

废黄河立交地下涵洞输送水沙特性研究

徐金环

(河海大学港口航道及海岸工程学院 南京 210098)

摘要 河渠水利立交工程是发展水利和水运事业的主要结构形式。本文以废黄河三种立交地下涵洞模型试验研究为基础,探讨了水流和泥沙运动特性及工程防淤措施,并提出了涵洞内不淤流速计算公式,可供类似工程参考。

关键词 立交地下涵洞 泄流能力 涵洞输沙 不淤流速 导流墙 防淤措施

通榆河位于江苏省东部沿海地区,是一条南起南通、北至赣榆的水利水运骨干河道,具有调引长江水、改造苏北中低产田及通航、灌溉、排涝等多项功能。但在滨海县大套附近,废黄河将由西向东横穿通榆河流入黄海,因此,在两河相交处建设水利立交工程,为废黄河输水排沙和通榆河引水通航提供了有利条件。

1 废黄河立交地下涵洞布置型式

1.1 倒虹吸型长涵洞结构^①

通榆河设计过水断面呈倒梯形,为此,废黄河立交地下涵洞设计成倒虹吸型,其水平洞身长 50m,与通榆河底宽相等;两端以 1:6 的涵洞斜向外侧延伸,进出口闸室底板与引水渠道平底联接,涵洞水平方向长 168.5m。倒虹吸涵洞设 15 个闸孔,单孔断面 $3.2\text{m} \times 4.0\text{m}$,矩形四周三角形贴角 $0.35\text{m} \times 0.40\text{m}$,总过水面积 187.8m^2 ,宽度 76m。另外,为确保通榆河运输船舶航行安全,在涵洞水平段顶层填土厚 1m,两侧斜坡涵洞也埋置

于地下,不改变通榆河过水断面。

1.2 上槽下洞型短涵洞结构^②

为缩短涵洞长度,减小沿程水头损失,将倒虹吸型长涵洞上层修改为“渡槽”形式,下层涵洞取其水平段,分别满足通榆河引水通航和废黄河输水排沙要求,形成了一种新的“上槽下洞”短涵洞结构。短涵洞结构共设 12 个闸孔,单孔断面 $3.45\text{m} \times 4.0\text{m}$,总过水面积 162.24m^2 ,长度 80.4m,宽度 55.5m,均比倒虹吸型长涵洞有较大幅度减小。但在涵洞上下游,需分别设置 1:6 和 1:9 的明渠斜坡与引水渠道联接。

1.3 竖井型双层涵洞结构^③

在废黄河立交地涵闸址,自高程 -9.5m 以下转为承载能力强、压缩性小的土层,为减少基础处理,同时便于下泄小流量时开启部分小型闸孔,增加洞内流速,防止泥沙淤积,将涵洞设计成上下两层结构。上层涵洞单孔过水断面(宽×高) $3.7\text{m} \times 4.6\text{m}$,下层对应为 $3.7\text{m} \times 1.8\text{m}$,共 9 组上下层涵洞,总过水面积 209.5m^2 ,涵洞总宽度 41.1m。竖井型双层

作者简介:徐金环,男,副教授、从事河流动力学及航道工程研究,曾发表《汉江中游游荡性河段滩槽演变与通航条件分析》等论文。

①南京水利科学研究院,废黄河地涵工程泥沙模型试验报告,1990 年。

②河海大学航运及海洋工程系,废黄河地涵整体模型试验研究,1994 年。

涵洞上游进口段为竖井形式布置,以两个直角拐弯分别与引水渠道和涵洞水平段联接。下游出口段以逆向斜坡与渠道相连,整个涵洞水平长 71.8 m。

2 立交地下涵洞输水特性

2.1 涵洞进出口水流流态

立交地下涵洞进出口联接段,两侧翼墙均呈圆弧形布置,底板联接方式分平底和斜坡两种。采用平底联接时,进口水流沿程渐趋收缩,出口水流略有扩散,随下泄流量增大,上游水流收缩、出口水流扩散现象较为明显。当上槽下洞型涵洞采用斜坡方式联接时,进口段过水断面除侧向收缩外,还存在垂向扩散,且垂向扩散大于侧向收缩,因而平均流速沿程减小。但在涵洞出口斜坡段,主流始终紧贴底部斜坡面,流速垂向分布上层流速小,下层流速大,并且表层水流略呈缓慢逆向流动,特别是下泄流量达 $400 \sim 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,斜坡联接段尾端出现因急速底流折向水面的“翻花水”,垂向呈现横轴“滚流”。当水流越过斜坡段后,“翻花水”现象消失,水流转变为上层流速大、下层流速小的正常分布状态。

2.2 涵洞水头损失与纵向断面形态

根据试验研究,在相同正态模型条件下,倒虹吸型涵洞长度较大,沿程水头损失达 40 cm,约占涵洞总水头损失的 $1/2$;上槽下洞型和竖井型涵洞长度相对较短,沿程水头损失占总水头损失的比重减少为 $1/3$ 左右。其中上槽下洞型涵洞纵向水流与涵洞边壁不发生分离,泄流顺畅,输水能力较大;当修改加大进口闸室胸墙圆弧半径,改善进口水流条件,局部水头损失有所减小,但沿程水头损失却有所增加,从而使总水头损失基本维持不

变,可见上槽下洞型涵洞泄流已基本达到最佳状态,若进一步设法提高泄流能力将收效甚微。双层涵洞原结构布置竖井垂直,下泄水流时上层涵洞进口底部形成回流区,减少了有效过水面积,局部水头损失大,泄流能力小。当加大竖井上下层进口闸室胸墙圆弧半径,使过水断面沿程呈渐收缩状,消除闸室回流,即可增加有效过水面积,提高竖井型双层涵洞泄流能力。三种立交地下涵洞的水头损失见表 1。

3 立交地下涵洞输沙与防淤措施

3.1 涵洞有压流输沙

废黄河是一条多泥沙河流,枯水位时含沙量较少,悬沙颗粒较粗;汛期时水位高,雨水多,滩地淤积细颗粒泥沙易被冲刷带入河道,含沙量增大,悬沙颗粒相对较细,因而满足废黄河排洪输沙,确保立交地下涵洞运行安全极其重要。试验研究表明,在开启全部闸门下泄中小流量时,三种立交地涵内均有一定程度的泥沙淤积。其中以流量 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 、含沙量 $0.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时淤积强度最大,月平均淤积厚度约 13 cm。小于该流量时,含沙量小,涵洞内泥沙淤积少。反之流量大时,含沙量大,洞内流速大,输沙能力随之增大,涵洞内泥沙淤积减少。当下泄流量超过 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,洞内平均流速增大约 $1.6 \text{ m}/\text{s}$,尽管含沙量增多,但涵洞输沙能力陡增,泥沙无法落淤,涵洞内即转变为无淤积状态。

3.2 进出口联接段输沙

涵洞进出口段两侧翼墙圆弧形布置,在底板以平底形式联接时,上游进口段流速逐渐加大,泥沙淤积沿程减少;下游出口段则相反,水流沿程扩散,泥沙淤积主要集中在两侧

表 1 涵洞水头损失与流量系数(泄流 $500 \text{ m}^3/\text{s}$)

结构布置	涵洞水头损失/cm			洞内平均流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	流量系数 μ	备 注
	总值	局部	沿程			
倒虹吸型涵洞	79	39	40	2.66	0.676	15 个闸孔全开
上槽下洞型涵洞	67.2	44.8	22.4	3.08	0.848	12 个闸孔全开
竖井型双层涵洞	60.2	41.0	19.2	2.68	0.780	8 组闸孔全开
竖井型双层涵洞	44.8	28.8	16.0	2.39	0.807	9 组闸孔全开

翼墙下缘。当上槽下洞型涵洞进口斜坡联接时,过水断面垂向扩散,流速沿程减小,水流挟带泥沙不断在进口斜坡段落淤,其泥沙淤积强度随下泄流量加大而增大,渲泄洪水流量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,测得 15 d 平均淤厚 98.6 cm,局部最大淤厚达 176 cm。在下游出口段以逆向斜坡联接时,涵洞出口主流紧贴坡面,底部流速大,输沙能力强,下游斜坡段基本上没有泥沙淤积。

3.3 轮换开启闸门,防止涵洞内泥沙淤积

为消除立交地下涵洞在下泄中小流量时的泥沙淤积,经多次试验表明,开启部分涵洞闸门,加大洞内流速,束水攻沙,局部提高涵洞输沙能力,是解决中小流量时涵洞内泥沙淤积的最好途径。对于竖井型双层涵洞,还可利用开启部分下层涵洞闸门,增强涵洞输沙能力。部分开启闸门时,控制涵洞内平均流速大于 1.6 m/s ,即相当于开启全部闸门、敞泄 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量以上,可保证涵洞内不发生泥沙淤积。因此,严格加强调度管理,轮换开启闸门,可确保地下涵洞安全运行。

3.4 斜坡段设置导流墙

立交地下涵洞进口段斜坡联接时,由于水流垂向扩散,泥沙淤积较为严重。试验研究将进口斜坡段沿闸门隔墩设置导流墙,其长度与斜坡段相等,墙顶高程 4 m(相当于下泄 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 时水位平齐)。采取在下泄中小流量时轮换开启闸门的措施,增加斜坡段导流墙间流速,提高输沙能力,可防止斜坡段泥沙淤积。对于竖井型双层涵洞下游斜坡段,涵洞出口位置偏低,增设与下层涵洞等高的低导流墙,同样可解决小流量时深层涵洞出口带来斜坡段轻微泥沙淤积问题。

4 试验成果分析

4.1 沿程和局部阻力系数

立交地下涵洞属淹没出流,渲泄水流时其总水头损失为

$$h_w = (\lambda \frac{l}{D} + \sum \zeta) \frac{U^2}{2g}$$

式中 λ 为地下涵洞沿程阻力系数; l 为地下涵洞长度; D 为地下涵洞当量直径,取 $D = 4R$; $\sum \zeta$ 为各部位局部阻力系数之和; U 为洞内平均流速; g 为重力加速度。

根据模型试验测得的涵洞水头损失,可计算出在渲泄洪水流量时沿程阻力系数和局部阻力系数见表 2。

由此可见,竖井型双层涵洞由于涵洞呈重叠布置,沿程阻力系数增大约 50%,但涵洞长度短,沿程水头损失占总水头损失的比重仍较小。上槽下洞型涵洞沿程阻力系数和局部阻力系数均较小,泄流能力明显大于其它结构布置方案。因此,上槽下洞型立交地下涵洞是输水能力较优的结构型式。

4.2 涵洞内泥沙不淤流速

涵洞不淤流速可用来判别立交地涵内是否发生泥沙淤积。当洞内流速小于不淤流速时,则有可能洞内发生泥沙淤积,危及涵洞使用安全,反之涵洞处于安全可靠状态。现根据涵洞输沙形式以悬沙为主的特点,引用扩散理论,由决定悬沙垂线分布均匀程度的悬浮指数 $Z = \frac{\omega}{\kappa U_*}$,认为当 $Z \geq 5$ 时,泥沙基本上以推移质运动,反之则开始出现悬移运动,即表示泥沙开始悬浮,当 $Z < 0.25$ 时,水流紊动扩散作用强烈,悬沙垂线分布趋于均匀,表示河床呈冲刷不淤积状态,此时临界条件

表 2 各种立交地下涵洞沿程阻力系数与局部阻力系数

结构型式	涵洞长度 l/m	涵洞当量直径 D/m	沿程阻力系数 λ	局部阻力系数 $\sum \zeta$
倒虹吸型涵洞	169.54	3.70	0.0242	1.08
上槽下洞型涵洞	80.40	3.86	0.0222	0.93
竖井型双层涵洞(8组)	79.55	3.54	0.0300	1.12
竖井型双层涵洞(9组)	79.55	3.54	0.0310	0.99

表3 泥沙不淤流速与全部开启闸门时洞内平均流速比较

结构型式	不淤流速 $U_F/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	涵洞内平均流速 $U/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$				
		$100\text{ m}^3/\text{s}$	$200\text{ m}^3/\text{s}$	$300\text{ m}^3/\text{s}$	$400\text{ m}^3/\text{s}$	$500\text{ m}^3/\text{s}$
倒虹吸型涵洞	1.60	0.53	1.06	1.60	2.13	2.66
上槽下洞型涵洞	1.61	0.62	1.23	1.85	2.47	3.08
竖井型双层涵洞(8组)	1.59	0.54	1.07	1.61	2.15	2.68
竖井型双层涵洞(9组)	1.59	0.48	0.95	1.43	1.91	2.39

下的平均流速即相当于涵洞内泥沙不淤流速。

亦即 $Z = \frac{\omega}{\kappa U_*} < 0.25$ 时,得 $U_* > \frac{\omega}{0.25\kappa}$ 或

$$U_F > \frac{\omega}{0.25\kappa} \cdot \frac{C}{\sqrt{g}} = \frac{\omega}{0.25\kappa} \cdot \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{g}}$$

式中 U_F 为涵洞内泥沙不淤流速; ω 为泥沙沉速; κ 为卡门常数, $\kappa = 0.15 \sim 0.4$ ^[1], 清水时 $\kappa = 0.4$, 浑水时随含沙量增大而减小, 当悬沙冲刷充分, 水中含沙量饱和, 取极限状态 $\kappa = 0.15$ 计算, 可确保涵洞内不发生泥沙淤积; U_* 为摩阻流速; C 为谢才系数; g 为重力加速度; n 为糙率系数; R 为水力半径。

作为粗略估算, 取废黄河悬沙中径 $d_{50} = 0.02\text{ mm}$, 泥沙絮凝团粒沉速 $\omega = 0.267\text{ cm/s}$, 涵洞糙率系数 $n = 0.014$, 计算出涵洞内泥沙不淤流速见表3。进一步与立交地涵在全部开启闸门时的洞内平均流速情况相比较, 可见渲泄流量大于 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 涵洞内将不会出现泥沙淤积, 这与模型试验结果是一致的。所以, 用不淤流速 U_F 作为参数, 控制涵洞安全运行, 可以满足工程管理需要。

5 结 语

a. 废黄河立交地下涵洞试验研究表明, 单纯从输水角度考虑, 上槽下洞型涵洞沿程和局部阻力系数均较小, 输水能力较大。

b. 立交地下涵洞在全部开启闸门下泄中小流量时, 涵洞内将有少量泥沙淤积, 通过加强调度管理, 轮换开启闸门, 可防止涵洞内发生泥沙淤积。

c. 当立交地下涵洞进出口以斜坡方式联接时, 上游斜坡段泥沙淤积较多, 下游泥沙淤积微弱。通过设置低导流墙, 利用轮换开

启部分闸门时束水攻沙, 是防止或减轻上游斜坡段泥沙淤积的有效途径。

d. 经试验表明, 控制立交地下涵洞内不发生泥沙淤积, 可用不淤流速 $U_F = \frac{\omega}{0.25\kappa} \cdot \frac{R^{1/6}}{n\sqrt{g}}$ 进行管理控制。

参考文献

- 1 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册. 北京: 中国环境科学出版社, 1992

(收稿日期: 1996-05-06 编辑: 许宇鹏)

简 讯

▲美国 Enron 电力公司最近签署了一份在尼泊尔兴建一座 10 800 MW 水电站的意向书。尼泊尔当局与 Enron 公司就该工程项目的有关问题进行了初步磋商。据报道, 该电站拟以发电、灌溉和防洪为主。预期电站的大部分电力将出售给印度和中国。

▲加拿大魁北克省政府最近公布了该省电力网向各独立电力生产公司和公共事业公司开放的计划。目前该省的电网是由魁北克省水电公司经营和管理的。据称, 制订这一开放计划的动机是要使魁北克省尽快取消对北美电力市场的限止, 以使该省的独立电力生产公司可进入庞大的美国市场及魁北克省邻近耗电量较大的其它省区。魁北克省现有 26 家独立电力生产公司, 每年生产 270 MW 电力并出售给魁北克水电公司。根据新的开放计划, 独立电力生产公司和其它电力公共事业公司只需向魁北克水电公司支付使用其输电网的输电费即可。

(熊莉芸供稿)