

简支梁式斜交矩形渡槽槽身结构受力分析*

季日臣^{1,2}, 李 宇^{1,3}, 陈尧隆¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

2 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

3 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 710048)

[摘 要] 分析了简支梁式斜交矩形渡槽的结构特性, 推导出了其内力及支反力的计算公式, 并与正交渡槽的受力特性进行了比较。结果表明, 斜交渡槽槽身正弯矩较同等跨径的正交渡槽要小, 在斜支承处还会产生负弯矩, 且反力分布不均匀, 钝角处反力大于锐角处反力; 随着斜度增大, 正弯矩在减小, 而扭矩却在增大, 具有弯扭耦合作用的特性, 建议其截面型式以抗扭能力大的箱形截面为佳。

[关键词] 矩形渡槽; 简支梁式斜交; 受力特性; 弯扭耦合

[中图分类号] TV 672.3

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)06-0117-04

随着南水北调工程的开工建设, 输水渠系建筑物——渡槽的应用越来越多, 渡槽的过水流量也越来越大, 如南水北调中线工程从丹江口水库陶岔渠首引水, 横跨长江、淮河、黄河、海河四大流域, 终点到北京团城湖, 线路总长 1 267 km, 渠首引水流量 500~630 m³/s, 年调水量 120~140 亿 m³, 主要供给京、津、冀、豫 4 省(市)京广铁路沿线地区城市的生活、工业和环境用水。调水线路在跨越河流、道路等障碍物时, 渡槽是最常用的交叉建筑物。

因受线路、地理及周围环境条件的限制, 渡槽中心轴线即输水流向不得不与河流、道路等障碍物斜交, 由此造成槽身结构与槽墩呈斜交形式。由于槽身与支承不垂直, 其槽身结构受力特性已属于空间力学的范畴, 故用平面简化分析很难得到准确的结果。对斜交渡槽的研究, 国内外还处于刚刚起步阶段, 文献[1, 2]只是将大型多纵梁斜交渡槽槽身简化为空间刚架, 然后利用大型商业化软件 Alogr 进行了定量的结构内力计算, 但定性分析明显不足。文献[3~10]以简支斜梁桥为研究对象, 分析了各种情况下的受力特性, 建立了计算模型, 并给出了内力计算公式, 但渡槽的结构形式和荷载特征与桥梁有很大不同, 对渡槽来讲, 斜交桥梁的结构布置与计算方法, 仅能借鉴而不能照搬。

因此, 研究斜交渡槽结构受力十分必要而且迫在眉睫, 本试验以简支梁式斜交矩形渡槽为研究对

象, 就其受力特性、梁的横截面型式进行了分析, 对其内力计算公式进行了推导, 并与正交渡槽的内力进行了比较, 以期对简支梁式斜交渡槽设计能有所借鉴。

1 计算简图

由于简支梁式斜交矩形渡槽的轴线与支承线斜交, 在水荷载作用下易产生弯曲并伴有扭转, 故其内力计算属于空间力系问题(图 1)。

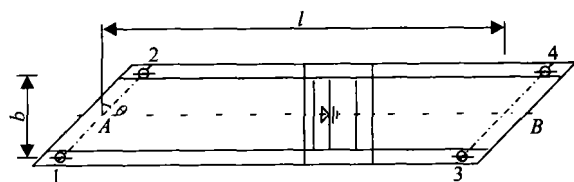


图 1 简支梁式斜交矩形渡槽

Fig 1 Simply supported skew beam rectangle aqueduct

将作用在槽身上的竖向水压力和侧向水压力向梁中心线简化, 由于结构形式的非对称性, 除得到 1 个竖向均布荷载 q 外, 两端还要产生扭矩 T_p ; 另外, 两侧墙水压力经静力简化合成后的合力 P_1 、 P_2 大小相等, 方向相反, 但不在同一条直线上, 将形成 1 个力偶, 最终平衡此力偶还需支座处的水平约束反力, 其受力计算简图如图 2 所示。由于简支梁式斜交矩形渡槽两端支座具有抗扭能力, 属于一次超静定结构。以结构力学中的力法求解, 应解除 B 端的扭

* [收稿日期] 2004-09-15

[作者简介] 季日臣(1969-), 男, 山西朔州人, 副教授, 在职博士, 主要从事水工结构研究。

转约束,而代之以多余的未知扭矩 T_B ,由此得到的

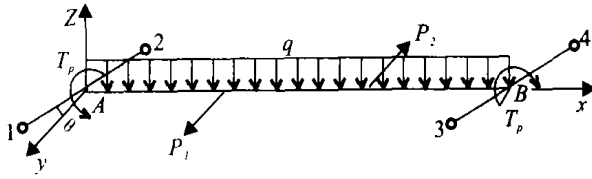


图 2 渡槽受力计算简图

Fig 2 Aqueeduct structure calculating model

2 竖向均布荷载作用下的支反力及内力计算

2.1 基本结构的支反力及内力

其基本结构为静定结构,由文献[11]知,其支反力、内力为

$$\left. \begin{aligned} (1) T_B \text{ 作用时} \\ \text{槽身支反力为} \quad \left. \begin{aligned} T_A &= -T_B \\ R_A &= R_B = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1) \end{aligned} \right\}$$

式中, T_A 为 A 端扭矩; R_A 、 R_B 分别为 A 和 B 端的支反力。

$$\left. \begin{aligned} \text{槽身内力} \quad \left. \begin{aligned} M &= \sin \theta T_B \\ T &= \cos \theta T_B \\ Q &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2) \end{aligned} \right\}$$

式中, M 为槽身弯矩; T 为槽身扭矩; Q 为槽身剪力。

(2) 竖向均布荷载作用时

$$\left. \begin{aligned} \text{槽身支反力} \quad \left. \begin{aligned} T_A &= T_B = 0 \\ R_A &= R_B = \frac{1}{2}ql \end{aligned} \right\} \quad (3) \end{aligned} \right\}$$

式中, q 为竖向均布荷载; l 为计算跨径。

$$\left. \begin{aligned} \text{槽身内力} \quad \left. \begin{aligned} M &= \frac{1}{2}q(lx - x^2) \\ T &= 0 \\ Q &= \frac{q}{2}(l - x) \end{aligned} \right\} \quad (4) \end{aligned} \right\}$$

式中, x 为计算截面至支点距离。

2.2 求解多余未知力 T_B

由结构力学方法方程有:

$$\delta_{BB} + \Delta_{BP}T_B = 0 \quad (5)$$

式中, δ_{BB} 为 T_B ($T_B = 1$) 作用于基本结构时在 T_B 方向产生的转角。由虚功原理可知:

$$\delta_{BB} = \int_0^l \frac{\overline{M}^2}{EI} dx + \int_0^l \frac{\overline{T}^2}{GJ} dx \quad (6)$$

式中, $\overline{M}$ 和 $\overline{T}$ 分别为 T_B ($T_B = 1$) 作用于基本结构时产生的弯矩和扭矩; EI 和 GJ 分别为槽身的抗弯和抗扭刚度。

将(2)式代入(6)式得

基本结构如图 3 所示。

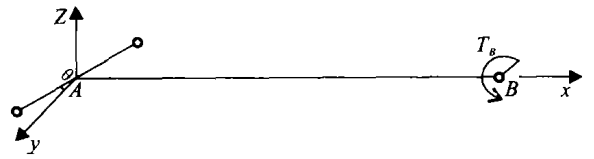


图 3 结构力学法求解的基本体系

Fig 3 Basic structure mechanics method solution system

$$\begin{aligned} \delta_{BB} &= \int_0^l \frac{\sin^2 \theta}{EI} dx + \int_0^l \frac{\cos^2 \theta}{GJ} dx \\ &= \frac{l}{EI} \sin^2 \theta + \frac{l}{GJ} \cos^2 \theta \\ &= \frac{l}{EI} \sin^2 \theta (1 + k \text{ctg}^2 \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $k = \frac{EI}{GJ}$, 为槽身的弯扭刚度比。

式(5)中, Δ_{BP} 为竖向均布荷载作用于基本结构时在 T_B 方向产生的转角, 由虚功原理可知:

$$\begin{aligned} \Delta_{BP} &= \int_0^l \frac{\overline{M}M}{EI} dx + \int_0^l \frac{\overline{T}T}{GJ} dx \\ &= \int_0^l \frac{\sin \theta}{EI} \frac{q}{2} (lx - x^2) dx \\ &= \frac{\sin \theta}{12EI} ql^3 \end{aligned} \quad (8)$$

由式(5), (7), (8)可得:

$$T_B = - \frac{ql^2}{12 \sin \theta (1 + k \text{ctg}^2 \theta)} \quad (9)$$

2.3 竖向均布荷载作用下的支反力及内力

将竖向均布荷载 q 和扭矩 T_B 分别作用在基本结构上时所引起的反力或内力进行叠加, 就得到超静定渡槽结构的实际反力和内力。由式(1)、(2)、(3)、(4)、(9)可得:

槽身支反力

$$\left. \begin{aligned} T_B &= - \frac{ql^2}{12 \sin \theta (1 + k \text{ctg}^2 \theta)} \\ R_B &= \frac{1}{2}ql \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

支座支反力

$$\left. \begin{aligned} R_1(R_4) &= R_B + \frac{T_B \cos \theta}{b} = \\ &= \frac{1}{2}ql - \frac{ql^2 \text{ctg} \theta}{12b(1 + k \text{ctg}^2 \theta)} \\ R_2(R_3) &= R_B - \frac{T_B \cos \theta}{b} = \\ &= \frac{1}{2}ql + \frac{ql^2 \text{ctg} \theta}{12b(1 + k \text{ctg}^2 \theta)} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

槽身内力

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{q}{2}(lx - x^2) - \left(\frac{ql^2}{12(1 + k\text{ctg}^2 \theta)} \right) \\ T &= - \frac{\text{ctg} \theta}{12(1 + k\text{ctg}^2 \theta)} ql^2 \\ Q &= \frac{q}{2}(l - x) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

设简支梁式斜交矩形渡槽的计算跨径为 l , 竖向均布荷载的集度为 q 。按上述公式可分别求出斜度为 $0^\circ; 5^\circ; 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ$ 和 60° 时, 槽身跨中截面和支点截面的内力以及斜支承处反力。取槽身的弯扭刚度比 $k = \frac{EI}{GJ} = 1$, 计算结果见表 1。

2.4 竖向均布荷载作用下斜交渡槽受力计算示例

表 1 竖向均布荷载作用下槽身内力及支反力值

Table 1 Internal force and bearing force of aqueduct under the uniform distribution loads

形式 Form	斜度/(°) Skew	跨中截面内力 Internal force at mid-span			支点截面内力 Internal force at support section			钝角和锐角 支反力差值 Reaction force difference
		弯矩/(kN·m) Moment	扭矩/(kN·m) Torsion	剪力/kN Shear	弯矩/(kN·m) Moment	扭矩/(kN·m) Torsion	剪力/kN Shear	
正交	0	$0.125 ql^2$	0	0	0	0	$0.5 ql$	0
	5	$0.124 ql^2$	$-0.007 ql^2$	0	$-0.0006 ql^2$	$-0.007 ql^2$	$0.5 ql$	$-0.014 ql^2/b$
	15	$0.119 ql^2$	$-0.021 ql^2$	0	$-0.0056 ql^2$	$-0.021 ql^2$	$0.5 ql$	$-0.042 ql^2/b$
斜交	30	$0.104 ql^2$	$-0.036 ql^2$	0	$-0.0208 ql^2$	$-0.036 ql^2$	$0.5 ql$	$-0.072 ql^2/b$
	45	$0.083 ql^2$	$-0.042 ql^2$	0	$-0.0417 ql^2$	$-0.042 ql^2$	$0.5 ql$	$-0.084 ql^2/b$
	60	$0.063 ql^2$	$-0.036 ql^2$	0	$-0.0625 ql^2$	$-0.036 ql^2$	$0.5 ql$	$-0.072 ql^2/b$

3 扭矩作用下的支反力及内力计算

扭矩作用下的支反力及内力计算原理与前文相同, 其计算公式如下:

槽身支反力

$$\left. \begin{aligned} T_B &= T_P \\ R_B &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

槽身内力

$$\left. \begin{aligned} M &= 0 \\ T &= 0 \\ Q &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由式(13)可知, 在斜支承处钝角反力小于锐角反力, 即 $R_2(R_3)$ 比 $R_1(R_4)$ 小 $\frac{2T_P \cos \theta}{b}$ 。这与竖向均布荷载作用下的反力结果刚好相反。所以, 在整个水荷载作用下, 斜支承处钝角反力与锐角反力之差将会减小。

4 水平力偶作用下的水平支反力计算

两侧墙水压力经静力简化合成后的合力 P_1, P_2 大小相等($P_1 = P_2 = P$), 方向相反, 但不在同一条直线上, 故将形成 1 个水平力偶, 其大小为 $P \times b \times \text{tg} \theta$, 最终平衡此力偶还需支座处的水平约束反力。因此, 简支梁式斜交渡槽的支反力与正交渡槽的支反力有很大不同, 除钝角反力与锐角反力不等外, 还需提供水平约束反力, 其大小随宽跨比($\frac{b}{l}$)和斜度 θ 的增大而增大。

斜交渡槽放置在槽墩上, 水平支反力看似要由槽墩提供, 但考虑到两端水平支反力的等值反向特

性, 这样, 对中间槽墩而言, 其支撑的两个槽段之间的水平作用力互相抵消, 因对槽墩无水平作用力, 故无须对槽墩另作处理, 只需对进口和出口处的槽墩作特殊处理。

5 结 语

(1) 当竖向均布荷载作用于斜交渡槽槽身轴线上时, 除了产生弯矩 M 和剪力 Q 外, 还要产生扭矩 T , 而正交渡槽中不会有扭矩 T 产生, 这说明斜交渡槽具有弯扭耦合特性。当斜度 θ 从零逐渐增大时, 扭矩 T 也随之逐渐增大, 而当斜度 θ 超过某一值时, 如当弯扭刚度比 $k = 1$, 斜度 θ 超过 45° 时, 扭矩 T 反而逐渐减小。

(2) 斜度 θ 一定时, 弯扭刚度比 k 越小, 扭矩 T 越大, 弯扭耦合越明显。一般来说, 箱形截面的弯扭刚度比 k 较小, 弯扭耦合作用显著, 而矩形槽截面的弯扭刚度比 k 较大, 弯扭耦合作用次之。

(3) 斜交渡槽槽身在竖向均布荷载作用下的正弯矩, 较同等跨径的正交渡槽要小, 在斜支承处还会产生负弯矩。很显然, 斜度 θ 越大, 支承处负弯矩越大, 跨中正弯矩越小; 弯扭刚度比 k 越小, 支承处负弯矩越大, 跨中正弯矩越小。这是斜交渡槽弯扭耦合作用的结果。

(4) 由式(11)可知, 在斜支承处钝角反力大于锐角反力, 即 $R_2(R_3)$ 比 $R_1(R_4)$ 大 $\frac{ql^2 \text{ctg} \theta}{6b(1 + k\text{ctg}^2 \theta)}$ 。二者的反力差与槽身的斜度 θ 及弯扭刚度比 k 有关。很显然, 弯扭刚度比 k 越小, 二者的反力差越大, 即在

钝角反力增大的同时锐角反力在减小。当斜度 θ 从零逐渐增大时, 二者的反力差逐渐增大, 而当弯扭刚度比 $k=1$, 斜度 θ 超过 45° 时, 二者的反力差反而逐渐减小。

(5) 在渡槽正常过水时, 斜交渡槽需要有较大的水平支座反力, 这是因两侧墙水压力不在同一条直线上而形成水平力偶所致, 其大小随宽跨比 $(\frac{b}{l})$ 和斜度 θ 的增大而增大。

(6) 弯矩与扭矩间是此消彼长的, 扭矩伴随着正弯矩的减小而在增大, 故两者应综合考虑。当斜度 $\theta \leq 15^\circ$ 时, 弯矩折减和扭矩都较小, 此时的斜交渡槽可按正交渡槽进行计算。

(7) 根据斜交渡槽具有的弯扭耦合特性, 从其内力计算公式可知, 增大渡槽的抗扭刚度, 可减小渡槽的弯矩值。因此, 简支梁式斜交矩形渡槽槽身的截面型式以抗扭能力大的箱形截面为佳。

[参考文献]

- [1] 赵平, 唐克东, 刘祚秋. 大型多纵梁斜交渡槽结构受力特性[J]. 工程力学, 2001, 18(3): 125- 130
- [2] 孙尔超, 赵平, 李书瑶. 大型斜交渡槽的结构设计计算[J]. 河北水利水电技术, 1999, 10(2): 53- 54
- [3] 李国豪. 斜交结构斜梁桥的荷载横向分布分析[J]. 同济大学学报, 1994, 22(4): 395- 400
- [4] 黄平明, 向光忠, 朱明华. 直角梯形斜梁桥荷载横向分布的研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(3): 17- 20
- [5] 张元海, 栗金光. 斜交异形桥梁的理论分析与结构性能[J]. 兰州铁道学院学报, 1996, 9(3): 53- 56
- [6] 吴善幸, 陈华鹏, 黄剑源. 城市不规则箱形桥梁的格子梁分析[J]. 宁波大学学报, 1996, 9(3): 126- 134
- [7] 杨云芳. 单梁式简支斜交桥的斜梁内力分析[J]. 浙江林学院学报, 1995, 12(4): 404- 411
- [8] 黄平明, 邵容光, 刘宗林. 弹性支承单跨斜梁的分析研究[J]. 中国公路学报, 1996, 9(1): 51- 58
- [9] Kahleel Mohammad A, Itani Rafik Y. Live-load moments for continuous skew bridge[J]. Structure Engineering, 1990, 16(9): 808- 814
- [10] Bishara Alfred G, Maria Chuan liu. Wheel load distribution on simply supported skew I-beam composite bridges[J]. Structure Engineering, 1993, 19(3): 183- 189
- [11] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

Analysis on structure character of simply supported skew beam rectangle aqueduct

J I R i - c h e n ^{1,2}, L I Y u ^{1,3}, C H E N Y a o - l o n g ¹

(1 X i ' a n U n i v e r s i t y o f T e c h n o l o g y, X i ' a n, S h a a n x i 710048, C h i n a;

2 L a n z h o u J i a o t o n g U n i v e r s i t y, L a n z h o u, G a n s u 730070, C h i n a;

3 N o r t h w e s t A & F U n i v e r s i t y, Y a n g l i n g, S h a a n x i 712100, C h i n a)

Abstract: The article analyses the structure character of simply supported skew beam rectangle aqueduct and deduces the calculation formula of internal force and bearing force. Compared with cross aqueduct, the following conclusion is given. The positive moment of skew aqueduct is less than that of right cross aqueduct; The negative moment produces on the skew bearing while bearing force distribution is not uniform; The bearing force on obtuse angle is more than that on acute angle; With skew degree increasing, the positive moment decreases, but the torsion increases. Skew aqueduct has character of moment-torsion interaction. Therefore box section type having ability to resist torsion is recommended.

Key words: rectangle aqueduct; simply supported skew beam; structure character; moment-torsion interaction