

文章编号:1671-6833(2008)04-0124-05

深基坑桩锚支护结构优化设计方法及系统研制

梅 钢, 徐能雄

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘 要: 针对单支点桩锚支护问题, 提出了一种基于施工过程中桩顶侧移控制的优化设计方法, 并建立了优化设计模型。该方法以基坑开挖过程中的桩顶侧移为优化目标, 以锚固点到桩顶距离为优化变量, 以一次位移与二次位移曲线的交点作为优化点, 确定锚杆最优位置, 进而对桩锚支护结构进行优化。根据上述优化设计方法和模型, 采用 VB 语言研制了优化设计系统, 并进行了工程实例分析, 设计结果表明: 优化设计系统是可行的, 优化设计方法和模型是合理的。

关键词: 桩锚支护; 位移; 优化设计

中图分类号: TU 378 **文献标识码:** A

0 引言

深基坑工程中, 基坑设计不仅要满足承载力要求, 更为重要的是其变形的计算和控制^[1-2]。同时, 支护结构是否安全, 不仅看基坑开挖结束时位移的大小, 并且要看施工过程中产生的位移。以施工过程中护坡桩桩顶侧移为优化目标, 以锚固点到桩顶距离为优化变量, 建立了优化设计模型。根据施工过程中桩顶侧移最小这一条件, 确定锚杆最优位置, 进而对桩锚支护结构进行优化设计。

1 桩顶侧移的计算

郭院成等^[1]和王立明^[2]给出了桩锚支护结构的计算模型(图 1), 并计算出了第 i 工况相对于初始位置的桩顶侧移(式 1)和第 i 工况相对于第 1 工况(锚杆张拉后)的桩顶的侧移(式 2)。笔者直接采用了上述计算模型和公式。

1.1 桩锚支护结构计算模型

经过简化的桩锚支护结构计算模型如图 1 所示, 上部锚杆简化为水平弹簧支座; 桩的入土端可以简化为铰支座, 其位置在第一个侧移为零的点处; L_i 为锚固点以上桩长; 在第 i 工况下, L_i ($i=1, 2, \dots, n$) 为锚杆锚固点到坑底的距离, L_{di} 为坑底到铰支座的长度, E_i 是护坡桩所受的土压力 e_i 的合力, 当地基反力系数采用“ m ”法, 且假定坑底以下桩体的形状为直线时, 因桩体变形引起的坑底

土反力呈抛物线分布, F_{di} 是坑底土反力的合力, 其作用线位置位于 O 点往上 $L_d/2$ 处^[1-2]。

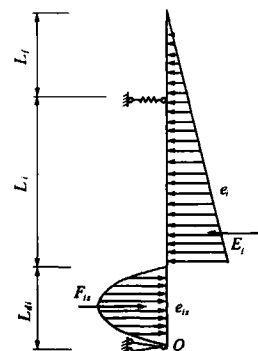


图 1 简化的计算模型

Fig.1 Simplified calculation model

1.2 桩顶侧移的计算

护坡桩施工结束后、基坑开挖前的这一工况为护坡桩产生位移的初始状况, 假设在这一状况护坡桩产生的侧移为零, 则护坡桩此时的位置定义为初始位置^[1-2]。

设预应力锚杆的抗拉刚度为 k , 得第 i 工况相对于初始位置的桩顶侧移计算公式^[1-2]

$$x_i = \frac{T_{i0}}{k} \cdot \frac{L_f + (1 + \eta_i) \cdot L_i}{(1 + \eta_i) \cdot L_i} + \frac{\gamma \cdot K_a \cdot L_f^4}{12EI} \quad (1)$$

式中: T_{i0} 为锚杆拉力相对于初始位置的增量; k 为锚杆水平刚度系数; L_f 为锚固点以上桩长; η_i 为

收稿日期: 2008-07-12; 修订日期: 2008-08-18

作者简介: 梅 钢(1983-), 男, 湖北黄冈人, 中国地质大学硕士生, 主要从事 Kriging 插值、六面体网格剖分研究。

第 i 工况时护坡桩的入土深度系数; L_i 为锚固点到基坑底面的距离; γ 为土的重度; K_a 为主动土压力系数; E 为护坡桩的弹性模量; I 为桩的截面惯性矩。

第 i 工况相对于第 1 工况 (锚杆张拉后) 的桩顶侧移计算公式^[1-2]:

$$x_i^s = x_i - x_1 = \frac{T_{is}}{k} \cdot \frac{L_f + (1 + \eta_i) \cdot L_i}{(1 + \eta_i) \cdot L_i} - \frac{T_{is}}{k} \cdot \frac{L_f + (1 + \eta_i) \cdot L_i}{(1 + \eta_i) \cdot L_i} \quad (2)$$

上式中各个参数的意义同式(1)。

2 锚杆最优位置的确定

桩锚支护结构在锚杆尚未锁定前, 桩身已经产生一定的初变位, 若不考虑开挖过程, 直接以基坑开挖后的受力状态进行计算, 就会使计算结果和实际情况产生较大的差异。所以, 只有当施工过程中产生的位移和施工结束时位移的大小都合理时, 支护结构才是安全的。

2.1 定义

由式(1)可得第 1 个工况相对于初始位置的桩顶侧移为

$$x_1 = \frac{T_{1g}}{k} \cdot \frac{L_f + (1 + \eta_1) \cdot L_1}{(1 + \eta_1) \cdot L_1} + \frac{\gamma \cdot K_a \cdot L_f^4}{12EI} \quad (3)$$

定义上述位移为一次位移;

由式(2)可得最终工况相对于第 1 工况的桩顶侧移

$$x_n^s = x_n - x_1 = \frac{T_{ng}}{k} \cdot \frac{L_f + (1 + \eta_n) \cdot L_n}{(1 + \eta_n) \cdot L_n} - \frac{T_{1g}}{k} \cdot \frac{L_f + (1 + \eta_1) \cdot L_1}{(1 + \eta_1) \cdot L_1} \quad (4)$$

定义上述位移为二次位移;

由式(1)可得最终工况即第 n 工况相对于初始位置的桩顶侧移为

$$x_n = \frac{T_{ng}}{k} \cdot \frac{L_f + (1 + \eta_n) \cdot L_n}{(1 + \eta_n) \cdot L_n} + \frac{\gamma \cdot K_a \cdot L_f^4}{12EI} \quad (5)$$

定义上述位移为最终位移。

一次位移是从开挖基坑到锚杆张拉锚固结束后, 这一过程中桩顶相对于初始位置产生的侧移。二次位移即为锚杆张拉锚固结束后到基坑开挖结束这一过程中桩顶产生的侧移。虽然一次位移、二次位移是以施工过程中某个具体时刻计算出来的, 但是, 它们包含了开挖过程这个时间因素。

2.2 锚杆位置对位移的影响分析

根据公式(3)~(5), 通过自编的程序试算得

到一次位移、二次位移和最终位移分别关于锚固点到桩顶距离的变化曲线, 如图 2 所示。

图中 L_0 表示一次位移等于二次位移时锚固点到桩顶的距离。由图 2 容易看出: 一次位移随着锚固点到桩顶距离的增大而增大, 即锚杆越往下, 一次位移越大; 二次位移随着锚固点到桩顶距离的增大而减小, 即锚杆越往下, 二次位移越小; 而最终位移和一次位移的变化趋势一致。

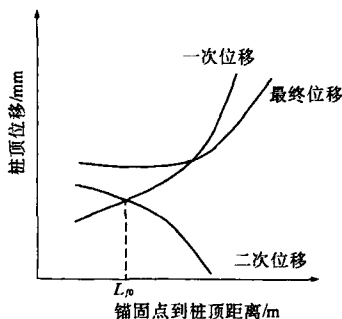


图2 锚杆的最优位置

Fig. 2 Optimal position of anchors

2.3 锚杆的最优位置

如图 2 所示, 一次位移曲线和二次位移曲线的变化趋势相反, 两条曲线至多存在一个交点。交点处, 一次位移等于二次位移, 即锚杆在某一位置时, 一次位移等于二次位移。

笔者选取该交点作为优化点, 对应的锚杆位置为最优位置, 即 $L_f = L_0$ 。这主要是因为以下原因。

当 $L_f < L_0$, 且 L_f 越小时, 虽然一次位移小, 但是二次位移比较大。桩顶侧移由桩的刚体转动产生的位移和桩的挠度产生的位移组成, 计算表明, 桩的刚度非常大, 桩的挠度很小, 所以桩顶侧移主要由刚体转动产生的位移组成。在锚固点处, 桩的侧移等于锚杆的伸长量。二次位移比较大, 即是锚杆的伸长量比较大, 伸长量越大, 锚杆拉力就越大, 从而可能导致锚杆受拉破坏; 并且其他条件基本相同时, 锚杆拉力越大, 桩身的最大弯矩和最大剪力越大, 桩就越容易破坏。

当 $L_f > L_0$, 且 L_f 越大时, 二次位移越小, 但是一次位移却越大, 计算表明, 桩顶侧移越大, 护坡桩在锚杆锚固点处的弯矩也就越大, 即锚杆越往下, 护坡桩在锚杆处的弯矩越大。当锚杆处于某一位置时, 护坡桩在锚杆处的弯矩为桩身最大弯矩。桩身弯矩过大可能会导致破坏。所以, 位移过大的话, 开挖前期支护结构和基坑边坡将不稳定。

综上, 当锚杆位于某一位置时, 一次位移等于

二次位移,该位置就是锚杆最优位置.将计算一次位移、二次位移的公式展开,可以得到都是关于锚固点到桩顶距离 L_f 的函数,此函数表达式比较复杂,笔者采用迭代法通过求解 L_f 的最优值 L_{f0} .

3 基于锚杆最优位置的优化设计

当锚杆的位置固定后,基坑开挖结束时护坡桩的弯矩和剪力是整个开挖过程中最大的,可以由此计算出基坑开挖结束后桩的弯矩和剪力,再根据其确定配筋等.锚杆的拉力在确定锚杆最优位置时已经求出.确定支护结构的内力后,可以通过计算或选取来确定支护结构的参数.能够计算出的参数,如护坡桩的长度、锚杆的位置、锚杆的长度等,采用计算值.需要选取的参数,选取时严格按照规范^[3-4]选取.当进行下面各种验算时,若不满足条件,则重新选取参数,直到满足条件.

笔者对支护结构进行了3种验算:护坡桩正截面抗弯验算、护坡桩斜截面抗剪验算和锚杆水平刚度系数的验算.理论上也应该验算锚杆的抗拉承载力的,但笔者是根据锚杆拉力设计值计算出的锚杆长度,再用计算出的锚杆长度进行抗拉验算的话肯定满足要求.因此,不验算锚杆的抗拉承载力.

4 优化设计系统

4.1 系统简介

为了验证笔者提出的优化设计方法的可行性,采用VB6.0编写了优化设计系统,该系统的程序流程如图3所示.

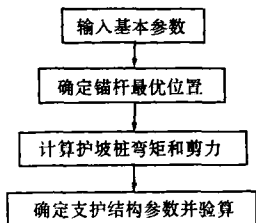


图3 程序流程图

Fig.3 Flowchart of the program

4.2 系统主要功能

4.2.1 确定锚杆最优位置

如图4中所示,在窗口左边输入一些已知的基本参数,如基坑深度、土的重度和地面超载等,而桩直径、桩间距和锚杆水平刚度系数等,在设计前是未知的,但在计算锚杆最优位置时需要采用

这些参数,因此,先给定一个初始值,再根据计算结果调整该值.参数输入完毕之后,单击按钮“开始计算”,右边的图片框中将绘制出一次位移、二次位移和最终位移的变化曲线,从图中清楚看出一次位移和二次位移曲线存在交点.窗口中间的文本框显示出该交点的坐标,即为要求的锚固点到桩顶距离和桩顶侧移.

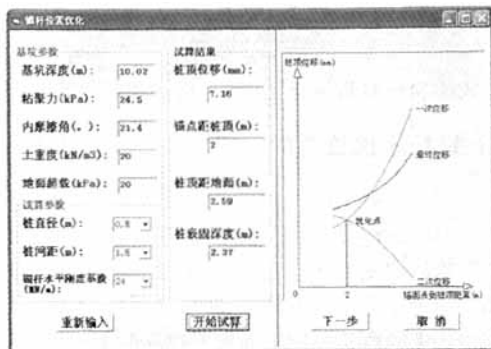


图4 锚杆位置优化

Fig.4 Optimizing the position of an anchor

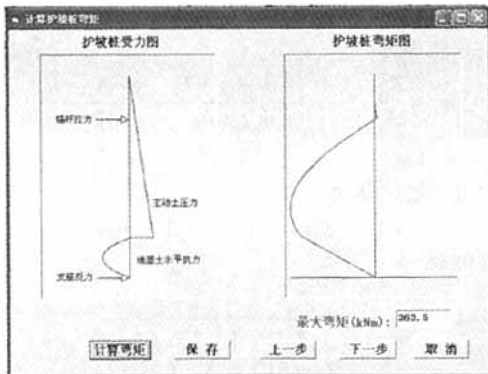


图5 计算护坡桩弯矩

Fig.5 Computing the bending moment of a retaining pile

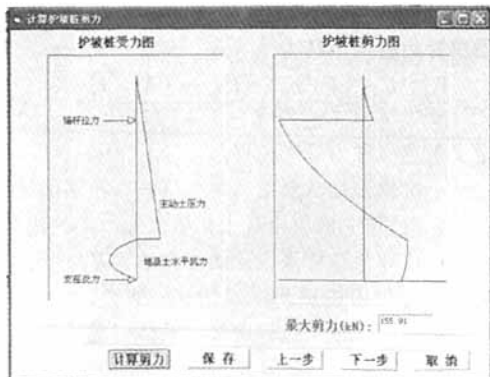


图6 计算护坡桩剪力

Fig.6 Computing the shearing force of a retaining pile

4.2.2 计算护坡桩弯矩和剪力

锚杆位置确定后,护坡桩的受力就可以完全确定.如图 5,窗口左边绘制出护坡桩受力图,右边绘制出弯矩图,同时显示弯矩最大值.在计算弯矩过程中,已经计算出锚杆拉力.

如图 6,窗口左边绘制出受力图,右边绘制出护坡桩的剪力图,同时显示剪力最大值.

4.2.3 确定支护结构参数及验算

上述步骤中计算出了护坡桩最大弯矩和剪力、锚杆拉力,且护坡桩长度和锚杆位置也已确定.如图 7,窗口的左上部分为护坡桩的参数:桩长在计算过程中已经求出;桩径和桩距是设计初假设的,此时不可以更改,若需要修改应返回图 4 所示窗口修改原假设值;主筋、箍筋、保护层厚度和混凝土标号按照规范^[3-4]选取,窗口的左下部分为锚杆的参数:“锚杆距桩顶”已经求出;孔径、锚杆倾角和杆体材料按规范^[3-4]选取;水平间距取桩距.以上参数确定后,则可以根据锚杆拉力设计值计算出锚杆长度.窗口右边为支护结构验算,理论上不需要进行锚杆抗拉验算.



图 7 支护结构设计参数及验算
Fig.7 Design parameters of a retaining structure and checking computations

5 工程算例

5.1 工程概况

某综合楼降水护坡工程建筑面积为 50 082 m²,地上 13 层,地下 4 层.基坑开挖分为 7 段,各段开挖深度和土层物理力学指标不同.本例中只计算 4-4 剖面,该剖面基坑开挖深度为 10.02 m,计算时考虑地面超载 20 kPa.场地地质条件和计算参数见表 1.地下水位标高为 -8.5 m.

表 1 工程地质条件和计算参数

Tab.1 Engineering geological conditions and computation parameters

土层	层底 标高/m	层厚 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	φ(°)	c/kPa
砂粉黏粉	-0.9	0.90	20	15	24
黏土	-5.87	4.97	20	25	26
粘粉粉粘	-10.86	4.99	20	20	25
黏土	-14.54	3.68	20	20	22

5.2 设计计算结果

5.2.1 基坑支护基本参数

在基坑开挖及支护的过程中,进行了降水,因此不考虑地下水对土层的影响.土层重度、c 和 φ 都按厚度加权,其中,φ 根据 tanφ 对厚度加权再用反三角函数求出.实际所需基本参数如表 2 所示.

5.2.2 护坡桩设计

根据表 2 中基本参数,计算得到的桩身最大弯矩计算值为 363.50 kN·m,最大剪力计算值为 155.91 kN.根据护坡桩的最大弯矩和最大剪力,反复试算得到护坡桩的各项参数如表 3 所示.护坡桩桩顶离地面 2.59 m,在此 2.59 m 内可采用挡土墙或土钉支护,笔者不研究此部分支护设计.

表 2 基坑支护基本参数

Tab.2 Basic parameters of the retaining in foundation pit

基本参数	取值
基坑深度/m	10.02
c/kPa	24.5
φ(°)	21.4
重度/(kN·m ⁻³)	20
地面超载/kPa	20
桩径/m	0.8
桩距/m	1.8
锚杆水平刚度系数/(kN·m ⁻¹)	24 000

表 3 支护结构设计结果

Tab.3 Design of retaining structure

护坡桩		锚杆	
基本参数	取值	基本参数	取值
桩长/m	9.8	L _p /m	2.0
桩距/m	1.8	长度/m	16.9
桩径/m	0.8	倾角(°)	20
主筋	14Φ25	孔径/mm	180
箍筋	Φ6@200	水平间距/m	1.8
混凝土标号	C20	杆体材料	6 根 1860 度钢绞线
保护层厚度/mm	45		

5.2.3 锚杆的设计

根据表 2 中基本参数,计算或选取得到锚杆的各项参数如表 3 所示.注浆材料采用水泥砂浆.

5.2.4 桩锚支护结构的验算

支护结构的各项验算结果如表 4 所示.锚杆水平刚度系数实际设计值(26 175 kN/m)比原假设值(24 000 kN/m)稍大,但经计算表明,锚杆水平刚度系数对确定锚杆位置的影响不大,对桩顶侧移的影响也不大.所以,只要实际设计出的值比原假设值大即可,按照原假设出的值进行的计算也是合理的,无需重新试算.

表 4 支护结构的验算

Tab. 4 Checking calculations of the retaining structure

验算	项目	取值
护坡桩	弯矩设计值/(kN·m)	454.38
正截面抗弯验算	抗弯承载力/(kN·m)	500.10
护坡桩	剪力设计值/kN	194.89
斜截面抗剪验算	抗剪承载力/kN	1 081.34
锚杆抗拉验算	拉力设计值/kN	218.16
	抗拉承载力/kN	232.94

6 结束语

(1)针对单支点桩锚支护问题,提出了一种基于施工过程中桩顶侧移控制的优化设计方法.

该方法以基坑开挖过程中的桩顶侧移为优化目标,以锚固点到桩顶距离为优化变量,以一次位移与二次位移曲线的交点作为优化点,确定锚杆最优位置,进而对桩锚支护结构进行优化.

(2)根据优化设计方法建立了优化设计模型,该模型定义了一次位移和二次位移等概念,计算表明:锚固点到桩顶距离变化时,一次位移曲线和二次位移曲线变化趋势相反,并且有且仅有一个交点.

(3)根据优化设计方法和模型,采用 VB 语言编制了优化设计系统,解决了手算效率低、准确性不高以及不一定能够得出优化结果等问题.

(4)利用优化设计系统,进行了工程实例分析,设计结果表明:优化设计系统是可行的,优化设计方法和模型是合理的.

参考文献:

- [1] 郭院成,王立明,曾力.基于位移控制的单支点桩锚支护结构的优化设计[J].郑州大学学报:工学版,2004,25(4):4-7.
- [2] 王立明.单支点桩锚支护结构的变形计算及变形控制的反演分析[D].郑州大学,2004.25-42.
- [3] JGJ 120-99,建筑基坑支护技术规程[S].
- [4] GB 50010-2002,混凝土结构设计规范[S].

Optimization Method and Program Developing of Pile-anchor Retaining Structure in Deep Foundation Pit

MEI Gang, XU Neng-xiong

(School of Engineering & Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at single fulcrum pile-anchor retaining structures, a new optimization method based on controlling the displacement of the top end of retaining piles during excavation has been proposed, and a related optimization model is established. In the optimization method, the displacement of the top end of a retaining pile is the optimization target, the distance between anchor and the top end of the retaining pile is the optimization variation. The optimal position of an anchor is set out when the first-displacement curve intersects the second-displacement one. According to the optimization method and model, an optimization program is developed using VB program language. The design results of engineering example generated by the optimization program show that the optimization program is viable and the optimization method and model are reasonable.

Key words: pile-anchor retaining structure; displacement; optimization