ohbo N, Yoshizako K. Dynamic test on behavior of pile during lateral ground flow [C]// Centrifuge 98. Rotterdam: A A Balkema, 1998: 327-332
- [7] 刘昌清,李想,张玉萍. 双排桩支挡结构振动台模型试验与分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(S2): 190-195 (Liu Changqing, Li Xiang, Zhang Yuping. Shaking table test and analysis of double row pile retaining structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S2): 190-195 (in Chinese))
- [8] 杨果林,文畅平. 格构锚固边坡地震响应的振动台试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(4): 1482-1493(Yang Guolin, Wen Changping. Shaking table test study on dynamic response of slope with lattice framed anchor structure during earthquake [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(4): 1482-1493(in Chinese))
- [9] 汪鹏程,朱大勇,许强. 强震作用下加固边坡的动力响应及不同加固方式的比较研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2009, 32(10): 1501-1504 (Wang Pengcheng, Zhu Dayong, Xu Qiang. Dynamic response of slopes subjected to intense earthquakes and effect comparison between various support modes [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2009, 32(10): 1501-1504(in Chinese))
- [10] 李俊飞. 双排埋入式抗滑桩工作机理分析与研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009(Li Junfei. Study on double-row sunken anti-slide piles and their mechanism [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009(in Chinese))
- [11] 杨明. 桩土相互作用机理及抗滑加固技术[D]. 成都: 西南交通大学, 2008(Yang Ming. On mechanism of pile-soil interaction and technique of anti-sliding [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008 (in Chinese))
- [12] 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
- [13] 林皋,朱彤,林蓓. 结构动力模型试验的相似技巧[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(1): 1-8(Lin Gao, Zhu Tong, Lin Bei. Similarity technique for dynamic structural model test [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(1): 1-8(in Chinese))
- [14] 杨国香. 地震条件下岩质边坡动力破坏及动力响应规律研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2011(Yang Guoxiang. Study on failure mechanism and dynamic response rules of rock slope under earthquake [D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2011(in Chinese))
- [15] 罗永红. 地震作用下复杂斜坡响应规律研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011(Luo Yonghong. Study on complex slopes response law under earthquake action [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011 (in Chinese))
- [16] 段建. 边坡框架锚杆锚固系统力学行为及特性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014(Duan Jian. Study on mechanical behaviors and characteristics of slope anchorage system with frame supporting structure [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014(in Chinese))

赖杰(1986-) 男, 博士研究生。主要从事岩土稳定性分析和数值模拟方面的研究。

郑颖人(1933-) 男, 教授, 中国工程院院士。主要从事岩土力学、岩土工程与地下工程方面的教学与研究工作。

刘云(1988-) 女, 博士研究生。主要从事地下工程动力响应分析方面研究工作。

李秀地(1970-) 男, 博士, 副教授。主要从事岩土力学、岩土工程与地下工程方面的教学与研究工作。

阿比尔的(1988-) 男, 博士研究生。主要从事岩土稳定性分析和数值模拟方面的研究。