

文章编号: 1002-0268 (2007) 07-0024-04

非常规荷载作用下泥石流流 板式渡槽的优化设计

朱彦鹏, 郑善义, 周 勇, 阎 茹
(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 跨径为 16 m 的装配式渡槽施工阶段张拉预应力钢筋后, 截面下缘压应力超过规范规定的界限, 采用了分阶段张拉预应力钢筋的方法, 以现行规范为依据, 以空心板的高度和各阶段预应力筋的面积为变量, 以施工阶段和使用阶段混凝土应力限制为约束条件, 建立了单位长度空心板的造价目标函数。并利用 Matlab 语言, 编制了遗传算法程序进行了优化分析。优化结果表明, 优化设计的截面尺寸与实际设计的相比, 截面高度大一些, 但总造价却比实际设计的要减小 16%, 优化设计收到了良好的经济效益。最后, 按照优化设计过程提出了一些施工注意事项, 为以后类似的设计提供了参考。

关键词: 道路工程; 板式渡槽; 遗传算法; 优化设计; 分阶段张拉; 空心板

中图分类号: U417.9

文献标识码: A

Optimum Design of Debris Flow Slab Type of Aqueduct Subjected to Abnormal Loads

ZHU Yan-peng, ZHENG Shan-yi, ZHOU Yong, YAN Ru

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Gansu Lanzhou 730050, China)

Abstract: During the construction of 16m span assembled debris flow aqueduct, the underlayer fringe stress of the cross-section is too much big after tensioning the prestressed reinforcements, which exceed the limit of standard. The prestressed method with stage tensions is adopted to design. According to the current standard, taking the height of hollow slab and areas of the prestressed bar of every stages as variables, and taking the concrete stress limits at construction stage and using stage as restraint conditions, the cost objective function of unit length hollow slab is established. Using Matlab language, the genetic algorithm procedures is compiled for optimum design. The results of optimization show that, comparing with the actual design, the section height of the optimum design is bigger, while the total cost is lower by 16%, which means a good economic benefits is obtained. According to the process of the optimum design, some attentions are put forward for the construction, which may be referenced for the similar design.

Key words: road engineering; slab type aqueduct; genetic algorithm; optimum design; prestressed method with stage tensions; hollow slab

0 前言

滑坡、泥石流是山区常遇到的自然灾害^[1], 在修建高速公路和铁路时为了道路使用安全, 对滑坡泥石流进行防治是一项重要的工作, 其中对泥石流的防治策略一般有 2 种: 一种是疏导防治法, 另一种是拦挡防治法, 而在疏导防治法中泥石流渡槽是一种常用方

法。由于渡槽大都是横跨公路建造, 现浇形式需要设置大量的脚手架, 影响交通, 而且施工速度较慢, 所以, 一般泥石流渡槽的施工采用装配式, 本着节约投资、加快工期及结构安全的原则, 可预制构件为后张法预应力空心板, 然后装配形成泥石流渡槽。由于泥石流渡槽是一种很特殊的结构, 只在泥石流发生地常见, 一般不会引起人们的重视, 因而, 对此研究很

收稿日期: 2006-02-27

作者简介: 朱彦鹏 (1960-), 男, 甘肃宁县人, 教授, 博士生导师, 研究方向为黄土及湿陷性黄土地区支挡结构的设计与分析。

(zhshy1980@163.com)

少,而这种特殊结构在甘肃南部、四川、云南和贵州的高速公路和铁路建设中是一种应用普遍的泥石流防治结构,国道212线高速公路(兰州—重庆)上这种泥石流防治结构就有大量的使用,因此,深入研究其合理的设计和施工方法有其重要意义^[2]。

迄今,国内外学者在泥石流渡槽设计和优化分析^[3~6]方面取得了一些成就,给出了渡槽的合理断面形式和优化参数,但这些技术对泥石流渡槽的设计缺乏明显的针对性,也没有完整的相关规范。本研究采用后张法预应力空心板装配式渡槽,后张法预应力空心板在桥梁上的应用比较广泛,设计方法也比较成熟。但相对于桥梁来说,渡槽的设计有其独特之处。首先,泥石流荷载比较大,在空心板截面尺寸有限的情况下,底板配筋比较多,施工阶段下缘压应力超过限值,按照常规设计方法,需要采用部分预应力混凝土,但这样会配置很多非预应力筋,造成不经济。其次,为了保持拼装后渡槽的整体性以及防止空心板被泥石流击穿,需要在空心板上现浇20 cm的混凝土层,如图1所示。针对这些特点,笔者采用了分阶段张拉预应力筋的设计方法,即空心板预制时张拉第1批预应力筋,吊装后浇上现浇层张拉第2批预应力筋,这样既可以充分利用现浇混凝土的重量,又有效地解决了施工阶段下缘压应力超过限值的问题,但设计中很难合理地确定每阶段张拉预应力钢筋的面积,文中运用遗传算法,以单位长度内材料工程总造价为目标函数,以截面高度、第1阶段、第2阶段张拉钢筋的面积为变量,对原有设计进行优化分析。

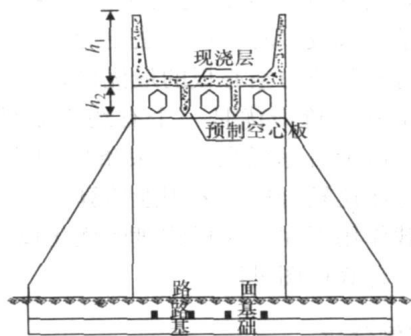


图1 渡槽剖面

Fig 1 Sectional drawing of Aqueduct

1 数学模型的建立

1.1 设计变量和目标函数

影响空心板(截面如图2所示)造价的因素很多,如截面尺寸、预应力钢筋面积及模板、施工费用

等^[7]。但实践经验及计算结果表明,对造价起控制作用的是空心板的高度 h 和预应力筋的面积 A_{y1} 、 A_{y2} ,由于渡槽的宽度大都是以1 m为模数,所以空心板的宽度取为1 m,不作为设计变量,其他因素在设计方案时可视为预定参数^[8]。

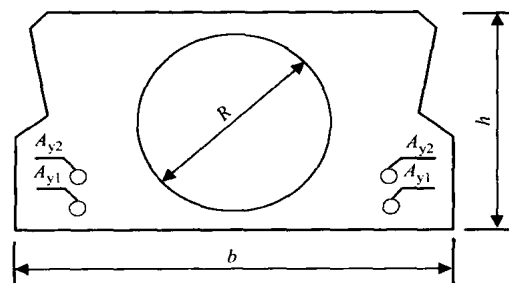


图2 空心板断面

Fig 2 Sectional drawing of hollow slab Aqueduct

优化设计的目的是为了取得比常规设计更好的经济效益,所以可取空心板单位长度造价为目标函数,其形式为:

$$z = \left[hb - \frac{\pi R^2}{4} \right] C_h + (A_{y1} + A_{y2}) C_y, \quad (1)$$

式中, z 为空心板单位长度造价; h 为截面高度; R 为空心板开洞直径; A_{y1} 为第1批张拉预应力钢筋的面积; A_{y2} 为第2批张拉预应力钢筋的面积; C_h 为单位体积混凝土价格; C_y 为单位体积预应力筋价格。

根据设计经验,预应力空心板开洞尺寸 $R \approx 0.7h$,于是目标函数可简化为:

$$z = [hb - 0.384 8h^2 + (A_{y1} + A_{y2}) q] C_h, \quad (2)$$

式中, $q = \frac{C_y}{C_h}$,其值可根据当地建设工程预算定额中混凝土和预应力筋的价格换算得到。

由于不考虑构件的绝对费用,故目标函数可进一步简化为

$$z = hb - 0.384 8h^2 + (A_{y1} + A_{y2}) q. \quad (3)$$

1.2 约束条件

严格地说,要考虑的约束条件很多,如强度约束、混凝土和预应力筋的应力约束及变形约束等。若要从全约束条件考虑的话,问题就会变得非常复杂。而在所有约束中,混凝土应力的约束是最基础的,通常起控制作用,故文中分施工和使用2个阶段,拟将混凝土应力计算作为约束条件对空心板进行截面问题的优化,将其余标准作为检验判别项以对优化结果进行检验。

(1) 施工阶段,第1阶段张拉预应力筋 A_{y1} 时空心板上、下缘混凝土应力限制值计算公式^[9]为

$$\sigma_{hs} = \frac{N_{y1}}{A_h} - \frac{N_{y1} e_y y_s}{I_h} + \frac{M_{gl} y_s}{I_h} \geq [\sigma_{hl}]_1, \quad (4)$$

$$\sigma_{hx} = \frac{N_{y1}}{A_h} + \frac{N_{y1} e_y y_x}{I_h} - \frac{M_{g1} y_x}{I_h} \leq [\sigma_{ha}]_1 \quad (5)$$

施工阶段,第2阶段张拉预应力筋 A_{y2} 时空心板上、下缘混凝土应力限制值计算公式^[9]为

$$\sigma_{hs} = \frac{N_{y1} + N_{y2}}{A_h} - \frac{(N_{y1} + N_{y2}) e_y y_s}{I_h} + \frac{(M_{g1} + M_{g2}) y_s}{I_h} \geq [\sigma_{hl}]_1, \quad (6)$$

$$\sigma_{hx} = \frac{N_{y1} + N_{y2}}{A_h} + \frac{(N_{y1} + N_{y2}) e_y y_x}{I_h} - \frac{(M_{g1} + M_{g2}) y_x}{I_h} \leq [\sigma_{ha}]_1 \quad (7)$$

(2)使用阶段,空心板上、下缘混凝土应力限制值计算公式^[9]为

$$\sigma_{hs} = \frac{\alpha(N_{y1} + N_{y2})}{A_h} - \frac{\alpha(N_{y1} + N_{y2}) e_y y_s}{I_h} + \frac{(M_{g1} + M_{g3} + M_p) y_s}{I_h} \leq [\sigma_{ha}]_2, \quad (8)$$

$$\sigma_{hk} = \frac{\alpha(N_{y1} + N_{y2})}{A_h} + \frac{\alpha(N_{y1} + N_{y2}) e_y y_x}{I_h} - \frac{(M_{g1} + M_{g3} + M_p) y_x}{I_h} \geq [\sigma_{hl}]_2, \quad (9)$$

式中, N_{y1} 为传力锚固时第1批预应力钢筋的合力; N_{y2} 为传力锚固时第2批预应力钢筋的合力; A_h 、 I_h 为构件混凝土全截面的面积和惯性矩; e_y 为预应力钢筋的合力作用点至截面重心轴的距离; y_s 、 y_x 分别为构件截面上、下边缘到截面重心轴的距离; M_{g1} 为构件恒载在计算截面处引起的弯矩; M_{g2} 为空心板吊装后,按照施工要求现浇的混凝土恒载在计算截面处引起的弯矩; M_{g3} 为空心板吊装及第2阶段预应力筋张拉后现浇的混凝土层恒载在计算截面处引起的弯矩; M_p 为使用阶段,泥石流活荷载及渡槽侧壁恒载在计算截面处引起的弯矩; α 为考虑预应力损失全部出现后的永存预加力与传力锚固时的有效预加力的比值; $[\sigma_{hl}]_1$ 、 $[\sigma_{ha}]_1$ 为施工阶段混凝土的限制拉应力(假定拉应力为负)和限制压应力(设压应力为正); $[\sigma_{hl}]_2$ 、 $[\sigma_{ha}]_2$ 为使用阶段混凝土的限制拉应力和限制压应力。

故此优化问题,即为求 h 、 A_{s1} 及 A_{s2} 在满足上述约束条件下使目标函数达到最小。其数学模型如式(10)、式(11)所示:

$$\min z = hb - 0.3848h^2 + (A_{y1} + A_{y2})q, \quad (10)$$

s. t.

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_{hs} &= \frac{N_{y1}}{A_h} - \frac{N_{y1} e_y y_s}{I_h} + \frac{M_{g1} y_s}{I_h} \geq [\sigma_{hl}]_1, \\ \sigma_{hx} &= \frac{N_{y1}}{A_h} + \frac{N_{y1} e_y y_x}{I_h} - \frac{M_{g1} y_x}{I_h} \leq [\sigma_{ha}]_1, \\ \sigma_{hs} &= \frac{N_{y1} + N_{y2}}{A_h} - \frac{(N_{y1} + N_{y2}) e_y y_s}{I_h} + \frac{(M_{g1} + M_{g2}) y_s}{I_h} \geq [\sigma_{hl}]_1, \\ \sigma_{hx} &= \frac{N_{y1} + N_{y2}}{A_h} + \frac{(N_{y1} + N_{y2}) e_y y_x}{I_h} - \frac{(M_{g1} + M_{g2}) y_x}{I_h} \leq [\sigma_{ha}]_1, \\ \sigma_{hs} &= \frac{\alpha(N_{y1} + N_{y2})}{A_h} - \frac{\alpha(N_{y1} + N_{y2}) e_y y_s}{I_h} + \frac{(M_{g1} + M_{g3} + M_p) y_s}{I_h} \leq [\sigma_{ha}]_2, \\ \sigma_{hx} &= \frac{\alpha(N_{y1} + N_{y2})}{A_h} + \frac{\alpha(N_{y1} + N_{y2}) e_y y_x}{I_h} - \frac{(M_{g1} + M_{g3} + M_p) y_x}{I_h} \geq [\sigma_{hl}]_2. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

2 优化方法的选取及程序设计

优化计算的方法很多,除了经典的优化算法之外,现代优化算法已发展很多,如模拟退火算法、人工神经网络、遗传算法等。本文主要建立基于遗传算法的求解模型,实现对空心板截面的优化,以解决传统优化算法存在结果依赖于初值的选取,难以进行多参数优化及优化结果易陷入局部极值等缺点的问题,是一种很好的优化算法,尤其是当约束条件为非线性、自变量个数较多时,该方法更为有效^[10]。

为了得到预应力空心板的最优设计,在相应约束条件下求出其造价最优是一个有约束条件的优化问题。考虑到造价目标函数与约束条件的非线性特征,选用遗传算法比较合适。采用遗传算法开发了可用于非常规荷载作用下泥石流板式渡槽优化设计的应用程序,其设计计算框图见图3。

3 工程实例分析

已知跨径为16m的泥石流渡槽,宽度为6m,侧壁高1.5m,侧壁上底宽20cm,下底宽30cm。为了拼装的方便,每块预制空心板宽度定为99cm,为了保持拼装后渡槽的整体性以及防止空心板被泥石流击穿,在吊装空心板上现浇20cm的混凝土层。C40混凝土, $f_{cd} = 18.4$ MPa,预应力筋束采用 $f_{pk} = 1860$ MPa的高强钢绞线, $\gamma_c = 1.0$, $\alpha = 0.8$, $M_{g1} = 590.13$

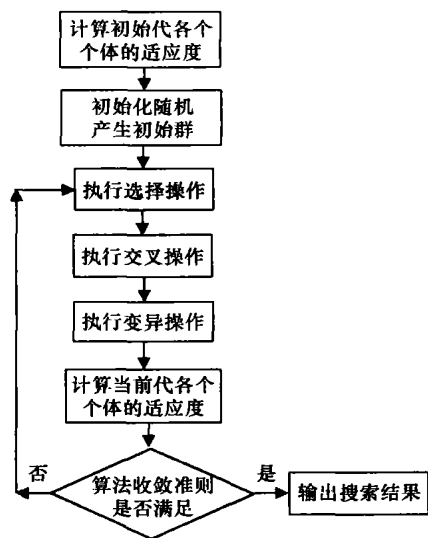


图3 遗传算法流程图

Fig 3 Flow diagram of genetic arithmetic

$\text{kN}\cdot\text{m}$, $M_{\text{中}} = 157.66 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{\text{边}} = 194.04 \text{ kN}\cdot\text{m}$, $M_{\text{p}} = 1480.44 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 试进行优化设计。

依据本文所提出的优化设计方法求得的优化设计结果为:

取 $q = 100$, 得到 $h = 104.8 \text{ cm}$, $A_{y1} = 1746.0 \text{ mm}^2$, $A_{y2} = 1061.5 \text{ mm}^2$ 。

原设计: $h = 95 \text{ cm}$; $A_{y1} = 2520 \text{ mm}^2$; $A_{y2} = 2240 \text{ mm}^2$ 。

经验算, 其余约束条件均满足, 比较结果可以看出, 优化设计的截面尺寸与实际设计的相比, 截面高度大一些, 但总造价却比实际设计的要减小 11.6%。

4 施工要求

分阶段张拉预应力筋, 对施工的要求更加严格, 该板式渡槽的施工除应符合现行的有关规范和规定外, 还应注意以下要求^[11]:

(1) 按照分阶段张拉预应力钢绞线设计施工时, 第2阶段张拉时须待空心板上浇筑的混凝土距板端 2 m 时, 中间部分混凝土达到设计强度后再进行预应力筋张拉, 如图 4 所示。张拉先由渡槽中轴线的中板依次向两侧边梁进行, 以避免预应力筋张拉时混凝土弹性压缩、预应力筋松弛, 以及因混凝土收缩造成预应力损失的偏差而影响空心板的使用性能。

(2) 为了保持渡槽受力的整体性, 板与板之间的横向连接钢筋必须进行单面焊接, 且要预留与现浇混凝土连接的竖向钢筋。

(3) 预应力筋束必须准确定位, 其定位钢筋的间距不得大于 80 cm。

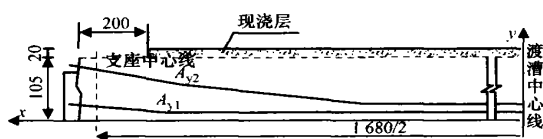


图4 第2阶段张拉预应力筋图(单位: cm)

Fig 4 Diagram of tensioning prestressed reinforcement in the second stage (unit: cm)

(4) 分阶段张拉时, 时间间隔不宜太长, 中间环节的时间尽量缩短, 以免造成第1阶段张拉的预应力筋应力损失过大。

5 结论

(1) 材料单价比 q 的变化直接会影响优化设计的结果, 因而, 不同地区材料的不同价格将会引起截面高度和钢筋用量的不同。

(2) 由工程实例优化结果可知, 工程结构优化设计很有必要, 特别是对于这种成批生产的构件, 微小的节约积累起来经济效益就很可观。

(3) 文中给出的分阶段张拉预应力筋的板式渡槽优化设计方法, 可推广于其他承受较大荷载的预应力构件, 只需更换相应的截面参数。

参考文献:

- [1] 谢修齐, 沈寿长. 铁路泥石流防治技术及其发展 [J]. 中国铁道科学, 1998, 19 (2): 60-66.
- [2] 陈洪凯, 唐红梅, 马永泰. 公路特大型泥石流研究及防治新理念 [J]. 公路, 2004 (2): 76-83.
- [3] 张发祥, 张旭明. 肋拱渡槽优化设计研究 [J]. 水利水电科技进展, 1996, 16 (1): 41-42.
- [4] 白新理, 刘桂荣, 王. 改进遗传算法在渡槽优化设计中的应用 [J]. 水利水运工程学报, 2005 (2): 59-62.
- [5] 夏富洲, 黄道宏, 方朝阳. 基于遗传算法的 π 型拱渡槽结构优化设计 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2005, 38 (1): 23-27.
- [6] 赵瑜, 张建伟, 张翌娜. GA 及惩罚函数思想在渡槽优化中的应用 [J]. 灌溉排水学报, 2005, 24 (4): 73-76.
- [7] 王明. 乐都县城西大桥空心板梁的优化设计 [J]. 城市道桥与防洪, 2003 (5): 39-40.
- [8] 赵顺波. 高性能预应力混凝土空心板梁系列优化设计研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (8): 49-52.
- [9] JTJ023-85, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
- [10] SOTIROPOULOS D G, STAVROPOULOS E C, VRAHATIS M N. A new hybrid genetic algorithm for global optimization [J]. Nonlinear Analysis, 1997, 30 (7): 4529-4538.
- [11] 石定志. 后张法组合 T 梁分阶段张拉的预应力施工控制 [J]. 铁道建筑, 2003 (12): 16-18.