

DOI: 10.11779/CJGE20221116

锚杆张拉力无损测试原理与技术研究

张天予, 钟新谷*, 赵超, 程忠悦

(湖南科技大学, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 基于锚杆锚固体系多接触面特征, 建造室内模型研究其锚固体系振动特性。通过在锚杆无应力段顶端安装加速度传感器测试时程信号, 经快速傅里叶变换获得锚杆无应力段顶端振动频谱图, 其频谱图的卓越频率具有良好的可识别性, 据此获得其卓越频率与锚杆张拉力、锚杆无应力长度的变化规律, 其卓越频率并非锚杆张拉段横向多阶振动频率。以此为基础建立了视锚固螺母为弹性基础的锚杆弹性振动模型、锚固螺母及锚杆相对螺母与球形垫圈接触面转动的刚体振动模型, 分别获得其模型频率方程, 基于其识别的卓越频率求解频率方程中的刚度参数, 室内与现场试验表明其刚度参数—锚杆张拉力具有良好的线性相关性和单调递增关系。进一步室内模型试验表明其刚度参数—锚杆张拉力关系特征与蝶形托盘接触不同介质、不同锚杆张拉段长度不具有明显的相关性。为此提出了锚杆张拉力无损测试原理、方法与实现的技术路线, 现场小规模试验表明本文提出的方法具有可靠性。

关键词: 隧道工程; 锚杆; 振动特性分析; 张拉力测试; 无损检测

中图分类号: TU43; U456.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)01-0140-11

作者简介: 张天予(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事预应力锚固件有效预应力无损检测方面的研究工作。E-mail: maomaohnust@mail.hnust.edu.cn。

Nondestructive testing principle and technology of tension of anchor bolts

ZHANG Tianyu, ZHONG Xingu, ZHAO Chao, CHENG Zhongyue

(Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Based on its multi-contact surface characteristics, an indoor model is built to study the vibration characteristics of the anchorage system of an anchor bolt. By installing an acceleration sensor at the top of the unstressed section of the anchor bolt to test the time-history signals, the vibrating spectra at the top of the unstressed section of the anchor bolt are obtained through the fast Fourier transform. The dominant frequencies of the spectra have good identification, then the variation law of the dominant frequencies with the tension force and the unstressed length of the anchor bolt are obtained. But the dominant frequencies in the unstressed section are not the multi-order vibrating ones of the tension section of the anchor bolt. On this basis, the elastic vibration model for the anchor bolt is established by regarding the nut as an elastic foundation, and the rigid vibration model is established by assuming the nut and the anchor bolt to rotate relative to the contact surface between the nut and the spherical washer, then the frequency equations for the models are obtained, respectively. Based on the identified dominant frequencies, the stiffness parameters in the frequency equations can be solved. The indoor and field tests show that there is a good linear correlation and monotonic increasing relationship between the stiffness parameters and the tension. Further indoor model tests show that its relationship characteristic has no obvious correlation with different media in contact with the butterfly pallet and different lengths of tension section of the anchor bolt. Therefore, the nondestructive testing principle, method and technical route for the tension of the anchor bolt are put forward. The field small-scale tests show that the proposed method is reliable.

Key words: tunnel engineering; anchor bolt; vibrating characteristic analysis; tension testing; nondestructive testing

0 引言

锚杆支护在隧道、边坡工程得到普遍使用, 一般分为集中锚固和全长锚固^[1-2], 属于隐蔽工程, 业主、政府监管部门高度关注其施工质量, 文献[3]规定公路工程桥梁隧道专项、综合甲级实验室必须配备锚杆质量检测仪, 具备锚杆张拉力(轴力)测试能力。锚杆

一般构造如图 1, 锚杆张拉力大小对预应力锚杆取决于工人拧紧锚固螺母的程度, 对于非预应力锚杆取决于围岩表面与锚固段围岩变形差值。锚杆张拉力(轴

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178183, 52178285)

收稿日期: 2022-09-08

*通信作者(E-mail: 1020086@hnust.edu.cn)

力)大小是否符合设计要求是工程质量重要体现, 是判断围岩巷道稳定性的重要参数。解决锚杆张拉力低成本测试最直接、最有效的途径之一是提出一种操作简单、快速的无损测试方法, 研发测试仪, 编制相应的行业标准。如此能很好地约束、规范锚杆的安装与锚固施工行为, 使锚杆张拉力具有可测性和可控性; 同时有效的测试手段可以监测隧道、边坡锚杆围岩的稳定性。

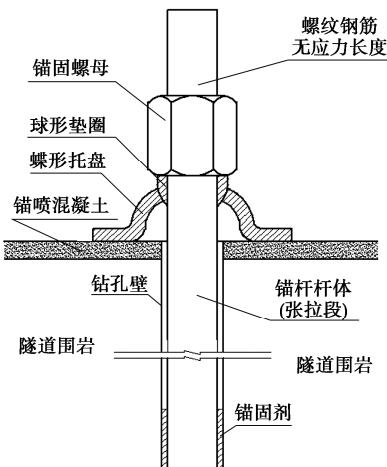


图 1 锚杆一般构造图

Fig. 1 Structural diagram of anchor bolt

在锚杆的张拉段(隐蔽段)表面预先粘贴应变片或安装测力传感器, 是获取锚杆有效张拉力直接、准确、常规的方法^[4], 也是目前隧道锚杆测试张拉力的常用方法。锚杆数量大, 普遍安装测力传感器成本过高, 且不能重复使用; 电阻应变片能得到较好的测试精度, 但易损坏、测试复杂, 上述张拉力测试方式并不能实现对工程质量的普遍监管。Yang 等^[5]的研究发现, 在锚杆连接两侧的锚垫板上各安装一个压电元件(PZT), 一个作为超声波发生器, 另一个作为接收器, 透过锚杆连接结合面的导波能量与其真实接触面积成正比, 且随锚杆张拉力增加而增大, 以透射导波能量作为锚杆张拉力大小的判断指标受到广泛关注^[6-7]。国内窦传浩等^[8]、赵利平等^[9]在锚杆球形垫圈与锚固螺母之间安装专用声学装置, 通过击振其装置根据声波频率判断其锚杆张拉力大小。文献[5~9]表明可以通过研究锚杆锚固体系的外露部分力学特性与锚杆张拉力关系获得锚杆张拉力无损测试方法。近年来 Wang 等^[10]在室内模型通过手机接收击振锚杆外露部分所产生的声音, 基于人工智能算法判断锚杆张拉力大小, 在室内模型的条件下实现了锚杆张拉力大小的无损测试, 同时将类似方法推广到建筑工地脚手架紧固件紧固程度的判断^[11-13]。但文献[10]没有考虑图 1 所示无

应力段长度对击振锚杆外露部分所产生的声音频率影响, 实际工程中锚杆锚固体系的外露部分无应力段长度具有随机性。

本文通过击振锚杆锚固体系的外露部分无应力段, 研究其振动特性, 建立了适用相应锚杆锚固体系几何特性变化的力学模型, 获得了其模型力学特征参数与锚杆张拉力的关系, 提出了锚杆张拉力无损检测方法的技术路线, 具有广泛的工程应用前景。

1 锚杆锚固体系振动特性试验研究方案

如图 2 所示建造了 340 cm×60 cm×140 cm 室内钢筋混凝土梁模型, 混凝土等级为 C50。模型内预留有锚杆安装孔道, 直径为 5 cm, 孔道中心间距 30 cm, 在张拉端孔道安装了 20 mm 厚的 Q235 钢锚垫板。根据文献[2], 试验锚杆直径为 $\Phi 20$ 的 BHRB335 号螺纹钢筋, 在锚杆张拉端安装蝶形托盘、钢制球形垫圈、锚固螺母, 蝶形托盘与嵌固固结在模型中的锚垫板接触。蝶形托盘由厚度 5 mm 的 Q235 钢板轧制, 平面尺寸为 100 mm×100 mm, 锚杆另一端锚固在混凝土中(锚固段长度 40 cm), 试验抗拔力大于锚杆屈服张拉力, 锚杆张拉段(隐蔽段)长度为 3 m。

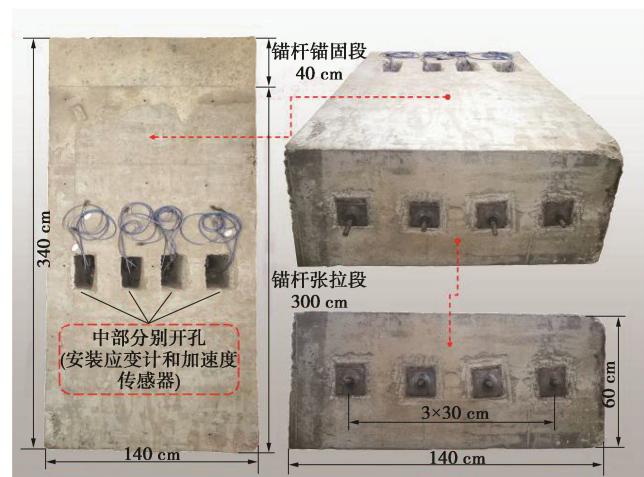


图 2 室内混凝土模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interior concrete model

测试方案如图 3 所示: 在锚杆无应力段顶端, 混凝土梁模型中部开口处的锚杆张拉段安装 B&K 4518-003 型加速度传感器, 并连接东华 9522N 信号采集分析仪。通过模型的中部开口在锚杆张拉段对称安装 2 个弦式应变计, 采用扭力扳手拧紧锚固螺母施加锚杆张拉力, 通过弦式应变计读数仪精确测量锚杆张拉力。采用小橡胶锤轻击锚杆无应力段顶端, 在混凝土梁模型的中部开口处轻击锚杆张拉段。记录两加速度传感

器的时程信号,东华9522N信号采集分析仪自动得到加速度时程信号的FFT频谱图。

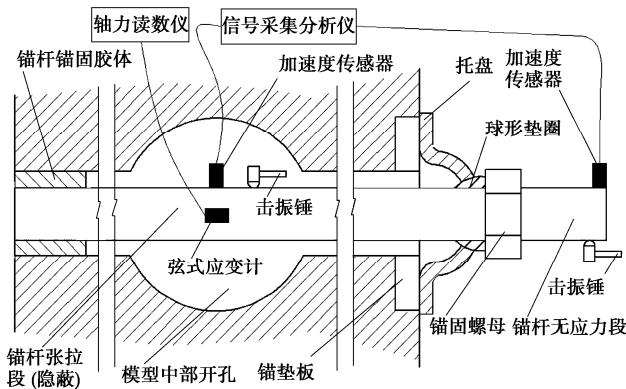


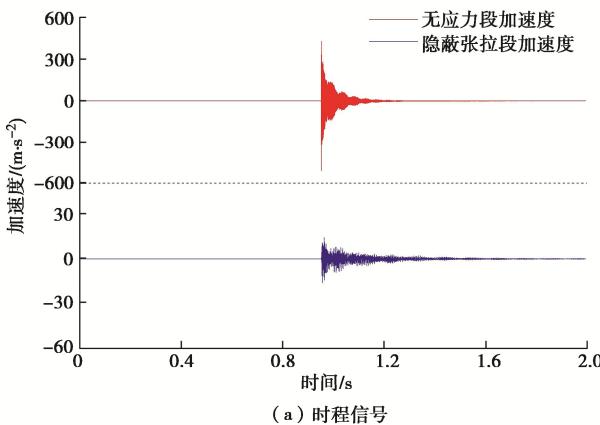
图3 测试方案示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test scheme

2 锚杆锚固体系振动特性试验研究

2.1 锚杆无应力段顶端、锚杆张拉段振动频谱图特性

按图3所示试验方案,人工手持橡胶小锤先后轻击锚杆无应力段顶端、混凝土梁模型中部开口位置的锚杆张拉段,获得加速度传感器时程信号,得到无应力段顶端、混凝土梁模型中部开口处的锚杆张拉段相应加速度频谱图如图4,5所示:击振锚杆无应力段顶端,或混凝土梁模型中部开口位置击振锚杆张拉段同时会触发锚杆无应力段、锚杆张拉段的振动,无应力段顶端加速度传感器时程信号其频谱图的卓越频率(将最大峰值频率定义为“卓越频率”),具有易识别的特性(图中634 Hz);张拉段加速度传感器时程信号其频谱图会出现多个峰值频率,其峰值频率无卓越性,同时峰值频率并不等于锚杆无应力段顶端的卓越频率。不同锚杆张拉力、锚杆无应力段长度多种工况试验表明锚杆无应力段顶端振动频谱图、锚杆张拉段振动频谱图所显现的特性具有完全重复性。



(a) 时程信号

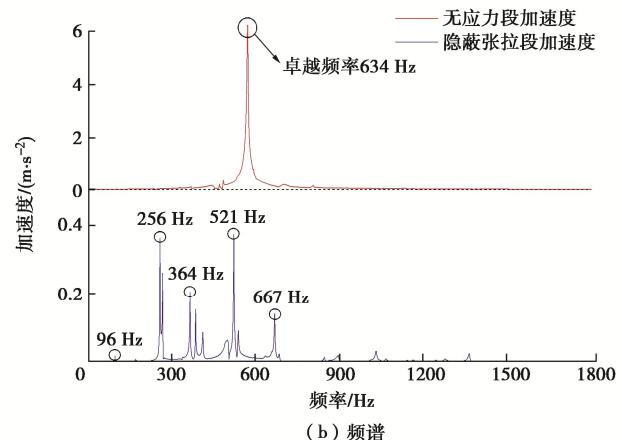
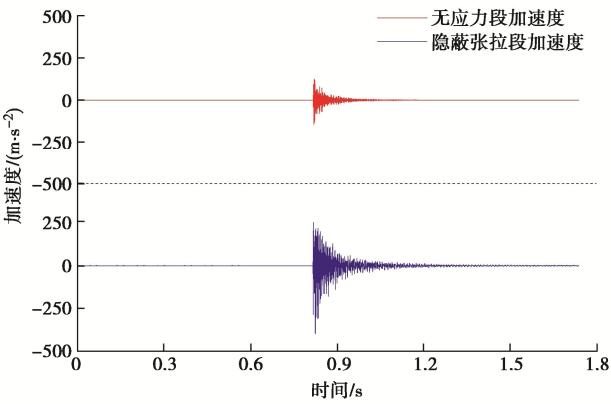


图4 击振无应力段加速度时程与频谱图(无应力段长度97 mm, 张拉力30 kN)

Fig. 4 Time histories and spectra of acceleration when striking unstressed section (length of unstressed section of 97 mm, tension of 30 kN)



(a) 时程信号

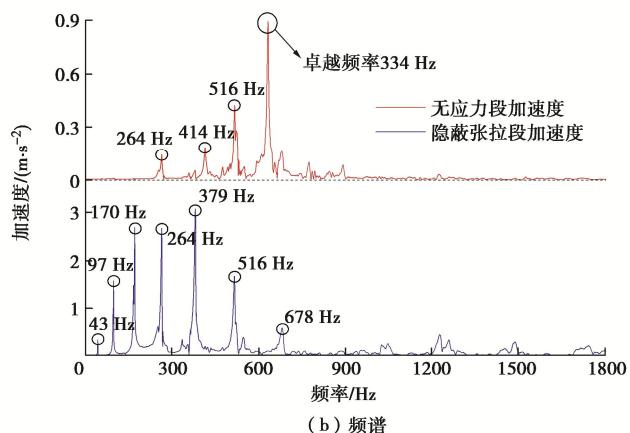


图5 击振张拉段加速度时程与频谱图(无应力段长度97 mm, 张拉力30 kN)

Fig. 5 Time histories and spectra of acceleration when striking tensioning section (length of unstressed section of 97 mm, tension of 30 kN)

2.2 保持锚杆无应力长度不变张拉力逐步增加的卓越频率变化特征

按前述方法和试验方案,完成了3根锚杆试验,张拉力加载完成后,切磨锚杆无应力段端部,分别保

表1 锚杆无应力段卓越频率与张拉力关系表(试验时无应力长度保持不变)

Table 1 Relationship between predominant frequency of unstressed section of anchor bolt and tension (length of unstressed section remains unchanged during experiment)

无应力长度/m	卓越频率/Hz	张拉力/kN	无应力长度/m	卓越频率/Hz	张拉力/kN	无应力长度/m	卓越频率/Hz	张拉力/kN
0.0895	610	10.02	0.0700	914	9.96	0.0492	1392	9.96
0.0899	632	14.97	0.0702	933	14.77	0.0497	1445	14.77
0.0896	659	19.78	0.0699	953	19.72	0.0505	1533	19.72
0.0900	676	25.06	0.0701	988	24.73	0.0502	1607	24.73
0.0901	681	29.48	0.0700	1000	29.80	0.0504	1625	29.80
0.0900	710	34.49	0.0699	1027	34.35	0.0509	1645	34.35

表2 锚杆无应力段卓越频率与张拉力关系表(试验时张拉力保持不变)

Table 2 Relationship between predominant frequency of unstressed section of anchor bolt and tension (tension remains unchanged during experiment)

无应力长度/m	卓越频率/Hz	张拉力/kN	无应力长度/m	卓越频率/Hz	张拉力/kN	无应力长度/m	卓越频率/Hz	张拉力/kN
0.1490	278	10	0.0920	643	22	0.0590	1287	30
0.1170	396	10	0.0830	747	22	0.1500	363	46
0.1000	502	10	0.0580	1274	22	0.1200	505	46
0.0805	682	10	0.1450	341	30	0.0950	717	46
0.0620	1029	10	0.1210	447	30	0.0790	944	46
0.1300	378	22	0.0970	634	30	0.0610	1385	46
0.1150	455	22	0.0790	837	30			

持其长度 90, 70, 50 mm 不变(误差±1 mm), 获得锚杆张拉段长度为 3 m 的锚杆无应力段顶端振动频谱图中卓越频率识别结果如表 1、图 6 所示, 表明保持无应力段长度不变其卓越频率随张拉力增加单调递增。

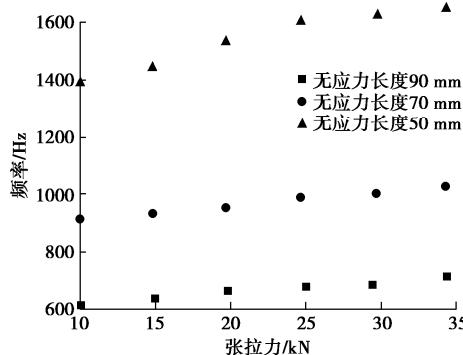


图6 锚杆无应力段卓越频率与张拉力关系图(试验时无应力长度保持不变)

Fig. 6 Relationship between predominant frequency of unstressed section of anchor bolt and tension (length of unstressed section remains unchanged during experiment)

2.3 保持张拉力不变锚杆无应力长度逐步变短的卓越频率变化特征

同理完成 4 根锚杆试验, 分别保持锚杆张拉力不变(张拉力分别为 10, 22, 33, 46 kN), 逐步切割锚杆无应力段, 获得锚杆张拉段长度为 3 m 的锚杆无应力段顶端振动频谱图中卓越频率识别结果如表 2、图 7 所示, 表明保持张拉力不变其卓越频率随无应力段变短快速增加。

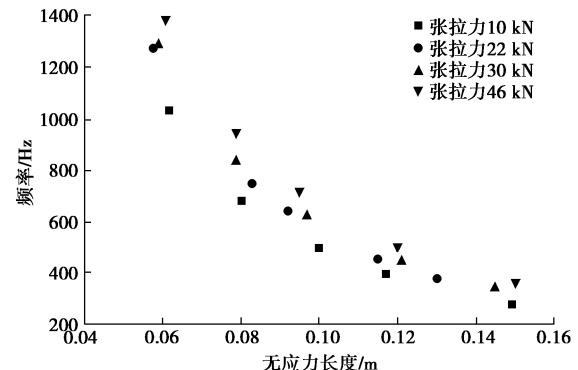


图7 锚杆无应力段卓越频率与张拉力关系图(试验时张拉力保持不变)

Fig. 7 Relationship between predominant frequency of unstressed section of anchor bolt and the tension (tension remains unchanged during experiment)

保持锚杆张拉段长度不变, 锚杆无应力段顶端振动频谱图的卓越频率随张拉力增加单调递增; 保持张拉力不变其卓越频率随无应力段变短快速增加, 由此推论: 在锚杆无应力段顶端安装加速度传感器所获得的频谱图其卓越频率并不是锚杆张拉段(隐蔽段)的欧拉梁多阶振动中的某个模态振动频率, 而是锚杆锚固体外露部分相关(锚杆无应力段、锚固螺母、螺母球形垫圈、蝶形托盘等组成)的某种振动模态频率。其推论为建立锚杆锚固体振动特性分析简化模型提供了依据, 锚杆无应力段顶端振动频谱图的卓越频率易识别性表明: 通过识别锚杆锚固体外露部分

的振动特性,建立锚杆张拉力与振动特性之间的关系,间接识别锚杆张拉力的无损测试方法具有可行性。

3 锚杆锚固体力学模型及其刚度参数与锚杆张拉力关系

3.1 锚杆锚固体的全局振动力学模型

如图 1 所示,锚杆锚固系统由锚杆外露部分、锚固螺母、球形垫圈、蝶形托盘、锚杆张拉段等组成,通过接触连接形成对围岩(锚喷网或锚喷网混凝土)的锚固,存在多个接触连接面(螺母与锚杆挤压接触、螺母与球形垫圈、球形垫圈与蝶形托盘、蝶形托盘与金属网或混凝土或围岩接触)。众多文献研究表明^[14-17],螺母锚固段(挤压接触)抗弯刚度、接触面法向接触刚度与法向应力成正比增加或与锚杆张拉力成正比增加。

设螺母锚固段抗弯刚度为 kEI , k 为随锚杆张拉力增加的刚度增大系数, EI 为锚杆抗弯刚度; 设螺母与球形垫圈、球形垫圈与蝶形托盘、蝶形托盘与金属网或混凝土或围岩接触面法向为弹簧连接,其刚度分别为 k_1 , k_2 , k_3 , 如图 8 所示,其模型振动的频率方程含有 k , k_1 , k_2 , k_3 4 个变量,但通过在锚杆无应力段顶端安装加速度传感器所获得的频谱图仅能识别一个卓越频率,求解其频率方程面临困难。显然需要对全局模型进一步简化,其简化模型存在多种可能性,经过分析比较弹性基础模型、刚体模型的刚度变量与张拉力具有良好的对应关系,与锚杆锚固体振动特性试验结果吻合,实现锚杆张拉力(轴力)无损测试具有可能性。

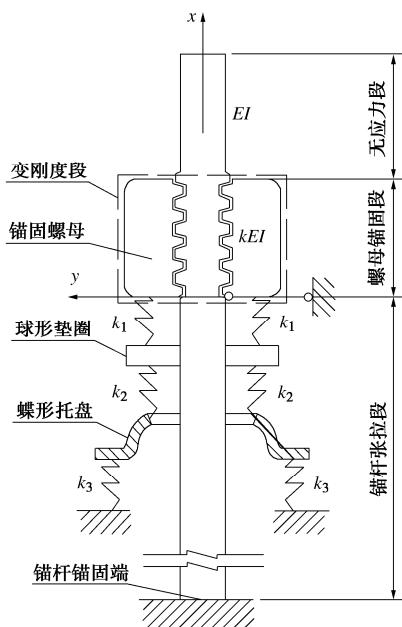


图 8 锚杆锚固体全局振动模型

Fig. 8 Global vibration model for anchorage system of bolt

3.2 弹性基础模型及频率方程

根据锚杆锚固体振动特性试验,在锚杆无应力段顶端安装加速度传感器所获得的频谱图中卓越频率并非锚杆张拉段(隐蔽段)振动模态频率的特性,视锚杆张拉段、球形垫圈、托盘、围岩相对锚固螺母为不动体,锚固螺母视为螺母锚固段锚杆的弹性基础,螺母锚固段锚杆视为弹性基础梁,如图 9 所示。基于锚固螺母与锚杆螺纹接触传递张拉力逐级递增,从顶面螺纹传递张拉力 10% 增加至底面螺纹传递 40% 左右^[18],其螺纹法向接触刚度同理由顶面螺纹逐渐增加,至底面螺纹最大,锚固螺母的弹性反力系数同理由顶面螺纹逐渐增加,至底面螺纹最大。

假设螺母与锚杆的螺纹法向为分布弹簧连接,其分布刚度为螺纹法向分布接触刚度,并假设其沿螺母高度均匀变化。 k_τ 为螺母与锚杆底面螺纹法向分布接触刚度 k_0 在 y 方向分量, k_α 为 x 方向分量,则 k_τ 与 k_α 的近似表达式为

$$k_\tau = k_0 \sin \alpha, \quad k_\alpha = k_0 \cos \alpha \quad . \quad (1)$$

式中, α 为螺纹倾角。由此螺母沿高度在 y 方向的弹性反力系数为 $k_\tau(1-x/l)$, 螺母沿高度在 x 方向的弹性反力系数为 $k_\alpha(1-x/l)$, l 为锚固螺母高度。如图 9 所示,在锚杆无应力段顶端施加单位荷载 P ,在 y 方向螺母对锚杆形成分布反力 $q(x)$:

$$q(x) = -k_\tau \left(1 - \frac{x}{l}\right) v \quad (x \in (0, l)) \quad . \quad (2)$$

在 x 方向螺母对锚杆形成分布反力,分布反力对锚杆形成分布力矩 $m(x)$:

$$m(x) = k_\alpha \left(1 - \frac{x}{l}\right) \frac{D^2}{2} v' \quad (x \in (0, l)) \quad . \quad (3)$$

式中: D 为锚杆直径; v 为螺母锚固段锚杆的挠曲函数。

如图 9 所示,单位荷载 $P=1$ 作用下,视螺母锚固段锚杆为弹性基础梁有:

$$EIv^{(4)} = \frac{dm(x)}{dx} + q(x) \quad (x \in (0, l)) \quad . \quad (4)$$

将式(2)、(3)代入式(4)得

$$EIv^{(4)} = k_\alpha \left(1 - \frac{x}{l}\right) \frac{D^2}{2} v'' - \frac{k_\alpha D^2}{l} \frac{D^2}{2} v' - k_\tau \left(1 - \frac{x}{l}\right) v \quad . \quad (5)$$

采用级数形式求解式(5),令

$$v = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \quad (x \in (0, l)) \quad , \quad (6)$$

式中, a_n 为无穷级数系数($n=1, 2, 3, \dots$)。

将式(6)代入式(5),对于任意 x 成立有

$$24EIa_4 - 2k_\alpha \frac{D^2}{2} a_2 + \frac{k_\alpha D^2}{l} \frac{D^2}{2} a_1 + k_\tau a_0 = 0 \quad , \quad (7)$$

$$120EIa_5 - 6k_\alpha \frac{D^2}{2} a_3 + 4 \frac{k_\alpha D^2}{l} \frac{D^2}{2} a_2 + k_\tau a_1 - \frac{k_\tau}{l} a_0 = 0 \quad . \quad (8)$$

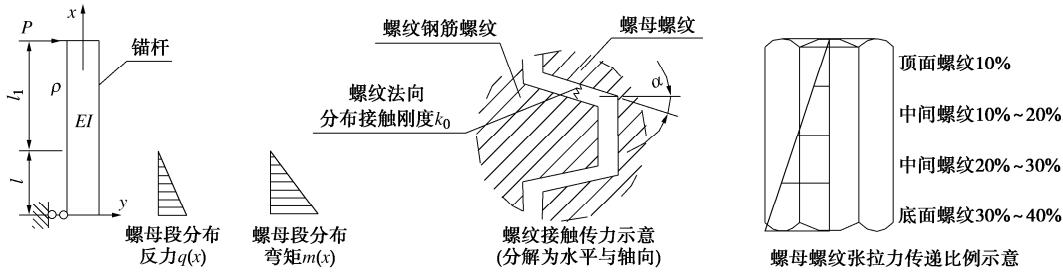


图 9 弹性基础模型

Fig. 9 Elastic foundation-beam model

当 $n \leq 5$ 的系数 a_n 已知时, 可得到无穷级数系数 a_n 递推方程:

$$\begin{aligned} n(n-1) & \left[(n-2)(n-3)EIa_n - k_a \frac{D^2}{2} a_{n-2} \right] + \\ & \frac{k_a}{l} \frac{D^2}{2} [n(n-1)+n] a_{n-1} + k_t \left(a_n - \frac{a_{n+1}}{l} \right) = 0 \quad . \end{aligned} \quad (9)$$

图 9 中锚固螺母段锚杆位移、剪力边界条件 (单位荷载 $P=1$ 作用下) 为

$$v|_{x=0} = 0 \quad , \quad (10)$$

$$EIv''|_{x=l} = -1 \quad , \quad (11)$$

$$EIv''|_{x=0} = -1 - \int_0^l q(x)dx \quad . \quad (12)$$

力矩平衡条件 (单位荷载 $P=1$ 作用下) 为

$$\int_0^l m(x)dx + \int_0^l xq(x)dx - EIv''|_{x=0} = (l+l_1) \cdot 1 \quad , \quad (13)$$

式中, l_1 为锚杆无应力段长度。式 (6) 取前 6 项结合式 (7), (8), (10) ~ (13) 联立求解获得 $n \leq 5$ 的系数, 再由式 (9) 递推获得式 (6) 的系数 a_n , 计算表明锚固螺母段锚杆挠度函数式 (6) 取前 6 项, 可满足工程计算精度要求。

视锚杆无应力段为经典弯曲梁, 由边界条件、螺母锚固段锚杆与无应力段位移连续条件, 锚杆无应力段的挠曲线方程为

$$v_1 = -\frac{x^3}{6EI} + \frac{x^2 l_1}{2EI} + v'|_{x=l_1} x + v|_{x=l_1} \quad x \in (0, l_1) \quad . \quad (14)$$

式中, v_1 为无应力段锚杆的挠曲函数。

由瑞利-里兹法, 图 9 所示模型的一阶固有频率方程为

$$\omega^2 = \frac{v_1|_{x=l_1}}{\int_0^l \rho v^2 dx + \int_0^{l_1} \rho v_1^2 dx} \quad , \quad (15)$$

式中, ρ 为锚杆的线密度。式 (15) 频率方程的未知数只含有螺母与锚杆底面螺纹法向分布接触刚度 k_0 。

3.3 刚体模型及频率方程

视锚杆张拉段、球形垫圈、托盘、围岩相对锚固螺母为不动体, 假设锚固螺母与球形垫圈法向为弹簧连接, 其弹簧刚度为 k_1 , 视螺母锚固段锚杆、无应力段为刚体, 视螺母为由无质量刚性杆连接的质量体,

并对称于锚杆轴向, 单个质量体为螺母质量的 $1/2$, 如图 10 所示。设锚杆无应力段顶部的加速度为 \ddot{v} , 位移为 v , 由 D'Alembert 原理得

$$\left(\frac{\rho L^3}{3} + 2 \cdot \frac{R^2 M}{2} \right) \ddot{v} + 2 \cdot k_1 R^2 \cdot \frac{v}{L} = 0 \quad . \quad (16)$$

式中: L 为螺母锚固段长度 l 与无应力段长度 l_1 之和; R 为螺母的内径与外径之和的二分之一; M 为螺母质量。视 $\rho L^2 / 3 + MR^2 / L$ 为广义质量, $2k_1 R^2 / L$ 为广义弹簧刚度, 由式 (16) 得到图 10 所示模型的固有频率方程:

$$\omega^2 = \frac{2k_1 R^2}{\rho L^3 / 3 + MR^2} \quad . \quad (17)$$

式 (17) 中未知数只含有螺母与球形垫圈的法向连接弹簧刚度 k_1 。

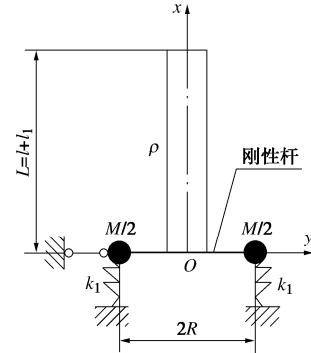


图 10 刚体模型

Fig. 10 Rigid body model

3.4 力学模型频率方程的刚度参数计算结果及与张拉力对应关系特征

设定初始刚度参数 k_0 , 并将已知参数: 锚杆钢材弹性模量 $E=201$ GPa, 锚杆直径 $D=20$ mm, 锚杆线密度 $\rho=3.9$ kg/m, 螺母质量 $M_1=0.078$ kg, 锚固螺母高度 $l=23$ mm, 螺纹倾角 α 、锚固螺母几何尺寸等参数, 表 1, 2 中锚杆无应力段长度 l_1 代入式 (7), (8), (10) ~ (13) 中, 通过求解线性方程组, 得到式 (6) 中的前 6 项系数 $a_0 \sim a_5$, 再将所得的螺母锚固段锚杆挠曲函数 v 代入式 (14), (15) 中, 同时结合表 1, 2 中所识别的无应力段卓越频率, 以刚度参数 k_0 作为迭代变

表 3 模型刚度参数计算结果
Table 3 Calculated results of stiffness parameters of model

无应力段长度/m	无应力段卓越频率/Hz	张拉力/kN	弹性基础模型刚度参数 $k_0/(10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	刚体模型刚度参数 $k_1/(10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})$	无应力段长度/m	无应力段卓越频率/Hz	张拉力/kN	弹性基础模型刚度参数 $k_0/(10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	刚体模型刚度参数 $k_1/(10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})$
0.149	278	10	14	49	0.061	1385	46	29	86
0.117	396	10	13	48	0.090	610	10	15	51
0.100	502	10	14	48	0.090	632	15	16	56
0.081	682	10	13	47	0.090	659	20	18	60
0.062	1029	10	15	50	0.090	676	25	19	64
0.145	341	30	21	67	0.090	710	34	22	70
0.121	447	30	21	68	0.070	914	10	17	56
0.097	634	30	21	68	0.070	933	15	18	58
0.079	837	30	21	67	0.070	953	20	19	60
0.059	1287	30	22	67	0.070	988	25	20	65
0.130	378	22	18	60	0.070	1000	30	21	67
0.115	455	22	18	60	0.070	1027	34	22	70
0.092	643	22	19	62	0.049	1392	10	15	47
0.083	747	22	19	61	0.050	1445	15	16	52
0.058	1274	22	20	63	0.050	1533	20	20	61
0.150	363	46	31	85	0.050	1607	25	22	66
0.120	505	46	29	84	0.050	1625	30	23	68
0.095	717	46	28	84	0.051	1645	34	24	72
0.079	944	46	29	85					

表 4 刚度参数与张拉力的关系特征

Table 4 Characteristics of relationship between stiffness parameters and tension

无应力长度范围/m	张拉力/kN	弹性基础模型刚度参数 $k_0/(10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})^a$			标准差变化范围/%	刚体模型刚度参数 $k_1/(10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})^b$			标准差变化范围/%
		最小值	最大值	标准差		最小值	最大值	标准差	
0.149~0.049	10	13	17	3.464	19.24	47	56	7.874	20.19
0.090~0.050	15	16	18	1.633	9.07	52	58	4.320	11.08
0.090~0.050	20	18	20	1.414	7.86	60	61	0.816	2.09
0.130~0.058	22	18	20	1.673	9.29	60	63	2.608	6.69
0.090~0.050	25	19	22	2.160	12.00	64	66	1.414	3.63
0.050~0.145	30	21	23	1.927	10.71	67	68	1.309	3.36
0.090~0.050	34	22	24	1.633	9.07	70	72	1.633	4.19
0.150~0.051	46	28	31	3.464	19.24	84	86	1.673	4.29

注: a 变化值范围为 $13 \times 10^3 \sim 31 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, b 变化范围为 $47 \times 10^6 \sim 86 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

量, 采用二分法即可求解方程式(15)中的唯一未知参数——螺母与锚杆的底面螺纹法向分布接触刚度 k_0 。同理, 将相关参数代入式(17)可直接计算螺母与球形垫圈的法向连接弹簧刚度 k_1 , 两类模型刚度计算结果如表 3 所示。

表 3 对应的两类模型张拉力与刚度参数关系如图 11, 12 所示, 表明无论是弹性基础模型、刚体模型其刚度参数均与锚杆张拉力显现递增关系和线性相关性。对表 3 进行分类统计如表 4 所示, 当锚杆张拉力较小时(小于等于 15 kN 时), 弹性基础模型刚度参数 k_0 的标准差/变化范围小于刚体模型刚度参数 k_1 的标准差/变化范围, 表明此时弹性基础模型相对刚体模型的刚度参数与张拉力关系有更好的收敛性; 当锚杆张拉力较大时(大于 15 kN 时), 则相反。显然, 刚体模型相对弹性基础模型适用范围较大, 本文后续分析仅

采用刚体模型。

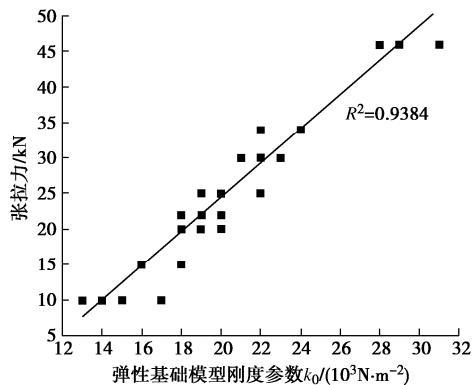
图 11 弹性基础模型刚度参数 k_0 与张拉力图

Fig. 11 Relationship between stiffness parameter k_0 and tension of elastic foundation-beam model

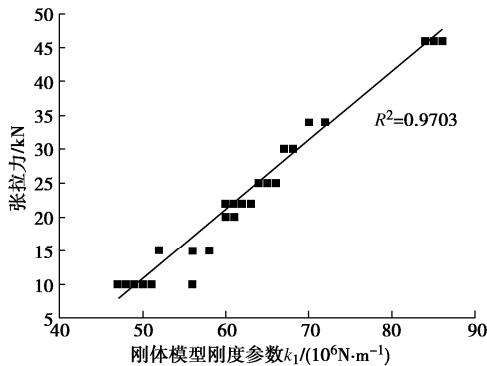
图 12 刚体模型刚度参数 k_1 与张拉力图

Fig. 12 Relationship between stiffness parameter k_1 and tension of rigid body model

4 不同边界条件刚度参数-张拉力关系特征试验

4.1 蝶形托盘不同接触对象对刚度参数-张拉力关系影响

对于隧道锚杆的蝶形托盘多数情况与锚喷钢丝网接触, 钢丝网存在不同规格。在试验模型上完成了蝶形托盘与硬质菱形网(工艺为焊接工艺, 孔径 80 mm×40 mm, 丝径 3.08 mm)、软质菱形网(工艺为钩编工艺, 孔径为 80 mm×80 mm, 丝径为 2.76 mm)接触的 4 根锚杆比对试验, 其无应力长度均为 0.07 m, 同理按刚体模型频率方程式(17)求解刚度参数 k_1 , 获得刚度参数 k_1 与张拉力关系如图 13 所示。

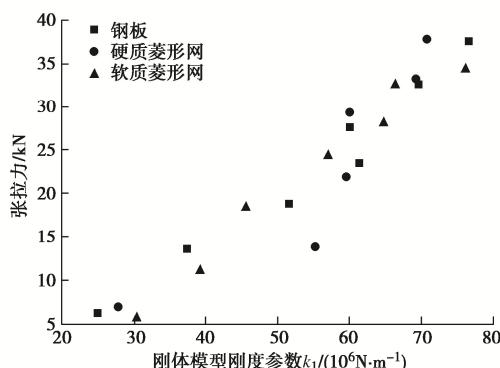
图 13 刚体模型刚度参数 k_1 与张拉力图(蝶形托盘不同接触条件比较)

Fig. 13 Relationship between stiffness parameter k_1 and tension of rigid body model (comparison of different contact conditions of butterfly pallet)

蝶形托盘所接触不同介质, 并不影响螺母与球形垫圈的接触刚度, 试验结果结合理论模型得出的结果说明蝶形托盘不同接触条件对锚固体的刚度参数 k_1 -张拉力关系没有实质影响。

4.2 不同锚杆张拉段长度的刚度参数-张拉力关系

在室内建造混凝土模型, 其尺寸、构造与图 2 基本一致, 按锚杆张拉段长度分别为 3.0, 2.5, 2.0, 1.5 m 构造梯级台阶, 进行 4 根试验锚杆试验, 其无应力长度均为 0.15 m, 同理按刚体模型频率方程式(17)求解刚度参数, 获得刚度参数 k_1 与张拉力关系如图 14 所示。不同锚杆张拉段长度与刚度参数 k_1 与张拉力关系没有对应变化关系, 与前述锚杆振动特性试验结论吻合, 即无应力段顶端所测试的卓越频率不是锚杆张拉段(隐蔽段)振动模态频率。

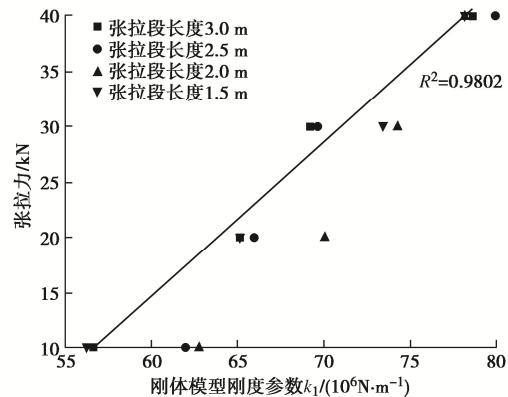
图 14 刚体模型刚度参数 k_1 与张拉力图(不同张拉段长度比较)

Fig. 14 Relationship between stiffness parameter k_1 and tension of rigid body model (comparison of different lengths of tension section)

4.3 现场试验的刚度参数-张拉力关系

工程背景: 湖南科技大学子校教学楼边坡防护工程, 钻孔深度为 10 m, 孔径为 90 mm, 倾斜角为 15°, 锚杆与室内试验规格相同, 水泥浆锚固长度为 4 m, 在 7 根锚杆张拉段安装弦式测力传感器, 边坡面在挂网(100 mm×100 mm, Φ8 钢筋网)后浇注 100 mm 厚混凝土, 并预制锚杆安装的台阶面, 养护 14 d 后, 安装与室内试验同批次的蝶形托盘、球形垫圈、螺母, 采用扭力扳手对锚杆施加 150 Nm 扭矩, 边坡锚杆工

程与测试示意如图 15 所示。施工完成 48 h 后按试验方案测试锚杆无应力段卓越频率、测量无应力段长度、锚杆张拉力如表 5 所示，同理按刚体模型频率方程式

(17) 求解刚度参数 k_1 ，获得刚度参数 k_1 与张拉力关系如图 16 所示。当张拉力为 10 kN 左右时，刚度参数 k_1 与张拉力关系收敛性较差；当大于 15 kN 时，张拉力与刚度参数 k_1 具有良好线性关系，其特性与室内试验具有一致性。



图 15 边坡锚杆工程与现场测试示意图

Fig. 15 Schematic diagram of anchor bolts in slope and field tests

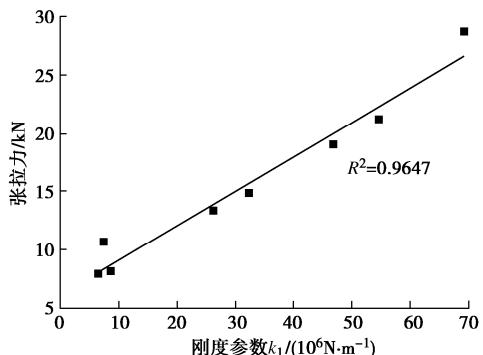


图 16 边坡锚杆刚度参数 k_1 与张拉力图

Fig. 16 Relationship between stiffness parameter k_1 and tension of anchor bolt in slope

表 5 边坡锚杆参数、张拉力实测与计算比较表

Table 5 Parameters of anchor bolts in slope and comparison between calculated and measured tensions

无应力段 长度/m	无应力段顶端 测试频率/Hz	计算刚度参数 $k_1/(10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})$	实测张拉力/ kN
0.063	910	47	19.01
0.054	515	7	10.63
0.061	762	26	13.37
0.138	230	32	14.89
0.090	256	9	8.14
0.077	922	69	28.67
0.051	518	6	7.89
0.084	692	55	21.17

5 锚杆张拉力无损测试方法与技术路线、适用性分析

5.1 锚杆张拉力无损测试方法与技术路线

刚度参数 k_1 与张拉力关系式标定如图 17 所示。
①按照实际施工方法在隧道安装锚杆 3, 4 根，测试张拉力。方法一：按相关检测标准，采用扭力扳手在室内标定锚杆拧紧锚固螺母的扭矩与张拉力关系式，现场根据扭力扳手扭矩间接获得锚杆张拉力，其优点标定的仪器设备可以重复使用，缺点是需要增加室内标定过程。方法二：直接在锚杆张拉段安装轴力计测量锚杆张拉力，优点是简单快速，不足是锚杆轴力计不能重复使用、需要施工单位配合，轴力计测量的导线需要保护。②测试需要获得锚杆基本物理参数：锚杆直径、锚杆线密度，螺母质量，螺母高度、螺母几何尺寸等。③标定流程：按设计张拉力分四级张拉（设计张拉力的 25%, 50%, 75%, 100%），每次张拉完成后测量锚杆无应力段长度，在无应力段顶端安装加速度传感器并连接信号采集仪，采用橡胶小锤先后轻击锚杆无应力段顶端，识别无应段顶端振动的卓越频率。将锚杆基本物理参数、锚杆无应力段长度、卓越频率代入式 (17) 计算刚度参数 k_1 ，获得不同张拉力对应的刚度参数 k_1 值 (12~16 对数据)，对获得的数据进行最小二乘法拟合得到刚度参数 k_1 与张拉力关系式。

待测锚杆的张拉力测试：测量锚杆无应力段长度，在无应力段顶端安装加速度传感器并连接信号采集仪，采用橡胶小锤先后轻击锚杆无应力段顶端，识别无应段顶端振动的卓越频率。将锚杆基本物理参数、锚杆无应力段长度、卓越频率代入式 (17) 计算刚度参数 k_1 ，根据标定的刚度参数 k_1 与张拉力关系式计算锚杆张拉力，实现锚杆张拉力无损测试目标。

5.2 锚杆张拉力无损测试仪器结构框架

根据图 17 技术路线，采用目前市场技术可构建嵌入式微机系统的锚杆张拉力无损测试专用仪器，其框架如图 18 所示，张拉力测试仪由信号采集系统、信号分析系统、频率读入系统、张拉力计算系统组成，通过张拉力测试仪液晶面板主菜单控制，主菜单由参数输入、信号采集与信号显示窗口、张拉力计算菜单 3 个子菜单组成。

5.3 锚杆张拉力无损测试方法适用性分析

(1) 锚杆无应力长度直接影响卓越频率的识别：本文所采用的锚杆直径为 $\Phi 20$ 的 BHRB335 号螺纹钢筋，当锚杆无应力段长度小于 40 mm 时，锚杆无应力段顶端振动频谱图会出现多个峰值接近的频率，其卓越频率不再具有易识别性，锚杆无应力长度相对较

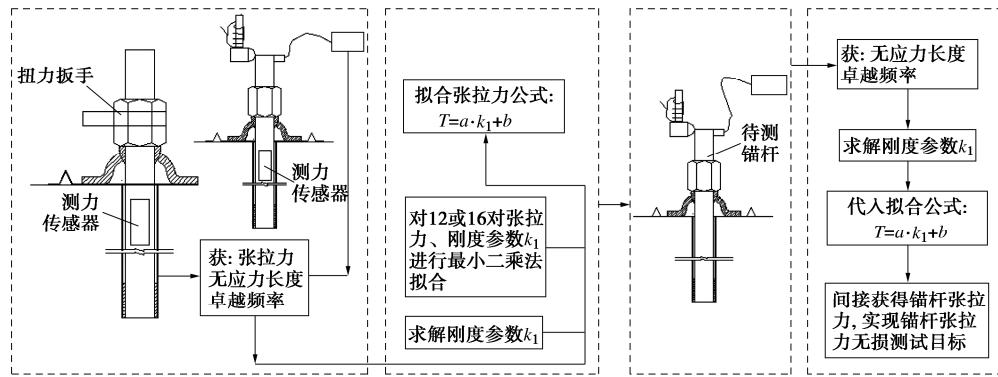


图 17 无损测试方法与技术路线示意图

Fig. 17 Schematic diagram of nondestructive testing method and technical route

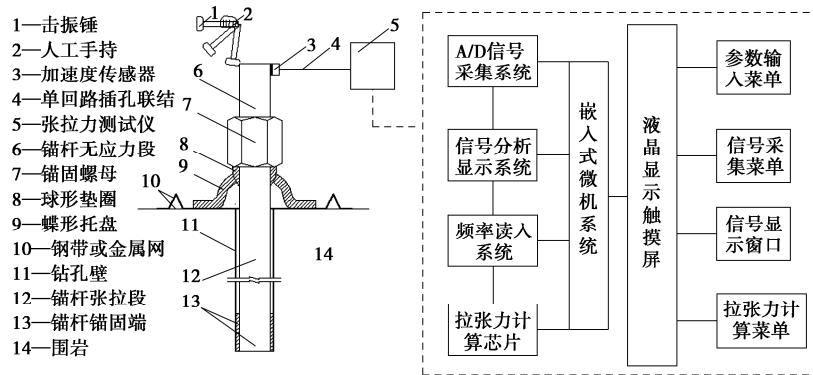


图 18 仪器技术框架

Fig. 18 Technical framework of instruments

短时锚杆张拉力无损测试方法需要进一步研究。

(2)本文室内和现场试验的锚杆锚固体系外露部分是按文献[2]建议配置的, 采用了球形垫圈、蝶形托盘, 而实际工程中可能存在无球形垫圈, 而锚垫板采用平面钢板的情况, 是否适用本文所提出的锚杆锚固体系外露部分简化弹性基础、刚体模型需进一步研究。

(3)采用锚杆 3~4 根现场标定刚度参数 k_1 与张拉力关系式, 需要进一步大规模工业试验, 确定误差影响因素及特征, 显然针对某一规格的锚杆现场标定刚度参数 k_1 与张拉力关系仅适用某一规格锚杆的张拉力无损测试。

6 结 论

(1)在锚杆锚固体系外露部分的无应段顶端安装加速度传感器, 击振其无应力段顶端, 获得其振动加速度时程信号, 快速傅里叶变换后获得的频谱图中卓越频率具有易识别的特点。测试所得的卓越频率不是锚杆张拉段欧拉梁的多阶振动模态频率, 是锚杆锚固体系外露部分的振动频率, 锚杆锚固体系外露部分振动特性是本文提出的锚杆张拉力无损测试方法的基本依据。

(2)根据锚杆外露部分振动特性所建立的简化力学模型, 其频率方程获得的刚度参数——锚杆张拉力关系对蝶形托盘接触的复杂介质、不同锚杆张拉段长度不具有敏感性, 表明本文提出的锚杆张拉力无损检测方法具有实际应用的可行性。

(3)小规模的现场试验表明, 现场试验刚度参数—张拉力关系具有良好的线性关系, 与室内模型试验具有一致性, 表明本文提出的锚杆张拉力无损检测方法完全可用于实际工程的锚杆张拉力无损测试。

(4)本文提出的锚杆张拉力专用测试仪器易实现工业化生产, 所提出的锚杆张拉力无损检测方法采用的仪器和传感器可重复使用, 可快速实现对工程全部锚杆张拉力的 100% 测试, 且不影响施工。在此基础上编制行业标准, 可实现在隧道、边坡工程的全面推广应用。

参考文献:

- [1] 赵东平, 王卢伟, 喻渝, 等. 隧道系统锚杆研究现状与发展方向[J]. 土木工程学报, 2020, 53(8): 116-128. (ZHAO Dongping, WANG Luwei, YU Yu, et al. Research status and development direction of tunnel system bolt[J]. China Civil

- Engineering Journal, 2020, **53**(8): 116-128. (in Chinese))
- [2] 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范: GB 50086—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016. (Technical Code for Engineering of Ground Anchoring and Shotcrete Support: GB 50086—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2016. (in Chinese))
- [3] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部关于修改《公路水运工程试验检测管理办法》的决定[A]. 中华人民共和国国务院公报, 2017(17): 73-79. (Decision of the Ministry of Transport on Amending the Administrative Measures for Testing and Testing of Highway and Waterway Engineering[A]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2017(17): 73-79. (in Chinese))
- [4] 余 涛, 方 勇, 姚志刚, 等. 隧道预应力锚杆锚固结构承载效应及围岩力学分析[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(6): 1069-1077. (YU Tao, FANG Yong, YAO Zhigang, et al. Bearing effect of prestressed bolt-anchored structures and mechanical analysis of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(6): 1069-1077. (in Chinese))
- [5] YANG J, CHANG F K. Detection of bolt loosening in C-C composite thermal protection panels: I. Diagnostic principle[J]. Smart Materials and Structures, 2006, **15**(2): 581-590.
- [6] ZHANG Z, LIU M L, LIAO Y Z, et al. Contact acoustic nonlinearity (CAN)-based continuous monitoring of bolt loosening: hybrid use of high-order harmonics and spectral sidebands[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, **103**: 280-294.
- [7] AMERINI F, MEO M. Structural health monitoring of bolted joints using linear and nonlinear acoustic/ultrasound methods[J]. Structural Health Monitoring, 2011, **10**(6): 659-672.
- [8] 窦传浩, 赵利平, 梁义维. 锤击声学法锚杆轴力监测装置的研究 [J]. 煤炭技术, 2016, **35**(4): 273-276. (DOU Chuanhao, ZHAO Liping, LIANG Yiwei. Study on device of monitoring axial force of rock bolt by hammering acoustics[J]. Coal Technology, 2016, **35**(4): 273-276. (in Chinese))
- [9] 赵利平, 张 杰, 梁义维, 等. 一种利用锤击声学法对锚杆轴力监测的装置及方法: CN105067170A[P]. 2017-08-22. (ZHAO Liping, ZHANG Jie, LIANG Yiwei, et al. Device and Method for Monitoring Axial Force of Anchor Rod by Utilizing Hammering Acoustic Method: CN105067170A[P]. 2017-08-22. (in Chinese))
- [10] WANG F R, SONG G B. 1D-TICapsNet: an audio signal processing algorithm for bolt early looseness detection[J]. Structural Health Monitoring, 2021, **20**(5): 2828-2839.
- [11] WANG F R, SONG G B. A novel percussion-based method for multi-bolt looseness detection using one-dimensional memory augmented convolutional long short-term memory networks[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, **161**: 107955.
- [12] WANG F R, SONG G B. Looseness detection in cup-lock scaffolds using percussion-based method[J]. Automation in Construction, 2020, **118**: 103266.
- [13] WANG F R, MOBINY A, VAN NGUYEN H, et al. If structure can exclaim: a novel robotic-assisted percussion method for spatial bolt-ball joint looseness detection[J]. Structural Health Monitoring, 2021, **20**(4): 1597-1608.
- [14] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces[J]. Journal of Tribology, 1991, **113**(1): 1-11.
- [15] FU W P, HUANG Y M, ZHANG X L, et al. Experimental investigation of dynamic normal characteristics of machined joint surfaces[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2000, **122**(4): 393-398.
- [16] 姜 东, 史勤丰, 费庆国, 等. 螺栓连接结构接触面刚度识别方法[J]. 固体火箭技术, 2014, **37**(5): 688-693. (JIANG Dong, SHI Qinfeng, FEI Qingguo, et al. Stiffness identification of fixed bolted-joint interface[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, **37**(5): 688-693. (in Chinese))
- [17] SANATI M, ALAMMARI Y, KO J H, et al. Identification of joint dynamics in lap joints[J]. Archive of Applied Mechanics, 2017, **87**(1): 99-113.
- [18] ZHONG X G, ZHANG T Y, ZHAO C, et al. New non-destructive dynamic tensile testing of prestressing fine-rolled screw-threaded steel bars[J]. Engineering Structures, 2019, **182**: 153-163.