

基坑支护桩结构优化设计

The optimal design of soldier pile system in deep excavation

莫海鸿¹ 周汉香¹ 赖爱平²

(1. 华南理工大学 建筑学院土木工程系, 广东 广州 510640 2. 广州市自来水公司 设计室, 广东 广州 510160)

摘 要 采用弯曲剪切扭转有限元模式计算圈梁, 采用杆系有限元增量法分析支护桩。通过变形协调条件求解二者的相互作用, 以各工况开挖深度、各支撑施工位置和圈梁截面为优化变量, 以支护桩变形曲线面积建立优化目标, 研究了多支点支护结构中圈梁和施工工艺的优化准则, 并通过复合形法求解, 形成了比较完整的支护桩结构优化设计体系。

关键词 支护桩结构, 圈梁, 施工工艺, 复合形法, 最优化设计

中图分类号: TU 473.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2001)02-0144-05

作者简介 莫海鸿, 男, 1955 年生, 教授, 博士生导师。1988 年于武汉水利电力大学获岩土工程博士学位, 1988~1990 年在同济大学做博士后研究, 主要从事地下构筑物的设计与施工的教学和科研工作。

MO Hai-hong¹ ZHOU Han-xiang¹ LAI Ai-ping²

(1. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China 2. Guangzhou Waterworks Company, Guangzhou 510160, China)

Abstract Timoshenko beam elements and linear torsional elements are adopted for the ring beam, nonlinear FEM based on Winkler model is used for the soldier pile, then the effect of ring beam is analyzed under the continuous deformation condition. The optimal design parameters are the position of struts, the depth of every excavation step as well as the size of ring beam, which are solved by the complex method based on the minimum pile deformation and optimization strategy presented in the paper. An integrate optimal system is formulated in this paper.

Key words soldier pile system, the ring beam, the construction procedure, the complex method, the optimal design

1 前 言*

深基坑支护结构优化设计具有显著的技术经济意义, 国内以往的研究主要基于等值梁法基础上的支护体系的经济性优化分析^[1]。不精确力学模型基础上的优化分析是粗糙的, 在变形控制成为深基坑支护设计主要考虑因素的情况下, 有必要首先从计算模型入手, 采用能考虑施工全过程的杆系有限元增量法进行结构优化分析^[2]。在该法中, 通常将圈梁作为安全储备, 计算时不考虑其作用。这种状况一方面使得圈梁作用机理不清晰, 从而圈梁的设计缺乏指导与依据; 另一方面, 可能使得支护桩偏于不安全。本文采用弯剪扭有限元模式计算圈梁, 采用杆系有限元增量法计算支护桩, 在地层损失法的基础上^[3], 根据施工工况, 分别独立优化圈梁截面和施工工艺(开挖与支撑位置), 根据变形协调条件计算圈梁效应并协调二者的优化, 形成以支护桩变形曲线面积为基础的优化模型并由复合形法求解, 实现对支护桩结构的优化设计。

2 圈梁效应计算模型

设基坑某边边长为 L , 支护桩数量为 n , 取第 i 根考察。在任一工况, 设第 i 根桩的桩顶位移为 U_i , 转角为 θ_i , 土压力为 E_i , 圈梁对桩的水平力 T_i 、弯矩

M_i 共同作用下产生的。假设桩是线弹性的, 则由叠加原理得到

$$U_i = U(E_i, T_i, M_i) = U_{E_i} - \delta_{PTi}^U T_i - \delta_{PMi}^U M_i \quad (1)$$

$$\theta_i = \theta(E_i, T_i, M_i) = \theta_{E_i} - \delta_{PTi}^\theta T_i - \delta_{PMi}^\theta M_i \quad (2)$$

式中 U_{E_i} , θ_{E_i} 分别为不考虑圈梁作用时, 土压力单独作用下桩顶在垂直轴线方向发生的水平位移和转角; δ_{PTi}^U , δ_{PTi}^θ 分别为桩顶作用单位水平力, 桩顶在垂直轴线方向发生的水平位移和转角; δ_{PMi}^U , δ_{PMi}^θ 分别为桩顶作用单位力矩时, 桩顶在垂直轴线方向发生的水平位移和转角。以上效应系数采用增量法计算^[2]。

在任一工况, 设 n 根桩对圈梁作用的水平力分别为 T_1, T_2, \dots, T_n , 扭转力矩分别为 M_1, M_2, \dots, M_n 。在水平力和扭矩的作用下, 圈梁发生弯剪扭变形。圈梁一般采用矩形截面, 它具有 2 个对称轴, 截面形心与扭转中心重合。圈梁扭转变形和弯剪变形可看作相互独立, 可以分别计算。由叠加原理, 圈梁在第 i 点处产生的水平位移和扭转角分别为

$$U_i = \sum_{j=1}^n \delta_{Bij}^U T_j \quad (3)$$

$$\theta_i = \sum_{j=1}^n \delta_{Bij}^\theta M_j \quad (4)$$

* 基金项目: 广东省水利厅科技计划资助项目(98-14)

收稿日期: 2000-08-27

式中 δ_{Bij}^U 为第 j 个单位水平力 ($T_j = 1$) 单独作用下, 圈梁在第 i 点产生的水平位移; δ_{Bij}^θ 为第 j 个单位扭矩 ($M_j = 1$) 单独作用下, 圈梁在第 i 点产生的扭转角。本文采用 3 节点铁摩辛柯梁单元计算圈梁的弯曲和剪切变形, 采用 2 节点扭转单元计算圈梁的扭转变形^[4]。土压力空间分布及其它基本假定则仍采用文献[5, 6]建议的模式。

由变形协调原理, 在第 i 点处, 桩顶位移与圈梁水平位移, 桩顶转角和圈梁的扭转角相等, 即

$$U_{E_i} - \delta_{PTi}^U T_i - \delta_{PMi}^U M_i = \sum_{j=1}^n \delta_{Bij}^U T_j \quad (5)$$

$$\theta_{E_i} - \delta_{PTi}^\theta T_i - \delta_{PMi}^\theta M_i = \sum_{j=1}^n \delta_{Bij}^\theta T_j \quad (6)$$

移项并整理成矩阵形式为

$$AT + BM = U \quad (7)$$

$$CM + DT = \theta \quad (8)$$

式中 T, M 分别为待求的水平力矩阵和扭矩矩阵; 其它为对应的已知系数矩阵。由于 B, D 为对角阵, 应优先考虑。经矩阵运算后, 得

$$T = [D - CB^{-1}A]^{-1}(\theta - CB^{-1}U) \quad (9)$$

$$M = B^{-1}U - B^{-1}AT \quad (10)$$

求出桩顶水平力 T 和力矩 M 后, 即可分别代入支护桩和圈梁模型进行计算分析。

3 同步优化基本思路

地层损失法的基本理论认为^[3], 支护结构变形量与开挖面的隆起量及非开挖侧的沉降量之间存在相关性。据此建立多支点支护桩结构优化模式, 即支护桩变形曲线面积最小的方案对周围环境影响最小, 并作为基本优化目标。假定初步方案已知, 开挖步数与支撑数量满足一撑一挖模式, 即支护桩刚度、嵌固深度、开挖步数与支撑数量、支撑刚度与预应力等已知, 需要优化计算的是各步开挖深度、各支撑位置和圈梁截面尺寸。

优化模式的待求参数与优化目标间不存在显函数关系式, 且无导数信息可以利用并为一个有约束的非线性离散变量优化问题。因此采用复合形法 (complex method) 进行求解^[7, 8]。计算难点在于: ①为保证优化解的精度, 支护桩单元长度应尽可能小, 有限元运算量大; ②变量数目较多, 以 4 步开挖 3 道支撑为例, 加上圈梁长宽, 共 9 个, 而现有的任何约束非线性优化解法, 尚无法有效地解决如此多变量的优化问题, 计算效率将明显受到制约; ③由圈梁计算模型求得的支护桩和圈梁之间的相互作用力, 对支护桩而言, 在增量法计算模式中, 该法求得的是各工况作用于桩顶的附加荷载, 称之为附加荷载法。

由式(9)可知, 计算时各工况均有多项矩阵求逆过程, 运算量大, 因此难点是如何处理众多的优化变量。首先将支护桩结构分为圈梁和施工工艺两个部分, 分别研究其优化方法, 优化计算时侧重于保证有限元精度。其次, 对施工工艺优化, 当考虑圈梁效应时, 将圈梁等效为一个支撑弹簧和一个扭转弹簧, 参与支护桩计算, 称之为附加刚度法。一般结构计算对应的是基坑边的中部桩, 因此可以由圈梁计算模式求出圈梁对应位置的抗推(侧移)和扭转柔度系数, 取其倒数作为支撑弹簧和扭转弹簧的刚度 K_{bh} 和 $K_{b\theta}$ 。最后, 通过圈梁效应联系二者。

若研究表明, 不考虑和考虑圈梁效应得到相同的施工工艺优化解, 不考虑和考虑施工工艺优化得到相同的圈梁截面优化解, 相同计算参数下, 附加荷载法和附加刚度法得到相同的支护桩计算结果。则此先分解后综合的方法可以有效地优化降维, 实现圈梁截面和施工工艺的同步优化。

4 圈梁优化设计

将求解出的各桩顶的水平力和弯矩作为荷载, 代入圈梁弯剪扭模型进行圈梁结构计算。设梁宽为 b , 梁高为 h , 桩径为 d 。

计算表明, 在其它条件不变时, 随着圈梁刚度增加, 支护桩变形逐步减少, 但刚度超过一定数值后, 变形趋于稳定, 而圈梁内力则继续增加, 且计算出的截面内力分布呈现显著的区域性。因此, 其截面优化设计应着重: ①优化目标是变形曲线面积值趋于收敛, 以选择合适的截面, 将圈梁分段, 根据内力包络值分段配筋; ②规范中的受扭计算公式, 只适用于平衡扭矩, 而本文模型所求得的是附加扭矩, 由于圈梁一般满足 $b/h < 6$ 的条件且计算表明圈梁以弯剪变形为主, 扭转变形占一定的比例, 本文仍参照平衡扭矩方法考虑; ③基坑施工通常采用分段分块开挖, 基坑计算边长是动态调整的, 这对圈梁优化设计必然会产生影响。本文采用改变计算模型中参与计算的支护桩数量的方法对此进行研究。

实际工程中, 圈梁截面 ($b \times h$) 组合有限。本文取 $b = (1.0 \sim 2.0)d$, 循环增量为 $0.1d$, $h = (0.3 \sim 1.0)b$, 循环增量为 $0.1b$ 。组合数量可以满足工程需要。本文以支护桩变形稳定, 即最后工况支护桩变形曲线面积收敛为目标函数, 逐一计算圈梁截面组合。对收敛对应的截面, 采用弯剪承载力进行截面校核。若满足在经济配筋率范围内, 则取之为最优截面, 并按同步优化思路, 比较施工工艺优化前和优化后的圈梁优化截面。对悬臂支护桩结构, 只有圈梁起唯一调整作用, 则

优化时还要综合考虑支护桩配筋减少与圈梁配筋增加、所允许的支护桩最大变形量、经济配筋率等因素。

5 施工工艺优化设计

5.1 优化目标

优化目标是支护桩变形曲线面积值 A 最小。分 3 种情况：

目标 1,在初步方案下,实现对周围环境的扰动最小,即支护桩变形曲线面积值 A 最小。

目标 2,当地基条件较好时,探讨能否通过优化计算减少一道或多道支撑,可以结合信息化施工反演分析以指导此设计。

目标 3,在深厚软土地基中,在满足抗隆起验算和开挖侧土弹簧未全部屈服(摩尔-库伦准则)的极限条件下,比较增加支撑与增加嵌固深度两方案,作出优化设计。

5.2 约束条件

设锚固数量为 n 道,则施工总工况为 $2n+1$ 步。

(1)几何约束^[2]

单步开挖深度值 C_{\min}, C_{\max} ,如机械开挖时,单步开挖深度通常需要大于 4 m ;支撑开挖相互约束值 Δ_1 ,支撑位置在相应的开挖步深度范围内变化,距离开挖面要保证施做的需要;支撑与主体结构约束值 Δ_2 ,支撑与地下室楼板、梁的施工要互不干扰;支撑间约束值 Δ_3 ,一般上下层支撑间距人工挖土时宜大于 3 m ,机械挖土时宜大于 4 m 。

(2)变形约束^[3]

参照有关规程,由基坑变形控制保护等级决定,如特级时,取围护桩允许最大水平位移 $[\delta]=0.14\%H_c$, H_c 为基坑开挖总深度。

(3)内力约束

支护桩刚度已知,可以通过限制抗弯抗剪配筋率 ρ_b 和 ρ_v 确定支护桩的允许承载力 $[M]$ 与 $[V]$,并以之考虑经济性。对撑锚,通过屈曲和弯压计算确定允许承载力,建立如下数学模型:

目标函数

$$\min A_j \quad j=2n+1 \quad (11)$$

约束条件

$$\max \delta_i \leq [\delta] \quad i=1, 2, \dots, 2n+1 \quad (12)$$

$$\max M_i \leq [M] \quad i=1, 2, \dots, 2n+1 \quad (13)$$

$$\max V_i \leq [V] \quad i=1, 2, \dots, 2n+1 \quad (14)$$

$$\max N_{ij} \leq [N_i] \quad i=1, 2, \dots, n \quad j=1, 2, \dots, 2n+1 \quad (15)$$

$$h_{pi} + \Delta_i \leq h_{ci} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$\Delta_2 \leq |h_{pi} - h_{fi}| \quad i=1, 2, \dots, n \quad (17)$$

$$C_{\min} \leq h_{(i+1)} - h_{ci} \leq C_{\max} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$\Delta_3 \leq h_{pi} - h_{(i-1)} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (19)$$

$$|H_c - h_{ci}| \leq E_L \quad i=n+1 \quad (20)$$

式中 A 为变形曲线面积积分值; δ, M, V 分别为支护桩位移、弯矩、剪力值; N 为支撑轴力值;方括号内为允许限值; h_p, h_c, h_f 分别为支撑、开挖、楼板的位置, E_L 为有限元桩单元计算长度,本文取 0.2 m 。复合形法求得的变量连续解代入有限元计算前必须取为 E_L 的倍数。

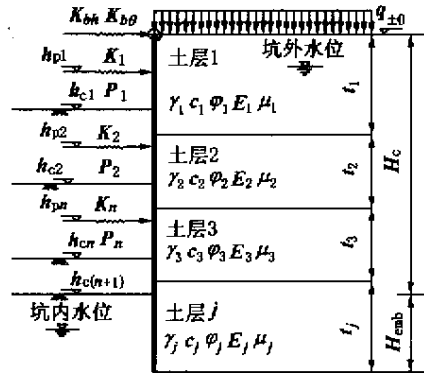


图1 施工工艺优化计算图示

Fig.1 The optimal calculation of construction

5.3 优化设计过程

优化计算时,随着变量和约束的增多,复合形法的计算效率显著降低,尤其是约束数比变量数更制约寻优效率。此外同任何其他约束直接搜索法一样,该法也存在着无法证明收敛于全局最优的问题。为解决这两个问题,采用如下策略:根据式(18),可以预计可能的开挖组合相对而言是有限的,通过调整 C_{\min} 和 C_{\max} 来实现;求出所有开挖组合后,即可只以支撑为待优化变量,循环对每一组合用复合形法优化计算支撑位置;同时,将变形、内力约束(隐约束)与目标函数相结合,与几何约束(显约束)相分离。显然即使求得的是局部最优解,由于有很多种开挖组合,因此可以求出足够多的可选优化方案。按照不同目标的要求选择可选方案中最好的一种,作为最后的优化方案。从而一方面大为减小待优化变量和显约束数量,另一方面较好地解决了局部最优问题。计算图示见图1,具体计算过程如下:

(1)建立约束条件,考虑圈梁时,采用附加刚度法计算其效应。

(2)运用穷举计算所有可能的开挖组合数,对每一组合计算以下(3)~(7)。

(3)用增量法计算各工况,检查所有的约束条件,对满足约束者计算挠曲线与初始轴线间的总变形面积。

(4) 将面积分为开挖段与嵌固段两部分, 考虑各种因素作适当的修正并模拟沉降面积和隆起面积。

(5) 根据最后工况支护桩变形面积最小的原则, 采用复合形法寻找每一开挖组合下最优支撑位置。

(6) 循环(2)~(5)。

(7) 输出最终优化结果。

(8) 改变开挖工艺, 减少支撑数量, 结合信息化施工反演分析, 重复(1)~(7), 探讨减少支撑的可行性, 进行目标 2 的优化分析。

(9) 根据最后工况变形面积最小和开挖侧被动区土弹簧全部屈服的极限条件以及抗隆起计算的要求, 重复(1)~(8), 探讨深厚软土层情况下, 增加嵌固深度与增加支撑数量两种方案的可行性, 进行目标 3 的优化分析。

(10) 改变初步方案中已知条件, 选择优化目标, 重复(1)~(10), 直至得到需要的优化解。

6 算 例

某采用挖孔桩加两道锚杆支护基坑, 初步方案和

地质参数见文献[9]。按照本文优化方法, 进行圈梁和施工工艺优化设计, 并验证同步优化方法的可行性。

最后工况各输出表中, p 表示桩, b 表示圈梁, M , V , N , T 分别表示弯矩、剪力、轴力、扭矩最大值, A 表示变形曲线面积值, δ 表示桩身最大位移, 圈梁两端边界取为固定。约束条件为 $[\delta] = 0.3\%H_c = 28.8 \text{ mm}$, $\Delta_1 = 0.0 \text{ m}$, $\Delta_3 = 3.0 \text{ m}$, 承载力限值为 $[N] = 720 \text{ kN}$, $[M] = 1400 \sim 1600 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $[V] = 800 \sim 1000 \text{ kN}$ 。目标 1 时取 $C_{\min} = 2.0 \text{ m}$, $C_{\max} = 5.0 \text{ m}$ 。还考虑了减少一道锚杆的方案, 在目标 2 时取 $C_{\min} = 4.0 \text{ m}$, $C_{\max} = 6.0 \text{ m}$ 。

根据支护桩变形曲线面积收敛这一判据, 初步方案下(见表 1, 未考虑施工工艺优化)圈梁优化解为 $b = 1.0d$, $h = 0.3b$ 。同理, 在目标 1 优化施工方案下(见表 2), 圈梁优化解仍为 $b = 1.0d$, $h = 0.3b$ 。表 3 表明, 目标 1 实现, 目标 2 由于轴力和弯矩超出限值而没有优化解, 所得的施工工艺优化解见后 5 列, 考虑和不考虑圈梁效应差别很小。表 4 给出在求得的优化圈梁截面下考虑圈梁效应时, 支护桩采用附加荷载和附加

表 1 初步施工方案下不同圈梁截面的支护桩和圈梁计算

Table 1 The calculated output of different ring beam section before optimization

b/d	h/b	A_p (10^{-1} m^2)	M_p /($\text{kN} \cdot \text{m}$)		V_p /kN		N_1 /kN	N_2 /kN	M_b /($\text{kN} \cdot \text{m}$)		V_b /kN		T_b /($\text{kN} \cdot \text{m}$)	
			正值	负值	正值	负值			正值	负值	正值	负值	正值	负值
1.0	0.3	1.108	788	661	561	491	652	506	234	379	141	80	21	0.5
1.0	0.4	1.098	787	655	561	488	651	505	282	499	171	112	36	0.2
1.0	0.5	1.084	785	647	563	485	648	504	329	614	201	142	52	0.1
1.1	0.3	1.098	787	654	561	488	651	505	301	545	173	116	29	0.2
1.1	0.4	1.075	786	642	565	483	647	504	366	710	213	157	48	0.2

表 2 优化施工方案下不同圈梁截面的支护桩和圈梁计算

Table 2 The calculated output of different ring beam section after optimization

b/d	h/b	A_p (10^{-1} m^2)	M_p /($\text{kN} \cdot \text{m}$)		V_p /kN		N_1 /kN	N_2 /kN	M_b /($\text{kN} \cdot \text{m}$)		V_b /kN		T_b /($\text{kN} \cdot \text{m}$)	
			正值	负值	正值	负值			正值	负值	正值	负值	正值	负值
1.0	0.3	0.649	879	1281	649	372	543	515	214	103	128	16	26	3.9
1.0	0.4	0.645	873	1298	651	370	543	515	256	149	155	30	44	6.6
1.0	0.5	0.637	870	1311	653	368	542	514	298	193	181	43	63	9.5
1.1	0.3	0.644	872	1295	650	369	543	515	272	157	156	30	35	4.8
1.1	0.4	0.631	870	1315	653	367	541	513	332	219	192	46	59	8.0

表 3 考虑与不考虑圈梁效应下施工工艺优化解与支护桩输出

Table 3 The calculated output of the optimal construction and soldier pile with and without ring beam

项目	δ /mm	A_p (10^{-1} m^2)	M_p /($\text{kN} \cdot \text{m}$)		V_p /kN		N_1 /kN	N_2 /kN	h_{c1} /m	h_{c2} /m	h_{c3} /m	h_{p1} /m	h_{p2} /m
			正值	负值	正值	负值							
原设计	21.03	1.60	591	1085	550	561	697	540	2.6	6.6	9.6	2.0	6.0
优化目标 1b	8.09	0.64	927	1352	693	372	543	508	2.2	5.0	9.6	0.0	3.2
优化目标 1	17.71	0.95	1395	912	562	486	547	574	2.2	5.0	9.6	0.2	3.2
优化目标 2b	16.45	2.42	1231	957	701	492	936	—	4.2	9.6	—	2.8	—
优化目标 2	37.27	4.14	1031	1863	710	528	999	—	4.2	9.6	—	2.8	—

注: 1b、2b 表示采用圈梁优化截面 $b = 1.0d$, $h = 0.3b$ 后的结果, 1、2 表示不考虑圈梁作用的结果

表 4 初步方案下附加荷载法与附加刚度法圈梁效应的比较

Table 4 The comparison of ring beam effect obtained from load and stiffness method

方法	δ/mm	$A_p/(10^{-1}\text{m}^2)$	$M_p/(\text{kN}\cdot\text{m})$		V_p/kN		N_1/kN	N_2/kN
			正值	负值	正值	负值		
荷载法	10.5	1.23	811	722	565	509	666	508
刚度法	9.2	1.11	788	661	561	491	652	506
(百分比)	(88%)	(90%)	(97%)	(92%)	(99%)	(97%)	(98%)	(99%)

表 5 初步方案下不同基坑边长下的圈梁效应的比较

Table 5 The comparison of ring beam effect with variable pit length

桩数 /根	δ /mm	A_p (10^{-1}m^2)	$M_p/(\text{kN}\cdot\text{m})$		V_p/kN		N_1 /kN	N_2 /kN	$M_b/(\text{kN}\cdot\text{m})$		V_b/kN		$T_b/(\text{kN}\cdot\text{m})$	
			正值	负值	正值	负值			正值	负值	正值	负值	正值	负值
30	8.99	1.077	783	643	562	483	644	504	256	385	141	82	26	0.5
35	9.35	1.112	788	664	560	491	652	506	251	382	141	81	16	0.1
40	9.16	1.108	788	661	561	491	652	506	234	379	141	80	22	0.5
45	9.26	1.119	790	667	561	493	655	506	234	379	141	79	27	0.1

刚度法计算的比较。表 5 给出初步方案时 ,不同基坑边长下圈梁效应的差异。

7 结 语

(1)将多支点支护桩结构体系优化设计分成施工工艺和圈梁截面优化两部分 ,以支护桩变形面积为基础进行了初步研究 ,探讨了同步优化的必要性。算例表明 ,不考虑和考虑圈梁效应得到基本相同的施工工艺优化解 ,不考虑和考虑施工工艺优化得到相同的圈梁截面优化解 ,附加荷载法和附加刚度法得到基本相同的支护桩计算结果。同步优化思路是可行的 ,能够有效解决优化变量和约束过多的难题 ,但所提的同步模式的严密性有待理论上的进一步论证。

(2)所提出的圈梁和施工工艺优化方法与策略能够有效地对支护桩结构进行系统性的优化设计 ,优化策略能够较好地发挥复合形法(或其他直接搜索法)的求解优势 ,使该模型适用于支撑数目不大于 5 道的优化问题。模型适用性广 ,改换该模型中的目标函数和约束函数 ,则适用于如内力最小等优化问题。

(3)设计时宜考虑圈梁效应 ,对多支点支护 ,可以采用附加荷载或附加刚度法计算 ,结果相差不大 ,对悬臂支护结构 ,应按附加荷载法计算。如果不考虑圈梁效应 ,则支护桩宜按对称配筋 ,否则抗弯可能偏于不安全。杆系有限元增量法可以和圈梁效应相结合。优化圈梁设计将提高整个支护桩结构的安全性和经济性。

(4)多支点支护时 ,圈梁效应与圈梁截面尺寸不存在线性递增关系 ,可以根据支护桩变形面积值收敛来优化截面设计。悬臂支护时 ,圈梁效应与圈梁截面尺寸存在近似线性递增关系 ,但圈梁内力亦持续增加 ,其优化设计要综合考虑各种因素 ,宜按控制变形量并使万方数据

得支护桩和圈梁配筋在经济配筋率范围内来确定。

(5)只考虑弯曲效应时 ,圈梁所受水平力偏小 ,求得内力亦偏小。圈梁内力分布呈现显著的区域性 ,受力以弯曲和剪切为主 ,扭转效应导致的剪力不大 ,宜计算和分段配筋。对封闭式圈梁 ,控制截面是圈梁两端 ,需采取相应的措施。

(6)同一圈梁截面下 ,基坑计算边长短时的圈梁效应比计算边长长时显著。圈梁最大内力随基坑计算边长的增加而减小并趋于一恒定值 ,该临界边长值约为基坑开挖总深度的 5 倍。

参考文献 :

[1] 龚晓南 ,杨晓军 ,俞建霖.基坑围护设计若干问题[A].基坑支护技术进展 ,基坑工程学术讨论会论文集[C].建筑技术 ,1998(增刊) :94~101.

[2] YB 9258—97,建筑基坑工程技术规范[S].

[3] 刘建航 ,侯学渊.基坑工程手册[M].北京 :中国建筑工业出版社 ,1997.212~217.

[4] 冯紫良 ,戴仁杰.杆系结构的计算机分析[M].上海 :同济大学出版社 ,1991.69~73.

[5] 曾庆义 ,刘明成.支护桩圈梁的作用机理与计算分析[J].岩土力学 ,1995 ,16(2) :74~82.

[6] 曹俊平 ,平 扬 ,等.考虑圈梁空间作用的深基坑双排桩支护计算方法研究[J].岩石力学与工程学报 ,1999 ,18(6) :709~712.

[7] 薛履中.工程最优化技术[M].天津 :天津大学出版社 ,1988.

[8] 韦鹤平.最优化技术应用[M].上海 :同济大学出版社 ,1988.

[9] 王小文 ,钱春阳.深基坑支护结构变形及内力有限元分析[A].广州地区岩土工程青年专家学术论坛论文集[C].广州建筑 ,1999(增刊) :54~61.