DOI：10. 12090/j. issn. 1006 – 6616. 2018. 24. 04. 051
文章编号：1006-6616（2018）04-0490-08

压力型锚杆支护滑坡的地震动力响应特性研究

李　楠[1]，汪班桥[1]，门玉明[1]，张妙芝[2]
（1. 长安大学地质工程与测绘学院，陕西 西安 710054；
2. 陕西铁路工程职业技术学院，陕西 渭南 714000）

摘　要：为研究地震作用下锚固滑坡的动力响应特征及压力型锚杆的受力机制，采用 ABAQUS 有限元软件建立了压力型锚杆联合格构梁支护的锚固滑坡模型，在此基础上，分析了锚固滑坡的加速度响应规律、地震动参数对加速度响应的影响以及压力型锚杆的受力特征等。结果表明：地震作用下锚固滑坡具有明显的高程放大效应，坡顶响应最强；不同类型的地震波作用时，由于其频谱特性的差异，锚固滑坡的加速度响应不同，锚固滑坡对输入地震波的低频段存在放大作用，对高频段具有滤波作用；随地震波幅值的增大，锚固滑坡的加速度响应呈先减小后增大的趋势。对于同一根锚杆而言，锚杆杆体轴力分布较均匀；对于同列不同排的锚杆而言，各排锚杆杆体的轴力值差异较大，自上而下呈“C”型分布，底排锚杆和顶排锚杆承担大部分荷载。研究结果对于压力型锚杆支护滑坡的抗震设计具有一定的指导意义。

关键词：地震；锚固滑坡；压力型锚杆；动力响应；数值模拟
中图分类号：P642. 22　　**文献标识码：**A

STUDY ON DYNAMIC RESPONSE OF LANDSLIDE SUPPORTED BY PRESSURE-TYPE ANCHOR UNDER EARTHQUAKE

LI Nan[1], WANG Banqiao[1], MEN Yuming[1], ZHANG Miaozhi[2]
(1. *School of Geology Engineering and Geomatics, Chang an University, Xi'an* 710054, *Shaanxi, China*;
2. *School of Shaan'xi Railway Institute, Weinan* 714000, *Shaanxi, China*)

Abstract: In order to study dynamic response of anchorage landslide and mechanical behaviors of pressure-type anchor under earthquake, the finite element software ABAQUS was adopted and an anchorage landslide model supported by pressure-type anchor and lattice beam was established. On that basis, the acceleration response law of anchorage landslide, the effect of ground motion parameters on acceleration response of the model, and the mechanical behaviors of pressure-type anchor under earthquake were researched respectively. The results indicated that anchorage landslide had elevation amplification effect from bottom to top along with the landslide, and the acceleration response in crest was the strongest. Due to the spectrum characteristics of earthquake, acceleration response is different under different seismic waves. The anchorage landslide had an amplifying effect on lower frequency band and an attenuation function on higher frequency band. With the increase of loading amplitude, the acceleration response of anchorage landslide decreased first and then increased. For the same anchor, axial force

基金项目：国家自然科学基金项目（41440021，41572261，41502277）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（310826175029，300102268209，310826171016）
作者简介：李楠（1990-），女，在读博士，主要从事滑坡治理及建筑安全研究。E-mail：linan1990111@163. com
通讯作者：汪班桥（1977-），女，博士，副教授，主要从事滑坡治理研究。E-mail：dcdgx17@chd. edu. cn
收稿日期：2018-01-09；**修回日期：**2018-03-08　　范二平编辑

distribution was nearly uniform; however, for the anchors at different elevation, axial force of anchors had a great difference, and the strain distribution of anchor body shows the "C" -type from bottom to top. The bottom anchor and the top anchor bear most of the loads. The research results could provide a reasonable foundation for the design of the pressure-type anchor under earthquake.

Key words: earthquake; anchorage landslide; pressure-type anchor; dynamic response; numerical simulation

0　引言

我国处于多山多地震的地质环境，地震的发生常诱发滑坡、崩塌等次生地质灾害，往往给人类的生命和财产造成严重威胁[1]。保障地震区特别是高烈度地区边坡（滑坡）的安全，研究地震作用下边坡（滑坡）的稳定性及支护结构的动力响应已成为我国社会、经济发展的迫切需求。锚杆作为边坡、滑坡支护工程中的一种主要方式，不仅具有施工方便、安全经济等优点，而且具有很好的抗震性能，如 2008 年汶川地震调查结果表明，锚杆支护的边坡、滑坡的整体性较好，一般仅发生局部破坏[2]。

近年来，许多学者开展了地震作用下锚固边坡（滑坡）动力响应的相关研究，研究方法主要以振动台试验[3~4]和数值模拟[5]为主。振动台试验方面，汪班桥等、郝建斌等[6~7]开展锚杆格构支护土质滑坡的小型振动台试验，研究了不同频率正弦波作用下拉力型锚杆的受力机制和锚固滑坡的加速度、位移响应等。文畅平、杨果林[8~9]设计了锚杆格构支护岩质边坡大型振动台试验，对锚固边坡在水平、竖直、水平竖直双向汶川波激振下的动态响应进行了研究。赖杰等[10]进行了抗滑桩和锚杆联合支护下边坡的抗震试验，研究了锚杆的动应力分布规律和加固机理。数值模拟方面，汪鹏程等[11]利用 FLAC3D 软件对比分析了强震作用下挡土墙、抗滑桩和预应力锚索 3 种不同支护形式下的边坡动力特性，指出三种支护方式下预应力锚索加固效果最优。叶帅华[12]利用 ADINA 研究了动力作用下地震烈度、锚杆长度和锚杆间距等参数对边坡稳定性的影响。Qi 等、Dong 等[13~14]分别利用 ANSYS 和 ADINA 模拟了地震作用下预应力锚杆边坡动力响应，分析了预应力对边坡地震性能的影响。

目前为止，锚杆支护边坡（滑坡）的地震动力特性研究已取得一定成果，但研究对象多为拉力型锚杆，而对于工程中常用的压力型锚杆很少。因此迫切需要开展压力型锚杆支护边坡（滑坡）动力响应的研究，以便于将压力型锚杆更好的应用到地震区的滑坡防治设计中。

ABAQUS 有限元软件可有效解决非线性动力分析问题，在边坡稳定性、岩土开挖及地震动力响应等诸多领域已得到广泛应用[15]。文章建立了一个压力型锚杆联合格构梁支护的土质锚固滑坡模型，利用 ABAQUS 进行了数值模拟，对地震作用下锚固滑坡的加速度响应规律、地震动参数对加速度响应的影响以及压力型锚杆的受力特征等分别进行了研究。

1　锚固滑坡动力分析模型

为研究压力型锚杆支护滑坡的地震动力响应特性，采用一个坡高为 7.0 m，长 14.0 m，宽 10.5 m，坡角为 60°的均质土质滑坡模型。滑坡的潜在滑面为圆弧状，滑坡的支护方式为压力型锚杆（见图 1）联合格构梁支护。杆体采用Φ32 mm HRB335 级钢筋，承载板厚度为 16 mm，砂浆强度为 M30，锚杆孔径为 130 mm。锚杆垂直于坡面布设，共 5 排 4 列，锚杆横向间距为 2.0 m，竖向间距为 1.5 m，如图 2。

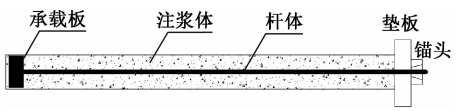

图 1　压力型锚杆结构示意图

Fig. 1　The sketch map of a pressure anchor

1.1　模型的建立及参数选取

锚固滑坡计算模型具有对称性，故数值模拟利用对称性，截取其中的一部分进行计算。

土体、锚杆杆体、承载板、格构以及砂浆均采用三维实体单元 C3D8R。格构、杆体、承载板、砂浆材料的本构模型考虑为弹性材料，遵循理想弹性本构关系。土体考虑为理想弹塑性材料，屈服准则为 Mohr-Coulomb 准则。由于外锚头和垫板起固定锚杆的作用，因此建模时，将杆体、承载

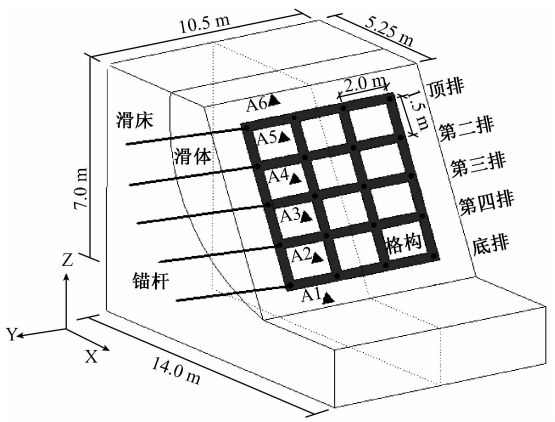

图 2 压力型锚杆联合格构梁支护滑坡

Fig. 2 The landslide supported by anchor and lattice beam structure pressure-type

板、格构视为锚杆格构整体进行建模，图 3a、3b、3c 分别为划分完网格后的锚杆格构整体、砂浆以及装配好的锚固滑坡模型。

模型的接触主要存在于杆体与砂浆、砂浆与土体、格构与土体、滑床与滑体之间，各接触面法向设定为“硬接触”，即两个物体只有在压紧状态时才能传递法向压力，且法向传递的压力大小不受限制，切向摩擦公式设定为 Coulomb 摩擦模型，用来定义接触面之间的摩擦系数，设定锚杆与砂浆之间为“无摩擦”以模拟杆体与外部砂浆的全长无粘结特性，参考文献［16］，砂浆与土体的摩擦系数取 0.4，格构与土体之间的摩擦系数取 0.1，滑面的摩擦系数取 0.28。分析时各材料阻尼采用 Rayleigh 阻尼，各材料的阻尼比取值见表 1。

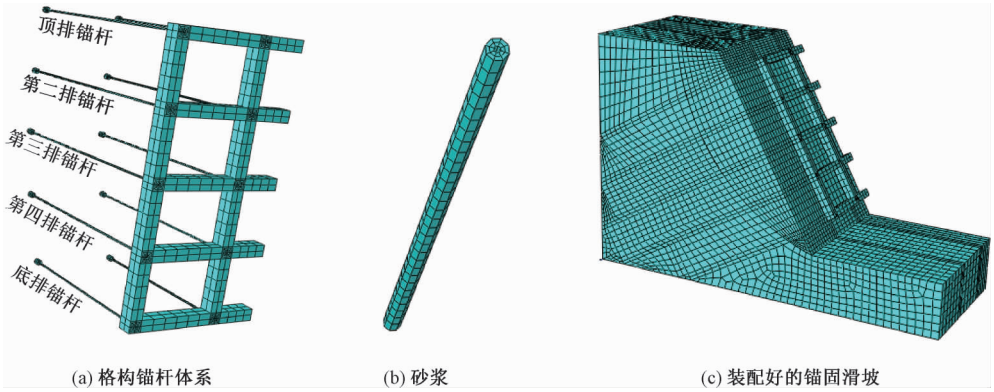

图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation model of anchorage landslide

表 1 锚固滑坡物理力学参数

Table 1 Physical mechanics parameters of anchorage landslide

材料参数	密度/(kg/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/KPa	内摩擦角/(°)	阻尼比
土体	2070	450	0.19	35.7	23.5	0.10
格构	2430	2.5×10^4	0.2	–	–	0.02
杆体	7850	2.1×10^5	0.3	–	–	0.02
砂浆	1900	1.5×10^4	0.15	–	–	0.02

1.2 边界条件设置

对于边坡、滑坡这种半无限体进行动力分析时，需要处理趋于无穷远的边界问题[14]。目前，解决动力边界条件常用的方法有黏性边界、黏弹性边界、透射边界等人工边界。粘性边界概念清楚、简单方便，但只有一阶精度，忽略了边坡（滑坡）的弹性恢复能力，且存在低频失稳问题，透射边界精度虽在二阶以内，但同样存在稳定性问题。相比而言，黏弹性人工边界可模拟边坡、地基等人工边界外半无限介质的弹性恢复性能，具有良好的稳定性和较高的精度[17]。因此本次数值模拟边界条件设置为黏弹性边界条件。

黏弹性人工边界可以等效为并联的弹簧—阻尼系统[18]。人工边界法向和切向的弹簧刚度和阻尼系数按照公式（1）和公式（2）取值。

$$K_{\mathrm{BN}} = \alpha_{\mathrm{N}} \frac{G}{R}, C_{\mathrm{BN}} = \rho c_{\mathrm{p}} \tag{1}$$

$$K_{\mathrm{BT}} = \alpha_{\mathrm{T}} \frac{G}{R}, C_{\mathrm{BT}} = \rho c_{\mathrm{s}} \tag{2}$$

式中：K_{BN}和K_{BT}分别为弹簧法向和切向刚度系数；C_{BN}和C_{BT}分别为阻尼器法向和切向的阻尼系数；R为波源至人工边界的距离，m；c_{p}和c_{s}分别为 P 波和 S 波波速，m/s；G为介质剪切模量，Pa；ρ为介质质量密度，kg/m^3；α_{N}与α_{T}分别为法向与切向粘弹性人工边界修正系数，参考文献［18］所推荐使用范围并经过数值计算分析设置α_{N}与α_{T}分别为 1.2 和 0.7。

1.3　地震荷载输入

由于水平地震对边坡稳定性影响显著，是结构破坏的主要因素，因此模型输入的地震波均为水平单向（*X* 向）。地震波输入过程中采用将地震波转化为等效节点力的方式实现。输入的地震波有 El Centro 波、汶川波、Kobe 波三种地震波，以考虑地震波类型的影响。对模型输入不同幅值的 El Centro 波，以模拟幅值的影响。对 Kobe 波进行不同的时间压缩比处理，以模拟时间压缩比的影响，具体输入工况见表 2。输入地震波加速度时程如图 4，其他输入地震波以图 4 为基础进行幅值和时间压缩比的调整。

表 2　地震荷载输入工况

Table 2　Information of input seismic waves

工况	地震波类型	幅值/（m/s^2）	时间压缩比	持时/s
E-1	El Centro 波	0.1*g*	1	30
E-2	El Centro 波	0.2*g*	1	30
E-3	El Centro 波	0.3*g*	1	30
E-4	El Centro 波	0.4*g*	1	30
E-5	El Centro 波	0.6*g*	1	30
W-1	汶川波	0.3*g*	1	45
K-1	Kobe 波	0.3*g*	1	25
K-2	Kobe 波	0.3*g*	1.78	14
K-3	Kobe 波	0.3*g*	3.16	7.9

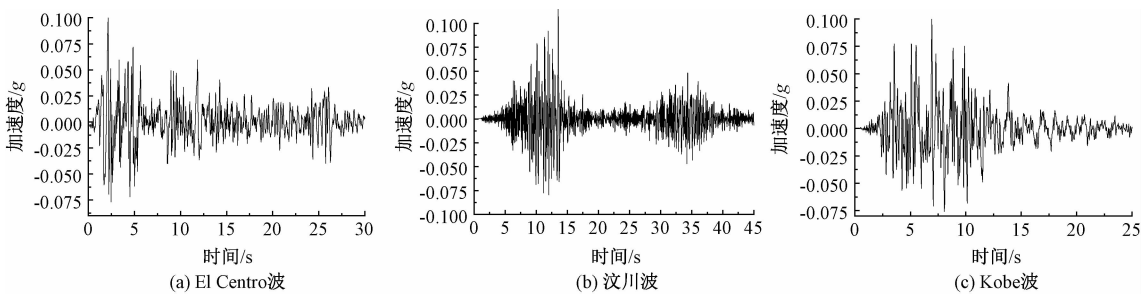

图 4　输入地震波的加速度时程

Fig. 4　Time-history of input seismic waves

2　计算结果分析

2.1　锚固滑坡的加速度响应规律

为描述地震作用下锚固滑坡加速度响应规律，定义任一测点加速度峰值（*PGA*）与输入地震波 *PGA* 值的比值为 *PGA* 放大系数。图 5 给出了幅值为 0.1*g*El Centro 波作用下，坡面 A1（坡底）、A2、A3、A4、A5、A6（坡顶）（具体位置见图 2）测点的 *PGA* 放大系数。

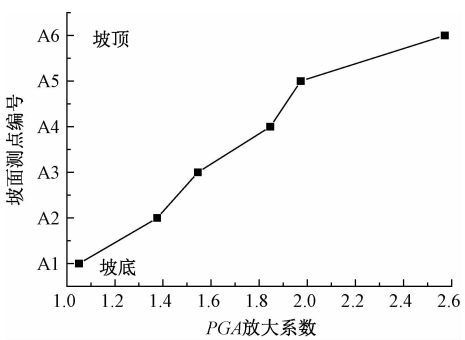

图 5　坡面测点 *PGA* 放大系数

Fig. 5　*PGA* amplification coefficient of slope surface measuring points

从图 5 可以看出，地震作用下坡面各测点 *PGA* 放大系数均大于 1，说明锚固滑坡土体对输入地震波具有放大作用。除此之外，沿坡面方向向上，锚固滑坡的 *PGA* 放大系数呈递增趋势，坡顶加速度响应最为强烈。这种加速度放大效应可从地震波频谱特性变化规律作出解释。图 6a、6b、6c 分别为坡底 A1、坡中 A3、坡顶 A6 的加速度反应傅里叶谱，从图中可以看出，坡底 A1 的加速度卓越频率在 1 ~ 4.2 Hz，坡中 A3 的加速度卓越频率在 1 ~ 3.5 Hz，坡顶 A6 的加速度卓越频率在 0.6 ~ 2.6 Hz。可见输入地震波经过模型土质传播后，其频谱特性发生了明显的变化，由于土体自身材料阻尼的存在，土体对不同频率的波段具有选择性放大作用，土体对低频段起到放大作用，对高频段起到滤波作用。锚固滑坡土体的这种特性与文献［19］素土边坡（滑坡）类似。

2.2　地震动参数对锚固滑坡动力响应的影响

影响锚固滑坡加速度响应的因素主要有地震波类型、地震波幅值、不同压缩常数等[20]，以下分别就其对锚固滑坡动力响应的影响进行分析。

2.2.1　地震波类型的影响

以 0.3*g* 工况为例进行分析，图 7 为幅值 0.3*g* 的 El Centro 波、汶川波和 Kobe 波三种地震波作用

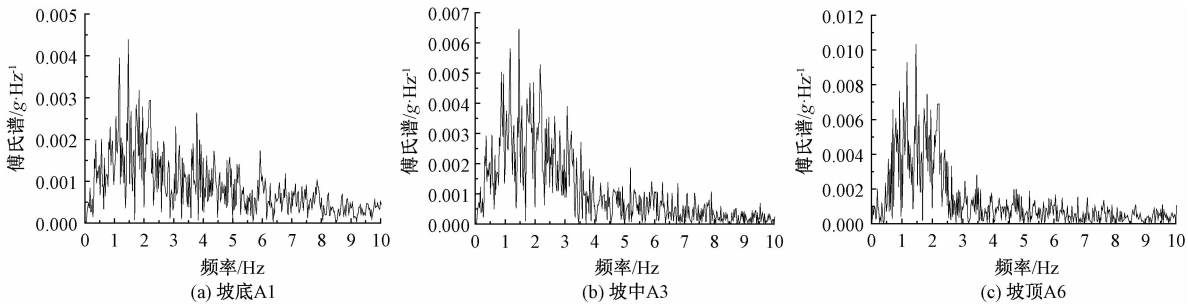

图 6 测点加速度傅里叶谱

Fig. 6 Acceleration fourier spectrums of measuring points

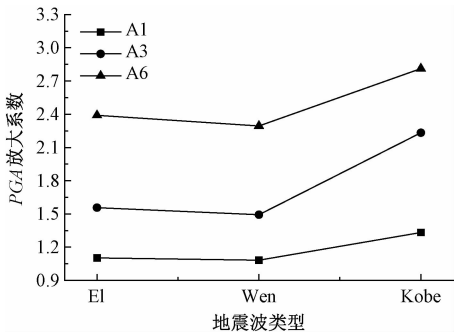

图 7 不同类型地震波作用下坡面测点 *PGA* 放大系数

Fig. 7 PGA amplification coefficient of slope surface measuring points under different seismic waves

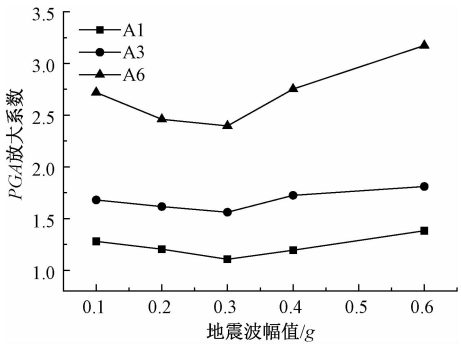

图 8 不同幅值地震波作用下边坡测点 *PGA* 放大系数

Fig. 8 PGA amplification coefficient of slope surface measuring points under different amplitudes

下坡面测点的 *PGA* 放大系数。

不同类型的地震波作用时，由于其频谱特性的差异，锚固滑坡的加速度响应不同。由图 7 可以看出，Kobe 波作用时，坡面各测点的 *PGA* 放大系数均大于 El Centro 波和汶川波，这主要是因为 Kobe 波相对于其他两种波而言卓越频率更低，低频成分更多，而滑坡模型对低频成分反应更为敏感。因此对于同一个滑坡支护设计问题，有必要输入不同类型的地震波。

2.2.2 地震波幅值的影响

地震波幅值分别为 0.1*g*、0.2*g*、0.3*g*、0.4*g*、0.6*g* El Centro 波作用时，锚固滑坡的 *PGA* 放大系数如图 8 所示。

随输入地震波幅值的增大，锚固滑坡的加速度响应表现为“先减小后增大”的变化趋势。0.1 ~0.3 *g* 幅值较小的地震波作用下锚固滑坡的 *PGA* 放大系数有所减小，这主要是由于低中强度的地震波作用时，锚杆格构支护结构的抗震性能没有完全发挥，在地震波的反复波动震荡下，模型土体的剪应变增大，整体性及模型刚度有所降低，阻尼比有所增大。0.4 ~0.6 *g* 幅值较高的地震作用时，锚杆格构支护结构的抗震抗滑性能显著增强，锚固滑坡的整体性有所提高，各层测点 *PGA* 放大系数有所增长。

2.2.3 不同时间压缩常数的影响

为探讨输入地震波不同压缩常数对锚固滑坡动力响应的影响，工况 K-1、K-2、K-3 对幅值为 0.3*g* 的 Kobe 波进行压缩，时间压缩比分别为 1、$10^{1/4}$、$10^{1/2}$，对应的卓越频率分别为 0.5 ~8 Hz、1 ~15 Hz、3 ~23 Hz。从图 9 可以看出，随着地震波频率的增加，锚固滑坡坡面测点的 *PGA* 放大系数呈下降趋势，其中输入原 El Centro 波（压缩比为 1）作用时的 *PGA* 放大系数 > 压缩比为 $10^{1/4}$ 的 El Centro 波 > 压缩比为 $10^{1/2}$ 的 El Centro 波，这主要是由于原波的卓越频率最低，土体对低频段的地震波的放大作用最为明显。而频率较高的地震波，其高频段的能量分布较多，土体对其滤波效应相应增强。

2.3 压力型锚杆的受力特性

锚杆在水平地震波作用下，杆体的轴力响应表现为拉压交替的时程曲线。受拉状态为危险状

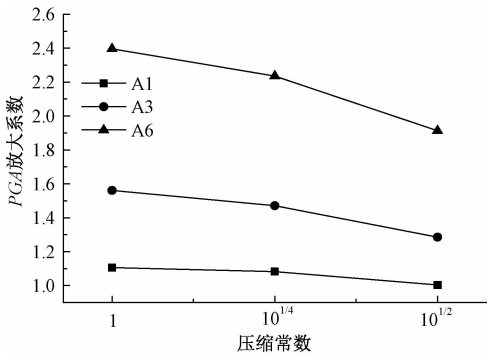

图 9　不同时间压缩常数下滑坡测点 *PGA* 放大系数

Fig. 9　PGA amplification coefficient of slope surface measuring points under earthquake in different time similitude constants

态，文中仅对锚杆受拉状态进行分析，锚杆轴力峰值均为锚杆受拉状态下的峰值。

2.3.1　单根锚杆的轴力分布

为分析地震作用下单根锚杆的受力分配情况，以第一列底排锚杆（具体位置见图 3a，锚杆杆体长 4 m）为例进行分析，在 0.1*g*、0.3*g*、0.6*g* El Centro 波作用下底排锚杆杆体的轴力分布情况如图 10 所示。

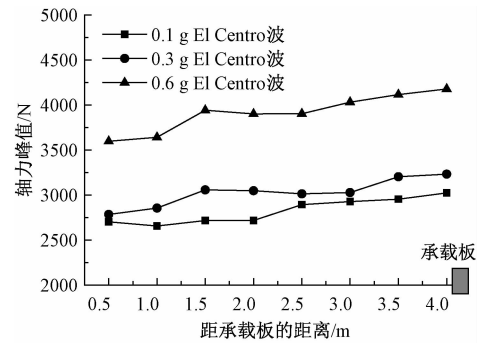

图 10　底排锚杆杆体轴力峰值

Fig. 10　Axial force peak values of the bottom anchor body

锚杆杆体不同位置处的轴力分布曲线整体上分布较均匀，靠近承载板处的轴力峰值略大于其他位置（见图 10）。而地震作用下拉力型锚杆支护滑坡时，杆体的轴力分布往往更为集中，且主要分布在滑面附近[21]。压力型锚杆轴力均匀分布的特征与其结构形式有很大关系：压力型锚杆锚固段的受力传递是由无粘结杆体、承载板以及将杆体连在承载板上的内锚组成，当地震荷载作用在锚固滑坡时，外部载荷通过锚杆杆体直接传至锚杆内端的承载板，由锚杆内端向外传递，砂浆体处于受压状态。在逐渐增大地震强度的过程中，锚固砂浆体径向膨胀与周围土体之间的摩阻力增大，杆体不同位置轴力峰值均逐渐增长。地震作用下压力型锚杆杆体的受力分布特征与静载情况类似[22]，锚杆杆体在张拉后不同测点处的截面变形差异较小，因此同一地震强度作用下杆体不同位置处的承载力分布较均匀。

2.3.2　不同排锚杆的轴力分布

为方便研究不同排锚杆的受力情况，对杆体测点轴力峰值求和取平均，作为杆体的平均轴力峰值。在 0.1*g*、0.3*g*、0.6*g* El Centro 波作用下第一列各排锚杆杆体的平均轴力峰值如图 11 所示。

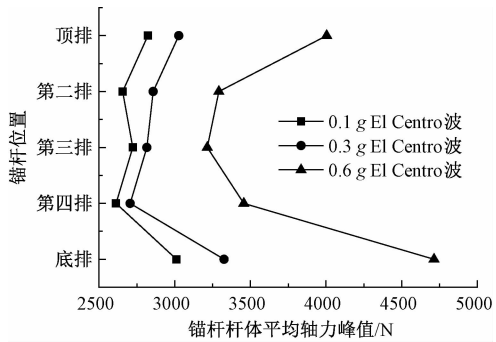

图 11　各排锚杆的平均轴力峰值

Fig. 11　Average axial force peak values of anchors at each layer

地震作用下，不同高程处锚杆的受力情况差别较大。对于同列锚杆而言，自上而下各排锚杆的平均轴力峰值呈“C”型分布，顶排锚杆和底排锚杆的轴力峰值较大，中间三排锚杆轴力峰值较小。此外，随输入地震波幅值的增大，顶排锚杆和底排锚杆发挥的作用也越来越大，地震强度较大时极易造成钢筋极限强度不足而出现拉断等现象。因此传统的拟静力法按照平均分配每排轴力进行锚杆设计是偏于危险的，建议高烈度地区进行滑坡防治压力型锚杆设计时，增大底排锚杆和顶排锚杆的安全储备，如采用预应力锚杆、增加锚杆的钢筋截面等。

3　结论

利用 ABAQUS 对地震作用下锚固滑坡的动力响应进行了数值计算，对锚固滑坡的加速度响应规律、地震动参数对加速度响应的影响、压力型锚杆的受力特征等分别进行了研究，得出如下结论：

（1）锚固滑坡的加速度响应规律表现为加速度放大效应和高程放大效应，坡顶加速度响应最为强烈。滑坡抗震设计时应特别注意坡顶的防护，

如增设防护网、种植根系发达的植物等。

（2）不同类型地震波具有不同的频谱特性，在卓越频率更低的地震波作用时，锚固滑坡的加速度响应更为强烈；随地震波幅值的增大，锚固滑坡的加速度响应表现为“先减小后增大”的变化趋势；滑坡土体对输入地震波的低频部分存在放大作用，对高频部分存在滤波作用，地震波压缩后，卓越频段增大，锚固滑坡的加速度响应有所降低。

（3）地震作用下，压力型锚杆杆体不同位置处的轴力分布较均匀，与静载情况类似。对于同列不同排的锚杆而言，自上而下各排锚杆杆体的平均轴力峰值呈“C”型分布，顶排锚杆和底排锚杆轴力峰值较大，中间三排锚杆轴力峰值较小。建议高烈度地区进行滑坡防治压力型锚杆设计时，增大顶排锚杆和底排锚杆的安全储备，如采用预应力锚杆、增加锚杆的钢筋截面等。

参考文献/References

[1] 李浩，杨为民，黄晓，等. 天水市麦积区税湾地震黄土滑坡特征及其形成机制［J］. 地质力学学报，2016，22（1）：12～24.
LI Hao，YANG Weimin，HUANG Xiao，et al. Characteristics and deformation mechanism of Shuiwan seismic loess landslide in Maiji，Tianshui［J］. Journal of Geomechanics，2016，22（1）：12～24.（in Chinese with English abstract）

[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 with English abstract）

[3] Hong Y S，Chen R H，Wu C S，et al. Shaking table tests and stability analysis of steep nailed slopes［J］. Canadian Geotechnical Journal，2005，42（5）：1264～1279.

[4] Wartman J，Seed R B，Bray J D. Shaking table modeling of seismically induced deformations in slopes［J］. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2005，131（5）：610～622.

[5] 朱宏伟，姚令侃，项琴. 锚固长度对加锚边坡地震动力特性的影响［J］. 水文地质工程地质，2012，39（3）：54～59.
ZHU Hongwei，YAO Lingkan，XIANG Qin. A study of the effect of bolt length on dynamic response of anchored slopes under earthquakes［J］. Hydrogeology & Engineering Geology，2012，39（3）：54～59.（in Chinese with English abstract）

[6] 汪班桥，郝建斌，黄毓挺，等. 滑坡防治格构梁锚杆地震动力响应分析［J］. 四川大学学报（工程科学版），2016，48（3）：48～54.
WANG Banqiao，HAO Jianbin，HUANG Yuting，et al. Dynamic response for framed anchors in landslide prevention under earthquake［J］. Journal of Sichuan University（Engineering Science Edition），2016，48（3）：48～54.（in Chinese with English abstract）

[7] 郝建斌，郭进扬，张振北，等. 地震作用下锚杆支护边坡动力响应［J］. 交通运输工程学报，2017，17（3）：46～55.
HAO Jianbin，GUO Jinyang，ZHANG Zhenbei，et al. Dynamic response of anchors-supported slope under earthquake［J］. Journal of Traffic and Transportation Engineering，2017，17（3）：46～55.（in Chinese with English abstract）

[8] 文畅平，杨果林. 格构式框架护坡地震动位移模式的振动台试验研究［J］. 岩石力学与工程学报，2011，30（10）：2076～2083.
WEN Changping，YANG Guolin. 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（10）：2076～2083.（in Chinese with English abstract）

[9] 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 with English abstract）

[10] 赖杰，郑颖人，刘云，等. 抗滑桩和锚杆联合支护下边坡抗震性能振动台试验研究［J］. 土木工程学报，2015，48（9）：96～103.
LAI Jie，ZHENG Yingren，LIU Yun，et al. Shaking table text study on anti-slide piles and anchor bars of slope under earthquake［J］. China Civil Engineering Journal，2015，48（9）：96～103.（in Chinese with English abstract）

[11] 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 with English abstract）

[12] 叶帅华. 黄土地区框架预应力锚杆支护边坡地震动反应及稳定性分析［D］. 兰州：兰州理工大学，2012.
YE Shuaihua. Dynamic response and stability analysis of slope supported by frame with pre-stressed anchors under earthquake in loess area［D］. Lanzhou：Lanzhou University of Technology，2012.（in Chinese with English abstract）

[13] Ji Q W，Xu Q，Wang T N，et al. Seismic performance analysis of fill slope with pre-stressed anchors［J］. Applied Mechanics and Materials，2013，353～356：2052～2056.

[14] Dong J H，Zhu Y P，Zhou Y，et al. Dynamic calculation model

and seismic response for frame supporting structure with prestressed anchors [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53 (7): 1957 ~ 1966.

[15] 毕忠伟，张明，金峰，等. 地震作用下边坡的动态响应规律研究 [J]. 岩土力学，2009，30 (S1)：180 ~ 183.
BI Zhongwei, ZHANG Ming, JIN Feng, et al. Dynamic response of slopes under earthquakes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (S1): 180 ~ 183. (in Chinese with English abstract)

[16] 张妙芝. 滑坡防治压力型锚固系统地震动力响应分析 [D]. 西安：长安大学，2016.
ZHANG Miaozhi. Study on the dynamic response for compression-type anchorage system under the action of earthquake in landslide prevention [D]. Xi' an: Chang' an University, 2016. (in Chinese with English abstract)

[17] 江学良，祝中林，杨慧，等. 含隧道岩石边坡在地震作用下动力响应特性研究 [J]. 自然灾害学报，2016，25 (2)：94 ~ 102.
JIANG Xueliang, ZHU Zhonglin, YANG Hui, et al. Study on dynamic response characteristics of rock slope with tunnel under earthquake [J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25 (2): 94 ~ 102. (in Chinese with English abstract)

[18] 刘晶波，谷音，杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元 [J]. 岩土工程学报，2006，28 (9)：1070 ~ 1075.
LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28 (9): 1070 ~ 1075. (in Chinese with English abstract)

[19] 徐光兴，姚令侃，李朝红，等. 边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究 [J]. 岩土工程学报，2008，30 (6)：918 ~ 923.
XU Guangxing, YAO Lingkan, LI Zhaohong, et al. Dynamic response of slopes under earthquakes and influence of ground motion parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (6): 918 ~ 923. (in Chinese with English abstract)

[20] 陈新民，沈建，魏平，等. 下蜀土边坡地震稳定性的大型振动台试验研究 (Ⅱ) ——试验结果及分析 [J]. 防灾减灾工程学报，2010，30 (6)：587 ~ 594.
CHEN Xinmin, SHEN Jian, WEI Ping, et al. Large-scale shaking table test of seismic stability of Xiashu loess slopes: Analysis of test results (Ⅱ) [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30 (6): 587 ~ 594. (in Chinese with English abstract)

[21] 郝建斌，姚婕，黄毓挺，等. 动力作用下锚杆格构支护土质边坡动态响应分析 [J]. 地球科学与环境学报，2015，37 (5)：93 ~ 100.
HAO Jianbin, YAO Jie, HUANG Yuting, et al. Analysis of dynamic response of soil slope reinforced by anchors and lattices subjected to dynamic loads [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2015, 37 (5): 93 ~ 100. (in Chinese with English abstract)

[22] 汪班桥，门玉明，郝建斌. 拉压锚杆锚固性能的对比试验分析 [J]. 长安大学学报 (自然科学版)，2013，33 (4)：68 ~ 74.
WANG Banqiao, MEN Yuming, HAO Jianbin. Experiment and analysis of anchorage performances of pressure type and tensile type anchor [J]. Journal of Chang' an University (Natural Science Edition), 2013, 33 (4): 68 ~ 74. (in Chinese with English abstract)