

基覆型边坡在地震作用下的动力响应与破坏模式研究

Study on the Dynamic Response and Damage Mode of Base-covered Slopes under Seismic Action

马万荣, 刘渊, 刘祥

(广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530200)

摘要: 为探究基覆型边坡的动力响应特性、破坏模式以及基覆界面倾角的影响, 以西南山区某基覆型边坡为原型, 利用 FLAC 3D 软件模拟基覆型边坡在地震作用下的响应过程, 分析不同地震作用下边坡的动力响应及破坏模式, 在此基础上进一步改变基覆界面的上、下界面倾角, 分析基覆界面倾角对动力响应特性及破坏模式的影响。结果表明: 基覆型边坡的 PGA 放大系数沿坡表方向随高程增大先增大后减小, 坡体内部的动力响应呈现明显的高程效应和趋表效应规律, 且随着输入 PGA 增大而减小; 在地震作用下边坡沿上覆土体内部形成的潜在滑动面发生剪切破坏, 加载 $PGA = 0.6g$ 的 EL 波和 Kobe 波时, 坡表的最大位移分别为 228.1 cm 和 446.2 cm, 加载 Kobe 波时模型的加速度响应与位移响应均要比加载 EL 波时更激烈; 基覆界面倾角对动力响应特性及破坏模式有着显著影响, 当上界面倾角增大时, 坡表处动力响应程度有所增强, 而下界面倾角增大时, 坡表处动力响应程度有一定减弱, 边坡破坏模式随着上下界面倾角差值增大由整体滑移破坏逐渐转变为局部滑移破坏, 上下界面倾角差值越大, 边坡稳定性越高。

关键词: 基覆型边坡; 地震作用; 数值计算; 动力响应; 破坏模式; 界面倾角

中图分类号: U213.1+3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 03-0079-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.016

MA Wanrong, LIU Yuan, LIU Xiang

(Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530200, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic response characteristics, damage modes and the influence of base-cover interface inclination angle of a base-cover slope in the southwest mountainous area, FLAC 3D software is used to simulate the response process of base-cover slope under seismic action, and to analyze the dynamic response and damage modes of the slope under different seismic actions, and then to further change the inclination angle of the base-cover interface, and to analyze the effect of the inclination angle on the dynamic response characteristics and the damage modes. On this basis, we further change the inclination angle of the upper and lower interfaces of the base-cover interface to analyze the influence of the inclination angle of the base-cover interface on the dynamic response characteristics and damage mode. The results show that the PGA amplification coefficient of the slope of bedrock and overburden layer increases and then decreases with the increase of Elevation, and the dynamic response of the internal slope body shows a clear pattern of Elevation effect and surface effect, and decreases with the increase of input PGA . The maximum displacement of the slope surface is 228.1 cm and 446.2 cm when loading EL and Kobe waves with $PGA = 0.6g$. The acceleration response and displacement response of the model are more intense when loading Kobe

作者简介: 马万荣 (1973—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路工程相关施工管理。

通信作者: 刘祥 (1991—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 结构工程、抗震减灾以及项目施工管理。

收稿日期: 2023-10-19

岩土力学

waves than when loading EL waves. The slope damage mode gradually changes from overall slip damage to local slip damage as the difference between the upper and lower interface inclination increases, the slope failure mode gradually transitions from overall slip failure to local slip failure, and the greater the difference, the higher the slope stability.

Keywords: the slope of bedrock and overburden layer; earthquake; numerical calculation; dynamic response; failure mode; interface dip

0 引言

基覆型边坡在我国西南山区分布较为广泛,由上覆岩土体和基岩组成,上覆土体与基岩大都以面-面接触为主,存在清晰的分界面,即基覆界面。基覆型边坡因其具有复杂的坡体结构及高陡的坡体形态,在地震等外部荷载作用下极易发生滑坡破坏,对沿线公路的安全运营以及居民的生命财产安全造成巨大的威胁^[1]。在2008年“5·12”汶川大地震发生后,大量的基覆型边坡发生失稳破坏,因此,为保障西南山区公路的安全运营,有必要对基覆型边坡的动力响应特性与破坏模式进行研究^[2]。

目前,针对地震作用条件下基覆型边坡动力响应特性和破坏模式以及基覆界面的研究已取得诸多成果。Sun等^[3]通过改变倾角和结构面研究发现,坡面上部动力响应随着靠近坡顶或坡面与倾角相近会表现得越加明显;谢显龙等^[4]通过振动台试验研究了黄土基覆层边坡的动力响应特性与破坏特征,认为贯通裂缝产生和加速度响应突变可以作为边坡动力破坏的依据;张忠平等^[5]认为滑坡滑动面(带)位置及其形状的确,直接控制滑坡的规模,是滑坡研究、勘察、稳定性分析及整体工程设计的一项极为重要的内容和依据;秦凤艳等^[6]基于FLAC 3D数值计算,分析了基覆型边坡在不同坡高、坡度和地震动作用下的动力响应规律,结果表明边坡高度和坡度对基覆边坡稳定性影响显著,同时坡面加速度响应大于坡顶和坡脚;Qian等^[7]基于材料点法对不规则基岩面的基覆型边坡进行模拟,得出基覆界面对基覆型边坡失稳有显著影响;梁敬轩等^[8-9]通过数值模拟分析和大量振动台试验发现基覆界面及微地貌是控制古滑坡体地震变形破坏模式的主导因素,基覆型边坡的破坏模式由基覆界面及坡面倾角共同控制;罗世林^[10]采用统计、理论、试验及数值模拟等方法开展了基覆界面强度与倾角对堆积体稳定性影响机制研究,揭示了基覆界面倾角变化对类直线形和上陡下

缓形两类基覆界面堆积体静力稳定性的影响规律;罗扬^[11]基于极限分析上限法与拟静力法研究了各种复杂条件下基覆型边坡可能发生的四种整体破坏模式及加固条件下两类局部破坏模式,发现影响基覆型边坡破坏模式的主要因素为基覆界面抗剪强度及其上下侧倾角。综上所述,基覆界面倾角在很大程度上会影响基覆型边坡的稳定性和破坏模式,但现有的研究对考虑上陡下缓的折线形界面的基覆型边坡在地震作用下的动力响应规律与破坏模式研究较为缺乏。

鉴于此,选取西南山区某公路段基覆型边坡,基于FLAC 3D软件模拟基覆型边坡在地震作用下的响应过程,分析动力作用下边坡的动力响应及破坏模式,在此基础上改变基覆界面的上下界面倾角,分析基覆界面倾角对动力响应特性及破坏模式的影响。

1 数值计算模型及参数

1.1 计算模型及参数

通过FLAC 3D软件对西南山区某公路段基覆型边坡工程进行数值模型建立及计算分析。由于实际边坡中的上覆土体构成较为复杂,为了研究边坡几何形态对边坡响应的影响,根据郑颖人等^[12]的建模思路与方法,将上覆土体模型简化为均质材料,将实际边坡形态进行简化。该基覆型边坡的界面形态大致呈现上陡下缓的折线形,可以将基覆界面简化为折线形,模型如图1所示,定义基覆界面的上界面倾角。

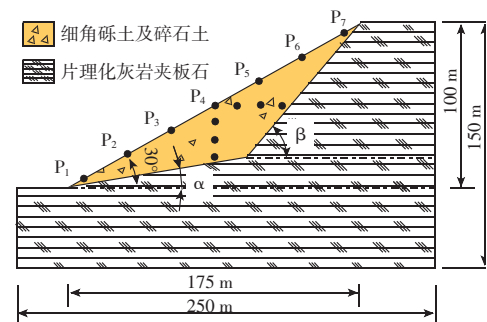


图1 数值模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of numerical model

图 1 中, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 50^\circ$, X 轴方向上的计算长度为 250 m; Y 轴方向上的计算长度为 100 m; 在 Z 轴方向上, 右侧的最大高度为 150 m, 左侧的计算高度为 50 m。边坡岩土体单元为实体单元, 坡表位置设置了 7 个监测点, 定义 H_4 为 P_4 监测点位置对应的土体竖向高度, W_4 为 P_4 监测点位置处对应的土体水平方向的厚度, 选取 P_4 处不同高度位置设置 5 个监测点, 其中 1 个监测点位于模型底部, 监测输入的地震波波形, 另外 4 个监测点位于上覆层土体内部, 距基覆界面的竖向距离分别为 $0.1H_4$ 、 $0.4H_4$ 、 $0.7H_4$ 和 $1.0H_4$ 。选取 P_4 位置处不同水平位置设置 4 个监测点, 监测点位于上覆层土体内部, 距离坡表的水平距离分别为 $0.05W_4$ 、 $0.35W_4$ 、 $0.35W_4$ 和 $0.9W_4$ 。所有监测点均监测对应位置的加速度与位移。边坡岩土体的本构关系选取为理想弹塑性模型, 屈服准则选取为摩尔-库仑屈服准则。边坡基岩与上覆土体材料参数以实际人工边坡强度为工程背景, 参照《工程地质手册》(第五版) 进行选取, 参数取值见表 1。

表 1 边坡岩土体力学计算参数
Table 1 Material parameters of the slope

岩土体名称	重度 / (kN/m ³)	体积模量 / MPa	剪切模量 / MPa	黏聚力 / kPa	摩擦角 / °	阻尼
上覆土体	1 850	80	40	30	30	0.2
基岩	2 400	8 500	4 300	65	45	0.001 5

1.2 边界条件与力学阻尼

因地震过程中边界存在波的反射, 会对动力结果产生影响, FLAC 3D 提供两种边界条件来降低影响, 即黏滞边界和自由场边界。黏滞边界是在模型边界的法向和剪切方向上设置独立的阻尼器, 当入射角度大于 30° 时, 对接近边界体波几乎完全吸收。自由场边界提供与无限模型中相同的条件, 加强自由场运动, 使边界保持其非反射特性, 因此向上传播的平面波在边界上没有畸变。本次计算将两种边界模型相结合, 在模型底部设置静置边界, 模型四周设置自由场边界。边界条件如图 2 所示。采用 FLAC 3D 中条件限制较少的局部阻尼进行动力计算。

1.3 地震动输入

为对比不同地震波对边坡的影响, 选取的输入地震波类型分别为 EL 波和 Kobe 波的主频段, 进行归一化处理, 地震波持续时间均为 20 s, 加速度时程

曲线及傅里叶谱如图 3 所示。

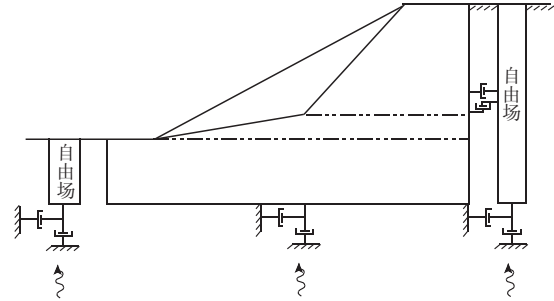


图 2 模型动力计算边界示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dynamic calculation boundary

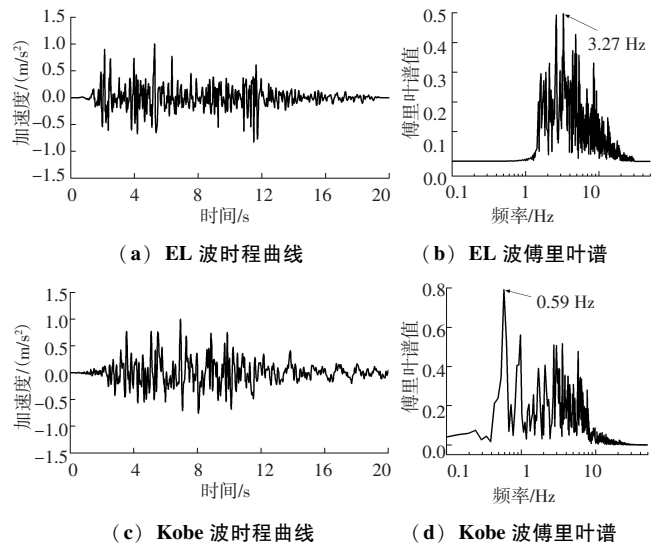


图 3 输入地震波加速度时程曲线及傅里叶谱 (0.2g)

Fig. 3 Acceleration time history of the input seismic wave and corresponding Fourier spectrum (0.2g)

查阅 GB 18306—2015《中国地震动参数区划图》, 该工点的基本地震动峰值加速度为 $0.2g$, 基本烈度地震下设计地面地震最大加速度为 $0.6g$ 。因此本次数值模拟计算选取的地震波地面峰值加速度分别为 $0.2g$ 、 $0.4g$ 和 $0.6g$ 。

1.4 数值方法验证

为保证数值计算结果的合理性, 首先应对所采取的数值计算方法进行验证。祁生文等^[13]通过 FLAC 3D 数值方法对边坡的动力响应进行了研究, 其结果受到广泛认可。因此, 本节建立与祁生文等文献^[13]中相同的数值模型, 输入相同的地震波数据:

$$a = 0.5g \cos \frac{2\pi t}{T} \quad (1)$$

式中: a 为加速度时程, m/s^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; t 为动力时间, s ; T 为周期, s 。

岩土力学

将加速度时程输入模型底部，记录坡肩位置的加速度时程，结果如图 4 所示。

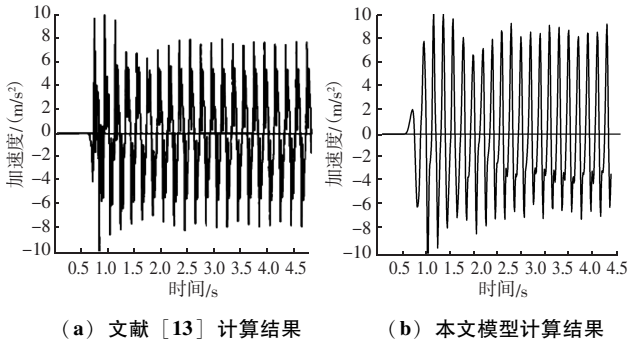


图 4 坡肩加速度时程对比

Fig. 4 Time-history comparison of accelerations at slope shoulder

由图 4 可知，本文所得结果与文献 [13] 高度一致，加速度从坡底传至坡肩所需时间为 0.6 s，坡肩加速度时程的整体趋势与加速度幅值也基本一致，说明本文采用的数值模拟方法正确可行，所得结果具有合理性。

2 地震响应结果分析

2.1 坡体动力响应分析

在计算模型的坡表位置选取 7 个监测点，由坡脚至坡肩分别为 $P_1 - P_7$ ， h_s 为土体坡脚到监测点的垂直高度， H_s 为土体高度（100 m）。定义监测点监测对应位置加速度时程峰值与输入加速度时程峰值的比值为 PGA 放大系数， h_s/H_s 表征监测点对应位置的相对高程，统计不同 h_s/H_s 下坡表 PGA 放大系数，如图 5 所示。坡表的 PGA 放大系数随高程增大先增大后减小，表现出高程放大效应，坡表中部动力响应更激烈。加载不同 PGA 的 EL 波时，边坡表面的

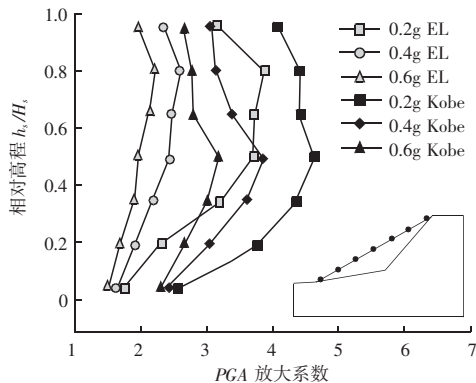
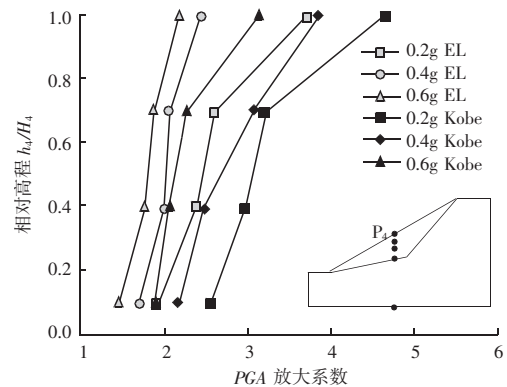


图 5 模型坡表 PGA 放大系数

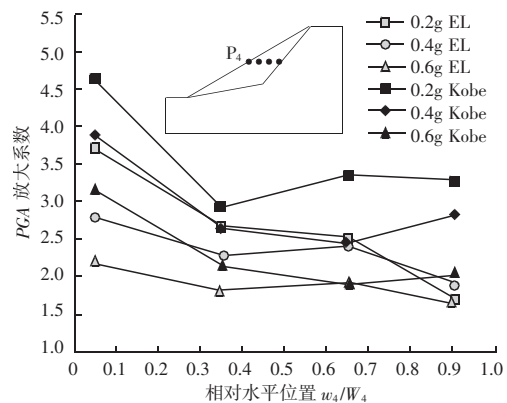
Fig. 5 PGA amplification coefficient of model slope surface

PGA 峰值均大致出现在 0.8H 处；而加载不同 PGA 的 Kobe 波时，坡表的 PGA 峰值均大致出现在 0.5H 处。同时，随着输入 PGA 的增大，坡表的 PGA 放大系数逐渐减小。对比不同地震波作用发现，在输入 PGA 相同情况下，加载 Kobe 波时边坡的加速度响应更大。

选取 P_4 水平位置处不同高度的监测点以及 P_4 高度处不同水平位置监测点的 PGA 放大系数，研究坡体内部竖直方向和水平方向的动力响应规律， h_4 为 P_4 水平位置处监测点到基覆界面的垂直距离， w_4 为 P_4 高度处监测点到坡表的水平距离，定义 h_4/H_4 为监测点对应位置的相对高程， w_4/W_4 表征监测点对应位置距坡表的相对水平位置，统计不同 h_4/H_4 和 w_4/W_4 下坡体内部的 PGA 放大系数，如图 6 所示。



(a) 竖直方向



(b) 水平方向

图 6 模型坡体内部 PGA 放大系数

Fig. 6 PGA amplification coefficient of inside the model

在同一水平位置上，坡体内部的 PGA 放大系数随高度增加近似线性增长，符合高程效应；在同一高度上，坡体内部的 PGA 放大系数近似相等；当临近坡表时， PGA 放大系数出现较大幅度增加，符合

趋表效应。同时，随着输入 PGA 的增大，坡体内部的 PGA 放大系数逐渐减小，在输入 PGA 相同情况下，加载 Kobe 波时边坡的加速度响应更大，这与坡表的动力响应规律基本一致。

2.2 边坡破坏模式分析

为探究边坡模型的破坏模式，在加载地震荷载后，对坡表的位移进行监测，坡表位移如图 7 所示。同时提取边坡的最大剪应变增量，绘制最大剪应变增量云图，结果显示不同震级下破坏形式相同，故仅取 $PGA = 0.6g$ 的情况进行分析，如图 8 所示。

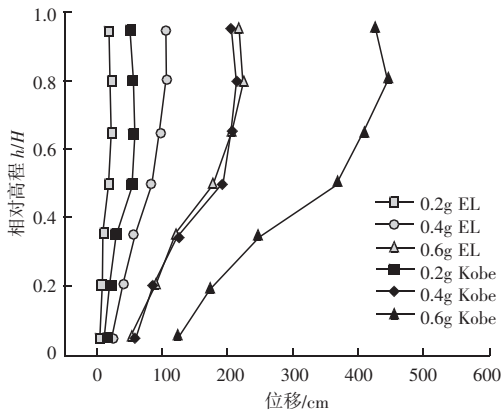
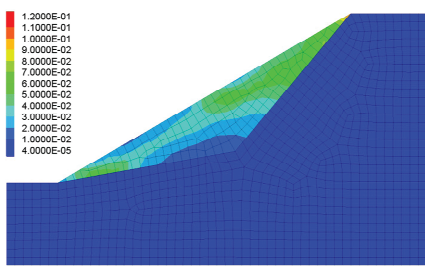
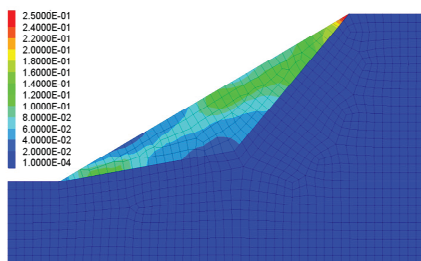


图 7 边坡模型坡表位移

Fig. 7 Surface displacement of slope model



(a) EL 波



(b) Kobe 波

图 8 边坡模型剪应变增量云图 ($PGA = 0.6g$)

Fig. 8 Shear strain increment of slope model ($PGA = 0.6g$)

由图 7 和图 8 可知，加载不同 PGA 的 EL 波和 Kobe 波时，坡表位移随高程变化的趋势基本一致，坡表位移随 PGA 增大而明显增大。结合坡表的位移

变化规律，可推测前文中边坡的 PGA 放大系数随 PGA 增大逐渐减小的原因可能为当输入 PGA 增大后，土体的剪应变也随之增大，土体的塑性区范围增大从而导致土体刚度降低；同时边坡位移随着 PGA 增加而增大，边坡对地震波能量的消耗作用逐渐增强^[14]。加载相同 PGA 的 EL 波和 Kobe 波时，边坡的破坏模式大致相同，首先在坡脚位置出现塑性变形，随着地震波的加载，塑性变形从坡脚逐渐向上发展，同时在加载过程中坡肩位置出现塑性变形，产生较大的剪应变增量，塑性变形从坡肩位置逐渐向下发展，最终在坡表下方形成一条贯通的剪应变带，边坡发生破坏。但加载 Kobe 波时坡体表面位移及坡体内部最大剪应变增量数值均明显大于加载相同 PGA 的 EL 波。加载 PGA 为 $0.6g$ 的 EL 波时坡表最大位移为 228.1 cm ，而加载 PGA 为 $0.6g$ 的 Kobe 波时坡表最大位移达到 446.2 cm 。与 2.1 节中边坡加速度响应所得结论类似，在输入 PGA 相同情况下，加载 Kobe 波时边坡的位移响应也更大。

3 界面倾角对基覆型边坡动力响应与破坏模式的影响

3.1 模型概化与计算工况

基覆界面是基覆型边坡的重要特征，基覆界面特性会对基覆型边坡的力学响应起到较大影响^[15]。根据前文所得结论，施加不同 PGA 的 EL 波时，坡体动力响应规律和破坏模式大致相同，为简化计算，考虑仅对模型施加 PGA 为 $0.6g$ 的 EL 波，分别改变 α 、 β 的大小，监测模型坡表处加速度响应，工况见表 2。

表 2 设计计算工况

Table 2 Design calculation conditions

工况	α	β	$\beta - \alpha$
1	10	40	30
2	10	50	40
3	10	60	50
4	0	50	50
5	20	50	30

3.2 不同界面倾角下坡体动力响应分析

由图 9 不同工况下模型坡表 PGA 放大系数可知，坡表 PGA 放大系数均随着坡表高程增大先增大再减小，边坡表面的 PGA 峰值均大致出现在 $0.8H$ 处，当保持下界面倾角 α 不变、改变上界面倾角 β 时，坡

岩土力学

表处动力响应随着上界面倾角 β 的增大而增强；当上界面倾角 β 分别为 40° 、 50° 和 60° 时，对应的坡表 PGA 放大系数最大值分别为 1.86、2.45 和 3.35；当保持上界面倾角 β 不变、改变下界面倾角 α 时，坡表动力响应随着下界面倾角 α 的增大而减弱，当下界面倾角 α 分别为 0° 、 10° 和 20° 时，对应的坡表 PGA 放大系数最大值分别为 2.98、2.45 和 2.16。

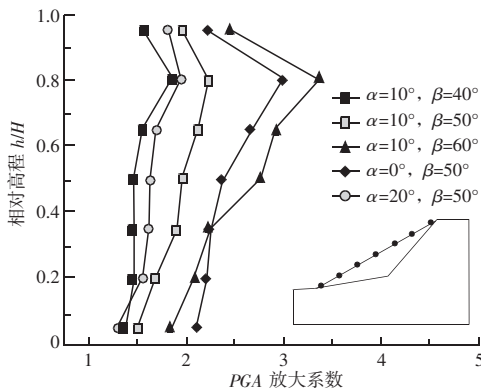


图9 不同界面倾角的模型坡表 PGA 放大系数

Fig. 9 PGA amplification coefficient of model slope surface with different interface dip angles

3.3 不同界面倾角下坡体破坏模式分析

为探究界面倾角对边坡模型破坏模式的影响，对不同界面倾角下坡体模型施加 PGA 为 0.6g 的 EL 波，在加载后，提取边坡最大位移，绘制边坡位移云图和坡表位移曲线，如图 10 和图 11 所示。基覆型边坡在动力作用下发生破坏，坡表位移整体上沿高程逐渐增大，其滑动面沿基覆界面的上界面发展，在上覆土体内部发生错动，随后滑动面向上脱离基覆界面，滑移完全发生在上覆土体内部，沿坡角位

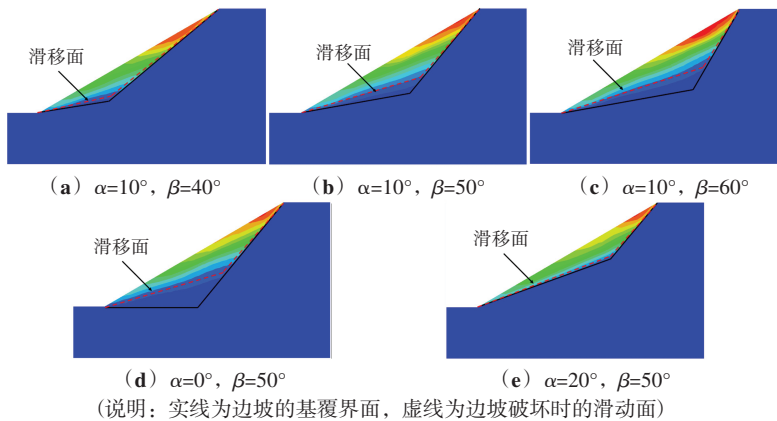


图10 不同界面倾角模型的位移云图

Fig. 10 Displacement of models with different interface dip angles

置剪出。总体来看，基覆界面倾角对基覆型边坡的破坏模式有着显著影响。图 10 (a)、(e) 的破坏模式属于整体滑移破坏，即边坡上覆土体沿基覆界面下滑；图 10 (b)、(c)、(d) 的破坏模式属于局部滑移破坏，即坡顶整体拉裂，土体沿滑移面在坡脚剪出，滑动面与基覆界面存在一定厚度的土体未发生变形。在下界面倾角 α 不变的情况下，改变上界面倾角 β ，随着上界面倾角 β 逐渐增大，边坡失稳时的滑移面位置逐渐由近似与基覆界面重合逐渐上移，破坏模式由整体滑移破坏逐渐转变为局部滑移破坏，坡表位移逐渐减小。在上界面倾角 β 不变的情况下，改变下界面倾角 α ，随着下界面倾角 α 逐渐增大，边坡失稳时的滑移面位置逐渐由上覆土体内部逐渐下移，直至近似与基覆界面重合，破坏模式由局部滑移破坏逐渐转变为整体滑移破坏，坡表位移逐渐增大。随着上下界面倾角差值 $\beta - \alpha$ 逐渐增大，边坡破坏模式由整体滑移破坏逐渐转变为局部滑移破坏，坡表位移逐渐减小，即在其他条件相同时，上下界面倾角差值 $\beta - \alpha$ 越大，边坡稳定性越高。分析其原因，当上下界面倾角差值 $\beta - \alpha$ 较小时，基覆界面的整体形态更加接近直线型，边坡在动力作用下产生下滑力时，下界面能提供的阻滑作用较弱；当上下界面倾角差值 $\beta - \alpha$ 较大时，上界面相对较陡，下界面相对较缓，尤其是当下界面水平甚至反翘时，边坡在动力作用下产生下滑力时，下界面能够产生明显的阻滑作用，边坡稳定性较好。

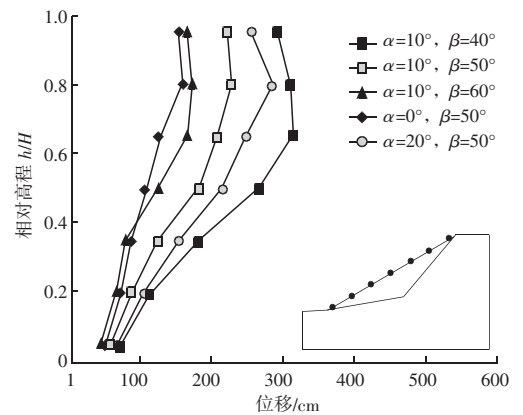


图11 不同界面倾角模型的坡表位移

Fig. 11 Slope surface displacement of different interface dip models

4 结论

(1) 基覆型边坡的 PGA 放大系数沿坡表方向随着高度向上先增大后减小, 坡表中部动力响应更激烈, 坡体内部 PGA 放大系数随高程增加而增大, 且坡表处 PGA 放大系数明显大于同高度坡体内部 PGA 放大系数, 呈现明显的高程效应和趋表效应规律, PGA 放大系数随着输入 PGA 增大而减小, 在输入 PGA 相同情况下, 加载 Kobe 波时边坡加速度响应明显比加载 EL 波时更大。

(2) 加载不同 PGA 的 EL 波和 Kobe 波时, 坡表位移均随高程增加而增大, 且随 PGA 增加坡表位移明显增大。加载 PGA 为 0.6g 的 EL 波和 Kobe 波时, 坡表最大位移分别为 228.1 cm 和 446.2 cm。加载相同 PGA 的 EL 波和 Kobe 波时, 边坡的破坏模型大致相同, 但加载 Kobe 波时坡体表面的位移及坡体内部最大剪应变增量数值均明显大于加载 EL 波。

(3) 当保持下界面倾角 α 不变, 改变上界面倾角 β 时, 坡表处动力响应程度随着倾角 β 的增大而增强; 当保持上界面倾角 β 不变, 改变下界面倾角 α 时, 坡表动力响应程度随着倾角 α 的增大而减弱。

(4) 基覆界面倾角对基覆型边坡的破坏模式有着显著影响。边坡破坏模式随着上下界面倾角差值 $\beta - \alpha$ 逐渐增大, 由整体滑移破坏逐渐转变为局部滑移破坏, 坡表位移逐渐减小, 边坡稳定性增大。

综上所述, 基覆型边坡的动力响应与传统均质边坡有一定不同, 基覆界面会对基覆型边坡的动力响应产生较大影响, 本文结论仅分析不同基覆界面倾角对基覆型边坡动力响应的规律, 对于基覆界面其他参数以及边坡的坡高、坡角等其他因素今后将做进一步分析研究。

参 考 文 献

- [1] 黄润秋. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (3): 433-454.
- [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): 2585-2592.
- [3] SUN J Z, TIAN X F. Numerical analysis of the influence of structure planes on earthquake motion in rock slopes [C] //Geological Engineering Problems in Major Construction Projects. Chengdu. 2009: 451-462.
- [4] 谢显龙, 廖昕, 施艳秋, 等. 黄土基覆层边坡动力破坏特征的大型振动台试验研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30 (4): 1371-1379.
- [5] 张忠平, 屈有智, 李荷生. 滑坡滑动面位置、形态的确定与工程对策 [J]. 路基工程, 1997 (5): 8-11.
- [6] 秦凤艳, 戈海玉, 郝成伟, 等. 基覆边坡地震稳定性分析 [J]. 世界地震工程, 2015, 31 (2): 156-161.
- [7] QIAN N, ZHAO L H, WANG X, et al. Influence analysis of irregular bedrock surface on failure characteristics of bedrock and overburden layer slope by material point method [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14: 1-11.
- [8] 梁敬轩. 紫坪铺水库坝前大型古滑坡体地震响应特征及变形机理研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [9] 梁敬轩, 胡卸文, 叶正晖, 等. 大型堆积体边坡基-覆界面及坡面动态响应特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38 (8): 2249-2260.
- [10] 罗世林. 三峡库区堆积体滑坡稳定性的基覆界面控制机制研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [11] 罗扬. 基于极限分析上限法的基覆型边坡破坏模式及稳定性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [12] 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.
- [13] 祁生文, 伍法权, 孙进忠. 边坡动力响应规律研究 [J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2003 (增刊 1): 28-40.
- [14] 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 (6): 918-923.
- [15] 田峻宇. 地震作用下基覆型堆积体边坡动力响应及稳定性的数值模拟研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2021.