

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.04.002

无根护壁桩支护三维有限元分析研究

贾金青, 曹 静, 高军程

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 传统的岩质基坑支护存在造价高、工期长、安全性低等缺点。无根护壁桩支护方法改善了上述缺点,并且已经成功应用于工程实践当中。通过详细介绍无根桩的结构和利用 ABAQUS 软件建立考虑支护结构与土体共同作用的无根护壁桩三维有限元模型,对基坑整体稳定性、各构件受力特征及变形特征进行了分析。分析得出,基坑满足整体稳定性要求,各支护构件均满足强度要求,基坑变形也满足要求,所以推广无根桩支护在岩质深基坑中的应用将具有积极意义。

关键词: 基坑工程;无根护壁桩支护;ABAQUS 数值模拟;基坑变形

中图分类号: TU442

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)04-0005-06

3 - D Finite Element Simulation of Rootless Pile

JIA Jinqing, CAO Jing, GAO Juncheng

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

Abstract: The traditional rock-excavations retaining has disadvantages of high costs, long construction duration, low security, et al. However the rootless pile retaining technology instead was successfully applied to the practice. By introducing the structures of the rootless pile in detail and building the 3 - D finite element models considering the combined effects of the soil structure inaction, the overall stability of the excavation, the internal force of the retaining components and the excavation deformation for each analysis step were analyzed. The results indicated that the stability of the excavation, the strength of each retaining components and pit deformation can meet all the requirements. It is significant to promote rootless pile in rock-pit practice.

Keywords: excavation engineering; rootless pile; ABAQUS numerical modeling; excavation deformation

目前基坑的支护形式很多,根据受力性能的不同可以分为预应力锚杆、悬臂式、重力式支护等^[1-2]。传统的基坑护壁桩是利用传统方法大孔径造孔,一般大孔深度为从地面开始至基底数倍桩径处,所以安置孔中的钢筋笼的直径是上下相同的,最终灌装混凝土形成护壁桩。当遇到下部为岩石的岩质基坑时,对造孔工作造成了极大的困难。通常采用爆破的方法,但是不但增加了施工费用,而且容易将孔壁震塌,严重情况下甚至危及基坑临近建筑物的安全^[3]。针对传统的基坑护壁桩的工期长、施工复杂、造价高等缺点,无根护壁桩支护方法得到应用。

与传统的钢筋混凝土灌注桩相对比,无根护壁

桩有以下优点:(1) 造价低:无根护壁桩利用了岩石自身的抗压强度,使岩石代替混凝土,从而节省了工程造价。(2) 工期短:传统的护壁桩在坚硬的岩石处造孔尺寸缓慢,但无根护壁桩当基岩层的抗压强度较大时停止造孔,沿钢筋笼的两侧向下钻小孔至基底以下,向小孔内放入钢筋并注浆,形成砂浆锚杆,这样极大地缩短了工期。(3) 安全性好:无根桩的施工过程中不需要岩石爆破,因此可以避免对周围建筑物的危害和人员伤亡等事故^[4]。目前无根护壁桩已经成功应用于工程实践,但对其工作机理和设计方法的研究仍不够深入,并没有完善的系统理论研究。基于以上原因本文通过数值模拟的方法对无根护壁桩技术进行了分析研究。

收稿日期:2016-03-20

修稿日期:2016-04-17

作者简介:贾金青(1962—),男,河北沧州人,博士,教授,博导,主要从事结构工程、岩土工程及工程新材料的研究和开发应用。

E-mail: keyknown@163.net

1 概述

无根护壁桩^[5]是一种应用于支护岩质基坑侧壁的新型支护方法。该支护方法的组成部分包括:由钢筋笼和混凝土组成的上部分、数根竖向砂浆锚杆、数根斜向砂浆锚杆,当开挖深度较大时上部还包括预应力锚杆。

无根护壁桩在基坑开挖过程当中,受拉区钢筋用于承受拉应力,上部桩体中的混凝土作为受压构件承受压应力,在护壁桩的下部分,用岩石代替混凝土,利用了基岩层岩石的抗压强度代替桩身混凝土承受由弯矩引起的压应力,竖向砂浆锚杆下部锚入基底以下的岩层中,上部锚入桩身混凝土中,从而代替了灌注桩中受拉主筋承受由弯矩引起的拉应力。斜向砂浆锚杆的设置用以抵抗桩身混凝土和基岩界面处承受由土压力引起的水平剪应力,增加桩的侧向稳定。通过以上设置,使无根护壁桩在基岩中具有灌注桩的抗弯、抗剪功能。作为受弯构件承受土压力产生的弯矩和剪力,

无根护壁桩的构造如图 1 所示,其中 1 是地面,2 是开挖的大孔,3 是基岩层,4 是基坑底部,5 是竖向砂浆锚杆,6 是斜向砂浆锚杆,7 是钢筋笼,8 是混凝土,9 是迎土面,10 是开挖面,11 是预应力锚杆。

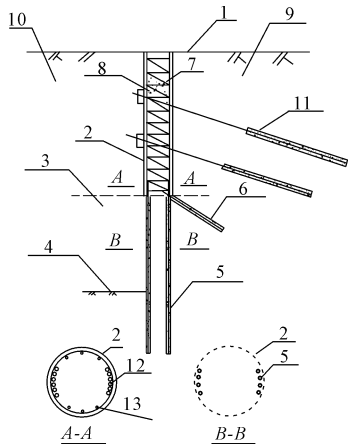


图 1 无根桩示意图

2 工程概况

大连某住宅项目建筑物为多层与高层,其建造过程当中基坑支护工程临近某广场北测,根据工程的用途及具体场区条件,整体开挖,其中地下两层,拟开挖基坑呈不规则多边形,基坑开挖深度一般为 12.4 m。基坑西侧紧邻文林街,基坑西南侧与船舶

丽湾相邻。基坑整体平面布置图部分如图 2 所示。

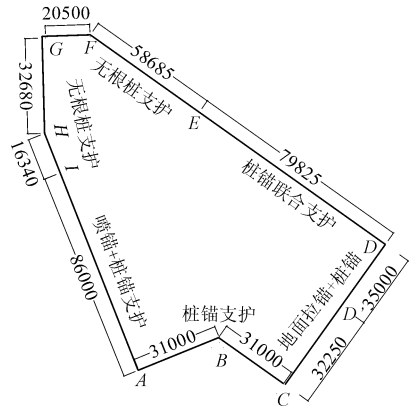


图 2 基坑开挖平面图

根据大连黄海岩土工程勘察有限公司提供的地质勘探报告表明,场地地层主要由第四系松散堆积物和风化岩组成,据钻探控制深度范围内,场地地层结构自上而下依次为:① 杂填土,杂色,湿-饱和,主要由砖、碎石、黏性土、混凝土等组成,局部有旧建筑物基础,主要呈松散状态。层厚 0.90 m~3.60 m,平均 0.8 m。② 粉质黏土,呈黄褐色至灰褐色,可塑或硬塑状态,局部软塑,含少量铁锰质结核,局部夹有薄层细砂和少量碎石。该层场区普遍分布,层厚 2.40 m~8.30 m,平均 4.27 m。③ 含碎石粉质黏土,呈黄褐色,稍密-中密,冲击进尺缓慢,碎石粒径 5 mm~80 mm,多数呈磨圆状,少数呈次棱角状,主要成分为石英岩和板岩,该层主要分布于基坑区域内,层厚 0.50 m~1.80 m,平均 0.98 m。④ 全风化板岩,呈黄褐色,散体结构,岩石风化剧烈,岩芯呈碎屑土状。场区广泛分布,层厚 0.40 m~3.20 m,平均 3.2 m。⑤ 中风化板岩,浅黄色、黄褐色,碎裂结构,岩芯呈碎片状及碎块状,手摸有滑腻感。场区普遍分布,层厚 2.00 m~18.80 m,平均 7.5 m。⑥ 微风化板岩,黄褐色、棕黄色、黑褐色,薄层状-碎裂块状结构,板理、裂隙发育,岩芯呈碎块状、短柱状,较坚硬。

3 方案选型

根据场区勘察报告,结合该基坑项目周围的具体情况,基坑支护最终方案为:(1) 基坑西南侧和东南侧均采用桩锚支护与其他支护方法相结合的支护方法。由于该两侧区域上岩层所处的位置较深,利用无根桩支护没有明显的优势。在该两侧区域中存在坍塌,坍塌处地质条件较为复杂,并且紧邻大连的

几条主要街道对支护要求较高。所以采用桩锚支护与其他支护方法相结合的方法。(2) 基坑西北侧及东北侧采用无根护壁桩支护方法。由于该两侧基坑内岩层较浅,若仍采用桩锚支护施工困难进程缓慢,综合考虑后决定采用无根护壁桩支护。基坑采用垂直开挖,从地面向下进行人工或者机械大孔径造孔,孔径为 $\Phi 800$,钢筋笼采用非均匀配筋,受力主筋分布在基坑内侧和基坑外侧分别为 7 根和 5 根,钢筋采用 $\Phi 18$;成孔至地下 9 m 左右时达到符合抗压强度的岩层,沿钢筋笼受力主筋的位置向岩石中钻小孔径孔,在大孔的迎土面和背土面均为 5 孔,孔径大小为 $\Phi 50$,间距为 150 mm,孔深为 5.5 m,向孔内放入直径为 $\Phi 28$ 的钢筋,其中嵌入基底层以下 2.5 m,留出 1 m 的锚固长度,并向孔中灌注 M30 水泥浆;在基岩层护壁桩的迎土面与水平面成大约 45° 角钻斜孔 3 个,间距为 100 mm,孔深为 6 m,放置 $\Phi 18$ 钢筋,并预留出 1 m 的锚固长度,并向孔中灌注 M30 水泥浆。施工完成后吊装钢筋笼并灌注混凝土形成无根护壁桩。开挖过程中,为了减少基坑侧壁位移,设置了两排预应力锚杆,与水平面的夹角均为 15° ,第一排锚杆设置在竖向距离为 3 m 处土体当中,总长度为 20 m,第二排锚杆位于竖向距离为 7 m 处土体中,长度为 17 m,两处预应力锚杆所施加的预应力均为 250 kN。具体的支护剖面图如图 3 所示,具体的配筋结果如表 1 所示。

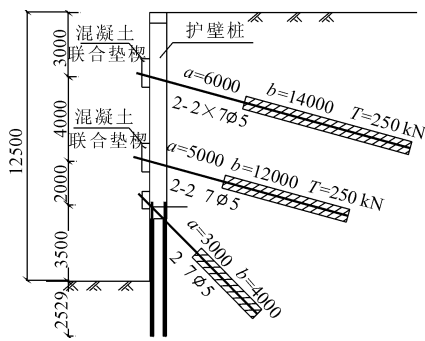


图 3 基坑支护典型剖面图

表 1 钢材材料参数表

类型	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性 模量 /MPa	泊松 比	屈服 强度 /MPa	极限 强度 /MPa
纵筋 $\Phi 18$	7800	2.0×10^5	0.3	408	623
纵筋 $\Phi 28$	7800	2.0×10^5	0.3	433	593
箍筋 A12	7800	2.0×10^5	0.3	335	475

4 数值模拟模型建立

4.1 数值模型及参数

本文采用 ABAQUS 软件对无根桩支护的基坑力学行为进行数值模拟分析。其中岩土体本构模型选用莫尔-库仑模型;模型中土体、桩深混凝土等均采用三维实体单元,钢筋笼、纵筋、预应力锚杆均采用三维 BEAM 单元模拟;桩身与土体之间采用摩擦接触,法向为硬接触不允许相互嵌入,切向的摩擦系数为 0.3;预应力锚杆锚固段与土体发生作用,采用降温方法施加预应力;基坑的开挖过程通过修改关键字控制生死单元实现^[6]。

为了尽量减小边界效应对模型计算的影响,参照有关三维基坑模拟的尺寸选择,本文的计算模型尺寸取为 $50\text{ m} \times 25\text{ m}$,具体的尺寸示意图如图 4 所示^[7]。

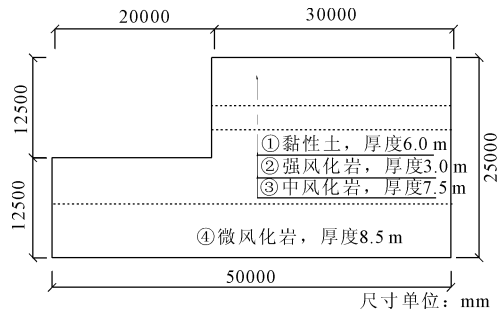


图 4 基坑数值模拟尺寸

模型左右两侧边界固定水平位移,底部固定水平及竖向位移,在计算前采用修改关键字方法,分不同土体集合平衡地应力计算。模型中选取的钢筋笼及其它钢材料的具体参数选择如表 1,岩土体参数^[8]如表 2 所示。

表 2 土体参数选取

地层编号	土层名称	厚度 /m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)	弹性模量 /MPa	泊松比
1	黏性土	6.0	20	10	10	20	0.35
2	强风化岩	3.0	22	80	20	30	0.25
3	中风化岩	7.5	25	300	30	40	0.20
4	微风化岩	8.5	27	500	35	80	0.16

4.2 数值模拟过程

本文在数值模拟分析过程中,严格模拟真实的施工过程,建立支护结构并分层开挖,整个模拟过程共分为 8 个工况,具体的施工顺序为:geo,施加重力,地应力平衡;zhuang,开挖桩孔,放入竖向钢筋、斜向钢筋、钢筋笼并灌注混凝土;r1,开挖第 1 层土体;r2,开挖第 2 层土体;yu1,第一排预应力锚杆施工;r3,开挖第 3 层土体;yu2,第 4 排预应力锚杆施工;r4,开挖最后一层土体。

5 数值模拟结果分析

本文将从模拟结果的稳定性、强度、变形以及无根桩支护与桩锚支护的对比结果几方面进行介绍。

5.1 稳定性结果分析

本文整体稳定性验算采用的方法为强度折减法,采用的失稳判据为位移发生突变,以有限元计算不收敛为计算结束^[9-10]。当计算结束时,土体的最大水平位移已经远远超过规范^[11]中对土体水平位移的要求。在输出的结果当中提取土体的抗剪折减系数 F_{V_1} 和土体的水平位移 U_2 ,并绘制图线如图 5 所示。

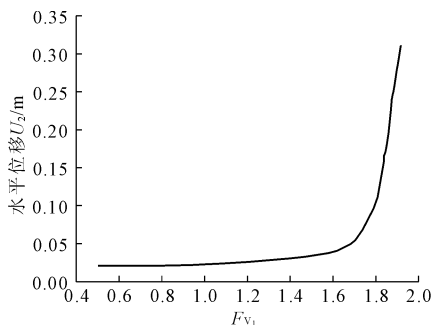


图 5 土体水平位移—抗剪折减系数曲线

据图线可以看出在 $F_{V_1} = 1.7$ 处曲线的斜率发生突变,说明此时的土体位移发生突变,根据边坡土体的失稳判据,边坡稳定安全系数 $F_s = 1.7$ 。根据《建筑基坑支护技术规程》^[11](JGJ120-2012)中的要求,可知对于临时的二级边坡 $F_{st} = 1.20$,则对于 $F_s = 1.7$ 的无根桩支护的基坑边坡处于稳定状态。

5.2 桩体结构内力分析

桩体部分主要由以下几部分组成:组成无根桩上部分的钢筋笼和浇筑的混凝土部分、下部的竖向砂浆锚杆以及代替混凝土起作用的岩石部分。

5.2.1 桩体应力强度分析

下文从构成桩体的三个部分分别分析其所受的应力及是否满足组件强度设计要求。

混凝土部分,桩上部浇筑的混凝土为 C30 混

土,由混凝土应力云图(图 6)可以看出,混凝土部分受到的最大应力发生在混凝土底部及靠近桩岩界面处,这是由于此处的构件的截面面积发生改变,随之受力发生改变。根据《混凝土结构设计规范》^[12](GB50010-2010),C30 混凝土抗压强度的设计值为 14.3 MPa,从应力云图中可以看出混凝土所受最大的应力为 8.5 MPa,所以上部桩体的混凝土部分满足强度设计的要求。

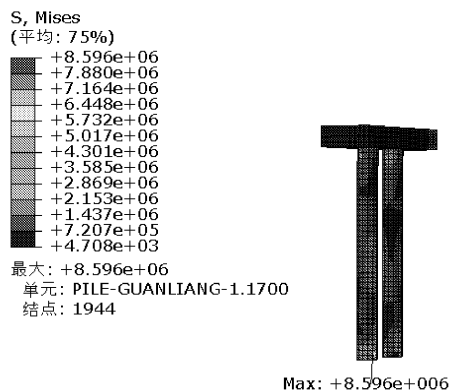


图 6 桩混凝土部分应力分布云图

钢筋笼部分由纵向钢筋和箍筋两部分组成,纵向钢筋采用的 HRB400 钢筋,箍筋是 HPB300 钢筋。图 7 给出了不同工况下钢筋笼的最大应力值。

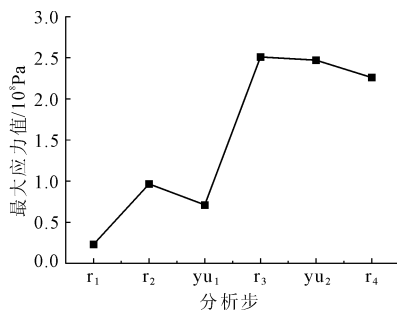


图 7 不同分析步钢筋笼最大应力值

同混凝土受力相似,钢筋笼最大的受力位置也位于靠近桩岩界面处,同样也是由于该处界面的截面面积发生改变所引起的。根据不同工况的钢筋应力图可以看到,对比于 r_2 分析步,加上第一层预应力锚杆后最大应力的值由 9.671×10^7 Pa 减少为 7.095×10^7 Pa,说明预应力锚杆在一定程度上分担了钢筋笼的受力。在分析步 r_3 出现了最大的应力值,在 r_4 分析步即开挖至桩岩界面以下的分析步,钢筋笼底部的最大应力值比上一分析步结束时减小,说明竖向砂浆锚杆起了作用,分担了钢筋笼承受的土压力。从应力云图可以看出钢筋所受最大应力

均未超过 HRB400 钢筋的最大抗拉强度设计值 3.6×10^8 Pa, 整个钢筋笼均未进入塑性应变阶段, 说明钢筋的强度值均能达到要求。

竖向砂浆锚杆部分, 竖向砂浆锚杆上部分 1 m 长的部分是嵌固在上部的桩体内, 当土体未开挖至桩岩界面时, 由于桩岩界面的截面面积发生改变, 最大应力位置发生在该界面附近; 当土体开挖至桩岩界面以下位置后, 由于土压力的改变和作用, 最大应力的位置下移并且相对于 r_1 分析步最大应力值有所增加。且竖向砂浆锚杆均未进入塑性区, 满足设计强度要求。

5.2.2 桩体弯矩

图 8 展示了不同分析步中桩体的弯矩图, 其中负弯矩表示基坑内侧部分受拉。本文中的桩锚支护结构上部有冠梁的作用, 桩体有两层预应力锚杆作用并且基坑底部为岩石属于土质较硬, 所以桩体的

变形应该属于组合型变形。分析步 r_2 开挖土体的深度为 6 m, 由于桩体下部被土体约束, 所以在 5 m 左右桩体出现反弯点, 反弯点以下出现外侧受拉。 $yu1$ 分析步是增加第一道预应力锚杆, 位置在桩体的 3 m 处, 由弯矩图可以看出在 3 m 处由于预应力锚杆的作用弯矩明显减小, 且整个桩体由于预应力锚杆的作用弯矩明显减小。分析步 r_3 中开挖的土体深度达到 9 m, 随着开挖深度增大, 桩体所受的弯矩变大, 且反弯点下移。值得注意的是, 在桩深 9 m 处, 由于斜向锚杆的作用, 桩体所受弯矩明显减小。 $yu2$ 分析步是增加第二道预应力锚杆, 增加预应力锚杆后桩体所受预应力有所减小。分析步 r_4 是开挖由竖向砂浆锚杆支护的岩石部分, 开挖深度至 12.5 m 处, 根据以上的分析, 桩体弯矩图的反弯点下移, 由图可知桩体弯矩在桩体 9 m 处, 斜向砂浆锚杆发挥了明显作用, 桩体的弯矩发生突变。

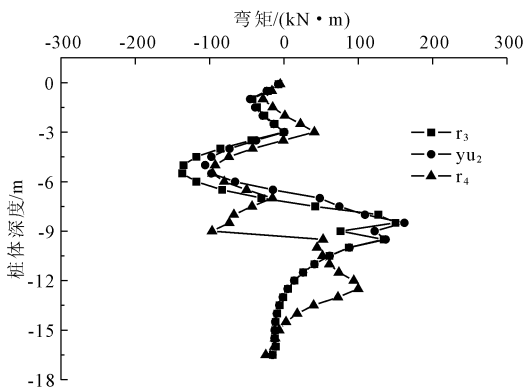
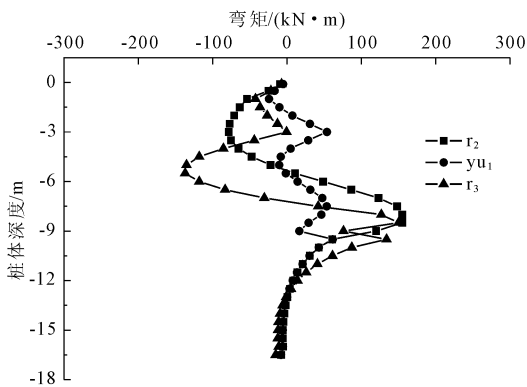


图 8 不同分析步桩体弯矩图

5.3 基坑变形分析

图 9 为不同工况下基坑内侧土体水平位移与基坑深度的曲线图, 曲线图 10 中取向基坑内部的变形为正, 向基坑外侧的变形为负。由于冠梁的作用, 增大了各桩的整体性和刚性, 所以土体的最大位移并未发生在桩体顶部, 变形曲线呈三角形与抛物线形的组合形式, 同样与第三种变形形式相符^[13-14]。从曲线图 9 中可以看到随着开挖基坑深度的增加, 基坑侧壁的位移向基坑内部逐渐增加, 最大的水平位移发生在最后一步开挖完成的第一层土体下侧, 最大位移值为 24.5 mm, 规范中规定的最大基坑侧移为 37.5 mm, 所以基坑的水平位移满足规范的要求。在 r_1 开挖步只开挖 2 m, 所以土体水平位移很小且下部土体基本没有位移。随着基坑开挖过程的进行, r_2 分析步基坑开挖至 6 m 处, 最大水平位移也相应的增大和下移, 对比 r_2 和 $yu1$ 分析步, 由于预应力的作用, 土体水平位移明显减小。同样, 对比 r_3

和 $yu2$ 分析步可以看出第二道预应力锚杆^[15]也起到了减小土体水平位移的作用。所以可以看出预应力锚杆能够有效减少土体的水平位移。对于分析步 r_4 , 在桩深 9 m 处, 及桩岩界面位置未发生水平位移突增的现象, 说明该处界面处于稳定状态。

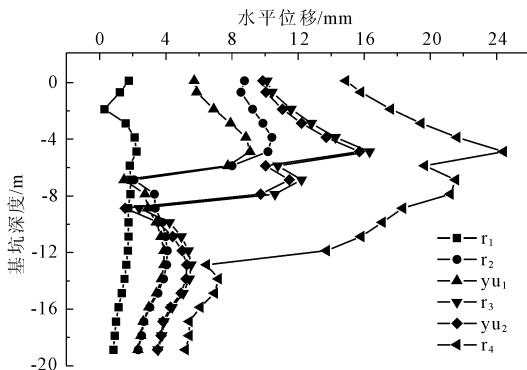


图 9 不同工况下基坑侧壁土体水平位移

图 10 是基坑顶部土体的水平侧移图线, 向坑内

的变形取为正值,下同不再进行特殊说明。从图 11 中可以看出随着距基坑边缘距离的增加基坑顶部土体位移呈递减变化,基坑顶部土体水平位移随开挖深度的增加逐渐增大,在 r_4 分析步达到最大 16 mm。对比 y_{u1} 、 r_2 、 y_{u2} 、 r_3 可以看出预应力锚杆的作用能够明显减小水平位移。

图 11 是基坑顶部土体的沉降曲线,取向下方向的位移为负,从图 11 中可以明显看出基坑顶部土体的变形符合上文提到的第三种变形图线,顶部土体的沉降量与距基坑边缘的距离并非是简单的直线关系,而是在距离基坑边缘 5 m 左右达到了最大沉降量。同时基坑顶部土体的沉降值随基坑开挖而逐渐增大,在 r_4 最后一个分析步达到最大沉降量 2.5 mm,沉降量仅是开挖深度的 0.02%。同样,对比 r_2 与 y_{u1} 、 r_3 与 y_{u2} 分析步可以看出加设预应力锚杆也能够有效减少竖向土体沉降。

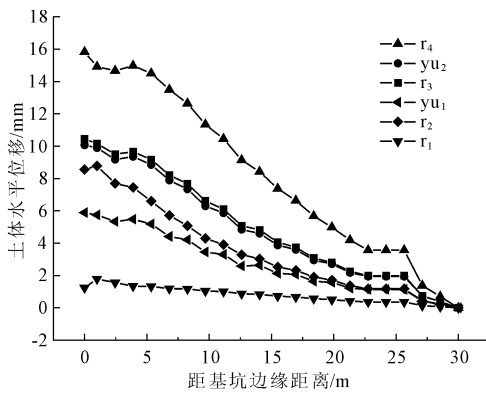


图 10 基坑顶部土体水平位移图

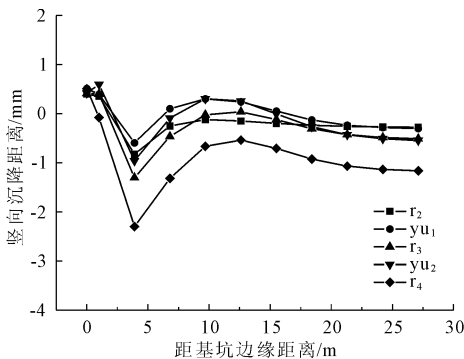


图 11 基坑顶部土体沉降图

6 结 论

无根护壁桩已经成功应用于工程实例当中,本文对无根护壁桩进行了详细的介绍并结合工程实例利用 ABAQUS 软件对其进行了数值模拟,研究了无根护壁桩的力学性能,并得出如下结论:

(1) 无根护壁桩相对于传统的岩质深基坑支护具有工期短、造价低、安全性高的特点,适合进行大规模的推广使用。

(2) 无根护壁桩支护条件下,基坑整体稳定性能够满足规范要求;且桩体混凝土、钢筋笼及竖向砂浆锚杆在各个分析步中均能满足强度要求。

(3) 无根护壁桩支护条件下,各工况条件下基坑侧壁水平位移,基坑顶部水平位移以及基坑顶部沉降位移均能够满足规范要求。

参考文献:

- [1] 涂兵雄. 预应力锚杆柔性支护法机理与力学行为研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 15-18.
- [2] 贾金青, 涂兵雄. 预应力锚杆柔性支护法在超深基坑中的实践[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S1): 530-535.
- [3] 王鸿运, 罗晓辉, 李梦云. 深基坑爆破的安全监控与数值模拟[J]. 工程爆破, 2010, 16(1): 20-24.
- [4] 蔡宝卷, 修良军, 沙友德, 等. 挖孔桩爆破开挖及安全技术措施探讨[J]. 工程爆破, 2014, 20(4): 41-44.
- [5] 贾金青. 一种用于支护基坑侧壁的无根护壁桩及其施工方法: 中华人民共和国, 02129085. 7[P]. 2003-2-26.
- [6] 陈志明. 深基坑工程开挖与支护的三维有限元模拟[D]. 天津: 天津大学, 2010: 25-28.
- [7] 赵静力. 基坑开挖的空间效应及土压力研究[D]. 保定: 河北大学, 2011: 35-36.
- [8] 刘 星. 基坑土体参数及超挖变形的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014: 45-46.
- [9] 周元辅, 邓建辉, 崔玉龙, 等. 基于强度折减法的三维边坡失稳判据[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1430-1437.
- [10] 陈力华, 靳晓光. 有限元强度折减法中边坡三种失效判据的适用性研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 136-146.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑基坑支护技术规程: JGJ120-2012[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2012: 105-109.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010-2010[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2010: 19-21.
- [13] 周 晋. 基坑开挖对邻近建筑物影响的数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(5): 162-166.
- [14] 王 兴. 几种常用基坑变形预测模型的比较与分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2016, 32(1): 62-65.
- [15] 高 磊, 王福彬, 余湘娟. 锚杆参数对基坑坑底回弹和地连墙变形的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(6): 55-59.