

文章编号: 1006-4710(2011)03-0350-05

深基坑预应力锚索支护监测数据分析与研究

朱训国^{1,2}, 杨庆³

(1. 大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622; 2. 大连大学 复杂结构系统灾害预测与控制
辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116622; 3. 大连理工大学 岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为深入研究基坑支护预应力锚索的锚固机理和锚固效果, 根据预应力锚索弹性状态下的变形, 建立了预应力锚索弹性状态下的变形解析力学模型。按照国家规范对大连奥海大厦 1 号楼深基坑支护预应力锚索进行了试验检测, 对预应力锚索锚固效果进行了评定。在此基础上, 通过模型计算结果和实测结果的对比, 验证了计算模型的正确性。

关键词: 基坑支护; 预应力锚索; 现场监测; 理论分析

中图分类号: TU472 **文献标志码:** A

The Study and Analysis of Monitoring Data for Pre-Stressed Anchorage in Foundation Excavation Reinforcement Engineering

ZHU Xunguo^{1,2}, YANG Qing³

(1. College of Architectural Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. Provincial Key Laboratory for Disaster Predicting and Controlling of Complex Structural System, Dalian University, Dalian 116622, China; 3. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study anchorage mechanism and anchorage effect upon the foundation excavation reinforcement pre-stressed anchor, the deformation analytical mechanical model in the case of pre-stressed anchor elastic state is established in accordance with the deformation under pre-stressed anchor elastic state. In accordance with national specifications, the testing monitoring is made of the pre-stressed anchorage in foundation excavation reinforcement of No. 1 Aohai Building in Dalin, and the anchorage effect of the pre-stressed anchor is evaluated, on the basis of which the correctness of calculation model is tested via the comparison of the results calculated by the model with those from the real tests.

Key words: foundation excavation reinforcement; pre-stressed anchor; in-site monitoring; theory analyzing

随着国民经济的快速发展, 城市基建规模不断扩大, 基坑工程项目愈来愈多。自 20 世纪 90 年代初预应力锚索技术被引用到城市深基坑支护以来, 该技术已在全国各地推广使用。该支护方式具有施工简便、安全和经济等优点, 已成为一种较成熟的支护结构形式。预应力锚索通过尽可能少地扰动被锚固岩土体, 由锚固在稳定岩土体中的锚固段提供预应力, 增强土体的锚固强度, 改善岩土体应力状态, 从而提高岩土体稳定性。一方面, 由于预应力的作用, 使岩土体结构面呈压紧状态, 从而提高岩土体本

身的整体性; 另一方面, 锚索的加固预应力直接改变了滑动面的抗滑力, 使边坡得以加固、稳定。因该技术具有先进性、经济性、可靠性等优点, 近年来已经在众多基坑支护工程中得到了广泛的应用^[1-7]。

本研究通过具体工程实例, 对预应力锚索在基坑支护的应用方面进行了研究, 重点对预应力锚索的拉拔力与锚索自由段的伸长量之间的关系进行分析, 以确定锚索的极限拉拔力是否满足设计要求。同时, 对此问题进行理论和数值分析, 对比分析结果, 探究预应力锚索支护机理。

收稿日期: 2011-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979013); 中国博士后科学基金资助项目(20090451269)。

作者简介: 朱训国(1974-), 男, 山东淄博人, 博士, 研究方向为地下工程锚固支护。E-mail: zhu_xunguo@hotmail.com。

1 预应力锚索弹性变形计算模型

一般情况下预应力锚索的塑性变形很小,可忽略不计,通过对锚索的预张拉可基本消除接触间隙的影响,因此锚索的总位移量 S 可以用锚索自由段的弹性变形 S_1 、锚索锚固段的拉伸变形 S_2 和锚索锚固段与周围土体间的相对剪切位移 S_3 来表示为:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (1)$$

1.1 自由段的弹性变形

由于锚索自由段受到的拉力就是张拉荷载,因此,由虎克定律可得:

$$S_1 = \frac{PL_f}{E_f A_f} \quad (2)$$

式中, L_f 为锚索的自由段长度; P 为锚索所受的张拉荷载; A_f 为锚索的截面积; E_f 为锚索的弹性模量。

1.2 锚固段的拉伸变形

在张拉荷载较小时,可将锚固段的拉伸变形视为弹性变形。由于锚固段锚索与周围土体的摩擦阻力分布不均匀,假设锚索锚固段的轴向拉力沿锚固段长度方向呈抛物线分布,设锚索锚固段前端受到的轴向拉力为 P ,其中:

$$P_x = P(x/L_m)^2$$

式中, L_m 为锚固段段长度、 P 为锚索所受的张拉荷载,末端受到的轴向拉力近似为 0,其受力状态如图 1 所示。

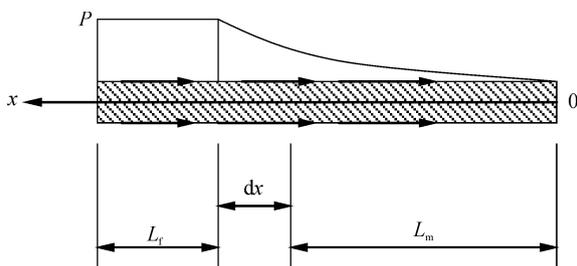


图 1 锚索所受轴力分布图

Fig. 1 Distribution of the axial force along the anchorage

利用虎克定律,通过对 x 处 dx 长度微段锚索的变形积分,可以得到锚固段的拉伸变形计算公式为:

$$S_2 = \frac{PL_m}{3E_a A_a} \quad (3)$$

式中, A_a 为锚固段的截面积; E_a 为锚固段的有效弹性模量, $E_a = \frac{E_f A_s + E_c A_c}{A_f + A_c}$ 。 E_f 、 E_c 分别为钢筋和锚索浆体的弹性模量; A_f 、 A_c 分别为钢筋和锚索浆体的截面积。

1.3 锚固段与土体的相对剪切位移

文献[8] 根据锚固段与岩土体之间的相对剪切

位移的基本假定,认为二者之间符合双曲线形式,建立了相对位移方程,根据边界条件得到了锚固段总的剪切位移值为:

$$S_3 = \frac{8P \exp\left(\frac{\mu}{D} L_m\right)}{\pi D E_a \mu \left[\exp\left(\frac{2\mu}{D} L_m\right) - 1 \right]} \quad (4)$$

式中, $\mu = \sqrt{\frac{4G_s}{\pi E_a}}$ (G_s 为锚固段与锚固层界面的剪切模量,物理意义是在单位长度的锚索表面上,由单位剪切位移产生的剪力); D 为锚固段直径,即钻孔直径。

从上述的分析可知,当锚索处于工作状态(即它处于弹性状态)时,其总位移量为:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = P \left(\frac{L_f}{E_f A_f} + \frac{L_m}{3E_a A_a} \right) + P \left(\frac{8 \exp\left(\frac{\mu}{D} L_m\right)}{\pi D E_a \mu \left[\exp\left(\frac{2\mu}{D} L_m\right) - 1 \right]} \right) \quad (5)$$

简单改变上式,可以得到 P - S 之间的关系:

$$\frac{P}{S} = \frac{1}{\left(\frac{L_f}{E_f A_f} + \frac{L_m}{3E_a A_a} \right) + \left(\frac{8 \exp\left(\frac{\mu}{D} L_m\right)}{\pi D E_a \mu \left[\exp\left(\frac{2\mu}{D} L_m\right) - 1 \right]} \right)} \quad (6)$$

式(6)表明,一旦确定了锚索的材料性质和几何条件,通过 P - S 曲线求得锚索产生单位位移所需拉拔力后,即可反算求得 μ 和 G_s 。或者通过计算 μ 和 G_s 得到锚索的 P - S 曲线。

2 工程实例的分析研究

2.1 工程实例概况

大连奥海大厦 1 号楼,地上建筑 30 层,地下 2 层,基坑深度 8 m,支护结构形式为预应力锚索/锚喷混凝土支护体系。锚索采用 2 束 7Φ5 钢绞线,长度 9~12 m,自由段长度 5.0~6.0 m,锚固段长度 4.0~6.0 m。轴向受拉承载力设计值 300 kN,设计数量 129 根;岩石防护锚索长度 5.0 m 采用 1Φ25 全粘结锚索,轴向受拉承载力设计值 140 kN。

该建筑场地基坑支护范围内的基本地质情况如下,地层总体分为三层,分别为杂填土、粘土,以及岩石风化层。岩石风化层又进一步分为全风化、强风化、中风化岩层,具体情况为:

- 1) 杂填土:杂色,松散,含碎石、砖块、混凝土块、粘土。厚度 0.5~2.10 m,层底标高 7.01~9.90 m;
- 2) 粘土:红棕色,湿,可塑,质地较均匀,干强度

较大, 摇震无反应, 含铁锰结核及强风化板岩碎石。该层分布局限。层厚 0.90 ~ 2.00 m, 层底标高 5.80 ~ 7.25 m;

3) 板岩: 粘土层下卧一定厚度的板岩, 由于地质作用, 板岩的类型主要有全风化板岩、强风化板岩, 以及中风化板岩, 其基本地质情况如下所述。

i) 全风化板岩: 黄褐色, 结构结构强烈破坏, 岩芯层碎屑状, 属极软岩, 极破碎, 岩体基本质量等级为 V 级, 该层分布局限。层厚 0.40 ~ 0.70 m, 层底标高 5.10 ~ 7.55 m;

ii) 强风化板岩: 黄褐色, 结构构造不清晰。岩芯呈碎屑状、片状, 属极软岩, 极破碎, 岩体基本质量等级为 V 级, 风化不均匀。层厚 0.40 ~ 6.30 m, 层底标高 0.25 ~ 7.98 m;

iii) 中风化板岩: 灰褐色, 泥质结构, 层状结构。岩芯层块状, 短柱状, 属软岩破碎, 岩体基本质量等级为 V 级, 风化不均匀。最大揭露厚度 21.40 m, 层底标高 - 14.50 ~ 2.63 m。

2.2 锚索拉拔试验方法与原理

为了验证锚索所提供的拉拔力, 尤其是极限拉拔力是否满足设计要求, 对其中 1#、2#、3# 锚索分别进行了试验检测。检测的内容为锚索拉拔力与伸长量关系。所有检测严格按照《锚杆喷射混凝土支护技术规范》(GB 50086—2001)^[6] 和《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330—2002)^[7] 等国家技术规范进行。

实验锚索为 2 束 7Φ5 钢绞线, 钻孔直径 130 mm, 钻孔深度 12 m, 自由段长度 6.0 m 锚固段长度 6.0 m。拉拔试验设备与施工设备相同。穿心千斤顶在油泵作用下, 活塞伸长, 施加反力于锚索。利用应变仪及传感器测定锚索所受拉拔力。同时使用百分表测量锚索伸长量。本次试验原理和方法采用国家规范中的相关规定^[6-7], 通过张拉试验, 分析拉拔力与锚索弹性变形之间的关系, 检验锚索是否达到和满足设计要求。锚索拉拔力分级见表 1。

表 1 拉拔力分级表

Tab. 1 The classification table of anchorage tension forces

| 拉拔力分级 | 拉拔力/N | 锚索拉拔力/kN |
|-------|--------------------|----------|
| 1 | 0.3N _t | 90 |
| 2 | 0.5N _t | 150 |
| 3 | 0.75N _t | 225 |
| 4 | 1.0N _t | 300 |
| 5 | 1.2N _t | 360 |
| 6 | 1.33N _t | 400 |
| 7 | 1.5N _t | 450 |

2.3 试验结果分析

试验过程中荷载每增加一级, 均稳定 5 ~ 10

min, 并记录锚索伸长量。最后一级荷载维持 10 min, 锚索伸长量 5 ~ 10 min 内, 位移量超过 0.1 mm, 则延长观测时间至 60 min。从 0.5 倍拉力设计直到最大试验荷载之间所测得的总伸长量, 应当超过该荷载范围自由段预应力锚索理论弹性伸长量的 80%, 并小于自由段与 0.5 倍锚固长度之和的预应力锚索理论弹性伸长量。各级荷载下锚索具体弹性伸长量数值见表 2。

表 2 锚索理论弹性伸长量表

Tab. 2 The table of theory elastic elongation for anchorage

| 拉拔力/kN | 自由段伸长量/mm | 0.8 倍自由段伸长量/mm | 最大伸长量/mm |
|--------|-----------|----------------|----------|
| 90 | 9.9 | 7.92 | 14.85 |
| 150 | 16.5 | 13.2 | 24.75 |
| 225 | 24.75 | 19.8 | 37.13 |
| 300 | 33 | 26.4 | 49.5 |
| 360 | 39.6 | 31.68 | 59.4 |
| 400 | 44 | 35.2 | 66 |
| 450 | 49.5 | 39.6 | 74.25 |

各级荷载下锚头位移稳定且本级荷载锚头位移增量小于前一级荷载产生位移增量的 2 倍。各级荷载下锚索伸长量具体数值见表 3。

表 3 实测锚索伸长量与荷载关系表

Tab. 3 The relationship between elongation for anchorage and the tension forces

| 拉拔力/kN | 1# 锚索伸长量/mm | 2# 锚索伸长量/mm | 3# 锚索伸长量/mm |
|--------|-------------|-------------|-------------|
| 90 | 11.2 | 12.4 | 11.8 |
| 150 | 15.6 | 15.7 | 16.1 |
| 225 | 20.3 | 21.6 | 22.9 |
| 300 | 28.3 | 27.8 | 28.9 |
| 360 | 37.5 | 36.9 | 37.8 |
| 400 | 41.5 | 42.9 | 43.8 |
| 450 | 54.8 | 55.7 | 56.2 |

根据表 3 中所得的试验数据, 可以得到三根试验锚索伸长量与拉拔力之间的关系曲线, 如图 2、3、4 所示。

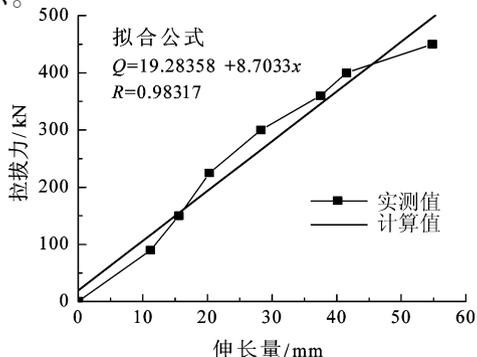


图 2 1# 锚索拉拔力与伸长量关系图

Fig. 2 The relationship between 1# anchorage elongation and tension force

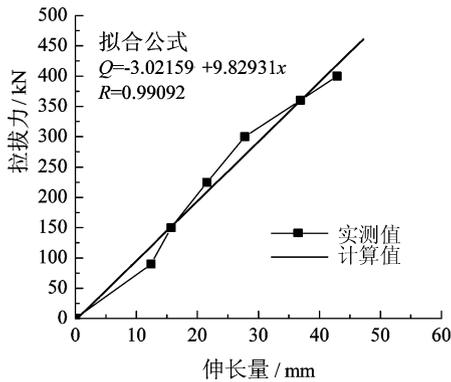


图3 2#锚索拉拔力与伸长量关系图

Fig. 3 The relationship between 2# anchorage elongation and tension force

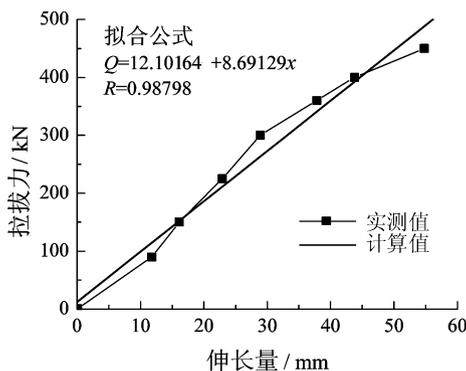


图4 3#锚索拉拔力与伸长量关系图

Fig. 4 The relationship between 3# anchorage elongation and tension force

从上述表格和图形结果来看,在最大拉拔力450 kN的拉拔实验过程中,拉拔力与锚索伸长量呈线性变化,锚索伸长量稳定且符合规范要求。锚索极限拉拔力不小于450 kN,满足锚索轴向受拉承载力设计值300 kN的要求。

2.4 试验结果与计算结果对比分析

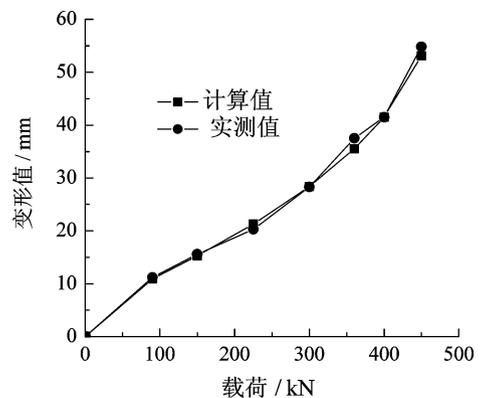
根据上述试验结果,可得1#、2#、3#锚索的 P/S 分别为:8.70 kN/mm、9.83 kN/mm、8.69 kN/mm。已知锚索的结构尺寸为: $L_t = L_m = 6$ m,钻孔直径 $D = 130$ mm,横截面积 $A = 132.7$ cm²;锚索的弹性模型 $E_t = 2.0 \times 10^5$ MPa,横截面积 $A_t = 2.75$ cm²;注浆体的弹性模量 $E_c = 2.0 \times 10^4$ MPa,横截面积 $A_c = 129.96$ cm²。锚固体的等效弹性模量 $E_a = 2.4 \times 10^4$ MPa。通过反算可以求得锚索1#、2#、3#的 μ 分别为 2.92×10^{-4} 、 2.93×10^{-4} 、 2.89×10^{-4} ,相应的 G_s 分别为5.50 MPa、5.52 MPa、5.45 MPa。

以1#锚索为研究对象,分别对其 S_1 、 S_2 、 S_3 进行计算,对比计算结果与实测结果之间的差异,验证本研究分析模型的正确性(见表4,图5)。

表4 锚索实测变形与计算变形的对比表

Tab. 4 The results of the measured and the computed

| 受拉载荷 P/kN | 变形计算值 S/mm | 实测值 S'/mm | 相对误差 % |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 90 | 10.9 | 11.2 | -2.68% |
| 150 | 15.3 | 15.6 | -1.92% |
| 225 | 21.3 | 20.3 | 4.93% |
| 300 | 28.4 | 28.3 | 0.35% |
| 360 | 35.5 | 37.5 | -5.33% |
| 400 | 41.5 | 41.5 | 0 |
| 450 | 53.1 | 54.8 | -3.10% |

图5 实测与计算之 $P-S$ 曲线Fig. 5 The $P-S$ curve between monitored and computed

从图5的拟合结果来看,实测值与计算值非常的接近的,总体误差也是完全可以接受的。说明本文所建立的计算模型是合理正确的。

3 结论

1) 通过锚索拉拔设施对基坑预应力锚索进行了张拉监测,得到了 $P-S$ 曲线,根据国家规范,说明锚索的作用效果达到了设计要求;

2) 通过对锚索弹性状态下的应变分析,建立了锚索弹性状态下的 $P-S$ 方程,对比计算和实测结果,说明本研究的计算是正确合理的。

参考文献:

- [1] 李宁,赵彦辉,韩焯. 单锚的力学模型与数值仿真试验分析[J]. 西安理工大学学报,1997,13(1):6-12.
Li Ning, Zhao Yanhui, Han Xuan. An analysis of single-bolt mechanical model and numerical simulation test[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 1997,13(1):6-12.
- [2] 刘志国,王立帮,孙云天. 预应力锚固技术在丰满大坝加固工程中的应用[J]. 水利水电技术,2000,31(10):36-38.
Liu Zhiguo, Wang Libang, Sun Yuntian. Application of pre-

- stressed anchorage technology to Fengman dam reinforcement engineering [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2000, 31(10):36-38.
- [3] 刘世锋. 预应力锚索在何群峡段危岩体整治工程中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(增2):2734-2737.
Liu Shifeng. Application of prestressed anchor cable to control engineering of unstable rock mass in Hequnxia experimental section[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(Supp. 2):2734-2737.
- [4] 涂心彦, 赵九江. 预应力锚索支护在治理软岩巷道破坏中的应用[J]. *矿山压力与顶板管理*, 2002, 19(3):41-42.
Tu Xinyan, Zhao Jiujiang. Using prestressed cable to support soft surrounding rock roadway [J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 2002, 19(3):41-42.
- [5] 刘天化. 预应力锚索边坡加固实践[J]. *金属矿山*, 2003, (11):64-66.
Liu Tianhua. Prestressed anchor cable practice in slope reinforcement[J]. *Metal Mine*, 2003, (11):64-66.
- [6] 冶金部建筑研究总院, GB50086—2001, 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2001.
- [7] 重庆市建设委员会, GB 50330—2002, 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] 邹金锋, 李亮, 阮波. 弹性状态下锚杆位移变形分析[J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(5):94-96.
Zou Jinfeng, Li Liang, Ruan bo. The deformation analyzing of rock bolt under elastic condition [J]. *Chinese Railway Science*, 2004, 25(5):94-96.

(责任编辑 李虹燕)

简讯

西安理工大学主持的国家数控机床重大专项通过鉴定

9月7日,陕西省科技厅组织对我校主持的国家数控机床科技重大专项课题“结合面特性数据库和考虑结合部耦合特性的机床整机性能预测集成软件系统”进行了科技成果鉴定。我校罗兴镒副校长代表学校对参加鉴定会的领导和专家表示欢迎,并介绍了学校教学和科研的相关情况。

由清华大学王立平教授任主任委员,中国机床工具工业协会名誉理事长于成廷和西北工业大学副校长王润孝教授任副主任委员的鉴定委员会认真听取了课题组的工作报告、技术报告、用户及查新报告,仔细审阅了课题相关资料,并对开发的实验装置进行了现场考察,经过质询、评议,一致认为:课题研究成果具有创新性,总体水平国际先进,主要成果在国际上具有原创性。

(摘自西安理工大学新闻网 2011-09-09)