

# 地震诱发工程岩体结构面滑移概率分析

邓学晶<sup>1</sup>, 亓玉成<sup>1</sup>, 林倩<sup>1</sup>, 邹德高<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 大连理工大学水利工程学院, 辽宁大连 116024)

**摘要:**基于非平稳随机地震动模型,编制快速合成人工地震动的程序以实现对工程地震动的随机抽样。对工程岩体地震响应进行等效线性数值计算时,定义结构面的水平等效加速度(时程),将结构面水平等效加速度(时程)的最大值超过其屈服加速度(滑移阈值)作为岩体失稳的极限条件;基于地震动随机抽样和等效线性化时程计算,提出一种随机地震动作用下工程岩体沿结构面的滑移概率和稳定可靠度的计算方法。考察某工程岩体在附近3个潜在震源影响下的结构面的滑移概率和稳定可靠性。结果表明,震级相差不大时,远场地震诱发该工程岩体的失效概率小于0.01%;近场地震作用下,工程岩体的失效概率为26.1%。

**关键词:**工程岩体;地震稳定性;动力可靠度;水平等效加速度

**中图分类号:** O 234      **文献标志码:** A

**引用格式:** 邓学晶, 亓玉成, 林倩, 等. 地震诱发工程岩体结构面滑移概率分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014, 38(6):148-152.

DENG Xuejing, QI Yucheng, LIN Qian, et al. Study on probability of earthquake-induced slip of geoenvironment rock mass joint plane[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6):148-152.

## Study on probability of earthquake-induced slip of geoenvironment rock mass joint plane

DENG Xuejing<sup>1</sup>, QI Yucheng<sup>1</sup>, LIN Qian<sup>1</sup>, ZOU Degao<sup>2</sup>

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Based on non-stationary random vibration model, a series of ground motions were synthesized, whose statistical parameters could satisfy the randomness of a potential earthquake. In order to evaluate the stability of engineering rock mass, horizontal equivalent acceleration (HEA) of the rock mass joint plane was defined, while the earthquake response of engineering rock mass was calculated numerically. The maximum horizontal equivalent acceleration (MHEA) was compared with the yield acceleration of the rock mass joint plane. Based on non-linear numerical calculations and ground motion samples of an earthquake, a new approach was proposed to calculate the probability density of the MHEA of rock mass joint plane. The application of this method in seismic reliability analysis of engineering rock mass was demonstrated. The numerical computation results indicate that the probability of rock mass instability under remote earthquake is below 0.01%, while the value is up to 26.1% under near earthquake, given the same magnitude of earthquake.

**Key words:** rock mass; earthquake stability; dynamic reliability; horizontal equivalent acceleration

地震诱发岩体边坡失稳是严重的自然灾害。随机源和功能函数是岩体可靠性分析的两个关键问题。地震动被作为随机源的方式主要有3种:将地震动的某个特征参数(如峰值加速度等)看作随机

变量,基于地震危险性分析和拟静力方法计算可靠度<sup>[1-2]</sup>;将地震动假设为平稳随机过程,基于随机有限元等方法建立工程岩体的动力方程求解可靠度;将地震动作为非平稳随机过程,采用虚拟激励或摄

收稿日期:2014-05-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51138001);地震行业科研专项(201208013);中央高校基本科研业务费专项(12CX04067A)

作者简介:邓学晶(1973-),男,副教授,博士,主要从事岩土工程数值计算方面的研究。E-mail:dengxj@upc.edu.cn。

动法等计算稳定可靠度<sup>[3-4]</sup>。前两种方法不能反映地震动的客观随机性;虚拟激励或摄动法用于求解高非线性的工程岩体地震可靠度分析,还有许多有待解决的问题。岩体失稳的状态函数应根据岩体的变形机制和主要破坏模式并结合上部结构的功能要求来确定。很多近似方法用以解决计算困难或迭代不收敛问题,如 FORM、SORM、响应面法, Monte-Carlo 方法等<sup>[5-6]</sup>。这些方法还可以用来求解动力可靠度问题<sup>[7]</sup>。笔者基于非平稳的随机地震动模型快速合成地震动,并以岩体结构面的水平等效加速度代表地震荷载水平,考察结构面的滑移状态,进行滑移概率计算和可靠度分析。

## 1 工程岩体结构面滑移状态方程

在确定性分析中,一般认为地震作用下岩体失稳与某些参数的响应值过大有关,例如,滑动体的加速度(惯性力)、滑移面上的合力等,这些参数被称为地震效应,记为  $S(t)$ ,是确定性的时程函数,可由地震动通过对岩体进行数值计算确定。在可靠度分析中,地震效应是随机过程,其不确定性主要来自于地震等的随机性。理论上,如果能求得  $S(t)$  和其导函数过程的联合概率密度,就可以用理论方法计算  $S(t)$  的首次穿越概率,即岩体滑移的概率,但这是相当困难的。

大多数情况只能用近似方法求解,例如,取地震效应  $S(t)$  的最大值,记为  $S$ ,代表地震荷载水平,针对一系列地震动, $S$  是随机变量。如果该一系列地震动符合某场地未来可能发生的地震的统计特性,随机变量  $S$  的分布就能够代表该地震诱发岩体滑移荷载水平的统计属性。

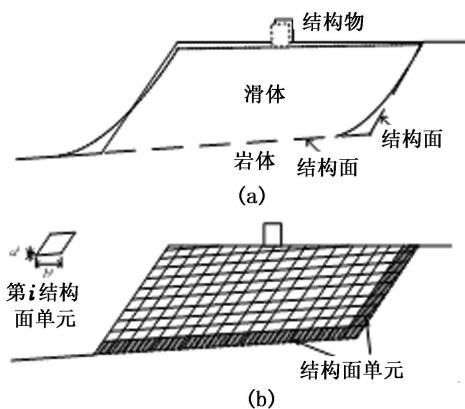


图1 工程岩体计算模型

Fig.1 Calculation model of engineering rock mass

图1(a)所示为工程岩体,二维计算模型见图1(b)。取靠近结构面的一层单元(图1(b)阴影所

示)定义工程岩体结构面的地震效应为

$$s(t) = \frac{\sum_{i \in \Omega} (\sigma_x^i(t)a^i + \tau_{xy}^i(t)b^i)}{\sum_{i \in \Omega} (\tau_{xy}^i(t)a^i + \sigma_y^i(t)b^i)/g} \quad (1)$$

式中,  $\sigma_{xx}^i(t)$ ,  $\tau_{xy}^i(t)$ ,  $\sigma_{yy}^i(t)$  为  $t$  时刻的单元应力分量;  $a^i$  和  $b^i$  为第  $i$  结构面单元的  $x$  和  $y$  方向尺寸;  $g$  为重力加速度;  $\Omega$  为结构面的单元集合。

分析可知,式(1)的分子部分是每个结构面单元的水平力的代数和,分母部分是上部滑体的总质量,具有加速度量纲,也可称作结构面的水平等效加速度,以其代表结构面的地震荷载水平是合理的。

对应于每个确定地震动的时程计算可以得到结构面水平等效加速度的时程曲线,取峰值  $S$ ,是该次地震动引起的结构面最大水平荷载。当考虑  $n$  次地震动时程计算时, $S$  可看作随机变量。

工程岩体的极限状态函数表示为

$$Z = R - S. \quad (2)$$

式中,  $R$  为结构面的屈服加速度,可由结构面的强度公式换算得到,受结构面强度参数不确定性的影响,也是随机变量。

## 2 结构面滑移概率分析

用核密度估计方法计算  $R$  和  $S$  的概率密度  $f(r)$  和  $F(s)$  的表达式,令

$$f(r) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{r - R_i}{h}\right). \quad (3)$$

式中,  $N$  为抽样计算次数;  $h$  为核密度估计的窗宽;  $K(\cdot)$  为核函数,是某个分布的密度函数,满足

$$K(u) \geq 0, \int_{-\infty}^{\infty} K(u) du = 1.$$

取

$$K(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq \frac{1}{2}; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

同理

$$f(s) = \frac{1}{Nh} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{s - S_i}{h}\right). \quad (4)$$

假设  $R$  和  $S$  相互独立,则状态函数  $Z$  的概率密度为

$$F_Z(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f(r)f(r-z) dr.$$

失效概率  $p_f$  为

$$p_f = P\{Z | z \leq 0\} = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) dz = \int_{-\infty}^0 \left( \int_{-\infty}^0 f(r)f(r-z) dr \right) dz. \quad (5)$$

特别是,当  $Z$  服从正态分布,其均值为  $\mu_z$ , 标准差为  $\sigma_z$ , 工程岩体的稳定可靠性指标

$$\beta = \mu_z / \sigma_z. \quad (6)$$

当  $Z$  不服从正态分布,也可以进行当量正态化处理,从而得到可靠度指标。

完成以上计算需要对地震动进行抽样,即合成人工地震动用于计算一定数量的  $S$  样本。

### 3 随机地震动抽样

人工合成地震动的方法主要有两类:一是基于震源机制和传播介质随机性的描述进行概率地震危险性分析,给出场地反应谱,拟合反应谱得到地震动<sup>[8]</sup>。二是假设随机地震动模型,用历史地震记录拟合模型参数的概率分布,直接对模型参数随机抽样生成地震动。前者通过反应谱间接反映地震的随机性,拟合过程需要迭代,而且收敛性不好保证。后者模型参数的随机性直接决定地震动随机性,且模型参数是震源机理、震级、传播介质和场地属性等的函数,不需要迭代,生成地震动比较快速<sup>[9]</sup>。

#### 3.1 随机地震动模型

白噪声作用于单自由度线性振子,振子作为滤波器,其稳态动力响应是一个随机过程,通过改变振子参数以实现频域非平稳性,再乘以幅值调制函数,可以合成时域和频域非平稳地震动:

$$x(t) = q(t, a) \left\{ \frac{1}{\sigma_f(t)} \int_0^t h[t - \tau, \lambda(t)] w(\tau) d\tau \right\}. \quad (7)$$

式中,  $w(\tau)$  为白噪声;  $\sigma_f(t)$  为积分项的标准差;  $q(t, a)$  为调制函数。

为实现地震动的时域非平稳性,  $\alpha$  为参数向量,控制调制函数的形状;令

$$q(t, \alpha) = \alpha_1 t^{(\alpha_2 - 1)} e^{-\alpha_3 t}. \quad (8)$$

$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  决定地震动时域的非平稳性。

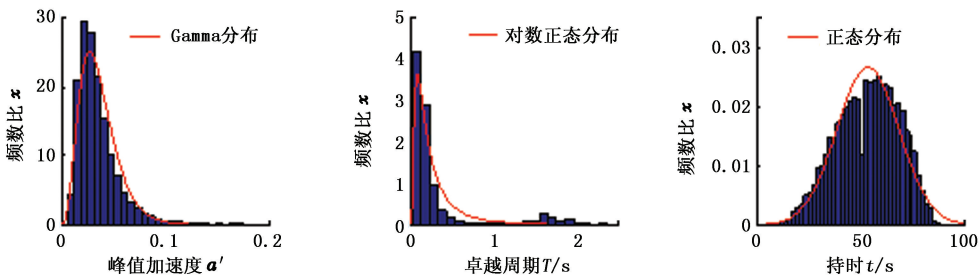


图2 人工合成地震动的主要参数分布

Fig. 2 Distributions of main parameters of synthetic ground motions

$h[t - \tau, \lambda(t)]$  为狄拉克函数  $\delta(t)$  作用下振子的响应;  $\lambda(t)$  说明单自由度振子的弹性系数和阻尼比等参数随时间变化,地震动具有频率非平稳性。

$\delta(t)$  作用下单自由度线性振子的响应为

$$h[t - \tau, \lambda(t)] = \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta_f^2(\tau)}} \exp[-\zeta_f(\tau) \times \omega_f(\tau)(t - \tau)] \sin[\omega_f(\tau) \sqrt{1 - \zeta_f^2(\tau)}(t - \tau)]. \quad (9)$$

假定频率随时间线性变化,有

$$\omega_f(\tau) = \omega_0 - (\omega_0 - \omega_n) \frac{\tau}{t_n}. \quad (10)$$

式中,  $\omega_0, \omega_n$  分别为  $t = 0$  和  $t = t_n$  时的频率。

假定阻尼比不随时间变化,  $\zeta_f(\tau) = \zeta_f, \omega_0, \omega_n$  与  $\zeta_f$  决定地震动频域的非平稳性。

由式(7)定义的地震动有6个参数需要确定,它们是  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$  和  $\omega_0, \omega_n, \zeta_f$ 。希望这些参数能够和有明确物理含义的地震参数取得联系,例如,震级、震中距等,以便利用现有的地震动数据库拟合这些参数的概率密度分布。

对于任意一个确定的地震记录,用最小二乘法以累积能量作为优化目标来确定待定参数  $\alpha$ 。至于  $\omega_0, \omega_n$  与  $\zeta_f$ , 因其互相影响,须分步考虑。首先假定一系列  $\zeta_f$ , 对于每个  $\zeta_f$  值,通过满足模拟地震动与目标地震动的累积过零数差别最小来确定  $\omega_0, \omega_n$ 。采用以上模型可以根据潜在震源震级场地属性等快速合成一族地震动。更详细叙述可参见文献[9]。

#### 3.2 地震动样本

编制了快速合成人工地震动程序。假定某工程场地潜在的危险地震来自100 km处的7级震源,对该场地基岩地震动进行1万次抽样,地震动加速度的峰值、持时、卓越周期不确定,而是满足某种分布规律的随机变量,如图2(震级  $M=7$ , 震中距  $r=100$ , 峰值加速度以加速度  $g$  为单位)所示。

### 4 计算实例

选用的工程岩体几何构型如图3所示,岩体厚36 m,基础宽184 m。考虑3个地震的影响,分别是①震级  $M=7$ ,震中距  $r=20$  km,为近场地震;②  $M=7$ , $r=100$  km,③  $M=7.8$ , $r=100$  km,为远场地震。对每个潜在地震的基岩地震动进行随机抽样  $n$  次,进行时程计算得到岩体结构面的水平等效加速度峰值  $S_i(i=1,2,\dots,n)$ 。

图4给出工程岩体顶部加速度放大倍数(即  $A_{max}$ /输入加速度峰值)的统计情况。分析可见,服从正态分布。地震参数分别为  $M=7$ , $r=20$  km; $M=7$ , $r=100$  km; $M=7.8$ , $r=100$  km 时,其正态分布参数分别为  $\mu=1.64906$ , $\sigma=0.37746$ ; $\mu=2.23965$ , $\sigma=0.36642$ ; $\mu=2.26218$ , $\sigma=0.41248$ 。近场地震时,岩体顶部加速度放大倍数的均值  $\mu$  小于远场地震,这主要是由于近场输入加速度峰值较大,岩体非线性响应更显著。同为远场地震,震级对工程岩体顶部加速度放大倍数标准差有影响,而对均值  $\mu$  的影响不大。

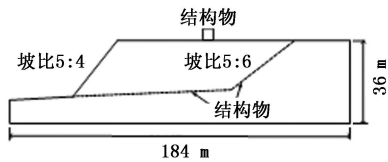


图3 工程岩体几何构型

Fig.3 Configuration of engineering rocks

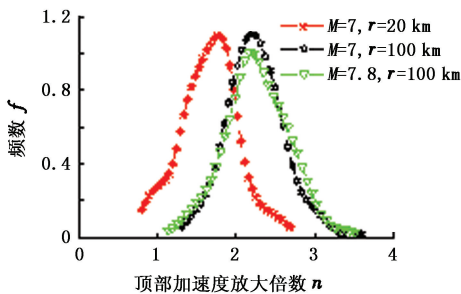


图4 岩体的主要地震响应参数分布

Fig.4 Distributions of main response parameters of rocks

图5给出3个潜在震源地震作用下,岩体结构面最大水平等效加速度分布情况。由图5可见,其分布规律与图2中地震动的峰值分布规律基本相似,可用 Gamma 分布函数拟合,地震参数分别为  $M=7$ , $r=20$  km; $M=7$ , $r=100$  km; $M=7.8$ , $r=100$  km 时, Gamma 分布参数分别为:  $a=3.30435$ ,  $b=0.04748$ ; $a=4.66710$ ,  $b=0.008376$ ; $a=4.82684$ ,

$b=0.009889$ 。

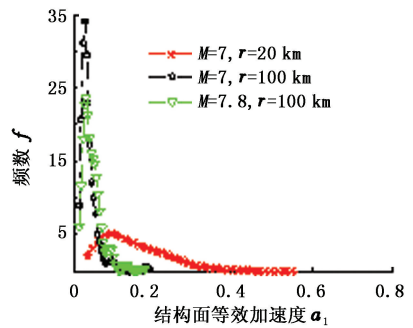


图5 工程岩体结构面水平等效加速度分布

Fig.5 Distributions of horizontal equivalent acceleration on structure surface of rock mass

计算岩体结构面的滑移概率和可靠度还须确定式(2)中屈服加速度参数  $R$  的分布规律,假定  $R$  服从正态分布,均值为  $0.2g$ ,标准差为  $0.1$ 。按照式(5)得到工程岩体沿结构面滑移的失效概率和可靠度指标。地震参数分别为  $M=7$ , $r=20$  km; $M=7$ , $r=100$  km; $M=7.8$ , $r=100$  km 时,可靠度  $\beta=0.6400$ ,失效概率  $p_f=0.2609$ ; $\beta=4.9434$ ,  $p_f=3.8393 \times 10^{-7}$ ; $\beta=4.2488$ ,  $p_f=1.0747 \times 10^{-5}$ 。由此可见:两个远场地震作用下,该工程岩体的可靠度都超过  $4.0$ ,失效概率都小于  $0.01\%$ ;即使发生远场地震,该工程岩体的滑移是小概率事件,且震级对岩体失效概率影响不大;近场地震作用下,工程岩体的可靠度指标为  $0.64$ ,失效概率为  $26.1\%$ ,可见,一旦发生近场地震,工程岩体滑移的可能性很大。

### 5 结论

- (1) 基于时域和频域非平稳的随机地震动模型,编程实现对潜源地震的地震动快速随机抽样。
- (2) 在工程岩体结构面上定义了水平等效加速度时程,以最大水平等效加速度代表地震诱发岩体结构面滑移的荷载水平。两个远场地震作用下,某工程岩体的可靠度均超过  $4.0$ ,失效概率都小于  $0.01\%$ ;近场地震作用下,工程岩体的可靠度指标为  $0.64$ ,失效概率为  $26.1\%$ 。

### 参考文献:

[1] 贾超,刘宁,陈进. 地震作用下土坡可靠度风险分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(4):703-707.  
 JIA Chao, LIU Ning, CHEN Jin. Slope risk analysis under the earthquake effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(4):703-707.

[2] 刘红帅,薄景山,杨俊波,等. 确定岩质边坡地震安

- 全系数的简化方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6):1107-1114.
- LIU Hongshuai, BO Jingshan, YANG Junbo, et al. Simplified method for determining seismic safety factor of rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6):1107-1114.
- [3] 徐强, 李静, 陈建云, 等. 非平稳地震动过程中混凝土重力坝受拉失效路径可靠度分析[J]. 工程力学, 2011, 28(3):123-129.
- XU Qiang, LI Jing, CHEN Jianyun, et al. Concrete gravity dam reliability analysis on tension failure path under non-stationary ground motion processes[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3):123-129.
- [4] 徐建平, 胡厚田. 摄动随机有限元法在顺层岩质边坡可靠性分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1):71-77.
- XU Jianping, HU Houtian. Application of perturbation stochastic finite element method in the reliability analysis of rock bedding slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 21(1):71-77.
- [5] 刘佩, 姚谦峰, 袁泉. 动力可靠度计算的概率简单叠加法则法[J]. 计算力学学报, 2011, 28(1):49-54.
- LIU Pei, YAO Qianfeng, YUAN Quan. Method based on simple additive rules of probability for dynamic reliability calculations[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(1):49-54.
- [6] 任丽梅, 徐伟, 肖玉柱, 等. 基于重要样本法的结构动力学系统的首次穿越[J]. 力学学报, 2012, 44(3):648-652.
- REN Limei, XU Wei, XIAO Yuzhu, et al. First excursion probabilities of dynamical systems by importance sampling[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(3):648-652.
- [7] KIUREGHIAN A D. The geometry of random vibrations and solutions by FORM and SORM[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2000, 15:81-90.
- [8] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 2006.
- [9] REZAEIAN S, KIUREGHIAN A D. Stochastic modeling and simulation of ground motions for performance-based earthquake engineering[R]. Peer, 2010.

(编辑 沈玉英)