

涵洞输沙特性研究

徐金环 张 玮

(河海大学交通与海洋工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 地下涵洞穿越河渠淹没于水下 , 水沙运动呈有压流状态 , 合理利用洞内水流自身能量 , 才能确保输送泥沙过洞 . 依据床面泥沙起动切应力相等原理及明渠水流挟沙力公式 , 提出了适应地下涵洞泥沙起动流速关系及输沙能力的修正公式 . 该公式较好地反映了地下涵洞的泥沙运动及输沙规律 , 为解决地下涵洞安全输沙及防止泥沙淤积提供了理论依据 .

关键词 涵洞 ; 起动流速 ; 输沙能力 ; 防淤措施

中图分类号 : TV672⁺.1 ; TV142 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2002)03-0047-05

废黄河是一条多泥沙河流 , 在江苏省北部滨海县大套附近与南北走向的通榆运河立体相交 . 废黄河地下涵洞穿越通榆运河 , 输送水沙自西向东流入黄海 . 通榆运河则是贯通南北送水北上 , 解决苏北工农业用水 , 发展水运事业的大型水利骨干运河 . 因此 , 满足地下涵洞输水排沙需要 , 确保涵洞内不发生泥沙淤积 , 是立交工程中迫切需要解决的关键问题 .

1 有压流状态下的淤积泥沙运动

1.1 淤积泥沙起动试验与冲刷率变化

地下涵洞淹没于水下 , 一旦洞内发生泥沙淤积 , 将给安全泄洪带来严重威胁 . 为模拟淤积泥沙在有压流状态下的水力冲刷状况 , 将地下涵洞用有机玻璃制作 , 中间试验段的过水断面为矩形 , 呈水平设置 , 长 1.4 m , 宽 0.3 m , 高 0.25 m . 两端设计成装配式接口 , 上层盖板紧密封闭 , 其上下游分别与渐趋收缩或放大的固定过渡段相接 , 布置见图 1 .

试验用沙取原型河道表层泥沙 , 其沙样中值粒径 $D_{50} = 0.0456 \text{ mm}$, 最大粒径为 0.125 mm , 粒径小于 0.05 mm 的粉沙和粘土部分占沙样重量的 65% , 小于 0.005 mm 的粘土约占 6.7% . 泥沙干密度 $\rho_s = 1.5 \text{ t/m}^3$. 试验前 , 将采集沙样掺水搅拌均匀 , 倒入试验段内铺平 , 置水池中静止沉积 , 控制淤泥厚度约 5 cm . 然后根据不同淤积历时的试验样本 , 将试验段与固定过渡段装配连接 , 在模型两端缓慢注水淹没试验段后 , 逐步增加上游进口流量 , 使试验段内恒为有压流状态 .

多组试验对比观察表明 , 淹没于水下不同历时的淤积泥沙 , 其表面均形成一定的薄膜状 , 在水流动力作用下 , 其泥沙起动规律见表 1 . 泥沙淤积历时长 , 沉积密实 , 冲刷干净所需要的时间则延长 , 而冲刷率有所降低 . 控制涵洞内平均流速 0.9 m/s 时的冲刷率变化见表 2 .

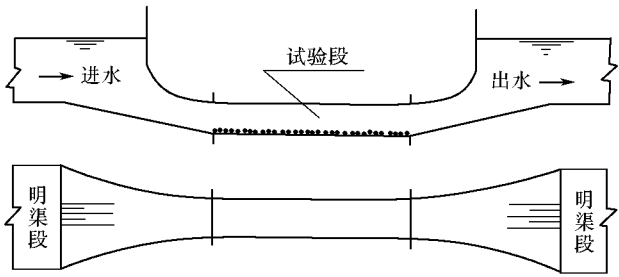


图 1 地下涵洞淤积泥沙有压流起动试验布置
Fig.1 Experiment of incipient motion
of silting sediment in underground culvert

表 1 淤积泥沙在不同水流条件下的起动状态
Table 1 Incipient state of silting sediment under different water flow conditions

洞内流速/(m·s ⁻¹)				
<0.2	0.3	0.5	0.7	0.9
淤积泥沙表面形成光滑薄膜状,泥沙静止不动	表面薄膜未撕破,泥面与侧壁结合处极少数泥沙起动;淤积泥面无颗粒起动	表面薄膜呈不规则块状撕破,淤积泥面少量泥沙起动	淤积泥面出现冲刷,泥沙跳起高度不大,泥沙进入扬动状态	淤积泥沙出现剧烈冲刷,掀起的泥沙充满过水断面,床面下切明显

1.2 地下涵洞淤积泥沙的起动流速

原型地下涵洞水深较大,泥沙起动时的水力条件与试验状况不尽完全相同,但室内模型试验用沙为原型河道泥沙,只要不同运动状态时泥沙表面切应力相同,则可根据床面切应力相等原理,计算出原型地下涵洞淤积泥沙在有压流状态下的水力冲刷条件.

利用矩形过水断面周界上总阻力与其它阻力之间的关系

$$\tau x = \tau_b x_b + \tau_\omega x_\omega \tag{1}$$

式中: $\tau, \tau_b, \tau_\omega$ ——矩形断面全边界、床面及边壁切应力; x, x_b, x_ω ——全边界、床面及边壁湿周.

$$\tau = \frac{\rho f U^2}{8} \quad \tau_b = \frac{\rho f_b U_b^2}{8} \quad \tau_\omega = \frac{\rho f_\omega U_\omega^2}{8} \tag{2}$$

根据各阻力坡降相等的观点,变换为

$$U = \sqrt{\frac{8gRJ}{f}} \quad U_b = \sqrt{\frac{8gR_bJ}{f_b}} \quad U_\omega = \sqrt{\frac{8gR_\omega J}{f_\omega}}$$

式中: f, f_b, f_ω ——全断面、床面及边壁相应的阻力系数,并假定矩形断面面积 A 可相应分为 A_b 和 A_ω 两部分,且对于 A_b 和 A_ω 来说,断面平均流速和阻力坡降均相同,则有

$$\frac{U^2}{J} = \frac{8gR}{f} = \frac{8gR_b}{f_b} = \frac{8gR_\omega}{f_\omega}$$

即
$$\frac{R}{f} = \frac{R_b}{f_b} = \frac{R_\omega}{f_\omega} \tag{3}$$

由式(1)及(2)得

$$fx = f_b x_b + f_\omega x_\omega$$

即
$$f = f_b \frac{x_b}{x} + f_\omega \frac{x_\omega}{x} \tag{4}$$

对于矩形过水断面,

$$f = f_\omega + \frac{B}{B+h} \times \frac{f_b - f_\omega}{2} \tag{5}$$

式中: B ——宽度; h ——高度.

在地下涵洞充满水体、有压过流的试验条件下,水流雷诺数 $Re = (7.1 \sim 24.4) \times 10^4$. 取淤积泥面绝对粗糙度 $\Delta = 0.125 \text{ mm}$,有机玻璃壁面 $\Delta = 0.01 \text{ mm}$,分别计算得泥面及有机玻璃壁面的相对粗糙度 $\Delta/\delta = 0.164 \sim 0.414$ 和 $0.013 \sim 0.030$,可见淤积泥面水流状态处于光滑区转变为粗糙区之间的过渡粗糙区^[1],据此得淤积泥沙表面及其它边壁在泥沙不同运动状态下的阻力系数与相应水力半径,见表3.由表3可看出,各阻力系数随洞内平均流速增加均有所减小,而相应的床面阻力水力半径随流速增加而增大,相应边壁阻力水力半径则相反,随流速增加略有减小.由式(2)即可求得模型淤积泥沙各种运动状态下的床面切应力.

同样,对于原型单孔过水断面为 $3.45 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ 的矩形地下涵洞,在同等断面平均流速条件下,取混凝土边壁 $\Delta = 2.65 \text{ mm}$,计算得淤积泥面和混凝土壁面的相对粗糙度分别为 $0.12 \sim 0.33$ 和 $3.2 \sim 9.6$,可见泥面相对光滑,混凝土壁面相对粗糙.然后根据原型沙泥面相对粗糙度近似相等及床面切应力相等原理,推算出原型地下涵洞淤积泥沙在各种运动状态下的平均流速,见表4.可见原型地下涵洞过水面积大,作用于底部的切应力较小,反之模型过水面积较小,作用于底部切应力相对较大.当淤积泥沙表面切应力同处于较小状态时,原型涵洞内平均流速要大于模型流速;当床面切应力增大时,原型与模型两者平均流速的差别趋向减小.

表 3 模型各种阻力系数及相应水力半径
Table 3 Resistance factors and corresponding hydraulic radii of model

平均流速 χ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	床面阻力系数 f_b	边壁阻力系数 f_w	床面阻力相应 水力半径/cm	边壁阻力相应 水力半径/cm	水流雷诺数 / 10^4	淤积泥面 相对粗糙度	有机玻璃壁面 相对粗糙度
0.3	0.0206	0.0198	6.180	5.940	7.1 ~ 7.4	0.164	0.013
0.5	0.0196	0.0178	6.426	5.836	11.7 ~ 12.8	0.266	0.020
0.7	0.0150	0.0129	6.667	5.733	16.0 ~ 18.7	0.327	0.024
0.9	0.0146	0.0122	6.791	5.674	20.4 ~ 24.4	0.414	0.030

表 4 原型与模型平均流速对比
Table 4 Comparison of mean prototype and model velocities

泥沙起动状态	淤积泥面平均切应力 /Pa	相应模型平均流速 χ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相应原型平均流速 χ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	原型流速/模型流速
将动未动	0.232	0.3	0.449	1.50
少量起动	0.613	0.5	0.730	1.46
大量扬动	0.919	0.7	0.894	1.28
剧烈冲刷	1.478	0.9	1.134	1.26

2 地下涵洞的输沙能力

2.1 地下涵洞有压流状态下的输沙能力
众所周知 ,明渠水流挟沙能力公式为

$$S_* = K(\frac{U^3}{gR\omega})^m \tag{6}$$

利用宽浅河道水深 h 代替水力半径 R ,并经过部分实验资料验证后 ,可得到更为简捷、易行的挟沙能力
计算公式^[2]

$$S_* = 0.235(\frac{U^3}{gh\omega}) \tag{7}$$

式中 : S_* ——水流挟沙力 , kg/m^3 ; U ——平均流速 , m/s ; g ——重力加速度 , m/s^2 ; h ——水深 , m ; ω ——床沙
质平均沉速 , m/s . 显然 ,由于输送泥沙的主要动力是水流速度 ,明渠水流上层流速大 ,下层流速小 ,其垂线平
均流速小于上层流速. 地下涵洞淹没于水下 ,泄流时为有压流 ,垂向流速分布较明渠水流更为均匀 ,其输沙状
态与明渠挟沙存在差异. 若假定明渠水流宽度与地下涵洞等宽、渠底高程与涵洞底高程平齐 ,且明渠水流服
从指数型流速分布关系

$$u = U_{\max}(\frac{y}{h})^{1/6} \tag{8}$$

则有任意水深处流速与垂线平均流速之间的关系

$$u = \frac{7}{6}U(\frac{y}{h})^{1/6} \tag{9}$$

进一步假定明渠底部洞身高度范围内垂向平均流速与洞内平均流速相等 ,则此明渠水流全水深垂线平
均流速与涵洞内平均流速存在

$$U = U_D(\frac{h}{y_D})^{1/6} \tag{10}$$

式中 : U_D , y_D ——涵洞内平均流速与涵洞洞身高度.

因而 ,适用于地下涵洞有压流状态下的输沙能力公式可表示为

$$S_{D^*} = 0.235\frac{U_D^3}{\eta_D^{1/2}gh\omega} \tag{11}$$

式中 : S_{D^*} ——地下涵洞输沙能力 ; U_D ——涵洞内平均流速 ; η_D ——涵洞洞身高度与涵洞洞底起算的下游明
渠水深间的比值 ; h ——涵洞洞底至下游明渠间的水深.

根据地下涵洞的来水、来沙条件 ,并注意到细颗粒泥沙的絮凝沉降影响后 ,计算出地下涵洞在不同水流
条件下的输沙能力 ,与模型试验研究的输沙特性基本一致. 在泄流量小于 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 时 ,涵洞输沙能力小于来
沙量 ,洞内将有所淤积 ,但当泄流量超过 $300\text{ m}^3/\text{s}$ 时 ,涵洞输沙能力远大于来沙量 ,因而涵洞内不会出现泥沙
淤积. 涵洞输沙能力计算结果见表 5.

表5 地下涵洞输沙能力计算结果
Table 5 Calculated sediment transport capacity of underground culvert

流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洞内流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泥沙中径 /mm	上游来沙量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)			计算涵洞输沙能力 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
			最大	最小	一般	
50	0.31	0.08				0.03
100	0.62	0.08			< 0.5	0.22
200	1.23	0.07	3.0	0.5	0.8	2.1
300	1.85	0.05	4.6	0.9	2.2	9.5
400	2.47	0.03	5.2	1.0	2.8	32.6
500	3.08	0.02	8.0	1.4	3.5	78.4

2.2 地下涵洞上下游连接段的输沙能力

地下涵洞上游连接段,虽两侧翼墙平面上有所收缩,但底部纵坡 1:6,水流垂直扩散大于平面收缩,流速沿程减小,流速垂向分布表层大、底层小,底坡坡面流速更小,泥沙容易淤积.模型试验测得年最大平均淤积厚度 98.6 cm,个别点年最大淤积厚度达 176 cm,若不治理疏通,将严重影响地下涵洞的正常泄洪.

与此不同的是,下游斜坡段逆向连接,坡面逐渐抬高,地下涵洞泄流时主流贴着斜坡面,表层水流存在横轴副流,底部流速大,上部流速小,地下涵洞下游斜坡段垂线流速分布见图 2.因此,上下游斜坡段的水流输沙状况不同,上游斜坡段沿程取平均流速,下游斜坡段沿程近似取底部水深为涵洞高度范围内的平均流速,分别用明渠输沙和有压流状态下的输沙能力公式计算,得上下游斜坡段的输沙结果见表 6.明显可见上游斜坡段随水深增加,输沙能力减小,泥沙淤积严重.下游斜坡段主流紧贴坡面,输沙能力增大,虽沿程输沙有所减小,但超过上游来沙量,因此下游斜坡面几乎没有泥沙淤积,这与试验研究结果相符,较好地反映出地下涵洞上下游斜坡段的实际输沙状况.

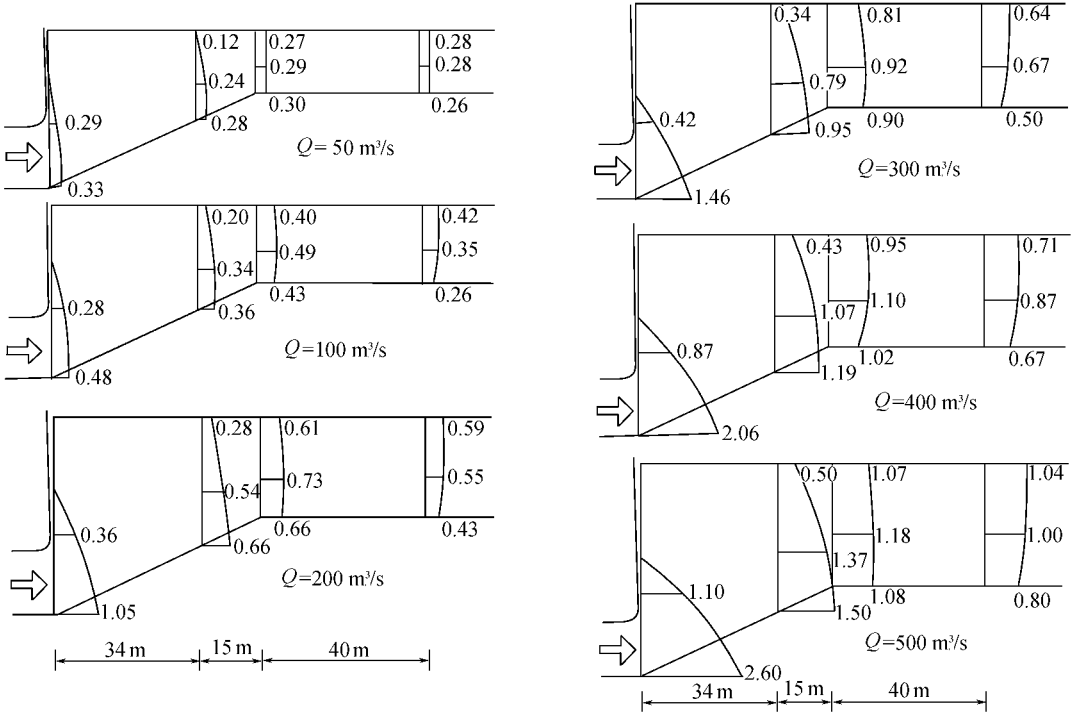


图2 涵洞下游斜坡段垂向流速分布

Fig.2 Vertical velocity distribution for backwater slope section of culvert

2.3 地下涵洞的防淤、减淤工程措施

地下涵洞在全开闸门通过大流量时,涵洞内输沙能力大,不发生泥沙淤积.但在下泄中小流量时,发现涵洞内有少量泥沙淤积,且随着淤积历时延长,淤积厚度逐渐增加,最终将危及地涵泄洪安全.经多次试验探索,进行合理调度,控制开启部分闸门,当涵洞内输沙能力大于水流来沙量时,便可达到涵洞内不发生泥沙淤积.同时,即使涵洞内发生了泥沙淤积,通过局部加大涵洞内流速,束水攻沙,当地下涵洞内流速超过有压流状态下的泥沙起动流速,也可冲刷淤积泥沙输移出洞.所以采取调控开启闸门措施,轮换冲刷涵洞内淤积泥

沙 是解决中小流量时涵洞内淤积的基本办法.

表 6 地下涵洞闸门全开时上下游斜坡连接段沿程输沙能力
Table 6 Sediment transport capacity for joint section on slopes with all gates
of underground culvert fully open

流 量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	上游斜坡段			下游斜坡段		
	顶端	中部	底端	底端	中部	顶端
50	0.016	0.003	0.001	0.03	0.02	0.04
100	0.047	0.015	0.006	0.06	0.06	0.14
200	0.190	0.070	0.035	0.40	0.30	0.53
300	0.490	0.220	0.120	1.24	1.15	1.53
400	1.050	0.520	0.310	6.90	3.70	3.40
500	1.980	1.020	0.630	17.00	9.50	4.80

另外 ,地下涵洞结构型式中上槽下洞型洞身短 ,输水、输沙能力强^[3] ,立交工程结构型式优良 ,但其进口斜坡段过水断面垂向扩散 ,泥沙淤积较为严重 ,直接威胁着地下涵洞的安全. 试验中将进口斜坡段沿闸门隔墩增设导流墙 ,其长度与斜坡段相等 ,墙顶高程 + 4 m(相当于下泄 100 m³/s 流量时平齐水位) ,利用轮换开启部分闸门时机 ,束水攻沙. 下泄大流量时水位高 ,导流墙作用弱 ;下泄中小流量时 ,开启部分闸门 ,导流墙顶出露 ,提高导流墙间的输沙能力 ,可以防止上游斜坡段泥沙淤积. 进口斜坡段防淤导流墙布置见图 3.

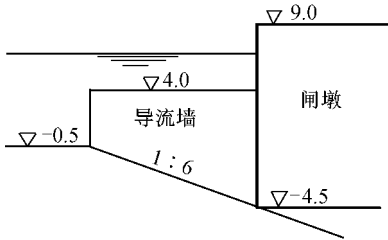


图 3 斜坡段防淤导流墙
Fig.3 Training wall for deposition control at slope section

3 结 束 语

- a. 原型与模型地下涵洞内的淤积泥沙 ,当床面切应力较小时 ,两者之间的起动流速比率较大 ,反之床面切应力增大 ,两者之间的起动流速比率减小.
- b. 地下涵洞的输沙能力与洞内流速、埋置深度密切相关. 洞内流速大 ,输沙能力强 ,埋置深度大 ,同等流速条件下输沙能力也趋强.
- c. 地下涵洞进出口段输沙能力与流速分布有关 ,上游进口斜坡段过水断面扩散 ,平均流速沿程减小 ,泥沙淤积较为严重 ;下游出口斜坡段主流紧贴坡面 ,底部流速较大 ,输沙能力大于上游斜坡段 ,不会出现泥沙淤积危害.
- d. 在上游斜坡段增设导流防淤墙 ,可以防止因水深沿程增加、流速逐渐减小所造成的进口斜坡段局部泥沙淤积 ,充分发挥上槽下洞型地下涵洞的输水、输沙优势 ,对类似工程有指导意义.

参考文献 :

[1] 华东水利学院. 水力学[M]. 北京 :科学出版社 ,1983. 178 ~ 179.
[2] 中国水利学会泥沙专业委员会. 泥沙手册[M]. 北京 :中国环境科学出版社 ,1992. 224 ~ 227.
[3] 徐金环. 水利立交地下涵洞输水输沙特性研究[J]. 泥沙研究 ,1999(1) 33 ~ 35.

Study on Characteristics of Sediment Transport through Culverts

XU Jin-huan , ZHANG Wei

(College of Traffic and Ocean Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The motion of water and sediment through underground culverts is in the state of pressure flow. The reasonable use of the water flow energy can ensure the culvert crossing transport of sediment. In this paper , a modified formula is proposed for analysis of the relationship between incipient motion of sediment and the sediment transport capacity of underground culverts , providing a theoretical basis for safety transport of sediment and prevention of sediment deposition in underground culverts.

Key words : culvert ; incipient velocity ; sediment transport capacity ; measures for sediment control