DOI:10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2006.03.027
第18卷 第3期
2006年9月
甘肃科学学报
Journal of Gansu Sciences
Vol.18 No.3
Sep.2006

框架预应力锚杆支挡结构的分部优化设计策略

周 勇，朱彦鹏
(兰州理工大学 土木工程学院，甘肃 兰州 730050)

摘 要： 从结构优化设计理论的观点出发，提出了框架预应力锚杆支挡结构的分部优化设计策略，设计结果使得结构整体内力分布更均匀、设计更合理、材料更节省，并结合某黄土边坡框架预应力锚杆支挡结构进行了实证.其优化设计思想可为类似支挡结构的优化设计参考.

关键词： 框架；预应力锚杆；支挡结构；分部优化设计策略
中图分类号： TU318 **文献标识码：** A **文章编号：** 1004-0366(2006)03-0097-04

Local Optimal Design Strategies for Grillage Supporting Structure with Prestressed Anchor Bars

ZHOU Yong, ZHU Yan-peng
(*School of Civil Engineering, Lanzhou University of Science and Technology, Lanzhou* 730050, *China*)

Abstract: Based on the viewpoint of optimal design, the local strategies for grillage supporting structure with prestressed anchor bars are proposed. The results show the integral internal force distribution of the structure is more even, more rational and more economical in materials. This method can be used to optimize a grillage supporting structure with prestressed anchor bars on loess slopes. Can be used as reference for the similar supporting structures.

Key words: grillage; prestressed anchor bar; supporting structure; local optimal design strategies

框架预应力锚杆支挡结构是应用于基坑开挖和边坡稳定的一种新型支挡技术.它由框架、挡土板、锚杆和墙后土体组成，属于轻型挡土结构，其剖面如图1所示.这种新型支挡结构克服了传统的边坡支挡结构支护高度受限制、造价高、笨重、稳定性差等缺点，在边坡支挡工程中发挥了极大的作用.此技术应用于黄土边坡支挡中具有结构轻、经济性好、外型美观以及整体稳定性好等特点，并可结合绿化措施，对保证公路、铁路和建筑物的使用安全，防止滑坡等都具有重要的现实意义.从体系受力和经济性2方面考虑，框架预应力锚杆支挡结构中最关键的技术是锚杆布置的优化选择.锚杆数量过多，则提供的抗侧力大，整体性好，但是经济性差；锚杆数量过少，则结构产生侧移，经济性转好.文献[1]对框架预应力锚杆支挡结构进行了基本计算研究，而我们提出了这种结构的分部优化设计策略，使设计更合理.

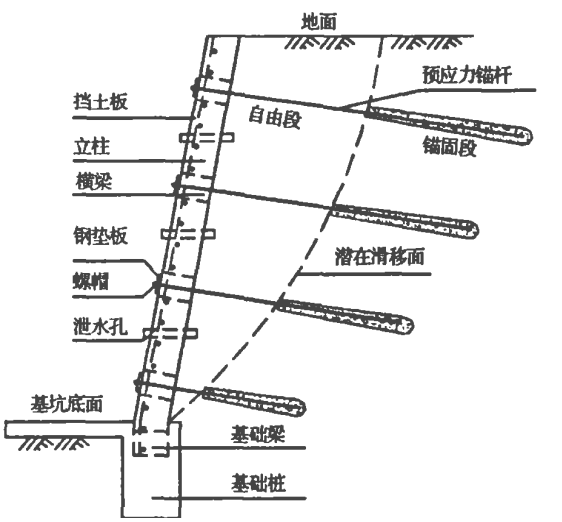

图1 框架预应力锚杆支挡结构剖面

收稿日期： 2005-09-28
基金项目： 甘肃省自然科学基金(ZS032-B25-021)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 优化设计思想

框架预应力锚杆支挡结构目前常用的设计方法往往只注重了其安全性，而忽略了其经济性，因此对一些大型边坡支挡结构就会造成材料的巨大浪费. 优化设计的一般思想是在保证工程安全可靠的前提下，以造价最低作为最优的设计方案. 从数学角度讲，就是建立一个以工程造价为目标函数，以工程设计的安全可靠性能指标等为约束条件的数学模型. 设计过程转化为在满足所有约束条件下，寻求使得目标函数最小的设计方案[2].

2 结构优化设计策略

框架预应力锚杆支挡结构是一个结构与岩土相互协同作用的复杂的空间受力体系，力学分析难度大，其优化设计就更为复杂和难以实现. 所以到目前为止，国内外学者开展的研究较少[3]. 但随着公路、铁路的大量修建，框架预应力锚杆支挡结构的应用前景越来越广，因此研究其优化设计具有重要的工程意义.

2.1 框架结构的分部优化设计技术[4]

框架结构是具有多个多余约束的超静定结构，其荷载效应不仅与外荷载大小有关，还与结构构件的材料特征、几何构造特征有关. 框架结构的优化设计即是在结构整体内力分析完成后，根据梁柱各构件的控制内力进行截面优化设计，确定满足荷载效应水平的各结构构件的几何特征和配筋量的优化结果. 框架结构的分部优化设计实际上是一个迭代、渐进的寻优过程，计算结果虽不总能等价于整体优化设计结果，但通常能给出工程实用的满意结果. 其优化设计的具体步骤为：①初始选型；②结构分析；③截面优化设计；④收敛性判断；⑤可行性判断.

2.2 框架结构的2阶段分部优化设计策略

框架预应力锚杆支挡结构的设计主要涉及2个方面的优化问题：①锚杆最优布置问题；②钢筋混凝土框架结构的优化设计问题. 该种支挡结构与岩土体在土压力水平荷载作用下的协同工作问题，主要是锚杆轴向受力、以及梁柱荷载分配的问题. 因此，锚杆的数量与间距设计是关键问题.

(1) 设计变量 影响框架预应力锚杆支挡结构总造价的主要因素有锚杆的立面布置、框架梁和框架柱的截面尺寸及其配筋. 我们考虑支挡结构单位宽度内的造价，取设计变量：

$$X=[x_1,x_2,x_3,x_4,x_5,x_6,x_7,x_8,x_9,x_{10},x_{11}]^T,$$

其中，x_1,x_2,x_3 代表第一排锚杆离坡顶的距离以及锚杆布置的水平间距和垂直间距；x_4,x_5,x_6,x_7 代表梁截面的宽度、高度及纵筋面积和单位宽度内箍筋面积；x_8,x_9,x_{10},x_{11} 代表柱截面的宽度、高度及纵筋面积和单位宽度内箍筋面积.

(2) 第1阶段 锚杆的最优布置设计：框架预应力锚杆支挡结构的稳定性分析方法有极限平衡分析法[1]、圆弧滑动简单条分法[5]以及数值分析法等. 我们采用极限平衡分析法，结构的稳定性只与锚杆有关. 另外，锚杆的布置直接影响梁、柱的设计内力，因此在锚杆的优化决策模型中引入梁、柱的造价以考虑它们对锚杆造价的影响.

① 目标函数：根据工程经验初步假定梁高为 y_1，梁宽为 αy_1；柱高为 y_2，柱宽为 βy_2（α、β 为假定常数；y_1、y_2 依据梁柱的抗弯抗剪强度条件解方程求得），则锚杆优化的目标函数为

$$f_0(X)=f_1(X)+f_L(X)+f_Z(X), \tag{1}$$

其中：

$$f_1(X)=\sum_{i=1}^{n}L_iC_m/x_2, \tag{2}$$

$$f_L(X)=n[\alpha y_1^2C_c+2A_{s1}\rho_sC_g+2A_{s2}(y_1+\alpha y_1-2a_s)\rho_sC_g], \tag{3}$$

$$f_Z(X)=(H+H_d)[\beta y_2^2C_c+2A_{s3}\rho_sC_g+2A_{s4}(y_2+\alpha y_2-2a_s]/x_2, \tag{4}$$

式中 $f_1(X)$、$f_L(X)$、$f_Z(X)$ 分别为锚杆、框架梁和框架柱的造价；n 为锚杆的排数；L_i 为第 i 排锚杆的设计总长度；C_m 为锚杆单价；C_c 为混凝土单价；A_{s1} 为梁单侧纵筋面积；ρ_s 为钢筋密度；C_g 为钢筋单价；A_{s2} 为梁单位长度内的箍筋面积；a_s 为混凝土保护层厚度；H 为坡高；H_d 为结构基础埋深；A_{s3} 为柱单侧纵筋面积；A_{s4} 为柱单位长度内的箍筋面积.

② 约束条件：锚杆优化问题主要考虑其强度条件、对结构稳定性的影响以及满足规范规定的相关构造要求[6]. 因此，此处的约束条件可分3类. 应该指出，这些约束条件从形式上看大多数都是极限约束，但是在文献[1]中进行荷载计算时已经考虑了荷载系数，所以对结构而言是有一定安全储备的.

强度约束. 框架预应力锚杆支挡结构中锚杆的强度约束条件即在确定的土压力荷载作用下，通过力法计算所得的各排锚杆的轴向拉力应该小于其极限承载力[1]，具体可以描述为：

$$R_j-\pi DL_{ej}\tau\leqslant 0,(j=1,2,\cdots,n) \tag{5}$$

式中 R_j 为第 j 排锚杆的轴向拉力，D 为锚固体的直径，L_{ej} 为第 j 排锚杆的有效锚固段长度，τ 为锚固体

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与周围土体之间的界面粘结强度.

稳定约束.根据文献[1],框架预应力锚杆支挡结构的整体稳定约束条件如下:

$$\sum_{j=1}^{n} R_j \cdot [H - x_1 - (j-1)x_3] - \frac{37}{128} \cdot e_{hk} \cdot x_2 \cdot H^2 \geqslant 0, \tag{6}$$

式中,x_1,x_2,x_3 即前面提到的与锚杆有关的设计变量;e_{hk}为侧向土压力水平分力的标准值.

界限约束.依据国家建筑技术规范[6]对锚杆的相关构造规定,其立面布置的约束条件如下:

$$1.5 \leqslant x_1 \leqslant H, \tag{7}$$

$$2.0 \leqslant x_2 \leqslant 4.0, \tag{8}$$

$$2.0 \leqslant x_3 \leqslant H - 1.5, \tag{9}$$

(3) 第 2 阶段　框架结构构件的分部优化设计:①框架梁优化设计的目标函数:考虑框架预应力锚杆支挡结构中的梁为矩形截面梁,若要求单位宽度内梁的造价(含主筋、箍筋和混凝土,忽略模板、受力筋锚固长度以及箍筋弯钩长度的影响)最经济,则目标函数为

$$f_2(X) = n[x_4 x_5 C_c + 2x_6 \rho_s C_g + 2x_7(x_4 + x_5 - 2a_s)\rho_s C_g]. \tag{10}$$

约束条件:强度条件.框架梁中最大弯矩和最大剪力分别要求满足:

$$M_b \leqslant f_y x_6 (x_5 - a_s) - \frac{1}{2}\frac{(f_y x_6)^2}{\alpha f_c x_4}, \tag{11}$$

$$V_b \leqslant 0.7 f_t x_4 (x_5 - a_s) + 1.25 f_{yv} x_7 (x_5 - a_s), \tag{12}$$

式中 M_b 为梁跨内最大弯矩设计值;f_y 为钢筋抗拉强度设计值;α 为混凝土强度系数;f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值;V_b 为框架梁跨内最大剪力设计值;f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值.

构造要求,最大和最小配筋率为

$$\rho_{\min} x_4 (x_5 - a_s) \leqslant x_7 \leqslant \rho_{\max} x_4 (x_5 - a_s), \tag{13}$$

式中 $\rho_{\min}$及 $\rho_{\max}$为最小和最大配筋率,且

$$\rho_{\min} \geqslant \max(0.2, 45 f_t / f_y), \quad \rho_{\max} \leqslant 5\%.$$

②框架柱优化设计的目标函数:框架预应力锚杆支挡结构中的框架柱从截面形式看虽然也是矩形截面,但是考虑到土压力荷载水平作用,所以从受力状态看其实质上仍为受弯构件.因此其目标函数可以类似于梁表述为

$$f_3(X) = (H + H_d)[x_8 x_9 C_c + 2x_{10}\rho_s C_g + 2x_{11}(x_8 + x_9 - 2a_s)]/x_2. \tag{14}$$

同理,类似于式(11)～式(13)可以得框架柱的约束条件:

$$M_z \leqslant f_y x_{10} (x_9 - a_s) - \frac{1}{2}\frac{(f_y x_{10})^2}{\alpha f_c x_8}, \tag{15}$$

$$V_z \leqslant 0.7 f_t x_8 (x_9 - a_s) + 1.25 f_{yv} x_{11} (x_9 - a_s), \tag{16}$$

$$\rho_{\min} x_8 (x_9 - a_s) \leqslant x_{11} \leqslant \rho_{\max} x_8 (x_9 - a_s), \tag{17}$$

式中 M_z 为框架柱跨内最大弯矩设计值;V_z 为框架柱跨内最大剪力设计值.

3　优化方法选取及程序设计[2,7]

为得到框架预应力锚杆支挡结构的最优锚杆布置以及梁柱设计,在相应约束条件下求出其造价最优是一个有约束条件的非线性优化问题.考虑到造价目标函数与约束条件的非线性特征,而复形法可以用来求解具有不等式约束的多变量的非线性优化设计问题,选用复形法进行优化(见图 2).

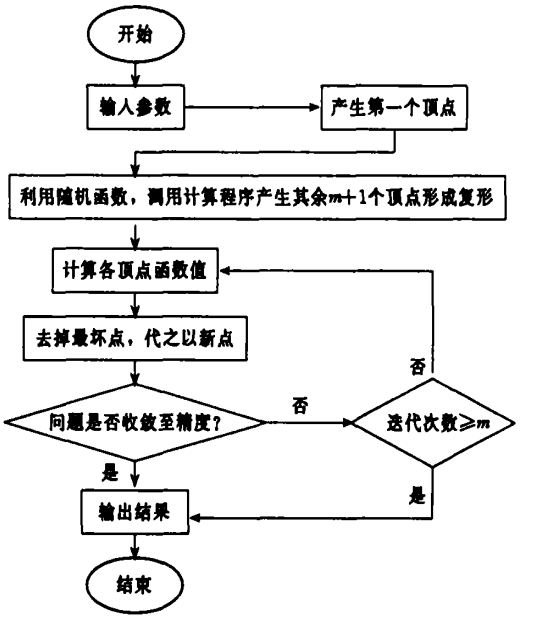

图2　程序计算

复形顶点个数 $k = m + 2$(m 为优化变量个数),其迭代步骤大致为:

(1) 通过人工干预在可行域内可形成初始顶点 $X^{(1)}$.

(2) 形成其他 $m+1$ 个顶点以构成复形.

(3) 寻求映象点.计算各顶点的函数值$f(X^{(i)})$,$j = 1, 2, \cdots, m+2$,比较各顶点的函数值,找出最坏点 $X^{(h)}$ 和最好点 $X^{(e)}$.计算去掉最坏点 $X^{(h)}$ 后其余各顶点的中心点 $X^{(o)}$,检查 $X^{(o)}$ 是否为可行点.如果是可行点,则选择一个反映系数 α($\alpha \geqslant 1$),由最坏点 $X^{(h)}$ 通过 $X^{(o)}$ 作 α倍映射而得到映象点 $X^{(\alpha)}$,然后转向第(4)步;如果 $X^{(o)}$ 不是可行点,说明可行域为非凸域,则进行调整或直接选出最好点作为最优点而输出.

(4) 检查映象点的可行性.如果 $X^{(\alpha)}$是可行点,转入第(5)步;如果 $X^{(\alpha)}$是不可行点,则将反映系数 α

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

改取其一半，一直到 $X^{(q)}$ 成为可行点为止，然后转入第(5)步.

(5) 比较映象点与最坏点的目标函数值. 计算映象点 $X^{(q)}$ 的目标函数值 $f(X^{(q)})$，并与最坏点的目标函数值 $f(X^{(h)})$ 相比较. 如果 $X^{(q)}$ 比 $X^{(h)}$ 好，即 $f(X^{(q)})<f(X^{(h)})$，则以 $X^{(q)}$ 代替 $X^{(h)}$，构成新复形，转回到第(2)步. 否则再次缩短步长，并计算其函数值，如果新点比 $X^{(h)}$ 好，则以新点代替 $X^{(h)}$ 并转回第(2)步. 如果仍无改进，则再将 α 值不断缩小一半，直到 α 值小于预先给定的一个很小的正数 ξ 如果这时目标函数仍无改进，则寻求新的映射点，然后转回第(3)步或者以最好点当作最优点而输出.

(6) 收敛准则. 如果复合形诸顶点的函数值满足 $\left[\frac{1}{m+2}\sum_{i=1}^{m+2}(f(X^{(e)})-f(X^{(i)})^2\right]^{\frac{1}{2}}<\varepsilon$ (ε 是预先给定一个很小的正数)，则终止迭代，此时 $X^{(e)}$ 就是满足精度要求的最优解；否则转向第(3)步.

4 工程实例

已知兰州某住宅建设小区边坡高 $H=11$ m，边坡倾角为 85°；坡顶有表面荷载 $q=12$ kN/m^2，墙后土体为均质粉土，土体基本参数为：$\gamma=17$ kN/m^3，$\varphi=22°$，$c=16$ kPa. 试寻求框架预应力锚杆支挡结构的最佳设计方案. 依据本文所提出的优化设计方法求得的优化设计结果如表1所示.

表1 优化前后自变量及单位总造价的变化

优化变量	优化前/元·m^{-1}	优化后/元·m^{-1}
x_1/m	2.500	2.200
x_2/m	3.000	2.700
x_3/m	3.000	3.200
x_4/mm	400.000	300.000
x_5/mm	400.000	400.000
x_6/mm^2	1 164.200	951.200
x_7/mm^2·mm^{-1}	1.268	1.124
x_8/mm	600.000	400.000
x_9/mm	400.000	400.000
x_{10}/mm^2	1 406.800	1 141.200
x_{11}/mm^2·mm^{-1}	1.192	1.136
优化前总造价/元·m^{-1}		5 720.000
优化后总造价/元·m^{-1}		4 975.000

由表中所显示的优化前后的设计结果看，优化后的设计方案比原设计方案节约造价约13%. 另外，从优化过程中显示的锚杆轴向拉力、框架梁和框架柱的内力来看，不仅最大轴向拉力、最大内力相比优化前有所减小，而且整个内力分布较为均匀，这将会使锚杆布置、框架结构设计更为合理，而且钢筋配置可以通常考虑，为现场施工带来了方便.

5 结语

(1) 以框架预应力锚杆支挡结构的稳定性、安全性等为分析前提，以造价目标函数作为分析对象，通过满足荷载和受力水平的条件进行复形法迭代求优，得到了结构的合理优化设计参数. 上述所提出的框架预应力锚杆支挡结构设计的优化设计策略对其它边坡支挡结构类型也应具有一定的参考价值.

(2) 在框架预应力锚杆支挡结构中，框架结构构件的截面尺寸对整体结构的稳定性影响很小，即锚杆布置的最优性条件具有相对稳定性. 因此一般来说，按分部优化设计计算所得结果并不一定是精确结构整体优化设计结果，但是根据锚杆布置的最优性条件具有相对稳定性的概念，也可认为分部优化设计结果就是结构整体优化设计的满意结果[8].

(3) 上述研究深化了框架锚杆支挡结构加固黄土边坡设计的内容，拓展了其设计内涵，提高了设计水平. 当然，由于边坡工程问题的难度与复杂性，真正做好黄土边坡支挡结构的优化设计，还有很多工作要做.

参考文献：

[1] 朱彦鹏，周勇. 黄土边坡框架预应力锚杆支挡结构的设计计算[A]. 第13届全国结构工程学术会议论文集[C]. 北京：清华大学出版社，2004，21(Ⅱ)：393-398.

[2] 秦四清. 土钉支护结构优化设计[J]. 中国岩土界，2000，3(1)：41-44.

[3] 李锁平. 边坡锚固优化设计理论与应用[J]. 四川建筑科学研究，2002，28(4)：47-49.

[4] 韩建新，郭院成. 某高层框剪－结构优化设计策略[J]. 河南科学，2002，20(4)：414-417.

[5] 朱彦鹏，李忠. 深基坑土钉支护稳定性分析方法的改进及软件开发[J]，岩土工程学报，2005，27(8)：939-943.

[6] GB50330-2002. 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.

[7] 朱彦鹏，于劲，王秀丽. 柱列悬臂式支护桩的优化设计[J]. 甘肃工业大学学报，2000，26(1)：90-95.

[8] 郭义海，白俊宇，苟雷. 某框－剪结构的分部优化设计[J]. 河南科学，2003，21(4)：471-474.

作者简介：

周 勇，(1978-)男，湖北省宣恩人，兰州理工大学2004级结构工程专业博士生，现任兰州理工大学土木工程学院讲师，主要从事黄土地区支挡结构设计方面的科研与教学工作.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net