

# 预应力锚杆柔性支护法在超深基坑中的实践

贾金青，涂兵雄\*

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室，大连 116024)

**摘要：**在岩质超深基坑中，预应力锚杆柔性支护法具有非常明显的优势，该方法造价低，工期短，施工简便，安全性好，具有较好的经济效益和社会效益。以远洋大厦超深基坑工程为背景，详细介绍了一套预应力锚杆柔性支护法设计方案，该方案的成功应用为岩质地层的超基坑支护工程提供了很好的借鉴作用。

**关键词：**预应力锚杆；超深基坑；岩质地层

中图分类号：TU473 文献标识码：A 文章编号：1000-4548(2012)S0-0530-06

**作者简介：**贾金青(1962-)，男，教授，博士生导师，主要从事深基坑与高边坡支护技术及理论方面的研究工作。E-mail: keyknown@163.net。

## Application of flexible retaining method with prestressed anchors in ultra-deep excavations

JIA Jin-qing, TU Bing-xiong

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** The flexible retaining method with prestressed anchors for ultra-deep excavations in from rocky soil has obvious advantages: low cost, quickness, convenient in construction, great safety performance and good economic and social benefits. A detailed design for the flexible retaining method with prestressed anchors in the ultra-deep excavation of Yuanyang is introduced. The successful application of the design method provides guidance for the supports of ultra-deep excavations in rocky soil.

**Key words:** prestressed anchor; ultra-deep excavation; rocky soil

## 0 引言

预应力锚杆柔性支护法<sup>[1-3]</sup>是主要应用于基坑和边坡支挡的一种新型技术，它是由按一定设计间距布置的许多小吨位预应力锚杆(或锚索)、特殊的锚下承载结构以及喷射混凝土面层或木板面层组成的一种柔性支护方法。通过对所有锚杆施加预应力，可以在基坑主动变形区产生强大的压应力区，不仅大大改善了基坑的受力状态，还可有效控制基坑的坑壁位移。因此，预应力锚杆柔性支护法特别适用于位移控制要求严格的基坑及超深基坑的支护，尤其适合于岩质超深基坑工程。

但是，目前在超深基坑支护设计方案中，一般多采用连续墙+锚杆支撑(内支撑)<sup>[4]</sup>，支护桩+内支撑(或锚杆支撑)<sup>[5-6]</sup>等整体刚度大且有利于控制变形的刚性支护方案。对于岩质超深基坑而言，如果仍采用这类刚性支护方案将会面临许多问题。如钻孔灌注桩或连续墙在中风化及微风化岩层中采用机械成孔时，则成孔比较困难且施工进度缓慢；采用人工挖孔时，则需要爆破成孔，不仅施工进度缓慢，而且爆破振动

还容易对周边环境产生不利影响，这都会大大延长基坑工程的施工工期。另外，超深基坑中的支护桩和连续墙相对都比较长，支护费比较高。而其他传统支护方案，如土钉支护，则又受基坑支护深度的限制，用于超深基坑不仅不能有效控制基坑变形，还存在重大安全隐患。

因此，与传统的桩锚支护及地下连续墙支护等刚性支护相比，预应力锚杆柔性支护法具有以下优点：  
①造价低：预应力锚杆柔性支护使用的材料(包括混凝土和钢材)非常少，工程经验表明，预应力锚杆柔性支护的工程造价仅约为桩锚支护的三分之一；  
②工期快：传统的桩锚支护或地下连续墙支护一方面需要在基坑开挖前进行支护桩和连续墙的施工，另一方面还需要等待桩身混凝土和连续墙混凝土强度达到一定设计要求后才能进行基坑开挖作业。而预应力锚杆柔性支护法为边开挖基坑边支护，使土石方开挖和基坑支护同步进行，因而大大缩短工期；  
③施工简便：预

应力锚杆柔性支护法所需要的设备主要为钻孔机、喷射机、注浆机以及电焊机等, 这些均为小型施工设备, 操作简便, 施工简单, 而且灵活性较强, 对基坑周边环境干扰较小。④安全性好: 预应力锚杆柔性支护法对每一根锚杆都施加预应力, 在各个工况下对锚杆的张拉过程实际上也是对锚杆施工质量及锚杆抗拔力的检验过程, 期间如发现锚杆存在质量问题可以及时采取补救措施, 从而有效避免潜在的隐患。在使用期间, 由于锚杆数量众多, 单根锚杆承受的荷载相对较小, 个别锚杆失效对基坑的整体影响很小。另外, 锚杆预应力产生的强大压应力场能有效改善基坑侧壁的受力状态, 对控制基坑坑壁的变形起到积极的作用。

目前, 预应力锚杆柔性支护法得到逐步推广和应用, 最经典的成功案例是该法在大连远洋大厦25.6 m超深基坑中的成功实践。

## 1 工程概况

远洋大厦位于大连市中山区友好广场南侧。北邻友好广场和中山路, 西邻一德街, 南邻玉光街, 基坑开挖线均在这三侧的人行步道上, 北近三鑫大厦, 东邻友好小学, 其中友好小学为4层砖混结构建筑, 距基坑开挖线1.7 m。远洋大厦由两栋高层和附设裙楼组成, 其中A座地上49层, B座地上38层, 附设裙楼地上为7层。高楼和裙楼连为一体, 并全部设有4层地下室, 基坑支护深度为25.6 m。其基坑周围的建筑物与基坑位置平面关系基坑开挖平面图如图1所示。

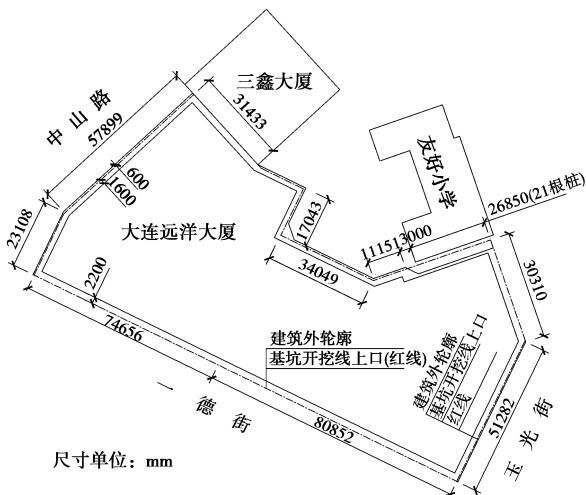


图1 基坑开挖平面图

Fig. 1 Plan view of excavated area

拟建场区无地下水, 场区主要岩土层分布为: ①杂填土: 全场区均有分布。主要由建筑垃圾、碎石、灰渣和部分板岩碎块及少量土组成。层厚0.50~2.00 m。②残积土: 主要分布在基坑南部区域(B座)。以辉绿岩的原岩结构—辉绿结构为主, 但矿物已全风化,

手搓具黏性, 可搓成细条, 局部含有小砾石和强风化辉绿岩块, 岩块呈深褐色, 手可掰碎。层厚1.20~4.00 m。③强风化板岩: 黄色、深黄色, 碎石土状, 碎块块径为4~7 cm、呈棱角状, 碎块表面风化为褐色; 碎块含量40%~70%, 干钻进尺困难。层厚0.30~6.50 m。④中风化板岩: 深黄色、黄褐色, 局部为浅褐色; 板裂结构; 岩体节理裂隙较发育, 岩芯多呈碎块状、短柱状; 岩层产状倾向200°~260°, 倾角40°~62°。中风化板岩在15~22 m深度处相对较破碎, 局部30 m左右岩石较破碎, 且有石英脉发育。⑤微风化板岩: 青灰色、深灰色, 板裂结构, 岩体节理裂隙发育不均匀; 基坑西北角相对较完整, 微风化板岩在40 m以下局部为千枚状板岩, 岩石中有石英脉发育, 岩芯呈饼状、柱状、短柱状。顶板埋深在基坑北部为17.2~35.8 m, 基坑南部为24.5~36.8 m。⑥强风化辉绿岩: 褐色、黄褐色、灰褐色, 块状碎裂结构; 岩芯呈碎块状, 碎块块径4~10 cm; 钻进进尺较慢, 下部岩石变硬; 节理裂隙发育, 岩块表面风化严重, 锤击声较哑, 矿物结晶较小。主要分布在基坑南部区域, 厚度2~18.7 m。⑦中风化辉绿岩: 灰绿色、暗绿色, 块状碎裂结构, 岩芯呈块状、短柱状、钻进进尺困难, 锤击声哑脆, 岩石原结构清晰。主要分布在基坑西南部, 厚度3.60~23.8 m。⑧微风化辉绿岩: 绿色、灰绿色, 块状结构, 节理裂隙不发育, 岩石致密坚硬; 岩芯呈短柱状、柱状, 钻进进尺困难, 本场区仅在基坑南部小范围分布。顶面埋深约16.8 m。

## 2 方案选型

本工程属超深基坑工程, 基坑开挖深度达25.6 m, 且基坑开挖平面周长约500 m, 总支护面积约13000 m<sup>2</sup>。基坑东西南三侧下埋污水管网, 东侧友好小学为4层砖混结构建筑, 距基坑开挖线仅1.7 m。为尽量减小对基坑周边环境的影响, 基坑支护工程要求对基坑的变形进行严格控制。

由于基坑开挖深度大, 基坑中下部下覆中风化和微风化板岩及辉绿岩, 如果采用传统的桩锚支护, 灌注桩采用机械成孔时, 在下覆中风化, 尤其是微风化岩层中成孔会比较困难, 甚至无法成孔, 施工工期长, 并且垂直度难以控制。另外基坑开挖平面周长约500 m, 如果采用灌注桩, 所需灌注桩数量大, 工程造价非常高。

根据本工程自身特点, 并综合考虑基坑工程施工的安全性、施工的便捷性、施工工期及工程造价等因素, 结合以往基坑工程的成功实践经验(如附近的大连胜利广场采用预应力锚杆柔性支护法支护基坑深度



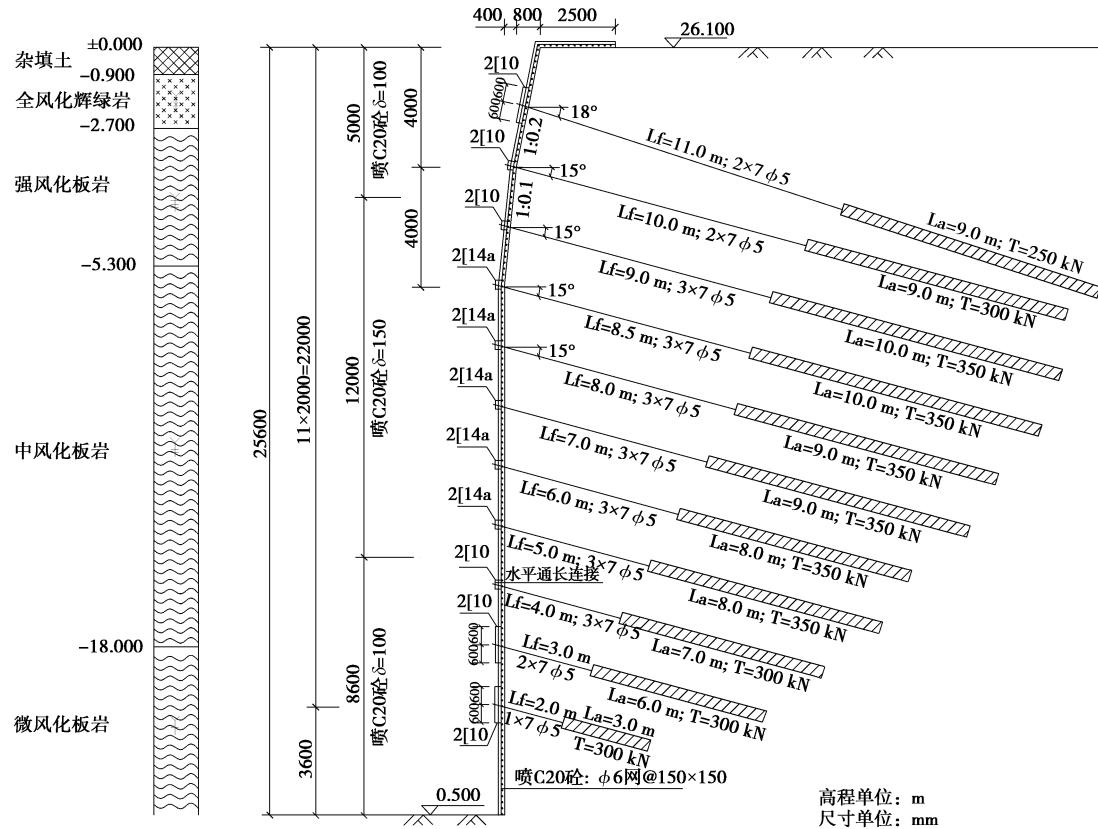


图 2 基坑支护典型剖面图

Fig. 2 Typical section of retaining for foundation excavation

达22.2 m), 在本基坑工程中整体采用预应力锚杆柔性支护法设计方案: 地面下0~4.0 m采用1:0.2放坡, 4.0~8.0 m采用1:0.1放坡, 8.0 m以下垂直开挖至基坑底部, 基坑至上而下共设置11排预应力锚杆, 锚杆长度为5.0~20.0 m, 坚向间距2.0 m, 水平间距1.6 m, 锚杆钻孔孔径130 mm, 注浆采用M25水泥砂浆, 锚杆采用高强度低松弛钢绞线, 在基坑坡面绑扎Φ6钢筋网, 间距150 mm×150 mm, 并喷射C20混凝土, 混凝土面层厚度为100~150 mm, 锚下承载结构采用10号槽钢和14号槽钢, 锚杆通过锚下承载结构与喷射混凝土面层连接, 第1排、10排、11排锚杆的锚下承载结构竖向设置, 长度1.2 m, 其余各排锚杆的锚下承载结构均水平排列并通长连接, 该支护方案的典型支护剖面如图2所示(图中T为锚杆预应力设计值), 基坑开挖效果图如图3所示。

### 3 锚下承载结构及喷射混凝土面层计算

本文主要对锚下承载结构和喷射混凝土面层的计算进行分析讨论。

#### 3.1 锚下承载结构

预应力锚杆由于承载力较大, 容易在锚头产生较大的应力集中, 严重时可能使锚头下部的喷射混凝土

面层结构冲切破坏, 进而影响基坑的稳定性。因此预应力锚杆锚头下的承载结构必须得到有效的处理。

预应力锚杆柔性支护法的锚下承载结构主要由型钢、垫板及加劲肋等组成。型钢可使用槽钢或工字钢, 加劲肋通常采用钢板条或螺纹钢等。原材料出厂经检测验收合格后, 可根据设计图纸要求的类别、型号、尺寸进行切割加工及组装。通常做法为两段槽钢腹部相对, 在两段槽钢翼缘外面用垫板连接在一起, 在翼缘内部主要受力点设置加劲肋, 槽钢腹部相对间距、垫板与两段槽钢翼缘连接部位、垫板中间开孔尺寸以及槽钢翼缘内部加劲肋的位置及数量等均应满足相应锚杆的受力要求。锚下承载结构组装时, 其连接部位的焊接应符合有关规范<sup>[7]</sup>的要求。



图 3 开挖效果图

Fig. 3 Photos of excavation of foundation pit

锚下承载结构安装前应在其放置部位喷射一层混凝土, 喷射混凝土的厚度约为设计厚度的1/2左右, 并在混凝土表面铺设钢筋网, 所喷射混凝土的表面应平整以利于锚下承载结构的安装, 锚下承载结构先在指定位置安装并临时固定, 然后在其周围喷射混凝土至设计厚度, 并用喷射混凝土将槽钢翼缘及槽钢腹板间隙全部喷满。

锚下承载结构的设计可以参照《钢结构设计规范》<sup>[8]</sup>, 本文同时采用有限元软件对锚下承载结构进行了全面的数值模拟分析, 考虑了喷射混凝土对锚下承载结构的3种约束情况: ①不约束, 即锚下承载结构放置于喷射混凝土上面; ②半喷, 即锚下承载结构翼缘一半的高度埋设于喷射混凝土面层下面; ③满喷, 即锚下承载结构翼缘全部高度埋设于喷射混凝土面层下面。锚下承载结构模拟图如图4所示。

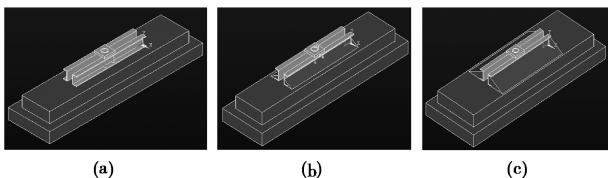


图4 锚下承载结构模拟图

Fig. 4 Simulation images of bearing structure under anchor head

为便于有限元分析, 钢材、混凝土和岩土体都按弹性材料考虑, 钢材(槽钢、钢垫板和加劲肋)的弹性模量取值为 $2.10 \times 10^5$  MPa, 泊松比取为0.3; 喷射混凝土厚度150 mm, 其弹性模量取为 $2.1 \times 10^4$  MPa, 泊松比取为0.2; 岩土体厚度150 mm, 其弹性模量为300 MPa, 泊松比取为0.25。槽钢与加劲肋的抗压强度为215 MPa, 钢垫板厚度20 mm; 喷射混凝土型号为C20, 其轴心抗压强度为10 MPa。有限元模拟分析图如图4所示。10号槽钢和14a号槽钢在上述3种情况下的模拟极限承载力分别为290, 350, 420, 340, 405, 485 kN。实际喷射情况在半喷和满喷之间, 均满足实际工程需要。

为便于工程应用, 笔者还对由不同型号槽钢组成的锚下承载结构的承载力进行了计算分析, 得出了相应的极限承载力, 具体如表1所示。表1中选用槽钢间距为60mm, 钢垫板为150 mm×150 mm, 厚20 mm, 加劲肋钢筋直径不低于20 mm, 喷射混凝土面层强度等级为C20。

### 3.2 喷射混凝土面层

预应力锚杆柔性支护法中, 锚杆作用力通过锚下承载结构及锚下岩土体逐渐向基坑内侧扩散传递, 由于锚下承载结构为双拼槽钢钢结构构件, 与岩土体接触并承压的面积较小, 因此, 锚杆作用力下的压缩区

范围有一定的限制, 而在相邻锚杆间的岩土体, 由于侧壁不受锚下承载结构作用力的约束, 可以认为其自身稳定性主要依靠自身岩土体的强度以及其与压缩区接触面的抗力来维持。另外, 由于开挖卸荷导致相邻锚杆间的岩土体侧壁出现应力释放, 其侧壁也会向基坑临空面侧产生变形, 如果变形过大可能出现局部坍塌, 有可能掏空锚下承载结构下的压缩区, 进而导致锚杆失效危及基坑的整体稳定性。因此, 需要对基坑侧壁进行约束, 通常采用喷射混凝土面层并内置钢筋网(有时也可以采用木板面层)。规范<sup>[9]</sup>规定, 喷射混凝土面层钢筋网钢筋直径宜为6~10 mm, 间距宜为150~300 mm, 面层厚度不宜小于80 mm。尽管目前喷射混凝土面层的钢筋选取及厚度一般按照构造在选取, 但是当支护面积较大时, 钢筋的密间距, 大直径及厚面层可能造成工期延长并增加造价; 而钢筋的疏间距, 小直径及薄面层又可能造成面层开裂, 或变形过大, 从而导致基坑变形过大并危及基坑整体稳定。综合考虑基坑工程的工期、造价及安全性, 有必要对喷射混凝土面层进行设计计算。笔者通过考虑预应力锚杆间的土拱效应, 得出了作用在预应力锚杆柔性支护法中喷射混凝土面层上土压力的简便算法<sup>[10]</sup>:

$$\sigma = \frac{\gamma l \tan(45^\circ - 0.5\varphi)}{6 \tan \varphi} \quad (1)$$

式中  $\sigma$  为作用在喷射混凝土面层上的土压力;  $\gamma$  为岩土体重度;  $l$  为锚杆的计算间距, 当锚下承载结构水平向设置时取竖向间距, 竖向设置时取水平间距;  $\varphi$  为岩土体内摩擦角。工程实践表明, 采用式(1)计算作用在喷射混凝土面层上的土压力并进行面层厚度及配筋简便可行。

表1 锚下承载结构极限承载力

Table 1 Maximum bearing capacity of bearing structure under anchor head

| 槽钢     | 极限承载力/kN |     |     |
|--------|----------|-----|-----|
|        | 不约束      | 半喷  | 满喷  |
| [10]   | 290      | 350 | 420 |
| [12.6] | 315      | 380 | 450 |
| [14b]  | 350      | 420 | 500 |
| [16b]  | 380      | 460 | 550 |
| [18b]  | 420      | 500 | 600 |

## 4 锚杆预应力对基坑的影响

预应力锚杆柔性支护法中的锚杆预应力大小对基坑的变形、塑性区发展及稳定性有显著的影响, 锚杆预应力的存在, 可以减小基坑壁位移, 约束岩土体的滑动, 减小岩土体的剪切变形, 还可以延缓岩土体塑性区的发生, 缩小潜在滑移区的范围。笔者采用FLAC程序对基坑进行了数值模拟分析<sup>[11]</sup>, 得出了不同锚杆预应力大小对基坑塑性区和变形的影响, 分别如

图5~7所示。

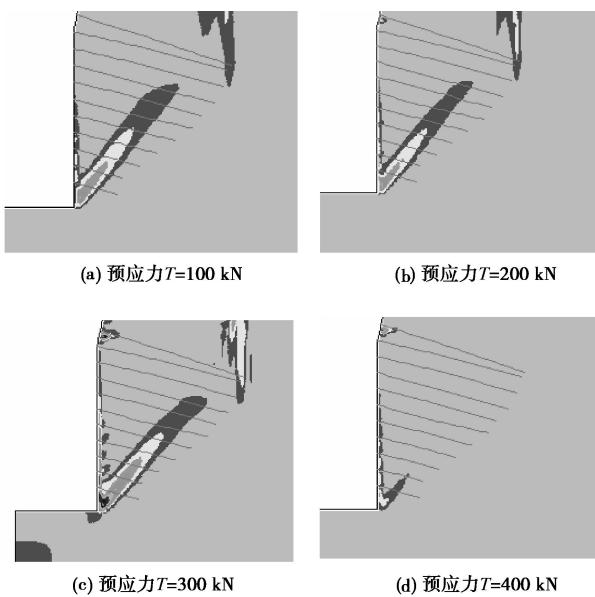


图 5 锚杆预应力对基坑塑性区的影响

Fig. 5 Effects of anchor prestress on plastic zone

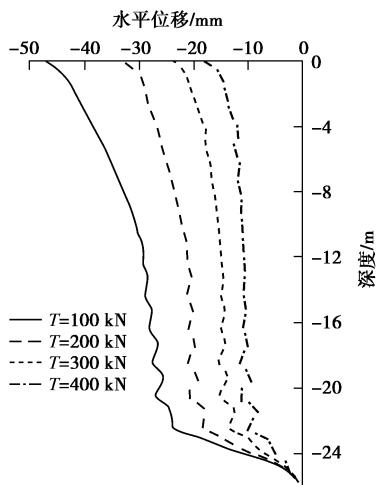


图 6 锚杆预应力对基坑水平位移的影响

Fig. 6 Effects of anchor prestress on horizontal displacement

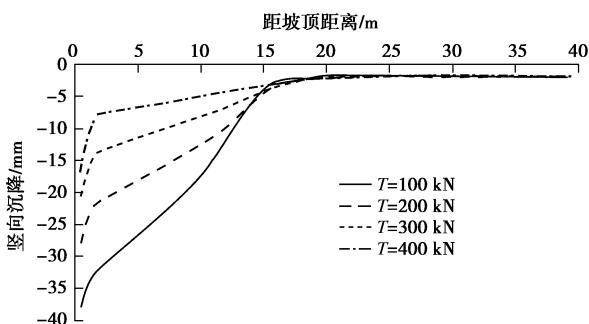


图 7 锚杆预应力对基坑竖向沉降的影响

Fig. 7 Effects of anchor prestress on vertical settlement

从图5中可以看出,随着锚杆预应力的增加,基坑潜在滑移面上剪切应变减小,滑移区变小,当预应力

施加到400 kN时,滑移区大范围消失,只在基坑底部小范围存在。因此,锚杆的预应力可以缩小于基坑岩土体塑性区的范围,延缓或阻止岩土体潜在滑动区的出现。从图6和图7可以看出,基坑水平位移和竖向沉降整体都随锚杆预应力的增加而减小,数值分析结果表明预应力为100, 200, 300, 400 kN时,在坡顶对应的最大水平位移为47.18, 33.25, 24.06, 18.42 mm, 对应的最大竖向沉降为37.66, 27.04, 20.00, 15.76 mm。工程实际监测该基坑最大水平位移为28.7 mm,为基坑开挖深度的1.12%,满足规范要求,且实测基坑水平位移在基坑开挖完毕3个月后趋于稳定。需要注意的是,实际工程中大部分锚杆设计的预应力锁定值主要为300, 350 kN(如图2所示),而实际监测的最大水平位移是28.7 mm,约为锚杆按280 kN预应力进行数值模拟得到相应最大位移。产生这种差别的主要原因是锚杆施工后,不可避免的存在预应力损失,使得锚杆实际的预应力水平要小于设计值。另外,数值模拟选取的材料模型均为理想的弹性模型,与实际工程可能存在一定的差别,这也可能是实际监测值略大于数值模拟值的另一原因。综合分析考虑,实际监测最大水平位移与数值模拟值整体上还是比较吻合的。另外,基坑竖向沉降主要影响区主要分布在距离基坑坡顶约15 m范围内,约为基坑开挖深度的0.59倍。

## 5 结语

远洋大厦深基坑开挖深度为25.6 m的超深基坑工程,根据工程的自身特点,从加快施工进度和节省工程造价的角度出发,采用预应力锚杆柔性支护法对该超深基坑进行支护,并得到了成功实践,较好地完成了基坑支护任务。数值分析和实测资料结果表明,锚杆预应力能有效地控制基坑塑性区的发展,对水平位移和竖向沉降能起到很好的控制作用。实测该基坑最大水平位移为28.7 mm,仅为基坑开挖深度的1.12%,满足规范要求。

预应力锚杆柔性支护法具有造价低、工期短、施工便捷、安全性好等优点,是一种能较好地适用于深基坑及超深基坑(尤其是岩质超深基坑)的支护技术。该法自提出并成功应用于远洋大厦超深基坑后,仅在大连地区便成功应用了几百项深基坑及超深基坑支护项目,取得了巨大的经济效益和社会效益。因此,预应力锚杆柔性支护法值得大力推广。

## 参考文献:

- [1] 贾金青.预应力锚杆柔性支护法研究[D].北京:清华大学, 2003. (JIA Jin-qing. Research on the flexible retaining

- method with prestressed anchor[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese))
- [2] 一种基坑侧壁的柔性支护方法: 中华人民共和国, 02130834.9[P]. 2004. (A flexible retaining method for the side of foundation pit. PRC:02130834.9[P]. 2004. (in Chinese))
- [3] 贾金青. 深基坑预应力锚杆柔性支护法的理论与实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (JIA Jin-qing. Theory and application on prestressed anchor flexible retaining method for deep excavation[J]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese))
- [4] 杨生彬, 王晓义, 朱艳艳. 北京市某深基坑支护工程实录 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 4471 - 4476. (YANG Sheng-bin, WANG Xiao-yi, ZHU Yan-yan. Engineering case of a deep foundation pit supporting in beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4471 - 4476. (in Chinese))
- [5] 王旭军. 上海中心大厦裙房深大基坑工程围护墙变形分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 421 - 431. (WANG Xu-jun. Analysis of retaining wall deformation for deep and big foundation pits of podium in shanghai tower[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 421 - 431.(in Chinese))
- [6] XU Qian-wei, MA Xian-feng, ZHU He-hua, et al. Centrifuge study on ultra-deep foundation pit excavation in soft ground[J]. Geotechnical special publication, Deep foundation and geotechnical in situ testing-proceedings of the 2010 GeoShanghai international conference, 2010, 205: 292 - 299.
- [7] JGJ 81—2002 建筑钢结构焊接技术规程[S]. 2002. (JGJ 81—2002 Technical specification for welding of steel structure of building[S]. 2002. (in Chinese))
- [8] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 2003. (GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. 2003. (in Chinese))
- [9] JGJ 120—99 建筑基坑支护计算规程[S]. 1999. (JGJ 120—99 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 1999. (in Chinese))
- [10] 涂兵雄, 贾金青, 王海涛. 预应力锚杆柔性支护喷射混凝土面层上的土压力[J]. 岩土力学, (录用待刊). (TU Bing-xiong, JIA jin-qing, WANG Hai-tao. Earth pressure on the shotcrete of flexible retaining method with prestressed anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, (accepted). (in Chinese))

(本文责编 孙振远)