

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.04.013

地震波斜入射下土质边坡的稳定性分析*

王雪艳, 刘超, 尹超, 李伟华

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 地震诱发的边坡失稳是重要的地质灾害类型之一,数值方法是对地震边坡进行分析的一项重要工具。基于黏弹性人工边界,通过将地震记录转化为等效地震荷载实现地震波在场地中的施加;并采用Mohr-Coulomb准则模拟土体的非线性特征。根据非线性有限元软件ABAQUS,建立了双面边坡的数值模型,通过分析地震波在不同角度入射下不同坡角边坡的地震响应,讨论了地震波入射角以及边坡坡角对破坏的影响。结果表明,地震波入射角和边坡形状改变了地震波在坡体内的传播规律,因此影响了边坡的破坏。随着地震波入射角的增加,靠近波源一侧坡面的滑动位移和滑动区域逐渐增加,而远离波源一侧的滑动位移和滑动区域逐渐减小。边坡坡度的增加引起坡面危害的逐渐加剧。本文讨论了不同尺寸边坡在不同地震作用下的破坏规律,从而为地震诱发边坡的失稳破坏提供了理论支撑,具有重要的现实工程意义。

关键词: 地震边坡; 入射角; 坡角; 黏弹性人工边界; 等效荷载; 非线性

中图分类号: TU43;P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)04-0589-07

Stability Analysis of Soil Slopes with Oblique Incident Seismic Waves

WANG Xueyan, LIU Chao, YIN Chao, LI Weihua

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Earthquake-induced slope instability is one of the important types of geological disasters. Numerical method is an important tool to analyze earthquake induced landslides. Based on the visco-elastic artificial boundary, seismic wave was applied on the site by converting seismic records to equivalent seismic loads. Mohr-Coulomb criterion was adopted to simulate the nonlinear characteristics of soil. Based on the nonlinear finite element software ABAQUS, the seismic numerical analysis model of a double-sided slope was established to analyze the slope stability at different slope angles together with the varied angles of wave incidence. Then, the impact of the incident angles and the slope angles was discussed according to the slope failure modes. The results indicated that incident angles of seismic waves and slope angles changed the propagation paths of the seismic waves, and thus controlled the failure mode of the slope. With the increase of the wave incident angle, the sliding displacements and the sliding areas gradually increased at the slide near the epicenter, and decreased at the slide away from the epicenter. The slope angle controlled the slope stability, i.e., the steeper the slope was, the more serious the failure occurred. The slope failure was discussed at different seismic events. The results provided theoretical support for slope failure mitigation under earthquake events and had

* 收稿日期:2019-07-01;修回日期:2019-09-17

作者简介:王雪艳(1998-),女,本科。主要从事边坡工程方面的研究。Email:16231047@bjtu.edu.cn

通讯作者:尹超(1989-),男,博士研究生。主要从事地震工程研究。Email:robiny@bjtu.edu.cn

important practical engineering significance.

Keywords: earthquake induced slope; incident angle; slope angle; viscoelastic artificial boundary; equivalent load; non-linearity

引言

我国是一个多山地,多地震的国家。由地震引发的山体滑坡是山地地区最危险的次生灾害之一。因此,讨论和分析地震诱发边坡失稳是岩土工程和地震工程领域一个重要的研究课题。

在众多对地震诱发边坡失稳的分析中,数值方法以其良好的精度和经济效益广泛应用于现阶段的设计和计算中。然而目前采用数值方法分析地震诱发的边坡失稳问题时,大多假设地震波以垂直入射的方式进入模型。张江伟等^[1]基于有限元强度折减法,对地震作用下土质边坡稳定性状态判定方法进行了研究。杨长卫等^[2]采用离散元法并结合振动台试验对双面高陡边坡的破坏机理进行了探讨。郑颖人等^[3]基于FLAC软件对地震边坡的破坏机制进行数值分析,指出在地震作用下边坡既包括剪切破坏也包括张拉破坏。尹超等^[4]基于ABAQUS软件对地震作用下产生的张拉-剪切破坏作用进行了对比和验证,指出在地震作用下张拉作用对边坡的稳定性影响很大。张泽林等^[5]讨论了地震波振幅对边坡地震动响应的影响规律。邹焜等^[6]通过将矢量和法与动力有限元法结合,计算三维边坡的动力稳定性分析。王军等^[7]以兰州南坡坪地区多级高边坡工程为依托,建立边坡有限元模型,模拟分析边坡的抗震性,研究在地震作用下坡高和坡角的变化对黄土高边坡稳定性的影响。裴广龙等^[8]分析了几何参数和强度参数对边坡稳定性的影响。虽然有大量学者对地震边坡的稳定性进行了分析,但是这些学者的结论均是基于地震波垂直入射时得到的,并未考虑地震波入射角度的影响。

众所周知,当待研究场地距离震源较近时,地震波是以一定角度倾斜进入场地的,由此引发的地震响应也必然与假设垂直入射时引起的地震响应不同。根据X.Jin等^[9-10]对美国和日本大量的真实地震记录进行的回归分析,也指出在地表面处地震波的入射角大约为 57.3° ,并非垂直的 90° 。因此,若在计算过程中将地震波假设为垂直入射,实际是对地

震诱发边坡失稳的一种过分简化,不仅会影响边坡的地震响应,还可能会进一步导致对地震诱发边坡破坏的错误结论。本文通过数值模拟讨论地震波入射角对边坡破坏的影响,从而丰富了山地区域地震安全评价的标准。

1 数值方法中地震波的施加

1.1 黏弹性人工边界的建立

在有限元中模拟地震波的输入需要在半无限空间中人为截取有限的研究区域,并在截断边界处添加人工边界达到对散射波吸收的目的。黏弹性人工边界是一种较为准确的应力型人工边界,通过在截断的边界处设置一系列由弹簧与阻尼并联作用的弹簧-阻尼物理系统,从而模拟散射波向远场的传播过程(图1)。

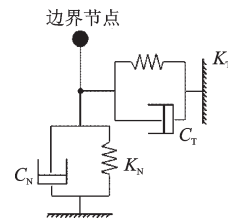


图1 简化后黏弹性边界的弹簧和阻尼系统

Fig.1 The springs and dashpots of the viscous-spring boundary after simplification

采用刘晶波等^[11]修正后的黏弹性人工边界。在边界的每一个节点处都添加法向和切向的黏弹性人工边界,如图2所示。黏弹性人工边界的参数见式(1)和式(2)。

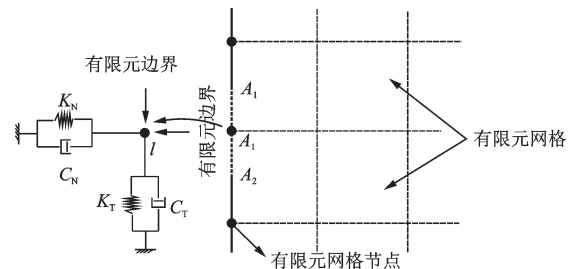


图2 二维黏弹性人工边界

Fig.2 viscoelastic artificial boundary in two dimension

法向边界:

$$K_N = \alpha_N \frac{G}{R} \cdot A, C_N = \rho c_p \cdot A \quad (1)$$

切向边界:

$$K_T = \alpha_T \frac{G}{R} \cdot A, C_T = \rho c_s \cdot A \quad (2)$$

式中, K_N 、 K_T 分别为法向与切向弹簧刚度系数; C_N 、 C_T 分别为法向与切向阻尼系数; R 为散射波源至人工边界的距离, 可简单地取为近场结构几何中心到人工边界点所在边界线的距离; G 为介质剪切模量; ρ 为介质质量密度; α_N 与 α_T 分别为法向与切向黏性人工边界的修正系数, 具体取值可参考文献[12]; A 为边界节点所代表的面积; c_p 与 c_s 分别为 P 波和 S 波波速。

1.2 等效地震荷载的施加

由于在有限元模型中设置了人工边界, 因此如何将真实地震记录输入模型进行计算是另一个重点和难点问题。通常的做法是将地震记录转化为等效地震荷载, 并施加在边界的每个节点上, 以实现地震波输入的目的^[13]。其核心公式为:

$$\sigma_l(x, y, t) = \sigma_0(x, y, t) + C\dot{u}(x, y, t) + Ku(x, y, t) \quad (3)$$

式中, $\sigma_l(t)$ 为边界节点 l 处的等效节点力; $\sigma_0(x, y, t)$ 为连续介质中由原自由场产生的应力; K 和 C 分别为黏弹性人工边界的法向和切向弹簧刚度系数和阻尼系数; $u(x, y, t)$ 和 $\dot{u}(x, y, t)$ 分别为入射波场的位移和速度。

与垂直入射的地震波所不同, 斜入射的体波(P 波和 SV 波)在自由表面会发生波型转换, 入射 SV 波在自由表面处会同时反射 SV 波和 P 波, 如图 3 中描述的斜入射模型。假设地震波从左侧以一定倾斜角度入射到研究区中, 则左边界的 A 点既受到来自入射 SV 波的影响, 同时还会受到来自自由表面反射的 SV 波和 P 波的影响。因此地震波的倾斜入

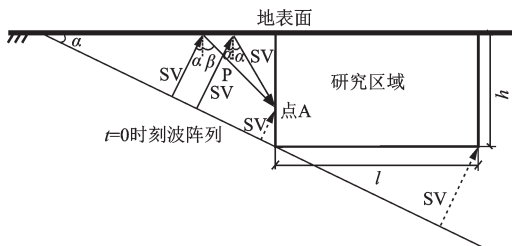


图 3 SV 波斜入射模型

Fig. 3 Model with oblique SV-wave incidence

射不仅会使问题更加复杂也会明显改变场地的地震响应。

2 方法验证

2.1 黏弹性人工边界有效性验证

为了验证黏弹性人工边界的有效性和合理性, 对弹性半空间表面施加竖向作用集中荷载的 Lamb 问题进行分析。截取 (50×50) m 的有限区域进行计算, 如图 4 所示。底面和两侧分别布设黏弹性边界和黏性边界, 同时以 (400×400) m 有限区域的固定边界模型解作为扩展解。地表集中荷载作用于有限元模型的表面中心处。输入的集中荷载为单一脉冲荷载, $p(t) = p_0 \cdot f(t)$, 其中 $P_0 = 50$ kN, $T_0 = 0.25$ s。 $f(t)$ 的曲线如图 5 所示, 其表达式为:

$$f(t) = 16 \left[G \left(\frac{t}{T_0} \right) - 4G \left(\frac{t}{T_0} - \frac{1}{4} \right) + 6G \left(\frac{t}{T_0} - \frac{1}{2} \right) - 4G \left(\frac{t}{T_0} - \frac{3}{4} \right) + G \left(\frac{t}{T_0} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

式中, $G(x) = (x)^3 H(x)$, 其中 $H(t)$ 为 Heaviside 阶梯函数。

图 6 给出 A、B 两点的竖向位移时程曲线, 由图中可以看到固定边界产生明显的振荡, 因此在分析动力问题时, 若边界为固定边界, 则会导致能量在模型中无法扩散出去, 从而出现反复振荡, 导致错误的结果。黏弹性边界对散射波具有较好的吸收能力, 与扩展解吻合较好, 可以很好的模拟远场地基的辐射阻尼。黏性地基由于缺乏弹簧提供的恢复力, 因此相比黏弹性边界, 不能很好模拟地基的

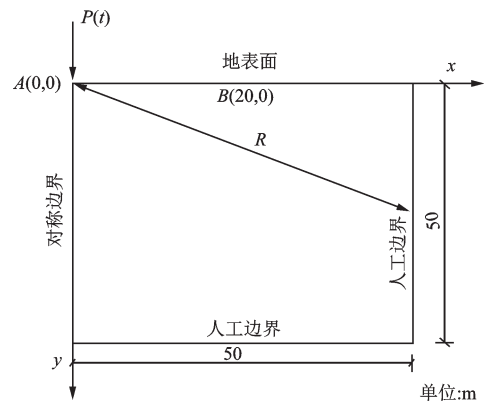


图 4 黏弹性人工边界内源验证模型

Fig. 4 Verification of the inner-source model of viscoelastic artificial boundary

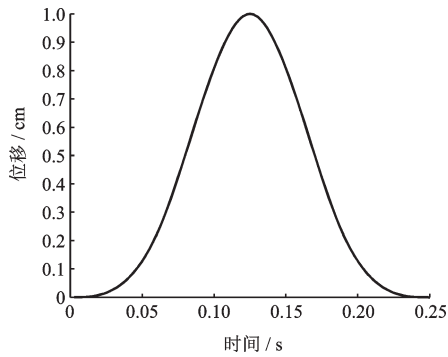
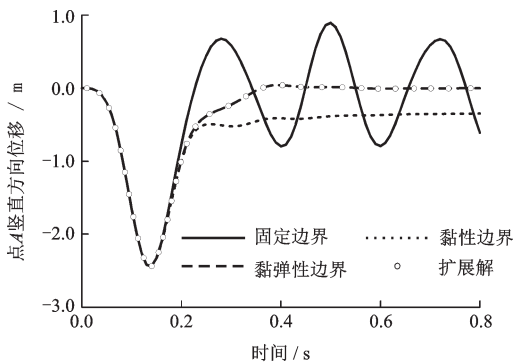
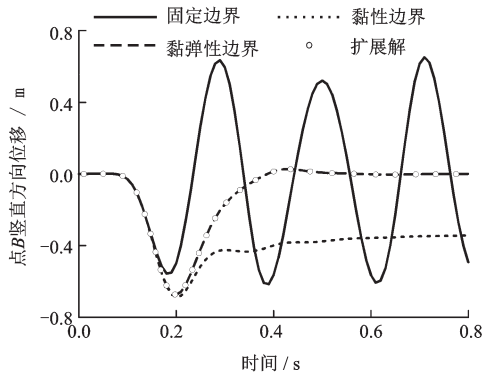


图5 脉冲函数 $f(t)$ 时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of pulse function $f(t)$



(a) 点A



(b) 点B

图6 监测点竖向位移时程曲线

Fig. 6 The vertical displacement time-history curve of the monitoring points

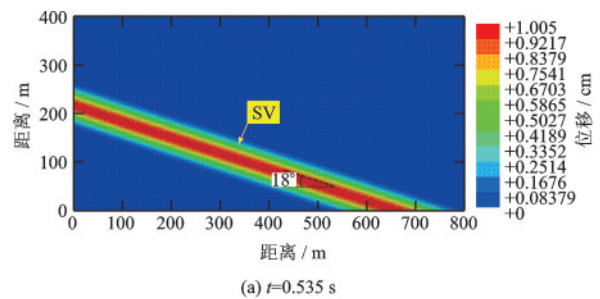
恢复特性,因此黏性边界不能使地基恢复到初始状态。综上,黏弹性边界的模拟精度更高。

2.2 外源问题自由场验证

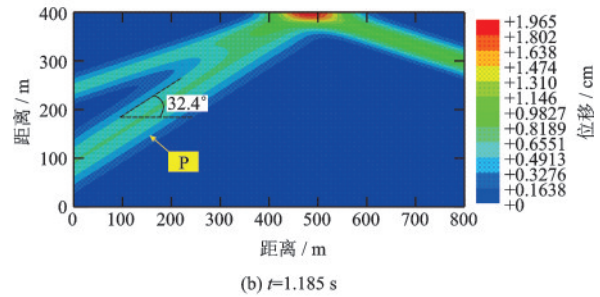
基于ABAQUS有限元软件,设置 (800×400) m的二维平面应变弹性研究区,选用一宽为0.25 s,持时2 s,振幅为1 cm的狄拉克脉冲作为入射波,并在模型四周布设一系列由并联弹簧-阻尼单元组成的黏弹性人工边界。入射波为倾斜 18° 入射的SV

波,给出了不同时刻的位移场快照。然后提取底部中点的位移时程曲线并与相应的解析解进行对比。

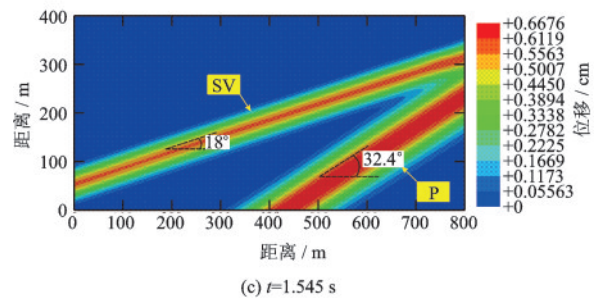
图7给出了SV波以 18° 倾斜输入时均匀半空间的位移场云图。从图7中可以看到以一倾斜波阵面进入有限区域的SV波经地表反射产生的反射SV波和反射P波及其在半空间的叠加情况。图8给出了监测点A和监测点B两点水平方向位移 U_x 和竖直方向位移 U_y 的时程曲线,从图8中可以看出,数值解与理论解吻合,验证了SV波在斜入射下地震波输入的正确性。



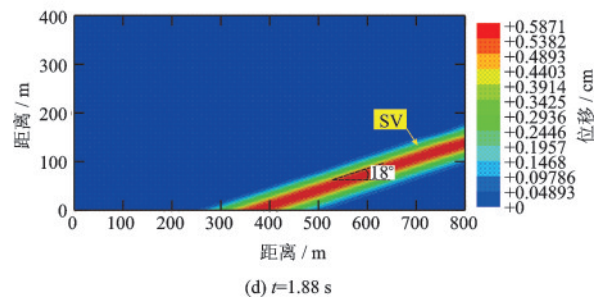
(a) $t=0.535$ s



(b) $t=1.185$ s



(c) $t=1.545$ s



(d) $t=1.88$ s

图7 SV波斜入射 18° 半空间位移云图

Fig. 7 Snapshot of displacement contours of SV-waves with 18° incidence in the half space

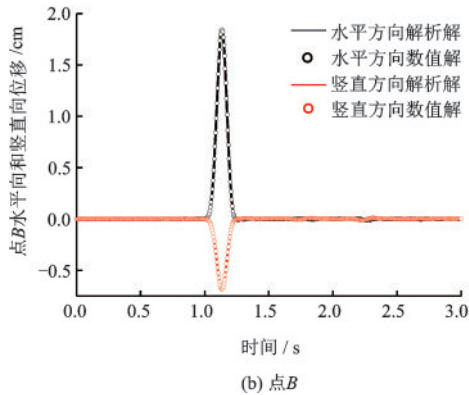
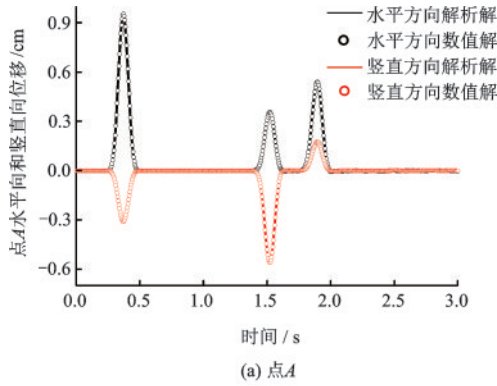


图8 SV波以18°入射时监测点A和B的水平和竖直位移时程曲线

Fig. 8 The displacement time-history curves of U_x and U_y when the SV-waves with an incident angle of 18° at the monitoring points of A and B

3 强度准则

在分析地震诱发边坡失稳的问题时,另一个需要考虑的因素是强度准则的选取。一般来说,Mohr-Coulomb准则是应用最为广泛的强度准则,其参数较少并且具有明确的物理意义。典型的Mohr-Coulomb强度包线如图9所示。因此本文也采用Mohr-Coulomb准则作为强度准则来分析和判断地震诱发边坡的失稳情况。

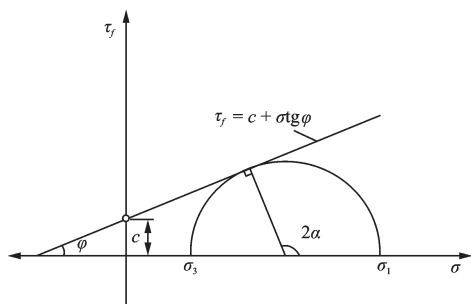


图9 Mohr-Coulomb强度准则示意

Fig.9 The sketch of the Mohr-Coulomb strength criterion

$$\tau = f(c, \varphi, \sigma) \quad (5)$$

式中, c 为黏聚力; φ 为内摩擦角。

在静水应力不大的情况下,屈服曲线常将 φ 视为常数,从而将曲线简化为直线来代替,因此Mohr-Coulomb强度准则可以表示为:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (6)$$

4 算例与分析

4.1 数值模型建立

本文采用双面边坡作为研究对象,边坡坡角 α 分别为 63.4°、45°、33.7°、26.6°(即高宽比分别为 1:0.5、1:1、1:1.5、1:2),坡高为 100 m,坡顶宽也为 100 m,具体如图 10 所示。其材料的参数指标见表 1。

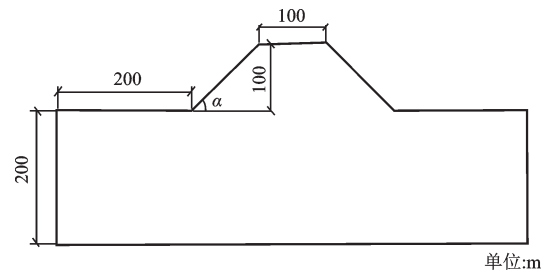


图10 模型尺寸

Fig. 10 The model size of the slope model

表1 模型材料参数

Table 1 The parameters of model materials

| 材料参数 | 地基 | 边坡 |
|---|-------|-------|
| 密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 2 000 | 2 000 |
| 弹性模量 E / MPa | 768 | 100 |
| 泊松比 ν | 0.2 | 0.4 |
| 内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$ | — | 24 |
| 剪胀角 $\psi / (^\circ)$ | — | 0 |
| 黏聚力 c / kPa | — | 42 |

4.2 算例分析

根据建立的模型,假设地震波分别以 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 和 30° 入射到边坡模型中。图 11 和图 12 给出了地震波在不同角度入射时边坡的位移云图、以及不同坡角的边坡模型在地震波 30° 入射时的边坡位移云图。图 13 为不同坡角边坡在不同地震波下的最大位移变化趋势。通过对比分析可以

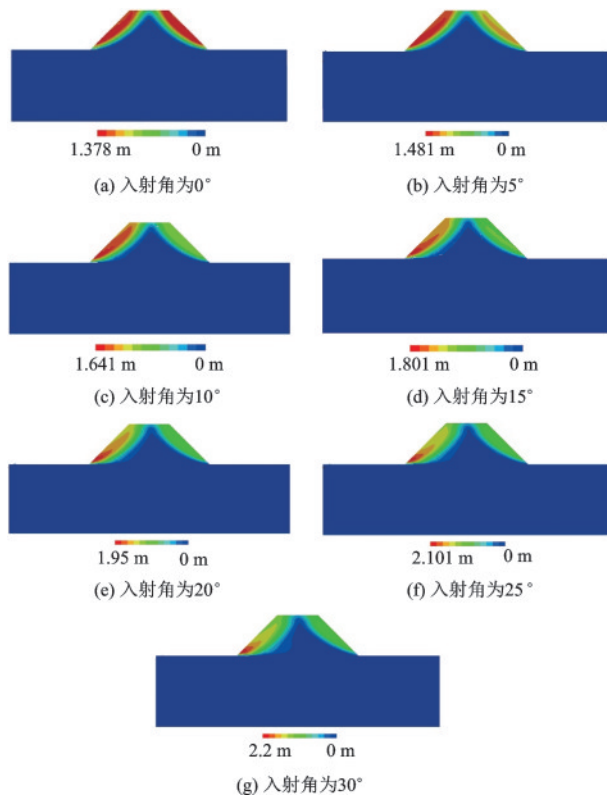


图 11 坡角为 45°(高宽比 1:1)的边坡模型在地震波以不同角度入射时的位移云图
 Fig. 11 Displacement contour of slope model with a slope angle of 45° (aspect ratio 1:1) with different incident angles of seismic waves

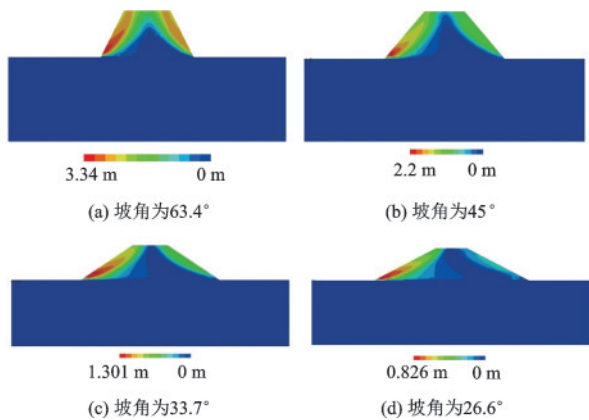


图 12 不同坡角的边坡模型在地震波以 30°入射时的位移云图
 Fig. 12 Displacement contour of slope models with different slope angles at an incident seismic waves angle of 30°

看出,地震波入射角度和边坡坡角均对边坡的破坏产生显著的影响。

随着入射角的增加,左侧坡面的滑动区域逐渐加深,相应的滑动位移也逐渐增大,而右侧坡面的滑动区域逐渐减小,相应的滑动位移逐渐降低。这

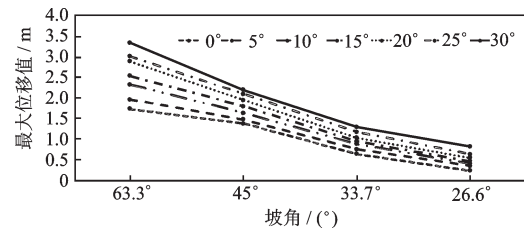


图 13 不同坡角的边坡在地震波以不同角度入射时最大位移变化
 Fig. 13 The maximum displacements of slopes at different slope angles with varied incident directions of seismic waves

是因为随着入射角的增加,更多的地震能量集中在左侧坡面,从而导致破坏的加深,而右侧坡面由于受到的聚集地震能量较少,因此其破坏程度逐渐减小。从最大滑动位移来看,当地震波从 0°变化到 30°时,左侧坡面的最大滑动位移增加超过 30%,而右侧坡面的最大滑动位移减少接近 25%。

当入射角不变时,随着边坡的坡度变缓,左右两侧坡面的滑动区域均逐渐减小,而其相应的滑动位移均逐渐降低。

根据上述分析可知,边坡的坡角改变了静力状态下的边坡稳定性。随着坡度变陡,坡面危害逐渐加剧。此外,地震波的入射角由于改变了其在坡体内部的传播特性,因此影响了边坡的失稳破坏。靠近震源一侧的坡面危害逐渐加剧而远离震源一侧的坡面危害逐渐减轻。综上,若我们仍然采用垂直入射的地震波来分析边坡的稳定性,那么靠近震源一侧的坡面偏危险。从工程安全的角度考虑,我们应该讨论和分析不同入射角度作用下边坡的稳定性。

5 结 论

(1) 通过将真实地震计算转化为等效地震荷载,在数值模拟中实现了地震波斜入射的施加,通过与理论解进行对比,验证了本文地震波输入方法的正确性。

(2) 在非线性地震响应中,不同角度入射的地震波对非线性地震响应产生的位移有明显影响。随着入射角度的增加,靠近震源一侧坡面的位移增加,偏危险;而远离震源一侧坡面的位移减小,偏安全。

(3) 在非线性地震响应中,边坡坡角的改变对边坡的失稳破坏有显著的影响,坡度减缓可增加边坡的稳定性,坡角越大,边坡越陡,坡面危害逐渐

加剧。

综上,地震波入射角、边坡坡角是分析地震边坡稳定性中重要的影响因素。然而本文的结果是基于假定的理想边坡得到的,而边坡的其他尺寸也必然对边坡的破坏产生影响。因此,在后续的分析和研究中,可通过改变边坡的其他尺寸(如:坡高)对边坡的失稳破坏进行进一步的分析和研究。

参考文献:

- [1] 张江伟,李小军,王晓明,等.土质边坡地震稳定性状态判定方法研究[J].岩土工程学报,2018,40(11):2096-2102.
Zhang J W, Li X J, Wang X M, et al. Method for judging seismic stability state of soil slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (11) : 2096-2102.(in Chinese)
- [2] 杨长卫,张建经.双面高陡边坡的地震滑坡响应分析[J].西南交通大学学报,2013,48(3):415-422.
Yang Ch W, Zhang J J. Landslide responses of high steep hill with two-side slopes under ground shaking[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48 (3):415-422.(in Chinese)
- [3] 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 Y R, Ye H L, Huang R Q. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8):1714-1723.(in Chinese)
- [4] 尹超,李伟华,李舰,等.考虑拉剪耦合作用地震边坡稳定性分析[J].中国公路学报,2018,31(2):97-105.
Yin Ch, Li W H, Li J, et al. Stability analysis of seismic slope considering tensile shear coupling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31 (2) : 97-105. (in Chinese)
- [5] 张泽林,吴树仁,王涛,等.地震波振幅对黄土-泥岩边坡动力响应规律的影响[J].岩土力学,2018,39(7):2403-2412,2450.
Zhang Z L, Wu Sh R, Wang T, et al. Influence of seismic wave amplitude on dynamic response of loess-mudstone slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39 (7): 2403-2412,2450.(in Chinese)
- [6] 邹焯,郭明伟,王水林,等.地震荷载下三维边坡动力稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2017,36(5):138-148.
Zou Y, Guo M W, Wang Sh L, et al. Dynamic stability analysis of three dimensional slopes under seismic loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(5):138-148.(in Chinese)
- [7] 王军,马学宁.地震作用下坡高和坡率对黄土高边坡稳定性的影响研究[J].路基工程,2018,199(4):116-120.
Wang J, Ma X N. Study on influence of slope height and slope ratio on stability of loess high slope under earthquake [J]. Subgrade Engineering, 2018, 199(4) : 116-120.(in Chinese)
- [8] 裴广龙,王宏权,林贻谛,等.不同参数对地震边坡稳定性的影响研究[J].低温建筑技术,2014,36(10):98-100.
Pei G L, Wang H Q, Lin L D, et al. Influence of different parameters on stability of seismic slope [J]. Low-Temperature Architecture Technology, 2014, 36(10) : 98-100.(in Chinese)
- [9] Jin X, Liao Z P. Statistical research on S-wave incident angle [J]. Earthquake Research in China, 1994, 8(1) : 121-131.
- [10] Takahiro S, Kazuhiko K, Yoichi S, et al. Estimation of earthquake motion incident angle at rock site [C]// Proceedings of 12th World Conference Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand: [s.n.], 2000, 956: 1-8.
- [11] 刘晶波,吕彦东.结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法[J].土木工程学报,1998,31(3):55-64.
Liu J B, Lyu Y D. A direct method for analysis of dynamic soil-structure interaction [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3) : 55-64.(in Chinese)
- [12] 杜修力,赵密,王进廷.近场波动模拟的人工应力边界条件[J].力学学报,2006,38(1):49-56.
Du X L, Zhao M, Wang J T. A stress artificial wave boundary in fea for near-field problem [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(1) : 49-56.(in Chinese)
- [13] 刘晶波,杜义欣,闫秋实.粘弹性人工边界及地震动输入在通用有限元软件中的实现[J].防灾减灾工程学报,2007,27(增1):37-42.
Liu J B, Du Y X, Yan Q Sh. Realization of viscoelastic artificial boundary and ground motion input in general finite element software [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2007, 27 (Sup1) : 37-42.(in Chinese)

(本文责编:周小潭)