

# 大型多槽式矩形渡槽结构静力分析

季日臣<sup>a,b</sup>, 杨旭亮<sup>b</sup>, 许涛<sup>b</sup>, 严娟<sup>b</sup>

(兰州交通大学 a. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室; b. 土木工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 根据大型多槽式矩形渡槽槽身结构及其受力特点, 采用结构力学法使复杂的空间结构分离成相互联系的两个平面问题: 横向计算时, 横梁底部弹性支承在各纵梁上, 根据力法位移协调理论, 给出了双槽式和三槽式渡槽横向结构弹性支承反力的计算公式, 并依此求得结构的横向受力与弹性支承反力; 以弹性反力作为荷载, 反向作用于纵梁上, 从而进行纵向梁的受力分析。通过三维实体有限元软件(MIDAS)对某大型三槽式渡槽单跨槽身整体进行了建模分析, 并将结构力学法和有限元法计算所得结果进行了比较分析, 验证了方法的合理性和公式的准确性。利用其进行渡槽结构计算, 能满足工程设计的精度要求。

**关键词:** 多槽式矩形渡槽; 结构力学法; 弹性支承; 荷载分配; 有限元软件

**中图分类号:** TV 312; TV 68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0046-04

## Static Analysis of Large scale Multi troughs Rectangular Aqueduct Structure

JI Ri chen<sup>a,b</sup>, YANG Xu liang<sup>b</sup>, XU Tao<sup>b</sup>, YAN Juan<sup>b</sup>

(Lanzhou Jiaotong University, a. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province; b. School of Civil Engineering, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** According to the structure of large scale multi troughs rectangular aqueduct and its mechanical characteristics, the structural mechanics method was applied to decompose the complicated space structure into two connected plane problems. In the lateral calculation, the beam bottom was supported by the longitudinal beams. According to the displacement coordination theory, the elastic supporting force calculation formula of double and triple troughs were proposed, and the lateral force and the elastic support force of the structure can be obtained. The elastic supporting forces were regarded as loads and acted reversely on the longitudinal beams, and then the forces on the longitudinal beams were calculated. The solid 3D finite element software (MIDAS) was adopted to simulate the triple troughs rectangular aqueduct, and the results obtained from the finite element model and the structural mechanics method were compared, which verified the reliability of the proposed method and accuracy of the formula. Consequently, the method used to calculate the aqueduct structure can meet the accuracy requirements of engineering design.

**Key words:** multi troughs rectangular aqueduct; structural mechanics method; elastic support; load distribution; finite element software

我国南水北调工程中渡槽应用十分广泛, 由于该工程中渡槽多为自流输水, 水头损失较小, 而输水流量巨大, 普通梁式渡槽很难满足要求, 因此对渡槽结构提出了更高要求。为了减小槽身底板厚度, 设计时将槽身分成两槽或三槽并联的形式, 使其纵梁达到三或四条, 改变了以往利用大侧墙承重的结构形式, 减少了上部结构的重量, 也减小了渡槽槽身各构件的尺寸, 使渡槽槽身承载能力大大增加, 纵向跨越能力也随之增大, 槽身结构形式和受力趋于优化。在水荷载作用

时, 由于结构的整体作用, 各纵梁不同程度地都要产生挠曲变形而形成一个挠曲面, 显示结构变形和受力的空间性, 从而造成水荷载在纵梁间的分配非常复杂, 结构静力计算的难度相应增加, 渡槽的这种受力特性实际上已属于空间结构力学分析范畴。

一般认为, 中纵梁承担一个单槽的水荷载, 而边纵梁只承担半个槽的水荷载, 理论上如果边纵梁及中纵梁的刚度与其承受的荷载相对应, 他们的挠度变形将相同, 横梁支座及

收稿日期: 2013-09-30 修回日期: 2013-12-10 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助(IRT 1139); 国家自然科学基金项目资助(10902045)

作者简介: 季日臣(1969-), 男, 山西朔州人, 教授, 博士, 主要从事水工结构的教学和科研工作。E-mail: JIRICHEN@126.com

荷载作用的不同点处将不会产生相对变形,这在实际工程中很难做到的。一般情况下,挠度较大的中纵梁的(水荷载为边纵梁的2倍)部分荷载必然通过底肋以剪力形式传递给边纵梁,从而中纵梁分配的水荷载在减小,而边纵梁分配的水荷载在增大,使渡槽结构达到平衡。

目前,多槽式渡槽结构的静力分析方法还不成熟,竺慧珠等<sup>[1]</sup>采用传统结构力学方法,在渡槽横向受力计算时,没有考虑边纵梁与中纵梁的不均匀变形,而把纵梁看成横梁的固定支承是不合适的;赵顺波等<sup>[2]</sup>研究中侧肋和底肋组成横向受力框架,纵梁和横梁结点为固定支承,各纵梁不均匀变形按结构力学中支座沉降进行槽身横向受力分析,其支座的不均匀沉降需要通过三维实体有限元计算;王云仓<sup>[3]</sup>考虑了中纵梁传递给边纵梁的次生荷载和横梁产生的次生弯矩;赵顺波等<sup>[4]</sup>采用了改进的空间刚架结构计算法和三维混凝土有限元法分析了南水北调工程中双泊河渡槽。本文以南水北调某大型三槽式矩形渡槽为例,运用结构力学法和有限元法对渡槽槽身空间结构受力进行分析,获取渡槽槽身纵向计算的简化方法和计算公式。

### 1 渡槽槽身结构计算模型简化

多槽式矩形渡槽槽身受力分析过程中,将槽身视为带翼缘板的横梁和纵梁交叉组成的空间结构,分析时按平面问题简化为横梁和纵梁。横向简化为由侧肋、中墙和底肋组成的受力框架,承受水荷载作用,纵梁和横梁的结点为弹性支承;纵向简化为一简支梁,承受横梁弹性支承传递的荷载。渡槽槽身结构计算简化模型见图1。

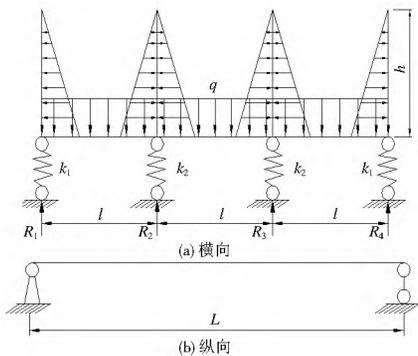


图1 渡槽槽身结构计算简化模型

Fig.1 Simplified model of the calculation of aqueduct structure

### 2 横梁弹性支承刚度计算

根据结构力学中位移计算原理,取单位均布荷载作用在纵梁上,求横梁位置处截面的挠度。根据弹簧变形原理,该截面的弹性支承刚度即为其挠度的倒数。由于各纵梁高跨比很大,挠度计算时要同时考虑弯矩和剪力的共同作用。

结构力学中平面受弯构件在荷载作用下的位移计算公式为<sup>[5]</sup>:

$$\Delta_p = \int \frac{\overline{M}M_p dx}{EI} + \int \frac{k\overline{F}_s F_{sp} dx}{GA} \quad (1)$$

式中: $E$ 为材料的弹性模量; $I$ 和 $A$ 分别为杆件截面惯性矩和面积; $G$ 为材料的切变模量; $k$ 为切应力沿截面分布不均匀而引用的修正系数,其值与截面形状有关,矩形截面 $k = \frac{6}{5}$ ,

工字型截面 $k \approx \frac{A}{A'}$ , $A'$ 为腹板截面面积。

纵梁上作用一单位均布荷载,其弯矩和剪力分布为:

$$M_p(x) = \frac{1}{2}xL - \frac{1}{2}x^2 \quad F_{sp}(x) = \frac{1}{2}L - x \quad (2)$$

式中: $L$ 为简支梁支座间距(m); $x$ 为计算截面距离支座的距离(m)。

纵梁上在计算截面上作用一单位集中荷载,其弯矩和剪力分布为:

$$\overline{M}(x) = \begin{cases} x(1 - \frac{a}{L}), & x \leq a \\ a(1 - \frac{x}{L}), & x \geq a \end{cases}$$

$$\overline{F}_s(x) = \begin{cases} 1 - \frac{a}{L}, & x \leq a \\ 1 - \frac{a}{L}, & x \geq a \end{cases} \quad (3)$$

式中: $a$ 为纵梁上横梁位置距支座的距离(m)。

将(2)、(3)式代入(1)式,化简整理后得到纵梁在单位均布荷载作用下横梁位置处的竖向位移,即为纵梁在该截面的柔度系数:

$$C_a = \frac{1}{24EI}(a^4 + L^3a - 2La^3) + \frac{k}{2GA}(La - a^2) \quad (4)$$

纵梁弹性支承的刚度即为:

$$k_a = \frac{1}{C_a} \quad (5)$$

### 3 计算截面选取

渡槽槽身横向计算时,简化为弹性支承在各主梁上的多跨弹性支承连续框架,在跨中截面处,弹性支承刚度最小;当截面由跨中向支座处靠近时,弹性支承刚度增大,在支座处的位移为零,此时端横梁近似为固定支承连续梁<sup>[6,8]</sup>。因此,在计算时沿跨径方向选取槽跨跨中、1/4、1/8和支座处为特征截面进行计算分析。

### 4 渡槽槽身横向结构弹性支承反力计算

双槽式渡槽槽身底板受均布水荷载为 $q$ ,侧墙所受水荷载作用在横梁梁端弯矩为 $M$ ,中纵梁对横梁的弹性支承刚度为 $k_2$ ,采用力法进行分析,见图2。

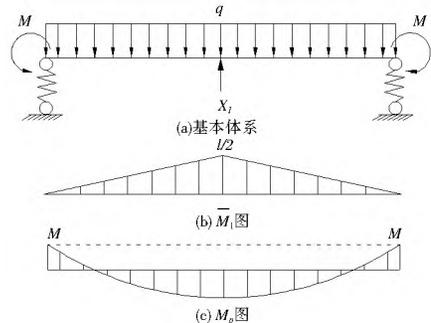


图2 槽身横向受力计算示意图

Fig.2 Schematic diagram of aqueduct lateral force calculation

力法典型方程为:

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = \Delta_1 = -(\frac{X_1}{k_2} + \Delta_{1\Delta}) \quad (6)$$

$$\text{式中: } \delta_{11} = \int \frac{\bar{M}_1^2 ds}{EI} = \frac{l^3}{6EI}; \Delta_{1p} = \int \frac{\bar{M}_1 M_p ds}{EI} = \frac{1}{EI} \left( \frac{1}{2} Ml^2 - \frac{5}{24} ql^4 \right); \Delta_{1\Delta} = - \int \bar{F}_{R1} c = - \frac{ql}{k_1} + \frac{X_1}{2k_2}$$

将以上系数代入典型方程(6)中, 化简计算得到:

$$X_1 = \frac{\frac{5}{12} \frac{ql^4}{EI} - \frac{Ml^2}{EI} + \frac{2ql}{k_1}}{\frac{l^3}{3EI} + \frac{1}{k_1} + \frac{2}{k_2}} \quad (7)$$

令  $\frac{1}{k_1} = C_1, \frac{1}{k_2} = C_2, C_1, C_2$  为弹性支座的柔度系数。

则, 双槽式渡槽弹性支承反力:

$$R_2 = X_1 = \frac{\frac{5}{12} \frac{ql^4}{EI} - \frac{Ml^2}{EI} + 2qlC_1}{\frac{l^3}{3EI} + C_1 + 2C_2} \quad (8)$$

$$R_1 = R_3 = ql - \frac{1}{2} R_2 \quad (9)$$

式中:  $q$  为作用在横向结构上的均布水荷载;  $l$  为各纵梁的间距;  $C_1$  为边纵梁与横梁交叉点弹性支座的柔度系数;  $C_2$  为中纵梁与横梁交叉点弹性支座的柔度系数。

同理可得三槽式渡槽的弹性支承反力为:

$$R_2 = R_3 = \frac{\frac{11}{12} \frac{ql^4}{EI} - \frac{Ml^2}{EI} + \frac{3}{2} qlC_1}{\frac{5l^3}{6EI} + \frac{10}{9} C_1 + C_2} \quad (10)$$

$$R_1 = R_4 = \frac{3}{2} ql - R_2 \quad (11)$$

## 5 槽身纵向计算

作为纵向、横向和高度 3 个方向整体受力的结构, 对于其所受荷载不是在各纵梁之间进行简单平均分配, 而是依靠相互协调平衡荷载的作用。所以通过横向结构分析中得到各纵梁对横梁的弹性支承反力, 即可求出水荷载沿横向在各纵梁之间的分配系数。将其对应水荷载作用在各纵梁上, 对纵梁进行受力分析。从支座到跨中, 弹性支承的刚度逐渐变小, 使弹性支承的反力在槽跨不同计算截面处产生变化, 因此各纵梁上分配的水荷载沿跨径方向的分布是不均匀的。

## 6 算例分析

### 6.1 工程背景

南水北调中线某大型三槽式渡槽, 单槽断面  $6.0 \text{ m} \times 5.3 \text{ m}$ , 设计水深  $4.792 \text{ m}$ 。边墙厚  $0.6 \text{ m}$ , 顶部设  $2.0 \text{ m}$  宽的人行道板, 中墙厚  $0.7 \text{ m}$ , 顶部设  $2.7 \text{ m}$  宽的人行道板。槽身设侧肋和底肋, 间距为  $2.5 \text{ m}$ 。侧肋宽  $0.5 \text{ m}$ , 高  $0.7 \text{ m}$ 。

表 4 结构力学法计算水荷载作用下各纵梁位移与下缘应力

Table 4 Displacement and stress in each longitudinal beam under the water load using the structural mechanics method

距支座距离/m		0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
边纵梁	位移/mm	0	0.51	0.89	1.40	1.53	1.58	1.62
	弯矩/(kN·m)	0	5 779.5	1 0591.2	15 375.4	17 096.8	18 738.8	19 288.8
	应力/MPa	0	0.34	0.69	0.99	1.10	1.17	1.28
中纵梁	位移/mm	0	0.56	0.98	1.77	1.84	2.21	2.45
	弯矩/(kN·m)	0	8 742.5	15 825.4	21 286.0	25 168.6	27 489.1	28 259.9
	应力/MPa	0	0.43	0.79	1.06	1.25	1.36	1.45

底肋宽  $0.5 \text{ m}$ , 高  $1.1 \text{ m}$ 。槽身纵向为多跨简支梁, 跨径为  $30 \text{ m}$ 。槽身为预应力混凝土结构, 强度为 C50。

### 6.2 渡槽有限元法计算结果

采用有限元软件 MIDAS 进行计算, 对槽身进行单元划分<sup>[9]</sup>, 共有 9 444 个结点, 29 275 个单元。渡槽有限元模型见图 3。弹性模量  $E = 3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\mu = 0.2$ 。水荷载作用下槽身有限元计算结果见表 1、表 2。

表 1 有限元法计算水荷载作用下各纵梁的位移与下缘应力

Table 1 Displacement and stress

in each longitudinal beam under the water load using FEM

距支座距离/m		0	2.5	5	7.5	10	12.5	15
边纵梁	位移/mm	0	0.52	0.92	1.24	1.46	1.57	1.61
	应力/MPa	0	0.56	0.79	0.98	1.10	1.16	1.25
中纵梁	位移/mm	0	0.64	1.05	1.75	1.81	2.18	2.45
	应力/MPa	0	0.45	0.87	1.08	1.25	1.37	1.41

表 2 有限元法计算水荷载作用下横梁计算截面处下缘应力

Table 2 Stress in cross beam under the water load using FEM

距横梁跨中的距离/m	0	3.325	6.65	9.975
边横梁应力/MPa	0.383	-0.019	0.306	-0.146
中横梁应力/MPa	0.898	0.271	0.664	-0.215

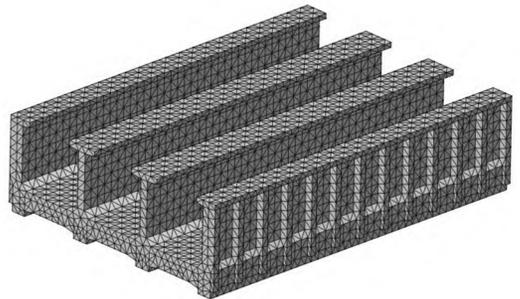


图 3 有限元模型

Fig. 3 Aqueduct FEM model

### 6.3 渡槽结构力学法计算结果

槽身结构中, 边纵梁截面惯性矩  $I_b = 52.06 \text{ m}^4$ , 中纵梁的截面惯性矩  $I_c = 65.91 \text{ m}^4$ , 横梁的截面惯性矩为  $I_0 = 1.42 \text{ m}^4$ 。根据上述原理计算分析, 所得结果见表 3 至表 5。

表 3 水荷载横向分配系数

Table 3 Lateral distribution coefficient of water load

梁号	梁端截面	1/8 截面	1/4 截面	跨中截面
边纵梁	0.168	0.191	0.202	0.209
中纵梁	0.332	0.309	0.298	0.291

表5 结构力学法计算水荷载作用下横梁计算截面处下缘应力

距横梁跨中的距离/m		0	3.325	6.65	9.975
边横梁	弯矩/(kN·m)	668.93	-19.96	658.97	-269.60
	应力/MPa	0.353	-0.01	0.348	-0.128
中横梁	弯矩/(kN·m)	1316	667.14	982.56	-449.33
	应力/MPa	0.795	0.352	0.519	-0.237

注: 应力以拉应力为正, 压应力为负, 弯矩以下缘受拉为正。

## 6.4 结果分析

(1) 同一截面处中纵梁位移和底缘应力均大于边纵梁, 说明中纵梁所受水荷载大于边纵梁所受水荷载。

(2) 从支座到跨中, 弹性支承的刚度逐渐变小, 使弹性支承的反力在槽跨不同计算截面处产生变化, 水荷载在各纵梁上的分配情况为: 在跨中截面, 中纵梁分配的水荷载是边纵梁的1.5倍, 随着向梁端截面的靠近, 中纵梁分配的水荷载在增加, 而边纵梁分配的水荷载在减少, 在梁端截面处, 中纵梁分配的水荷载大约是边纵梁的2倍。

(3) 一般认为, 边纵梁承担半个槽的水荷载, 中纵梁承担一个单槽的水荷载, 如果这样对槽身进行纵向受力计算分析, 对边纵梁的计算是偏于不安全的, 对中纵梁的计算是偏于保守的。

(4) 边纵梁从支点到1/4截面的荷载分配系数逐渐增大, 近似呈直线分布, 从1/4截面到跨中截面的荷载分配系数基本不变; 中纵梁从支点到1/4截面的荷载分配系数逐渐减小, 近似呈直线分布, 从1/4截面到跨中截面的荷载分配系数基本不变。所以在横向计算时沿跨径选取槽跨跨中和支座处为特征截面进行计算分析就可以了。

(5) 边横梁为固定支撑的连续梁, 支点截面处为负弯矩, 下缘受压; 跨中截面处为正弯矩, 下缘受拉。

(6) 中横梁为弹性支承的连续梁, 在靠近边纵梁处为负弯矩, 下缘受压, 随着远离边纵梁, 弯矩由负变正, 下缘由受压向受拉转变。其与固定支撑的连续梁不同, 不能把刚性支承连续梁上弯矩分布的概念用以说明中横梁的内力情况。

(7) 结构力学法在槽身结构计算过程中, 没有考虑梁的扭转问题, 所以与有限元法计算稍有差异。

## 7 结语

进行渡槽槽身空间结构计算时, 将渡槽槽身简化为平面计算模型, 从横向结构和纵向结构单独分析, 用弹性支座使横向和纵向结构产生联系。横梁弹性支承在各纵梁上, 通过计算弹性支座反力, 获得水荷载横向分配系数, 将其对应水荷载作用在各纵梁上, 以此进行渡槽槽身结构受力分析, 计

算简便, 结果准确, 便于实际工程的设计配筋, 计算精度也能满足实际工程的要求。

## 参考文献(References):

- [1] 竺慧珠, 陈德亮, 管枫年. 渡槽[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (ZHU Hui zhu, CHEN De liang, GUAN Feng nian. Aqueducts [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 赵顺波, 李晓克, 赵平. 混凝土叠合结构设计原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (ZHAO Shun bo, LI Xiaoke, ZHAO Ping. Design principles and Applications of Concrete Composite Structure [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2004. (in Chinese))
- [3] 王云仓. 三向预应力多侧墙渡槽结构研究[D]. 天津大学, 2009. (WANG Yun cang. Structural Research on Three Dimension Prestressed Multi Side Wall Aqueduct [D]. Tianjin University, 2009. (in Chinese))
- [4] 赵顺波, 李晓克, 赵平. 大型钢筋混凝土多纵梁渡槽结构设计方法的研究[J]. 水利学报, 1999(4): 35-39. (ZHAO Shun bo, LI Xiaoke, ZHAO Ping. On the Design Method for Large Reinforced Concrete Aqueduct with Multi longitudinal Beam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(4): 35-39. (in Chinese))
- [5] 李廉锟. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004. (LI Lian kun. Structural Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press. (2004). (in Chinese))
- [6] 季日臣, 陈尧隆. 大型多纵梁矩形渡槽结构静力计算方法研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24(5): 80-84. (JI Ri chen, CHEN Yao long. The Study on Static Structure Calculation Methods of Large Rectangle Aqueduct with Longitudinal Beams [J]. Journal of hydroelectric Engineering, 2005, 24(4): 80-84. (in Chinese))
- [7] 季日臣, 陈尧隆, 王春国. 大型多纵梁矩形渡槽受力计算的实用空间法[J]. 西安理工大学学报, 2005, 21(3): 257-260. (JI Ri chen, Chen Yao long, WANG Chun guo. The Practicality Space Analysis Method of Structure Calculation for Large Rectangle Aqueduct with Multi Longitudinal Beam [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2005, 21(3): 257-260. (in Chinese))
- [8] 季日臣, 张永亮, 王军玺. 大型多纵梁矩形渡槽槽身横向结构计算[J]. 兰州交通大学学报, 2004, 23(4): 5-8. (JI Ri chen, ZHANG Yong liang, WANG Jun xi. Orientation Structure Calculation Method of Large Rectangle Aqueduct with Multi longitudinal Beam [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2004, 23(4): 5-8. (in Chinese))
- [9] 吴鸿庆, 任侠. 结构有限元分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000. (WU Hong qing, REN Xia. Structure finite element analysis [M]. Beijing: China Railway Press, 2000. (in Chinese))