

某基坑框架预应力锚杆柔性支护结构的数值模拟分析

周 勇^{1, 2}, 朱彦鹏^{1, 2}

(1. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 框架预应力锚杆柔性支护结构是当前基坑工程中常采用的一种支护方式, 但是对其进行数值模拟分析目前未见报道。结合工程算例, 运用有限元软件 ADINA, 选择合理本构模型, 对某基坑框架预应力锚杆柔性支护结构进行了数值模拟。结果表明: 基坑最终水平位移最大值出现在基坑顶部, 锚杆预应力值和作用位置对坑壁水平位移影响显著; 基坑地表沉降和坑底隆起均随基坑开挖深度的增加而增大; 锚杆轴力随基坑开挖深度增加而增大, 且沿长度方向呈曲线分布, 其最大轴力作用点连线近似于基坑滑移面曲线, 锚杆轴力最大值沿基坑深度方向呈“弓形”分布。数值模拟表明框架预应力锚杆柔性支护结构在深基坑支护工程中控制变形的效果显著, 值得进一步推广应用。

关键词: 岩土工程; 深基坑; 框架预应力锚杆; 柔性支护结构; 位移与内力; 数值模拟

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0260-07

作者简介: 周 勇(1978-), 男, 湖北宣恩人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 国家一级注册结构工程师, 主要从事深基坑开挖支护与边坡加固方面的教学和研究工作。E-mail: gsutzhouy@163.com。

Numerical simulation of grillage flexible supporting structure with prestressed anchors for an excavation

ZHOU Yong^{1, 2}, ZHU Yan-peng^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Engineering Research Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Grillage flexible supporting structure with prestressed anchors is commonly adopted in the projects of deep excavation, but there is no report for its numerical simulation analysis till today. Based on an engineering example, by using the FEM software ADINA and choosing reasonable constitutive models, the numerical simulation for grillage flexible supporting structure with prestressed anchors for an excavation is performed. The results show that the final maximum horizontal displacement appears at the top of excavation, and the prestress values as well as the action positions of the prestressed anchors have significant influences on the horizontal displacement of wall facing. With the increase of excavation depth, the ground surface settlement and the bottom uplift of excavation increase at the same time. The axial forces of anchors increase with the increase of excavation depth, which are on curve distribution along the length direction. The connection line of the points of the maximum axial forces is similar to the slipping surface curve of excavation, and the maximum values of the axial forces of anchors appear bow-shaped distribution along the direction of excavation depth. The numerical simulation shows that the grillage flexible supporting structure with prestressed anchors has obvious effect on the deformation control for deep excavation, and it is worthy of further promotion and application.

Key words: geotechnical engineering; deep excavation; grillage with prestressed anchors; flexible supporting structure; displacement and internal force; numerical simulation

0 引 言

近年来, 随着城市高层建筑和基础设施的大量兴建, 产生了大量深基坑开挖支护和边坡加固工程。因此, 相应地出现了不少新型支护结构形式, 比较典型的有预应力锚杆柔性支护技术^[1]、预应力土钉支护结构^[2]、土钉与预应力锚杆复合支护结构^[3]、框架预应

力锚杆柔性支护结构^[4]等。但是, 目前基坑工程事故频频发生, 分析原因主要有两个: 一是未能根据实际

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978129, 51108221); 兰州理工大学红柳青年教师培养计划项目(Q201108); 兰州理工大学博士科研基金项目(BS04200902)

收稿日期: 2012-08-24

水文地质条件和周边环境条件采取合理的支护方案而导致支护体系失稳;二是基坑开挖引起的周边环境位移的显著改变导致周围建筑物及城市基础设施管线的破坏。另外,由于基坑支护结构无论是从理论计算还是从施工工艺角度看,都较典型的上部结构复杂,因为这涉及到结构与岩土相互作用问题,因此基坑开挖的理论计算难以对支护参数进行系统研究,对支护结构的工作机理进行深入探讨则更加困难,但是采用数值计算方法进行模拟,可以获得较为全面的信息,从而确定各参数的定性关系,对基坑开挖支护设计具有较大的指导意义^[5-6]。

目前,笔者对框架预应力锚杆柔性支护结构进行了较为系统的研究^[7-10],采用的方法主要是传统的极限平衡法,该分析方法不能得到详细的有关基坑开挖支护变形的信息。但是,在基坑开挖过程中,基坑周围的水平位移和沉降以及坑底隆起是不可避免的。因此,有必要对基坑开挖引起的变形进行分析和预测。然而,这方面的理论分析难度很大,而基坑开挖数值模拟计算分析可对基坑支护的受力、变形及破坏模式等力学行为进行较全面的分析研究,可为基坑工程的设计和施工提供全面指导,提供优化设计方案^[11]。目前,采用 ADINA 软件对框架预应力锚杆柔性支护结构体系用于基坑支护时的数值模拟分析和支护参数研究的文献未见报道。

本文采用有限元 ADINA 数值分析软件,并结合中国社会科学院中心图书馆基坑工程实例,对框架预应力锚杆柔性支护结构的工作性能进行有限元数值模拟,系统讨论了基坑开挖过程中的整体位移场分布、基坑的地表沉降与隆起、锚杆的轴力分布特点,从而验证了框架预应力锚杆柔性支护结构的应用效果及控制变形的显著成效,以期对理解这种支护结构的工作机理有所裨益。

1 有限元软件 ADINA

ADINA 是一种自动动态增量法非线性有限元分析软件,其在计算岩土变形和稳定性方面具有很强的优势,主要体现在岩土材料模式丰富;提供多种地质断层、节理裂隙处理方法;具有锚杆、抗滑桩等杆单元算法等。另外,在地下空间的施工过程中,岩土材料开挖过程和支护、锚固结构的施加需要使用到单元的死功能。为了与工程实际相符,ADINA 的单元死亡功能对单元刚度的处理不同于其它软件,其刚度的变化不是在瞬间完成,而是在用户指定的一个时间段从真实刚度降低到零,这是 ADINA 软件能够成功模拟极为复杂施工工序的重要原因。

2 工程算例数值模拟分析

2.1 工程概况

中国社会科学院中心图书馆工程^[6, 12],位于北京市建国门内大街 5 号中国社会科学院内。施工厂区地形基本平坦,施工场地狭小,基坑开挖深度 12 m。施工占地面积 2400 m²,支护面积约 2340 m²。根据地质勘察情况,工程场地内土层地质情况为:表层厚度为 3.8~6.0 m 的人工堆积渣土层,以下分别为砂质粉土层、黏质粉土层以及砂卵石层。在基坑开挖深度范围内,各土层的平均厚度及物理力学参数见表 1。

表 1 土体的物理力学参数

| 土层名称 | 杂填土 | 砂质粉土 | 黏质粉土 |
|-------------------------------|------|------|------|
| 平均厚度 h/m | 4.9 | 3.0 | 4.1 |
| 重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$ | 19.8 | 19.8 | 20.6 |
| 黏聚力 c/kPa | 20 | 18 | 35 |
| 内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$ | 15 | 35 | 18 |
| 压缩模量 E_s/MPa | 6 | 14 | 12 |
| 泊松比 ν | 0.35 | 0.29 | 0.32 |

由于基坑西侧紧邻社科院主楼和既有 3 层办公楼,基坑东侧紧邻贡院东街,基坑南侧紧邻长安街,本工程实际采用了土钉支护和微桩土钉复合支护等 3 种不同剖面形式的支护^[6, 12]。为了对比验证框架预应力锚杆柔性支护结构在控制基坑变形方面的显著效果和相关工作性能,假定支护结构采用框架预应力锚杆柔性支护结构,设计剖面见图 1。

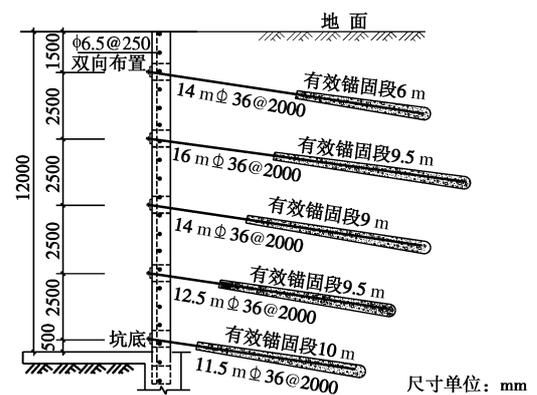


图 1 基坑剖面布置图

Fig. 1 Profile of excavation

2.2 有限元模型的建立

由于基坑平面形状接近于矩形,支护方案中对基坑四周均采用框架预应力锚杆柔性支护结构,具有对称性,因此仅取 1/4 基坑进行建模,且不考虑土方开挖过程对土体力学性能的影响。有限元分析模型宽度取为 80 m,高度取为 24 m。由于布置了 5 排锚杆,因此分 6 步开挖,第一步开挖 1.5 m,第 2, 3, 4, 5

步开挖 2.5 m, 最后一步开挖 0.5 m。模型中锚杆采用 Rebar 单元, 其本构关系采用双线性弹塑性模型; 框架采用梁单元, 截面为矩形, 由于框架的整体刚度相对于土体要大得多, 因此假定其为弹性体; 挡土板面层为 shell 单元, 其本构关系采用弹性模型; 土体采用八结点实体单元, 土体本构关系采用莫尔-库仑理想弹塑性模型; 其余相关参数的选取详见周勇^[13]的研究结果。建立有限元模型见图 2, 图 3 为锚杆与框架的布置示意图。

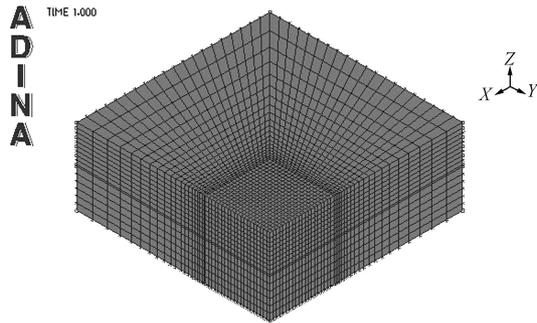


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

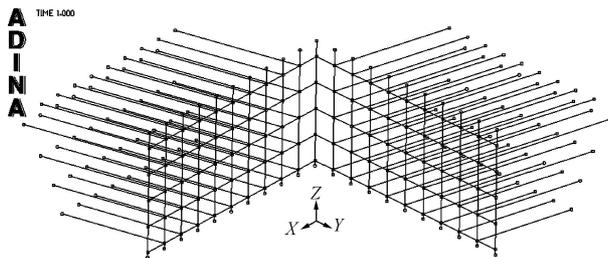


图 3 锚杆与框架布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of arrangement of anchors and grillage

2.3 数值模拟结果及分析

(1) 位移计算结果

a) 基坑分步开挖整体位移场

图 4 给出了最后一步即第 6 步开挖结束时基坑的整体位移场。随着开挖的进行, 基坑位移的总体趋势为: 基坑底部隆起, 地表沉降, 基坑位移的影响范围不断扩大, 坑壁水平位移和坑底隆起量不断增大, 隆起最大量发生在坑底中心线处, 地表沉降最大值发生在距离坑壁较远处。由于基坑“角隅效应”的影响, 靠近基底中心线处的侧移量明显大于基坑角点处的侧移量, 即基坑角点的存在有效约束了其周围土体的位移, 基坑的整体空间效应明显。图 4 表明采用整体三维有限元模型能够更加有效地分析深基坑柔性支护结构的整体工作性能。

b) 坑壁水平位移

框架预应力锚杆柔性支护下基坑各开挖步的坑壁水平位移如图 5 所示。由图 5 可知基坑的水平位移沿

深度方向呈曲线分布, 且随开挖深度的增加而增大。每开挖一步, 在坑壁都有一定的水平位移增量, 其中最后一步位移增量最大, 达到 4.22 mm, 而且每一步开挖形成的水平位移分布曲线形状相似。另外, 前 3 步开挖过程中基坑的最大水平位移并未出现在基坑顶部, 而是发生在基坑下部, 但是随着基坑向下开挖, 锚杆布置排数的增加和各排锚杆预应力的施加, 坑壁最大水平位移逐渐向上部转移, 基坑开挖完毕上部位移达到最大值 14.63 mm。这种水平位移分布模式与一般的土钉支护结构相同, 但是其最大水平位移明显小于相同条件下土钉支护的位移值^[6]。文献[12]指出, 该基坑采用土钉支护, 基坑开挖支护完毕时坑顶水平位移最大, 数值为 27.45 mm; 若采用文献[4]的计算方法粗略估算出其最大值为 11.26 mm, 但是其出现在基坑的中上部, 与前者有所区别, 造成这种现象的原因主要是由于估算方法的计算模型中将基坑底部处理为铰接, 忽略了有些次要因素的影响, 而有限元模拟能够考虑的信息更加全面, 因此如果仅仅从数值上看两者

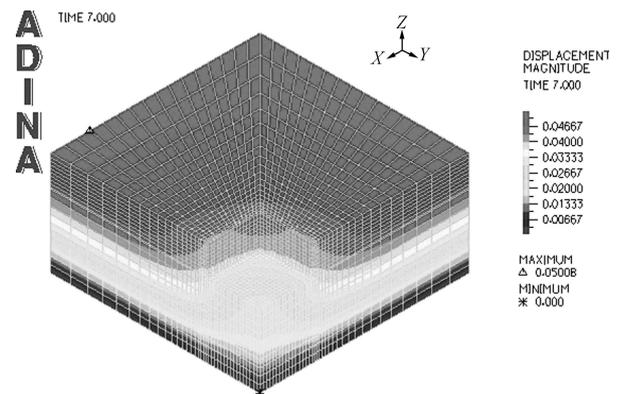


图 4 第 6 步开挖基坑整体位移场

Fig. 4 Whole displacement field after the 6th excavation step

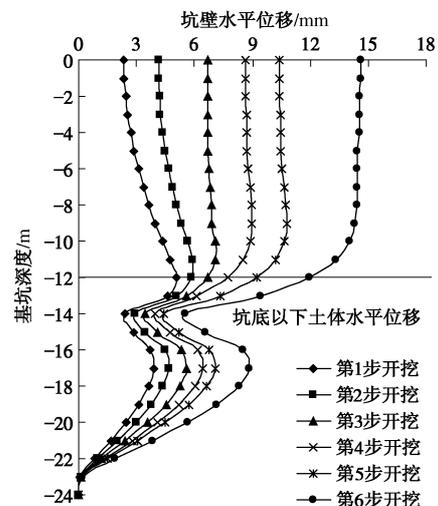


图 5 基坑坑壁水平位移分布

Fig. 5 Distribution of horizontal displacements of wall facing of excavation

还是吻合较好。对比框架预应力锚杆柔性支护结构和土钉支护结构可以发现,前者在严格控制深基坑支护结构的变形方面具有明显的优越性。从图 5 还可以看出,在基坑开挖面以上,坑底附近位移相对较小,但是在坑底以下,由于坑底的隆起,在一定的影响范围内坑壁水平位移有逐渐增加外凸的趋势,这个影响范围大概为 0.5 倍的基坑开挖深度。

c) 锚杆预应力大小对抗壁水平位移的影响

如图 6 所示,在相同条件下,基坑水平位移随预应力的增加而减小,且位移的分布规律逐渐发生改变,在基坑深度范围内,中上部的位移逐渐小于下部位移。在预应力等于 40 kN 时,基坑最大水平位移 27.99 mm。当预应力较小时,预应力的增加对水平位移的减小作用明显,如预应力由 40 kN 增加至 60 kN 时,最大水平位移的减小幅度为 7.89 mm;而预应力由 100 kN 增加至 120 kN 时,坑壁顶点水平位移的减小幅度为 5.57 mm,且此时最大位移发生在基坑顶面以下 10 m 处,数值为 10.71 mm。由此可知,当预应力超过一定数值后对限制基坑的水平位移的效果将会降低,但是此时的位移已经比较小,能够满足实际工程的需要。

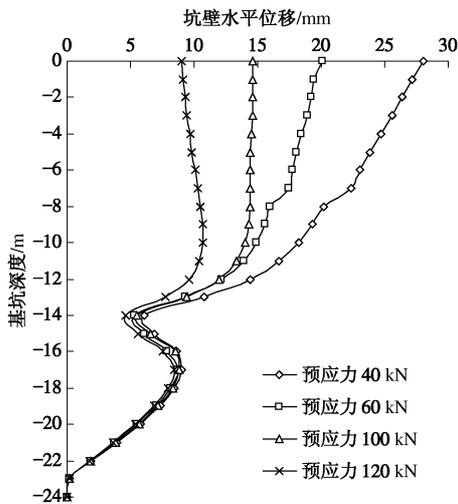


图 6 不同预应力条件下基坑水平位移曲线图

Fig. 6 Curves of horizontal displacements of excavation under different prestress values

d) 锚杆预应力作用位置对抗壁水平位移的影响

图 7 表示锚杆预应力施加位置不同时基坑坑壁水平位移的变化情况,假定施加预应力的大小均为 100kN,一种情况为全部施加,另外一种情况为仅上面两排锚杆施加。由图 7 可知预应力的施加位置对抗壁水平位移的影响显著,当仅上面两排锚杆施加预应力时,顶部最大水平位移达到 23.69 mm,且随着开挖深度的增加位移明显递增;而对所有锚杆均施加预应力时,不仅坑壁水平位移能够有效减小,而且随着开挖深度的增加,位移的增量较小。在实际工程中,工

程技术人员通常认为既然基坑上部位移较大,则仅对上部锚杆施加预应力即可,这种看法是不妥的。因为尽管基坑上部位移大,在位移允许的范围内可以不施加或施加较小的预应力,但是若施加较大的预应力则对位移控制作用明显;而中下部虽然位移较小,但是从基坑抗倾覆和抗滑移角度看对锚杆施加较大的预应力是有利的。所以综合分析,对于框架预应力锚杆这种柔性支护结构,最好是对所有锚杆都施加预应力。

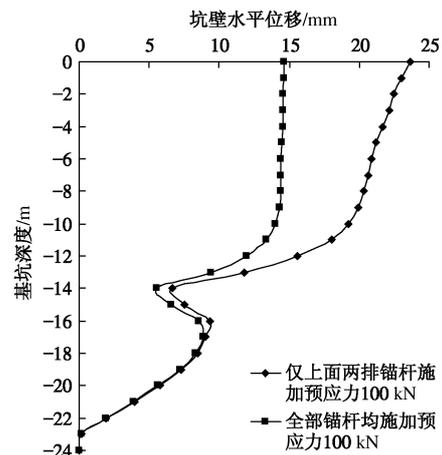


图 7 锚杆预应力位置变化时基坑水平位移曲线图

Fig. 7 Curves of horizontal displacements of excavation under different application positions of prestresses

(2) 基坑的地表沉降分布

随着基坑土体的开挖,开挖面后的土体会产生滑动,从而产生竖直方向的位移。在基坑开挖过程中,最大沉降可能发生在开挖面附近,也可能发生在距开挖面一定距离的地方,这与开挖土体的材性以及采取的支护措施有关。本文模拟出的框架预应力锚杆柔性支护下的基坑地面沉降情况如图 8。由图 8 可知基坑地表沉降沿坑壁水平方向呈曲线分布,随开挖深度的增加,每开挖一步,在基坑顶面都有一定的沉降增量,且比较均匀,每步开挖形成的沉降分布曲线形状相似。对比图 5, 8 可以发现,地表沉降和水平位移的分布的大小是相互对应的,水平位移越大,地表沉降也越大。另外,基坑地表最大沉降未出现在开挖面附近,而是在离坑壁约 7 m 的位置处,当第 6 步开挖结束时,最大沉降量为 19.53 mm,随着离坑壁的距离越来越大,沉降量逐渐变小,在大约 60 m 处,沉降接近于零,这说明沉降的影响范围约为基坑开挖深度的 5 倍。分析原因可以认为:由于土体开挖卸载,使坑底隆起,导致坑后土体沉降,而在土体与框架的接触处,由于框架的刚度较土体要大得多,再加之锚杆预应力的作用,框架起到了限制周围土体沉降的作用,因此坑壁处土体沉降较小,最大值仅为 9.15 mm;当超过框架作用的影响范围以后,土体应力增加,导致

地面沉降增大，并在坑壁不远处达到最大值，且在最大沉降点，土体应力得到部分释放，从而在最大沉降位移点后地面沉降逐渐减小，最后趋于零。

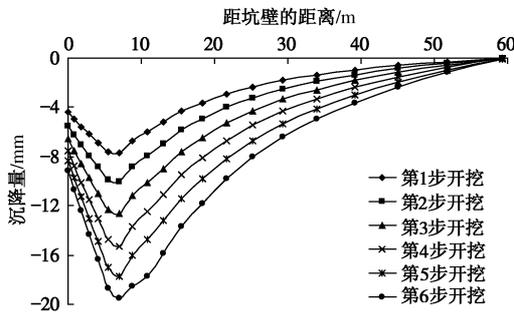


图8 基坑的地表沉降分布

Fig. 8 Distribution of ground settlement of excavation

(3) 基坑的坑底隆起

随着基坑土体的开挖，开挖面后土体会产生向坑内方向的滑移，对基坑底部产生挤压作用，引起基坑底部的隆起，图9为各开挖阶段基坑坑底隆起分布曲线图。从图9中可知坑底隆起随基坑开挖深度的增加而增大，在基坑开挖深度较浅时，坑底隆起较为均匀，数值较小，曲线平坦。随开挖深度增加，坑底隆起逐渐变大，而且越靠近基坑中部，隆起量也越大，开挖结束时最大相对隆起量达到12.87 mm。

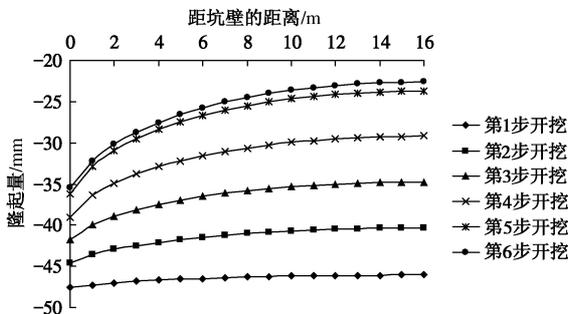


图9 基坑的坑底隆起曲线图

Fig. 9 Curves of bottom uplift of excavation

(4) 锚杆轴力计算结果

在框架预应力锚杆柔性支护结构中，锚杆是维系基坑稳定的重要受力构件。

图10是基坑最后一步开挖结束后的锚杆轴力云图，从图10可以看出，沿基坑深度方向各排锚杆的轴力呈现中间大两端小的特点，沿基坑水平方向除了基坑角部锚杆由于“角隅效应”的影响其轴力较小外，其余各排锚杆轴力较为接近。

图11为第1至3排锚杆轴力随基坑开挖步的变化曲线图。由于当开挖深度增加时，土体卸载引起的水平荷载增加，通过锚杆与土体之间的应力转移，锚杆更多地参与工作，分担了大部分水平土压力荷载，

因此锚杆轴力随开挖深度的增加而均匀增加，每步锚杆轴力增量产生后形成的轴力沿杆长的分布曲线形状相似，但非均匀分布，越靠下锚杆轴力沿其长度方向递减的速率越快。

图12为开挖结束后各排锚杆的轴力分布图，从图12可以发现各排锚杆最大轴力出现在锚杆的中前部，其中第3排锚杆轴力最大，第5排锚杆轴力最小，而且随着开挖深度的变化逐渐向坑壁方向转移，第1至第5排锚杆的最大轴力作用点离锚杆前端的距离依次为5.62, 4.49, 3.50, 1.84, 0.54 m，最大轴力作用点连线与计算中所确定的基坑滑移面形状相似，如图13所示，这说明对于土质基坑采用圆弧滑移面来确定锚杆长度有一定的合理性。

第1至第5排锚杆的最大轴力依次为199.47, 214.86, 294.65, 270.61, 161.93 kN。如果将各排锚杆的最大轴力反映在基坑深度方向，如图14所示。由图14知基坑中部锚杆的轴力较大，上下部位轴力较小，轴力沿基坑深度方向大致呈“弓形”分布。

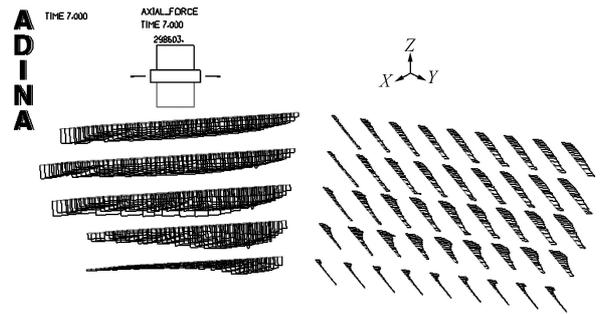
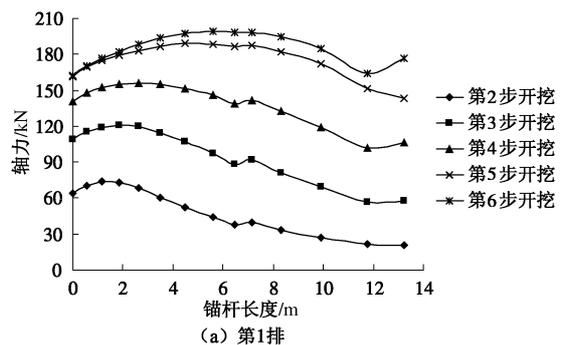
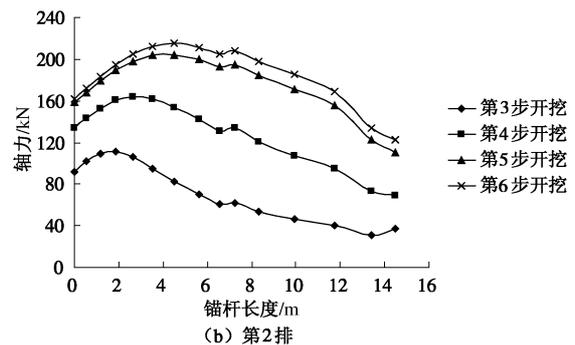


图10 锚杆轴力云图

Fig. 10 Nephogram of axial forces of anchors



(a) 第1排



(b) 第2排

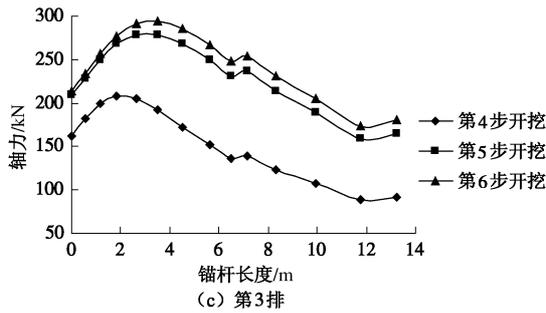


图 11 第 1 至 3 排锚杆轴力随开挖步的变化曲线

Fig. 11 Change curves of axial forces of the 1st to 3rd row of anchors with excavation steps

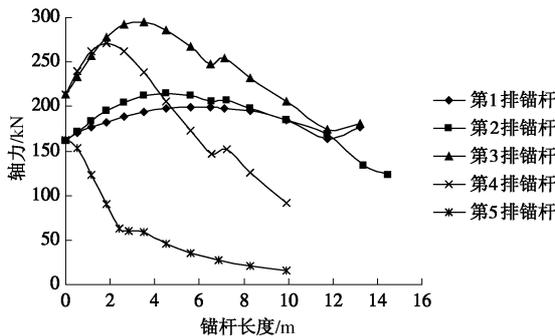


图 12 各排锚杆开挖结束时的轴力图

Fig. 12 Curves of axial forces of all anchors after excavation end

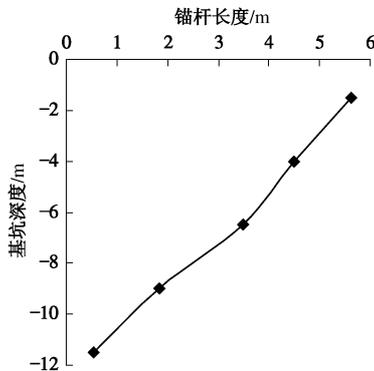


图 13 各排锚杆轴力最大作用点连线图

Fig. 13 Connection line of points of maximum axial forces of all anchors

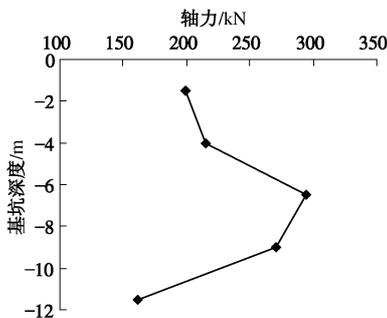


图 14 各排锚杆最大轴力分布图

Fig. 14 Distribution of maximum axial forces of anchors

3 结 论

通过采用有限元软件 ADINA 对中国社会科学院中心图书馆基坑工程采用框架预应力锚杆柔性支护结构时的工作性能进行数值模拟分析, 结论得到以下 4 点结论。

(1) 框架预应力锚杆柔性支护下基坑水平位移和垂直位移(地表沉降)均呈曲线分布。水平位移最大值在开挖深度较浅时发生在基坑的下部, 随着开挖深度加大, 最大位移逐渐向上部转移, 开挖结束时顶部位移达最大值; 由于框架限制了坑壁附近土体的地表沉降, 基坑地表沉降最大值发生在离坑壁一定距离处, 且在最大沉降位移点以后逐渐减小而最终趋于零。

(2) 锚杆预应力大小和施加预应力的位置对基坑坑壁水平位移影响显著。较大的预应力不仅可以大幅减小坑壁水平位移, 而且还会改变位移的分布形状, 即最大水平位移向基坑下部转移, 但是当锚杆预应力超过一定数值后对基坑位移改善的幅度已不再明显。当采用框架预应力锚杆柔性支护技术进行基坑开挖稳定维护时, 最好对每排锚杆都施加预应力, 这样对基坑位移的控制将更加有效。

(3) 随着基坑的开挖, 坑底出现不同程度的隆起, 开挖深度较浅时, 基坑隆起量较小, 当开挖深度大时, 隆起量明显增加, 且离坑壁越远, 隆起量越大。

(4) 锚杆轴力随基坑开挖深度的增加而逐渐增大, 沿锚杆长度成曲线分布, 从上至下每排锚杆的最大轴力作用点逐渐向坑壁方向靠近, 这些作用点连线近似于基坑滑移面曲线。另外, 锚杆轴力值大小具有一定的规律性, 呈现中部大、上下部位小的特点, 沿基坑深度方向大致呈“弓形”分布。

通过数值模拟分析可知, 框架预应力锚杆柔性支护结构作为一种新型柔性支护技术, 与传统的土钉喷锚支护结构相比, 其对基坑的位移控制非常有效, 因此在深度较大的基坑和对位移控制要求严格的基坑和边坡支护工程中具有明显的优势, 值得大力推广应用, 但是有必要进一步通过工程监测以获得更多的实测数据来验证它的优越性。

参考文献:

[1] 贾金青, 陈国周, 孟祥波. 改进的杆系有限元在预应力锚杆柔性支护法中应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2314 - 2318. (JIA Jin-qing, CHEN Guo-zhou, MENG Xiang-bo. Application of modified beam-spring FEM to prestressed anchor flexible retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2314 - 2318. (in Chinese))

- [2] 秦四清, 贾洪, 马平, 等. 预应力土钉支护结构变形与破坏的数值分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(9): 1356 - 1362. (QIN Si-qing, JIA Hong, MA Ping, et al. Numerical analysis of deformation and failure in Prestressed soil-nailed reinforcement structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(9): 1356 - 1362. (in Chinese))
- [3] 董诚, 郑颖人, 陈新颖, 等. 深基坑土钉和预应力锚杆复合支护方式的探讨[J]. 岩土力学, 2009, **30**(12): 3793 - 3796, 3802. (DONG Cheng, ZHENG Ying-ren, CHEN Xin-ying, et al. Research on composite support pattern of soil nails and prestressed anchors in deep foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(12): 3793 - 3796, 3802. (in Chinese))
- [4] 周勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆柔性支护结构坡面水平位移影响因素[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 470 - 476. (ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Influencing factors of horizontal displacement of wall facing of grillage flexible supporting structure with prestressed anchors[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 470 - 476. (in Chinese))
- [5] 贾金青, 郑卫锋, 陈国周. 预应力锚杆柔性支护技术的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(21): 3978 - 3982. (JIA Jin-qing, ZHENG Wei-feng, CHEN Guo-zhou. Numerical analysis of prestressed anchor flexible retaining method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(21): 3978 - 3982. (in Chinese))
- [6] 伍俊, 郑全平, 吴祥云. 复合土钉支护技术的有限元数值模拟及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(4): 388 - 392. (WU Jun, ZHENG Quan-ping, WU Xiang-yun. Numerical simulation in finite element and engineering application of compound soil nail support technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(4): 388 - 392. (in Chinese))
- [7] 周勇, 朱彦鹏. 预应力锚杆柔性支护体系的锚杆抗拔力研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(2): 415 - 421. (ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Research on anti-pulling force of anchor of flexible supporting system with prestressed anchors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, **33**(2): 415 - 421. (in Chinese))
- [8] 周勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆边坡支护结构的稳定性分析方法及其应用[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(3): 376 - 382. (ZHOU Yong, ZHU Yan-peng. Stability analysis method for prestressed anchor and grillage supporting structures and its application[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(3): 376 - 382. (in Chinese))
- [9] 周勇, 朱彦鹏, 叶帅华. 框架预应力锚杆柔性边坡支护结构设计和施工中的若干问题探讨[J]. 岩土力学, 2011, **32**(增刊 2): 437 - 443. (ZHOU Yong, ZHU Yan-peng, YE Shuai-hua. Discussion on several issues about the design and construction of grillage flexible slope supporting structure with prestressed anchors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(S2): 437 - 443. (in Chinese))
- [10] 叶帅华, 朱彦鹏, 周勇. 兰州市某复杂深基坑工程设计与监测分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 431 - 437. (YE Shuai-hua, ZHU Yan-peng, ZHOU Yong. Design and monitoring analysis of a complicated deep foundation pit in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 431 - 437. (in Chinese))
- [11] 贾金青, 郑卫锋. 预应力锚杆柔性支护法的研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(11): 1257 - 1261. (JIA Jin-qing, ZHENG Wei-feng. Study and application of flexible retaining method with prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(11): 1257 - 1261. (in Chinese))
- [12] 郭红仙. 考虑施工过程的土钉支护分析方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2006. (GUO Hong-xian. Research on a new analysis method for soil nailing considering the construction process[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006. (in Chinese))
- [13] 周勇. 框架预应力锚杆柔性支护结构的理论分析与试验研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2007. (ZHOU Yong. Theoretical analysis and testing study for grillage flexible supporting structure with prestressed anchors[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2007. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)