

锚杆张力无损检测方法的数值模拟与试验对比

田北平¹, 毛利胜¹, 刘文方¹, 黄伯太²

(1. 四川理工学院建筑工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 四川升拓检测技术有限责任公司, 成都 610045)

摘要:针对预应力锚杆使用过程中张力逐渐降低问题, 考虑锚杆系统的卓越频率及加权频率, 运用弦振理论, 建立锚杆张力与自振频率相关关系模型。通过数值模拟分析的方式探求了自振频率与锚杆张力的相关性, 并通过实验进行了验证。

关键词:无损检测; 锚杆张力; 计算频率; 预应力锚杆

中图分类号: TU757

文献标识码: A

引言

长期以来, 预应力锚固作为一种主动支护手段, 大大不同于传统“被动”式支护, 其主动支护的优越性已被广大设计人员认可, 锚杆作为一种有效的加固方法已广泛应用于土木工程和采矿工程中。桩锚支护中, 锚杆利用一定的预应力主动制约土体变形和结构破坏。锚杆预应力大小对锚杆发挥主动制约作用。一般桩锚支护体系中锚杆预应力大小在设计时已经确定, 如果锚杆实际工作预应力大小达到设计值, 支护体系将满足稳定性要求。然而, 锚杆的张拉及锁定后的预应力均有不同程度的损失, 如果损失过大, 将达不到设计所要求的预应力值, 从而影响锚固和支护效果, 造成工程隐患。因此, 不少学者致力于预应力锚杆张力损失因素探讨并有学者通过不同方式来试图计算此张力。文献[1]选用钢弦式锚杆测力仪, 对基坑锚杆预应力变化进行了检测和分析, 将锚杆预应力在运营过程中分为了预应力快速下降、预应力值“抬头”、预应力稳定变化三个阶段; 文献[2]通过非线性蠕变分析理论模型, 通过改变锚杆的物理参数及几何参数, 考察各种参数对于锚杆蠕变特性及应力松弛特性的影响; 文献[3]DDA这种数值模拟方法用以模拟无锚杆、有锚杆(不同预应力值)条件下节理岩体的稳定情况; 文献[4]对预应力锚杆钻孔抗滑桩结构的受力状态和抗滑机理进行了室内试验和现场监测研究, 在现场观测中采用了安装应变片及拉力传感器

的形式来获知在施工期间(桩前出土)、锚杆张拉期间及后期土压力的变化情况, 从而进行了锚杆和桩身受力的变化情况方面的探讨; 文献[5-7]都分别探讨了锚杆预应力问题, 分析影响预应力的各种因素, 并通过各种方式来模拟预应力实际状况。但如何在无损状态下快速测试出锚杆预应力, 国内鲜有此类方法及研究, 本文正是在前人研究理论上探讨无损状态下锚杆张力快速测试, 并建立预应力锚杆张力与锚杆纵向卓越频率及锚杆重心频率之间关系。

1 无损检测测试原理

1.1 测试原理方程

本研究依弦振动理论为基础, 通过锚杆张力与系统自振特性关系来推算预应力锚杆张力, 如图1所示, 将锚杆板面与接触部分增加弹簧模型, 并引入弹簧系数 K , 则系统的响应固有频率预应力锚杆工程属于隐蔽工程, 受锚固介质等多因素的影响, 振动特性变得相当复杂, 需要修正和改良测试参数。其中, 锚杆的纵向卓越频率比较容易测定, 因此本研究着力于纵向卓越频率与张力之间关系的数值分析和试验验证。

1.2 承压板固有频率测定方法及流程

只要测定出锚杆板面固有频率, 则可以根据固有频率与锚杆张力间的关系求出锚杆张力, 如图1所示。当压力增加时, 板材的固有频率提高, 频谱特性也改变。根据其固有频率范围, 可以测定张力。然而, 在推测张

收稿日期: 2010-06-22

基金项目: 四川省教育厅科研项目(07ZC036); 四川理工学院科研项目(2009XJKYL003)

作者简介: 田北平(1963-), 男, 四川自贡人, 教授, 主要从事结构方面的研究。(E-mail) tianbeiping@126.com

力时, 板材的形状和面积, 有无盖帽, 背面山地状况(有无固定砂浆存在, 岩石风化条件等) 都是其结果有着影响, 因此测定过程极其复杂。

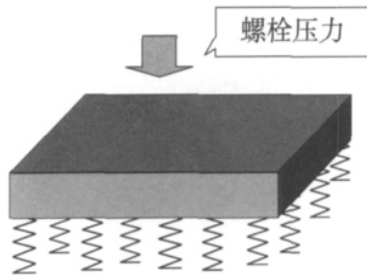


图 1 锚杆张力与系统弹簧系数的关系模型图

我们结合数值分析 来解决这些问题。测量流程如下:

- (1) 数值分析, 确定弹簧系数 $K \sim f$ 之间的关系。
- (2) 进行室内模型试验, 寻找 $N \sim f$ 关系, 在数值计算结果的基础上进一步推定 $N \sim K$ 的关系。
- (3) 利用 $N \sim K$ 的关系, 可测试锚杆张力。

2 固有频率与弹簧系数之间的数值模拟研究

表 1 弹簧系数 K 与承压板固有频率计算结果

序号	文件名	K _x	K _y	K _z	第 1 阶频率 (Hz)	第 2 阶频率 (Hz)	第 3 阶频率 (Hz)	第 4 阶频率 (Hz)	第 5 阶频率 (Hz)	第 6 阶频率 (Hz)
3	dbkth-93	-1E+05	-1E+05	-1E+07	2561.345	2564.147	2564.729	2571.805	2667.095	2979.893
4	dbkth-94	-3E+05	-3E+05	-3E+07	3765.316	3864.706	3864.569	3941.72	4150.196	4281.455
5	dbkth-95	-6E+05	-6E+05	-6E+07	4672.783	5053.354	5143.632	5143.658	5250.667	5587.898
6	dbkth-96	-9E+05	-9E+05	-9E+07	4687.953	6067.502	6142.666	6142.703	6244.353	6622.131
7	dbkth-97	-1E+06	-1E+06	-1E+08	4692.964	6368.355	6439.083	6439.129	6537.323	6914.952
8	dbkth-98	-3E+06	-3E+06	-3E+08	4790.654	7509.509	7509.482	10160.92	10665.94	10665.95
9	dbkth-99	-6E+06	-6E+06	-6E+08	4932.032	7606.316	7606.334	10263.19	13277.26	13511.28
10	dbkth-910	-9E+06	-9E+06	-9E+08	5068.448	7700.687	7700.683	10343.86	13350.59	13637.01
11	dbkth-911	-1E+07	-1E+07	-1E+09	5112.935	7731.685	7731.71	10370.38	13370.43	13664.83
12	dbkth-912	-3E+07	-3E+07	-3E+09	5922.612	8317.681	8317.681	10880.29	13699.92	14054.26
13	dbkth-913	-6E+07	-6E+07	-6E+09	6941.486	9106.428	9106.444	11589.28	14145.62	14527.62
14	dbkth-914	-9E+07	-9E+07	-9E+09	7810.39	9814.429	9814.408	12243.2	14567.35	14965.09
15	dbkth-915	-1E+08	-1E+08	-1E+10	8075.602	10035.75	10035.75	12450.54	14703.53	15105.49
16	dbkth-916	-3E+08	-3E+08	-3E+10	12005.32	13495.1	13495.08	15818.89	17076.29	17511.35
17	dbkth-917	-6E+08	-6E+08	-6E+10	15727.65	16916.65	16916.64	19122.43	19418.8	19795.26
18	dbkth-918	-9E+08	-9E+08	-9E+10	18305.27	19297.26	19297.25	19474.85	20597.63	21206.07
19	dbkth-919	-1E+09	-1E+09	-1E+11	18967.37	19493.65	19900.01	19900.02	20709.37	21409.3
20	dbkth-920	-3E+09	-3E+09	-3E+11	19559.54	20443.97	21300.73	21300.73	22773.51	22773.51
21	dbkth-921	-6E+09	-6E+09	-6E+11	19576.05	20505.77	21381.71	21381.71	22818.75	22818.75
22	dbkth-922	-9E+09	-9E+09	-9E+11	19583.67	20529.1	21414.46	21414.46	22839.52	22839.53
23	dbkth-923	-1E+10	-1E+10	-1E+12	19585.45	20534.16	21421.86	21421.86	22844.39	22844.39
24	dbkth-924	-3E+10	-3E+10	-3E+12	19599.39	20569.05	21477.19	21477.18	22882.45	22882.45
25	dbkth-925	-6E+10	-6E+10	-6E+12	19604.33	20579.57	21495.72	21495.66	22895.76	22895.76
26	dbkth-926	-9E+10	-9E+10	-9E+12	19606.26	20583.33	21502.58	21502.49	22900.68	22900.78

通过计算分析的结果中可知每一节点中 x 、 y 、 z 方向的弹簧系数对应的各阶(这里利用了第 1 阶到第 6 阶)固有频率趋势是一致的, 伴随张力的增加(锚杆张力与系统弹簧系数的关系)该阶次固有频率也相应增大, 但是高阶频率的增加趋势比较迟缓。

3 实测分析

根据上述有限元数值仿真的结果且结合弦振动理

以图 2 作为理论模型, 试验承压板结构尺寸为 $0.2\text{m} \times 0.2\text{m} \times 0.01\text{m}$ 。采用日本算生会(Sanseikai)和四川升拓检测技术有限公司联合开发的 3 维连续体(NAS-FEM3DVib)有限元分析软件进行数值分析, 建立如图 2 的有限元分析模型。利用雅可比(Jacobi)分析方法求解 MK 型特征值。

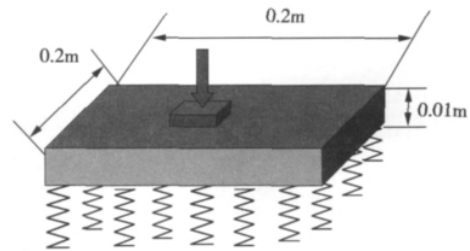


图 2 承压板数值分析理论模型

计算条件

$E_x = E_y = E_z = 210\text{GPa}$, 密度 $\rho = 7800\text{kg/m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。

计算结果如表 1 所示:

论通过室内模拟试验来建立预应力锚杆张力无损检测的理论体系并分析其影响因素。预先浇筑室内混凝土试验块且安装锚索结构, 主要研究锚杆张力与纵向频率之间的关系。用应力测试系统和中空千斤顶测试张力; 在锚杆长度方向, 用磁性座把传感器安装在承压板上, 采用电磁铁或激励锤等装置在承压板上垂直激励, 产生纵向振动。本实验采用自动激振装置和直径分别为 6, 10, 17 的激励锤进行激励, 采集到系统响应信号并进行

频率相关分析。伴随预应力锚杆张力的增加,卓越频率有增加的趋势,但卓越频率的规律稳定性较差。而锚杆张力与另一个变量 f_{DN} (重心频率)却有比较好的相关关系。

定义加权频率 f_{DN} 如下:

$$f_{DN} = \frac{\sum_{i=1}^N f_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (1)$$

其中, f_i 为第*i*阶的固有频率; W_i 为第*i*阶固有频率的对应的频谱能量,可利用FFT来分析得到。

经过多次反复试验,结果发现与数值分析的结果之间有一定的差异,主要体现在:

① 在试验中,张力达到设计张力的1/3左右时,其自振频率基本上不再增加,而数值模拟则呈单调增加趋势。

② 锚杆露出长度对系统响应有影响,这种影响仅在低拉力范围内,伴随拉力的增加,这种影响减弱。

③ 试验中对试块敲击部位的不同对频率测定有影响。

④ 试验中发现对试块打击力度对测试结果也有影响,主要在低拉力范围内力度越大越容易激励高频信号;而在高拉力作用下,力度的影响则不大。

这些问题说明,单纯依靠自振频率推算锚杆张力存在较大的问题,我们将在随后的研究中,会进一步探讨并将成果展现,从而将预应力锚杆无损检测方法更好的完善。

4 结论

通过实验和数值模拟分析,发现:

① 伴随预应力锚杆张力的增加,在一定范围内,卓越频率和加权频率都有增加的趋势;

② 然而,当张力超过一定范围(通常在1/3设计张力)后,测试得到的自振频率开始不随张力的增加而增加;

③ 此外有诸多方面(如锚杆露出长度、激振力度等)的影响,试验与数值模拟之间有较大的差别。

因此,单纯采用自振频率来测试锚杆张力的方法具有较大的局限性,需要进一步的研究和完善。

参考文献:

- [1] 史哲,马平,张晓科,等. 基坑支护中锚杆预应力损失机理分析[J]. 分析研究, 2006, 1(1): 34-37.
- [2] 李京剑,郑百林,徐春雨. 边坡预应力锚杆蠕变的数值分析[J]. 力学季刊, 2007, 28(1): 124-128.
- [3] 张秀丽,焦玉勇,刘泉声. 非连续变形分析(DDA)方法中的预应力锚杆模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(1): 38-41.
- [4] 曾德荣,李霖. 预应力锚杆背拉结构的力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 76-80.
- [5] 张建龙,胡辉,尹敬泽. 预应力锚杆在张拉锁定时的应力损失问题[J]. 施工技术, 2001, 30(1): 24-25.
- [6] 谷拴成,邵红旗,魏效农. 预应力岩石锚杆锚固段应力分布模式分析[J]. 探矿工程, 2008, 11.
- [7] 林玮,李巨文. 预应力锚杆(索)框架梁加固边坡的仿真试验分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 109-112.
- [8] 吴佳晔,安雪晖,田北平. 混凝土无损检测技术的现状和进展[J]. 四川理工学院学报:自然科学版, 2009, 22(4): 4-7.

Numerical Simulation and Test Comparison on the Non-destructive Testing Methods of Prestressed Bolt Tension

TIAN Bei-ping¹, MAO Li-sheng¹, LIU Wen-fang¹, HUANG Bo-tai

(1. School of Architecture Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China;

2. Sichuan Central Inspection Technology Co. Ltd., Chengdu 610045, China)

Abstract: The prestressed bolt tension will gradually reduce in using process, in order to solve the above problem, the author has established the relationship model between bolt tension and calculating frequency through considering excellent frequency and power frequency of the bolt system and using the string vibration theory. The relationship between bolt tension and calculating frequency through the numerical simulation and experimental approach is proved, finally, non-destructive testing method which can calculate bolt tension according to calculating frequency is proposed.

Key words: non-destructive testing; bolt tension; calculate frequency; prestressed bolt