

预应力混凝土槽箱配筋优化设计

朱文荣 冷畅俭

(西北农业大学水利与建筑工程系, 陕西杨陵·712100)

摘要 运用复合形法数学优化方法, 结合钢筋混凝土、全预应力与部分预应力混凝土设计理论, 依据我国现行设计规范, 提出将预应力度作为预应力混凝土结构优化设计的控制指标。在给定截面形式下, 求解满足结构性能约束和构造约束条件的预应力筋最优用量以及预应力筋与非预应力筋的最优比值。

关键词 复合形法, 预应力度, 优化设计, 混凝土槽

中图分类号 TV672.3, TV332.4, TB114.1

薄壁箱型预应力混凝土槽箱目前我国水工渠系建筑物结构——渡槽设计中, 应用较少, 形式较为新颖。采用这种结构形式的主要优点是: 结构整体刚度大, 抗弯扭性能好, 箱型梁集输水及承重结构于一体, 减轻了上部结构重量, 尤其是近年来预应力混凝土施工技术日益完善, 薄壁箱型预应力混凝土结构适用于较大流量、较大跨度的输水建筑物。

由于水工结构的特殊性, 渡槽对裂缝控制要求较建筑、铁路及公路结构严格得多, 应按纵向不出现裂缝进行控制设计。一般认为, 不出现裂缝的预应力混凝土结构应按全预应力设计, 但在公路、铁路部门实践中发现, 全预应力混凝土也存在一些严重缺点^[1], 如结构反拱过大, 尤其是承受恒载小、活载大的结构, 由于预应力区混凝土长期处于高压状态而引起徐变, 使反拱不断增长, 有的经过二三十年之久仍未稳定。此外, 过大的预应力也常产生平行于预应力筋的纵向水平裂缝。由此看来, 要在任何荷载组合作用下都使结构处于全预应力状态, 并不一定能达到预期效果, 也很不经济。

本文提出按预应力度^[2]进行结构设计, 把预应力度和荷载组合紧密联系在一起, 使预应力度变成一个随荷载而变的相对概念。在设计荷载作用下, 构件被设计成全预应力, 而在核荷载作用下, 构件被设计成部分预应力混凝土结构。对于如何选取不同荷载组合下相应的预应力度, 在实际设计工作中, 要通过不断的试算求得, 计算工作相当繁杂。本文运用优化设计原理, 结合钢筋混凝土及全预应力与部分预应力混凝土设计理论, 依据我国现行设计规范, 在给定截面形式下, 求解满足构件性能约束及构造约束条件的预应力筋最优用量及预应力筋与非预应力筋最优比值, 亦即求解构件的最优预应力度。

1 优化设计数学模型

1.1 设计变量

断面形式如图1所示, 渡槽的跨径、槽箱内径一般都是根据工程的地形地质条件,

过流能力及工程总造价初步估算确定。本文取跨径 L 、内径宽度 B 、高度 H 为常数, 选取设计变量如下:

- x_1 ——腹板厚度 b ;
- x_2 ——底板厚度 h_1 ;
- x_3 ——顶板厚度 h_2 ;
- x_4 ——纵向受拉区预应力筋面积 A_y ;
- x_5 ——纵向受拉区非预应力筋面积 A_g ;
- x_6 ——纵向受压区非预应力筋面积 A'_g ;

1.2 目标函数

优化设计目标函数是力求构件满足使用要求前提下, 造价最低。并认为造价主要由混凝土及纵向预应力筋和非预应力筋三种材料量决定, 至于构造设施、施工运输费用均折算到以上三种材料价格中去。目标函数的表达式为:

$$F = (C_c \cdot A + \rho(C_y A_y + C_g A_g + C_g A'_g)) \cdot L_0$$

式中: C_c ——单位体积混凝土折算价; A ——槽箱截面面积; C_y ——单位重量预应力筋折算价; C_g ——单位重量非预应力筋折算价; ρ ——钢筋比重; L_0 ——计算跨度。

1.3 约束条件

1.3.1 构造约束 ①施工要求 依据文献〔2〕, 为满足施工要求, 槽箱腹板、底板、顶板应满足:

$$x_i \geq 14 \text{ cm} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

②稳定性要求 依据文献〔2〕, 腹板厚度与高度之比应满足:

$$x_1 / H \geq 1 / 15 \quad (2)$$

1.3.2 正截面强度约束

$$M_k \leq M_{j \max} = \frac{1}{\gamma_c} R_a S + \frac{1}{\gamma_s} R'_g A'_g (h_0 - a'_g) \quad (3)$$

$$x \leq \xi_{iv} h_0 \quad (4)$$

$$x \geq 2a'_g \quad (5)$$

式中: M_k ——校核荷载作用下跨中截面弯矩; x ——受压区高度。

其余未说明者请参阅文献〔2〕, 下同。

1.3.3 斜截面强度约束

$$\text{① 截面限制条件约束: } Q_j \leq 0.051 \sqrt{R} b h_0 \quad (6)$$

$$\text{② 斜截面强度约束条件: } Q_j \leq Q_{hk} + Q_w \quad (7)$$

式中: Q_j ——校核荷载作用下计算截面剪力。

1.3.4 预应力度约束条件

①在设计荷载作用下应为全预应力构件, 则

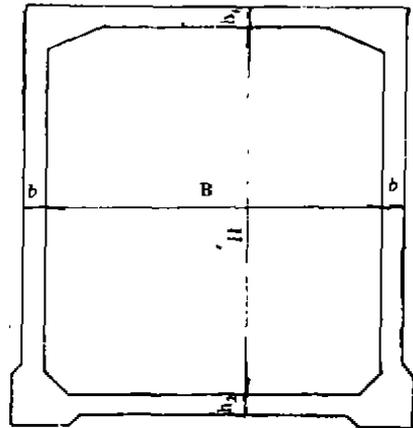


图 1 槽箱断面图

$$\lambda = M_0 / M_s \geq 1 \quad (8)$$

式中: M_0 ——消压弯矩; M_s ——设计荷载作用下跨中弯矩

②在校核荷载作用下应为部分预应力混凝土构件, 则

$$\lambda = M_0 / M_k < 1, \text{ 且 } \lambda > 0.5 \quad (9)$$

1.3.5 限值部分预应力构件应力约束条件

① 混凝土法向压应力约束 $\sigma_{ha} \leq 0.6 R_a^h$ (10)

② 混凝土法向拉应力约束 $\sigma_{ht} \leq 0.9 R_t^h$ (11)

③ 预应力筋应力约束 $\sigma_v \leq 0.7 R_v^h$ (12)

1.3.6 预应力筋下限约束 $R_j \geq 5 \text{ cm}^2$

1.3.7 非预应力筋下限约束 $A_g \geq 5 \text{ cm}^2$ (13)

$$A_g' \geq 0 \quad (14)$$

此外还有梁挠度、梁端局部受压、梁斜截面抗剪、梁主拉应力和主压应力及施工阶段验算等约束。一般说来, 这些都不是有效约束, 可以不加考虑, 仅在得出优化结果后, 验算使其达到满足即可。

1.4 优化方法

在工程结构中, 遇到的优化问题大都是多维非线性有约束优化问题, 对于这种类型的优化, 有许多方法^[3], 通常分两大类: ①直接法 如网格法、随机试验法和复合形法等; ②解析法 如罚函数法、拉格朗日乘子法和可变容差法等。

解析法需要对目标函数及约束函数求导, 而直接法不需要。由于本文结构性能约束函数比较复杂, 且多为隐式函数, 故选用直接法中的复合形法作为数学优化方法。

2 优化设计程序框图

2.1 优化设计程序总框图 见图2

2.2 优化设计子程序框图 可参阅文献[4]

2.3 约束函数子程序框图 图3、4、5、6

3 优化程序设计及运算

本文利用 FORTRAN 程序设计语言^[5], 依据程序设计框图, 编制了结构优化设计程序, 并在西北农大 M-340S 计算机上调试通过。经过多次运算试验, 程序设计性能良好。将源程序稍作修改, 亦可用于公路、铁路等部门的箱梁及 T 梁、工字梁的预应力混凝土结构优化设计, 具有较好的通用性。

以陕西省东雷二期抽黄灌溉工程洛河渡槽为例, 其设计流量 $40 \text{ m}^3/\text{s}$, 全长 1 200 m, 采用薄壁预应力混凝土槽箱, 跨径 30 m, 断面内径 $3 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$, 采用本程序优化设计成果与常规设计成果比较见附表。

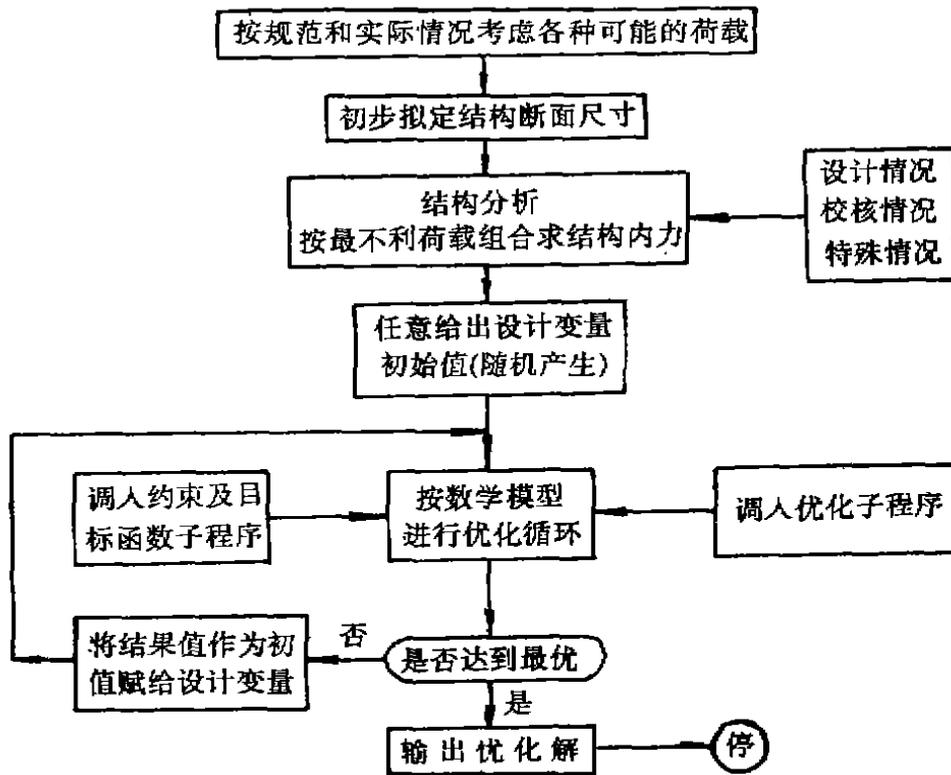


图 2 优化总框图

附表 设计成果比较表

方法	b	h ₁	h ₂	A ₁	A _s	A _{s'}	预应力度 λ	
							设计情况	校核情况
常规设计	20	20	20	75.40	43.26	30.54	1.010	0.865
优化设计	20	20	20	65.75	22.21	12.28	1.000	0.859

4 讨 论

(1) 表中求得的计算结果是在 b 、 h_1 、 h_2 给定条件下求得的，即为在给定截面型式及尺寸条件下的最优配筋。如在编制程序时，引入截面几何特性子程序、框架结构分析子程序及普通钢筋混凝土子程序，则优化数学模型中所考虑的六个设计变量的优化结果对生产实际将具有更广泛的意义。

(2) 在给定截面型式下，优化结果比常规设计预应力筋节省 12.8%，非预应力筋节省 53.2%，其经济效益是相当可观的。

(3) 常规设计与优化设计的预应力度 λ 仅相差 0.01 左右。由此可见，预应力度对结构设计产生相当大的影响，其对结构设计经济影响程度值得进一步研究。

(4) 从优化设计过程及其结果可看出，非预应力筋，尤其是非预应力受压筋对结构各性能约束影响不大，设计时满足构造约束条件即可。

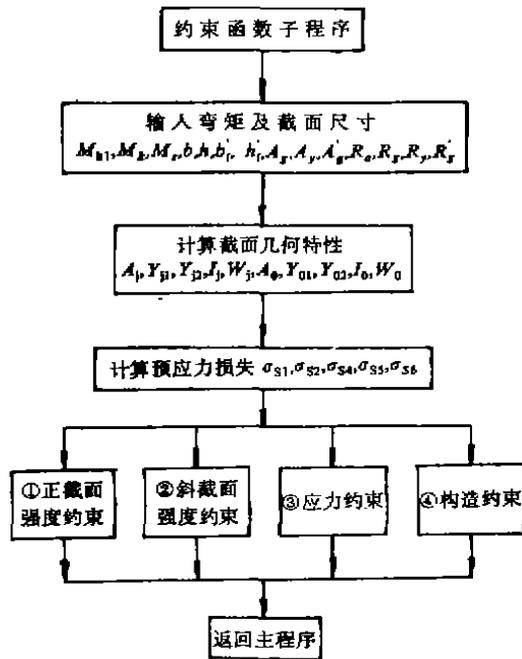


图3 约束函数子程序

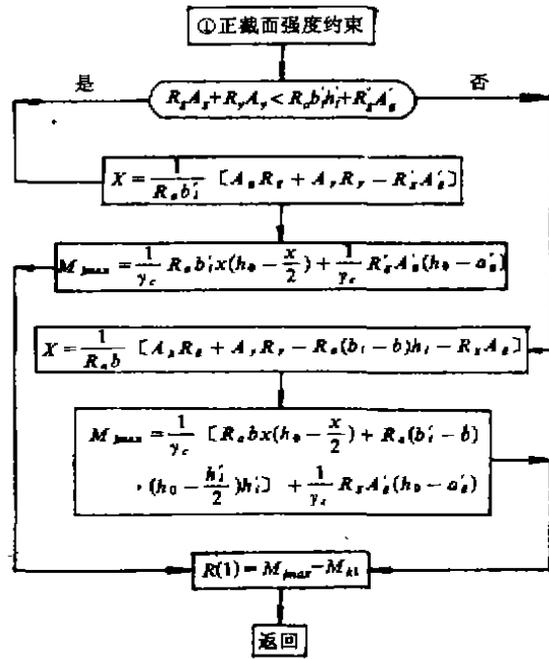


图4 约束函数子框图(1)

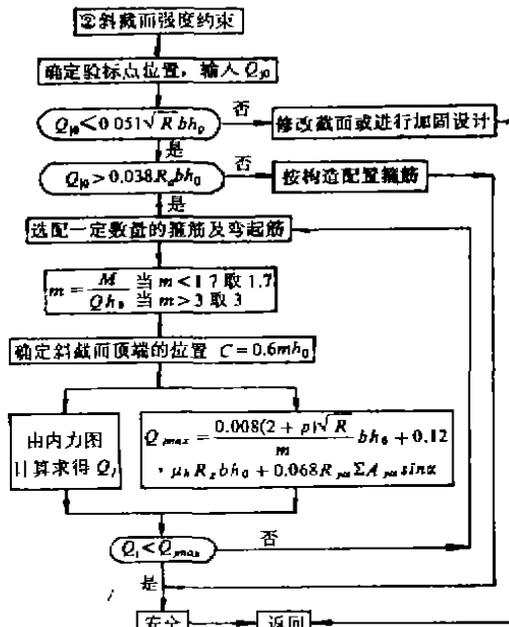


图5 约束函数子框图(2)

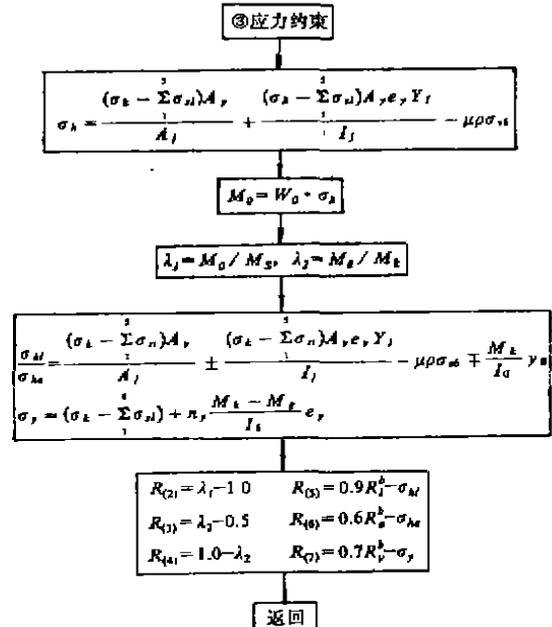


图6 约束函数子框图(3)

参 考 文 献

- 1 《部分预应力混凝土结构设计建议》编写组编. 部分预应力混凝土结构设计建议. 北京: 中国铁路出版社, 1985
- 2 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 (JTJ023-85). 北京: 人民交通出版社, 1985
- 3 朱伯芳, 黎展眉, 张壁城编著. 结构优化设计原理与应用. 北京: 水力电力出版社, 1984; 140~146
- 4 万耀青, 梁庚荣, 陈志强编. 最优化计算方法常用程序汇编. 北京: 工人出版社, 1983; 279~285
- 5 赵奎元编. FORTRAN 77 简明教程. 北京: 清华大学出版社, 1985; 250~275

Reinforcement Optimum Design for Prestressed Concrete Box Aqueduct

Zhu Wenrong Leng Changjian

(*Water Conservancy and Hydraulic Construction Engineering Department, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100*)

Abstract Based on the present China's design specifications in combination with the design theory for reinforced, full-prestressed and part-prestressed concrete structure, a prestressed-degree was suggested as the control index of optimum design for prestressed concrete structure using the complex-shape mathematical optimum method. In the case of a given shape of structure cross-section, the optimum total of prestressed reinforcement and the optimum ratio of the prestressed and non-prestressed reinforcement can be obtained to satisfy the functional restraints and structural restraints.

Key words complex-shape method, prestressed degree, optimum design