

文章编号:0253-9993(2012)12-1994-05

框架预应力锚杆支护边坡地震动稳定性分析方法

叶帅华^{1,2}, 朱彦鹏^{1,2}

(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)

摘要:在考虑锚杆预应力对黄土边坡稳定性影响的情况下,根据土体边坡滑移面的破坏模式,建立了框架预应力锚杆支护边坡的地震动稳定性分析模型。利用集中质量显式有限元法,将土体离散为土体静动力微元和土体预应力微元,并建立了相应的离散动力平衡方程,推导了边坡在地震作用下的位移反应和滑移面上的应力场。基于位移反应和土体应力场,提出了框架预应力锚杆支护边坡在地震作用下的稳定性安全系数计算方法。用本文方法针对某一工程实例进行分析,并与拟静力法的结果进行比较。比较结果表明,本文方法对于土质均匀的黄土边坡是可行的,相比拟静力法,更能反应黄土支护边坡的地震作用和土的动力特性。

关键词:框架预应力锚杆; 支护边坡; 地震作用; 土体静动力微元; 土体预应力微元; 稳定性
中图分类号:TD353.6; TU443 **文献标志码:**A

Stability analysis of slope supported by frame with pre-stressed anchors under earthquake

YE Shuai-hua^{1,2}, ZHU Yan-peng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Northwest Center for Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Under the situation of considering the anchor prestress effects on stability of loess slope, according to the damage of the sliding surface, stability model of slope supported by frame with pre-stressed anchors under earthquake was established. By the method of lumped-mass explicit finite element, the soil was separated into soil-static-dynamic micro-unit and soil-prestressed micro-unit discretely, and the corresponding discrete element dynamic equilibrium equation was established, the displacement response and the stress field in sliding surface of the supporting slope were deduced. Based on the displacement response and the soil stress field, a calculation method of stability safety factor for slope supported by frame with pre-stressed anchors under earthquake was proposed. A project example was analyzed by using the method proposed in this paper, the result was compared with the one of the quasi-static method. Comparison results show that the method proposed in this paper for the homogeneous loess slope is feasible, the earthquake reaction of the supporting loess slope and the dynamic performance of the soil can be showed primely compared with pseudo-static method.

Key words: frame with pre-stressed anchors; supporting slope; seismic action; soil-static-dynamic micro-unit; soil-prestressed micro-unit; stability

我国属于多地震国家,占全球约 1/4 的人口承受了约 1/3 的大陆地震和约 1/2 的地震死亡人数^[1]。

随着国家西部大开发的进一步加快,越来越多的基础设施建设在西北地区得以开展,但是西北地区存在大量的

收稿日期:2011-10-18 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978129);国家科技支撑计划资助项目(2011BAK12B07)

作者简介:叶帅华(1983—),男,河南巩义人,博士研究生。Tel:0931-2976372, E-mail: yeshuaihua@163.com

黄土边坡,要在这些地方修建道路和房屋,就需要保证这些边坡的稳定,尤其是地震作用下边坡的稳定性。近年来,框架预应力锚杆支护技术在西北黄土边坡中得到了广泛的应用^[2-9],其对边坡的加固效果显著,对保证道路的安全畅通和人民的生活环境的安定发挥了巨大的作用,在地震过程中亦表现出了很好的抗震性能,然而,目前在国内外对框架预应力锚杆支护结构在地震动作用下的稳定性方面的研究还比较缺乏,呈现出理论研究远远落后于实践的一种现象。

本文在考虑锚杆预应力对黄土边坡稳定性影响的情况下,根据土体边坡滑移面的破坏模式,建立了框架预应力锚杆支护边坡的地震动稳定性数值分析模型。利用集中质量显式有限元法,将土体离散为土体静动力微元和土体预应力微元,并建立了相应的离散元动力平衡方程,分析了支护边坡在地震作用下的位移反应和滑移面上的应力场。并基于位移反应和土体应力场,提出了框架预应力锚杆支护边坡在地震作用下的稳定性安全系数计算方法。最后结合一工程实例验证了本文方法,这种稳定性计算方法给框架预应力锚杆支护边坡的地震动稳定性分析提供了一种新的途径。

1 基本假定

在建立框架预应力锚杆支护边坡地震动稳定性模型时,作以下假定:

- (1)破坏发生于指定的滑移面,滑移面通过坡脚;
- (2)锚杆锚固段以固定支座的形式与土体连接,锚杆不存在预应力损失;
- (3)框架与土体之间不考虑接触,框架与土体看成一个弹性体。

2 支护边坡地震动稳定性模型及分析方法

在地震作用下,采用集中质量显式有限元法,将框架预应力锚杆支护边坡滑移面上的土体离散成若干个微元,如图 1 所示。图 1 中 z 表示滑动土体的高度, δ 表示支护边坡土体位移。对计算区域进行有限元离散后可得到动力平衡方程^[10]:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = -M\ddot{\delta}_g + K_m\delta \quad (1)$$

式中, M 为坡体的总质量矩阵,其中包含框架(横梁和立柱)和挡土板的质量; C 为坡体的总阻尼矩阵; K 为坡体的总刚度矩阵; K_m 为预应力锚杆的弹性刚度矩阵; δ , $\dot{\delta}$, $\ddot{\delta}$ 分别为坡体节点的位移、速度和加速度向量; $\ddot{\delta}_g$ 为地震加速度向量。

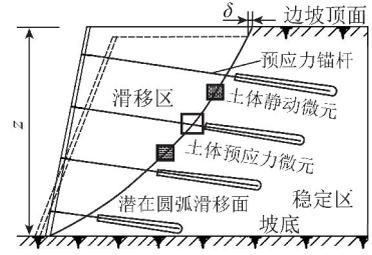


图 1 支护边坡地震稳定性模型计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of stability for the supporting slope under earthquake

将框架预应力锚杆支护边坡进行离散,则对应于方程(1)具有集中质量 m_i 的节点 i ,其运动平衡方程^[11]为

$$m_i\ddot{\delta}_{ix} + c_i\dot{\delta}_{ix} + k_i\delta_{ix} = -m_i\ddot{\delta}_{gix} + k_{mi}\delta_{ix} \quad (2)$$

式中, m_i 为离散微元节点 i 的集中质量; c_i 为离散微元节点 i 的阻尼,采用 Rayleigh 阻尼假定, $c_i = \alpha m_i + \beta k_i$, α 和 β 为 Rayleigh 阻尼系数, $\alpha = \lambda \omega_s$, $\beta = \lambda / \omega_s$, ω_s 为土体的振动频率, λ 为单元的阻尼比; k_i 为离散微元节点 i 的刚度; k_{mi} 为预应力锚杆的单元弹性刚度; δ_{ix} , $\dot{\delta}_{ix}$, $\ddot{\delta}_{ix}$ 分别为坡体微元节点 i 在 x 方向的位移、速度和加速度; $\ddot{\delta}_{gix}$ 为离散微元节点 i 在 x 方向的地震加速度。

对方程(2)的求解采用中心差分法,将方程演变为显示积分格式,并具有二阶计算精度:

$$\delta_{ix}^{l+1} = \frac{\Delta t^2}{2} m_i^{-1} (-m_i \ddot{\delta}_{gix}^l + k_{mi} \delta_{ix}^l) + \delta_{ix}^l + \Delta t \dot{\delta}_{ix}^l - \frac{\Delta t^2}{2} m_i^{-1} (c_i \dot{\delta}_{ix}^l + k_i \delta_{ix}^l) \quad (3)$$

$$\dot{\delta}_{ix}^{l+1} = \frac{\Delta t^2}{2} m_i^{-1} [-m_i (\dot{\delta}_{gix}^{l+1} + \ddot{\delta}_{gix}^l) + k_{mi} (\delta_{ix}^{l+1} + \delta_{ix}^l)] + \dot{\delta}_{ix}^l - \frac{\Delta t}{2} m_i^{-1} k_i (\delta_{ix}^{l+1} + \delta_{ix}^l) m_i^{-1} c_i (\delta_{ix}^{l+1} - \delta_{ix}^l) \quad (4)$$

式中, l 为微元单位界面长度。

对式(3)和式(4)逐步积分求出节点位移后,利用本构关系求出单元的应力状态。

3 动力稳定性系数计算

地震作用下框架预应力锚杆支护边坡的总应力状态简化为滑动区土体的自重应力状态,通过锚杆施加在土体上的预应力状态和附加地震动应力状态的叠加,黄土边坡危险滑移面上的稳定性系数为滑面上的抗滑力与滑动力之比。由于土体自重、锚杆预应力和地震动作用的影响,将土体离散微元分为土体静动力微元 i 和土体预应力微元 k ,也就相应地得到了土体的静动应力场和土体预应力场,如图 1,2 所示,稳

定性系数时间函数可表示为

$$K(t) = \frac{\int \tau_k(t) dA}{\int \tau(t) dA} \quad (5)$$

式中, $K(t)$ 为稳定性系数; $\tau_k(t)$ 为滑移面上任一点在 t 时刻的抗滑力; $\tau(t)$ 为滑移面上任一点在 t 时刻的滑动力; dA 为滑面上微元的面积。

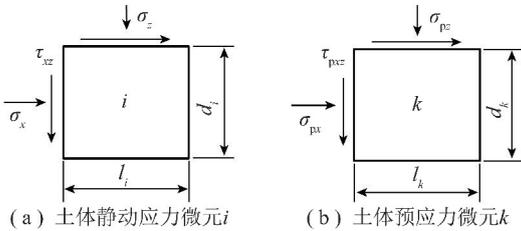


图 2 支护边坡滑移面土体应力场

Fig. 2 Soil stress field in sliding surface of the supporting slope

依据库仑土压力强度理论,用有限元方法计算稳定性系数时,考虑锚杆预应力对边坡稳定性的影响,将通过锚杆传递至土体而产生的应力场称为土体预应力场,如图 2 微元 k 所示,土体预应力分为土体正预应力 σ_{spk} 和剪预应力 τ_{spk} ,将式(5)表示成式(8)所示的离散形式:

$$\sigma_{spk} = \sigma_{pk} \sin \beta \quad (6)$$

$$\tau_{spk} = \sigma_{pk} \cos \beta \quad (7)$$

$$K(t) = \left\{ \sum_{i=1}^n \{ c_i + [\sigma_{ji} + \sigma_{di}(t)] \tan \varphi_i \} A_i + \sum_{k=1}^m (\sigma_{pk} \sin \beta) A_k \right\} / \left\{ \sum_{i=1}^n [\tau_{ji} + \tau_{di}(t)] A_i + \sum_{k=1}^m (\sigma_{pk} \cos \beta) A_k \right\} \quad (8)$$

式中, c_i, φ_i 为土单元的黏聚力和内摩擦角; τ_{ji}, σ_{ji} 为滑移面上的土单元在静力状态下的剪应力和正应力; τ_{di}, σ_{di} 为滑移面上的土单元在地震作用下的剪应力和正应力; σ_{pk} 为锚杆预应力; A_i 为滑移面土体静动力微元面积, $A_i = l_i d_i$; A_k 为土体预应力微元面积, $A_k = l_k d_k$; β 为锚杆与水平面夹角; n 为滑动面上的单元数; m 为锚杆数。

边坡动力抗滑稳定性分析在静力计算和动力计算的基础上进行,由式(9)~(12)求出滑弧上微元 i 的静正应力 σ_{ji} 和静剪应力 τ_{ji} , 动正应力 σ_{di} 和动剪应力 τ_{di} , 式(6), (7)给出了滑弧上土体预应力微元 k 的正应力 σ_{spk} 和剪应力 τ_{spk} , 则滑弧上微元 i 的静动正应力 $\sigma_{jdi} = \sigma_{ji} + \sigma_{di}$, 微元 i 的静动剪应力 $\tau_{jdi} = \tau_{ji} + \tau_{di}$ 。

$$\cos \left(2\alpha - \arctan \frac{2\tau_{xj}}{\sigma_{xj} - \sigma_{zj}} \right) \quad (9)$$

$$\tau_{ji} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xj} - \sigma_{zj}}{2} \right)^2 + \tau_{xj}^2} \times \sin \left(2\alpha - \arctan \frac{2\tau_{xj}}{\sigma_{xj} - \sigma_{zj}} \right) \quad (10)$$

$$\sigma_{dj} = \frac{\sigma_{xd} + \sigma_{zd}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xd} - \sigma_{zd}}{2} \right)^2 + \tau_{xzd}^2} \times \cos \left(2\alpha - \arctan \frac{2\tau_{xzd}}{\sigma_{xd} - \sigma_{zd}} \right) \quad (11)$$

$$\tau_{di} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xd} - \sigma_{zd}}{2} \right)^2 + \tau_{xzd}^2} \times \sin \left(2\alpha - \arctan \frac{2\tau_{xzd}}{\sigma_{xd} - \sigma_{zd}} \right) \quad (12)$$

式中, α 为摩尔库伦应力圆中的土体内摩擦角。

对式(3), (4)进行逐步积分得出节点位移, 利用本构关系求出微元的应力状态。将式(6), (7), (9)~(12)代入式(8), 计算边坡稳定性系数时程。

边界条件

$$\delta(t) |_{t=0} = 0 \quad (13)$$

$$\dot{\delta}(t) |_{t=0} = 0 \quad (14)$$

土体剪切弹簧刚度^[12]:

$$k_i = \frac{G_i}{d_i} \quad (15)$$

式中, G_i 为第 i 个土体单元的动剪切模量。

土体的动剪切模量 G 采用 Seed 等的公式^[13], 即

$$G = Kp^{1-N} \sigma'_e \frac{G}{G_{\max}} \quad (16)$$

式中, K, N 为相应于 G_{\max} 时的试验常数; σ'_e 为平均有效应力; p 为大气压力。

预应力锚杆弹簧刚度^[14]为

$$k_{mi} = \frac{3AE_s E_c A_c}{3l_f E_c A_c + E_s A l_a} \cos^2 \beta \quad (17)$$

式中, A 为锚杆中钢筋拉杆的截面面积; A_c 为锚杆锚固体截面面积; E_s 为钢筋拉杆的弹性模量; E_c 为锚固体组合弹性模量, $E_c = \frac{AE_s + (A_c - A)E_m}{A_c}$, 其中 E_m 为锚固体中注浆体弹性模量; l_f, l_a 分别为锚杆自由段和锚固段长度。

4 数值算例

4.1 工程概况

甘肃省天水市民安家园住宅小区边坡支护, 边坡高度为 12 m, 边坡重要性系数 1.0, 边坡与水平面夹

$$\sigma_{ji} = \frac{\sigma_{xj} + \sigma_{zj}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xj} - \sigma_{zj}}{2} \right)^2 + \tau_{xj}^2} \times$$

角 80°,本工程抗震设防烈度为 8 度,地震动加速度峰值取 0.30g。

4.2 支护方案及设计结果

边坡土体参数见表 1,采用框架预应力锚杆挡墙对该边坡进行支护,框架梁、柱截面尺寸 0.4 m×0.4 m,挡土板厚度为 0.15 m,采用 C20 级混凝土,预应力锚杆设计结果见表 2,具体设计结果如图 3 所示。

表 1 边坡土体参数
Table 1 Slope soil parameters

黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	容重/(kN·m ⁻³)	极限摩阻力/kPa
18	25	16.4	50

表 2 框架预应力锚杆支护边坡设计结果

Table 2 Design results of frame with pre-stressed anchors for dynamic

层数	水平间距	竖向间距	锚固体直径	钢筋直径	自由段长度	锚固段长度	锚杆长度
1	2	2	0.15	0.028	6	10	16
2	2	2	0.15	0.028	5	10	15
3	2	2	0.15	0.028	5	9	14
4	2	2	0.15	0.028	4	8	12
5	2	2	0.15	0.028	4	7	11
6	2	2	0.15	0.028	4	5	9

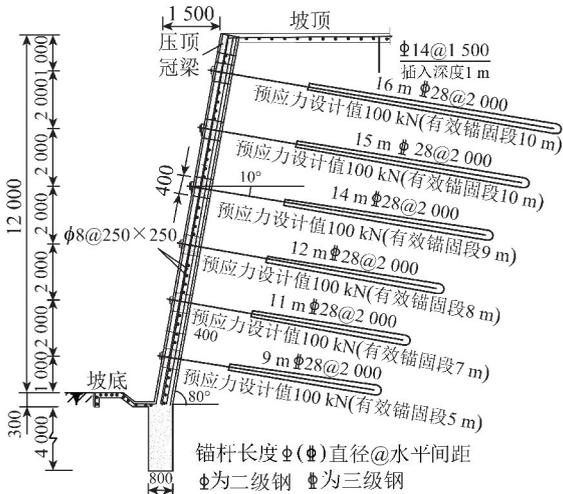


图 3 框架预应力锚杆支护边坡剖面

Fig. 3 Sectional sketch of slope supported by frame with pre-stressed anchors

4.3 稳定性计算条件

计算参数选取如下:土的压缩模量 $E_s = 10.5 \text{ MPa}$,土的波松比 $\mu = 0.3$, 阻尼比 $\xi = 0.005$, 时间步长 $\Delta t = 0.02 \text{ s}$, 钢筋拉杆的弹性模量 $E = 2.60 \text{ GPa}$, 锚固体中砂浆弹性模量 $E_m = 3.0 \text{ MN/m}^2$,

地震波选取正弦波,地震频率为 2 Hz,加速度峰值为 0.30g,土层剪切波速 $v_s = 280 \text{ m/s}$ 。地震波采用水平 EI-Centro 波,如图 4 所示。黄土动力本构模型中的剪模比 G/G_{\max} 和阻尼比 λ 的关系见表 3^[15],表中给出了原状黄土和强夯黄土的动剪模比和阻尼比,本工程实例中框架预应力锚杆支护的边坡主要是原状黄土边坡,因此动剪模比和阻尼比按原状黄土来取。

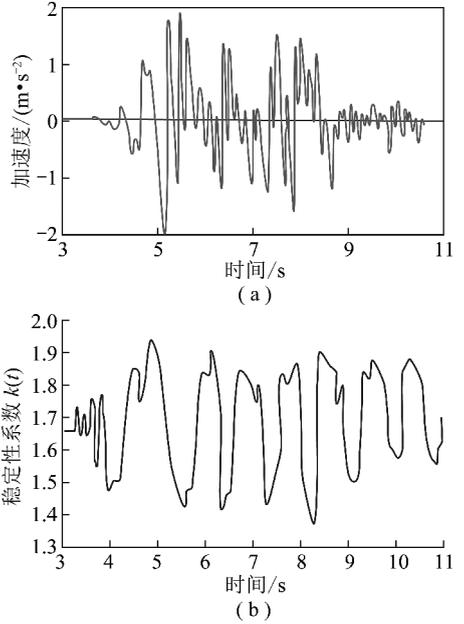


图 4 EI-Centro 水平地震波加速度和稳定性安全系数时程曲线

Fig. 4 EI-Centro horizontal seismic acceleration and stability safety factor time history

4.4 计算结果

4.4.1 反应加速度和动剪应力

随着边坡高度的增加,峰值加速度明显增加。动剪应力最大值发生在距坡顶约 2/3 高度位置处,随着动力时程的变化而变化,其值为 500 ~ 600 kPa,坡顶附近位置处动剪应力最小,其值 60 ~ 100 kPa。

4.4.2 地震动稳定性安全系数

框架预应力锚杆支护边坡在水平 EI-Centro 地震波作用下的稳定性安全系数时程如图 4(b)所示,在 5.1 s 左右时,其稳定性系数最大,值为 1.935,在 8.3 s 左右时,其稳定性系数最小。其值为 1.38。为了便于比较,本文给出了拟静力法的计算结果,拟静力法按照文献[16]中的方法进行计算,计算过程中将锚杆预应力计入抗滑力中,经过计算,稳定性安全系数为 2.172。由此可得,拟静力法所得结果与本文方法所得结果不太一致,其值比本文方法的最大稳定性安全系数还要大,这是因为拟静力法没有考虑到地震特性和土体的动力特性。

表 3 黄土动力本构模型中的剪模比(G/G_{\max})和阻尼比(λ)

Table 3 Shear modulus ratio and damping ratio

剪应变		1×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}	5×10^{-2}
原状黄土	G/G_{\max}	0.914	0.913	0.912	0.905	0.904	0.857	0.766	0.525	0.500	0.495
	λ	0.001	0.042	0.049	0.051	0.061	0.105	0.125	0.260	0.350	0.560
	G/G_{\max}	1.000	0.970	0.863	0.490	0.462	0.411	0.411	0.411	0.411	0.411
	λ	0.001	0.050	0.112	0.129	0.134	0.145	0.150	0.161	0.165	0.177
	G/G_{\max}	1.000	0.937	0.810	0.434	0.414	0.400	0.400	0.400	0.400	0.400
	λ	0.001	0.050	0.068	0.100	0.111	0.133	0.143	0.165	0.175	0.198
强夯黄土	G/G_{\max}	0.945	0.828	0.727	0.438	0.420	0.390	0.390	0.390	0.390	0.390
	λ	0.001	0.049	0.061	0.091	0.099	0.120	0.127	0.146	0.154	0.174
	G/G_{\max}	0.949	0.830	0.715	0.422	0.411	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380
	λ	0.001	0.073	0.089	0.103	0.110	0.124	0.131	0.145	0.151	0.165
	G/G_{\max}	0.927	0.822	0.737	0.426	0.414	0.398	0.398	0.398	0.398	0.398
	λ	0.001	0.055	0.073	0.089	0.098	0.114	0.121	0.139	0.146	0.162

5 结 论

(1) 考虑锚杆预应力对边坡稳定性的影响, 根据土体边坡滑移面的破坏模式, 建立了框架预应力锚杆支护边坡的地震稳定性分析模型。并利用显式有限元法, 将土体离散为土体静动力微元和土体预应力微元, 建立了离散动力平衡方程。通过对支护边坡位移反应和和应力场的分析, 求解了边坡的地震动稳定性安全系数。

(2) 通过分析和计算表明, 不管是本文方法还是拟静力法, 由于锚杆预应力的存在, 可以大大提高支护边坡在地震作用下的稳定性。

(3) 工程算例表明, 本文方法对于土质均匀的黄土边坡是可行的, 相比拟静力法, 更能反应黄土支护边坡的地震作用和土的动力特性。

参考文献:

- [1] 蒋 溥, 戴丽思. 工程地震学概论[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [2] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例(第1版)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] 朱彦鹏, 罗晓辉, 周 勇. 支挡结构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [4] 朱彦鹏, 王秀丽, 周 勇. 支挡结构设计计算手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 周 勇, 朱彦鹏. 黄土地区框架预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3115-3122.
Zhou Yong, Zhu Yanpeng. Sensitivity analysis of design parameters of grillage supporting structure with prestressed anchor in loess slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3115-3122.
- [6] 朱彦鹏, 郑善义, 张 鸿, 等. 黄土边坡框架预应力锚杆支挡结构的
- 设计研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S0): 1582-1585.
Zhu Yanpeng, Zheng Shanyi, Zhang Hong, et al. Design of frame supporting structure with pre-stressed anchor bars on loess slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(S0): 1582-1585.
- [7] 李 忠, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆边坡支护结构稳定性计算方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3922-3926.
Li Zhong, Zhu Yanpeng. Stability calculation methods for grillage supporting structure with prestressed anchor and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3922-3926.
- [8] Zhu Yanpeng, Zhou Yong. Analysis and design of frame supporting structure with pre-stressed anchor bars on loess slope[A]. AC-MSM2004[C]. Perth: Australia, 2004: 1089-1094.
- [9] Zhou Yong, Zhu Yanpeng. Optimum design of grillage supporting structure with pre-stressed anchor bars on loess slope[A]. Proceedings of the Ninth International Symposium on Structural Engineering for Young Experts[C]. Fuzhou & Xiamen, 2006: 1567-1573.
- [10] 帕兹 M. 结构动力学理论与计算[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [11] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [12] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] 刘汉龙, 费 康, 高玉峰. 边坡地震稳定性时程分析方法[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 553-556.
Liu Hanlong, Fei Kang, Gao Yufeng. Time history analysis method of slope seismic stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(4): 553-556.
- [14] JGJ 120-99, 中华人民共和国行业标准. 建筑基坑支护技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1984.
- [15] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [16] 祁生文, 伍法权. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.