

# 斜拉桥式渡槽结构的方案优选和有限元分析

朱召泉 苏 超 任青文 王润富

(河海大学土木工程学院 南京 210098)

**摘 要** 结合南水北调中线工程穿黄(河)渡槽结构的设计,对钢质斜拉桥式大跨度渡槽结构进行了优化设计和有限元分析.首先,对斜拉桥式钢质渡槽进行了结构布置和构件截面设计.然后,采用 Super Sap 程序对其进行了有限元分析.在对各承重构件进行强度和刚度等验算的基础上,通过各设计方案的综合比较,给出了穿黄渡槽结构的优选方案.

**关键词** 斜拉桥 渡槽 方案优选 有限元分析

**中图号** TV672.3

南水北调中线工程是我国一项跨世纪的巨型工程.它将丹江口水库的大坝加高 20 m,然后将库水引出,通过湖北、河南、河北向京津地区供水.源头的设计引水流量达  $630\text{ m}^3/\text{s}$ ,输水总干渠全长达 1 700 多 km,沿途有大量的渡槽、隧洞、倒虹吸等交叉建筑物.特别是穿过黄河的建筑物,长度达 5 km,输水流量为  $500\text{ m}^3/\text{s}$ .黄河流势复杂,基础地质条件差,且位于 7 度地震区,河床高程以下 15 m 内砂土极易液化,对这样的巨型输水建筑物,必须提出多种方案,进行全面、深入的分析和比较.在对穿黄隧洞和常规的钢筋混凝土渡槽结构进行研究的基础上,结合弧柏咀渠线方案,对大跨度钢结构渡槽进行结构设计和有限元分析,从而为穿黄输水建筑物的设计和优选提供科学依据.

## 1 钢质斜拉桥式渡槽结构设计

设计方案选用双支渡槽,根据输水要求,每支渡槽的设计过水断面取为  $15\text{ m} \times 3.5\text{ m}$  (宽  $\times$  高),双支渡槽的过水断面合计为  $105\text{ m}^2$ .如图 1,每支渡槽均为开口厢形结构,它由钢质箱形截面主纵梁,工字形截面横梁、小纵梁和高强混凝土厢形过水槽组成.整个渡槽结构由钢缆索悬挂支承在钢筋混凝土塔架上.由于黄河河床的地质条件比较软弱,并考虑施工方便,塔架的基础采用灌注桩,由灌注桩群支承顶部塔墩(桩台),上部塔架结构则直接落在该桩台上.由于渡槽结构荷重很大,所需斜拉索根数较多,钢缆索的布置采用了扇形布置的密布柔索体系.塔架则采用三层双跨 A 型刚架型式.

根据上述设计思路,共设计了四种方案 12 组结构尺寸,进行了结构分析和方案比较.为节省篇幅,经过初步优选,下面仅列出三组结构设计尺寸,进行结构分析和方案比较.对照图 1,各方案渡槽上部结构的构件截面尺寸如表 1 所列.其中,主纵梁为由钢缆索悬吊的弹性支承连续梁,截面采用焊接箱形组合梁,每支渡槽布置两根;横梁为支承在两主纵梁上的单跨梁,采用变梁高的焊接工字形组合梁,横梁间距初定为 2.5 m;小纵梁与横梁一起支承混凝土过水槽底板,采用轧制工字型钢,间距为 1.5 m,共 11 道.钢索沿主纵梁纵向的吊点布置间距为 5.0 m,即每隔一根横梁处布置一个钢索吊点.

表 1 渡槽各类构件的截面尺寸

| Table 1 Section sizes of flume members mm |       |                     |                     |                     |
|-------------------------------------------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 跨度/m                                      |       | 80                  | 100                 | 120                 |
| 主纵梁                                       | 上、下翼缘 | - 25 $\times$ 1 500 | - 25 $\times$ 1 500 | - 25 $\times$ 1 500 |
|                                           | 内外腹板  | - 16 $\times$ 4 800 | - 16 $\times$ 5 000 | - 16 $\times$ 5 200 |
| 横 梁                                       | 上、下翼缘 | - 25 $\times$ 400   | - 25 $\times$ 400   | - 25 $\times$ 400   |
|                                           | 跨中腹板  | - 16 $\times$ 2 000 | - 16 $\times$ 2 000 | - 16 $\times$ 2 000 |
|                                           | 梁端腹板  | - 16 $\times$ 1 000 | - 16 $\times$ 1 000 | - 16 $\times$ 1 000 |
| 小 纵 梁                                     |       | 120a                | 120a                | 120a                |
| 钢筋混凝<br>土铺板厚                              |       | 200                 | 200                 | 200                 |

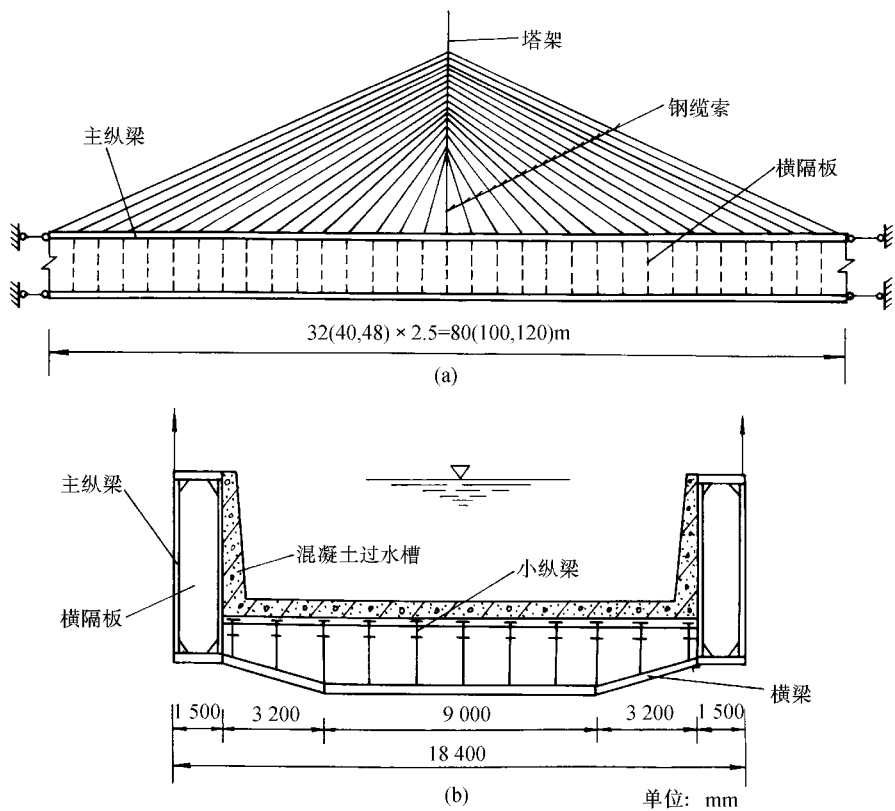


图 1 斜拉桥式渡槽结构布置简图

Fig.1 Structural arrangement of cable stayed flume

对于 A 型钢筋混凝土塔架和灌注群桩的布置型式及结构尺寸详见南水北调中线工程穿黄大跨度渡槽研究报告\*。

## 2 渡槽结构的有限元计算分析

### 2.1 计算模型和计算工况

由于每一个塔架都是独立式结构,可只取一跨并考虑相邻跨的连接条件来进行计算,其计算简图如图 1 (a)所示。经多方案比较,并考虑便于伸缩缝的止水布置,渡槽跨中截面边界支承条件取为双铰连接,即在箱形主纵梁截面的上、下翼缘处均按有一纵向水平链杆处理。渡槽结构采用三维有限元计算,所用程序为 Super Sap 通用程序,钢索、渡槽分别采用索、板壳、杆、梁四类单元模拟,混凝土塔架则按三维块单元处理。

根据渡槽结构在施工架设、正常运行或偶然荷载等作用下的各种工作条件,需全面考虑结构自重、水重、风载、塔架沉降、地震及温度变化等影响,从而对渡槽结构进行电算分析。本文共考虑了 10 种工况,对渡槽结构进行有限元分析。

### 2.2 电算成果分析

根据 80 m、100 m 和 120 m 三种跨度方案对渡槽各构件的初选截面尺寸(表 1)以及 10 种计算工况,分别进行了  $3 \times 10$  次电算。下面把渡槽结构的电算结果做一简要分析。

#### 2.2.1 钢缆索

钢缆索由多股公称直径均为 15.2 mm 的钢绞线制成,每股钢绞线则由 7 $\phi$ 5 的高强度钢丝组成,钢缆索的标准强度为  $f_k = 1\,700\text{ MPa}$ 。

表 2 列出了不同跨度方案,在各种计算工况下单根钢缆索的最大和最小拉应力。为了使钢索尽量做到受力均匀,从而减小主纵梁的受力不均性,电算时在空载工况下对钢索施加了预应力,以使其在渡槽正常工作

\* 河海大学土木工程学院、长委会设计院枢纽处,1997 年 10 月

时受力均匀.从表 2 可以看出,不同跨度方案中,单根钢索的拉应力的最大值出现在塔架沉降和风荷载同时作用的工况 6.各自相应于钢索标准强度  $f_K$  的安全系数分别为  $1\,700/609.8=2.79$ ,  $1\,700/568.5=2.99$ ,  $1\,700/538.9=3.15$ ,均在钢缆索的允许安全系数  $2.5\sim4.0$  范围内.不同跨度方案,单根钢缆索的净截面面积  $A_e$  的取值如表 2 所列.

2.2.2 主纵梁和横梁的强度验算

钢质渡槽各承重构件所采用的钢材为 16Mn 钢( $Q_{345}$  钢),其设计强度  $f_K=300\text{ MPa}$ (第二组)<sup>[1]</sup>.根据电算结果,将不同跨度方案在各种计算工况下渡槽结构主纵梁和横梁的应力控制部位的等效力最大值分别列入表 3,需要指出的是横梁的最大应力值均出现在跨中截面附近,而主纵梁的最大应力值则出现在链杆支座(图 1)附近的翼缘上.从表中可以看出,各种工况下,各横梁的应力均小于钢材的设计强度  $f_K$ ,满足强度要求.主纵梁在大多数工况下,能满足强度要求,只是在 100 m 和 120 m 跨度方案中,考虑地震荷载作用下的工况 9 和工况 10,其最大应力值比钢材设计强度  $f_K=300\text{ MPa}$  稍大,在 120 m 跨度方案的工况 10,主纵梁的最大应力  $\sigma=314.3\text{ MPa}$ ,不超过设计强度  $f$  的 5%.而且工况 9 和工况 10 属于考虑地震荷载的校核工况,钢材的设计强度通常可提高 5%~10%.综上所述,主纵梁和横梁均能满足强度要求.

表 2 钢索的最大、最小拉应力值

| Table 2 Maximal and minimal stresses of steel cable MPa |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|---------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 计算工况                                                    | 跨度/m            |                 |                 |                 |                 |                 |
|                                                         | 80              |                 | 100             |                 | 120             |                 |
|                                                         | $\sigma_{\max}$ | $\sigma_{\min}$ | $\sigma_{\max}$ | $\sigma_{\min}$ | $\sigma_{\max}$ | $\sigma_{\min}$ |
| 1                                                       | 564.5           | 484.8           | 559.2           | 433.9           | 532.9           | 389.6           |
| 2                                                       | 522.6           | 459.7           | 539.7           | 393.6           | 521.6           | 351.7           |
| 3                                                       | 529.6           | 445.0           | 522.8           | 398.7           | 507.7           | 355.0           |
| 4                                                       | 536.2           | 444.5           | 531.8           | 395.9           | 485.0           | 315.0           |
| 5                                                       | 609.6           | 437.0           | 567.9           | 394.3           | 537.9           | 314.4           |
| 6                                                       | 609.8           | 436.9           | 568.5           | 393.6           | 538.9           | 314.1           |
| 7                                                       | 542.1           | 452.9           | 537.3           | 404.2           | 521.7           | 362.0           |
| 8                                                       | 543.8           | 455.1           | 539.7           | 405.8           | 524.5           | 363.8           |
| 9                                                       | 536.4           | 444.5           | 532.1           | 395.6           | 517.2           | 354.3           |
| 10                                                      | 538.3           | 444.5           | 533.0           | 394.6           | 518.6           | 353.8           |
| 钢索净<br>截面面<br>积 $A_e/\text{mm}^2$                       | 6 860           |                 | 6 860           |                 | 8 232           |                 |

表 3 渡槽主纵梁和横梁的最大应力  $\sigma$

| Table 3 Maximal stress of main longitudinal girder and cross girder MPa |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 计算工况                                                                    | 跨度/m  |       |       |       |       |       |
|                                                                         | 80    |       | 100   |       | 120   |       |
|                                                                         | 主纵梁   | 横梁    | 主纵梁   | 横梁    | 主纵梁   | 横梁    |
| 1                                                                       | 173.0 | 196.0 | 185.6 | 189.6 | 220.3 | 195.2 |
| 2                                                                       | 167.6 | 194.0 | 215.6 | 215.6 | 184.0 | 188.8 |
| 3                                                                       | 160.9 | 182.0 | 166.6 | 175.9 | 203.0 | 182.7 |
| 4                                                                       | 184.9 | 187.9 | 213.6 | 215.5 | 243.3 | 191.0 |
| 5                                                                       | 206.8 | 201.3 | 197.3 | 180.6 | 215.5 | 172.6 |
| 6                                                                       | 235.8 | 202.9 | 243.0 | 216.1 | 291.8 | 192.0 |
| 7                                                                       | 158.9 | 184.3 | 168.7 | 183.4 | 200.7 | 184.0 |
| 8                                                                       | 189.8 | 191.7 | 220.1 | 219.4 | 279.0 | 205.6 |
| 9                                                                       | 201.4 | 190.1 | 236.6 | 232.6 | 302.4 | 213.0 |
| 10                                                                      | 244.7 | 202.0 | 311.7 | 290.9 | 314.3 | 279.6 |

2.2.3 主纵梁和横梁的刚度验算

对于斜拉桥式渡槽结构,主纵梁由于受到钢缆索的均匀支承,在空载状态下,对钢索施加预应力后,各工况计算的主纵梁相对挠度均较小,不同跨度方案在各种计算工况下,主纵梁的相对挠度值  $w/l$  均小于  $1/1\,000$ ,满足设计要求.对于横梁,不同跨度方案,横梁的最大挠度值相差不大,这是因为对于不同跨度方案,横梁的跨度、截面尺寸及荷载条件完全相同所致.各跨度方案横梁的最大相对挠度均为  $w/l=1/740$ ,也满足渡槽结构设计要求的挠度限值  $[w/l]=1/600$  的要求.

对于小纵梁,经计算分析,均能满足强度和刚度要求,混凝土过水槽底板的强度、抗裂性及挠度也符合设计要求.

3 方案比较和方案总结

为了进行方案比较,经计算,分别把各跨度方案渡槽的钢材(梁格、钢索)和混凝土材料(过水槽、塔架、桩基)的总用量列入表 4,该表列出的是双支渡槽每单位长度方向的材料总用量.

从表 4 可以看出,若以钢材和混凝土材料的总用

表 4 双支渡槽材料总用量

| Table 4 Total material consumption of two-line flume |                                              |                                                 |                                                |                                                |                                                 |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 跨度<br>/m                                             | 钢材总<br>用量<br>$/(\text{t}\cdot\text{m}^{-1})$ | 过水槽<br>混凝土<br>$/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1})$ | 塔架<br>混凝土<br>$/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1})$ | 桩基<br>混凝土<br>$/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1})$ | 混凝土<br>总用量<br>$/(\text{m}^3\cdot\text{m}^{-1})$ |
| 80                                                   | 14.792                                       | 9.36                                            | 20.64                                          | 87.42                                          | 117.42                                          |
| 100                                                  | 15.328                                       | 9.36                                            | 20.23                                          | 93.25                                          | 122.84                                          |
| 120                                                  | 16.242                                       | 9.36                                            | 21.20                                          | 100.37                                         | 130.93                                          |

量来衡量,均以 80 m 跨度方案最省,100 m 和 120 m 方案依次增加;以钢材用量衡量,100 m 和 120 m 方案分别比 80 m 方案增加 3.6% 和 10.4% ;若以混凝土材料总用量衡量,100 m 和 120 m 方案分别比 80 m 方案增加 4.6% 和 11.5% .

从上述的电算分析可知,对于 80 m,100 m 和 120 m 三种不同跨度方案,按本文所取的主纵梁、横梁及小纵梁的截面尺寸,均能满足各自的强度、刚度和稳定性要求,混凝土过水槽板也能满足抗拉强度、抗裂性及挠度要求.可以看出,三种跨度方案的技术性能均能满足要求,经济指标相差不大.但从减小对黄河水流的影响来说,当然跨度较大的方案较好.因此,从经济性、施工架设以及对黄河水流的影响和整体美观等方面综合考虑,可选用 100 m 跨度方案进行进一步的研究分析,从而进行合理设计.

## 4 结 语

- a. 对大跨度渡槽运用现代桥梁技术,采用斜拉桥式钢质渡槽方案设计是可行的.它不仅可以解决荷重巨大且跨度大的问题,而且还具有美观及观赏性的优点,它能够把安全性、经济性和美观实用性和谐统一起来.
- b. 计算分析表明,通过对钢缆索的预施应力的合理调整,可以有效地改善渡槽主纵梁的受力和变形条件,以达到截面设计合理从而减少钢材用量的目的.

## 参 考 文 献

1 中华人民共和国冶金工业部.GBJ17-88 钢结构设计规范.北京 中国计划出版社,1989.6

# Scheme Optimization and Finite Element Analysis of Cable Stayed Flume Structure

Zhu Zhaoquan    Su Chao    Ren Qingwen    Wang Runfu  
(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098)

**Abstract** In combination with the design of flume structure passing over the Yellow River on the middle route of South-North water transfer project, the scheme design and finite element analysis of the long-span cable stayed steel flume structure is performed. First, the structural arrangement and member section design of the cable stayed steel flume are discussed. Secondly, the finite element analysis of the flume structure is performed by means of Super Sap program. Finally, on the basis of verification of strength and stiffness of load-bearing members, through comprehensive comparison of different design schemes, the optimal schemes of flume structure passing over the Yellow River are put forward.

**Key words** cable stayed bridge ; flume ; scheme optimization ; finite element analysis