

文章编号:1001-7372(2015)10-0026-08

# 框架预应力锚杆边坡锚固结构的随机地震反应及动力可靠度分析

董建华<sup>1,2,3</sup>, 张 媛<sup>1,2</sup>, 朱彦鹏<sup>1,2</sup>, 董旭光<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 阿尔伯塔大学 资源环境与土木工程系, 阿尔伯塔 埃德蒙顿 T6G 2R3)

**摘要:**为了简化框架预应力锚杆边坡锚固结构随机地震反应分析和动力可靠度计算方法,提高计算效率,采用虚拟激励法对锚杆边坡锚固结构进行了随机地震反应分析,获得了框架预应力锚杆边坡锚固结构的地震反应功率谱,给出了改进的动力可靠度计算方法,进行了工程实例验证,并将提出的方法与 Monte-Carlo 法进行了比较。结果表明:提出的分析模型物理概念明确,是一种快速、精确、实用的分析方法,为框架预应力锚杆边坡锚固结构的随机地震反应分析与动力可靠度计算奠定了理论基础,并提供了一种新的计算途径;随机地震反应随着坡高逐渐增大,在坡中上部达到极值,锚固结构的动力响应峰值随着可靠度指标的增大而增大。

**关键词:**道路工程;边坡;虚拟激励法;框架预应力锚杆;动力计算模型;随机地震反应;动力可靠度  
**中图分类号:**U416.14 **文献标志码:**A

## Random Seismic Response and Dynamic Reliability Analysis of Frame with Prestressed Anchors for Slope Stability

DONG Jian-hua<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yuan<sup>1,2</sup>, ZHU Yan-peng<sup>1,2</sup>, DONG Xu-guang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton T6G 2R3, Alberta, Canada)

**Abstract:** In order to simplify the random seismic response analysis and dynamic reliability calculation method of the frame with prestressed anchor for slope anchor structure, and improve the calculation efficiency, the pseudo-excitation method was adopted to analyze random seismic response of anchor for slope anchor structure, and the power spectrum of seismic response of the frame with prestressed anchor was obtained. The improved dynamic reliability calculation method was presented, an engineering example was conducted to verify the effectiveness and reliability, and the proposed method was compared with Monte-Carlo method. The results show that the physical concept of proposed analysis model is clear, which is a rapid, accurate and practical

收稿日期:2014-11-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51108221,51268037);教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20116201120002);甘肃省杰出青年基金项目(145RJDA330);陇原青年创新人才扶持计划;兰州理工大学红柳杰青基金项目(J201403);甘肃省高校基本科研业务费专项项目(1204ZTC058);国家留学基金委项目(2011862535)

作者简介:董建华(1980-),男,甘肃甘谷人,兰州理工大学教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:djhua512@163.com。

analysis method. The proposed method lays the theoretical basis and provides a new calculation way for dynamic reliability calculation and random seismic response analysis of frame with prestressed anchor for slope stability. Random seismic response increases gradually with the slope height, and the extremum occurs at the upper part of slopes. Anchorage structure dynamic response peak increases with the increase of reliability index.

**Key words:** road engineering; slope; pseudo-excitation method; frame with prestressed anchor; dynamic calculation model; random seismic response; dynamic reliability

## 0 引言

边坡失稳是全球性三大地质灾害之一,经常给工程建设带来很大困难,许多山地灾害与工程事故均与边坡有关。边坡治理在基础设施建设工程中占有重要地位,尤其在山区交通工程建设中,边坡处治问题十分突出,也是比较棘手的工程问题。边坡工程的研究,对人类的生产建设、生存环境,都具有重大的现实意义。

各地地震灾害分析结果表明,地震常常引起大量的边坡失稳、锚固结构破坏。随着高速公路和铁路建设的迅速发展,公路和铁路边坡锚固结构的抗震分析与设计越来越受到人们的重视。董建华等<sup>[1-5]</sup>建立了框架预应力锚杆边坡支护结构动力计算模型及稳定性评价模型。刘建华等<sup>[6]</sup>进行了锚杆加固边坡的简谐地震动力反应及其参数敏感性研究。郑文博等<sup>[7]</sup>研究了地震作用下预应力锚索加固复杂边坡的动力响应。石玉成等<sup>[8]</sup>对危岩体进行了锚杆加固,并进行了动力特性研究。叶海林等<sup>[9]</sup>对锚杆支护岩质边坡进行了动力稳定性评价。Bathurst 等<sup>[10-11]</sup>采用有限元法对锚杆支挡结构进行了地震动力响应分析。文畅平等<sup>[12-13]</sup>对格构式框架锚杆支护边坡进行了地震振动台模型试验,模拟了地震动力作用下位移模式的变化特性及抗震性能。近年来,尽管地震作用下框架预应力锚杆边坡锚固结构的工作机理在数值分析和室内试验方面取得了一定的研究成果,但现有的边坡支护结构地震作用下的动力分析基本上都是采用“定值分析”方法。事实上,地震动具有明显的不确定性,以往研究采用确定性分析,没有从本质上反映出边坡支护结构的动力反应机理。在进行支护结构地震动力分析与设计时,应将地震作用处理为随机场或至少处理为随机过程。迄今为止,有关框架预应力锚杆锚固边坡的随机地震反应及动力可靠度的研究成果鲜见报道。

地震发生具有明显的随机性和不确定性,基于动力可靠度理论的地震分析与抗震设计方法是岩土

工程防灾减灾发展的必然方向。同时地震作用下工程结构动力反应分析的结果是否准确、有效,除了与分析方法和计算模型有关外,还主要取决于输入的地震动是否与实际一致。地震动的不确定性是进行地震动力分析与设计的最大不确定性因素,地震动的随机性使得边坡锚固体系的动力分析与设计的不确定性程度加大。随着支护结构的发展,柔性边坡支挡结构被广泛应用在永久性工程中,但抗震设计理论和设计方法还停留在确定性的动力放大系数和拟静力阶段,由于岩土工程地质条件千差万别,地震动的随机性使得计算方法存在不合理性,目前,对锚固支护结构与土体协同工作的随机地震反应分析方法研究很少。随机振动法全面考虑了地震发生的概率特性,是一种合理、先进和较精确的分析方法。过去数十年间,随机振动理论被国内外学者逐步引入工程抗震分析与设计。例如:王志华等<sup>[14]</sup>提出一种简单的模拟平稳随机过程的地震动模型,并将其应用于均质土坝,分析了该土坝在随机地震动激励下的动力反应;刘汉龙等<sup>[15]</sup>给出了土石坝永久变形和危险性评价的随机地震作用分析方法;何蕴龙等<sup>[16]</sup>介绍了一种重力坝地震动力可靠度分析方法。

传统的随机振动分析比较复杂,虚拟激励法<sup>[17]</sup>作为随机反应分析的快速完全二次平方根法(CQC)算法,可以方便地应用于工程结构平稳/非平稳随机响应功率谱的计算。本文中采用虚拟激励法对框架预应力锚杆边坡锚固结构进行随机地震反应分析,获得其地震反应功率谱,并给出动力可靠度计算方法,最后将本文方法与 Monte-Carlo 法进行比较,并进行工程实例验证。

## 1 运动方程

采用笔者建立的动力计算模型<sup>[1]</sup>,其计算简图如图 1 所示,框架预应力锚杆运动方程<sup>[18-19]</sup>如下

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial y^4} + m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + k_i u = -m \frac{\partial^2 u_g \sin(\beta)}{\partial t^2} + \sum_{i=1}^N F_i'(t) \delta(y - y_i') - \sum_{i=1}^N \bar{T}_i' \delta(y - y_i')$$

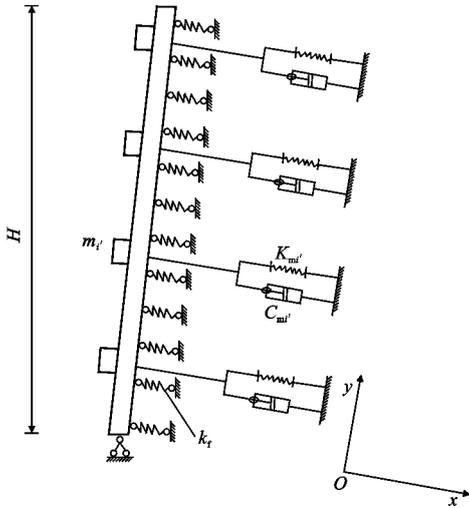


图1 简化计算模型

Fig. 1 Simplified Calculation Model

$$0 \leq y \leq H[\sin(\bar{\beta})]^{-1}, t \geq 0 \quad (1)$$

$$\bar{T}_i' = m_i' \frac{d^2 u(y_i', t)}{dt^2} \quad (2)$$

$$F_i'(t) = C_{mi}' \frac{du(y_i', t)}{dt} + K_{mi}' u(y_i', t) \quad (3)$$

式中:  $EI$  为框架柱的抗弯刚度;  $\bar{m}$  为框架柱单位长度的质量;  $u$  为框架柱水平位移;  $k_f$  为地基弹性系数;  $u_g$  为基岩水平地震输入;  $\bar{\beta}$  为边坡坡角;  $H$  为坡高;  $N$  为锚杆数;  $y_i'$  为第  $i'$  根锚杆所处位置竖向坐标;  $\delta(\cdot)$  为 Dirac 函数;  $F_i'(t)$  为在  $y_i'$  处第  $i'$  根锚杆锚固反力;  $t$  为时间;  $\bar{T}_i'$  为框架梁和挡土板的惯性作用;  $u(y_i', t)$  为在  $i'$  处的框架柱水平位移;  $m_i'$  为框架梁和挡土板质量;  $K_{mi}'$  为锚杆弹性系数, 其值的计算参见文献[20];  $C_{mi}'$  为锚杆阻尼系数, 参照文献[21]、[22]中桩土阻尼计算方法, 取值如下

$$C_{mi}' = 2\bar{\rho}_i' B(V_S + V_P) \quad (4)$$

式中:  $V_S, V_P, B, \bar{\rho}_i'$  分别为土的剪切波速、压缩波速、锚杆与其周围土体系统的等效宽度及锚杆与土的等效密度。

运动方程初始条件为

$$u|_{t=0} = 0, \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0 \quad (5)$$

运动方程边界条件为

$$u|_{y=0} = 0, EI \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}|_{y=0} = 0 \quad (6)$$

$$EI \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}|_{y=H/\sin(\bar{\beta})} = 0, EI \frac{\partial^3 u}{\partial y^3}|_{y=H/\sin(\bar{\beta})} = 0 \quad (7)$$

## 2 随机地震反应分析

将平稳的随机振动分析转化为简谐振动分析,

将非平稳随机振动转化为确定性时间历程分析是虚拟激励法<sup>[17]</sup>的特性和优势, 可显著简化分析及计算, 且理论上的精确性保持不变。

由于岩土材料的高阻尼性, 随机地震输入和土体地震反应可近似处理为平稳过程。因此, 本文将基岩地震输入假设为平稳高斯过滤白噪声过程, 其谱密度用金井清谱表示, 即

$$S_{u_g}(\omega) = \frac{1 + 4\lambda_g^2(\omega\omega_g^{-1})^2}{[1 - (\omega\omega_g^{-1})^2]^2 + 4\lambda_g^2(\omega\omega_g^{-1})^2} S_0 \quad (8)$$

式中:  $\omega$  为输入激励圆频率;  $\omega_g$  和  $\lambda_g$  分别为土层过滤器的圆频率和阻尼比, 由地震烈度和场地条件确定;  $S_0$  为白噪声功率谱强度, 与峰值地震加速度  $a_{max}$  有关, 即

$$S_0 = \frac{4\lambda_g^2 a_{max}^2}{\pi\gamma_p^2 \omega_g (1 + 4\lambda_g^2)} \quad (9)$$

式中:  $\gamma_p$  为峰值因子, 通常  $\gamma_p = 3$ 。

当输入平稳激励时, 只需求解简谐运动方程的稳态解, 构造虚拟基岩加速度  $\ddot{u}_g$  为

$$\ddot{u}_g = \sqrt{S_{u_g}(\omega)} e^{i\omega t} \quad (10)$$

式中:  $i$  为虚数单位。

若假定随机地震输入为平稳过程, 则地震反应也近似为平稳过程<sup>[17]</sup>, 从而可设虚拟地震反应的形式为

$$\bar{u}(y, t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \bar{Y}_n(t) \varphi_n(y) \quad (11)$$

式中:  $\bar{u}(y, t)$  为虚拟地震反应位移;  $\bar{Y}_n(t)$  为振幅时间函数;  $\varphi_n(y)$  为式(1)对应的齐次方程的特征函数, 即

$$\varphi_n(y) = \sin(a_n y) + \frac{\sin[a_n H / \sin(\bar{\beta})]}{\text{sh}[a_n H / \sin(\bar{\beta})]} \text{sh}(a_n y) \quad (12)$$

$a_n$  由频率方程确定, 即

$$\cos[a_n H / \sin(\bar{\beta})] \text{sh}[a_n H / \sin(\bar{\beta})] - \sin[a_n H / \sin(\bar{\beta})] \text{ch}[a_n H / \sin(\bar{\beta})] = 0 \quad (13)$$

将式(10)和式(11)代入式(1), 然后两边同时乘以  $\varphi_n(y)$ , 并取  $[0, H/\sin(\bar{\beta})]$  上的定积分, 利用  $\delta$  函数的性质以及固有函数的正交性有

$$\bar{M}_n \ddot{\bar{Y}}_n(t) + (\omega_n^2 \bar{M}_n + K_n) \bar{Y}_n(t) = P_n(t) \quad (14)$$

$$\bar{M}_n = \int_0^{H/\sin(\bar{\beta})} \bar{m} \varphi_n^2(y) dy \quad (15)$$

$$K_n = \int_0^{H/\sin(\bar{\beta})} k_f \varphi_n^2(y) dy \quad (16)$$

$$P_n(t) = \int_0^{H/\sin(\bar{\beta})} \varphi_n(y) [-\bar{m} \sqrt{S_{u_g}(\omega)} e^{i\omega t} \sin(\bar{\beta}) + \sum_{i=1}^N F_i'(t) \delta(y - y_i') - \sum_{i=1}^N \bar{T}_i' \delta(y - y_i')] dy =$$

$$\int_0^{H/\sin(\beta)} \varphi_n(y) [-\bar{m} \sqrt{S_{u_g}(\omega)} e^{i\omega t} \sin(\beta)] dy + \sum_{i=1}^N F_i'(t) \varphi_n(y_i') - \sum_{i=1}^N \bar{T}_i' \varphi_n(y_i') \quad (17)$$

从而可得随机地震反应为

$$\bar{Y}_n(t) = \frac{1}{M_n \omega_n} \int_0^t P_n(\tau) \sin[\omega_n(t-\tau)] d\tau \quad (18)$$

$$\bar{\omega}_n = \sqrt{\omega^2 + \frac{K_n}{M_n}} \quad (19)$$

式中:  $\bar{\omega}_n$  为地震反应圆频率;  $\tau$  为时间。

由虚拟激励理论可得随机地震位移反应自功率谱  $S_{uu}$  为

$$S_{uu} = \bar{u}(y, t) \bar{u}(y, t) \quad (20)$$

在虚拟激励作用下得到反应的自功率谱密度, 经过积分可以得到其均方差, 位移反应均方差  $\sigma_u^2$  为

$$\sigma_u^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{uu}(\bar{\omega}) d\bar{\omega} \quad (21)$$

同理可以得到框架及锚杆内力的随机地震反应、功率谱及均方差。由于输入采用的是零均值, 对应的中心化的地震反应也为零均值。

### 3 动力可靠度计算

#### 3.1 首次穿越破坏概率

首次穿越破坏和疲劳破坏是 2 种主要与随机振动相关的结构破坏准则。地震作用下结构的动力可靠度分析是典型的基于首次穿越破坏的分析。假定对于零均值高斯随机过程, 采用首次破坏理论, 当界限  $a$  较大时, 随机反应变量  $S(t)$  超越限值  $S=a$  的次数的的事件近似服从泊松分布, 其概率  $P_S(a)$  的表达式为

$$P_S(a) = P[S(t) \leq a] \quad (22)$$

在单位时间内随机动力响应过程  $S(t)$  与界限  $S=a$  的交叉次数  $N_a^+$  为

$$N_a^+ = N_0^+ \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (23)$$

式中:  $N_0^+$  为在  $t$  时刻地震反应过程的穿零率, 其值为  $N_0^+ = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_s}{\sigma_s}$ ,  $\sigma_s, \sigma_s'$  分别为随机过程  $S(t)$  和其导数的均方根。

随机过程  $S(t)$  超过限值  $S=a$  的事件服从泊松分布, 在强震时间  $T$  内超过限值  $S=a$  的峰值数目  $K$  的概率  $P(K, T)$  [23-24] 为

$$P(K, T) = \frac{(N_a^+ T)^K}{K!} \exp(-N_a^+ T) \quad (24)$$

在强震时间  $T$  内超过  $S=a$  的数目为 0 的动力可靠度概率为

$$P_S(a) = P(0, T) = \exp(-N_a^+ T) \quad (25)$$

由随机过程理论, 结合式(21)、(22)得到峰值反应的均值  $\mu_{S_j^m}$  和标准差  $\sigma_{S_j^m}$  [24] 分别为

$$\mu_{S_j^m} = \left[ \sqrt{2 \ln(N_0^+ T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(N_0^+ T)}} \right] \sigma_{S_j} \quad (26)$$

$$\sigma_{S_j^m} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} \frac{1}{\sqrt{2 \ln(N_0^+ T)}} \sigma_{S_j} \quad (27)$$

式中:  $\mu_{S_j^m}, \sigma_{S_j^m}$  分别为第  $j$  个构件峰值反应的均值和标准差;  $\sigma_{S_j}$  为第  $j$  个构件反应的标准差。

#### 3.2 极限状态方程

取支护结构各层锚杆轴力的地震响应峰值不超过弹性极限摩阻力限值, 外框架的地震响应峰值不超过极限承载力值作为支护结构的功能方程, 即任何 1 根锚杆的最大轴力反应值超过其弹性摩阻力界限值(拔出或拔断), 框架的弯矩和剪力超过极限承载力则视为框架预应力锚杆支护体系失效, 且假定每根锚杆和框架的失效互不关联, 则其表达式为

$$S_j - R_j = 0 \quad (28)$$

式中:  $S_j, R_j$  分别为最大值和允许值, 其中  $R_j = G(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,  $X_1, X_2, \dots, X_n$  均为随机变量。

#### 3.3 支护结构体系失效概率

由于极限状态方程[式(28)]不能直接采用上述首次穿越破坏泊松过程求解动力可靠度, 为了使式(29)能够计算, 将非正态的  $R_j$  当量正态化 [25]

$$\mu_{X_j'} = x_j^* - \varphi^{-1} [F_{X_j}(x_j^*)] \sigma_{X_j'} \quad (29)$$

$$\sigma_{X_j'} = \frac{\varphi\{\varphi^{-1}[F_{X_j}(x_j^*)]\}}{f_{X_j}(x_j^*)} \quad (30)$$

式中:  $\mu_{X_j'}, \sigma_{X_j'}$  分别为非正态的  $R_j$  当量正态化的均值和标准差;  $\varphi^{-1}(\cdot)$  为标准正态分布函数的反函数;  $\varphi(\cdot)$  为标准正态概率密度函数;  $F_{X_j}(\cdot), f_{X_j}(\cdot)$  分别为  $X_j$  概率分布函数和密度函数;  $x_j^*$  为设计验算点的坐标。

假定  $R_j$  服从对数正态分布 [24], 将其代入式(29)、(30), 可得当量正态随机过程  $R_j'$  的均值  $\mu_{R_j'}$  和标准差  $\sigma_{R_j'}$  分别为 [25-26]

$$\mu_{R_j'} = x_{R_j}^* \left[ 1 - \ln(x_{R_j}^*) + \ln\left(\frac{\mu_{R_j}}{\sqrt{1 + \sigma_{R_j}^2}}\right) \right] \quad (31)$$

$$\sigma_{R_j'} = x_{R_j}^* \sqrt{\ln(1 + \sigma_{R_j}^2)} \quad (32)$$

式中:  $\mu_{R_j'}, \sigma_{R_j'}$  分别为当量正态随机过程  $R_j'$  的均值和标准差;  $x_{R_j}^*$  为随机过程  $R_j$  变量对应的设计验算点。

设计验算点  $x_j^*$  事先无法确定, 通过迭代法求解。将  $R_j'$  进一步当量正态化 [16], 可改写为

$$R_j' = \mu_{R_j'} + r_j \quad (33)$$

式中:  $r_j$  为均值为 0 的正态变量,  $r_j$  的标准差  $\sigma_{r_j} = \sigma_{R_j'}$ 。

将式(33)代入  $R_j = G(X_1, X_2, \dots, X_n')$ , 再代入式(28)可得

$$S_j(t) = \mu_{R_j}' + r \quad (34)$$

令  $Q_j(t) = S_j(t) - r$ , 得  $Q_j(t) = \mu_{R_j}'$ ,  $Q_j(t)$  仍然为高斯平稳过程。将  $Q_j(t)$  及其导数  $\dot{Q}_j(t)$  的均方根代入式(25), 且令  $a = \mu_{R_j}'$ , 则动力可靠度  $P_{S_j}$  为

$$P_{S_j} = \exp\left[-\frac{1}{2\pi\sigma_{Q_j}} \exp\left(-\frac{\mu_{R_j}'^2}{2\sigma_{Q_j}^2}\right)\right] \quad (35)$$

$$\sigma_{Q_j} = \sqrt{\sigma_{S_j}^2 + \sigma_{R_j}'^2} \quad (36)$$

$$\sigma_{Q_j} = \sigma_{S_j} \quad (37)$$

由于假定各部分失效非关联, 则整个体系的动力可靠度  $P_S$  为

$$P_S = \prod_{j=1}^n P_{S_j} \quad (38)$$

## 4 工程算例分析

### 4.1 工程背景

兰州市南山公路某边坡为天然边坡, 边坡高度 10.0 m。土体为黄土状粉土, 其主要物理力学性质见表 1。边坡位于黄河南岸 III 级阶地前缘斜坡部位, 地势相对较高, 且该段公路穿越高烈度地区。考虑到边坡的永久性安全以及立面美观, 拟对该公路边坡进行加固处理, 安全等级为一级。重要性系数取 1.1, 最小稳定安全系数取 1.3, 混凝土用 C30, 每根锚杆施加预应力为 100 kN。场地条件  $\omega_g = 15.2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\lambda_g = 0.75$ , 抗震设防烈度为 8 度,  $a_{\max} = 0.2g$ 。其他计算参数如表 2 所示。地震持时选取 10 s, 输入功率谱如图 2 所示。支护设计结果如图 3 所示, 最底层锚杆是构造设计, 在分析中没有考虑, 锚固段直径为 150 mm。

表 1 土体物理性质

Tab. 1 Physical Property of Soil

参数	厚度/ m	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力 $c$ / kPa	内摩擦 角 $\varphi$ /( $^\circ$ )	界面粘结 强度/kPa	坡角/ ( $^\circ$ )
参数值	$\geq 30$	16.8	12	22	50	80

### 4.2 随机地震反应分析

通过计算可得地震作用下框架预应力锚杆支护边坡的位移和内力随机反应。图 4 给出了各层锚杆轴力峰值沿坡高的分布情况。由图 4 可以看出, 轴力沿坡高逐渐增大, 在边坡中上部达到最大。根据边坡所在场地输入功率谱密度, 随机生成与场地条件一致的 50 个样本地震波, 采用 Monte-Carlo 方法求得各层锚杆轴力峰值反应, 并与本文方法进行了对比。通过与 Monte-Carlo 方法对比可知, 虚拟

表 2 计算参数

Tab. 2 Calculating Parameters

参数	参数值
土体剪切模量 $G/\text{MPa}$	7.7
锚杆侧弹簧刚度 $k/\text{MPa}$	2.325
土的阻尼系数 $c_s/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	8 160
锚杆端头弹簧刚度 $k_0/\text{MPa}$	3.22
混凝土重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	25
杆体重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	78
锚固体重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	28
锚杆自由段弹性模量 $E_1/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$2 \times 10^{11}$
锚杆锚固段组合体弹性模量 $E_2/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$8 \times 10^9$

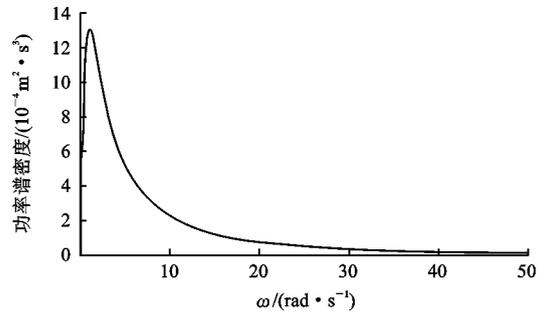


图 2 输入功率谱

Fig. 2 Input Power Spectrum

激励法简单、实用, 计算效率和精度均较高, 在工程分析与设计方面显示出优越性。

图 5 为第 3 层锚杆轴力在随机地震作用下的均方根反应。从图 5 可以看出, 在地震作用过程中, 锚杆轴力具有明显的波动性, 在土体阻尼作用下锚杆轴力存在明显的衰减现象。

图 6 给出了框架预应力锚杆锚固边坡在随机地震作用下的水平位移峰值均方根, 和轴力类似, 也是在边坡中上部达到极值。

### 4.3 动力可靠度分析

图 7, 8 给出了框架预应力锚杆轴力峰值和位移峰值反应随可靠度指标  $\beta$  的变化关系。由图 7, 8 可知, 框架预应力锚杆边坡支护结构的位移和轴力的极值随可靠度指标的增高而增大。从而可知, 要使支护结构的抗震可靠性较高, 必须满足各项动力指标的容许值都较高。

表 3 给出了各层锚杆的失效概率, 通过文献[5]中的失效模式可得, 锚固边坡在地震作用下的整体失效概率为  $1.25 \times 10^{-2}$ 。由于锚固边坡的各层锚杆位移反应很大, 整个锚固结构体系的条件失效概率基本上取决于支护结构体系的失效概率。要减小锚固边坡结构体系在地震作用下锚固体滑移或开裂的概率, 需要将锚杆的刚度值取小一些, 即锚杆设

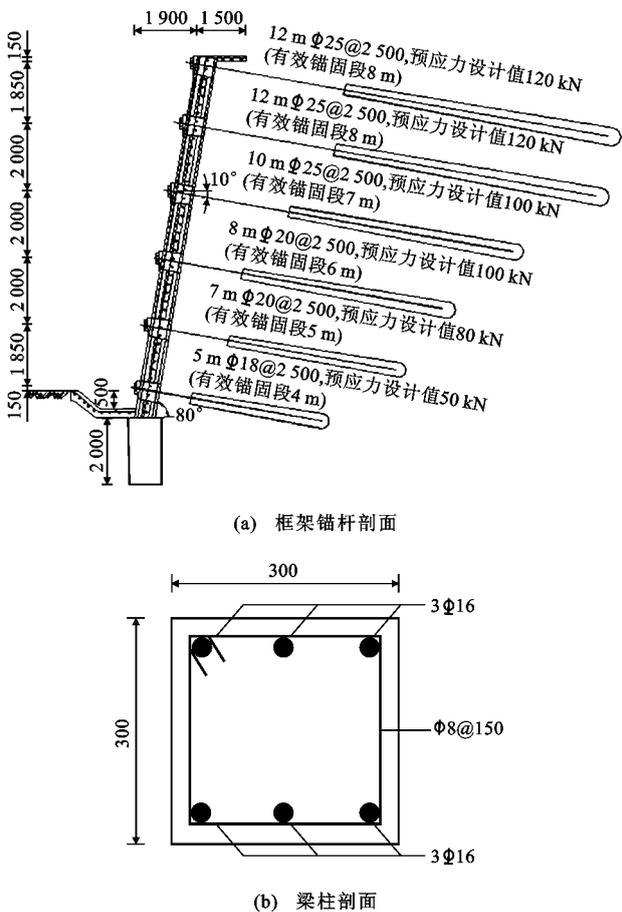


图 3 支护设计剖面(单位:mm)

Fig. 3 Sectional Drawing of Supporting Design (Unit: mm)

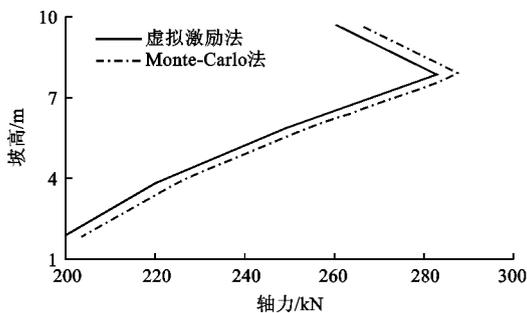


图 4 各层锚杆轴力峰值随机地震反应

Fig. 4 Random Seismic Response of Anchor Axial Force Peak of Each Layer

计时长度加长,锚固体尽量减小。

### 5 结语

(1) 基于虚拟激励法,对框架预应力锚杆边坡锚固结构进行了随机地震反应分析,获得了锚固结构随机地震反应数字特征的解析表达式,为边坡锚固结构的随机地震反应分析及动力可靠度的计算提供了一种简明、有效的分析途径。

(2) 在当量正态化法和泊松过程法基础上,给出

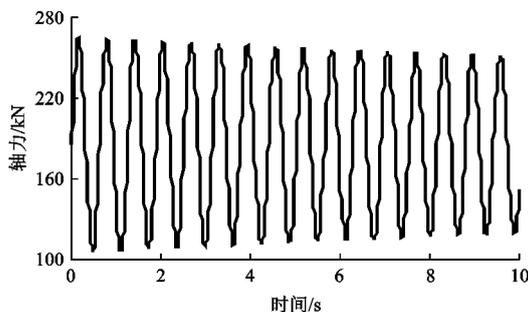


图 5 第 3 层锚杆轴力均方根反应

Fig. 5 Response of Mean-square-root of Axial Force for Third Layer Anchor

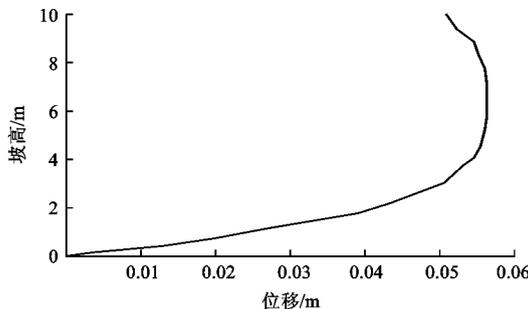


图 6 边坡位移反应均方根峰值

Fig. 6 Mean-square-root Peak Value of Slope Displacement Response

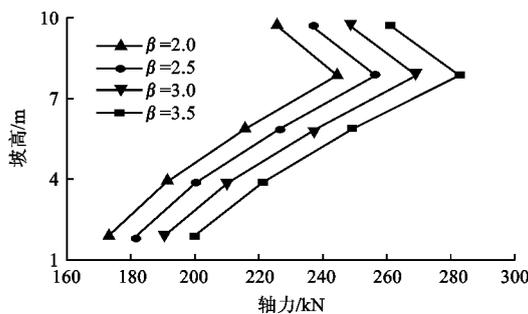


图 7 锚杆轴力地震反应峰值随可靠度指标的变化

Fig. 7 Seismic Response Peak Value Change of Anchor Axial Force with Reliability Index

了框架预应力锚杆边坡锚固结构动力可靠度计算方法,改进了首次穿越破坏泊松过程求解动力可靠度的缺陷,为可靠性抗震设计奠定了理论基础。

(3) 通过工程算例研究了边坡支护结构的随机地震动力特性,结果表明:随机地震反应随着坡高逐渐增大,在坡中上部达到极值,锚固结构的动力响应峰值随着可靠度指标的增大而增大。

(4) 在比较大的地震作用下,框架预应力锚杆边坡锚固结构可能会发生塑性变形,本文中未给出塑性阶段的动力可靠度分析与设计方法,尚须进一步研究;框架锚杆边坡锚固结构在随机地震作用下的

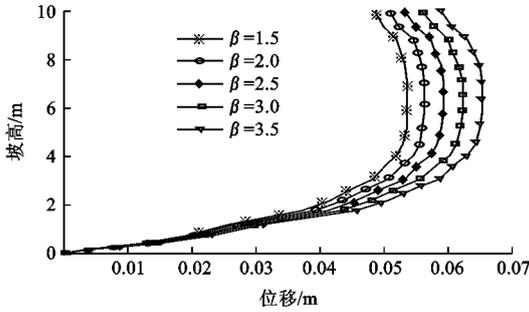


图8 地震位移反应峰值随可靠度指标的变化

Fig. 8 Displacement Response Peak Value Change of Seismic with Reliability Index

表3 各层锚杆可靠指标及失效概率

Tab. 3 Reliability Index and Failure Probability of Each Layer Anchor

锚杆层号	可靠度指标	失效概率
1	2.58	$4.97 \times 10^{-3}$
2	2.60	$4.63 \times 10^{-3}$
3	2.79	$2.61 \times 10^{-3}$
4	3.31	$4.72 \times 10^{-4}$
5	4.06	$2.49 \times 10^{-5}$

整体稳定和局部稳定的可靠性问题也需进一步研究探讨。

## 参考文献:

## References:

- [1] DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng, ZHOU Yong, et al. Dynamic Calculation on Model and Seismic Response for Frame Supporting Structure with Prestressed Anchors[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(7): 1957-1966.
- [2] 董建华, 朱彦鹏, 马巍. 框架预应力锚杆边坡支护结构动力计算方法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 250-258, 264.  
DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng, MA Wei. Study on Dynamic Calculation Method for Frame Supporting Structure with Pre-stress Anchors[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 250-258, 264.
- [3] 董建华, 朱彦鹏, 马巍. 地震作用下框架预应力锚杆边坡锚固结构的动力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增1): 3135-3143.  
DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng, MA Wei. Dynamic Calculation Method of Frame Prestressed Anchors for Slope Stability Under Seismic Effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S1): 3135-3143.
- [4] 董建华, 朱彦鹏, 马巍. 锚固边坡地震动力稳定性计

算方法[J]. 振动工程学报, 2013, 26(4): 633-640.

DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng, MA Wei. Dynamic Stability Calculation Method for Anchor Slope Based on Stress State[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(4): 633-640.

- [5] 董建华, 朱彦鹏, 马巍, 等. 框架预应力锚杆边坡支护结构抗震简化设计方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 38-46.  
DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng, MA Wei, et al. Simplified Seismic Design Method of Frame Supporting Structure with Prestressed Anchors for Slope Stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 38-46.
- [6] 刘建华, 汪优, 付康林, 等. 简谐振动荷载下锚杆加固岩质边坡的受力分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(增1): 85-90.  
LIU Jian-hua, WANG You, FU Kang-lin, et al. Force Analysis of Anchor Bolts Reinforcing Rock Slope Under Simple Harmonic Vibration Load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 85-90.
- [7] 郑文博, 庄晓莹, 蔡永昌, 等. 地震作用下预应力锚索对岩石边坡稳定性影响的模拟方法及锚索优化研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1668-1676.  
ZHENG Wen-bo, ZHUANG Xiao-ying, CAI Yong-chang, et al. Modeling of Prestressed Anchors in Rock Slope Under Earthquake and Optimization of Anchor Arrangement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1668-1676.
- [8] 石玉成, 秋仁东, 孙军杰, 等. 地震作用下预应力锚索加固岩体的动力响应分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1157-1162.  
SHI Yu-cheng, QIU Ren-dong, SUN Jun-jie, et al. Analysis of Dynamic Response of Dangerous Rock Mass Reinforced by Prestressed Anchor Cables Under Seismic Loads[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1157-1162.
- [9] 叶海林, 黄润秋, 郑颖人, 等. 岩质边坡锚杆支护参数地震敏感性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1372-1379.  
YE Hai-lin, HUANG Run-qiu, ZHENG Ying-ren, et al. Sensitivity Analysis of Parameters for Bolts in Rock Slopes Under Earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1372-1379.
- [10] BATHURST R J, KARPURAPU R, JARRETT P M. Finite Element Analysis of a Geogrid Reinforced Soil Wall[C]//ASCE. Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics. Reston: ASCE, 1992: 1213-1224.
- [11] HO S K, ROWE R K. Finite Element Analysis of

- Geosynthetic Reinforced Soil Walls[M]. London: University of Western Ontario, 1992.
- [12] 文畅平, 杨果林. 格构式框架护坡地震动位移模式的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2076-2083.
- WEN Chang-ping, YANG Guo-lin. Shake Table Model Test Study of Seismic Displacement Mode of Slope with Anchor Lattice Frame Structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(10): 2076-2083.
- [13] 叶海林, 郑颖人, 陆新. 边坡锚杆地震动特性的振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S): 152-157.
- YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, LU Xin. Shake Table Test on Anchor Bars of Slope Under Earthquake [J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 2011, 44(s): 152-157.
- [14] 王志华, 胡庆兴. 均质土坝非平稳随机地震反应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(1): 35-40, 47.
- WANG Zhi-hua, HU Qing-xing. Non-stationary Stochastic Seismic Analysis of Homogeneous Earth Dam [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(1): 35-40, 47.
- [15] 刘汉龙, 钱家欢. 随机地震作用下土石坝永久变形预估[J]. 河海大学学报, 1996, 24(2): 86-91.
- LIU Han-long, QIAN Jia-huan. Permanent Deformation of Embankment Dam Due to Stochastic Seismic Excitation [J]. Journal of Hohai University, 1996, 24(2): 86-91.
- [16] 何蕴龙, 陆述远, 段亚辉. 重力坝地震动力可靠度分析方法研究[J]. 水力学报, 1998, 29(4): 66-69.
- HE Yun-long, LU Shu-yuan, DUAN Ya-hui. Study on the Method for Analyzing Aseismic Reliability of Gravity Dam [J]. Shuili Xunbao, 1998, 29(4): 66-69.
- [17] 林家浩, 张亚辉. 随机振动的虚拟激励法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- LIN Jia-hao, ZHANG Ya-hui. Pseudo-excitation Method of Random Vibration [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [18] CLOUGH R W, PENZIEN J. 结构动力学[M]. 王光远, 译. 北京: 科学出版社, 1981.
- CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of Structure [M]. Translated by WANG Guang-yuan. Beijing: Science Press, 1981.
- [19] 谢定义. 土动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- XIE Ding-yi. Soil Dynamics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [20] JGJ 120—99, 建筑基坑支护技术规程[S].
- JGJ 120—99, Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations [S].
- [21] KAGAWA T. Lateral Pile-group Response Under Seismic Loading [J]. Soils and Foundations, 1983, 23(4): 75-86.
- [22] SEED H B, IDRISS I M. Soil Module and Damping Factor for Dynamic Response Analysis[R]. Berkeley: University of California, 1970.
- [23] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- OU Jin-ping, WANG Guang-yuan. Random Structure of Vibration [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [24] 李桂青, 曹宏, 李秋胜, 等. 结构动力可靠性理论及其应用[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- LI Gui-qing, CAO Hong, LI Qiu-sheng, et al. Structural Dynamic Reliability Theory and Its Application [M]. Beijing: Earthquake Press, 1993.
- [25] 戴宗信. 结构动力学的概率分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.
- DAI Zong-xin. Probability Analysis of Structural Dynamics [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1989.
- [26] 赵国藩, 金伟良, 贡金鑫. 结构可靠度理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- ZHAO Guo-fan, JIN Wei-liang, GONG Jin-xin. Structural Reliability Theory [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000.