

U 型渡槽环向无粘结预应力钢绞线束优化设置

陆晓敏, 赵 引, 任青文, 李 鹏

(河海大学 工程力学系, 江苏 南京 210098)

摘要: 构建了计算任意形状无粘结预应力钢绞线束由摩擦引起的内力沿程损失数值模型, 并用于某渡槽环向钢绞线束的优化设置. 通过作者编制的程序计算表明, 随着钢绞线束分割单元数的增加, 其内力计算结果趋于理论解, 并有足够的精度; 进而以槽壁若干截面的弯曲应力之和作为目标函数, 以钢绞线在各截面内的位置为设计变量, 应力作为约束条件, 建立了预应力环向钢绞线束合理位置的优化模型, 并利用复形法进行了求解. 结果表明, 本文的优化模型可以显著减小槽壁内的弯曲应力, 使槽壁轴向趋于均匀受压.

关 键 词: 渡槽; 预应力钢绞线束; 优化设计

中图分类号: TV672.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)02-0055-06

渡槽是引水系统中的常见结构, 为了增大过流面积, 设计时常采用薄壁结构, 并对截面形状及截面厚度进行优化设计, 以在满足强度条件的前提下, 尽可能减小渡槽的自重. 对于大跨度渡槽, 采用薄壁结构有时很难满足强度条件. 因此, 设计渡槽时在槽壁内常设置纵向和环向预应力钢绞线束, 以达到减小槽壁混凝土中拉应力的目的.

目前有关渡槽优化设计的文献并不多^[1-7], 对渡槽进行优化设计大多以工程造价为目标函数, 结构几何参数为设计变量, 强度作为约束条件. 研究预应力渡槽优化的文献更少^[3,4,8], 文献[3,8]并未对预应力筋专门进行优化研究; 文献[4]也只以预应力筋的数量作为设计变量, 并未考虑其位置的变化. 本文从优化设计的角度, 以槽壁内的弯曲应力作为目标函数来探讨环向钢绞线束的合理设置.

1 无粘结预应力钢绞线束内力沿程损失的计算

由于摩擦的作用, 预应力钢绞线束的内力将发生沿程损失, 当钢绞线束按弧形设置时(见图1), 由摩擦引起的内力沿程损失可以通过理论分析^[9]得到:

$$F = F_0 e^{-f\theta} \quad (1)$$

式中: F_0 为施加的预拉力; θ 为计算内力 F 的位置角; f 为钢绞线束与孔道壁的摩擦因数. 摩擦是预应力损失的主要因素, 在设计中, 还要考虑其它因素对预应力损失的影响^[10]. 目前规范也只提供了弧形钢绞线束内力的计算公式. 有关有预应力钢绞线束的渡槽设计^[11,12]计算也主要限于规范的方法.

弧形钢绞线束不一定是最佳的设置形式, 但按任意形状布置时, 很难从理论上直接导出计算由摩擦引起的预应力损失计算公式. 为此, 本文尝试通过数值分析方法, 把任意形状的钢绞线束简化成由直线段组成, 取其中第 i 段分析, 受力图见图2.

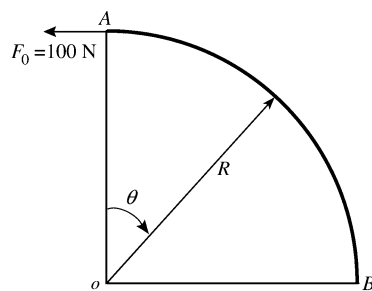


图1 弧形钢绞线束

Fig. 1 Arc-shape tendon

收稿日期: 2008-07-10

作者简介: 陆晓敏(1963-), 男, 江苏无锡人, 教授, 主要从事水工结构的力学研究工作. E-mail: xmlu@hhu.edu.cn

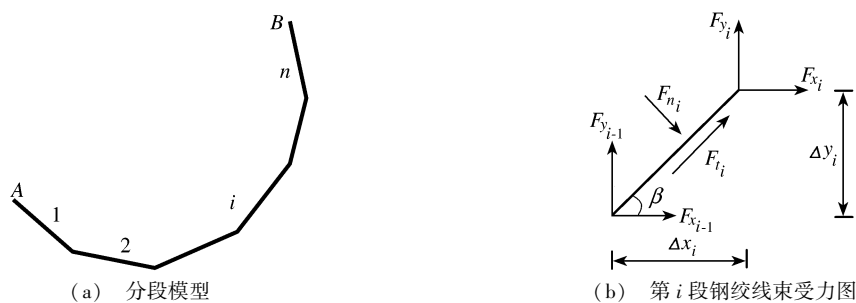
图 2 钢绞线束的分段模型和第 i 段钢绞线束的受力图

Fig. 2 Segment mode of tendon and Force diagram of segment

图 2(b) 中, F_{x_i} 、 F_{y_i} 为第 i 段和第 $i+1$ 段钢绞线束之间的相互作用力, F_{n_i} 、 F_{t_i} 分别为钢绞线束与孔道壁的法向约束力和摩擦力. 根据平衡条件和库伦定律可以建立 4 个方程:

$$\begin{cases} F_{x_{i-1}} + F_{x_i} + F_{t_i} \cos \beta + F_{n_i} \sin \beta = 0 \\ F_{y_{i-1}} + F_{y_i} + F_{t_i} \sin \beta - F_{n_i} \cos \beta = 0 \\ F_{x_i} \Delta y_i - F_{y_i} \Delta x_i + F_{n_i} \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2} / 2 = 0 \\ F_{t_i} = f F_{n_i} \end{cases} \quad (2)$$

如把钢绞线束分成 m 段, 则共有 $4m$ 个未知量 (F_{x_i} 、 F_{y_i} 、 F_{t_i} 、 F_{n_i} , $i=1, 2, \dots, m$), 所能建立的平衡方程也为 $4m$ 个, 故所有的未知量都可求解. 钢绞线束中的内力 F_i 可由其分力求得: $F_i = \sqrt{F_{x_i}^2 + F_{y_i}^2}$. 为验证此方法的可行性, 取弧形钢绞线束为例 (见图 1), 与由 (1) 式计算的理论解进行比较. 设弧形钢绞线束的半径为 5 m , 圆心角为 90° , 预拉力为 $F_0 = 100 \text{ N}$, 与孔壁的摩擦因数 $f=0.2$. 分别将钢绞线束等分 9 份和 18 份进行计算, 结果见表 1.

表 1 钢绞线束内力

Tab. 1 Internal force of steel tendon

位 置 角	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
内力(9 等分)/N	96.528	93.295	90.047	87.041	84.002	81.206	78.361	75.763	73.099
内力(18 等分)/N	96.575	93.266	90.072	86.986	84.007	81.130	78.351	75.667	73.075
理论解/N	96.570	93.257	90.058	86.968	83.985	81.104	78.322	75.635	73.040

由表 1 可见, 数值方法的结果与理论解非常接近, 且随着分段数的增加, 数值计算值趋于精确值. 在 9 等分的情况下, 计算值与理论值的误差已在 1% 以内. 故用上述方法分析任意形状布置的无粘结预应力钢绞线束的内力是可行的.

在求出 F_{x_i} 、 F_{y_i} 、 F_{n_i} 、 F_{t_i} 后, 将 F_{n_i} 、 F_{t_i} 反作用于混凝土, 就能反映预应力钢绞线束对混凝土的约束作用.

2 某渡槽初步设计方案及应力分析

图 3 为南水北调工程中某渡槽初步设计方案中的跨中断面, 单槽净宽 9.0 m , 净高 7.23 m , 跨度达 38.94 m . 弧段内半径 4.5 m , 槽侧壁厚 0.35 m . 渡槽顶部沿边梁每 2.5 m 设置一根拉杆, 以增加渡槽槽壁的侧向稳定性. 槽身混凝土强

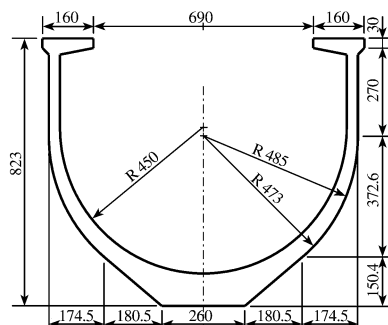


图 3 渡槽跨中断面图 (单位: cm)

Fig. 3 Mid span section (unit: cm)

度等级为C50,重度 25 kN/m^3 ,弹性模量 $2.5\times 10^4\text{ MPa}$.以满水工况来研究预应力环向钢绞线束优化设置的可行性.荷载有自重和满水压力.

2.1 无预应力钢绞线束时的内力分析

采用静力有限元法对渡槽结构进行应力分析.由于本文主要考虑环向预应力钢绞线束的布置,故将跨中断面简化为平面问题进行研究.根据对称性,取渡槽一半进行计算,有限元网格见图4.采用四边形四节点等参单元,槽壁分5层,共有节点284个,单元228个.槽顶拉杆宽度和高度均为50 cm,间距为2.5 m.在平面有限元计算中,拉杆的弹性模量按间距等效折减.在对称面上设置法向约束,E截面底部设置铅直向约束.在无设置预应力环向钢绞线束的情况下,线弹性有限元计算的槽壁环向应力见图5.应力以拉为正,压为负.由图5可见,上部外侧槽壁受拉,内侧受压,下部则相反.内外侧的最大拉应力分别达 3.564 MPa 和 3.496 MPa ,都超过了C50混凝土的容许拉应力.为此,在初步设计中槽壁内设置弧形环向预应力钢绞线束.

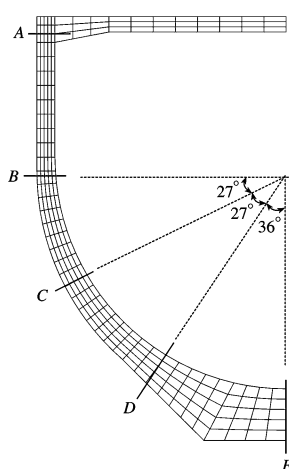


图4 有限元网格

Fig.4 FEM mesh

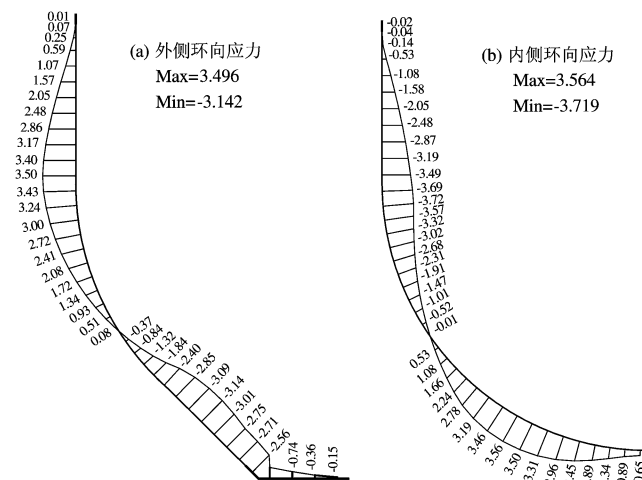


图5 槽壁环向应力(单位:MPa)

Fig.5 Circumferential stress in wall (unit: MPa)

2.2 设预应力钢绞线束时的内力分析

环向预应力钢绞线束的位置见图6.钢绞线束采用1860级 $\Phi 15.2$ 高强低松弛钢绞线,在跨中 $1/2$ 跨区域内按 $(7\times \Phi 15.2)@40$ 布置.钢绞线弹性模量为 $1.95\times 10^5\text{ MPa}$,标准抗拉强度 1860 MPa ,张拉控制系数0.70,控制张拉应力 1302 MPa .钢绞线束与孔道壁的摩擦因数为 $f=0.1$.

首先对预应力钢绞线束进行内力分析,求出其与孔道壁的法向作用力和切向摩擦力,然后反作用于孔道壁(有限元结构模型),则反映了预应力钢绞线束对渡槽的作用.有限元分析时在渡槽顶部锚头处还需反加预拉的作用力,以使渡槽在预应力作用下满足平衡条件.

设置预应力环向钢绞线束后的有限元计算结果见图7.由图7可见,设置预应力环向钢绞线束后,槽壁环向拉应力大大减小,槽壁环向基本都处于受压状态,只在内侧的底部出现少许拉应力区,最大值达 0.678 MPa .尽管槽壁应力状态得到了很大的改善,但内壁下部出现的少许拉应力,仍不满足规范要求.另外,槽壁轴向受力不均匀(内外侧应力相差大),尤其是A、B、C、D(见图4)4个截面上的弯曲应力很大,不能充分发挥混凝土的抗压强度.

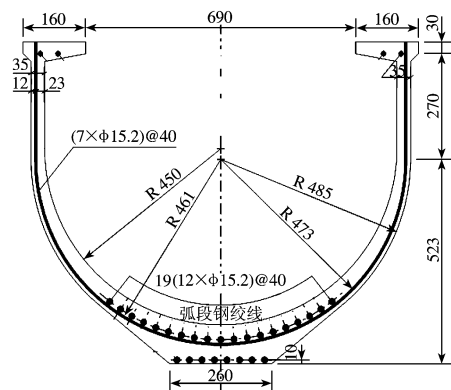


图6 环向钢绞线束位置图(单位:cm)

Fig.6 Circumferential tendon shape (unit:cm)

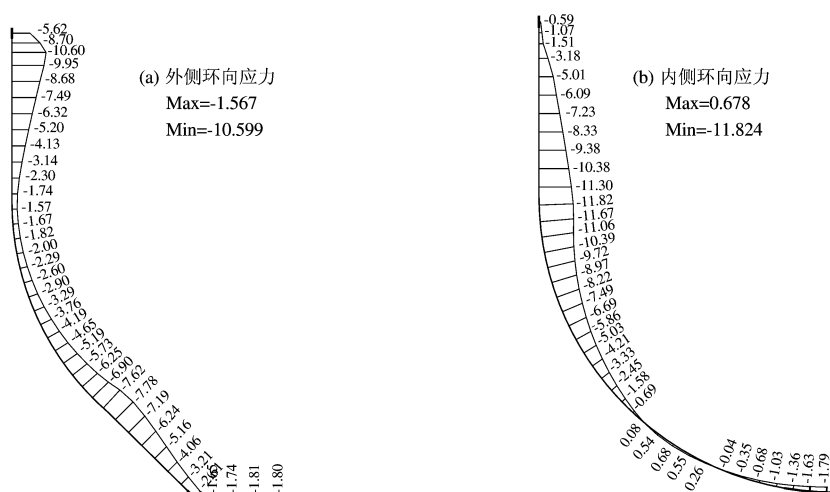


图 7 槽壁环向应力 (单位:MPa)

Fig. 7 Circumferential stress in wall (Unit: MPa)

通过调整环向钢绞线束的位置,可以改变槽壁的应力分布.下面利用优化方法来讨论环向钢绞线束的合理位置.

3 预应力环向钢绞线束位置优化

3.1 优化模型

优化环向钢绞线束位置的目的是使渡槽槽壁轴向受力均匀,减小弯曲应力.为此取 A, B, C, D, E 5 个断面(见图 4),以内外侧环向应力差的绝对值之和作为目标函数.目标函数值越小,说明弯曲应力越小.目标函数的表达式为:

$$F(X) = \sum_{k=1}^5 \text{abs}(\sigma_k^i - \sigma_k^e) \quad (3)$$

式中: X 为设计变量(矩阵); $k=1, 2, \dots, 5$ 分别代表 A, B, C, D, E 截面; σ_k^i, σ_k^e 分别为 k 截面内侧和外侧的环向应力; abs 表示取绝对值.

以环向钢绞线束的位置参数为设计变量.截面 B, C, D 将槽壁分成 4 段,假设位于截面 A, B 内的钢绞线束呈直线布置,其它 3 段内为弧形布置,弧半径保持初步设计值.各段钢绞线束的两端在 5 个截面上的位置可改变,即共有 5 个设计变量,变量的取值为钢绞线束在截面内相对于内侧的距离.考虑到混凝土最小保护层的厚度,设计变量的变化范围限定为: $x_A=0.10 \sim 0.28$ m, $x_B=0.10 \sim 0.25$ m, $x_C=0.10 \sim 0.30$ m, $x_D=0.10 \sim 0.50$ m, $x_E=0.15 \sim 0.75$ m.

约束条件为渡槽内壁环向不出现拉应力,及外壁环向应力小于容许值:

$$\begin{cases} \sigma^i(X) \leq 0 \\ \sigma^e(X) \leq [\sigma_t] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $[\sigma_t]$ 为混凝土的容许拉应力,本文取 1.5 MPa.

由于目标函数无法表示为设计变量的显式函数,本文采用复形法计算,详见文献[12].

3.2 计算结果

利用本文编制的程序,对上述优化模型进行了计算分析.达最优解时的目标函数值与设计变量分别为:

$$F(X) = 8.54 \text{ MPa}, x_A = 0.23 \text{ m}, x_B = 0.12 \text{ m}, x_C = 0.20 \text{ m}, x_D = 0.28 \text{ m}, x_E = 0.39 \text{ m}.$$

用 2.2 中的应力计算目标函数值的结果为 28.28 MPa,与最优解 8.54 MPa 比较可见,原初步设计方案

并非为钢绞线束最合理的设置方法.图8为环向预应力钢绞线束优化设计前后位置的示意图,图9为采用优化方案后,槽壁内外侧的环向应力图.可见,圆弧段钢绞线束宜上移.上移后,槽壁中的受力趋于均匀,明显减小了槽壁中的弯曲应力,尤其是内壁不再出现拉应力,只在外侧底部出现少许拉应力,但仍满足设计的约束条件.从计算结果看,优化设计对改善渡槽壁中的应力分布具有明显的效果,对渡槽预应力钢绞线束的设置具有很好的指导意义.

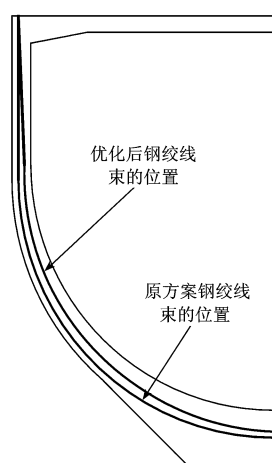


图8 环向钢绞线束位置

Fig. 8 Location of tendons

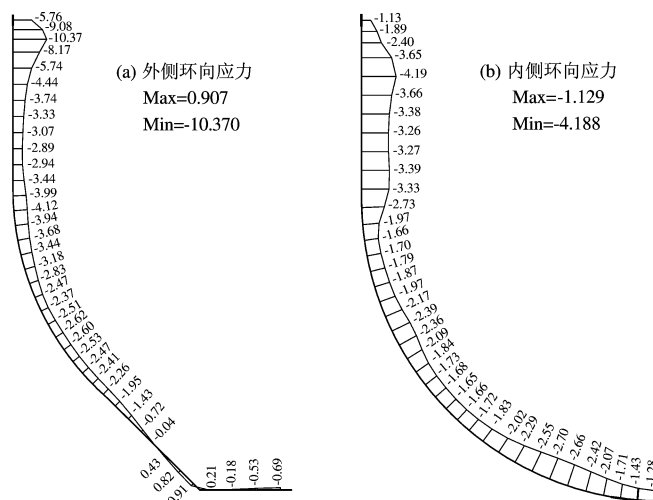


图9 槽壁环向应力(单位:MPa)

Fig. 9 Circumferential stress in wall (unit:MPa)

4 结 语

环向预应力钢绞线束位置的优化能显著改善槽壁的应力状态,使槽壁轴向受力趋于均匀,从而提高渡槽的安全性和可靠性.文中建立的计算任意形状布置的预应力钢绞线束内力的数值模型,为研究钢绞线束优化布置提供了方便,且采用有限单元法和数学优化的方法来研究环向钢绞线束合理位置是可行的,值得进一步研究.

但本文的工作还过于简单,很多问题还需进一步研究.如渡槽工作工况为三向应力状态,本文的平面分析过于简单;目标函数还可以作进一步改进,如可多取(文中只取5个截面)几个截面的内外侧应力差来计算目标函数值,使槽壁应力更趋均匀.另外,本文所取设计变量只反映了环向钢绞线束的位置变化,宜将其形状也作为设计变量.随着设计变量的增加,优化结果也将更为合理.本文所考虑的荷载工况也偏少,渡槽属薄壁结构,完整的优化设计还需考虑结构的稳定性.本文计算钢绞线束的内力时只考虑了摩擦的影响,具体设计时还将考虑混凝土收缩、锚具变形等因素对锚索内力的影响.

参 考 文 献:

- [1] 白新理,刘桂荣,王珺.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. (BAI Xin-li, LIU Gui-rong, WANG Jun. Application of improved genetic algorithm in aqueduct optimal design[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005, (2): 59-62. (in Chinese))
- [2] 赵瑜,陈长胜,刘宪亮,等.东深供水工程矩形渡槽优化设计及受力分析[J].长江科学院院报,2002,19(5):31-37. (ZHAO Yu, CHEN Chang-sheng, LIU Xian-liang, et al. Optimum design and behavior analysis of rectangular flume of Dongshen Water-supply Project[J]. Journal of Yangtze Scientific Research Institute, 2002, 19(5): 31-37. (in Chinese))
- [3] 赵新铭,白新理,杨开云.简支预应力U型薄壳渡槽槽身整体结构优化[J].港工技术,2002,(3):22-24. (ZHAO Xin-

- ming, BAI Xin-li, YANG Kai-yun. The global optimization of prestressed U-thin-shell aqueduct structure with simple supports [J]. Science & Technology of Ports, 2002, (3): 22-24. (in Chinese))
- [4] 周 娟, 屈吉鸿, 刘宪亮. 预应力 U 型渡槽结构的优化设计[J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2005, 17(3): 1-3. (ZHOU Juan, QU Ji-hong, LIU Xian-liang. The structural optimum design of the prestressed U-shell flumes[J]. Journal of Yellow River Conservancy Technical Institute, 2005, 17(3): 1-3. (in Chinese))
- [5] 朱彦鹏, 郑善义, 周 勇, 等. 非常规荷载作用下泥石流板式渡槽的优化设计[J]. 公路交通科技, 2007, 24(7): 24-27. (ZHU Yan-peng, ZHENG Shan-yi, ZHOU Yong, *et al.* Optimun design of debris flow slab type of aqueduct subjected to abnormal loads[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(7): 24-27. (in Chinese))
- [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. (ZHAO Yu, ZHANG Jian-wei, ZHANG Yi-na. Application of GA and the idea of penelty funtion in optimization of flume[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005, 24(4): 73-76. (in Chinese))
- [7] 张发祥, 张旭明. 肋拱渡槽优化设计研究[J]. 海河水利, 1995, (4): 3-4. (ZHANG Fa-xiang, ZHANG Xu-ming. Optimization design of flume supported by arc beam[J]. Haihe Water Resources, 1995, (4): 3-4. (in Chinese))
- [8] 朱照宣, 周起钊, 殷金生. 理论力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1982: 76-77. (ZHU Zhao-xuan, ZHOU Qi-zhao, YIN Jin-sheng. Theoretical Mechanics[M]. Beijing: Peking University Press, 1982: 76-77. (in Chinese))
- [9] SL/T191-96, 水工混凝土结构设计规范[S]. (SL/T191-96, Design Code for Hydraulic Concrete Structure[S]. (in Chinese))
- [10] 石向荣. 预应力钢筋混凝土矩形渡槽槽身设计[J]. 浙江水利科技, 2002, (5): 13-14. (SHI Xiang-rong. Design of prestressed concrete flume with rectangular section[J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2002, (5): 13-14. (in Chinese))
- [11] 郭雁平, 贺晓彬. 预应力技术在大型混凝土箱形渡槽中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2002, (12): 53-56. (GUO Yan-ping, HE Xiao-bin. Application of prestressed technique in large scale flume with box cross section[J]. China Rural Water and Hydropower, 2002, (12): 53-56. (in Chinese))
- [12] 蔡 新. 结构优化设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 100-102. (CAI Xin. Optimization Design of Structure [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2003: 100-102. (in Chinese))

Optimization design of prestressing tendon without bond in U-shape aqueduct bridge

LU Xiao-min, ZHAO Yin, REN Qing-wen, LI Peng

(*Department of Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: A numerical method to calculate internal force loss of pre-stressing tendon without bond duo to friction is established, and is used to design an aqueduct bridge. Its computational program written by the authors gives the results that the internal force is close to theoretical solution when the number of tendon elements increases. The numerical solution has enough precision. A optimization design mode of pre-stressing tendon without bond in the wall is presented, and is solved by Complex Method. Its destination function is defined by sum of absolute difference between internal and external circumferential stresses in the 5 sections of wall. The tendon coordinates in wall sections are chosen as the design variables. Allowable stresses are set as constrained conditions. The mode can make stress distribute uniformly in wall. The result shows that the method presented in the paper is feasible.

Key words: aqueduct bridge; prestressing tendon; optimization design