

地震作用下边坡抗滑桩振动台试验研究

叶海林^{1,2}, 郑颖人^{1,2}, 李安洪³, 杜修力⁴

(1. 后勤工程学院军事建筑工程系, 重庆 400041; 2. 总装备部工程设计研究院, 北京 100028;

3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 4. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 通过大型振动台试验研究地震荷载作用下边坡抗滑桩的抗震性能, 振动台试验边坡模型放在一个长 3.7 m、宽 1.5 m、高 1.8 m 的模型箱中。模型与原型边坡按照尺寸相似比 1:20 进行模型试验相似设计。经过配合比试验由标准细砂、石膏粉、滑石粉、甘油、水组成相似材料, 通过控制密度 2.5 g/cm^3 垒入模型箱中。模型振动台试验通过输入 3 种不同的地震波, 不断加大输入地震波的幅值, 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。试验研究为边坡抗滑桩抗震设计奠定了良好的基础。

关键词: 边坡工程; 抗滑桩; 地震; 振动台试验

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)02-0251-07

作者简介: 叶海林(1982-), 男, 湖北随州人, 博士研究生, 主要从事岩土稳定性分析和数值模拟方面的工作。E-mail: yeharry@163.com。

Shaking table tests on stabilizing piles of slopes under earthquakes

YE Hai-lin^{1,2}, ZHENG Ying-ren^{1,2}, LI An-hong³, DU Xiu-li⁴

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China; 2. Engineering Design and Research Institute of General Armament Department (P.R.China), Beijing 100028, China; 3. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China; 4. Architectural and Civil Engineering Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The seismic behaviors of piles retaining the slopes are studied by means of large-scale shaking table tests. The model slope is installed into a model box with a length of 3.7 m, width of 1.5 m and height of 1.8 m. The sizes of model and prototype slope are designed by using the similar principles with a scale factor of 1:20. Similar materials are made up of the standard fine sand, gypsum powder, talc powder, glycerin and water, and the specimens are reconstituted with density of 2.5 g/cm^3 . Three different kinds of seismic waves are input to study the dynamic response stabilizing piles by increasing the amplitude of input seismic waves. By monitoring the soil pressure after the piles, the acceleration and displacement response of the slope, the distribution of the soil pressure behind the piles and the seismic performance of the piles are studied. This research provides a good foundation for seismic design of stabilizing piles.

Key words: slope engineering; stabilizing pile; earthquake; shaking table model test

0 引 言

滑坡治理历来是岩土工程的热门问题, 抗滑桩作为一种效果良好的支护措施, 已在滑坡治理中得到广泛应用^[1], 但针对地震作用下抗滑桩的抗震性能研究较少。“5·12”汶川地震诱发大量的滑坡和潜在的不稳定斜坡^[2-3], 急需进行治理。地震作用下桩土动力相互作用、抗滑桩后土压力分布形式和抗滑桩支护边坡地震作用下稳定性计算方面都需要进行研究。Takahashi 等^[4]利用动力离心机试验研究了码头桩的动力特性, 于玉贞等^[5-7]采用离心机试验研究抗滑桩的动力特性; 笔者采用强度折减动力分析法计算抗滑桩支护滑坡稳

定性和支护抗震设计研究, 取得较好效果^[8-10]; 文献[11, 12]采用数值手段研究了地震作用下抗滑桩的作用机制, 文献[13]采用数值模拟分析了抗滑桩在地震作用下的动力响应。以上研究主要采用离心机试验和数值分析两种手段, 离心机试验试件尺寸较小, 试验结果容易受边界条件的影响, 且只能输入单向地震波; 数值分析结果需进一步的试验验证。大型振动台试验, 试样尺寸较大, 可输入多向地震波, 相对离心模型试

基金项目: 科技部 973 项目 (2011CB710603); 重庆市自然科学基金项目 (2010BC8002)

收稿日期: 2011-01-20

验, 振动台试验得到的结果更为合理。因此, 本文采用大型振动台试验研究抗滑桩支护边坡的抗震性能和作用机制, 为抗滑桩抗震设计的研究奠定良好基础。

1 振动台模型试验概况

采用振动台试验模拟一高度为 30 m 的岩质高切坡, 下部岩体为碳质千枚岩, 岩体重度 24.5 kN/m³、黏聚力 0.5 MPa、内摩擦角 35°、压缩模量 2 GPa, 上部为卵石土, 岩体重度 21 kN/m³、黏聚力 0.01 MPa、内摩擦角 30°、压缩模量 0.1 GPa。坡面 2 级放坡, 放坡比率 1:1.25, 均设锚杆框架梁护坡, 框架梁采用 C30 钢筋混凝土现场立模浇筑, 节点间距 3.0 m, 锚杆设置在框架梁的节点上, 与坡面垂直施作。每阶均设 5 排边坡, 锚杆长 8 m, 锚筋为 1 根直径 25 mm HRB335 钢筋。坡脚采用抗滑桩支挡, 桩截面 1.5 m×2.25 m, 桩间距 5 m, 桩长 15 m。为研究抗滑桩的动力特性, 结合模型箱的尺寸, 将原型与模型尺寸相似比为定为 20:1, 缩尺后的模型示意图见图 1。

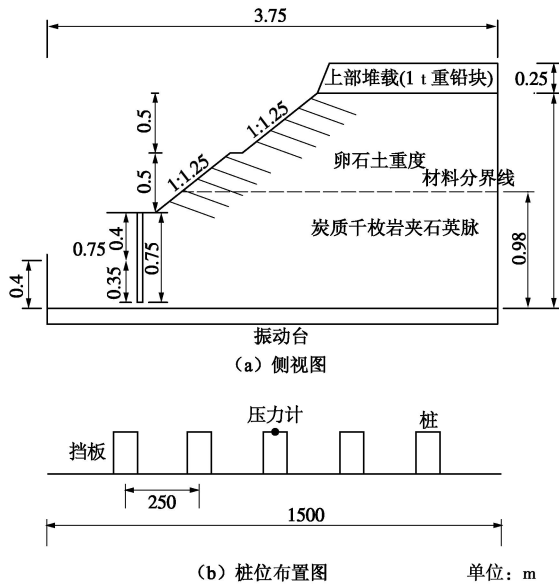


图 1 抗滑桩振动台试验模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a slope reinforced by piles

动力相似关系按照重力相似推导^[14-15], 该相似律可以满足模型强震条件下破坏特性研究所要求的相似性, 可能对于模型坡面位移响应并不能与原型坡面位移响应保持严格的相似性, 但不影响本论文研究主要目的——抗滑桩的抗震性能。相似关系: 密度, 1; 力, 20³; 模量, 20; 长度, 20; 应变, 1; 加速度, 1; 速度, 20^{1/2}; 时间, 20^{1/2}; 频率, 20^{-1/2}; 应力, 20。基本准则为 $\rho_p = \rho_m$, $a_p = a_m$, $L_p / L_m = 20$, 推导过程如下:

(1) 力

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{m_p a_p}{m_m a_m} = \frac{\rho_p L_p a_p}{\rho_p L_m a_m} = 20^3 \quad (1)$$

(2) 应力

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_m} = \frac{F_p / A_p}{F_m / A_m} = 20^3 \frac{L_m^2}{L_p^2} = 20 \quad (2)$$

(3) 弹模

$$\frac{E_p}{E_m} = \frac{\sigma_p \varepsilon_p}{\sigma_m \varepsilon_m} = 20 \quad (3)$$

(4) 持时

$$\frac{T_p}{T_m} = \frac{L_p / V_{sp}}{L_m / V_{sm}} = \frac{L_p \sqrt{G_m / \rho_m}}{L_m \sqrt{G_p / \rho_p}} = \sqrt{20} \quad (4)$$

式(1)~(4)中, a 为加速度, ρ 为密度, L 为长度, 下标 p 表示该参数是原型的参数, 下标 m 表示该参数是模型的参数, F 为力, m 为质量, σ 为法向应力, A 为面积, E 为弹模, ε 为应变, T 为持时, L 为长度, V_s 为剪切速度, G 为剪切模量。

相似材料采用标准砂、石膏粉、滑石粉、甘油、水为基本材料, 按照正交设计, 在试验室进行直剪试验进行参数试验, 最后选择配合比 0.7:0.1:0.06:0.03:0.11 模拟下部炭质千枚岩, 0.8:0.02:0.05:0.1:0.03 模拟上部卵石土。桩采用塑料板黏结而成, 长 0.75 m, 宽 0.1 m, 高 0.11 m。将桩两端支撑, 中间加集中载测其相应的位移的方法, 反算得到模型桩的弹模为 1.17 GPa。锚筋采用直径 6 mm 钢筋模拟, 锚杆长度 0.4 m, 间距 0.15 m, 水平间距 0.25 m。锚杆采用水泥浆现场浇注而成, 框架采用木质框架模拟, 与锚杆连接。在模型箱的前后两端贴上厚的软垫以消除模型箱端部对模型的影响, 在模型箱的侧壁上贴上塑料布, 并在塑料布上刷上凡士林, 以消除模型箱侧壁与模型的摩擦的影响。岩体相似材料通过控制相似密度 2.5 g/cm³, 垒入模型箱, 制作完成后模型如图 2 所示, 模型总重量 118 kN。制作完成的模型取样进行材料参数直剪试验, 得到实际相似材料的参数见表 1。

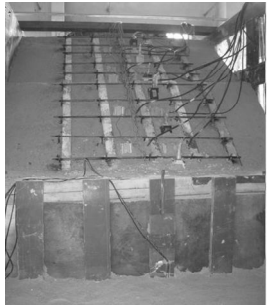


图 2 制作完毕的模型

Fig. 2 Model slope before experiment

试验选择 3 条有代表性的地震波作为地震激励, 它们分别是 WENCHUAN WOLONG(N)波、EL

CENTROL 波和 TAFT 波。每条地震波的加速度峰值与持时根据相似关系按照试验要求进行调整, 调整后的地震波如图 3 所示。振动台试验时每条地震波均是先水平向输入, 后水平垂直双向输入, 其中垂直向加速度峰值取水平向加速度峰值 2/3。为了考虑峰值大小对桩和边坡动力响应的影响, EL CENTROL 波和 Taft 波峰值分别取 0.1g, 0.2g, 0.4g, 为了考虑边坡破坏状态下桩的动力响应, WOLONG (WENCHUAN NE) 波分别取 0.1g, 0.2g, 0.4g, 0.6g, 0.8g, 1.0g。输入地震波信息如表 2 所示。

表 1 模型材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of model slope

材料	重度 /(kN·m ⁻³)	弹性模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /kPa
卵石土	25	36	0.35 [*]	10	27	1 [*]
千枚岩	25	96	0.25 [*]	47	32	10 [*]
桩	25	1.17×10 ³	0.20 [*]	弹性材料处理		
锚杆	25	1.00×10 ³	0.20 [*]	弹性材料处理		

注: 带*为经验值。

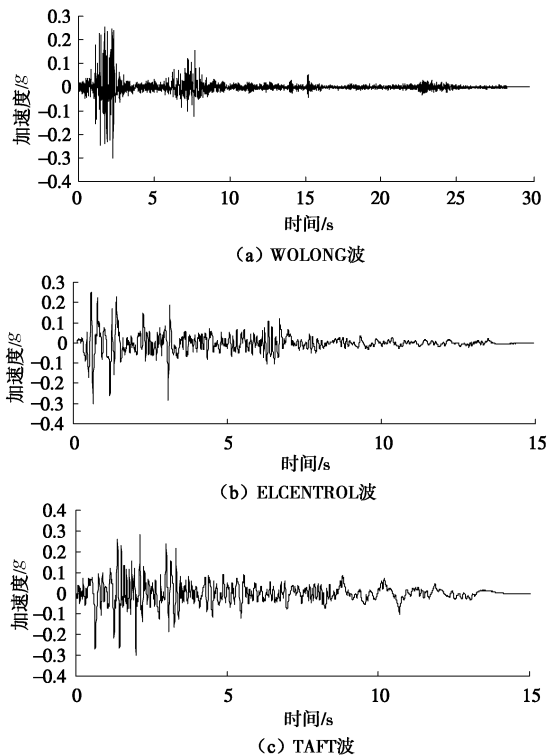


图 3 模型试验输入的压缩后的水平向加速度曲线
Fig. 3 Input horizontal seismic acceleration-time curves

表 2 输入地震波信息

Table 2 Information of input seismic waves

地震波	峰值加速度/g	持时/s
WOLONG(NE)	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0	28.4
EL CENTROL	0.1, 0.2, 0.4	13.8
TAFT	0.1, 0.2, 0.4	14.3

试验在边坡坡面上设置加速度、位移监测点, 见图 4, 在中间一根桩前后设置土压力监测点, 见图 5,

中间一列锚杆的锚筋上贴应变片测锚筋的应变, 每个锚筋上贴 2 个, 间隔 0.2 m, 应变测点布置见图 6。

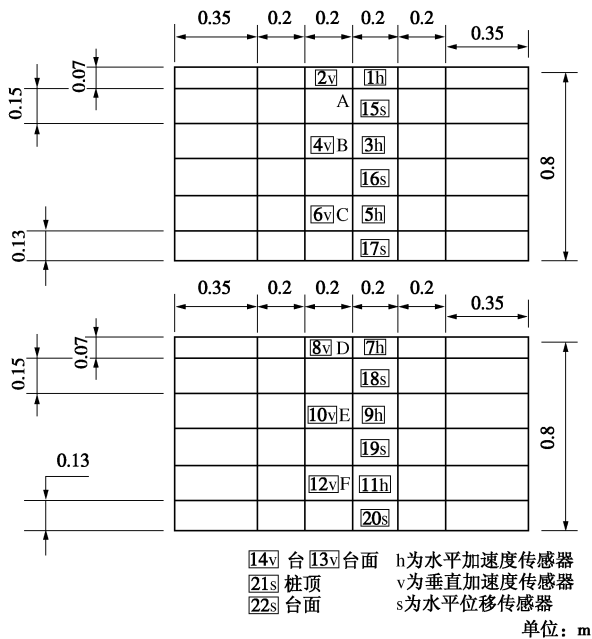


图 4 加速度和位移传感器布置图

Fig. 4 Layout of acceleration and displacement sensors

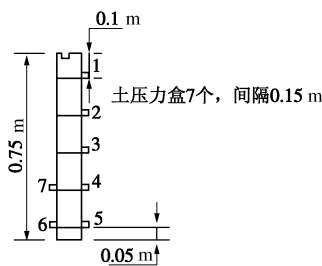


图 5 土压力盒布置图

Fig. 5 Layout of earth pressure cells

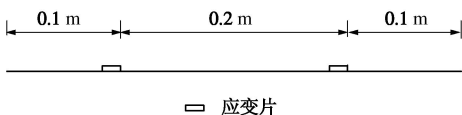


图 6 应变片布置图

Fig. 6 Layout of strain gauges

2 振动台模型试验结果分析

按照表 2 中所示输入地震波信息, 按照振幅从小到大的顺序, 逐级输入图 3 所示的 3 种地震波。在输入地震波作用下, 抗滑桩结合坡面锚杆的支护边坡模型无明显破坏迹象, 输入最后一个工况后 (1g WOLONG 波), 桩的变形图如图 7 所示, 桩稍有倾斜, 但不影响边坡整体稳定性。下面将从桩后土压力、桩顶位移、坡面加速度响应、位移响应等方面的监测数据分析抗滑桩在输入地震波作用下的抗震性能。

2.1 模型抗滑桩桩后土压力分析

桩后设置了 5 个土压力监测点, 桩前设置了 2 个土压力监测点, 具体位置见图 5 所示。这里只分析地

震引起的增加的土压力，称为动土压力，不考虑静力作用下的土压力。



图 7 输入所有工况之后抗滑桩变形图

Fig. 7 Deformation pattern of pile after inputting all conditions

输入峰值 0.4g 的地震波，桩后 5 个监测点的动土压力峰值如表 3 所示。从表 3 中可以看出，桩底监测点静土压力和动土压力均较小，说明地震波作用下桩底周围土压力变化不大，桩身上部的中间监测点 2 静土压力最大，地震作用下的动压力也最大。从不同的地震波作用下可以看出，相同幅值的地震波情况下，3 种地震波引起的桩后和桩前动土压力不同，其中 WOLONG 波引起的动土压力最大，TAFT 波次之，ELCENTROL 波引起的动土压力最小，说明不同地震波作用下，抗滑桩与岩土体动力相互作用是不同的。进行抗滑桩抗震设计时候需要输入不同类型的地震波进行抗震设计。从表 3 中还可以看出单向输入的地震波引起的动土压力小于双向输入地震波情况下的动土压力，说明进行抗滑桩抗震设计应该双向输入地震波。

表 3 输入 0.4g 地震波桩后土压力

Table 3 Soil pressures after pile after inputting seismic wave of 0.4g

地震波 类型	桩后土压力/kPa				
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
静力	26.7	92.7	15.6	47.8	8.7
WOLONG 单 向	15.6	45.2	13.6	66.9	5.8
WOLONG 双 向	42.5	61.2	17.8	58.7	5.8
ELCENTROL 单向	10.5	36.8	12.8	64.1	5.7
ELCENTROL 双向	10.1	40.4	21.3	61.2	6.1
TAFT 单向	12.7	42.8	16.5	52.1	5.8
TAFT 双向	34.5	86.9	13.8	64.9	5.7

图 8 所示输入 0.4g 双向 WOLONG 地震波桩后 5 个监测点的动土压力时程曲线，从图 8 中可以看出靠近桩底的监测点 5 动土压力变化较小，说明在 WOLONG 地震波作用下，靠近桩底的部位土压力变化不是很大。从图 8 中桩后第 1~4 个监测点的动土压力时程曲线可以看出，监测点 1 的动土压力峰值时刻 5.228 s，监测点 2 的动土压力峰值时刻 5.232 s，监测点 3 的动土压力峰值时刻 5.42 s，监测点 4 的动土压

力峰值时刻 5.652 s，而输入的 WOLONG 地震波的峰值时刻为 3.996 s，说明桩后动土压力峰值时刻晚于输入地震波的峰值时刻，桩后土体的作用由桩顶土体向外运动引起的，桩身受力由桩顶向下逐步传递。

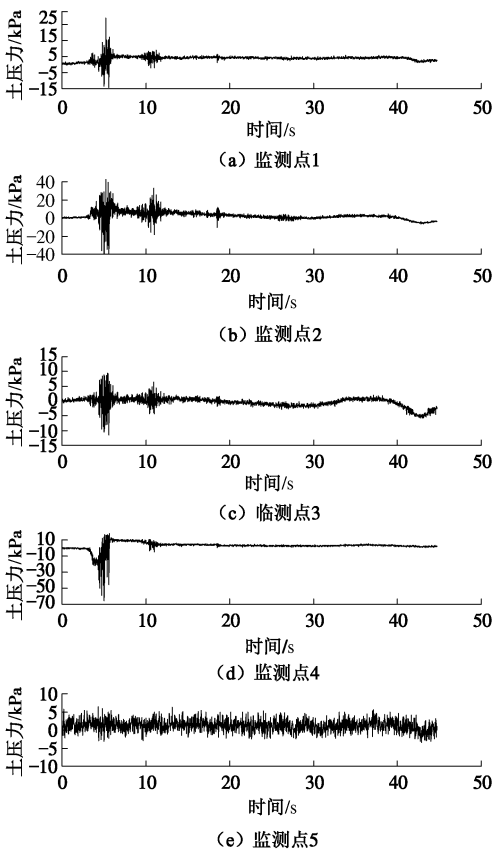


图 8 桩后监测点动土压力时程曲线（0.4g WOLONG 双向）

Fig. 8 Time history curves of dynamic soil pressure at key points after pile (0.4g WOLONG two-way)

输入 0.4g 双向 WOLONG 波、ELCENTROL 波和 TAFT 波时，桩后滑面以上 3 个监测点土压力不同时刻沿桩身的分布分别如图 9~11 所示，图中土压力为静土压力加上动土压力。图 9 为输入 WOLONG 波时不同时刻桩后土压力分布，0 s 时刻为静力条件下的土压力，此时桩后土压力分布为抛物线性，上部开口较大；5.2 s 时刻为峰值时刻的桩后土压力，此时桩顶部位土压力增加较大，桩底动土压力也稍有增加，但在桩后土压力分布仍为抛物线性，上部开口较大，但是抛物线的顶点较高；10.3 s 时刻地震波第二峰值时刻的桩后土压力，小于 5.2 s 峰值时刻的桩后土压力，桩后土压力分布形式变化不大，仍为抛物线性，上部开口大，顶点高度小于 5.2 s 时刻，大于静力下顶点高度。从图 10，11 中输入 0.4g 双向 ELCENTROL 地震波和 TAFT 地震波的桩后土压力分布中同样可以得到同样的结论，地震作用下悬臂桩桩后土压力分布为抛物线性，地震作用过程中，桩后土压力分布基本形式不变，但是抛物线顶点的高度会随地震波输入发生变化，峰

值时刻抛物线顶点高度最大。

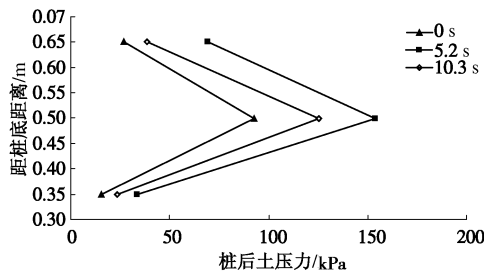


图9 桩后土压力分布形式 (0.4g 双向 WOLONG 波)

Fig. 9 Distribution form of soil pressure after pile (0.4g bidirectional WOLONG wave)

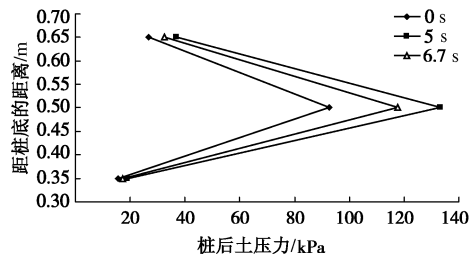


图10 桩后土压力分布形式 (0.4g 双向 ELCENTROL 波)

Fig. 10 Distribution form of soil pressure after pile (0.4g bidirectional ELCENTROL wave)

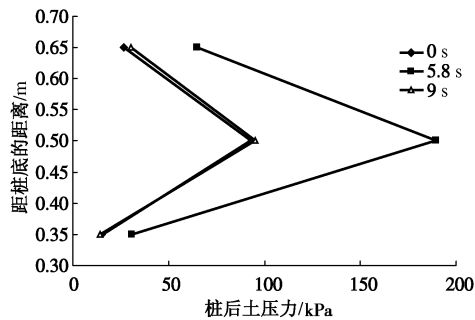


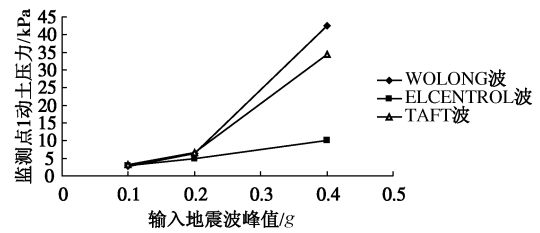
图11 桩后土压力分布形式 (0.4g 双向 TAFT 波)

Fig. 11 Distribution form of soil pressure after pile (0.4g bidirectional TAFT wave)

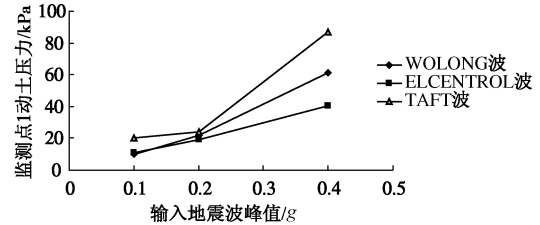
桩后动土压力随输入地震波峰值的变化曲线如图12所示,从图中可以看出,输入 WOLONG 波和 TAFT 波情况下监测点1和监测点2动土压力增加较快,输入 ELCENTROL 波监测点1和监测点2动土压力增加较慢,而输入3种地震波情况下测点3动土压力增长趋势基本一致。

2.2 模型抗滑桩桩顶相对位移的分析

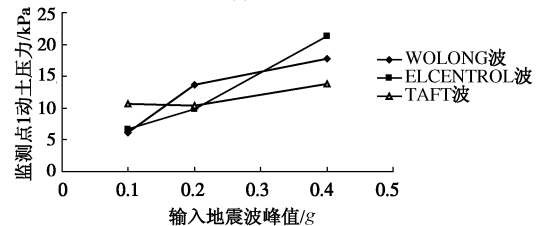
桩顶设置了一个位移传感器,测量地震作用下,桩顶相对于边坡模型底部稳定基岩的位移,所有工况结束之后桩顶的累计相对位移只有 33 mm, 0.8g 双向 WOLONG 波输入之后累计的相对位移只有 22 mm,位移量非常小,桩顶稍向外倾斜,但是在可控范围之内,最后一个工况 (1g 双向 WOLONG 波) 之后桩保持稳定,说明模型边坡设置的抗滑桩是稳定的,能够抵抗较大的地震。



(a) 监测点1



(b) 监测点2



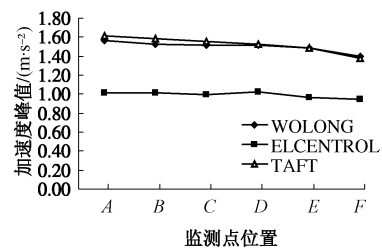
(c) 监测点3

图12 桩后动土压力随输入地震波峰值的变化曲线

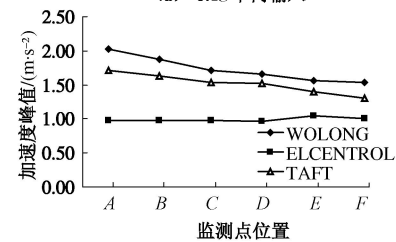
Fig. 12 Relationship of dynamic soil pressure after pile and peak of input seismic waves

2.3 模型边坡坡面加速度响应比较

模型边坡坡面共分两阶,上阶和下阶坡面分别设置了3个加速度监测点,如图4所示, A, B, C 3个监测点位于上阶坡面, D, E, F 3个监测点位于下阶坡面,坡面水平地震加速度一定程度上反映了边坡在地震作用下的动力响应。图13所示为输入地震波峰值0.1g单向和双向输入情况下各种监测点的加速度峰值,从中可以看出从边坡顶部A点到坡底F点,加



(a) 0.1g 单向输入



(b) 0.1g 单向输入

图13 不同位置监测点加速度峰值

Fig. 13 Peak accelerations at monitoring points at different positions

速度峰值呈减小趋势。边坡上阶的监测点的加速度峰值大于下阶边坡监测点的加速度峰值，位于监测点的高度越高，响应加速度峰值越大，反映了地震作用下边坡放大效应随坡高而增大的现象。

因实际输入的地震波与准备工况要求的地震幅值有一定差别，不便于互相比较，将监测点响应水平地震波的峰值与实际输入的水平地震波的峰值之比定义为水平加速度 PGA 放大系数。图 14 为输入峰值 0.1g, 0.2g, 0.4g 双向输入情况下不同地震波的水平加速度 PGA 放大系数，从图中可看出输入 ELCENTROL 波水平加速度 PGA 放大系数较小，输入 WOLONG 波和 TAFT 波情况下水平加速度 PGA 放大系数较大，说明对于本文模型抗滑桩支护对于 ELCENTROL 波支护效果好于 WOLONG 波和 TAFT 波。如图 15 所示为 WOLONG 波单向和双向输入情况下坡面监测点放大系数随地震输入幅值的变化规律，从中看到基本趋势 PGA 放大系数随输入地震波幅值的增大而减小。

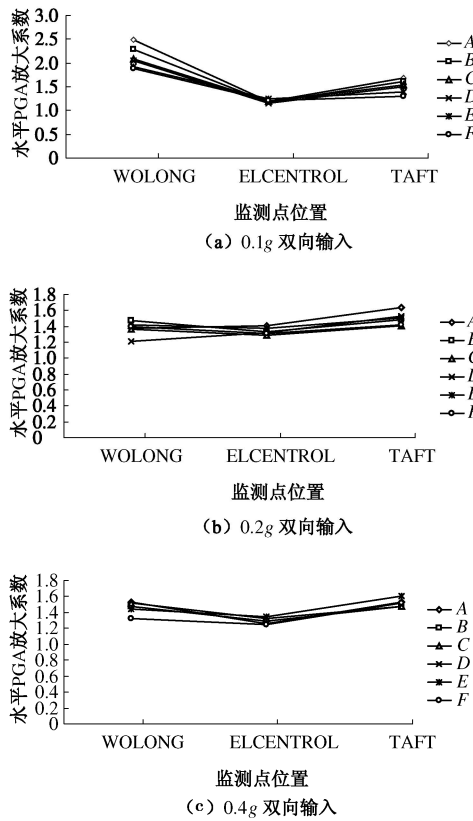


图 14 不同地震波下 PGA 放大系数

Fig. 14 Amplification factor of PGA under different seismic waves

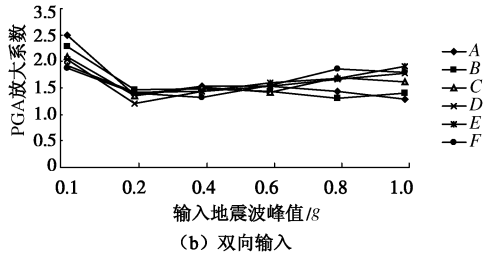
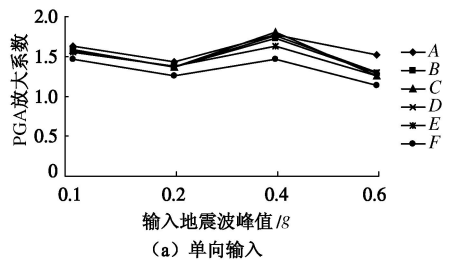


图 15 不同幅值地震波下 PGA 放大系数 (WOLONG 波)

Fig. 15 Amplification factor of PGA under different amplitudes of seismic waves (WOLONG wave)

2.4 模型边坡坡面位移响应比较

模型边坡坡面上阶和下阶分别设置了 3 个位移监测点(图 4)，A, B, C 个监测点位于上阶坡面，D, E, F 监测点位于下阶坡面，位移测量的为相对于边坡基岩的相对位移。除 D 点位移传感器发生故障外，其余监测点在输入不同的地震波情况下累计相对位移见图 16。特别说明的是，振动台试验输入地震波顺序是按照振幅有小到大，逐级输入，最后一个工况为输入 1.0g 双向 WOLONG 波。从图 16 可看出所有测点在 0.8g 双向 WOLONG 波输入之前累计的相对位移均小于 20 mm，位移量非常小，模型边坡处于稳定状态。输入最后一个工况 1g 双向 WOLONG 波，除坡顶 A 点外，其余监测点的累计相对位移最大也仅 33 mm，故除边坡坡顶局部变形较大外，模型边坡整体稳定，证明抗滑桩+坡面锚杆的框架支护方式有效，抗震效果较好。

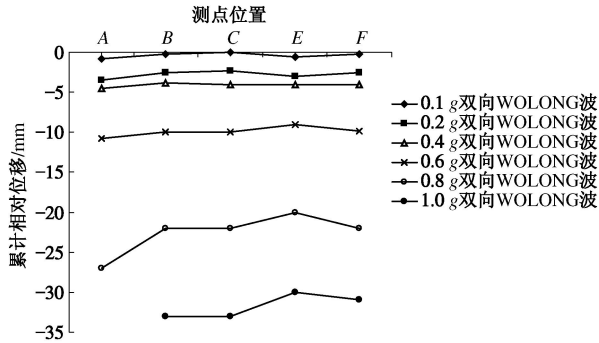


图 16 不同地震波下测点累计相对位移

Fig. 16 Relative displacements at key points under different seismic waves

3 结 论

- (1) 不同地震波作用下抗滑桩的动力响应不同，双向输入情况下桩后土压力大于单向输入情况下的，说明进行抗滑桩采用以单一的峰值为标准的拟静力进行设计是偏于危险的，采用动力有限元进行抗滑桩抗震设计应该双向输入多种不同的地震波进行计算。
- (2) 地震作用下悬臂桩的桩后土压力分布为抛物线形，上部开口较大，地震作用过程中，桩后土压力

分布基本形式不变, 但抛物线顶点高度会发生变化, 峰值时刻达到最高点。

(3) 坡面上高度越高, 边坡加速度放大效应越明显, 随输入地震波幅值的增大, 加速度放大系数反而减小。

(4) 桩顶和坡面监测点相对位移动力响应分析认为, 输入所有工况后, 桩顶和坡面累计相对位移较小, 模型边坡地震作用下保持稳定, 证明抗滑桩加坡面锚杆的支护结构的抗震性能是可靠的。

参考文献:

- [1] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先. 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (ZHENG Ying-ren, CHEN Zhu-yu, WANG Gong-xian, et al. Engineering treatment slope & landslide[M]. Beijing: China Communication Press, 2007. (Chinese))
- [2] 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 Run-qiu, LI Wei-le. 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))
- [3] 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 De-pei, ZHANG Jian-jing, 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))
- [4] TAKAHASHI A, TAKEMURA J, KAWAGUCHI Y, et al. Stability of piled pier subjected to lateral flow of soils during earthquake[J]. Centrifuge, 1998: 365 - 370.
- [5] 于玉贞, 邓丽军. 抗滑桩加固边坡地震响应离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1320 - 1323. (YU Yu-zhen. DENG Li-jun. Centrifuge modeling of seismic behavior of slopes reinforced by stabilizing pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1320 - 1323. (in Chinese))
- [6] 于玉贞, 李荣建, 柴霖, 等. 铜质模型桩加固边坡的动力离心模型试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2008(5): 41 - 46. (YU Yu-zhen, LI Rong-jian, CHAI Li, et al. Dynamic centrifuge test of slope reinforced with copper model piles[J]. Hydrogeology Geological Engineering, 2008(5): 41 - 46. (in Chinese))
- [7] 李荣建, 于玉贞, 吕禾. 饱和砂土地基上抗滑桩加固边坡的动力离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 897 - 902. (LI Rong-jian, YU Yu-zhen, LÜ He. Dynamic centrifuge modeling of piles-reinforced slope on saturated sandy foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(4): 897 - 902. (in Chinese))
- [8] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1714 - 1723. (ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qiu. Discussion and analysis on failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1714 - 1723. (in Chinese))
- [9] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 66 - 73. (ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qiu, et al. Study on the stability analysis of earthquake slope[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 66 - 73. (in Chinese))
- [10] 叶海林, 郑颖人, 黄润秋, 等. 强度折减动力分析法在滑坡抗滑桩抗震设计中的应用研究[J]. 岩土力学, 2010(增刊1): 66 - 73. (YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, HUANG Run-qiu, et al. Study of application of strength reduction dynamic analysis method to aseismic design of anti-slide piles for landslide[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010(S1): 66 - 73. (in Chinese))
- [11] 陶云辉, 周勇波, 王伟峰. 地震条件下双排抗滑桩受力分析[J]. 路基工程, 2010(2): 163 - 166. (TAO Yun-hui, ZHOU Yong-bo, WANG Wei-feng. Analysis on double anti-slide pile stress under seismic action[J]. Subgrade Engineering, 2010(2): 164 - 166. (in Chinese))
- [12] 罗渝, 何思明, 何尽川. 地震作用下抗滑桩作用机制研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(6): 26 - 29. (LUO Yu, HE Si-ming, HE Jin-chuan. Study on interaction between slope and stabilizing pile under seismic loading[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 26(4): 26 - 29. (in Chinese))
- [13] 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, 2009, 32(10): 1501 - 1504. (WANG Peng-cheng, ZHU Da-yong, XU Qiang. Dynamic response of slope subjected to intense earthquakes and effect comparison between various support modes[J]. Journal of University of Technology, 2009, 32(10): 1501 - 1504. (in Chinese))
- [14] IAI Susumu. Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1-g gravitational field[J]. Soils and Foundations, 1989, 29(1): 105 - 118.
- [15] MEYMAND Philip J. Shaking table scale model tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay[D]. Berkdy: U.C. Berkeley. 1998.