

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210115002

边坡地震响应数值模拟中最优边界范围研究*

张江伟^{1,2}, 周爱红^{1,2}, 迟明杰³, 王玉石⁴, 陈 苏⁴

(1. 河北地质大学城市地质与工程学院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北地质大学, 河北 石家庄 050031; 3. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 4. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124)

摘要: 在边坡地震响应数值模拟中, 科学合理地选取边坡计算模型的边界范围是决定模拟结果准确性的关键因素之一。基于有限元数值模拟方法, 分别建立了边坡前缘和后缘两组边界尺寸不同的概化模型, 选取了两条不同特性的实际地震动记录作为输入, 计算了各边坡模型的动力响应, 探索了边坡前缘和后缘尺寸的影响规律, 验证了远置边界在边坡地震稳定性分析中的可用性。结果表明: (1) 在边坡地震响应数值模拟中, 边坡模型的前缘尺寸应至少设定为坡高的2倍、后缘尺寸应至少设定为坡高的4倍, 才能避免边界的地震波反射叠加效应, 以便得到更为准确的模拟结果; (2) 设置黏弹性边界和远置边界工况下得到的边坡地震安全系数相差0.02, 说明合理的远置边界可以运用到边坡地震稳定性分析当中。

关键词: 土质边坡; 地震动; 地震响应; 边界范围

中图分类号: TU311.3; TU352.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0034-08

Research on Boundary Range in Seismic Response Simulation of Slope

ZHANG Jiangwei^{1,2}, ZHOU Aihong^{1,2}, CHI Mingjie³, WANG Yushi⁴, CHEN Su⁴

(1. School of Urban Geology and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 2. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Shijiazhuang 050031, China; 3. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 4. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In numerical simulation of seismic response of slopes, setting a scientific and reasonable boundary dimension of slope models is one of the key factors to ensure the accuracy of the simulation results. Based on the finite element numerical simulation method, two groups of generalized model with different sizes of the leading edge and trailing edge slope were established, the actual ground motion records were selected as the inputting loads, and the dynamic response of the slope was calculated to explore the reasonable dimension of the leading edge and the trailing edge. Also, the availability of the remote boundary in slope seismic stability analysis is verified. The results show that: (1) In the seismic responses study of slopes using numerical simulation, the leading edge size of the slope model should be set at least two times of the slope height to avoid seismic reflection superimposed effect, and the

* 收稿日期:2021-01-15;修回日期:2021-05-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51908176, 51639006)、国家重点研发计划(2019YFC1509400)、河北省自然科学基金项目(E2019403153)资助

作者简介:张江伟(1988—),男,副教授,博士。主要从事岩土地震工程研究。E-mail:zjwok1988@sina.com

通讯作者:周爱红(1976—),女,教授,博士。主要从事岩土地震工程研究。E-mail:sensiblecall@163.com

trailing edge size should be set at least four times of the slope height. Only in this way the simulation results would be more accurate. (2) The difference of the slope seismic safety coefficient obtained by setting the viscoelastic boundary and remote boundary is 0.02, which is shown that the reasonable remote boundary can be applied to the analysis of slope seismic stability.

Keywords: soil slopes; ground motion; seismic response; boundary range

在边坡动力数值模拟计算时,需要把无限域问题变为有限域问题,也就是需要把有限计算域从自然地质体中切割出来,当地震波传播到切割出的边界上时便会反射回模型,形成叠加效应,从而极大地影响边坡动力计算结果。因此,边界条件如何设定是边坡动力数值模拟分析中一个关键性的问题。为解决这一问题,国内外学者提出了许多人工边界理论,如黏性边界^[1]、叠加边界^[2]、Clayton—Engquist边界^[3-4]、透射边界^[5]等。但在数值模拟中运用这些边界条件时,设置计算比较复杂,使用不当容易产生较大的误差。其实,人工边界条件的早期思想是远置人工边界,即将研究区域截取范围足够大、边界足够远,以消除边界对计算结果的影响。例如,Z.S.Alterman等^[6]最早运用这种方法对单层覆盖弹性半空间爆炸内源产生的近场波动的研究。但远置人工边界往往会大大增加计算工作量,对于早些时期的计算机计算能力甚至是难以接受的,所以远置人工边界方法的应用受到制约。随着科技的飞速发展,计算机水平有了显著的提升,完全可以承载一些庞大的运算,以解决边坡地震动力分析问题。为此,开展远置人工边界设置的合理和有效性研究仍然具有工程实用意义。但纵观目前研究现状,针对边坡地震动力问题中远置边界范围选取的研究较少。对于二维边坡模型,有前缘、后缘和底部三处截取边界,底部边界可设置在土层与基岩界面处,一般采用固定边界即可,但如何科学合理地选取边坡模型的左右边界范围是边坡地震动力响应分析的关键问题之一。

本文主要针对此问题展开研究,采用有限元数值模拟方法,以实际记录到的地震动加速度为输入,计算分析边界选取范围对边坡动力响应的影响,探讨地震作用下边坡动力分析的最合理边界选取范围,并得到相关结论。

1 边坡动力有限元分析方法

动力有限元计算方法采用如下平衡方程^[1-2]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

对于求解地震作用下的动力问题,动力荷载就是地震荷载,于是求解边坡地震动力稳定性问题的基本力学运动方程可写为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_g(t)\} \quad (2)$$

式中, $[M]$ 为结构的质量矩阵; $[C]$ 为结构的阻尼矩阵; $[K]$ 为结构的刚度矩阵; $\{\ddot{u}\}$ 结构的加速度列阵; $\{\dot{u}\}$ 为结构的速度列阵; $\{u\}$ 为结构的位移列阵; $\{F(t)\}$ 为结构的节点荷载列阵。

在考虑阻尼效应时,本文采用工程中常用的瑞利(Rayleigh)阻尼形式,表达为:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3)$$

其中,

$$\alpha = 2 \left(\frac{\xi_i}{\omega_i} - \frac{\xi_j}{\omega_j} \right) / \left(\frac{1}{\omega_i^2} - \frac{1}{\omega_j^2} \right) \quad (4)$$

$$\beta = 2(\xi_j \omega_j - \xi_i \omega_i) / (\omega_j^2 - \omega_i^2) \quad (5)$$

式中, ξ_i 和 ω_i 分别为第*i*阶振型的阻尼比和自振频率。

计算中假定土体的阻尼比 $\xi = 0.1$,根据振型分析结果,采用“贡献”较大的振型即第一阶阵型和第二阶振型相对应的自振频率计算 α 和 β 值。用数值积分方法求解公式(2)得到边坡动力响应。

2 计算模型建立及参数

2.1 计算模型

为研究边界截取范围对边坡地震响应的影响,分别建立两组边坡概化模型。第一组模型旨在探寻边坡前缘尺寸设定的合理范围,如图1(a)所示,各模型前缘的尺寸分别为 $1h$ 、 $1.5h$ 、 $2h$ 、 $2.5h$,其中 h 为斜坡高度,其它尺寸均一致;第二组模型旨在探寻边坡设定后缘尺寸的合理范围,如图1(b)所示,各模型后缘的尺寸分别为 $2h$ 、 $3h$ 、 $4h$ 、 $5h$,其中 h 为斜坡高度,其他尺寸均一致。

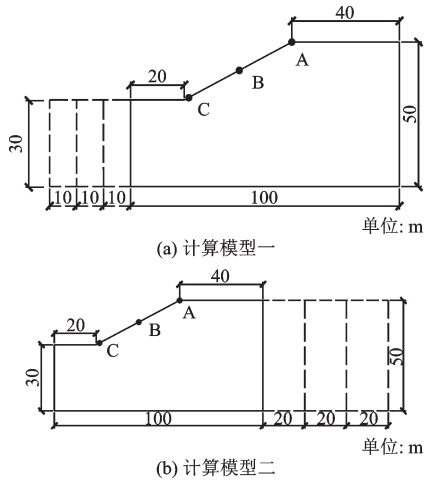


图1 边坡有限元计算模型

Fig.1 Finite element model of the slope

具体计算中,模型前缘和后缘分别采用水平向固定约束边界作为远置边界条件,底部均采用水平和竖直向约束固定边界,沿坡面选取三个观测点,标记为A、B、C。本构模型和屈服准则采用理想弹塑性模型和Mohr-Coulomb强度准则,土体参数参照《工程地质手册》^[9]选取,其中容重 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E = 78 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$,黏聚力 $c = 16.5 \text{ kPa}$,内摩擦角 $\phi = 25^\circ$ 。计算得到土体的S波波速为 122.5 m/s ,P波波速为 229.1 m/s 。

2.2 黏弹性边界的设定

为了对比确定数值模拟中边坡模型边界的合理范围,需模拟计算边坡前缘和后缘分别在设定黏弹性边界条件下的地震响应作为参考值,其模型示意如图2所示。

在进行半无限空间体的地震动力模拟分析时,

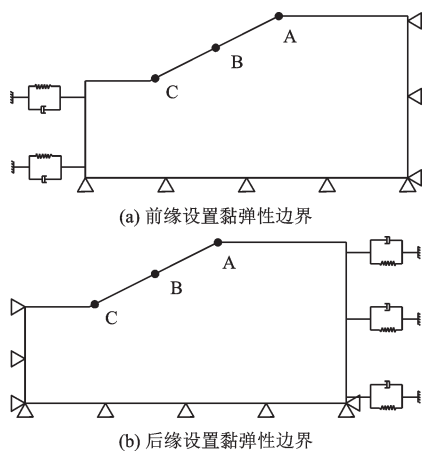


图2 黏弹性边界模型

Fig.2 Viscous boundary model

需要考虑边界条件的设置,与静力问题中边界条件不同,由于存在人工边界对地震波的反射、折射问题,如果不对边界进行处理,势必会影响计算结果的准确性^[10-11]。本文采用适合模拟边坡地震稳定性的黏弹性边界^[12],其中二维黏弹性人工边界等效物理系统的弹簧系数 K 和阻尼系数 C 分别由下式求得:

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho c_s \quad (6)$$

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho c_p \quad (7)$$

式中, K_{BN} 、 K_{BT} 分别为弹簧法向与切向刚度; ρ 为介质质量密度; α_T 与 α_N 分别为切向与法向黏弹性人工边界参数,刘晶波等^[13]推荐二者的取值分别为 $0.35 \sim 0.65$ 和 $0.8 \sim 1.2$,本文取 $\alpha_T = 0.5$, $\alpha_N = 1.0$ 。 R 为波源至人工边界点的距离,对于前缘 R 近似取 52.2 m ,对于后缘 R 近似取 55.9 m ; c_s 和 c_p 分别为S波与P波波速; G 为介质剪切模量。 c_s 、 c_p 、 G 分别通过式(8)~(10)求得:

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (8)$$

$$c_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (9)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (10)$$

式中, E 和 ν 分别为结构材料的弹性模量和泊松比。经计算,本文中前缘设置黏弹性边界的参数如下:

$$K_{BT} = 287\ 356.3, C_{BT} = 244\ 948.9$$

$$K_{BN} = 574\ 712.6, C_{BN} = 458\ 257.6$$

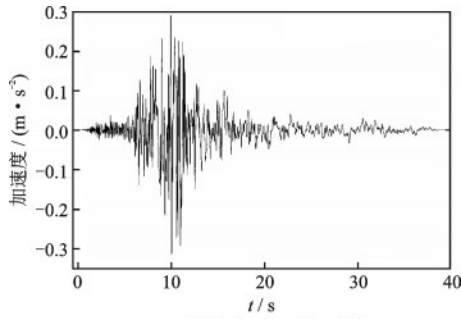
后缘设置黏弹性边界的参数如下:

$$K_{BT} = 268\ 336.3, C_{BT} = 244\ 948.9$$

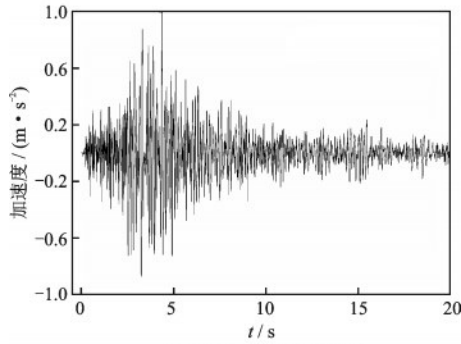
$$K_{BN} = 536\ 672.6, C_{BN} = 458\ 257.6$$

2.3 地震动选取

为全面研究不同地震动对边坡边界范围截取的影响,选取了两条频谱成分有较大差异的强震动记录作为地震动输入,分别记为M1和M2,其加速度时程曲线如图3所示、傅里叶谱如图4所示。M1为1979年10月15日的美国帝国谷(Imperial Valley)7.1级地震的USGS STATION 5115台站的强震动记录,该震动的主要频率成分的频段为 $2 \sim 10 \text{ Hz}$,即周期为 $0.1 \sim 0.5 \text{ s}$;M2为1971年02月09日的美国加州圣费南多(San Fernando)6.6级地震



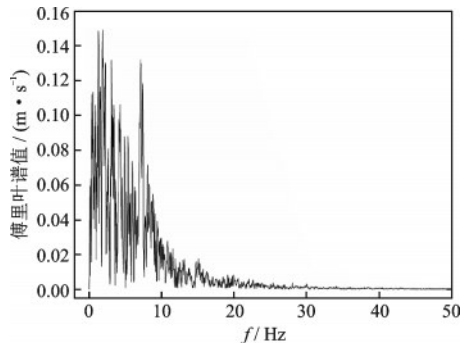
(a) 地震动M1加速度时程



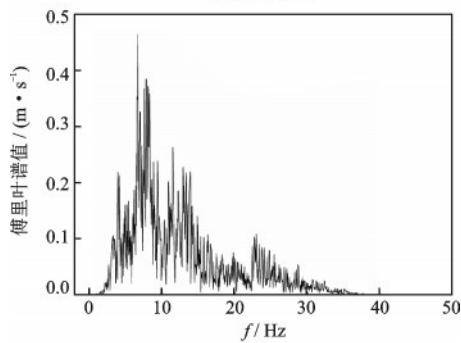
(b) 地震动M2加速度时程

图3 输入地震动加速度时程

Fig.3 Time history of input acceleration



(a) 地震动M1



(b) 地震动M2

图4 输入地震动傅里叶谱

Fig.4 Fourier spectra of the input wave

的 USGS STATION 126 台站强震动记录, 该地震动的主要频率成分的频段为 4~15 Hz, 即周期为 0.07~0.25 s。

本文研究的边坡模型的土体 S 波波速为 122.5 m/s, 计算得到输入地震波 M1 和 M2 的主要波长分别为 12~61 m 和 8~31 m。本文研究的模型高为 50 m、坡长约为 45 m, 分别位于两条地震波波长的范围内和范围外, 这样可更全面地研究不同特性地震作用下边坡边界范围的选取问题。

3 边界选取合理范围分析

本文在施加地震荷载即计算动力步前进行了初始应力场的平衡, 在 GEOSTATIC 步中, 通过抵消土体的初始应力, 实现初始应力场的平衡。

3.1 前缘截取合理范围确定

分别计算两条地震动作用下边坡前缘尺寸为 1.0h、1.5h、2.0h、2.5h 以及前缘设置黏弹性边界时边坡的地震响应, 提取 A、B、C 各观测点的加速度最大响应值, 计算得到相对于输入地震动的峰值加速度放大系数, 见表 1。

为更明了地研究边界范围对边坡模拟计算结果的影响, 提取上表中两条地震动作用下各观测点的 PGA 放大系数与边界范围的关系, 如图 5 所示。图 5 中横坐标“3.0”表示设置黏弹性边界时的计算结果。并将以上得到不同边界范围的峰值加速度放大系数与前缘设置黏弹性边界条件下观测点的放大系数作比较, 得到相对误差曲线, 如图 6 所示。

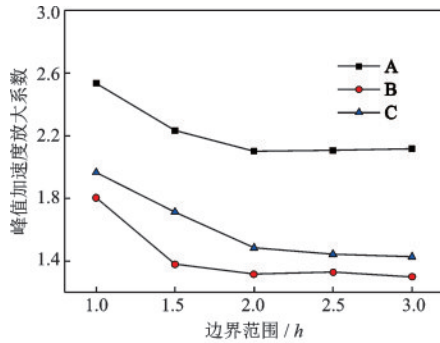
如图 5 所示, 当作用于两条不同频谱特性地震动时, 前缘尺寸对边坡地震响应的影响规律较为一致, 即当前缘尺寸大于 2 倍坡高尺寸后, 计算结果不随后缘尺寸变化而发生明显改变, 而是趋于稳定, 且结果近于施加黏弹性边界的模型计算结果。同时, 由图 5 可知, 坡体对低频成分较多的地震动 M1 产生了放大效应, 而对富含高频成分的地震动 M2 则相反, 坡顶输出的峰值加速度小于输入地震动峰值加速度, 说明坡体对高频地震动产生了抑制作用。

图 6 结果表明, 当前缘尺寸大于 2 倍坡高尺寸后, 远置固定边界与黏弹性边界的计算结果相对误差均小于 5%, 这个误差在工程中是可以接受的^[14]。

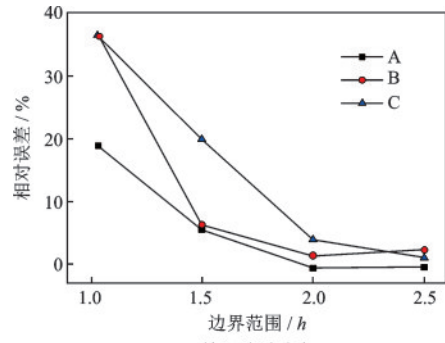
表1 不同前缘范围的各观测点PGA及PGA放大系数

Table 1 PGA and coefficients of amplification for PGA of the observation points in different leading edge

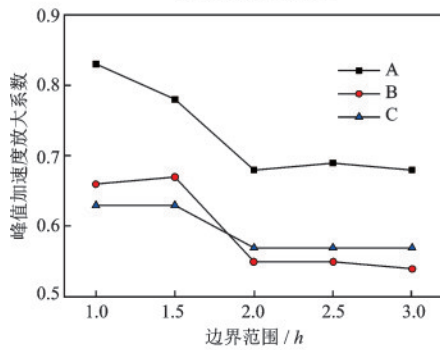
输入地震动	边界尺寸	A		B		C	
		峰值加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大系数	峰值加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大系数	峰值加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大系数
M1	1.0h	0.799	2.54	0.569	1.81	0.620	1.97
	1.5h	0.704	2.23	0.435	1.38	0.540	1.71
	2.0h	0.663	2.10	0.415	1.32	0.468	1.49
	2.5h	0.664	2.11	0.419	1.33	0.455	1.44
	黏弹性边界	0.667	2.12	0.410	1.30	0.450	1.43
M2	1.0h	0.779	0.78	0.610	0.61	0.579	0.58
	1.5h	0.732	0.73	0.615	0.62	0.585	0.58
	2.0h	0.631	0.63	0.499	0.50	0.522	0.52
	2.5h	0.644	0.64	0.504	0.50	0.518	0.52
	黏弹性边界	0.629	0.63	0.490	0.49	0.520	0.52



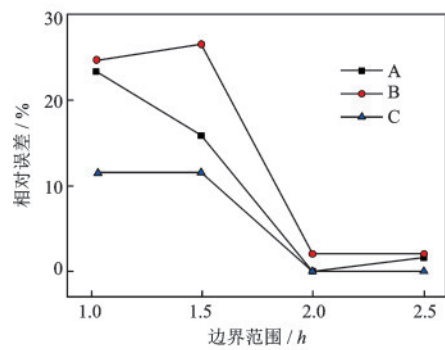
(a) 输入地震动为M1



(a) 输入地震动为M1



(b) 输入地震动为M2



(b) 输入地震动为M2

图5 不同前缘范围的各观测点PGA放大系数

Fig.5 Coefficients of amplification for PGA of the observation points in different leading edge

图6 不同前缘范围的相对误差变化曲线

Fig.6 Variation of relative errors for different leading edge

3.2 后缘截取合理范围确定

分别计算两条地震动作用下边坡后缘尺寸为2.0h、3.0h、4.0h、5.0h以及前缘设置黏弹性边界时边坡的地震响应,提取A、B、C各观测点的加速度响应,计算得到相对于输入地震动的峰值加速度放大系数见表2。

同样,为更明了地研究边界范围对边坡模拟计算结果的影响,提取表2中两条地震动作用下各观测点的PGA放大系数与边界范围的关系,如图7所示。其中横坐标中的“6”为设置黏弹性边界时的计算结果。将以上得到不同边界范围的峰值加速度放大系数与后缘设置黏弹性人工边界条件下观测点的放大系数作比较,得到相对误差曲线,如图8所示。

表2 不同后缘范围的各观测点PGA及PGA放大系数

Table 2 PGA and coefficients of amplification for PGA of the observation points in different trailing edge

输入地震动	边界设置	A		B		C	
		峰值加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大系数	峰值加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大系数	峰值加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大系数
M1	2.0h	0.799	2.54	0.569	1.81	0.620	1.97
	3.0h	0.599	1.90	0.505	1.60	0.427	1.35
	4.0h	0.601	1.91	0.484	1.54	0.421	1.34
	5.0h	0.594	1.89	0.476	1.51	0.416	1.32
	黏弹性边界	0.585	1.86	0.482	1.53	0.412	1.31
M2	2.0h	0.737	0.74	0.610	0.61	0.579	0.58
	3.0h	0.694	0.70	0.592	0.59	0.576	0.58
	4.0h	0.619	0.62	0.569	0.57	0.555	0.56
	5.0h	0.617	0.62	0.540	0.54	0.535	0.54
	黏弹性边界	0.624	0.62	0.553	0.55	0.540	0.54

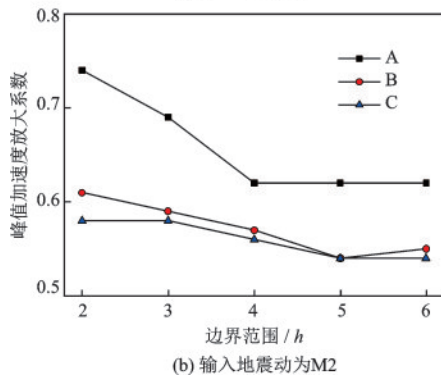
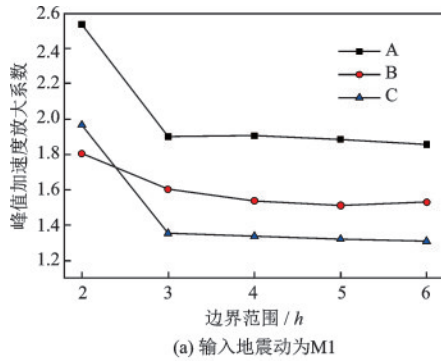


图7 不同后缘范围的各观测点PGA放大系数

Fig.7 Coefficients of amplification for PGA of the observation points in different trailing edge

由图7可知,当作用于两条不同频谱特性地震动时,后缘尺寸对边坡地震响应的影响规律有所差异。在低频成分较多的地震动M1作用下,当后缘尺寸大于3倍坡高尺寸后,坡体临空面各点的加速度响应值不随后缘尺寸变化而发生明显改变,趋于稳定,且接近于施加黏弹性边界模型计算结果。同样,分析远置固定边界与黏弹性边界的计算结果的

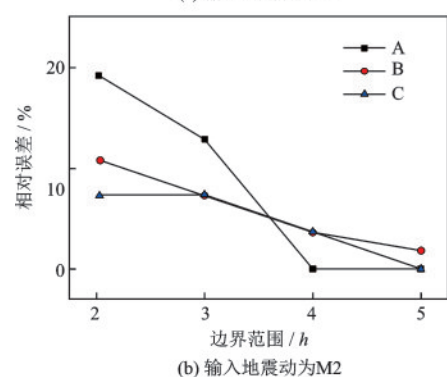
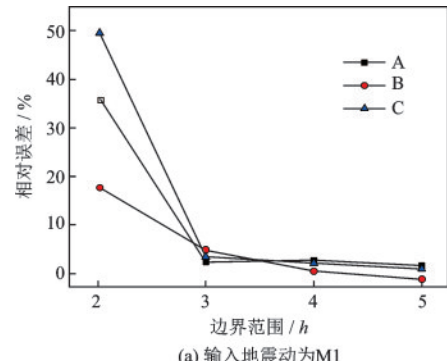


图8 不同后缘范围的相对误差变化曲线

Fig.8 Variation of relative errors for different trailing edge

相对误差,如图8所示,不难发现当后缘尺寸大于3倍坡高尺寸后,相对误差均小于5%,说明此时计算结果可满足工程需求^[14]。而在富含高频成分的地震动M2的作用下,当边坡后缘尺寸大于4倍坡高后,计算结果才趋于稳定,远置固定边界与黏弹性边界的计算结果的相对误差均小于5%。

与3.1节中的结论相似,在本节的计算结果中,坡体同样对低频地震动产生了放大效应,对高频地

震动产生了抑制作用。

4 边坡地震稳定性分析

对地震动力数值模拟中边坡边界范围选取的研究旨在更准确地运用到边坡地震稳定性的模拟分析中。为此,在上述研究的基础上,建立两个边坡模型作为算例,采用有限元强度折减法计算分析边坡地震稳定性安全系数。图9为两个模型的示意图,其中实线部分为远置边界模型,虚线部分为黏弹性边界模型以作对比计算。坡体的物理力学参数如上文,输入地震动采用上文中的M1。

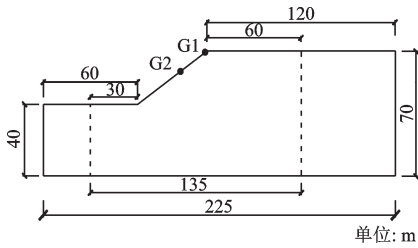


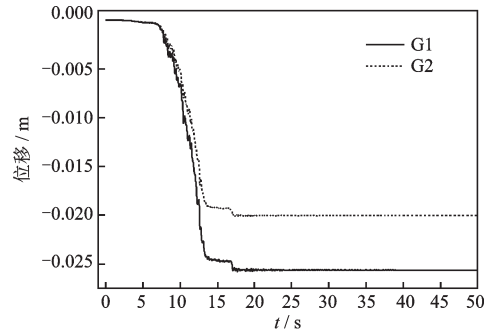
图9 边坡有限元计算模型

Fig.9 Finite element model of the slope

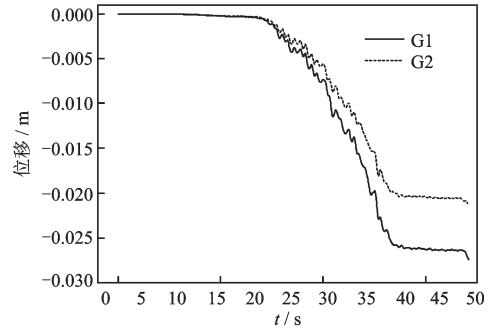
运用有限元强度折减法分析边坡稳定性的原理是对土体的强度参数按照折减系数逐渐降低,直至边坡发生破坏以探寻边坡的稳定性安全系数。在判别边坡是否失稳破坏时,静力和动力问题会有所差别^[15-16],采用郑颖人等^[17]提出的滑体位移变化趋势结合计算是否收敛、塑性区是否贯通的方法,即地震作用时,观察坡面滑体特征点最终位移的发展趋势,如果陡然增大并计算不收敛,伴随塑性区贯通则说明边坡处于失稳状态,如果保持不变或者变小则说明边坡未处于失稳状态。

在计算远置边界模型的地震安全系数过程中,不断对边坡参数折减,当折减系数为1.09时,从计算结果中提取坡面关键点的竖向位移时程曲线,如图10(a)所示。由图可知地震持续作用39s后,曲线保持水平,说明此时坡体未处于失稳状态;当折减系数为1.10时,地震持续作用17s后计算不能收敛,如图10(b)所示,关键点位移曲线在末期也陡然倾斜,并有持续增大的趋势,说明此时坡体已经处于失稳状态,塑性区贯通导致坡体滑动变形,对应的变形位移云图如图11所示。为此,可以认为在地震动M1作用下所计算边坡的地震安全系数为1.09。

为了验证远置边界在边坡地震稳定性分析中



(a) 折减系数为1.09



(b) 折减系数为1.10

图10 观测点位移—时间曲线

Fig.10 The history curves of observation point displacements

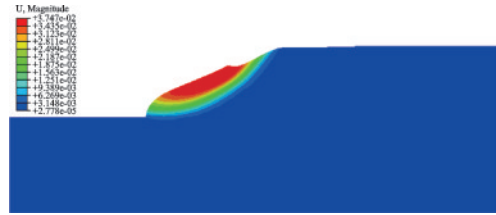


图11 边坡变形位移云图

Fig.11 Slope deformation contour

的准确性,本文采用同样方法计算了设置黏弹性边界时边坡的地震安全系数以作对比分析。经过多次折减后模拟计算得到设置黏弹性边界时边坡的地震安全系数为1.11。这与远置边界情况下得到的地震安全系数1.09比较接近,从而验证了远置边界在边坡地震稳定性分析中的可用性。

5 结论

(1)通过对不同尺寸模型和施加黏弹性边界模型计算结果的对比分析,认为在土质边坡地震响应数值模拟计算中,模型边界范围的大小对坡体动力响应有着显著的影响,但其影响随计算边界离斜坡的距离的增加减小。具体表现为:当前缘尺寸大于2倍坡高尺寸、后缘尺寸大于4倍坡高尺寸时,模拟计算结果趋于稳定,且与施加黏弹性边界工矿结果相比误差均小于

5%。由此说明在土质边坡地震响应数值模拟计算中,模型的前缘尺寸应截取坡高的2倍以上,后缘尺寸应截取坡高的4倍以上,这样的模型范围可以避免模型边界的反射地震波叠加效应对坡体临空面响应的影响,从而得到足够准确的模拟结果。

(2)坡体对低频成分较多的地震动产生了放大效应,而对富含高频成分的地震动则相反,表现出了抑制作用。

(3)通过计算分析地震作用下远置边界模型和黏弹性边界模型的边坡安全系数,发现两者较接近,说明远置边界可以很好地运用到边坡地震稳定性分析中。

值得注意的是,虽然本文研究考虑了地震动不同特性的影响效应,但对于边坡本身的形貌、尺寸的影响效应尚未研究。因此,结论将更好地适用于和本文边坡模型相似的情况。

参考文献:

- [1] Lysmer J, Kulemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1969, 95(4): 759-877.
- [2] Smith W D. A non-reflecting plane boundary for wave propagation problems [J]. Journal of Computational Physics, 1974, 15: 492-503.
- [3] Clayton R, Engquist B. Absorbing boundary condition for acoustic and elastic wave equations[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1977, 67 (6) : 1529-1540.
- [4] Clayton R, Engquist B. Absorbing boundary conditions for wave-equation migration [J]. Geophysics, 1980, 45(5): 895-904.
- [5] 廖振鹏, 黄孔亮, 杨柏坡, 等. 暂态波透射边界[J]. 中国科学, 1984, 27(6): 556-564.
Liao Z P, Huang K L, Yang B P, et al. Transient wave transmission boundary [J]. Scientia Sinica, 1984, 27 (6): 556-564. (in Chinese)
- [6] Alterman Z S, Karal F C J. Propagation of elastic waves in layered media by finite-difference methods[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58: 367-398.
- [7] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 第二版. 北京: 地震出版社, 2006: 132-144.
Hu Y X. Earthquake engineering [M]. Second Edition. Beijing: Seismological Press, 2006: 132-144. (in Chinese)
- [8] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 98-104.
Liu J B, Du X L. Structural dynamics [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004: 98-104. (in Chinese)
- [9] 工程地质手册编委会. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 22-28.
Editorial board of engineering geology manual. Engineering geology manual (4th Edition) [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2006: 22-28. (in Chinese)
- [10] 李小军, 廖振鹏. 时域局部透射边界的计算飘移失稳[J]. 力学学报, 1996, 28(5): 627-632.
Li X J, Liao Z P. The drift instability of local transmitting boundary in time domain [J]. Acta Mechanica Sinica, 1996, 28(5): 627-632. (in Chinese)
- [11] 章小龙, 李小军, 陈国兴, 等. 黏弹性人工边界等效荷载计算的改进方法[J]. 力学学报, 2016, 48(5): 1126-1135.
Zhang X L, Li X J, Chen G X, et al. An improved method of the calculation of equivalent nodal forces in viscous-elastic artificial boundary [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48 (5) : 1126-1135. (in Chinese)
- [12] 戚玉亮, 大塚久哲. ABAQUS动力无限元人工边界研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 3007-3013.
Qi Y L, Hisanori Otsuka. Study of ABAQUS dynamic infinite element artificial boundary [J]. Rock and soil mechanics, 2014, 35(10): 3007-3013. (in Chinese)
- [13] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1070-1075.
Liu J B, Gu Y, Du Y X. Consistent viscous-spring artificial boundary and viscous-spring boundary element [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1070-1075. (in Chinese)
- [14] 潘旦光, 楼梦麟, 董聪. 土层地震行波反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 308-312.
Pan D G, Lou M L, Dong C. Effect of vertical artificial boundary on seismic response of soil layer under traveling wave excitations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 308-312. (in Chinese)
- [15] Zheng H, Liu D F, Li C G. On the assessment of failure in slope stability analysis by the finite element method [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(4): 629-639.
- [16] 年廷凯, 刘凯, 黄润秋, 等. 地震作用下锚固土质边坡稳定性解析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2009-2016.
Nian T K, Liu K, Huang R Q, et al. Solutions for stability of anchored earth slopes subjected to seismic loading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 2009-2016. (in Chinese)
- [17] 郑颖人, 赵尚毅, 李安洪, 等. 有限元极限分析法及其在边坡中应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011: 205-224.
Zheng Y R, Zhao S Y, Li A H, et al. FEM limit analysis and its application in slope engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2011: 205-224. (in Chinese)

(本文责编: 池营营)