利用 FLAC^{3D} 分析某边坡地震稳定性^{*}

刘春玲¹ 祁生文² 童立强¹ 赵法锁³

(¹中国国土资源部航空物探遥感中心 北京 100083) (²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) (³长安大学地质工程系 西安 710054)

摘要 利用 FLAC^{3D} 对某边坡进行了动力分析,讨论了利用 FLAC^{3D} 进行边坡动力分析时如何设置边界条件、合成、 输入以及转化动力时程,为地质体选取合理的阻尼。在此基础上,对该边坡进行了详细的动力分析。结果表明, 在地震作用下,边坡会发生一定的永久位移,因此,工程上应慎重考虑。利用 FLAC^{3D} 对边坡进行动力分析的文 献较为鲜见,该方法为利用 FLAC^{3D} 解决边坡动力问题提供了范例。 关键词 数值分析,边坡,地震稳定性分析,FLAC^{3D}

分类号 TU 457 文献标识码 A 文章编号 1000-6915(2004)16-2730-04

STABILITY ANALYSIS OF SLOPE UNDER EARTHQUAKE WITH FLAC^{3D}

Liu Chunling¹, Qi Shengwen², Tong Liqiang¹, Zhao Fasuo³

(¹China Aerogeophysics and Remote Sensing Center, Beijing 100083 China)

 $(^{2}$ Key Lab of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100029 China)

(³Geological Engineering Department, Chang'an University, Xi'an 710054 China)

Abstract The stability analysis of slope under earthquake is made with FLAC^{3D} in this paper. The problems about boundary conditions, dynamic time series, and rational damping for geological body are discussed. The study result shows that certain permanent displacement would occur in the potential slide mass of the slope under earthquake, and this must be taken into serious consideration in practical engineering.

Key words numerical analysis, slope, stability analysis, FLAC^{3D}

1 引 言

地震边坡的研究是边坡工程和地震工程研究的 重要内容,而稳定性问题则是研究的核心。研究地 震边坡稳定性的方法归纳起来主要有以下几种:拟 静力法,有限滑动位移法,Makdisi-Seed 的简化分 析法,地震反应分析的剪切楔法,地震边坡的概率 分析方法以及数值方法^[1]。

引入数值方法进行边坡的动力响应分析始于 20 世纪 60 年代^[2]。常用的数值分析方法包括有限单 元法、有限差分法和边界元法。首先把有限单元法 引入土体的动力反应分析的是 Clough 和 Chopra (1966)^[3]。20 世纪 70 年代以来,有限单元法已经广 泛地应用于土体的动力分析中。近年来,拉格朗日 元由于能解决大变形问题而倍受青睐,美国 Itasca 公司推出的 FLAC^{3D} 能够很好地用以进行动力分 析^[4]。

利用 FLAC^{3D} 进行边坡动力分析的文献鲜见报 道。本文利用 FLAC^{3D} 对一边坡地震稳定性进行了 研究。文中讨论了对于边坡动力问题边界条件的设 置、边坡阻尼的选取、场地人工地震波的合成及输 入等关键问题,为将 FLAC^{3D} 用以解决边坡动力问 题提供了范例。

²⁰⁰³ 年 3 月 3 日收到初稿, 2003 年 5 月 29 日收到修改稿。

^{*} 中国青年科学基金(40302032)和中国博士后基金资助(2002032100)课题。

作者 刘春玲 简介: 女,1976年生,硕士,2000年毕业于长安大学地测学院,现任助理工程师,主要从事工程地质及数值模拟方面的研究工作。E-mail: valley1@sohu.com。

2 边坡工程地质概况

图 1 是某边坡的剖面图。该边坡的坡脚高程为 1 630 m左右。边坡陡峻,为近千米高的高陡边坡, 基岩裸露,岩壁耸立。该边坡地层为中~上三叠统 杂谷脑组(T_{2-32})一套浅变质岩层,有两套岩性,边 坡底部为条纹状大理岩及角砾大理岩夹钙凝灰质千 枚岩和绿片岩透镜体及薄层结晶灰岩组成(T_{2-32}^2), 顶部为条带状板岩、变质砂岩(T_{2-32}^3)。岩层平均产 状为 N20 °~40 E/NW 35 °~50 °,边坡为反倾向 坡。边坡中的重要结构面是 f₉,倾向坡外,产状为 N60 E/SE 58 °。在坡脚部位有 f₅~f₈断层带,对 边坡的行为有一定影响。



Fig.1 Typical section of slope

3 边坡动力模型的建立

边坡的剖分如图 2 所示。根据岩性和岩体质量 分级把整个模型划分成 11 种材料类型(block group),分别命名为 second2_sandstone, second2_ marble, fault 等。例如对于 second2_sandstone 命名 的材料代表岩性为砂板岩、岩体质量为 级。各材 料参数见表 1。

3.1 场地人工地震波的合成

进行场地地震危险性分析,可以得到场地的 5 000 a 一遇的场地基岩峰值加速度,其值为197.1 cm/s²。根据 McGuire(1978)90%能量持续时间经验 公式^[5]可以得到地震的持时为20.16 s,然后根据工 程地震学的原理和方法^[6]人工合成如图3所示的场 地地震加速度时程。



图 2 坡体动力数值分析模型

Fig.2 Numerical model of slope

表1 岩体物理力学参数

Table 1 Physicomechanical parameters of rock mass

	岩性	岩体物理力学参数							
岩级		密度 /g・cm ⁻³	内摩 擦角 j /(粘聚力 c/MPa	抗拉 强度 /MPa	变形 模量 <i>E</i> ₀ /GPa	泊松 比 m	纵波 波速 <i>C</i> pm	动弹 性模量 E _{d*} /GPa
	大理岩	2.75	53.3	2.00	4.0	27.0	0.20	5 600	77.62
	砂岩	2.74	53.3	1.62	2.0	23.2	0.20	5 108	64.34
1	大理岩	2.75	47.7	1.50	1.0	12.5	0.25	5 053	58.51
2	大理岩	2.75	43.5	1.00	1.0	10.5	0.27	4 609	46.75
1	大理岩	2.73	36.1	0.60	0.0	3.0	0.30	4 005	32.53
2	2大理岩	2.60	31.0	0.40	0.0	2.0		3 032	17.76
	断层带	2.40	27.6	0.25	0.0	1.2	0.35	1 800	4.85







对加速度时程做谱分析,其振幅谱参见图 4。 从图上可以看出,地震的卓越频率为5 Hz,95%以 上的能量集中在 15 Hz 范围内。





3.2 边界条件的设置

FLAC^{3D} 中求解动力问题的边界条件设置有远 置人工边界(截断边界)和粘滞边界两种^[7]。远置人工 边界条件的办法在处理弹性波的能量逸散时,沿用 静力条件下边界的设置,这样的边界对入射波起着 完全反射的作用,即既不传播,也不吸收任何能量。 在动力体系中,这样被限制的能量会导致结果的严 重失真。为使边界对计算结果产生的影响变小,就 要求把模型的边界取得足够远,把模型的范围取得 足够大,从而使边界反射的影响尽可能地小。由于 模拟研究的对象不是结构物,而是边坡,它是自然 地质体的一部分,其模型究竟取多大才能消除边界 的影响,目前还不清楚,所以采用远置人工边界条 件的办法不可取。因此,本文采用粘滞边界条件。

粘滞边界通过在边界的法线方向和水平方向上 设置独立的粘壶得以实现,以便吸收来自模型内部 的入射波^[7]。法向粘滞力 *f*_a和剪切粘滞力 *f*_s的计算 式为

$$f_{\rm n} = -\boldsymbol{r} \, \boldsymbol{C}_{\rm P} \boldsymbol{v}_{\rm n} \tag{1}$$

$$f_{\rm s} = -\mathbf{r} \, C_{\rm s} v_{\rm s} \tag{2}$$

式中:v_n,v_s分别为边界上的法向和切向速度分量; r 为密度;C_p,C_s分别为 P 波和 S 波的波速。当 波动入射角小于 60 时,粘滞边界对于体波的吸收 是有效的。对于大角度入射问题或者表面波而言, 虽然也有一定的能量吸收,但是误差较大。这种方 法易于在时域进行操作,在有限元和有限差分中的 有效性已经被证明^[8]。

根据文[9]的研究,网格剖分的尺寸受输入波动的最短波长控制。设网格的最大尺寸为△*l*,输入波动的最短波长为*l*,则△*l*必须小于(1/10~1/8)*l*。

动荷载的输入可采用加速度时程、速度时程、 位移时程和应力(力)时程4种方式。需要注意的是, 对于粘滞边界条件,边界条件的输入必须采用应力 (力)时程。利用如下公式可以将速度时程转变为应 力时程:

$$\boldsymbol{s}_{\mathrm{n}} = -2(\boldsymbol{r} \, C_{\mathrm{p}}) \boldsymbol{v}_{\mathrm{n}} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{s}_{s} = -2(\boldsymbol{r} \boldsymbol{C}_{s}) \boldsymbol{v}_{s} \tag{4}$$

式中: s_n 为正应力, s_s 为剪应力,r为密度, C_p 为 介质的 P 波速度, C_s 为介质的 S 波速度, v_n 为铅直 方向的质点速度, v_s 为水平方向的质点速度。对于 加速度时程首先通过积分转化成速度时程,再利用 式(3),(4)转化成相应的应力输入。

由于采用了粘滞边界条件,因此,必须把图 3 所示的加速度时程利用数值积分的办法转化为相应 的速度时程(图 5)。从谱分析结果(见图 4)来看,动 力分析最高频率可以截断至 15 Hz。若假设最高频 率为 15 Hz,则对于断层带来说,模型网格单元剖 分的最大尺寸不能大于 57 m。模型剖分时注意了这 一点,对所有的材料,剖分单元的最大尺寸控制在 20 m之内,从而保证了数值分析的精度。数值模型 见图 2。模型采用弹塑性本构关系,即莫尔-库仑强 度准则。



图 5 动力输入的速度时程



3.3 边坡阻尼的选取

FLAC^{3D}中,采用了两种形式的阻尼,瑞雷阻尼 和局部阻尼。局部阻尼是在静力计算中用来使结构 达到最终平衡的,也可以用来进行动力分析,但是 在这方面的经验还比较少,其可靠性还有待考证^[7], 因此,这里采用瑞雷阻尼。

瑞雷阻尼是结构分析和弹性体系分析中用来抑 制系统自振的,通常可以用下式来表示:

$$C = \mathbf{a}M + \mathbf{b}K \tag{5}$$

式中:a,b分别为质量阻尼常数和刚度阻尼常数。

在 FLAC^{3D} 中,设置瑞雷阻尼必须选择中间频 率 f_{nid} 。对于地质体,阻尼一般是独立于频率的,中 间频率 f_{nid} 选择出现在数值模拟中频率范围的中间 值(自振频率或者是输入频率的主频)^[7]。根据谱分析 结果,这里 f_{nid} 为 0.4 Hz,用命令 set dyn damp rayleigh 1 0.4 设置瑞雷阻尼。

4 模拟结果分析

需要注意的是,动力问题的分析必须建立在静 力分析的基础上。在静力分析的基础上,再施加动 力时程^[7]。边坡静力分析的边界条件采用底边界铅 直方向约束,两侧边界水平方向约束。因为边坡中 存在很大的构造应力,构造应力的施加是必不可少 的。在构造应力场施加之后,边坡右侧水平方向约 束解除。

整个数值模拟分3步进行。首先施加自重;然 后施加构造应力场;最后输入地震动。图6是边坡 在自然状态(自重和构造应力作用)下铅直方向位移 等值线图。从图上可以看出,以断层 f₉为界,断层 外侧的变形明显大于断层内侧边坡变形,并且在断 层 f₅以及深部裂缝的配合下,等值线向坡外延出, 变形大的区域形成一个潜在的滑体,潜在滑体的前 缘为 f₅断层在坡面露头附近。该图清楚反映了在自 然状态下,断层 f₉、深部裂缝以及断层 f₅对边坡变 形的明显控制作用。清除由构造应力和自重作用形 成的位移场,施加图5的地震动速度时程。图7,8 是 fs断层在坡面露头的位移和加速度随时间变化的 曲线。从图7,8可以看出,在地震作用下,潜在滑 体前缘(f, 断层在坡面露头)水平方向向坡外永久位 移为 8 cm 左右, 水平向坡外的速度最大值为 8.706 cm/s,加速度时程的最大值为 5.598 m/s², 与场地输 入的 PGA 相比,放大了 2.84 倍。



图 6 自然状态下铅直方向位移 Fig.6 Vertical displacements under natural condition



图 7 潜在滑体前缘一点位移随时步变化曲线







Fig.8 Curve of acceleration of frontier point of potential slide vs time step

5 结论

利用 FLAC^{3D} 对某边坡进行了动力分析,详细 讨论了利用 FLAC^{3D} 进行边坡动力分析的关键性问 题,包括边界条件的设置,动力时程的合成、输入 以及转化,阻尼的选取等。在此基础上,对某边坡 进行了详细的动力分析。结果表明,在地震作用下, 边坡会发生一定的永久位移,潜在滑体永久位移可 以达到 8 cm 左右,加速度时程的最大值为 5.598 m/s²,与场地输入的*PGA*相比,放大了 2.84 倍。因 此,工程上应做慎重考虑。本文为利用 FLAC^{3D}分 析边坡动力问题提供了范例。

参考文献

- 祁生文.边坡动力响应研究及应用[博士学位论文][D].北京:中国 科学院地质与地球物理研究所,2002
- 2 Ishizaki Hatekeyama. Consideration on the dynamical behavior of earth dams[R]. Bul. No.52, Disaster Prevention Research Inst., Kyoto Unvi., 1963
- Clough R W ,Chopra A K. Earthquake stress analysis in earth dams[J].
 J. Engng. Mech. , ASCE , 1966 , 92(EM2) : 51 ~ 60
- 4 刘耀儒,刘元高,周维垣等.应用FLAC方法进行动力分析[J].岩 石力学与工程学报,2001,20(2):1518~1522
- 5 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988
- 6 蒋 溥,戴丽思. 工程地震学概论[M]. 北京:地震出版社, 1993
- 7 Itasca Consulting Group Inc. FLAC-3D(Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions), Version 2.00, Users Manual(Volume)[R]. USA : Itasca Consulting Group Inc , 1997
- 8 Kunar R R, Beresford P J, Cundall P A. A tested soil-structure model for surface interaction[R]. India : Rookee Univ., 1977
- 9 Kuhlemeyer R L , Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. J. Soil Mech. & Foundations Div., ASCE, 1973, 99(SM5): 421 ~ 427