

层状边坡的地震动输入方法研究

毕仲辉, 张燎军, 翟亚飞, 唐彧杰, 张汉云

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:层状边坡是自然界中最常见的边坡之一,研究其动力响应规律对边坡的稳定性评价具有重要意义。为真实模拟弹性波在层状地基中的传播过程,首先建立层状地基的黏弹性人工边界模型,然后根据波动力学理论推导了考虑介质交界面的一次反射的等效荷载计算公式,并通过两层地基算例验证该输入方法的精度;针对层状边坡,采用本文提出的地震动输入方法和一种传统的输入方法分别研究其动力响应规律。研究表明:在两层地基算例中,本文提出的地震动输入方法能较好满足工程抗震的精度要求;在边坡的动力分析中,与传统方法相比,采用本文方法的边坡塑性应变能累积效应更加明显,且动力安全系数相对较小。

关键词:层状边坡;波幅比;黏弹性人工边界;地震响应;动力稳定性

中图分类号:TV16

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2021)04-0214-07

Seismic input method of layered slopes

BI Zhonghui, ZHANG Liaojun, ZHAI Yafei, TANG Yujie, ZHANG Hanyun

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Layered slopes are very common in nature, the study of its dynamic response is of great significance to the evaluation of slope stability. In order to simulate the propagation process of elastic waves in layered foundation, the viscous-elastic artificial boundary model of layered foundation is established firstly, and then the equivalent load calculation formula considering the primary reflection of medium interface is derived according to the wave dynamics theory, and the accuracy of the input method is verified by a two-layer foundation example. For layered slopes, the ground motion model proposed in this paper and a conventional input method are used to study the dynamic response law of the foundation. The results show that according to the two-layer foundation example, the proposed ground motion model can better meet the accuracy requirements of the seismic engineering. Compared with the conventional method, the cumulative effect of plastic strain energy of the proposed method is more evident, and its dynamic safety factor is relatively small in the analysis of slope dynamics.

Key words: layered slope; amplitude ratio; viscous-elastic artificial boundary; seismic response; dynamic stability

1 研究背景

我国西部地区因其独特的地质构造和地质环境,常发生地震灾害^[1-2]。其中,地震引发山体滑坡是最常见的地质灾害之一,其具有分布广、数量多、破坏性大的特点^[3]。一批大型水利工程已经在西部建成,库区边坡中有一部分是层状边坡,在地震作用下边坡更容易发生失稳破坏。因此,分析层状边

坡的动力变形破坏机制和研究边坡的动力响应规律十分必要。

已有大量的学者通过振动台模型试验和数值模拟方法对边坡的动力响应规律进行了研究。刘新荣等^[4]基于振动台试验研究了在往复地震作用下边坡的累计损伤对层状岩质边坡稳定性的影响;黄润秋等^[5]通过大型振动台试验,研究了反倾向和顺层向两类结构在强震作用下的地震动力响应;刘汉东

收稿日期:2020-12-29; 修回日期:2021-03-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0404903);国家自然科学基金项目(51709090)

作者简介:毕仲辉(1995-),男,安徽黄山人,硕士研究生,研究方向为水工结构抗震。

通讯作者:张燎军(1962-),男,江苏南京人,博士,教授,研究方向为高坝抗震,水工薄壁结构。

等^[6]开展了地震波频率对反倾向层状岩质边坡影响的试验研究;刘汉香等^[7]进行了层状复合岩体边坡动力特性和动力响应研究的振动台试验。与振动台试验相比,数值模拟方法因成本低和操作方便等优点被广大研究人员采用。刘云鹏等^[8]采用离散元的方法研究了地震作用下反倾软硬互层岩体边坡的动力响应;言志信等^[9]基于 FLAC3D 研究了基岩型层状边坡在地震作用下的响应规律和变形机制;周剑等^[3]基于应力波传播原理分析了层状边坡在地震作用下的损伤机理和破坏模式;周英博等^[10]基于 4 种不同岩质边坡,开展了不同地形地质的地震动传播特性研究。

上述数值模拟方法中动力边界均采用黏性边界,而黏性边界不能真实地模拟地震波的辐射阻尼效应。事实上,在众多的人工边界条件中,黏弹性人工边界可以同时模拟散射波的吸收和边坡边界的弹性恢复能力,因此得到广泛应用。张伯艳等^[11]基于黏弹性人工边界研究了白鹤滩水电站岩石边坡的动力稳定性;尹超等^[12]在边坡的截断边界上采用黏弹性人工边界,研究中考虑了拉剪耦合作用下地震边坡的稳定性;张江伟等^[13]采用黏弹性人工边界模拟了不同地震动参数对边坡动力响应的影响。上述研究在采用黏弹性人工边界模拟边坡的辐射阻尼效应时,均以均质边坡进行模拟,而天然状态下的边坡往往都是呈层状非均质分布。

本文在前人研究成果的基础上,结合波动理论,构建了一种水平层状边坡的地震动输入方法。该方法不仅考虑了散射波的吸收和边坡截断边界的弹性恢复能力,还考虑了弹性波在不同介质中的透射和反射特点。通过对 ABAQUS 的二次开发来实现层状边坡的地震动输入,以此分析地震作用下层状边坡的动力稳定性。

2 层状地基的人工边界

用数值方法模拟结构和地基的相互作用时,考虑到天然地基为半无限域,数值模拟计算量很大,需从天然地基中截取有限的近域地基进行计算,并在近域地基的边界上施加人工边界,模拟无限地基对地震波的辐射阻尼效应^[14-15]。

图 1 为近域层状地基模型示意图,该模型共有 f 层,地震波由模型底部垂直入射,近域边界施加人工边界。

黏弹性人工边界可以用空间连续分布的并联弹簧-阻尼器元件模拟。二维黏弹性人工边界上施加的弹簧和阻尼器参数为^[16]:

$$K_N^f = \alpha_N \frac{G^f}{r} \tag{1}$$

$$C_N^f = \rho^f c_p^f \tag{2}$$

$$K_T^f = \alpha_T \frac{G^f}{r} \tag{3}$$

$$C_T^f = \rho^f c_s^f \tag{4}$$

其中:

$$c_p^f = \sqrt{\frac{\lambda^f + 2G^f}{\rho^f}} \tag{5}$$

$$c_s^f = \sqrt{\frac{G^f}{\rho^f}} \tag{6}$$

式中: K_N^f, K_T^f 分别为第 f 层弹簧的法向刚度、切向刚度, N/m^3 ; C_N^f, C_T^f 分别为第 f 层阻尼器的法向阻尼、切向阻尼, $kg/(m^2 \cdot s)$; α_N, α_T 分别为法向、切向的黏弹性人工边界修正系数^[15], 取 $\alpha_N = 1, \alpha_T = 0.5$; G^f 为第 f 层岩土体的剪切模量, Pa ; r 为波源至人工边界点的距离, m ; ρ^f 为第 f 层岩土体的密度, kg/m^3 ; c_p^f, c_s^f 分别为第 f 层岩土体的压缩波速和剪切波速, m/s ; λ^f 为第 f 层岩土体的介质拉梅常数, Pa 。

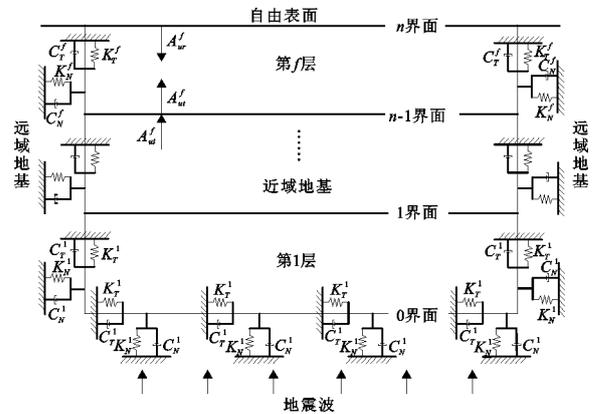


图 1 地震波入射近域层状地基模型示意图

本文运用有限元程序中弹簧-阻尼单元实现层状地基的黏弹性人工边界,弹簧单元的刚度系数及阻尼器单元系数可根据公式(1)~(4)取为:

$$K_{bN}^f = \alpha_N \frac{G^f}{r} L_b^f \tag{7}$$

$$C_{bN}^f = \rho^f c_p^f L_b^f \tag{8}$$

$$K_{bT}^f = \alpha_T \frac{G^f}{r} L_b^f \tag{9}$$

$$C_{bT}^f = \rho^f c_s^f L_b^f \tag{10}$$

式中: K_{bN}^f, K_{bT}^f 分别为第 f 层节点 b 的弹簧法向刚度、切向刚度, N/m ; C_{bN}^f, C_{bT}^f 分别为第 f 层节点 b 的阻尼器法向阻尼、切向阻尼, kg/s ; L_b^f 为模型近域上节点 b 的影响面积, m^2 。

二维有限元模型弹簧阻尼单元如图2所示。

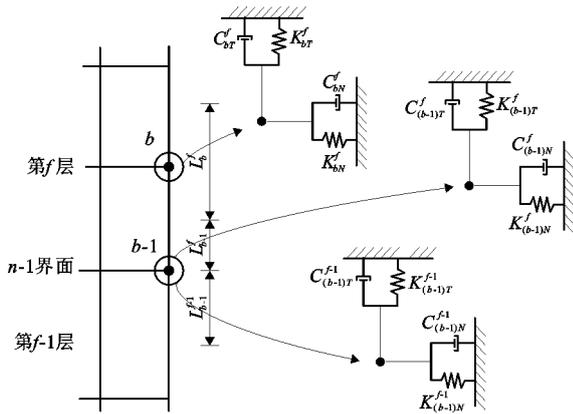


图2 二维有限元模型弹簧阻尼单元示意图

3 层状地基的地震动输入方法

3.1 地震波入射时反射波和透射波的波幅比

地震波从一种介质进入另一种介质时,会在两种介质的分界面上发生透射和反射,反射波会在入射的介质中向下层传播,而透射波会在上层的介质中向上传播^[17]。P波和S波垂直射入不同介质分界面时,其产生的反射波和折射波的波型不发生变化,如图3所示,其中黑色箭头表示波的传播方向,灰色箭头表示波的振动方向。

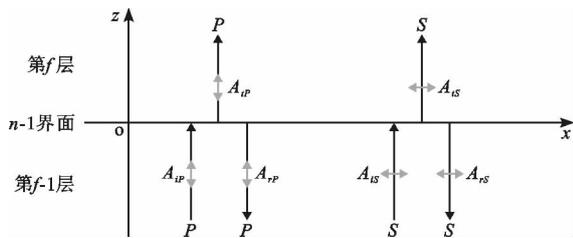


图3 P波和S波的入射、反射和折射示意图

假定第f层与第f-1层介质的剪切波和压缩波的波阻抗之比分别为 z_s^f 和 z_p^f ,其计算公式如下:

$$z_s^f = \frac{\rho^f c_s^f}{\rho^{f-1} c_s^{f-1}} \quad (11)$$

$$z_p^f = \frac{\rho^f c_p^f}{\rho^{f-1} c_p^{f-1}} \quad (12)$$

$$F_{bx}^{-z} = L_b^f \{ K_T^1 [u(t) + \alpha_{ur}^1 u(t - \Delta t_{rs}^f)] + 2C_T^1 \dot{u}(t) \} \quad (18)$$

$$F_{bz}^{-z} = L_b^f \{ K_N^1 [w(t) + \alpha_{wr}^1 w(t - \Delta t_{rp}^f)] + 2C_N^1 \dot{w}(t) \} \quad (19)$$

$$F_{bx}^x = L_b^f \{ K_N^f [\alpha_{ur}^f u(t - \Delta t_{is}^f) + \alpha_{ur}^f u(t - \Delta t_{rs}^f)] + C_N^f [\alpha_{ur}^f \dot{u}(t - \Delta t_{is}^f) + \alpha_{ur}^f \dot{u}(t - \Delta t_{rs}^f)] - \frac{\lambda^f}{c_p^f} [\alpha_{ur}^f \dot{w}(t - \Delta t_{ip}^f) - \alpha_{ur}^f \dot{w}(t - \Delta t_{rp}^f)] \} \quad (20)$$

$$F_{bz}^x = L_b^f \{ -C_T^f [\alpha_{ur}^f \dot{u}(t - \Delta t_{is}^f) - \alpha_{ur}^f \dot{u}(t - \Delta t_{rs}^f)] + K_T^f [\alpha_{ur}^f w(t - \Delta t_{ip}^f) + \alpha_{ur}^f w(t - \Delta t_{rp}^f)] +$$

当地震波从第f-1层垂直入射至第f层时,第n-1界面的反射波、透射波与入射波的波幅比计算公式如下:

$$\frac{A_{sr}^f}{A_{si}^f} = \frac{1 - z_s^f}{z_s^f + 1} \quad (13)$$

$$\frac{A_{st}^f}{A_{si}^f} = \frac{2}{z_s^f + 1} \quad (14)$$

$$\frac{A_{pr}^f}{A_{pi}^f} = \frac{1 - z_p^f}{z_p^f + 1} \quad (15)$$

$$\frac{A_{pt}^f}{A_{pi}^f} = \frac{2}{z_p^f + 1} \quad (16)$$

式中: A_{si}^f 、 A_{st}^f 、 A_{sr}^f 分别为第f层的入射、透射和反射S波幅值,m; A_{pi}^f 、 A_{pt}^f 、 A_{pr}^f 分别为第f层的入射、透射和反射P波幅值,m。

3.2 等效节点荷载推导

地震作用下,成层地基复杂波场中共包含入射波、反射波、透射波和散射波4种波场,其中入射波、反射波和透射波为自由波场,散射波场由人工边界来吸收。作用在截断边界上的等效节点力由两部分组成,一是克服人工边界单元刚度和阻尼所需要的力,二是自由波场在人工边界处的应力场,其计算公式为^[18]:

$$F_b(t) = \tau_b(x_b, z_b, t) + C_b \dot{u}_b(x_b, z_b, t) + K_b u_b(x_b, z_b, t) \quad (17)$$

式中: $F_b(t)$ 为节点b的等效节点荷载,N; x_b 、 z_b 为节点b的坐标,m; $\tau_b(x_b, z_b, t)$ 为节点b处自由波场产生的力,N; C_b 为节点b处的阻尼,kg/s; K_b 为节点b处的弹簧刚度,N/m; $\dot{u}_b(x_b, z_b, t)$ 为节点b处的速度,m/s; $u_b(x_b, z_b, t)$ 为节点b处的位移,m。

在地震波垂直入射的情况下,介质界面不会产生波型转换,但是由于波的反射和折射作用,各个波会发生叠加。对于边界节点等效荷载的计算,可根据公式(13)~(16),求得不同的介质之间的波幅比,从而确定相应的波幅变化系数。由波动理论和单元应变状态,代入公式(17)中得到各个边界的等效节点力,计算公式如下:

$$C_T^f[\alpha_{ut}^f \dot{w}_0(t - \Delta t_{ip}^f) + \alpha_{wr}^f \dot{w}_0(t - \Delta t_{rp}^f)] \} \quad (21)$$

$$F_{bx}^{-x} = L_b^f \left\{ \frac{\lambda^f}{c_p^f} [\alpha_{ut}^f \dot{w}(t - \Delta t_{ip}^f) - \alpha_{wr}^f \dot{w}(t - \Delta t_{rp}^f)] + K_N^f [\alpha_{ut}^f u(t - \Delta t_{is}^f) + \alpha_{wr}^f u(t - \Delta t_{rs}^f)] + C_N^f [\alpha_{ut}^f \dot{u}(t - \Delta t_{is}^f) + \alpha_{wr}^f \dot{u}(t - \Delta t_{rs}^f)] \right\} \quad (22)$$

$$F_{bz}^{-x} = L_b^f \{ C_T^f [\alpha_{ut}^f \dot{u}(t - \Delta t_{is}^f) - \alpha_{wr}^f \dot{u}(t - \Delta t_{rs}^f)] + K_T^f [\alpha_{ut}^f w(t - \Delta t_{ip}^f) + \alpha_{wr}^f w(t - \Delta t_{rp}^f)] + C_T^f [\alpha_{ut}^f \dot{w}_0(t - \Delta t_{ip}^f) + \alpha_{wr}^f \dot{w}_0(t - \Delta t_{rp}^f)] \} \quad (23)$$

当 $f > 1$ 时,有:

$$\alpha_{ut}^f = \prod_{j=1}^f \frac{A_{ut}^j}{A_{ui}^j} \quad (24)$$

$$\alpha_{wr}^f = \left(\prod_{j=1}^f \frac{A_{ut}^j}{A_{ui}^j} \right) \frac{A_{wr}^f}{A_{ut}^f} \quad (25)$$

$$\alpha_{ut}^f = \prod_{j=1}^f \frac{A_{ut}^j}{A_{ui}^j} \quad (26)$$

$$\alpha_{wr}^f = \left(\prod_{j=1}^f \frac{A_{ut}^j}{A_{ui}^j} \right) \frac{A_{wr}^f}{A_{ut}^f} \quad (27)$$

$$\Delta t_{is}^f = \sum_{j=1}^{f-1} \frac{h_j}{c_s^j} + \frac{d_f}{c_s^f} \quad (28)$$

$$\Delta t_{rs}^f = \sum_{j=1}^{f-1} \frac{h_j}{c_s^j} + \frac{2h_f - d_f}{c_s^f} \quad (29)$$

$$\Delta t_{ip}^f = \sum_{j=1}^{f-1} \frac{h_j}{c_p^j} + \frac{d_f}{c_p^f} \quad (30)$$

$$\Delta t_{rp}^f = \sum_{j=1}^{f-1} \frac{h_j}{c_p^j} + \frac{2h_f - d_f}{c_p^f} \quad (31)$$

$$\frac{A_{ut}^f}{A_{ui}^f} = \frac{2}{z_s^f + 1} \quad (32)$$

$$\frac{A_{wr}^f}{A_{ut}^f} = \frac{1 - z_s^{f+1}}{z_p^{f+1} + 1} \quad (33)$$

$$\frac{A_{ut}^f}{A_{wi}^f} = \frac{2}{z_p^f + 1} \quad (34)$$

$$\frac{A_{wr}^f}{A_{ut}^f} = \frac{1 - z_p^{f+1}}{z_p^{f+1} + 1} \quad (35)$$

当 $f = 1$ 时,有:

$$\alpha_{ut}^1 = 1 \quad (36)$$

$$\alpha_{wr}^1 = \frac{1 - z_s^2}{z_s^2 + 1} \quad (37)$$

$$\alpha_{ut}^1 = 1 \quad (38)$$

$$\alpha_{wr}^1 = \frac{1 - z_p^2}{z_p^2 + 1} \quad (39)$$

$$\Delta t_{is}^1 = \frac{d_1}{c_s^1} \quad (40)$$

$$\Delta t_{rs}^1 = \frac{2h_1 - d_1}{c_s^1} \quad (41)$$

$$\Delta t_{ip}^1 = \frac{d_1}{c_p^1} \quad (42)$$

$$\Delta t_{rp}^1 = \frac{2h_1 - d_1}{c_p^1} \quad (43)$$

式中:等效节点荷载 F 的下标分别代表节点号和荷载分量方向,上标代表节点所在侧边界的外法线方向,与坐标轴方向一致为正,相反为负, N ; u, w 分别为剪切波和压缩波的位移, m ; L_b 为节点 b 的等效面积, m^2 ; K_N^f, K_T^f 分别为第 f 层岩土体边界弹簧的法向刚度、切向刚度, N/m^3 ; C_N^f, C_T^f 分别为第 f 层岩土体边界阻尼器的法向阻尼、切向阻尼, $kg/(m^2 \cdot s)$; $\alpha_{ut}^f, \alpha_{wr}^f$ 分别为第 f 层透射和反射剪切波的波幅变化系数; $\alpha_{ut}^f, \alpha_{wr}^f$ 分别为第 f 层透射和反射压缩波的波幅变化系数; $A_{ui}^f, A_{ut}^f, A_{wr}^f$ 分别为第 f 层的入射、透射和反射剪切波幅值, m ; $A_{ui}^f, A_{ut}^f, A_{wr}^f$ 分别为第 f 层的入射、透射和反射压缩波幅值, m ; c_s^f, c_p^f 分别为第 f 层的剪切波速和压缩波速, m/s ; λ^f 为第 f 层的介质拉梅常数, Pa ; z_s^f 为 f 层与 $f-1$ 层之间的剪切波的波阻抗之比; z_p^f 为 f 层与 $f-1$ 层之间的压缩波的波阻抗之比; $\Delta t_{is}^f, \Delta t_{rs}^f$ 分别为剪切波入射和反射的延迟时间, s ; $\Delta t_{ip}^f, \Delta t_{rp}^f$ 分别为压缩波入射和反射的延迟时间, s ; h_f 为第 f 层的厚度, m ; d_f 为节点 b 到 f 层底部边界的垂直距离, m 。

4 算例验证

4.1 双层水平地基模型

对 ABAQUS 进行二次开发,编写相应层状地基的地震动输入程序,与解析解进行对比,从而验证本文提出的反透射黏弹性人工边界的合理性。计算模型如图 3 所示,模型为两层地基模型,坐标原点位于地基地部的中点。地基上下两层的密度均为 $2000 kg/m^3$,泊松比为 0.25 ,上层地基的弹性模量为 $2 GPa$,下层为 $10 GPa$ 。

为了比较波动输入方法的准确性,采用地基顶部解析解的值作为参考解,并设置 2 种不同地震动的输入方法:方法 1 假定弹性波不在介质分界面产生反射作用,仅在地基顶部发生反射;方法 2 考虑弹性波在不同介质分界面的反射作用。假设从模型底部垂直输入单一周期的剪切波,输入的位移时程曲

线如图4所示。

4.2 计算结果与分析

图5为两种不同地震动输入方法及解析解在观测点N3和N4的位移时程曲线。分析图5(a)可知,在第1个周期内,方法1的位移幅值小于方法2和解析解的位移幅值;分析图5(b)可知,在第1个周期,方法1和方法2的位移幅值均等于输入值1 m,方法1的传播规律与方法2和解析解相比均有较大差异。总体来看,在层状地基中考虑波在介质分界面的一次反射作用,与解析解的值更加接近,能较好地模拟波在层状地基中的传播特性。

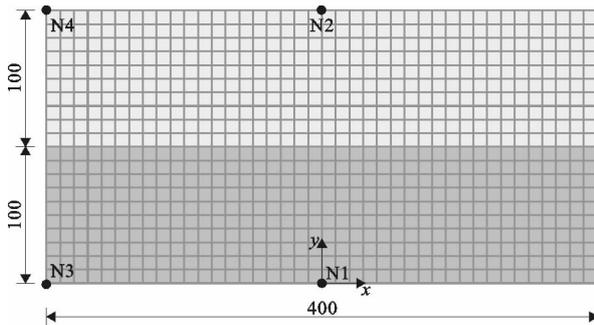


图3 两层层状地基计算模型(单位:m)

通过公式(13)~(16)计算可得,SV波从第1层传递到第2层的波幅放大系数为1.38,输入SV波的位移幅值为1 m,故地基顶部的最大位移理论值为2.76 m。图6为采用方法2计算的各观测点水平位移,由图6(a)可知,顶部观测点N2和N4的最大位移幅值计算值为2.78 m,与最大位移理论值比较接近,且在第1个周期内,波的传播规律和位移响应基本一致,具有较高的稳定性;由图6(b)可知,底部观测点N1和N3的最大位移幅值计算值为1.00 m,与输入位移幅值误差较小,且在传播的规律上,第1个周期前面部分基本相同,位移响应也基本一致。

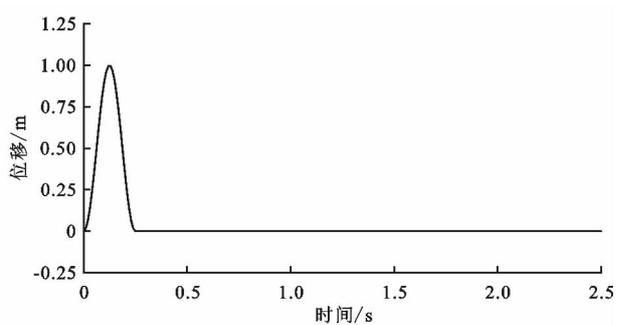


图4 验证计算输入的位移时程曲线

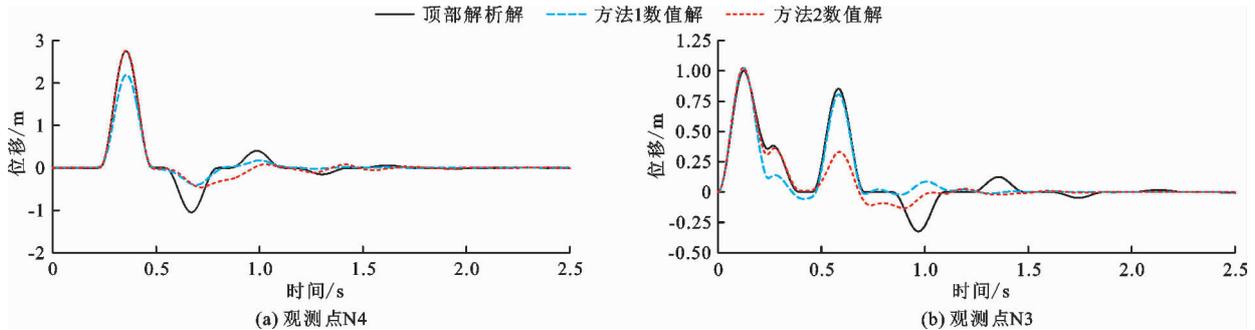


图5 两种不同地震动输入方法计算的N3、N4观测点水平位移

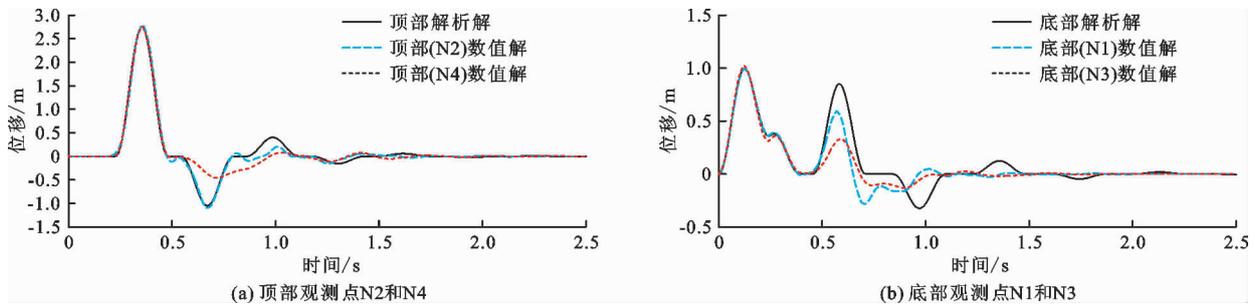


图6 采用方法2计算的各观测点水平位移

5 层状边坡动力稳定性实例分析

5.1 实例工程概况与有限元模型

选取我国西部地区某实例工程层状边坡作为研究对象,建立的有限元模型如图7所示。该工程边

坡坡高为30.0 m,坡角为60°,共分为3层(I~III层),从下到上依次为硬岩(I层)、软岩(II层)和碎石土(III层),各层的材料属性如表1所示。3种材料分析选用MC本构关系模拟非线性,分别在边坡的截断边界施加上层状黏弹性人工边界。采用两种不

同的波动输入方法,方法 1 为假定弹性波不在介质分界面产生反射作用,仅在地基顶部发生反射;方法 2 为考虑弹性波在不同介质分界面的反射作用。

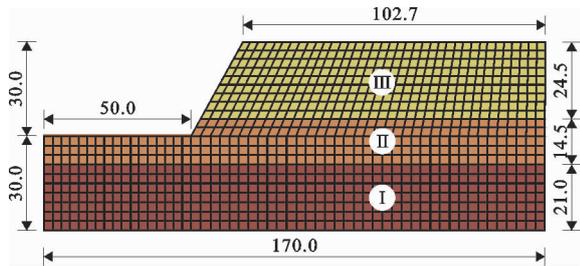
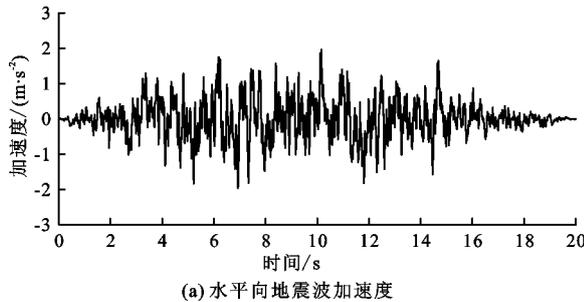


图 7 实例工程层状边坡有限元模型(单位:m)

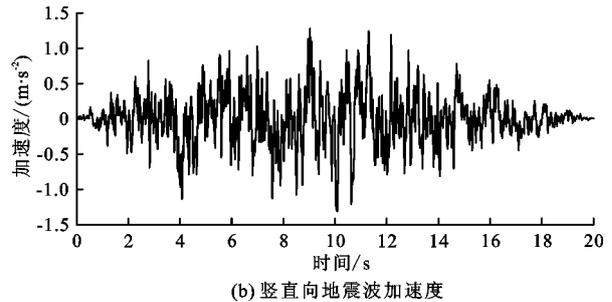
表 1 实例工程边坡的材料参数

分区	材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚 力/kPa	内摩擦 角/($^\circ$)	弹性模 量/MPa	泊松比
I	硬岩	2300	200	45	2100.0	0.20
II	软岩	2200	104	41	2780.0	0.25
III	碎石土	1900	27	38	1.5	0.16

边坡模型采用 ABAQUS 中的 CPE4 单元模拟,整个模型共有 947 个单元和 1 023 个节点。本文考虑的荷载为自重和地震作用。通过反应谱合成时-频非平稳人工地震波,地震历时为 20 s,水平加速度



(a) 水平向地震波加速度



(b) 竖直向地震波加速度

图 8 实例计算加载的地震波加速度时程曲线

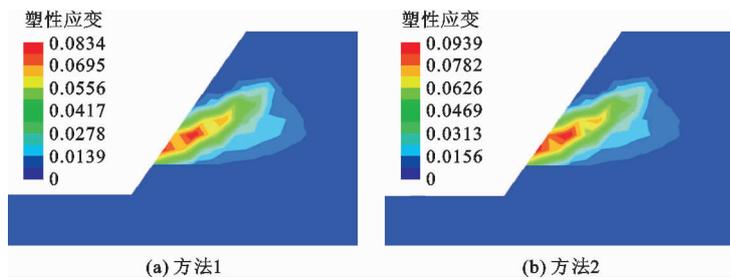


图 9 实例计算边坡塑性应变云图

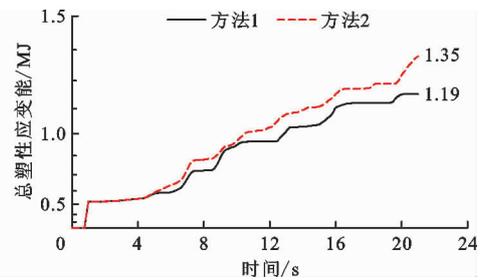


图 10 两种方法总塑性应变能时程曲线

5.3 边坡动力安全系数

在地震作用下,对边坡上层碎石土层的稳定性分析采用强度折减法^[20],从而获得多级动力折减系数下的总塑性应变能,并且据此绘制动力折减系数

峰值为 0.200g, 竖直加速度峰值为 0.133g, 水平向和竖直向地震波加速度时程曲线如图 8 所示。通过公式(13)~(16)计算可得,剪切波和压缩波从边坡底部传播到坡顶表面放大的倍数分别为 3.72 和 3.61 倍,故剪切波和压缩波输入加速度时需要分别缩小 3.72 和 3.61 倍。

5.2 边坡塑性应变能

在地震的作用下,边坡通过调整应力和应变的发展趋势来维持稳定,当荷载破坏性超过边坡自身调节能力时,边坡便会发生失稳破坏^[19]。边坡的塑性应变云图如图 9 所示,两种方法计算的总塑性应变能时程曲线如图 10 所示。

由图 9 可以看出,两种地震动输入方法下边坡的上层碎石土塑性区扩展规律相似,均产生了从碎石土层坡脚向坡顶延伸的弧形滑裂带;从数值上来看,考虑波反射和透射过程(方法 2)时比未考虑时(方法 1)的塑性应变要大。由图 10 可以看出,0~1 s 为静力作用,总塑性应变能呈直线上升;1~5 s 塑性应变能增加缓慢,在 0~5 s 之间,两种不同输入方法的总塑性应变能变化基本相同;6~21 s 总塑性应变能增幅比较明显,且考虑波的反射和透射作用时的总塑性应变能比未考虑时的大。

与总塑性应变能的关系曲线,如图 11 所示。本文构建了地震后边坡的总塑性应变能与动力折减系数的尖点突变模型^[21],基于尖点突变理论的判据,客观地确定边坡的动力安全系数。

由图 11 可以看出,边坡的总塑性应变能随着动力折减系数的增加而增加,说明边坡在较低的抗剪强度下,塑性应变更大;在相同的动力折减系数下,方法 2 的总塑性应变能略大于方法 1,且主要体现在动力折减系数为 1.0~1.1 之间。

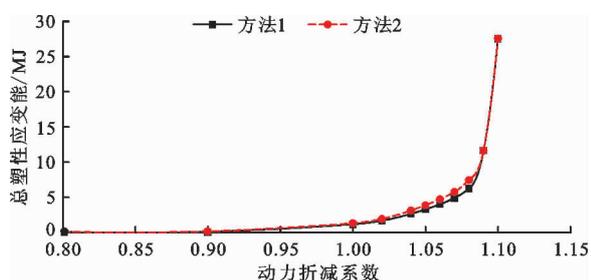


图 11 两种方法总塑性应变能与动力折减系数关系曲线

根据建立的尖点突变模型,方法 1 和方法 2 的边坡动力安全系数分别为 1.083 和 1.078;通过对比不难发现,采用地震动输入方法 2 时,边坡更加易于失稳,因此在针对层状边坡的动力稳定性分析时,应该考虑地震波入射不同介质分界面时的反射和透射作用。

6 结 论

本文首先针对层状地基模型,提出了考虑地震波在介质交界面的一次反射的波动输入方法,并通过两层水平地基模型验证了该方法的正确性。然后将层状地基地震动输入方法运用到层状边坡的动力稳定性分析中,分析比较两种不同输入方法下边坡的动力响应规律,得出以下结论:

(1) 在地震波的波动输入方法上,本文提出的方法更加接近理论解,满足工程精度要求。

(2) 采用本文提出的地震动输入方法计算时,层状边坡会产生更大的塑性应变,且动力安全系数更小。

综上所述,本文针对半无限层状地基提出的波动输入方法具有较高的精度,且适用于层状边坡的动力稳定性分析。

参考文献:

[1] 崔铁军,李莎莎,马云东,等. 地震下含有逆坡裂隙的露天矿边坡破坏模拟与研究[J]. 应用力学学报,2016,33(6):1051-1058.

[2] 冯细霞. 层状岩质边坡地震动力响应与稳定性分析[D]. 武汉:武汉大学,2018.

[3] 周剑,张路青,王学良,等. 水平层状岩体边坡动力响应

中的结构面效应研究[J]. 工程地质学报,2011,19(3):352-358.

[4] 刘新荣,邓志云,刘永权,等. 地震作用下水平层状岩质边坡累积损伤与破坏模式研究[J]. 岩土力学,2019,40(7):2508-2516.

[5] 黄润秋,李果,巨能攀. 层状岩体斜坡强震动力响应的振动台试验[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(5):865-875.

[6] 刘汉东,牛林峰,王忠福,等. 震动强度对反倾层状岩质边坡动力响应规律的影响[J]. 防灾减灾工程学报,2018,38(4):677-683.

[7] 刘汉香,周逸飞,李欣. 层状复合岩体边坡动力特性及地震响应特性的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(4):676-689.

[8] 刘云鹏,邓辉,黄润秋,等. 反倾软硬互层岩体边坡地震响应的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质,2012,39(3):30-37.

[9] 言志信,张刘平,曹小红,等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应规律及变形机制研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(1):54-58.

[10] 周英博,周秋鹏,段志强,等. 不同地形地质下岩质边坡的场地效应与地表地震影响范围的初步确定[J]. 科学技术与工程,2019,19(7):200-208.

[11] 张伯艳,李德玉. 白鹤滩水电站左岸边坡抗震分析[J]. 工程力学,2014,31(S1):149-154.

[12] 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.

[13] 张江伟,李小军,袁颖,等. 地震动参数对边坡地震响应的规律[J]. 地震学报,2017,39(5):798-805.

[14] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2009.

[15] 蒋新新. 复杂地基条件下黏弹性人工边界模型及其应用[D]. 大连:大连理工大学,2014.

[16] 陈立,张燎军. 基于黏弹性边界的地震波斜入射方法研究[J]. 水力发电学报,2015,34(1):183-188.

[17] 徐海滨,杜修力,赵密,等. 地震波斜入射对高拱坝地震反应的影响[J]. 水力发电学报,2011,30(6):159-165.

[18] LIU Jingbo, DU Yixin, DU Xiuli. 3D viscous-spring artificial boundary in time domain[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 5(1): 93-102.

[19] 乔蓓,江德军. 基于动力强度折减法的地震边坡稳定性分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):233-236+243.

[20] 吴应祥,刘东升,宋强辉,等. 基于有限元强度折减法的边坡动力稳定性可靠度分析[J]. 岩土力学,2013,34(7):2084-2090.

[21] 崔笑,张燎军,翟亚飞,等. 基于塑性应变能理论的边坡动力稳定性研究[J]. 人民长江,2020,51(4):180-183.