

[文章编号] 1005-9539(2000) 01-0069-04

基于射线理论的边坡地震反应分析⁽²⁰⁾

范留明 黄润秋 林 峰

(成都理工学院工程地质研究所, 成都 610059)

[摘要] 从射线理论出发, 研究了在地震 P 波作用下坡体临空面附近地震能量的分异和重分布现象, 推导了坡体内动应力和动位移计算公式, 并将这一理论应用于边坡地震响应分析。最后以单斜无限长边坡为例, 从理论上探讨了坡体内地震动应力和动位移的分布规律。

[关键词] 地震动, 地震射线, 地震响应, 无限长边坡, 动应力, 动位移

[分类号] TU 452

[文献标识码] A

坡体的地震稳定性研究是地震研究的重要课题之一, 具有重要的工程和社会意义^[1]。现有的分析方法主要有三种: 拟静力法, Newmark 位移法^[2]和有限元模拟。拟静力法趋于保守, 不能真实反映地震动与坡体相互作用的动力过程, 越来越无法满足现代工程设计的需要^[3]。Newmark 算法主要用来预报在地震动作用下的累积位移, 尽管后人对该方法进行了多次改进^{[1], [4]}, 但是均未考虑坡体临空面引起的反射波的影响。有限元模拟虽然全面反映地震动的作用过程, 但对输入参数要求较高, 而且需要大量耗时的计算, 因此不能作为常规方法使用, 只适于大型重要工程^[5]。为了克服上述种种不足和缺陷, 本文首次引入了地震射线理论, 以期促进该理论在工程地质中的应用和发展。下面以平面 P 波为例, 分析边坡在 P 波作用下的地震动力响应。

1 射线基本理论和方法

射线理论源于物理几何光学, 射线被定义为光的传播路径, 其几何形状由费马(Fermat)原理确定^[6], 后来 Keller 将这一理论推广应用到地震学中。按照费马原理, 连接两点的射线就是使地震波传播时间最短的几何连线, 所以费马原理又称为最小时间原理。与光在非均匀介质中传播一样, 当地震波遇到弹性性质突变界面时, 将会在分界面上产生反射和折射现象, 发生能量分异。

1.1 平面波在临空面处的能量重分布

在平面波入射条件下, 如果弹性分界面(又称反

射界面)为光滑平面, 则射线理论在这种情况下严格成立, 即存在精确的解析解形式^[7]。特别地, 如果反射面是自由界面, 则射线方法有更简单的表达形式。

如图 1 所示, 假设平面 P 波以与自由面法线方向成 α 角入射, 根据弹性波散射理论可知, 入射波在自由界面 A 点处产生波场分裂现象, 分解为同类型的反射 P 波和新类型的反射 S 波(转换波)。在突变分界面处的射线方向由斯奈尔(Snell)定理确定^[8]。如果入射角为 α 按照斯奈尔定理, P 波反射角亦为 α 而且与 S 波反射角 β 满足如下关系:

$$\sin \alpha / v_P = \sin \beta / v_S \quad (1)$$

式(1)中, v_P, v_S 分别表示 P 波和 S 波的速度。对于任一平面简谐 P 波, 假设入射波振幅为 A_0 , 反射 P 波振幅为 A_P , 反射 S 波振幅为 A_S , P 波和 S 波反射系数分别定义为:

$$R = A_P / A_0, \quad B = A_S / A_0 \quad (2)$$

根据射线理论, 并考虑到平面波在界面上的扩

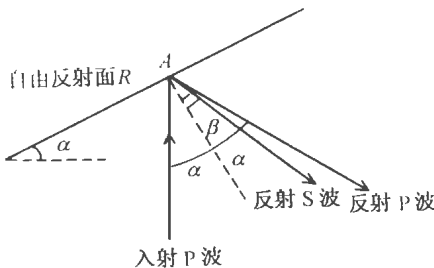


图 1 平面 P 波在自由面处的能量分配

Fig. 1 The energy distribution of planar P-wave on the free surface

(20) [收稿日期] 1999-09-27

[作者简介] 范留明(1968—), 男, 博士生, 工程地质学专业。

散效应, 反射系数 R 和 B 满足如下关系:

$$R = \frac{v_P^2 \cos^2 2\beta - v_S^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta}{v_P^2 \cos^2 2\beta + v_S^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta} \frac{1}{\cos \alpha}$$

$$B = \frac{2v_P v_S \sin 2\alpha \cos 2\beta}{v_P^2 \cos^2 2\beta + v_S^2 \sin^2 \alpha \sin^2 \beta} \frac{1}{\cos \alpha} \quad (3)$$

虽然 (3) 式是由平面谐波推导得出, 但是由于任一地震时程函数均可视为若干个平面谐波的线性叠加, 所以对平面波场具有普适性。

1.2 坡体内地震动的射线合成

对于均质单斜边坡, 边坡地形对地震动的影响主要体现在不同坡度的坡面对地震波产生不同程度和不同方向的反射, 各种类型的波相互叠加形成复杂的地震波场, 从而影响边坡的变形和破坏。

根据地震波射线理论, 坡体内任意一点 A 处的地震动由三部分构成, 即入射波 (P), 同类反射波 ($P-P$) 和转换反射波 ($P-SV$) (如图 2 所示)。假设入射 P 波, 反射 P 波和反射 S 波的地震动位移时程函数分别用 w, u, w 表示, 则按照地震波场矢量叠加原理, 坡体内任意一点总的地震动 u 可按照下式计算:

$$u(t) = w(t - t_0) + u(t - t_1) + w(t - t_2) \quad (4)$$

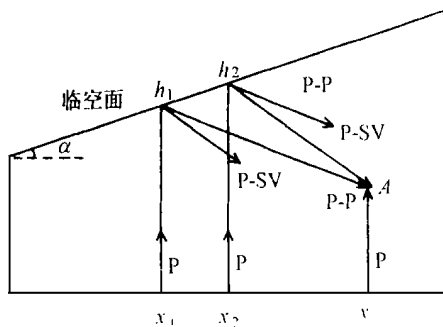


图 2 复杂地震波场合成图

Fig. 2 Compound of the complicated seismic wave field by ray methods

式 (4) 中, t_0 表示入射 P 波从 x 点直接到达 A 点的旅行时间, t_1 表示入射 P 波从 x_1 到达坡面上 h_1 点的旅行时间及其同类反射波 $P-P$ 从 h_1 点到达 A 点的旅行时间之和, t_2 表示入射 P 波从 x_2 点到达坡面上 h_2 点的旅行时间及其转换反射波 $P-SV$ 从 h_2 点到达 A 点的旅行时间之和。这里, w, u, w 均为矢量, 其方向由射线方向决定, 其中 w, w 与射线方向一致, w 与射线方向垂直。 w, w 的幅值由自由边界面反射系数 R, B 以及入射 P 波的幅值 w 所决定。式 (4) 虽然是从位移场导出, 但是由于位移、速度、加速度之间存在着简单的微积分关系, 所以同样适用于

对速度场和加速度场的计算。

2 边坡地震反应分析

2.1 动位移计算

对于坡角为 α 的边坡, 地震动为近场垂直入射的 P 波 (如图 2), 考虑到水平位移分量为零, 由 (3) 式和 (4) 式可得 A 点处总地震动为:

$$u(t) = -R w_0(t - t_1) \sin 2\alpha - B w_0(t - t_2) \sin(\alpha + \beta)$$

$$w(t) = R w_0(t - t_1) \cos 2\alpha + B w_0(t - t_2) \cos(\alpha + \beta) + w_0(t) \quad (5)$$

其中, w_0 表示入射 P 波垂直位移分量; u, w 分别表示水平位移分量和垂直位移分量。

2.2 动应力计算

应变反映了位移在空间的变化梯度, 根据弹性力学和地震波射线理论, 动应变的计算公式如下:

$$\epsilon(t) = R w_0'(t - t_1) \sin^2(2\alpha/v_P - 0.5B w_0'(t - t_2) \sin[2(\alpha + \beta)]/v_S$$

$$\xi(t) = R w_0'(t - t_1) \cos^2(2\alpha/v_P + 0.5B w_0'(t - t_2) \sin[2(\alpha + \beta)]/v_S - w_0'(t - t_0)/v_P$$

$$\xi_y(t) = -0.5R w_0'(t - t_1) \sin(4\alpha/v_P + 0.5B w_0'(t - t_2) \cos[2(\alpha + \beta)]/v_S \quad (6)$$

式 (6) 中, $w_0'(t)$ 为地震速度时程函数, 是位移对时间的一阶导函数, 据此可计算出相应的动应力 σ, τ_y :

$$\sigma(t) = \lambda [\epsilon(t) + \xi(t)] + 2G \xi(t)$$

$$\sigma(t) = \lambda [\epsilon(t) + \xi(t)] + 2G \xi(t) \quad (7)$$

$$\tau_y(t) = 2G \xi_y(t)$$

(7) 式中, λ 为拉梅常数, G 为剪切模量。

3 模型算例

3.1 模型计算

为了便于理论研究, 以无限长边坡为例, 利用射线方法进行了模型试算。假定坡长为无限长, 坡体为均质弹性体, 取坡角为 30° ; 地震纵、横波速比按照理想弹性体取值, 为 1.73, 表明是完整岩体^[9]。其中纵波速为 5 500 m/s, 横波速为 3 000 m/s, 密度为 $2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。地震加速度时程取某地合成记录 (图 3), 时间为 8.4 s, 计算结果如图 4~图 9 所示 (其中应力单位为千帕, 位移单位为毫米, 坡体尺度按米计)。

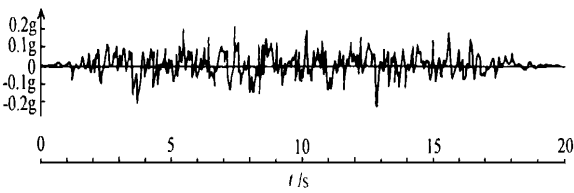


图 3 地震加速度时程
Fig. 3 The time history of seismic acceleration

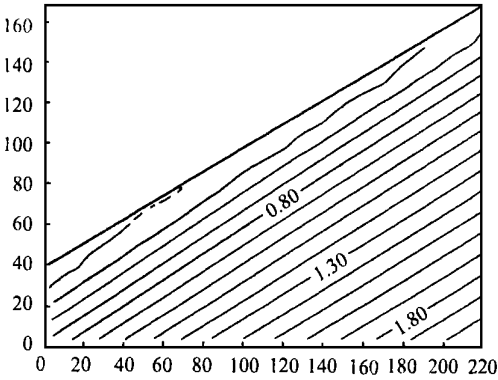


图 7 水平位移等值线图
Fig. 7 Isogram of horizontal dynamic displacement

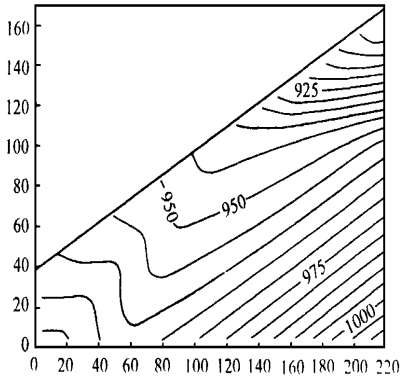


图 4 最大动应力等值线图
Fig. 4 Isogram of maximal dynamic stress

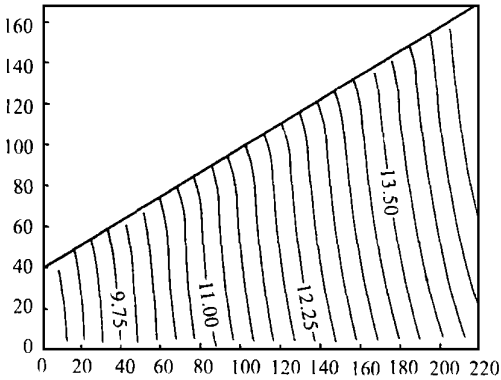


图 8 垂直位移等值线图
Fig. 8 Isogram of vertical dynamic displacement

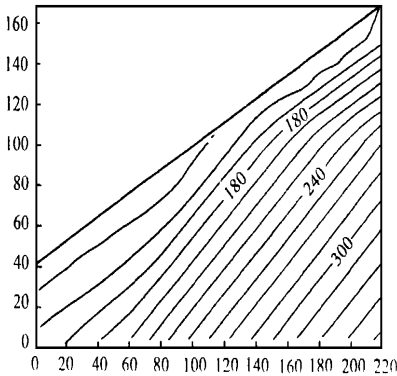


图 5 最小动应力等值线图
Fig. 5 Isogram of minimal dynamic stress

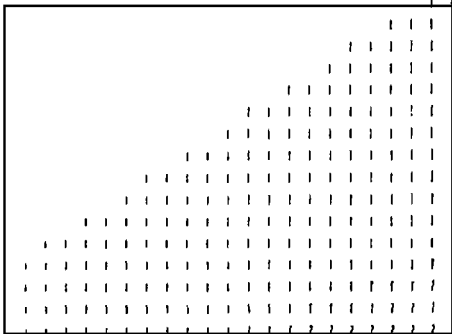


图 9 地震动位移矢量图
Fig. 9 Vectorgraph of seismic dynamic displacement

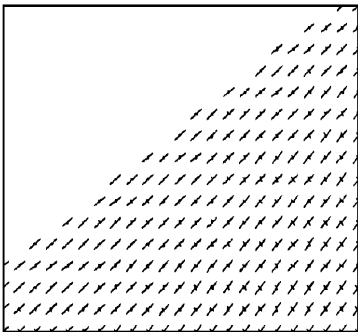


图 6 地震动应力矢量图
Fig. 6 Vectorgraph of seismic dynamic stress

3.2 计算结果分析

由计算结果可以看出,坡体内地震动应力的分布有如下规律:(1) 动应力值(无论是拉应力或是压应力)从坡体临空面到坡体内部,随着深度的增加而增大。即在坡面上动应力值相对较小,在距坡面较远的坡体深处动应力值相对较大。(2) 最大(小)动应力的方向与坡体临空面有良好的对应关系:最大动应力的方向平行于坡面,最小动应力的方向垂直于坡面。(3) 受坡体地形的影响,坡体上部动应力和坡体下部动应力存在着时间上的差异,坡体上部动应力

在时间上滞后于下部动应力。

地震动位移的分布与动应力分布有所不同:(1)与动应力分布特征相反,动位移幅值在坡面上最大,随着深度的增加而逐渐减小。(2)动位移以铅垂方向振动为主,铅垂方向位移是水平方向位移的 10 倍左右,这从另一个方面也证明了 Newmark 位移法^[2]的合理性。(3)坡体上部动位移和坡体下部动位移也存在旅行时间上先后差异,其规律与地震动应力相似。

4 结束语

本文利用平面射线理论和方法,分析了边坡地震动力响应的一般规律,方法简便实用,具有效率高、速度快的特点。它能够描述坡体临空面对地震波的反射作用,反映边坡的地震地形效应;因此可以作为常规方法使用,或者与其他分析方法(例如 Newmark 位移法)结合起来,共同分析边坡的地震动力响应,具有一定的实用性。

[参 考 文 献]

- [1] 黄建梁,王威中,薛宏交.坡体地震稳定性动态分析[J].地震工程和工程,1997,17(4):113~122.
- [2] Newmark, N. M. Effects of earthquake on dams and embankments[J]. Géotechnique, 1965, 15(2):139~159.
- [3] 黄润秋,王贤能,唐胜传.深埋隧道地震动力响应复反应分析[J].工程地质学报,1997,5(1):1~7.
- [4] Kramer S L, Smith M W. Modified Newmark model for displacements of compliant slopes [J]. Journals of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(7):635~644.
- [5] 王余庆.土石坝与边坡的抗震稳定[A].中国振动工程学会土动力学专业委员会.土动力学工程实例与分析[C].北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [6] 黎在良,刘殿魁.固体中的波[M].北京:科学出版社,1995.
- [7] 鲍亦兴,毛昭宙.弹性波衍射和动应力集中[M].北京:科学出版社,1993.
- [8] 柯登.地震勘探原理和方法[M].北京:地质出版社,1986.
- [9] Аверух А. Г. Изучение состава и свойств горных пород при сейсморазведке [M]. Москва: Недра, 1982.

RAY THEORY FOR THE SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF SLOPE

FAN Liu-ming, HUANG Run-qiu, LIN Feng

(Chengdu University of Technology, China)

Abstract: The seismic response analysis of a slope is an important subject in geology engineering and earthquake engineering. In spite of many methods for it, such as quasi static method, displacement method by Newmark and other numeric methods, they either ignore the effect of the free surface of a slope or need much hours to compute. The ray method, which generates from geometrical optics and is used widely in seismology now, can overcome these shortages effectively. Based on the ray theory, the propagation regulation of the incident planar primary wave in a slope and its redistribution near the free surface of a slope are discussed, and its dynamic energy variation in the course of its propagation is studied in detail. On the basis of this, analytical formulas for calculating the dynamic stress and dynamic displacement in a slope are also derived in theory. This method is generalized to be applied to the seismic response analysis of a slope. Finally, taking an infinite homogenous slope as an example, the distribution law of its dynamic stress and dynamic displacement is summarized in this paper.

Key words: ground motion; seismic rays; seismic response; infinite slope; dynamic stress; dynamic displacement