

DOI: 10.11779/CJGE201406009

边坡锚杆锚固系统固有频率及其参数影响分析

段建^{1,2}, 言志信^{1,2*}

(1. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学), 甘肃 兰州 730000)

摘要: 基于一定假定, 建立了边坡锚杆锚固系统自由振动力学模型, 获得了锚固系统固有频率及对应振型计算公式, 通过算例, 对比验证了理论计算公式的可行性; 同时, 还分别从锚杆长度、坡面附加质量 M_d 以及刚度系数 k 三方面开展了边坡锚固系统固有频率参数影响分析, 探讨了之间内在规律: 锚杆长度和 k 值均对低阶固有频率的影响较小, 而对高阶固有频率大小影响则较大; 附加质量对锚固系统固有频率影响较小; 边坡锚固系统在一定条件下具有线性振型固有频率。

关键词: 边坡锚固系统; 固有频率; 振型; 参数影响

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)06-1051-06

作者简介: 段建(1979-), 男, 湖南沅江人, 博士研究生, 讲师, 主要从事岩土锚固及支挡工程教学与研究工作。

E-mail: duanj07@lzu.edu.cn.

Natural frequency and parameter influence of slope anchorage system

DUAN Jian^{1,2}, YAN Zhi-xin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China (Lanzhou University), Ministry of Education, Lanzhou 730000, China)

Abstract: According to some assumptions, the dynamic mechanical model for slope anchorage system is established for free vibration. Some formulas for the natural frequency and the corresponding vibration modes of anchorage system are deduced. Compared to that of the other methods, the feasibility of the theoretical formulas is verified through a specific example. Meanwhile, the natural frequency of slope anchorage system is analyzed under the influence of different parameters, anchor length, equivalent lumped mass M_d and stiffness coefficient k . The inherent laws between them are discussed. It is found that the anchor length and the value of stiffness coefficient k have less effect on the low-order natural frequency, and their impact on the size of high-order natural frequency is larger. The equivalent lumped mass M_d has less effect on the natural frequency of slope anchorage system. The slope anchorage system has the natural frequency of linear vibration mode under certain conditions.

Key words: slope anchorage system; natural frequency; vibration mode; parameter influence

0 引言

屡次震后边坡支护结构震害调查表明, 锚杆支护型式的抗震性能较好^[1]。然而, 该技术也并非固若金汤, 稳似铜墙铁壁, 在高烈度地区, 强地震动往往能激发锚固结构产生较大附加动应力, 致使锚固系统构件失效破坏(如锚杆拉断、锚头滑脱等), 从而引发各种次生地质灾害, 因此开展锚固工程设计时必须考虑地震动的影响。目前, 针对锚杆锚固系统动力特性研究方面, 国内外学者通过各种研究手段取得了一些相关研究成果。Ivanović等^[2-3]针对锚固系统建立了一集中参数模型, 探讨了外部激发荷载对锚固系统的动力特性的影响; 董建华等^[4-5]建立了土钉土体系统动力模型, 求解了简谐地震荷载作用下土钉动力响应解

析解; 叶海林等^[6-7]基于FLAC^{3D}数值模拟技术, 探讨了边坡锚杆动力破坏机理, 开展了锚杆支护参数地震敏感性分析; 同时, Hong等^[8]、张明聚等^[9]、文畅平等^[10]、叶海林等^[11]还分别围绕锚固地震边坡的动力响应特性开展了大型振动台模型试验研究。这大大丰富了锚固工程理论基础, 为工程设计提供了一定的指导建议。然而, 锚杆锚固工程涉及结构与岩土体的相互作用, 动力特性复杂, 影响因素甚多, 研究难度大, 目前研究工作侧重于锚固系统的受迫动力响应方面, 而针对锚固系统基本动力特性研究较少。因此,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308273, 41372307); 云南省交通运输厅科技教育专项资金资助项目(云交科2010(A)06-b)

收稿日期: 2013-09-12

*通讯作者

开展此项研究,为工程锚固质量无损检测、锚固系统动力分析及锚固工程防灾减灾提供理论支撑,均具有重要的理论和实践意义。

1 锚杆锚固系统动力力学模型

边坡锚杆锚固系统一般由锚固段I、自由段II和坡面结构III三部分组成,如图1所示,其中锚固段包含锚杆钢筋和锚固剂,在进行弹性动力分析中,可将其视为整体来考虑锚固体与周边岩土体间的相互作用,而自由段,工程中为了施工方便及防止锚杆钢筋锈蚀,锚筋设置后,自由段空腔通常与锚固段空腔一同浇筑形成整体,通过在自由段钻孔周边设置套管(如PVC管材)的隔离来体现锚杆自由特性,其与周边岩土体毫无任何相互作用,属于一般的自由杆体,材质与锚固段相同,第三部分坡面结构则是边坡锚固系统中重要的传力构件,动力分析中,其对自由段的惯性动力作用,可依据坡面结构与锚杆空间组合布置型式,按质量均分原则将其简化为集中于锚杆自由段端头上的等效集中质量 M_d 块体加以考虑。在建立锚杆轴向动力简化理论模型时,同时还假定:①锚杆及周边岩土体均视为连续均质的线性弹性体;②锚杆锚固段与周边岩土体间相互作用采用线性弹簧模拟,系统力学特性类似于微型基桩,因此其与周边岩土体相互作用的有关动力学参数的取值可借鉴桩基振动理论有关研究成果^[12-14],对应周-边弹簧刚度系数为 $k = \frac{2.75G_s}{\pi D}$, 底端

参数则为 $k_b = \frac{8G_s}{\pi D(1-\mu_s)}$, 其中, G_s , μ_s 分别为周边岩土体剪切模量和泊松比, D 则为锚固体直径大小。

1.1 振动控制方程

依据弹性动力学理论及上述假设条件,边坡锚杆锚固系统轴向动力计算模型如图1所示。

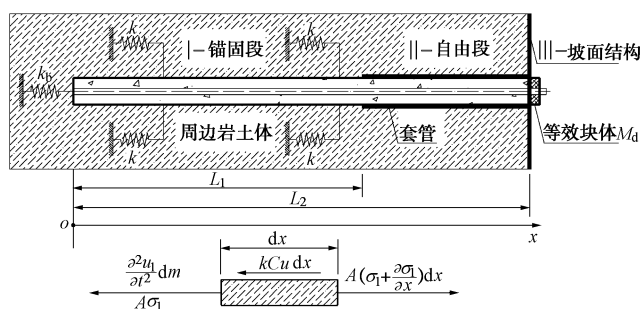


图1 锚固系统动力计算模型

Fig. 1 Dynamic model of anchorage system

选取 dx 长锚固微段作为研究对象,如图1所示,根据达朗伯原理可得锚固段微元体轴向动力平衡方程为

$$A \left(\sigma_1 + \frac{\partial \sigma_1}{\partial x} dx \right) = A \sigma_1 + \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} dm + k C u_1 dx \quad (1)$$

式中 C , A , u_1 分别为微元体周长、截面面积和轴

向位移函数; ρ , E 分别为锚杆密度和弹性模量,则微元体质量 $dm = \rho A dx$, 轴向应力 $\sigma_1 = E \frac{\partial u_1}{\partial x}$, 将其

代入式(1)整理得

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} + \frac{kC}{EA} u_1 \quad (2)$$

同样可建立锚杆自由段的动力平衡方程为

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \quad (3)$$

式中, u_2 为锚杆自由段轴向位移函数。

1.2 边界条件

根据基本假定,锚杆锚固系统对应边界条件为

$$\begin{cases} EA \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=0} = k_b A u_1 \Big|_{x=0} \\ EA \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=L_2} = -M_d \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} \Big|_{x=L_2} \end{cases} \quad (4)$$

同时,段间还应满足位移及轴力连续条件

$$\begin{cases} u_1 \Big|_{x=L_1} = u_2 \Big|_{x=L_1} \\ \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=L_1} = \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=L_1} \end{cases} \quad (5)$$

2 锚杆锚固系统固有频率计算与验证

2.1 固有频率计算

令 $\alpha_1 = \frac{\rho}{E}$, $\alpha_2 = \frac{kC}{EA}$, 对于锚杆锚固段,设其动力

方程的解为 $u_1(x,t) = U_1(x)T_1(t)$, 其中 $U_1(x)$ 为振型函数, $T_1(t)$ 为振动时间函数,将其代入对应振动控制方程式(2),则有

$$\frac{U_1''(x)}{U_1(x)} = \alpha_1 \frac{T_1''(t)}{T_1(t)} + \alpha_2 = \alpha_2 - \alpha_1 \omega_n^2 \quad (6)$$

式(6)中第一个等号左边与时间 t 无关,而右边则与 x 无关,要使其成立, ω_n 只可能是常数,由此可得到2个关于 $U_1(x)$, $T_1(t)$ 独立的微分方程:

$$U_1''(x) + (\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2) U_1(x) = 0 \quad (7)$$

$$T_1''(t) + \omega_n^2 T_1(t) = 0 \quad (8)$$

由式(7)可知,锚固段振型函数 $U_1(x)$ 的表达式形式取决于参数 $\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2$ 的大小,它可能出现指数函数、三角函数及线性函数3种类型,这样各类型对应锚固段轴向位移函数相关表达式分别为

$$\begin{cases} U_1(x) = C_1 e^{\beta_1 x} + C_2 e^{-\beta_1 x} & (\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2 < 0), \\ U_1(x) = C_1 \cos \beta_1 x + C_2 \sin \beta_1 x & (\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2 > 0), \\ U_1(x) = C_1 x + C_2 & (\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2 = 0), \end{cases} \quad (9)$$

$$T_1(t) = D_1 \cos \omega_n t + D_2 \sin \omega_n t$$

式中, $\beta_1 = \sqrt{\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2}$, ω_n 为锚固系统固有频率,待定参数 C_1 , C_2 , D_1 , D_2 分别由系统边界和段间连续条

件确定。

对应锚杆自由段, 同样可令 $u_2(x, t) = U_2(x)T_2(t)$, $\beta_2 = \sqrt{\alpha_1 \omega_n^2}$, 代入其振动平衡方程式 (3), 可得

$$\frac{U_2''(x)}{U_2(x)} = \alpha_1 \frac{T_2''(t)}{T_2(t)} = -\alpha_1 \omega_n^2 \quad (10)$$

由式 (10) 即可获得锚杆自由段轴向位移函数为

$$u_2(x, t) = [C_3 \cos \beta_2(x - L_1) + C_4 \sin \beta_2(x - L_1)] (D_1 \cos \omega_n t + D_2 \sin \omega_n t) \quad (11)$$

其振型函数 $U_2(x)$ 为三角函数型, 对应待参数 C_3, C_4 可由系统边界条件确定。

锚杆锚固系统为组合构件, 由上述分析可知, 受参数 $\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2$ 大小的影响, 其振动型式大体可归结为 3 种类型: ①锚固段振型为指数函数型, 自由段则为三角函数型; ②锚固段振型为三角函数型, 自由段则为三角函数型; ③锚固段振型为线性型、而自由段则为三角函数型。各类型对应固有频率及振型函数分析如下:

当 $\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2 < 0$ 时, 即对应锚杆锚固系统低阶固有频率情形, 系统振动型式为类型①, 将其锚杆各区段轴向位移函数代入边界条件式 (4) 和段间连续条件式 (5), 可获得此振动类型锚固系统固有频率 ω_n 满足

$$\frac{\beta_1(\beta_1 EA - M_d \omega_n^2) e^{\beta_1 L_1} - \beta_2(\beta_1 EA + M_d \omega_n^2) \frac{\beta_1 E - k_b}{\beta_1 E + k_b} e^{-\beta_1 L_1}}{(\beta_2^2 EA + \beta_1 M_d \omega_n^2) e^{\beta_1 L_1} + (\beta_2^2 EA - \beta_1 M_d \omega_n^2) \frac{\beta_1 E - k_b}{\beta_1 E + k_b} e^{-\beta_1 L_1}} = \tan \beta_2 (L_2 - L_1) \quad (12)$$

对应锚杆各区段振型函数分别为

$$\left. \begin{aligned} U_1(x) &= C_1 \left(e^{\beta_1 x} + \frac{\beta_1 E - k_b}{\beta_1 E + k_b} e^{-\beta_1 x} \right), \\ U_2(x) &= C_1 \left[\left(e^{\beta_1 L_1} + \frac{\beta_1 E - k_b}{\beta_1 E + k_b} e^{-\beta_1 L_1} \right) \cos \beta_2 (x - L_1) + \right. \\ &\quad \left. \frac{\beta_1}{\beta_2} \left(e^{\beta_1 L_1} - \frac{\beta_1 E - k_b}{\beta_1 E + k_b} e^{-\beta_1 L_1} \right) \sin \beta_2 (x - L_1) \right] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当 $\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2 > 0$ 时, 对应锚杆锚固系统高阶固有频率, 系统振动型式为类型②, 同样基于系统边界条件及连续条件, 可得到其固有频率 ω_n 满足

$$\frac{\beta_1 \beta_2 E (k_b A - M_d \omega_n^2) \cos \beta_1 L_1 - \beta_2 (\beta_1^2 E^2 A + k_b M_d \omega_n^2) \sin \beta_1 L_1}{\beta_1 (\beta_2^2 E^2 A + k_b M_d \omega_n^2) \cos \beta_1 L_1 + E (\beta_2^2 k_b A - \beta_1^2 M_d \omega_n^2) \sin \beta_1 L_1} = \tan \beta_2 (L_2 - L_1) \quad (14)$$

此情形锚固系统振型函数为

$$\left. \begin{aligned} U_1(x) &= C_1 \left(\cos \beta_1 x + \frac{k_b}{\beta_1 E} \sin \beta_1 x \right), \\ U_2(x) &= C_1 \left[\frac{\beta_1 E \cos \beta_1 L_1 + k_b \sin \beta_1 L_1}{\beta_1 E} \cos \beta_2 (x - L_1) + \right. \\ &\quad \left. \frac{k_b \cos \beta_1 L_1 - \beta_1 E \sin \beta_1 L_1}{\beta_2 E} \sin \beta_2 (x - L_1) \right] \end{aligned} \right\}$$

(15)

当 $\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2 = 0$ 时, 锚杆锚固系统振动型式为类型③, 此时 $\omega_n = \omega_l = \sqrt{\frac{\alpha_2}{\alpha_1}}$, 通过系统边界条件及连续

条件, 化简可得锚固系统物理力学参数还应满足

$$\frac{\alpha_1 \sqrt{\alpha_2} k_b EA - \alpha_2 \sqrt{\alpha_2} M_d (k_b L_1 + E)}{\alpha_2 k_b M_d + \alpha_1 \alpha_2 EA (k_b L_1 + E)} = \tan \sqrt{\alpha_2} (L_2 - L_1) \quad (16)$$

其对应振型函数为

$$\left. \begin{aligned} U_1(x) &= C_1 \left(x + \frac{E}{k_b} \right), \\ U_2(x) &= C_1 \left[\left(L_1 + \frac{E}{k_b} \right) \cos \beta_2 (x - L_1) + \frac{1}{\beta_2} \sin \beta_2 (x - L_1) \right] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

在此应注意, 条件 $\alpha_1 \omega_n^2 - \alpha_2 = 0$ 不是锚固系统发生第③类振型振动的充要条件, 而仅仅只是充分条件, 只有当系统内部物理力学参数间同时满足式 (16) 时, 才能发生, 相对第①和②类振型振动而言, 其条件苛刻得多。因此, 对某一具体的锚杆锚固系统, 第①类振型振动对应低阶固有频率, 第②类振型振动则对应高阶固有频率, 而第③类振型振动则视系统内部物理力学参数关系而定, 其不一定都发生。

考察一种特殊情形: $L_1 = 0, k_b \rightarrow \infty$, 此时锚固系统退化为一端固端一端带有集中质量 M_d 的 L_2 长杆体, 由此分别对式 (12)、(14)、(16) 两边求极限均可得

$$\tan L_2 \sqrt{\alpha_1} \omega_n = \frac{EA \sqrt{\alpha_1}}{M_d \omega_n} \quad (18)$$

式 (18) 与这一类型杆体自由振动固有频率计算公式一致^[15], 这也从侧面说明了上述锚固系统固有频率计算公式的正确性与通用性。

2.2 算例分析与验证

一边坡工程, 坡高为 12 m, 坡角为 65° , 土体物理力学参数为 $\rho_s = 1600 \text{ kg/m}^3$, $G_s = 148 \text{ MPa}$, $\mu_s = 0.3$, $c_s = 20 \text{ kPa}$, $\varphi_s = 25^\circ$ 。该工程采用端锚型锚杆+框架格梁支护方案, 其中锚杆采用 II 级钢筋 $\phi 28 @ 3.3 \text{ m} \times 3.3 \text{ m}$, 倾角 $\varphi = 10^\circ$, 剖面上共布置 4 排, 各排锚杆锚固段和自由段长度均为 5 m, 锚固剂采用 M30 水泥砂浆, 锚孔 $D = 130 \text{ mm}$, 框架格梁截面尺寸为 $b \times h = 0.45 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, $M_d = 3724 \text{ kg}$, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, $E = 28 \text{ GPa}$ 。

根据上述计算方法, 将参数代入相关理论计算公式获取锚固系统固有频率及振型如表 1, 图 2, 3 所示。锚固系统前三阶固有频率对应振动类型均为①类, 而三阶以后的高阶频率均产生第②类振型振动, 因系统内部物理力学参数不满足式 (16), 故不能产生第③类

振动。

表1 计算结果

Table 1 Calculated results

阶数	固有频率 $\omega_n / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$			锚固系统振型类型
	本文方法	有限元解	文献[2]	
I	128	135	125	①
II	1761	1772	1757	①
III	3352	3363	3348	①
IV	3793	3802	3790	②

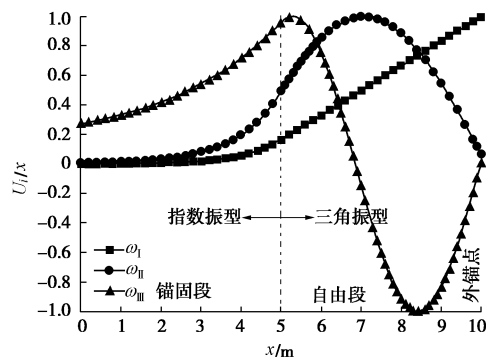


图2 I、II、III阶振型分布

Fig. 2 Distribution of I-, II- and III-order vibration modes

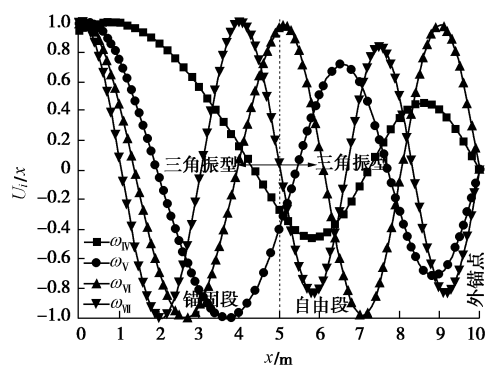


图3 IV、V、VI、VII阶振型分布

Fig. 3 Distribution of IV-, V-, VI- and VII-order vibration modes

由于锚杆锚固系统具有临空面, 对应锚杆外端点的力学响应不仅对坡面结构的内力大小, 而且对系统的变形及整体稳定性都极为不利, 因此, 可以用此关键点的力学响应来评价各阶振型贡献大小, 通过对比分析图2, 3发现, 低阶固有频率时, 锚杆自由段相对其锚固段振动幅度较大, 锚杆外端点I阶频率振动幅度最大, 随着阶数的增加锚杆外端点振幅减小, 说明高阶振型对总体反应的贡献逐渐减小。

由此可见, 低阶固有频率对应第①类振型, 高阶频率对应第②类振型, 低阶固有频率对锚固系统的力学响应较大, 锚固工程抗震设计时应重视低阶固有频率的影响。

为了验证上述理论方法的正确性, 采用有限元软件ANSYS对其进行动力响应分析。土体采用三维实体8节点SOLID45单元, 格构梁采用三维弹性梁单元BEAM4, 锚杆采用三维杆单元LINK8, 锚杆与土体间采用连接单元combin14, 通过赋予不同参数来体现锚

杆锚固与自由特性, 格梁与土体之间相互作用同样也采用combin14单元进行模拟, 建立一榀三维有限元模型如图4, 模型尺寸为41.6 m×13.2 m×24 m。自模型底部输入一定频率水平简谐载荷, 以锚杆外锚点位移发散作为锚固系统固有频率确定标准, 所得结果如表1所示, 对比本文理论方法与数值模拟结果, 发现两者比较吻合, 两者差异可能主要因为理论模型的简化, 数值模拟考虑了锚杆群锚效应以及锚杆与坡面框架格梁空间相互作用所致。两者误差都在10%以内, 说明上述锚固系统固有频率计算方法合理可行。表1还给出了采用文献[2]集中参数数值模型计算获得的结果, 总体上, 文献[2]法所得结果最小, 本文方法次之, 而有限元法最大, 但三者差别不大。

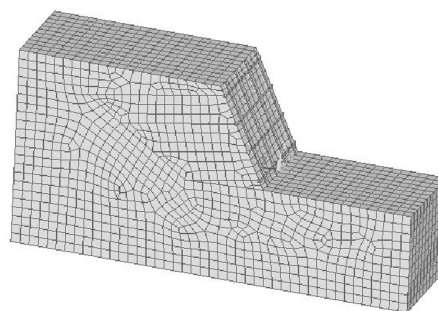


图4 有限元计算模型

Fig. 4 Finite element model

3 锚杆锚固系统固有频率参数影响分析

为了充分了解锚杆锚固系统固有频率与其系统物理力学参数间的内在关系, 分别从锚杆长度、附加质量 M_d 以及弹簧刚度 k 值大小这3个方面开展固有频率参数影响分析。为此, 采用上节算例, 根据研究内容改变一影响参数大小, 其他参数保持不变。

3.1 锚杆长度的影响

保持自由长度不变, 即 $L_2 - L_1 = 5$ m, 仅改变锚固长度 L_1 大小。获得不同锚固长度布置方案下的锚固系统固有频率计算结果如图5所示。由图5可知, 特征“线性振型”固有频率 ω_1 水平线将图形分成2个小区域, 当 $\omega < \omega_1$ 时, 对应系统低阶指数振型固有频率, 而 $\omega > \omega_1$ 时, 则对应锚固系统高阶三角振型固有频率; 锚杆锚固长度的变化对各阶固有频率所对应振型类型的改变毫无影响, 其中前3阶低阶固有频率均对应第一类振型, 随锚固长度的增加, 固有频率先增大后保持水平不变, 整体变化幅度不大, 而高阶固有频率则随着锚杆锚固长度的增加, 均表现为先急剧递减后水平的变化趋势, 阶数越高, 跌幅也越大, 曲线远端均与“线性振型”固有频率 ω_1 值接近, 且均对应第②类振型。

保持锚固长度不变, 即 $L_1 = 5$ m, 仅变化自由长

度,锚杆自由长度与固有频率间的关系如图6所示。由图6可知,同样,特征“线性振型”固有频率 ω_1 水平线将图形分为II个小区域:指数振型区和三角振型区;随着锚杆自由长度的增加,锚固系统I阶固有频率均对应第一类振型,表现为逐渐减小的变化特征,但总体变化幅度很小;II阶以上固有频率,随着自由长度的增加,固有频率值逐渐减小,阶数越高,跌幅越大,振型也由三角振型逐渐转化成指数振型,临界振型转化锚杆自由长度随阶数的增大而增大;同时,II阶以上固有频率曲线均与特征“线性振型”固有频率 ω_1 水平线相交,说明锚固系统在一定条件下能发生线性振型。

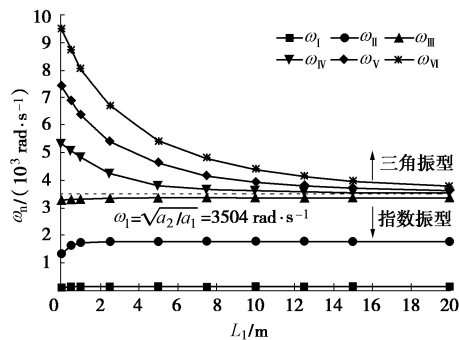


图5 锚固长度与固有频率之间关系

Fig. 5 Internal relations between anchorage length and natural frequency

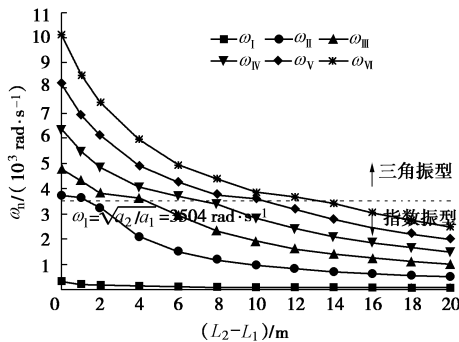


图6 自由长度与固有频率之间关系

Fig. 6 Internal relations between free length and natural frequency

3.2 附加质量 M_d 的影响

仅改变坡面附加质量 M_d 值大小,锚固系统其他物理力学参数保持不变,图7给出了锚固系统附加质量 M_d 与固有频率之间的关系。

由图7可知,附加质量对锚固系统固有频率影响较小,随着附加质量的增大,各阶固有频率先减小后趋于固定值的变化规律,整体变化较小,其中III阶固有频率值因与特征“线性振型”固有频率 ω_1 接近,随附加质量的变化,其振型类型稍有改变,质量小时,对应三角振型,而质量大时,则变为指数振型,其固有频率曲线与特征“线性振型”固有频率 ω_1 水平线相交,当 $\omega_3 = \omega_1$ 时,锚固系统将发生线性振型。

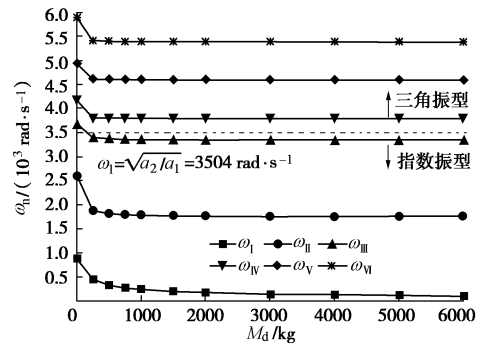
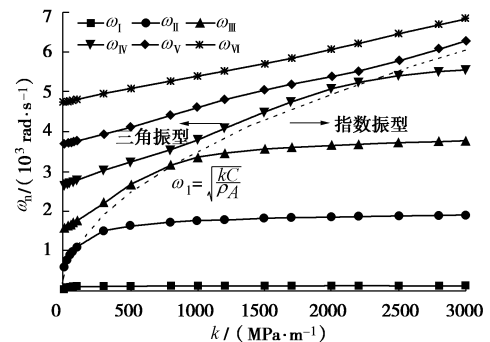


图7 附加质量与固有频率之间关系

Fig. 7 Internal relations between equivalent lumped mass and natural frequency

3.3 k 值的影响

为了研究 k 值对锚固系统固有频率的影响,仅改变 k 值,其他参数保持不变,锚固系统固有频率与 k 值之间关系如图8所示。

图8 k 值与固有频率之间关系Fig. 8 Internal relations between k and natural frequency

由图8可知,特征“线性振型”固有频率 $\omega_1 = \sqrt{\frac{kC}{\rho A}}$

将图形分成2个区域:指数振型区和三角振型区;随着 k 值的增加,低阶固有频率先急剧增大,后变化不大,整体变化很小,尤其是I阶固有频率,而高阶固有频率均呈现线性增长趋势,与低阶相比,其曲线后段增加幅度要大;锚固系统I阶固有频率均对应第①类振型,而II阶以上固有频率振型类型随着 k 值的增加在改变,由三角振型逐渐转化成指数振型,临界振型转化锚固系统 k 值随阶数的增大而增大,同时,固有频率曲线均与特征“线性振型”固有频率 ω_1 水平线相交,在一定 k 值条件下锚固系统能发生线性振型。

4 结 论

(1) 依据基本假定,建立了边坡锚杆锚固系统自由振动力学模型,给出了锚固系统自由振动控制方程,同时,结合边界条件,推导了系统固有频率及振型理论计算公式,并通过算例的对比分析,验证了理论方法的可行性。

(2) 锚固系统低阶固有频率对应第①类振型,即锚固段振型为指数函数型、自由段则为三角函数型,低阶固有频率对锚固系统的力学响应较大,抗震设计时应重视低阶固有频率的影响。

(3) 锚杆长度和 k 值均对低阶固有频率的影响较小,而对高阶固有频率大小影响则较大,其中锚固长度对各阶固有频率所对应振型类型的改变无影响,而自由长度和 k 值对各阶固有频率所对应振型类型的改变均有较大影响;附加质量对锚固系统固有频率影响较小;锚固系统在一定条件下具有线性振型固有频率。

参考文献:

- [1] 周德培, 张建经, 汤涌. 汶川地震中道路边坡工程震害分析[J]. 岩石力学及工程学报, 2010, **29**(3): 565 - 576. (ZHOU De-pei, ZHANG Jian-jing, TANG Yong. Seismic damage analysis of road slopes in Wenchuan Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(3): 565 - 576. (in Chinese))
- [2] IVANOVIĆ A, NEILSON R D, RODGER A A. Lumped parameter modelling of single-tendon ground anchorage systems[J]. Geotechnical Engineering, 2001, **149**(2): 103 - 113.
- [3] IVANOVIĆ A, STARKEY A, NEILSON R D, et al. The influence of load on the frequency response of rock bolt anchorage[J]. Advances in Engineering Software, 2003, **34**(11): 697 - 705.
- [4] 董建华, 朱彦鹏. 土钉土体系统动力模型的建立及地震响应分析[J]. 力学学报, 2009, **41**(2): 236 - 242. (DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng. Dynamic calculation model and seismic response for the system of soil nailing and surrounding soil[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2009, **41**(2): 236 - 242. (in Chinese))
- [5] 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. (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. (in Chinese))
- [6] 叶海林, 郑颖人, 黄润秋, 等. 锚杆支护岩质边坡地震动力响应分析[J]. 后勤工程学院学报, 2010, **26**(4): 1 - 7. (YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, HUANG Run-qiu, et al. Analysis on dynamic response of rockbolt in rock slope under earthquake[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2010, **26**(4): 1 - 7. (in Chinese))
- [7] 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): 1374 - 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): 1374 - 1379. (in Chinese))
- [8] HONG Yung-shan, CHEN Rong-her, WU Cho-sen, et al. Shaking table tests and stability analysis of steep nailed slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(5): 1264 - 1279.
- [9] 张明聚, 吕琦, 李立云, 等. 土钉支护边坡动力性能参数分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(11): 1758 - 1763. (ZHANG Ming-ju, LÜ Qi, LI Li-yun, et al. Parametric analysis for a seismic behavior of soil nailing system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(11): 1758 - 1763. (in Chinese))
- [10] 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. Shaking 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. (in Chinese))
- [11] 叶海林, 郑颖人, 陆新, 等. 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**(增刊): 152 - 157. (YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, LU Xin, et al. Shaking table test on anchor bars of slope under earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(S0): 152 - 157. (in Chinese))
- [12] LYSMER J, RICHART F E. Dynamic response of footing to vertical loading[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1966, **92**(1): 65 - 91.
- [13] NOVAK M, NOGAMI T, ABOUL-ELLA F. Dynamic soil reaction for plain strain case[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1978, **104**(4): 953 - 959.
- [14] 王腾, 王奎华, 谢康和. 成层土中桩的纵向振动理论研究及应用[J]. 土木工程学报, 2002, **35**(1): 83 - 87. (WANG Teng, WANG Kui-hua, XIE Kang-he. Study on vibration properties of piles in layered soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, **35**(1): 83 - 87. (in Chinese))
- [15] 倪振华. 振动力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990. (NI Zhen-hua. Vibration mechanics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1990. (in Chinese))