基于剩余推力法的地震滑坡永久位移研究

祁生林 祁生文 伍法权 刘春玲

(北京林业大学水土保持学院 北京 100083)

(中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室 北京 100029)

(长安大学地质工程系西安 710054)

摘 要 基于剩余推力法思想,结合 Newmark 有限滑动位移法,考虑了由于动力作用造成的孔隙水压力变化,对一种最为常见的边坡灾害—滑坡,提出了一种简便的估算地震动力永久位移的方法。对一实例用该法和快速拉格朗日元(FLAC^{3D})进行 对比计算,结果表明两者的结果基本接近,前者要保守一些。这就使得应用剩余推力法这一常规方法对滑坡进行真正意义上 的动力时程分析成为可能。

关键词 剩余推力法 滑坡 动力稳定性 永久位移 中图分类号:P642.22 P315 文献标识码:A

ON PERMANENT DISPLACEMENT OF EARTHQUAKE INDUCED SLIDE BASED ON RESIDUAL PUSHING FORCE METHOD

QI Shenglin QI Shengwen WU Faquan LIU Chunling

(College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100029)

(Key Lab. of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

(Department of Geological Engineering, Chang 'an University, Xi an 710054)

Abstract A new simpler method is presented for evaluating the earthquake - induced permanent displacements of sliding body based on residual pushing force method as well as Newmark s method (1965). At the same time, pore pressure increment caused by dynamic force is considered. Then this method is applied to a case, in which our prediction result is very close to that obtained by using numerical method, but the value obtained by former method is slightly higher than that by numerical method.

Key words Residual pushing force method, Slide, Dynamic stability, Permanent displacement

1 引 言

边坡或者滑坡动力稳定性的研究是边坡稳定性 研究的重要方面,是岩土工程和地震工程中关心的 重要问题之一。最简单的办法是把边坡看成刚性 体,利用拟静力法进行计算。拟静力法虽然简单,但 是有先天性不足。Seed H. B. (1973) 曾经对拟静力 法的不足进行过详尽的讨论,他指出:(1) 惯性力不 是永久不变的,也不是单向的,而是在量级上和方向 上有快速的波动;(2) 即使边坡的稳定性系数暂时小 于1,不一定会导致边坡整体失稳,只会导致边坡产 生一定永久变形。边坡的行为由变形的量级而不是 拟静力法的稳定性系数控制^[1]。

 ^{*} 收稿日期: 2003 - 06 - 11;收到修改稿日期:2003 - 08 - 26.
 基金项目:本文受中国博士后基金资助(编号:2002032100).
 第一作者简介:祁生林(1978 -),男,硕士研究生,水土保持专业. Email:Idslq@sina.com

Newmark, N. M. (1965)提出了一种划时代的 分析方法——有限滑动位移法^[2]。他注意到无论 什么时候只要作用在潜在滑体上的惯性力超过了它 的屈服阻力,滑动便发生,当惯性力改变方向时,滑 动停止甚至向回滑动。这个著名的方法随后被广泛 应用并且被多次改进^[3~9]。我国学者黄建梁等人 (1997)借用 Sarma 法,建立了根据水平和铅直地震 加速度时程估计坡体失稳的加速度、速度和位移时 程的方法^[10]。对于岩质边坡的动力稳定问题我国 学者王思敬先生较早地进行了研究,他和他的合作 者们建立了边坡块体运动的动力微分方程,对岩质 边坡中楔形块体作了动力分析,进行了层状边坡岩 体滑动稳定的三维动力学分析,建立了块体运动的 三维动力学方程,并探讨了层状边坡层间振动加速 度在传递过程中的加速度变化情况以及在不同振源 方向作用下边坡各层间的稳定性^[11~17]。

本文旨在基于剩余推力法的思想,针对一种重要的边坡工程地质模型-滑坡,考虑了由于动力作

用造成的孔隙水压力变化,结合有限滑动位移法导 出了滑坡在动力作用下的永久位移公式,这使得应 用剩余推力法这一常规方法对滑坡进行动力时程分 析成为可能。

2 滑坡的永久位移计算

图 1a 为一典型的滑坡模型。根据滑坡形态和 滑面特征将图 1a 所示一滑坡模型进行条块划分,在 土条 i 底部的平面上对力进行分解,沿法线方向有

$$W_{i}\cos_{i} - E_{i-1}\sin(_{i} - _{i-1}) - N_{i} - KW_{i}\sin(_{i} +) = 0 \qquad (1)$$
$$W_{i}\sin_{i} + E_{i-1}\cos(_{i} - _{i-1}) - T_{i} - E_{i} + KW_{i}\cos(_{i} + _{i}) = 0 \qquad (2)$$

假定滑坡安全系数用 *F*_s 来表示,根据安全系数的强度定义^[18],有



图 1 剩余推力法滑坡条块受力分析图

Fig. 1 Slice stressing of residual pushing force method a. 滑坡条块划分; b. 条块几何要素; c. 条块受力图

$$F_{s} = \frac{1}{T} [cA + (N - uA) \tan \phi]$$
 (3)

式中 *T* 为滑面上的滑动力, *c* 为滑动面的粘聚力, *A* 为滑动面的面积, *N* 为滑动面上的法向力, *u* 为滑动面上的孔隙水压力, 为内摩擦角。

那么对于条块 *i*,式(3)可以写为

$$T_i = \frac{c_i b_i}{F_s} + (N_i - u_{di} b_i) \frac{\tan \phi_i}{F_s}$$
(4)

式中 u_{di} 为第 i 条块在地震过程中的孔压。

为了求取屈服加速度系数^[2],取
$$F_s = 1$$
 ,则有

$$T_i = c_i b_i + (N_i - u_{di} b_i) \tan \phi_i$$
(5)
把(5)代入(2),并进行整理

$$E_{i} = W_{i} \sin_{i} + E_{i-1} \cos(i - i - 1) - [c_{i}b_{i} + (N_{i} - u_{di}b_{i}) \tan \phi_{i}] + KW_{i} \cos(i + 1) - (6)$$

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

联立(1),化简

$$E_{i} = W_{i} \sin_{i} - [c_{i}b_{i} + (W_{i}\cos_{i} - u_{di}b_{i})\tan\phi_{i}] + E_{i-1} + KW_{i}[\cos(+i) + \sin(+i)\tan\phi_{i}]$$
(7)

式中

 $i_{i-1} = \cos(i_i - i_{i-1}) + \sin(i_i - i_{i-1}) \tan \phi_i(8)$ 可见 i_{i-1} 就是静力条件下剩余推力法的传递系 数^[18]。

这样对于最后一个条块 n,有

 $E_{n} = W_{n} \sin_{n} - [c_{n}b_{n} + (W_{n}\cos_{n} - u_{dn}b_{n})\tan\phi_{n}] + E_{n-1} + KW_{n}[\cos(+n) - \sin(+n)\tan\phi_{n}]$ (9)

不断的调整 K值,直到 $E_n = 0$,这时的 K即为屈服

加速度系数 K_c 。但是注意(5)中的 u_{di} 是一个未知量,因此,仍然无法求取 K_c 。

由于孔压变化的实质是由于在地震荷载作用 下,岩土体之间发生相互运动,岩土体孔隙比发生变 化,从而导致孔隙水压力发生变化^[19]。基于此理 论,根据屈服加速度的概念^[2],可以认为在地震加 速度没有超过屈服加速度之前,岩土体之间没有发 生明显相互运动,也就是说岩土体中的孔隙水压力 不发生变化。这样我们有

当 $K \leq K_c$ 时, $u_{di} = u_{oi}$ (10) 式中 u_{0i} 为第 i 条块的初始孔压。把(10) 代入(7) 式 中进行迭代,便可以获得屈服加速度系数 K_c 。

当地震加速度超过屈服加速度系数 K_c 时, (10) 式不再成立。这时假定 u_{di} 可以表示为式(11) $u_{di} = u_{0i} + u_i$ (11)

其中 u_i 为动力作用导致的第 i 条块的孔隙水压力 增量。

关于 *u_i* 的求取办法,可以引入三维 Biot 固结 理论,采用数值法求取孔隙水压力,但是这样会使问 题的分析又陷入复杂化。为使问题简化,这里引入 Martin - Finn - Seed(1975)的孔压应变模型^[19]。该 模型认为不排水条件下的振动孔隙水压力 <u>u</u>等于 排水条件下永久体积变形 *v_d* 与回弹模量 *E_r* 的乘 积,即

其中

$$u_i = E_r \quad _{vd} \tag{12}$$

$$\overline{E_r} = \frac{(v)^{1-m}}{mk_o(v)^{n-m}}$$
(13)

$$_{d} = C_{1}(- C_{2 vd}) + \frac{C_{3 vd}^{2}}{+ C_{4 vd}}$$
(14)

式中, v_d 为一个应力循环所引起的塑性体积应 变,仅同累积压缩体积应变 v_d 有关; v_d 为累积压缩 体积应变, 为剪应变振幅, E_r 是有效应力为 , 时 的回弹模量; v_0 是初始有效应力; k_0 、m、n 为系数, 可由一组卸荷曲线根据不同的初始垂直应力 v_0 求 得;系数 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 可以根据试验确定。

把式(11)~(14)代入式(7),进行递推可以方便 地得到 *E_n*的表达式。这样整个滑体下滑的加速度 可以表示为

$$\frac{U}{U}(t) = \frac{E_n(t)g}{n}$$
(15)
W_i

对式(15)进行积分可以得到滑体下滑的速度时程

U(t) 和位移时程 U(t):

$$\overset{\cdot}{U}(t) = \int_{0}^{t} U(t) dt = \frac{g}{\int_{0}^{n} U(t) dt} = \frac{g}{\int_{0}^{n} U(t) dt} \quad (0 \le t \le t_{0})$$

$$U(t) = \int_{0}^{t} U(t) dt = \frac{g}{\int_{0}^{n} U(t) dt} \int_{0}^{t} \int_{0}^{t} E_{n}(t) dt dt$$

$$W_{i}$$

$$(0 \le t \le t_{0}) \quad (17)$$

其中 t_0 为地震持时。不考虑在地震作用下边坡体向 回的滑动作用,也就是 $E_n(t)$ 小于 0 时认为滑体发 生的永久位移为 0,这样(17)可以写为

$$U(t) = \frac{g}{n} [E_n(t) \ t] \ t \ (K > K_c)$$
$$W_i$$

(18)

式中 $E_n(t)$ 在 $K < K_c$ 的时段取为 0。利用(18)式, 使得地震作用下滑坡的永久位移计算成为可能。

3 应用实例

图 2 是某一拟建水电站边坡剖面。推测的可能 滑面是 f₉加推测的圆弧段(图中用虚线表示),根据 地形和滑面把整个滑体条分成 6 块。各条块的重量 以及各条块滑面的参数见表 1。

表1 滑体各条块的重量及各条块滑面参数

 Table 1
 Each slice weight and mechanical parameters for sliding interface

滑块编号							
重量/ MN		169.95	244.79	107.92	59.35	147.41	192.27
滑面 参数	内聚力/kPa	250	250	600	100	800	700
	内摩擦角/(9	27.6	27.6	43.5	36.1	31	31

图 3 是按地震作用方向为水平时,地震系数与 剩余下滑力的关系图。进行回归,可以得到下式

$$K = 0.005 E_n + 0.0876 \tag{19}$$

从图上明显可以看出,在不考虑地震作用时,剩 余下滑力约为 - 20MN,表明在无地震作用时,边坡 处于稳定状态。当地震系数为0.0876时,剩余下滑 力为0,边坡处于极限平衡状态,地震屈服加速度为 0.876m s⁻²。

把式(19)代入(18),有

$$U(t) = \frac{g}{n} [E_n(t) t] t = W_i$$



图 2 坝区典型地形剖面

Fig. 2 Typical cross - section of a dam



图 3 水平向地震系数与剩余下滑力关系图

Fig. 3 Horizontal seismic coefficient vs. residual down - sliding force

$$\frac{g}{m} \qquad \left[\begin{array}{ccc} \frac{K(t) - 0.0876}{0.005} & t \right] t \quad (20) \\ W_i \\ i = 1 \end{array} \right]$$

输入图 4 所示人工拟合的场地加速度时程^[20], 利用(20)进行计算,可以得到可能滑体的永久位移 为 9.93cm。

4 和数值法结果的比较

用拉格朗日元法计算上例,程序采用国际上通 用的大型岩土程序 FLAC^{3D}的动力模块计算^[21]。对 模型先进行静力分析,再施加动力时程^[20]。模型采 用弹塑性模型,破坏准则采用莫尔-库仑准则。单 元剖分见图 5,计算所用参数见表 2。根据计算结果 见图 6,可见潜在滑体的永久滑动位移 (f₅断层在坡 面露头)水平方向向坡外永久位移介于 8cm 左 右^[20],这比前面方法结果略小一些,原因在于数值 方法考虑滑体在波动作用下向坡内的运动,而前面 的方法没有考虑这一点,因此分析结果是合理的。





Fig. 4 Synthetic acceleration series in the dam - site area



 Fig. 5
 Numerical model for analysis of slope

 1. 砂岩; 2. 大理岩; 3. 大理岩; 4. 断层; 5. 砂岩;

 6. 大理岩; 7. 大理岩; 8. 大理岩; 9. 砂岩;

 10. 大理岩; 11. 砂岩

Tuble 2 Thysical and meenaneear parameters of the fock mass										
岩	级	岩 性	密度/	内摩擦角	内聚力	抗拉强度/	变形模量	うまた	纵波波速	动弹性模量
			g cm ⁻³	/ (9	c / MPa	MPa	E ₀ / GPa		C_{pm}	$E_d \star / \text{GPa}$
		大理岩	2.75	53.3	2	4	27	0.2	5600	77.62
		砂 岩	2.74	53.3	1.62	2	23.2	0.2	5108	64.34
	1	大理岩	2.75	47.7	1.5	1.0	12.5	0.25	5053	58.51
	2	大理岩	2.75	43.5	1.0	1.0	10.5	0.27	4609	46.75
	1	大理岩	2.73	36.1	0.6	0	3	10	4005	32.53
	2	大理岩	2.6	31	0.4	0	2	0.3	3032	17.76
		断层带	2.4	27.6	0.25	0	1.2	0.35	1800	4.85

表 2 岩体物理力学参数

 Table 2
 Physical and mechanical parameters of the rock mass





5 讨 论

当不考虑孔隙水压力,滑面为平面时,上述模型 退化成 Newmark 模型,Newmark 模型是上述滑坡模 型的一种特例。需要注意的是,剩余推力法没有考 虑块体之间的力矩平衡,同时 Martin - Finn - Seed (1975)模型又是假定地面基本为水平的条件下获 得,因此这种永久位移求取方法是不完善的。所用 实例表明,与数值方法相比,该法相对保守,但是结 果差别不大。该法提供了一种简单估算滑坡永久位 移的方法,使得应用剩余推力法这一常规方法对滑 坡进行真正意义上的动力时程分析成为可能。 **致** 谢 本文的写作得到了国家地震局地质研究所 蒋溥研究员、梁小华副研究员的帮助,人工场地的加 速度是在他们的帮助下完成的。孙广忠研究员、蒋 溥研究员、孙进忠教授审阅了全文,并进行了修改, 特此致谢!作者还要感谢两名匿名的审稿人,他们 的修改意见大大提高了本文的质量。

参考文献

- Seed, H. B. Stability of earth and rockfill dams during earthqukes, in Embankment - Dam Engrg [J]. Casagrande, Vol., (Eds Hirschfeld and Poulos), John Wiley, 1973.
- [3] Franklin, A. G. and Chang, F. K. Earthquake resistance of earth and rock - filled dams, rep. 5: permanent displacements of earth embankments by Newmark sliding block analysis [A]. Misc. Pap. S - 71 - 17, Waterways Experimental Station [C]. Vicksburg, 1977.
- [4] Makdisi, F. I. and Seed H. B. Simplified procedure for evaluating embankment response[J]. J Geotech. Engrg., ASCE, 1979, 105, GT12,1427 ~ 1434.
- [5] Sarma, S. K. Seismic stability of earth dams and embankments
 [J]. Geotechnique, 1975, 25(4), :743 ~ 761.
- [6] Seed, H. B. Consideration in the earthquake design of earth and rockfill dams[J]. Geotechnique, 1979, 29(3): 215 ~ 263.
- [7] Hynes Griffth, M. E. and Franklin, A. G. Rationalizing the seismic coefficient method [J]. Waterways Experiment Station Report, Vicksburg.
- [8] Constantinous, M. C. Gazetas, G. A. and Tadjbakhsh, I. Stochastic seismic sliding of rigid mass supported through non symmetric friction[J]. Earthq. Engrg. and Struct. Dyn. 1985, 12,777 ~ 793.
- [9] Kramer, S. L. and Smith, M. W. Modified Newmark model for

seismic displacements of compliant slopes[J]. J. Geotech. Engrg. ASCE, 1997, 123(7):635 ~ 644.

 [10] 黄建梁,王威中,薛宏交.坡体地震稳定性的动态分析[J].地 震工程与工程震动,1997,17(4):113~122.
 Huang Jianliang, Wang Weizhong and Xue Hongjiao. Dynamic analysis of seismic stability of slopes, Earthquake Engineering

and Engineering Vibration, 1997, 17(4):113 ~ 122.

 [11] 王思敬. 岩石边坡动态稳定性的初步探讨[J]. 地质科学, 1977,(4).
 Wang Sijing. Discuss on dynamic stability of rock slopes. Scien-

tia Geologica Sinica, 1977, (4).

- [12] 王思敬,张菊明.边坡岩体滑动稳定的动力学分析[J].地质科学,1982,(2):162~170.
 Wang Sijing, Zhang Juming. On the dynamic stability of block sliding on rock slopes. Scientia Geologica Sinica. 1982,(2):162~170.
- [13] 王思敬,薛守义.岩体边坡楔形体动力学分析[J].地质科学, 1992,(2):177~182.

Wang Sijing, Xue Shouyi. Dynamic analysis of wedge sliding on rock slopes. Scientia Geologica Sinica., 1992, (2):177~182.

- [14] 张菊明,王思敬. 层状边坡岩体滑动稳定的三维动力学分析
 [J]. 工程地质学报,1994,2(3):1~12.
 Zhang Juming, Wang Sijing. 3 D dynamic analysis of rock sliding on the layered rock slope, 1994, 2(3):1~12.
- [15] Wang, S. J., Xue, S. Y., Maugeri, M., Motta, E. Dynamic stability of the left abutment in the Xiaolangdi Project On the Yellow River. Proc. Int. Symp. on Assessment and Prevention

of Failure Phenomena in Rock Engrg[C]. Ankara, April, 5 ~ 7, 1993.

- [16] Wang, S. J. and Zhang, J. M. On the dynamic stability of block sliding on rock slopes. Proc. of the Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, 431 ~ 434.
- [17] 王存玉,地震条件下二滩水库岸坡稳定性研究[A]. 岩体工程 地质力学问题(七)[C].北京:科学出版社,1987.
 Wang Cunyu Seismic stability of slope of Er tan reservoir, Engineering Geomechnics problem of rock mass(). Beijing: Scientific Press, 1987.
- [18] 钱家欢,殷宗泽合编.土工原理与计算(第二版)[M].北京:水 利电力出版社,1994.

Qian Jiahuan, Yin Zongze. Principle of soil mechanics and calculation (2nd Version). Beijing: Water conservancy and Hydropower Press, 1994.

- [19] Martin, G. R., Finn, W. D. L. and Seed, H. B. Fundamentals of liquefaction under cyclic loading[J]. J. Geotech. Engrg. Div. ASCE, 101(GT5), 423 ~ 438.
- [20] 祁生文.边坡动力响应研究及应用[D].中国科学院地质与地 球物理研究所博士学位论文,2002,6.
 Qi Shengwen. Study on Dynamic Responses of Slopes and Its Application. Ph.D. Dissertation, Institute of Geology and Geophysics, 2002, 6.
- [21] FLAC 3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Version 2. 00, Users Manual (Volume) [S]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 1997.

《工程地质学报》网站开通

自 2004 年 2 月 20 日起《工程地质学报》网站正式开通了,网址是 www.enggeo.org,目前 学报的网址是挂靠中国科学院地质研究所工程地质与浅层地球物理研究室的网址上,大家可 随时在网上留言,我们将逐步开通网上稿件的网上查询及其他进展。学报的电子邮箱是 gcdz @mail.igcas.ac.cn。

欢迎大家登录并查询查关信息。

《工程地质学报》编辑部启

2004年2月24日