

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.008

近断层地震动对边坡稳定性的影响

马冲¹, 邢天海², 郑有雷², 赵武胜³

(1. 济南市水利建筑勘测设计研究院有限公司, 山东 济南 250014;

2. 兖州煤业股份有限公司 济三煤矿, 山东 邹城 273500;

3. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 为研究近断层地震动特性及其入射方向对边坡地震响应的影响, 首先, 考虑边坡对地震波的散射规律, 提出了一种能够考虑地震波任意角度入射的地震动输入方法, 该方法能够准确考虑模型边界两侧的动力相互作用且简单易操作。其次, 运用提出的地震动输入方法, 通过有限元参数分析研究了地震波入射角对边坡地震响应的影响规律。结果表明: 当同时考虑 P 波及 SV 波入射时, 由于两种波形的叠加作用, 边坡的放大效应较一种波形单独作用时更加显著, 且坡面上加速度分布更不均匀。地震波的入射角能够显著影响边坡的地震响应, 随着地震波入射方向与坡面间夹角的增加, 边坡对地震动的放大效应越明显, 坡面上加速度分布越不均匀。

关键词: 边坡; 地震; 近断层; 入射角

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0049-05

Influence of Near Fault Ground Motion on Seismic Response of Slope

MA Chong¹, XING Tianhai², ZHENG Youlei², ZHAO Wusheng³

(1. Jinan City Water Conservancy Construction Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China;

2. Jisan Coal Mine, Yanzhou Coal Mining Company Limited, Zoucheng, Shandong 273500, China;

3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Therefore, the aim of this study is to investigate the influences of the characteristics and incident angle of the near-fault ground motion on the seismic response of slopes. First, based on the propagating law of seismic waves near slopes, an earthquake input method was proposed for seismic analyses of slopes subjected to obliquely incident waves. The proposed method can accurately consider the dynamic interaction between the two sides of the model at boundaries. Then, a parametric study was conducted to study the influence of the incident angle on the seismic response of slopes. The results show that when both the SV and P waves are applied, the amplification effect of the slope is more significant owing to the superposition of SV and P waves. Besides, the distribution of the acceleration at the slope becomes more non-uniform. The incident angle of the input motion has a significant effect on the seismic response of slopes. Moreover, as the angle between the incident direction and the slope surface increases, the amplification effect of the slope becomes more significant.

Keywords: slope; earthquake; near fault; incident angle

地震诱发边坡失稳破坏会造成人员伤亡与巨大经济损失^[1]。我国处于欧亚地震带及环太平洋地震带交汇处, 构造运动强烈, 是一个多山而又多震的国家。地震作用下边坡失稳是我国最常见的工程灾害之一, 也是岩土工程界重点关注的问题之一。因此,

深入研究地震作用下边坡的响应失稳机理, 对于推动边坡治理技术发展、保证人民群众生命财产安全具有重要的理论及实践价值。

目前, 针对地震作用下边坡稳定性的研究主要体现在(1) 地震作用下边坡稳定性评价与失稳机

理;(2) 边坡的加固技术及效果两个方面。在稳定性分析方面,目前最常采用的是拟静力方法,该方法仅考虑地震动峰值参数(PGA)对边坡稳定性的影响,将地震的瞬时作用等效为荷载作用在滑体的重心上^[2]。拟静力分析方法简单实用,但忽略了地震动频谱特性对边坡稳定性的影响。为此,许多学者采用理论分析^[3-4]、动力有限元^[5-7]、模型试验^[8-10]等方法研究了地震动频谱特性对边坡的稳定性的影响。结果表明输入地震动特性(幅值、持时、频谱等)均对边坡响应具有显著影响,坡体对地震动具有不同程度的放大效应,特别是存在软弱结构面时^[11-14]。

近断层地震动由于受到断层影响,通常表现了显著区别于远场地震动的特征^[15]。近场会受到发震断层破裂方向的影响,导致近场地震动出现方向性效应、滑冲效应,并由此引发长周期速度脉冲信号;同时,近断层地震动表现出明显的上盘效应,即相同断层距条件下,上盘地震动较下盘强烈;除此之外,近场地震动的竖向地震动强度与水平向地震相近,甚至大于水平地震动。近断层地震动对边坡的影响与远场地震动也有较大差异^[16],近场区边坡失稳灾害更加严重。但目前已开展的大部分研究主要针对远场地震动,并未考虑近场地震动区别于远场地震动的特性,且假定地震波垂直入射而未考虑地震波入射方向对边坡地震响应的影响。因此,开展近断层地震动作用下边坡的响应规律研究将有利于揭示近场区边坡失稳机理。

首先,基于时程分析方法提出一种适用于边坡地震响应分析的地震动输入方法;然后,研究近场水平及竖向地震动共同作用下边坡的放大效应;最后研究近断层地震动入射方向对边坡地震响应的影响。相关结果对揭示近场区边坡失稳机理具有积极作用。

1 近断层地震动输入方法

1.1 计算模型

在边坡的地震响应分析中,常采用如图 1 所示的平面应变模型^[16]。地震响应分析不同于静力稳定性分析,边界条件对计算结果影响较大。由于通常假定边坡两侧相对平坦,所以在地震响应分析中模型两侧边界处通常假定为自由场边界条件;而底部边界通常选择在基岩面或基岩内部,为了考虑下行地震波在底边界处的散射,通常在底边界处设置为吸收边界,用于模拟无限地基的辐射阻尼。

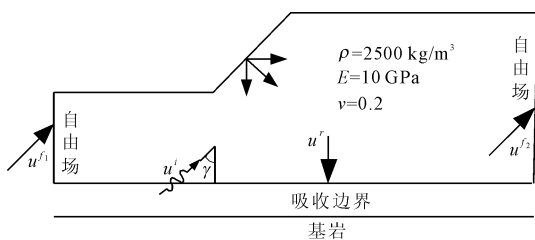


图 1 边坡稳定性分析模型示意图

对于两侧边界,入射地震波自底部向上传播至地表,在地表处发生反射,反射波将再次影响两侧边界。上行波为入射波,而下行波为地表反射波。由于模型两侧边界处尺寸(高度)不同,在入射地震波相同的情况下,两侧自由场也不相同,因此,两侧边界处的自由场边界条件需要分别求解。

对于底边界,入射地震波自底边界向上传播,当传播至地表时,由于边坡的存在会产生反射与散射。上行波为入射地震波,下行波为地表反射波与散射波。

为了简化,在本研究中采用如图 1 所示的理想化二维平面应变边坡模型,且假定岩体为均质线弹性体,其力学参数如图 1 所示。该平面应变模型底部为基岩,两侧为相对平坦地层,模型长 170 m,左侧高 30 m,右侧高 60 m,坡角为 60°,左侧边界至坡角的水平距离为 50 m。

1.2 地震动输入方法

从上述分析可以看出,在进行地震动输入时两侧边界处应当施加自由场边界条件,而底部边界处应将入射地震波作为输入波,并配合吸收边界。

地震波垂直入射:对于地震波垂直入射的情况,如图 2 所示,两侧边界处为自由场震动,可由一维自由场计算程序 Shake 或自由场有限元计算得到,由于两侧边界的尺寸不同,对应的自由场震动也不同。对于底部边界,由于自由表面处的反射波与散射波会再次到达底部边界,底部边界处应为吸收边界,为模拟底部边界这种地震阻尼作用,通常配合人工吸收边界。因此,可将地震波转换为等效节点力,假定入射 SV 波为 $u(t)$,底部边界处的荷载为:

$$\begin{aligned} f_x &= A\rho c_s \ddot{u}(t) + f_x^d \\ f_z &= A\rho c_s \ddot{u}(t) + f_z^d \end{aligned} \quad (1)$$

式中: A 为底部边界单元 x 方向尺寸; ρ 为介质密度; c_s 介质剪切波速; $\ddot{u}$ 为入射波速度时程; f_x^d 与 f_z^d 为底部边界处人工边界引起的阻尼力。

同理,假定入射 P 波为 $u(t)$,底部边界处的荷载为:

$$f_x = A \rho c_p \ddot{u}(t) + f_x^d$$
$$f_z = A \rho c_p \ddot{u}(t) + f_y^d$$

(2)

式中: c_p 为介质剪切波速。

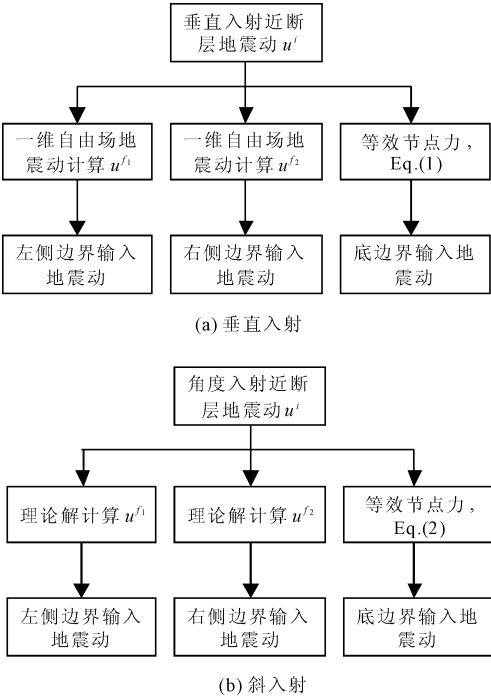


图 2 地震波入射时地震动输入流程

当地震波斜入射时,情况会变的比较复杂;首先,地震波在自由表面处会发生波形转换,如入射 SV 波到达界面处时会产生反射 SV 波及反射 P 波;其次,边界处地震动为非一致地震动,即不同坐标位置地震动会因行波效应而不同。

假定底部入射 SV 波 $u(t)$,对于左侧边界,内行波为入射波 $u(t)$ 、自由表面的反射 SV 波、地表反射 P 波;而外行波为边坡处的散射波,若考虑左右边界处为自由场,则无外行波。左侧自由场边界处内行波可由解析解得到。对于右侧边界而言,所有地震波均为外行波,无内行波。因此,右侧边界只需通过人工边界将外行波吸收。对于底部边界,由于边界处的地震动为非一致地震动,输入荷载与空间位置及时间均有关。假定入射波为 SV 波,底部边界 (x, y) 处的地震动输入荷载为:

$$f_x = A \rho c_s u \left(t - \frac{x}{c_x} \right) \cos(2\gamma) + f_x^d \left(t - \frac{x}{c_x} \right)$$
$$f_z = A \rho c_s u \left(t - \frac{x}{c_x} \right) \sin(2\gamma) + f_y^d \left(t - \frac{x}{c_x} \right)$$

(3)

式中: A 为单元的尺寸; γ 为地震波入射角; c_x 为 x 方向的视波速。

同理,若 P 波斜射至模型底部,底部边界处 $(x,$

$$y)$$
 处的地震动输入荷载为:

$$f_x = A \frac{G}{c_p} u_0 \left(t - \frac{x}{c_x} \right) \sin(2\gamma) + f_x^d \left(t - \frac{x}{c_x} \right)$$
$$f_z = A \frac{2G \cos^2 \gamma + \lambda}{c_p} u_0 \left(t - \frac{x}{c_x} \right) + f_y^d \left(t - \frac{x}{c_x} \right)$$

(4)

1.3 近断层地震动

由于近断层场区受到断层滑冲效应、方向性效应的影响,近断层地震动往往会出现速度大脉冲,其表现为峰值大、频率低,有时还会出现较大残余位移,对边坡工程会造成较大危害。

本次研究选取了美国地震动数据库(Next Generation Attenuation ground motion library)中的一组近断层地震动。该地震记录是 1979 年 Imperial 地震中在 EC Meloland Overpass FF 台站监测到的地震动,该地震记录的详细信息见表 1。

表 1 选取地震记录信息

震级	峰值加速度/ g	峰值速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	峰值位移/ cm	Joyner - Boore 距离	Epicentral 距离
6.53	0.31	79.79	28.13	0.07	19.44

采用 Baker^[18]提出的方法,将脉冲信息提取出,从图 3 及图 4 可以看出,提取脉冲信息号后,地震动的峰值加速度(PGA)变化较小,而峰值速度(PGV)及峰值位移(PGD)显著减小。由此可以看出,峰值加速度并不能考虑近断层速度脉冲。

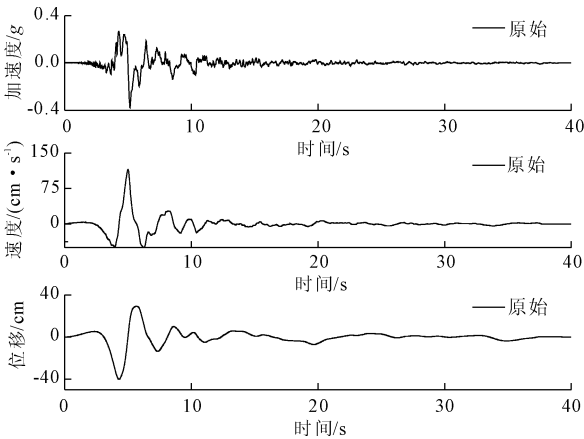


图 3 近断层地震动

2 P 与 SV 共同作用下边坡响应

从表 2 可以看出,由于本次计算假定边坡岩体为一整体,且岩体刚度较大,在地震波垂直入射条件下边坡不同位置处加速度放大系数接近,模型震动表现为较好的一致性。但近场地震动(提取速度脉冲信号)作用下边坡的放大系数大于远场地震动,这

是由于近断层地震动中的速度大脉冲周期较长,与边坡自有频率更为接近。因此,对于近场区边坡的地震稳定性分析需要考虑近断层地震的特性。

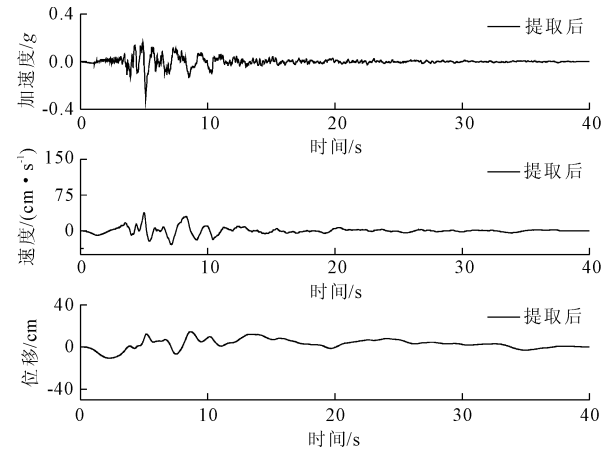


图 4 提取速度脉冲后地震记录

表 2 SV 波作用下边坡加速度放大系数

地震动类型	加速度放大系数		
	坡顶	坡中	坡脚
远场地震动	1.67	1.69	1.71
近场地震动	1.98	2.03	2.13

从图 5 及图 6 可以看出,同时考虑 P 波与 SV 波作用时,坡面的峰值加速度分布极不均匀,这是由于 P 波与 SV 波共同作用时,两个波形会在边坡处叠加;由于两种波形在介质中传播速度不同,两种波形叠加的效果不同,边坡不同位置峰值加速度发生的时刻也不相同,导致不同位置处加速度放大系数分布不均匀。

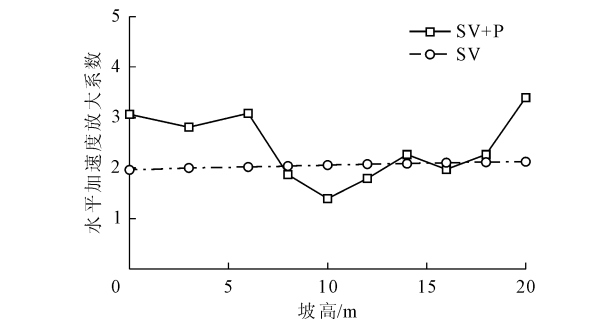


图 5 不同地震波作用下边坡水平加速度放大系数

在边坡抗震设计中,若仅考虑一种波形,这种波形的叠加效应会被忽略,将会低估边坡的地震动水平。对于远场区边坡的抗震设计中,竖向地震动水平较弱,通常仅考虑水平地震动作用。而对于近场区边坡工程而言,由于竖向地震动效应明显,在进行边坡地震稳定性分析时需要同时考虑水平及竖向地震动。

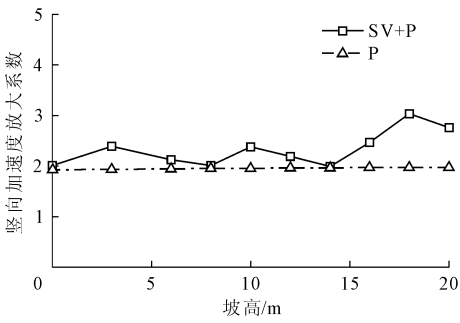


图 6 不同地震波作用下边坡竖向加速度放大系数

3 地震波入射角的影响

本节将通过开展不同角度入射条件下边坡地震响应的有限元计算,研究地震波入射角(如图 1 所示)对边坡地震响应的影响。

3.1 SV 波入射角的影响

从图 7 中可以看出,当 SV 波垂直入射时,坡面水平加速度放大系数较为均匀,约为 2.0。当地震波以正角度(图 1 顺时针为正)入射时,随着入射角的增加,地震波传播方向与边坡坡面夹角减小,边坡水平向加速度放大系数有减小的趋势,但坡面上地震加速度分布变得不均匀。对于负角度入射时,随着入射角的增加,地震波传播方向与边坡坡面夹角不断增加,坡面的放大效应越明显,且边坡坡面的水平向加速度放大系数越不均匀。负角度入射情况下边坡坡面的放大效应明显大于正角度入射的情况。

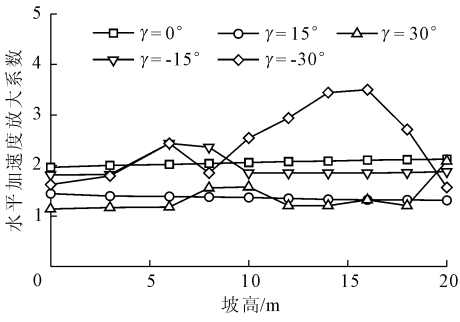


图 7 SV 波不同角度入射时边坡水平加速度放大系数

从图 8 中可以看出,随着 SV 波入射角的变化,不论是正角度入射还是负角度入射,边坡竖向放大系数均不断增加;但负角度入射时边坡放大效应较正角度入射时更明显。

3.2 P 波入射角的影响

从图 9 及图 10 可以看出,当 P 波垂直入射时,坡面水平加速度放大系数较小,约为 1.0,而竖向加速度放大系数最大值约为 2.5。

从图 9 可以看出,随着 P 波入射角度的增加,边坡水平向加速度放大效应迅速增大。当 P 波正角度

入射时,水平向加速度峰值出现在坡脚处,而负角度入射时,坡面水平向加速度峰值出现在坡顶。入射角相同的情况下,负角度入射时边坡对地震动的放大效应更明显。

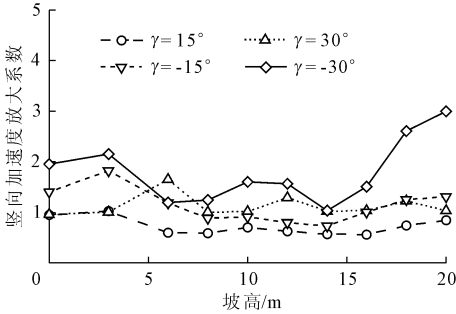


图 8 SV 波不同角度入射时边坡竖向加速度放大系数

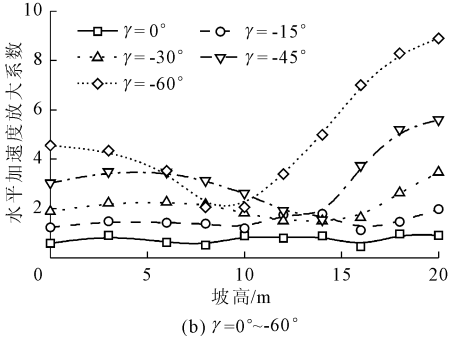
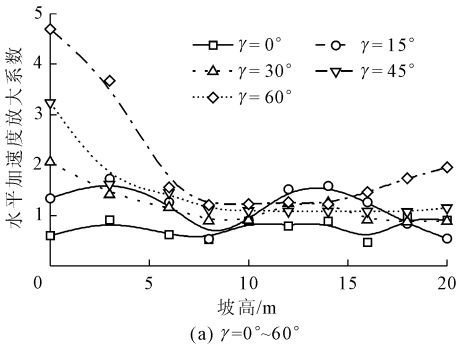


图 9 P 波作用下边坡水平加速度放大系数

从图 10 可以看出,当 P 波正角度入射时,随着入射角的增加,边坡竖向加速度减弱,但加速度分布趋于不均匀。当 P 波负角度入射时,随着入射角的增加,边坡竖向加速度不断增加且分布趋于不均匀。P 波斜入射条件下,边坡竖向加速度峰值发生在坡面中间部位,呈现出中间大两端小的特点。入射角相同的情况下,负角度入射时边坡对地震动的放大效应更明显。

上述结果表明,地震波入射方向对边坡地震响应具有显著影响。与垂直入射相比,地震波斜入射时,边坡加速度分布更不均匀;且地震波入射方向与边坡坡面夹角越大,边坡对地震动的放大效应越明

显。因此,对于近断层场区边坡的抗震设计,需要考虑地震波传播方向对边坡稳定性的影响。

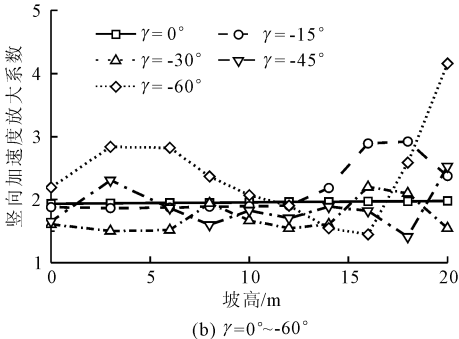
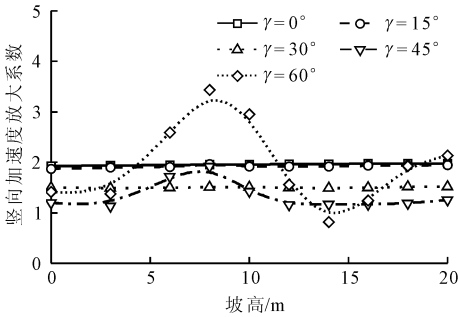


图 10 P 波作用下边坡竖向加速度放大系数

4 结 论

(1) 基于二维平面应变边坡分析模型,提出了一种用于边坡抗震稳定性分析的地震动输入方法,该方法能够准确考虑地震波任意角度入射时模型各边界处有限单元与无限地基间的动力相互作用。

(2) 与 SV 或 P 波单独作用相比,当 P 波与 SV 波共同作用时,由于两种波形的叠加作用,坡面放大效应更明显且坡面上加速度的分布更不均匀。对于近断层场地区,由于竖向地震动效应明显,仅考虑 SV 波影响会低估边坡竖向地震响应,工程边坡地震稳定性分析结果偏不利。

(3) 地震波的入射角对边坡的响应具有显著影响。与垂直入射相比,地震波斜入射时,坡面上加速度分布更不均匀;且地震波入射方向与坡面的夹角越大,边坡对地震动的放大效应越明显。

因此,对于近断层场区的边坡抗震设计,需要同时考虑水平及竖向地震动双重作用,也需要考虑地震波入射方向的影响。

参考文献:

[1] 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.