

# 大型立交地涵上下游连接段底坡坡比对其水力特性的影响

曹伽<sup>1</sup>, 林青炜<sup>1</sup>, 王辉<sup>2</sup>, 陈武<sup>3</sup>, 唐立模<sup>1</sup>, 屈一晗<sup>1</sup>, 曾清<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院; 2. 江苏省淮沭新河管理处; 3. 江苏省骆运水利工程管理处)

**摘要:**为探究大型立交地涵上下游连接段底坡坡比对其水力特性的影响,以淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵为研究对象,采用1:30正态断面物理模型和OpenFOAM三维数值模型,开展了上下游连接段底坡坡比参数研究,从过流能力、流速分布、断面能量、水头损失、湍动能及其耗散率等方面对不同流量水位条件下的地涵水力特性进行了分析。结果表明:地涵总水头损失系数随上下游连接段底坡坡比增大呈先缓慢减小后迅速增大的非线性变化规律,总水头损失系数在0.837~1.464之间变化;下游涵首及连接段总水头水力坡降最大,其水头损失占比达55.07%~72.67%,并且对底坡变化最为敏感;坡比过大和过小均易引发不良流态,影响地涵过流能力,底坡坡比为1:7的方案水头损失最小,流态最优,并在不同流量下表现出优良且稳定的水力性能,其流量系数范围为0.868~0.928。

**关键词:**立交地涵;底坡坡比;水力特性;水头损失系数;淮河入海水道滨海枢纽

**Influence of bottom slope ratio of upstream and downstream connecting sections on hydraulic characteristics of large interchange culverts**//Cao Jia<sup>1</sup>, Lin Qingwei<sup>1</sup>, Wang Hui<sup>2</sup>, Chen Wu<sup>3</sup>, Tang Limo<sup>1</sup>, Qu Yihan<sup>1</sup>, Zeng Qing<sup>1</sup>  
(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 2. Jiangsu Huai-Shu Xinhe Management Office; 3. Jiangsu Luoyun Management Division)

**Abstract:** To investigate the influence of the bottom slope ratio of the upstream and downstream connecting sections on the hydraulic characteristics of large interchange culverts, the interchange culvert of the Binhai Hub of the Huaihe River Sea-Entry Channel (Phase II Project) was taken as the research object. A parametric study on the bottom slope ratio of the upstream and downstream connecting sections was conducted using a 1:30 normal-section physical model and the OpenFOAM three-dimensional numerical model. The hydraulic characteristics of the culvert under different flow rate and water level conditions were analyzed in terms of flow capacity, velocity distribution, sectional energy, head loss, turbulent kinetic energy, and turbulent dissipation rate. The results show that the total head loss coefficient of the culvert exhibits a nonlinear variation pattern, first decreasing slowly and then increasing rapidly, with the increase of the bottom slope ratio of the upstream and downstream connecting sections. The total head loss coefficient varies between 0.837 and 1.464. The maximum hydraulic gradient of total head occurs at the downstream culvert inlet and its connecting section, where the head loss accounts for 55.07% to 72.67% of the total head loss, and this section is the most sensitive to changes in bottom slope. Both excessively large and excessively small bottom slope ratios are prone to inducing unfavorable velocity patterns, thereby affecting the flow capacity of the culvert. The scheme with a bottom slope ratio of 1:7 exhibits the minimum head loss, the optimal flow pattern, and excellent and stable hydraulic performance under different flow rates, with its flow coefficient ranging from 0.868 to 0.928.

**Key words:** interchange culvert; bottom slope ratio; hydraulic characteristics; head loss coefficient; the Binhai Hub of the Huaihe River Sea-Entry Channel

立交地涵主要用于解决水系河道之间的交汇问题,在我国防洪排涝工程和引调水工程中应用广

泛<sup>[1]</sup>。随着工程应用的不断深入,其运行环境正经历显著变化。近年来,受全球气候变化影响,极端降

基金项目:淮河入海水道二期工程枢纽建设质量及安全保障提升关键技术研究项目(RHSD2/FW-2024-03);国家重点研发计划项目(2022YFC3202603)

作者简介:曹伽(2001—),男,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:408653485@qq.com

通信作者:唐立模(1977—),男,教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:tanglimo@hhu.edu.cn

雨与洪水事件呈现出发生频率上升、强度增大的趋势,对流域防洪排涝体系整体的安全性与可靠性提出了更高要求<sup>[2-3]</sup>。这种极端水文情势的持续加剧,使得传统防洪工程在设计标准、运行工况及安全储备等方面可能面临不同程度的适应性不足问题<sup>[4-6]</sup>。在此背景下,立交地涵作为流域防洪排涝系统中的关键节点工程,承担着洪水过流与区域排涝的重要功能,其水力性能直接影响流域防洪体系的运行效能。因此,系统开展大流量工况下立交地涵水力特性及其影响机理研究,对于完善工程设计理论、提升防洪排涝能力具有直接意义,同时也对后续工程优化中防止泥沙淤积<sup>[7-8]</sup>、延长工程使用寿命<sup>[9]</sup>等方面具有重要参考价值。

立交地涵按断面形式通常可分为倒虹吸式、竖井式、上槽下洞式<sup>[10-13]</sup>3种类型,不同形式在水头损失以及水力特性等方面存在差异。在实际运行过程中,立交地涵内部涉及“明渠流-有压涵流-明渠流”的复杂流态转换,在结构内部以及上下游范围容易引发泥沙淤积和不良流态等工程问题。国内外学者对此开展了大量研究。例如:吴时强等<sup>[14]</sup>针对地涵下游河道回流区不良流态和高流速区域过大等问题,根据物理模型和二维水流数学模型结果,改进了翼墙布置形式,较好地改善了下游流态;傅朝康<sup>[15]</sup>通过水工模型试验和数值模拟对废黄河立交地涵工程进行了防冲减淤研究,指出河道上游左岸区域因水动力较弱而成为主要淤积区域;朱明成等<sup>[16]</sup>采用局部物理模型对新孟河奔牛立交地涵枢纽工程开展了过流能力、通航水流和泥沙淤积研究,根据涵孔的淤积平衡形态提出了地涵涵孔和纵剖面体型的优化方案。国外研究则更多聚焦于涵洞体型的水力优化与设计理论。例如:Nassralla<sup>[17]</sup>分析了涵洞进出口扩散角与宽度收缩比对水力损失的影响,发现当进口收缩角为 $15^\circ$ 、宽度收缩比为2.33时进口能量损失最小;Jaeger等<sup>[18-19]</sup>采用数值模拟和物理模型试验方法,研究了涵洞进口和顶部翼墙角度对过流能力的影响,发现具有 $45^\circ$ 倒角的圆形进口产生的湍动能最小,对过流能力的提升效果最好,并建议添加通风装置以进一步提升涵洞的过流能力;Sellevold

等<sup>[20]</sup>在总结现有涵洞设计与数据的基础上,提出近似椭圆弧的进口边缘设计可有效减少水头损失;McKay<sup>[21]</sup>基于临界流理论开发了最小能量损失(MEL)涵洞及其设计方法,在提高过流能力的同时有效降低了工程成本;Chanson<sup>[22]</sup>统计了MEL涵洞工程40年的应用效果,证明了设计的合理性,并进一步强调了涵洞结构流线型的重要性。

可见,目前国内外关于立交地涵的研究多针对过流能力和泥沙淤积,对于大流量工况下立交地涵不同位置的流态演变和水力损失的系统及量化研究尚显不足。此外,地涵的结构特点决定了上下游连接段的底坡形式可能显著影响过涵水流,但围绕底坡参数对地涵水动力影响的敏感性研究在国内外尚不多见。本文以淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵为例,通过数值模拟结合物理模型试验对高淹没条件下大流量立交地涵进行研究,开展了上下游底坡参数对水动力影响的敏感性分析,揭示了不同行洪条件下地涵各部位的水力特性,以期为更好地发挥立交地涵防洪排涝作用以及地涵工程设计提供技术支撑。

## 1 工程概况

淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵位于江苏省滨海县淮河入海水道与通榆河交汇处,形式为上槽下洞式,上部为通榆河航道,下部为淮河入海水道(图1)。地涵主体由上游涵首段、涵身段、下游涵首段组成,沿水流方向总长100.00m,与上下游入海水道明渠通过连接段进行过渡。上游涵首段长27.50m,进口底高程-6.70m,与上游明渠段(底高程为-4.50m)通过底坡连接,向下经过两段圆弧段和一段斜直段过渡至涵身水平段,圆弧段半径分别为12.00、11.00m,斜直段与水平方向夹角为 $38^\circ$ ;涵身段底高程为-12.90m,长45.00m,矩形断面高6.50m、宽6.00m;下游涵首段长27.50m,与涵身通过斜直段连接,出口处底高程为-10.60m,通过底坡过渡至下游明渠段(底高程为-4.50m)。淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵建成后入海水道设计行洪流量将提高至 $7000\text{ m}^3/\text{s}$ ,并使洪泽湖防洪

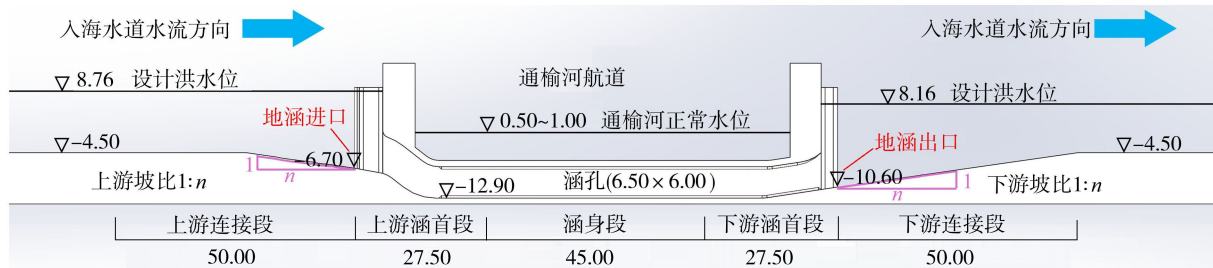


图1 滨海枢纽立交地涵布置(单位:m)

标准由 100 年一遇提高到 300 年一遇,同时可有效减少周边滞洪区进洪机遇。

## 2 研究方法

### 2.1 数学模型

按照工程原型建立淮河入海水道二期工程滨海枢纽地涵数学模型,由于立交地涵结构复杂,水平方向存在导流墩收缩段,重力方向存在圆弧过渡段,概化为二维模型难以准确描述水流特性,故建立三维数值模型。滨海枢纽地涵共有 63 孔(一期工程和二期工程),地涵横向宽度为 560.90 m,单孔净宽 6.00 m,两侧导流墩厚度为 0.55 m,过涵水流方向与入海水道方向平行。模型设置双孔(一个完整孔和两侧两个半孔)地涵断面模型,为避免上下游边界对地涵水流流态的影响,依据相同形式总渠地涵研究<sup>[12]</sup>,以地涵进出口为界分别向上下游设置 190.00 m(约 30D, D 为洞孔高度)、160.00 m 的过渡段,模拟范围长 450.00 m,宽 14.20 m,高 29.20 m。

基于通用计算流体力学开源平台 OpenFOAM 对地涵数学模型进行模型设置和方程求解。地涵出口处底部高速水流带动顶部水流旋转,且流动属于强湍流运动,故采用雷诺时均模型并选择 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[23]</sup>对方程进行封闭。RNG  $k-\varepsilon$  模型引入重整化群理论,对湍流耗散率扩散方程在标准  $k-\varepsilon$  模型基础上进行了修正,使得其对于旋转结构能够有更加精确的模拟结果。数学模型相关控制方程可参考文献<sup>[24]</sup>。

采用体积函数法(VOF)模拟空气与水的相界面位置及水面变化。基于有限体积法求解数学模型控制方程,空间离散采用二阶迎风格式,时间离散采用一阶隐式格式,速度压力解耦采用基于分离求解器的 PIMPLE 算法<sup>[25]</sup>。考虑湍流脉动对流速提取的影响,当流场内水位稳定时取稳定后 500 s 时间段的流场数据进行分析。

模型进口分为水相进口和气相进口,水相为质量流量进口边界,气相为压力进口边界;出口边界为压力出口边界,满足静水压强分布;地涵壁面和侧壁与物理模型试验保持一致,采用壁面边界,并采用粗糙壁面函数,根据文献<sup>[26]</sup>设置混凝土抹面对应参数。

考虑计算精度与计算效率,地涵数学模型采用结构化六面体网格划分,网格采用渐变网格,在地涵上下涵首位置以及水面附近网格进行加密,并进行网格无关性检验,选择上下游水深以及地涵总水头损失作为网格评判标准,计算结果见表 1。断面之间水头损失根据断面能量差值计算,断面能量及水头损失按下式计算:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h_{w12} \quad (1)$$

式中: $z_i$  为断面位置水头, $i=1,2$ ;  $p_i$  为断面静压; $\rho$  为流体的密度; $g$  为重力加速度; $u_i$  为断面流速; $h_{w12}$  为两个断面之间的水头损失; $z_i + p_i/\rho g$  为断面测压管水头; $u_i^2/2g$  为断面流速水头。物理模型结果在计算流速水头时可按照  $\alpha_i \bar{u}_i^2/2g$  计算,其中, $\alpha_i$  为断面的动能校正系数, $\bar{u}_i$  为断面平均流速。数学模型结果在计算时为了避免动能校正系数对结果的影响,采用对整个断面进行积分计算的方法。断面能量的计算方法可参考文献<sup>[27]</sup>。

表 1 数学模型网格无关性验证

编号	网格数/万	上游水深/m	下游水深/m	总水头损失/m
1	10.1	12.970	12.652	0.318
2	14.2	12.993	12.648	0.346
3	24.3	13.010	12.655	0.351
4	67.2	13.018	12.649	0.355
5	116.2	13.013	12.650	0.358

随着网格数量的增加,上下游水深以及地涵总水头损失趋于稳定,当网格数量从 67.2 万增加至 116.2 万时,地涵上下游水深变化幅度均小于 0.1%,地涵总水头损失变化幅度小于 0.85%,表明网格数为 67.2 万时地涵数学模型的流场数据已满足网格无关性检验的要求,此时网格划分见图 2,其中沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的网格数量分别为 810、24 和 67。以地涵出口断面为典型断面,沿  $x$  方向的相邻网格比为 1.0004 : 1;沿  $y$  方向的相邻网格比为 1 : 1;沿  $z$  方向位于明渠底与地涵底的区间(高程为 -12.9 ~ -4.5 m)网格比为 1 : 1,在明渠底与水面位置向中间水深位置的网格比为 1.0294 : 1;壁面法向网格尺度为 0.023D。

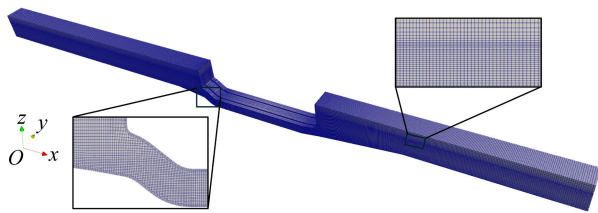


图 2 数学模型网格划分

模型沿程共布置 9 个测量断面 CS1 ~ CS9 (图 3),每个测量断面沿垂线方向布设 5 个流速测点,测点高度分别位于 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 倍水深位置。

以淮河入海水道二期工程滨海枢纽立交地涵设计行洪工况作为模型验证工况,设计行洪工况下流速模拟值与试验值对比见图 4(地涵上下游连接段底坡坡比为 1 : 7)。地涵上下游水位断面 CS1 与 CS8 的流速最大误差为 5.93%,地涵出口断面底部

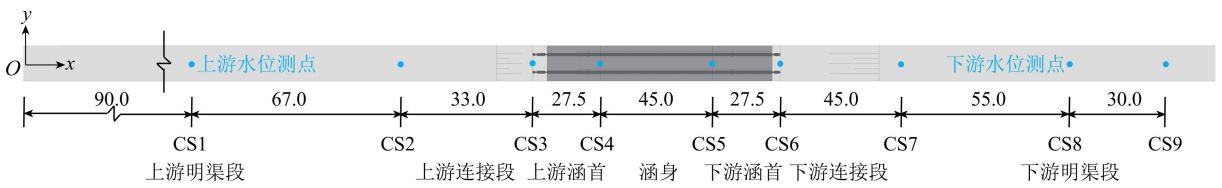


图3 流速及水位测点布置(单位:m)

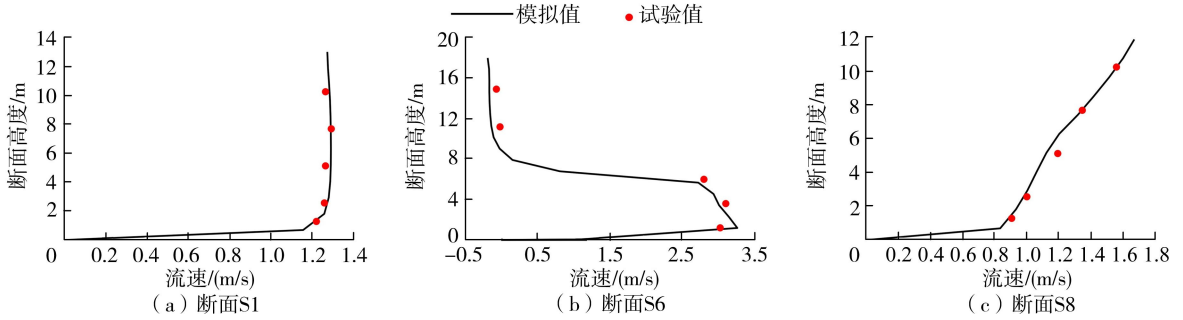


图4 设计行洪工况下流速模拟值与试验值对比

高流速点最大误差为 7.85%，顶部测点流速绝对误差小于 0.121 m/s。误差可能来自模型试验过程中的测量误差，也可能是由于数值模拟网格划分不够精细或湍流模型的适用性。但整体上数值模拟结果与模型试验结果吻合程度较好，说明了采用数值模拟进行立交地涵水力特性研究具有一定的可行性。

## 2.2 断面物理模型

地涵水流运动主要受重力作用驱动，因此选择重力相似作为相似准则进行断面物理模型设计，正态模型几何比尺为 1 : 30。选择有机玻璃制作地涵整体和上下游明渠部分，确保模型壁面糙率与混凝土表面糙率相对应。地涵断面物理模型布置见图 5。物理模型使用旋桨式流速仪对地涵流速进行测量；在每个测量断面底部布设连通管外接水尺读取水位；流量通过电磁流量计读取。

## 2.3 研究方案设计

立交地涵上下游涵首的体型设计通常以进出口底高程作为固定控制点，并由此向上下游进行过渡连接。其中，上下游连接段的关键体型参数为底坡坡比，鉴于实际工程上下游常采用相同底坡坡比并且多以“1 : n”形式表示，本文将研究参数统一设定为坡比 1 : n，具体见图 1。为便于对结果进行量化分析，进一步将坡比 1 : n 量化为单一参数  $i$  (即  $i =$

$1/n$ )。以设计行洪流量  $7000 \text{ m}^3/\text{s}$  (对应双孔流量  $222.22 \text{ m}^3/\text{s}$ ) 为基准，采用数值模拟方法对不同坡比方案 (方案 1~10) 进行对比分析，旨在便捷且高效地获得地涵水力特性随底坡参数的变化规律，据此筛选出最优底坡方案。在此基础上，采用模型试验结合数值模拟的方式，对最优底坡方案开展不同流量水位组合工况 (方案 6、11 和 12) 下的水力特性分析与验证，全面评估其性能，并进行更深层次的机理分析，确保研究结论的准确性和丰富性。具体研究方案设计见表 2。

表2 研究方案设计

方案编号	$n$	$i$	行洪流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ )	下游水位/m
1	0.5	2.00	7000	8.16
2	1.0	1.00	7000	8.16
3	1.5	0.67	7000	8.16
4	3.0	0.33	7000	8.16
5	5.0	0.20	7000	8.16
6	7.0	0.14	7000	8.16
7	9.0	0.11	7000	8.16
8	11.0	0.09	7000	8.16
9	13.0	0.08	7000	8.16
10	15.0	0.07	7000	8.16
11	7.0	0.14	6000	7.54
12	7.0	0.14	5000	6.89

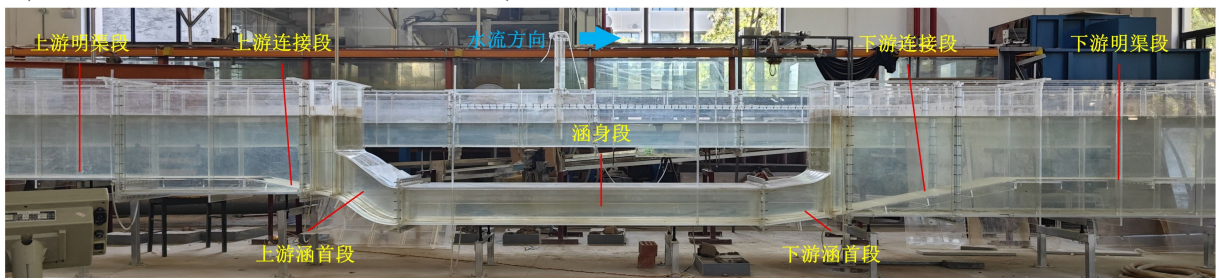


图5 地涵断面物理模型

### 3 结果与分析

#### 3.1 底坡参数对地涵水力特性的影响

##### 3.1.1 流速分布

上下游连接段不同底坡参数条件下地涵纵剖面与断面流速对比结果分别如图6和图7所示(图中均为提取的水相结果)。总体来看,地涵不同位置在各底坡方案下存在一定程度的差异。对于涵身断面CS5,各方案之间流速分布差异较小,最大流速介于3.23~3.31 m/s之间,底坡坡比的影响主要集中在涵进出口位置。当坡比较大( $n=0.5, 1.0, 1.5$ )时,由于底坡变化剧烈,地涵进出口位置形成明显折角,导致该位置出现负流速或低流速区域,其中进口断面CS3的最大负流速为-0.29 m/s。随着坡比减小,进口流速差异逐渐缩小。在地涵出口处水流沿底坡直冲顶部,引发下游水位较大波动,并在底部形成明显的负流速区域。当坡比适中( $n=3, 5, 7$ )时,进出口折角处不良流态基本消失,出口水流沿底坡平顺进入下游明渠段,在底坡底部形成高流速区域,底坡段低流速区域消失。当坡比继续减小( $n=9, 11, 13, 15$ )时,出口断面CS6的流速分布与 $n=3, 5, 7$ 时相似,最大流速为3.05~3.33 m/s,且最大流速断面高度基本稳定在1.19 m,受底坡坡比因素影响

较小,差异主要体现在底坡段,由于坡比减小,底坡长度增加,出口高流速水流会在抵达坡顶前完成明渠流态的转变,致使底坡段形成新的低流速区域。综上可知:底坡坡比过大会造成地涵进出口局部和下游明渠底部的不良流态,坡比过小则会因底坡延长而产生低流速区。这些不良流态会影响有压涵流向明渠流的正常过渡,影响地涵流态演变。相比之下, $n=3, 5, 7$ 时地涵断面流速受底坡影响较小,下游水流贴合底坡,无低流速区等不良流态,流态更加平顺。

##### 3.1.2 水头损失

为分析底坡坡比对地涵不同位置水头损失的影响,对各部分水头损失进行计算。为避免断面流速分布不均匀对计算结果的影响,选择上游涵首及连接段、涵身段、下游涵首及连接段作为地涵水头损失分析的不同位置。其中上游涵首及连接段水头损失计算选取断面CS1与断面CS4,涵身水头损失计算选取断面CS4与断面CS5,下游涵首及连接段水头损失计算选取断面CS5与断面CS8(包括下游连接段底坡)。水头损失系数为:

$$\xi_{12} = 2gh_{w12}/v^2 \quad (2)$$

式中: $\xi_{12}$ 为两个断面之间的水头损失系数; $v$ 为地涵涵身断面平均流速。

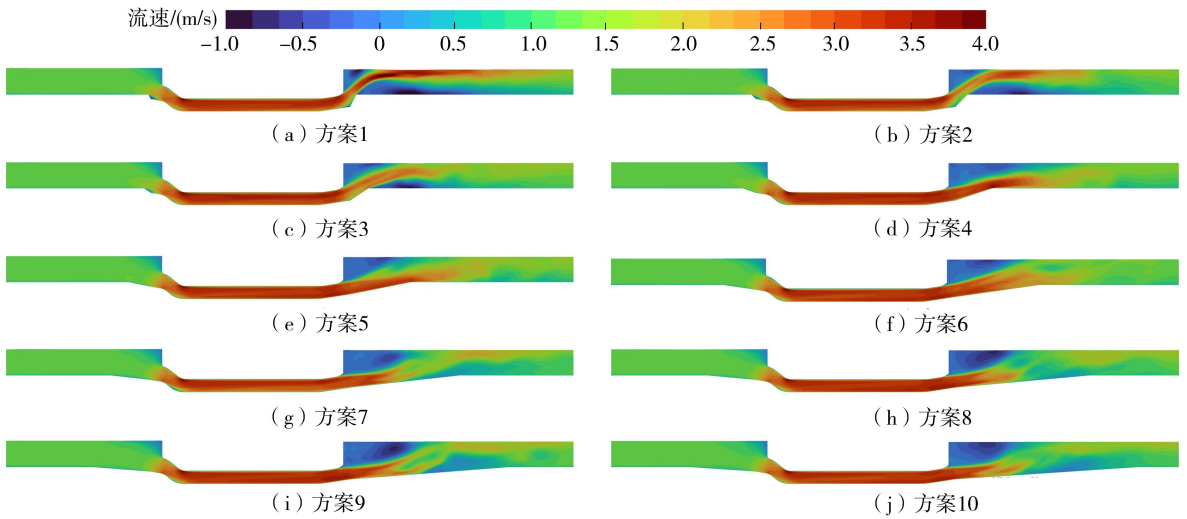


图6 地涵纵剖面流速对比

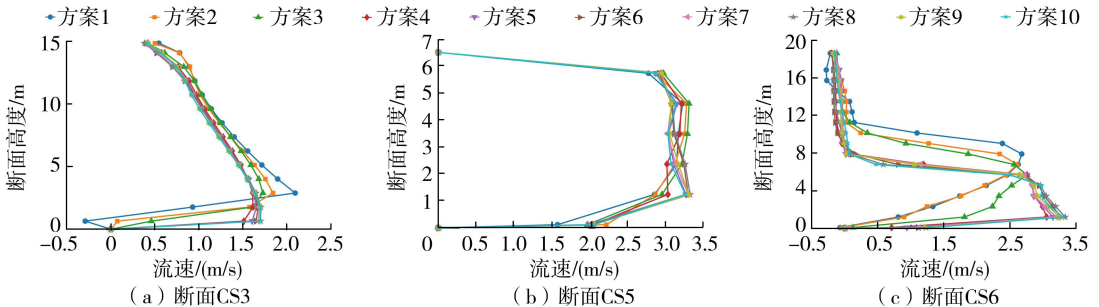


图7 地涵断面垂线流速对比

不同坡比条件下,地涵总水头损失及各部位水头损失结果如表 3 所示。当上下游底坡坡比  $i$  逐渐增大(即  $n$  从 15 减小至 0.5)时,地涵总水头损失呈现先略微减小后快速上升的变化趋势。当  $n$  为 0.5 时,总水头损失达到最大值 0.622 m,对应总水头损失系数为 1.464;当  $n$  为 7 时,总水头损失达到最小值 0.355 m,对应总水头损失系数为 0.837;当  $n$  为 1.5~15 时,总水头损失系数变化范围为 0.837~0.907,整体变化幅度小于 8.36%,且表现为先减小后增大的特征。同时,地涵不同部位水头损失随坡比的变化呈现不同的变化规律。上游涵首及连接段水头损失系数随坡比变化范围为 0.228~0.248,涵身水头损失系数随坡比变化范围为 0.120~0.152,两者受底坡坡比影响相对有限。与之相比,下游涵首及连接段水头损失则对底坡变化较为敏感。当  $n$  为 0.5 时,下游涵首及连接段水头损失系数达到最大值 1.064;当  $n$  为 1.5 时,下游涵首及连接段水头损失系数达到最小值 0.474;此后随  $n$  增大逐渐回升至 0.527。整体上,下游涵首及连接段水头损失系数随坡比增大呈现先缓慢减小后迅速上升的趋势。在所有方案中,下游涵首及连接段水头损失占比 55.07%~72.67%,为水头损失的主要部位。

基于上述结果及分析可知,上游涵首及连接段和涵身部位水头损失变化幅度有限,受底坡坡比影响较小。地涵水头损失主要集中分布在下游涵首及连接段位置,该部位水头损失占比超过一半,并且对底坡坡比更加敏感。当底坡坡比增大至一定范围时,下游涵首及连接段水头损失会显著增加,进而影响地涵的过流能力,并对工程运行安全构成潜在威胁。因此,在地涵底坡设计尤其是下游连接段底坡

设计时,应审慎选取底坡参数,避免采用过大的底坡坡比。

综合流速分布以及水头损失对比分析结果,建议  $n$  取 7,即立交地涵上下游连接段底坡坡比选取 1:7。在该方案下,地涵进出口水流与上下游底坡贴合良好,无明显不良流态,且地涵总水头损失系数最小。

### 3.2 不同流量水位组合下的地涵水力特性

#### 3.2.1 过流能力

过流能力是地涵设计时的关键控制指标。基于前述确定的最优底坡坡比方案( $n=7$ ),开展不同流量水位组合工况下的过流能力分析,对比不同工况下的地涵过流差异。

大型立交地涵在设计行洪条件下常处于高淹没条件(下游水深达到上游水深的 90%或以上),其流量系数可按式<sup>[12]</sup>进行计算:

$$m = Q/A\sqrt{2g(\Delta H + \delta H)} \quad (3)$$

式中: $Q$  为过涵流量,  $m^3/s$ ;  $A$  为地涵涵身段过流面积,  $m^2$ ;  $\Delta H$  为上下游水位差,  $m$ ;  $\delta H$  为恢复落差,  $m$ , 为下游水位与地涵出口水位差值,若无模型试验数据,可按照文献[12]中的式(6)计算。

不同行洪流量下,物理模型试验与数学模型计算的上下游水位差和流量系数结果如表 4 所示。由对比结果可知,两种方法获得的地涵流量系数误差的绝对值均小于 1.72%,表明数学模型与物理模型结果具有较好的一致性。随着行洪流量的减小,上下游水位差和恢复落差逐渐减小,流量系数也逐渐减小,其变化范围为 0.868~0.928,均高于地涵设计流量系数 0.863,物理模型和数学模型的上下游水位差最大值分别为 0.360、0.380 m,小于设计行洪

表 3 不同坡比条件下水头损失计算结果

$i$	$n$	上游涵首及连接段水头损失/m	上游涵首及连接段水头损失系数	涵身水头损失/m	涵身水头损失系数	下游涵首及连接段水头损失/m	下游涵首及连接段水头损失系数	总水头损失/m	总水头损失系数
2.00	0.5	0.105	0.248	0.065	0.152	0.452	1.064	0.622	1.464
1.00	1.0	0.105	0.248	0.059	0.139	0.273	0.643	0.437	1.030
0.67	1.5	0.105	0.248	0.058	0.137	0.201	0.474	0.365	0.859
0.33	3.0	0.099	0.233	0.057	0.133	0.203	0.477	0.358	0.844
0.20	5.0	0.097	0.228	0.056	0.131	0.205	0.483	0.358	0.842
0.14	7.0	0.101	0.238	0.051	0.120	0.204	0.479	0.355	0.837
0.11	9.0	0.100	0.236	0.060	0.141	0.210	0.494	0.370	0.872
0.09	11.0	0.099	0.234	0.061	0.144	0.216	0.508	0.376	0.887
0.08	13.0	0.101	0.237	0.061	0.144	0.223	0.525	0.384	0.905
0.07	15.0	0.099	0.233	0.062	0.147	0.224	0.527	0.385	0.907

表 4 水位差及流量系数结果对比

方案编号	行洪流量/( $m^3/s$ )	上下游水位差/m		恢复落差/m		流量系数		流量系数误差/%
		物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	
6	7000	0.360	0.380	0.120	0.130	0.928	0.912	-1.72
11	6000	0.300	0.292	0.090	0.105	0.894	0.887	-0.78
12	5000	0.210	0.227	0.075	0.060	0.872	0.868	-0.46

水位差 0.600 m。

以上结果表明,最优底坡方案的过流能力满足行洪要求,其流量系数与相同上槽下洞形式的总渠道涵<sup>[12]</sup>相近,可为相同类型工程设计提供参考。

### 3.2.2 流速分布

不同行洪流量方案下地涵纵剖面流速分布和进出口流线分布如图 8 和图 9 所示(图中均为提取的水相结果)。地涵整体流速随行洪水量的减小而

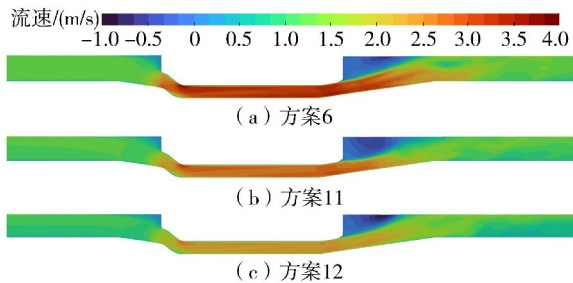


图 8 地涵纵剖面流速分布

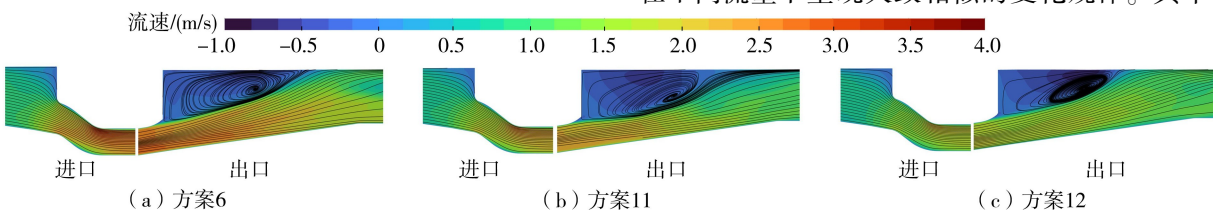


图 9 地涵进出口纵剖面流线分布

逐渐减小,各方案下地涵流速演变规律基本一致。水流在上游涵首位置由明渠流转变为有压涵流,并在顶部圆弧与水平段连接处达到流速峰值。进口纵剖面流线分布均匀,并未出现明显回流,流态过渡较为平顺。在下游涵首出口位置,流速分布呈现“底部流速大,顶部负流速”的特征,高流速水流流线分布相对更加均匀,顶部则形成明显回流区域。地涵底部高流速水流从有压涵流向明渠流过渡的过程中,与顶部水流发生动量交换,引起顶部旋滚,同时水流在连接段底坡向明渠流态过渡,在下游明渠段完成流态的转变。

各方案断面流速分布模拟值与试验值如图 10 所示,数学模型与物理模型在不同流量方案下上下游水位断面和地涵出口断面流速的最大误差为 7.85%,说明二者吻合较好。不同断面的流速分布在不同流量下呈现大致相似的变化规律。其中,上

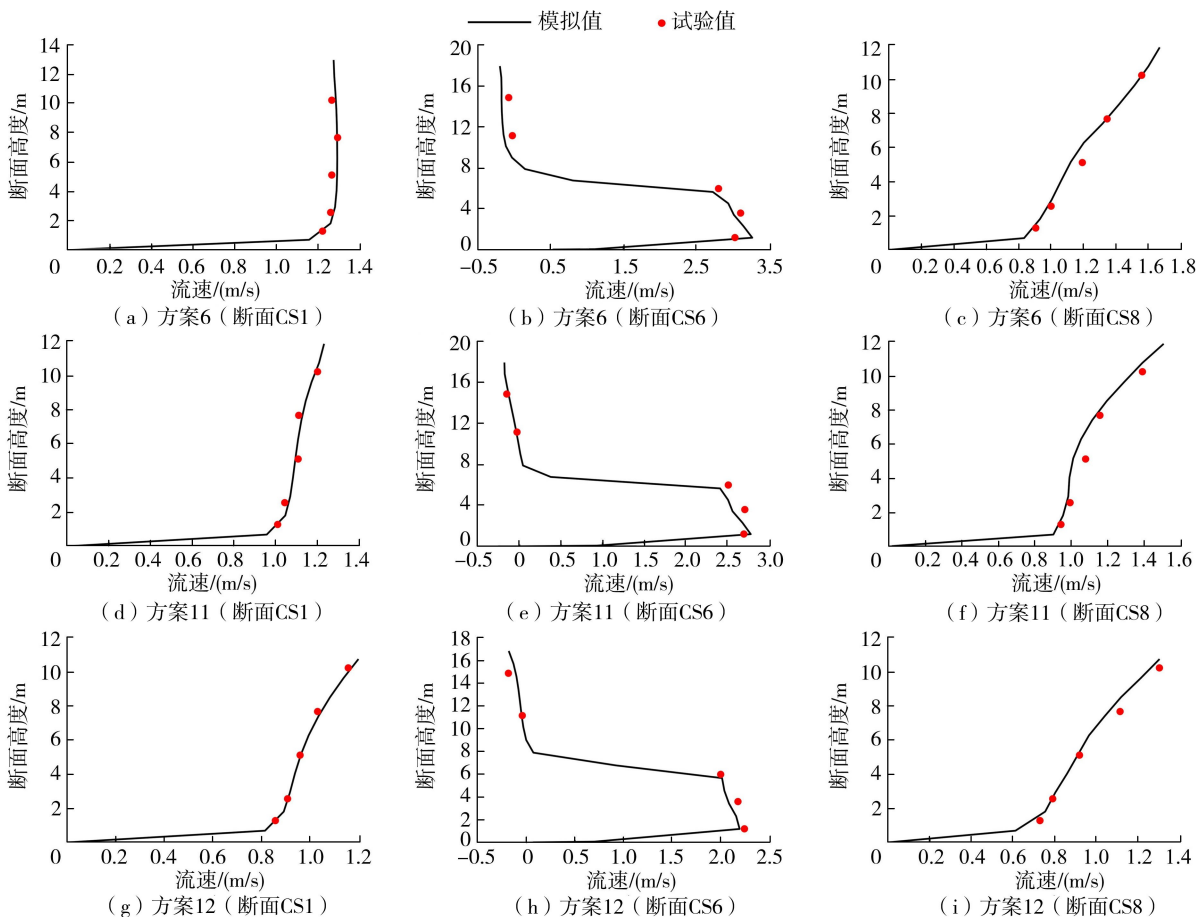


图 10 断面垂线流速模拟值与试验值对比

游水位断面 CS1 流速分布均匀性明显高于地涵出口断面 CS6 以及下游水位断面 CS8。随着行洪流量的减小,断面 CS1 流速整体上逐渐减小,流速分布由“均匀分布”逐渐向“顶部流速大于底部流速”转变,说明上游水位断面受地涵工程的影响程度逐渐减弱,流速分布逐渐趋于明渠流态。地涵出口断面 CS6 底部最大流速随行洪流量的减小逐渐减小,底部流速最大值分别为 3.27、2.78、2.20 m/s,均位于断面高度 1.19 m 处,顶部最大负流速介于 -0.18 ~ -0.20 m/s 之间。下游水位断面 CS8 的水流已基本完成了明渠流态的转换,流速沿垂线均匀变化,表现为顶部流速大于底部流速,最大流速分布在水面附近。

上述结果表明,在最优底坡方案( $n=7$ )下,地涵水流在不同流量水位工况下均能良好贴合底坡,流态演变平顺,过程中无底部负流速或低流速等不良流态现象。

### 3.2.3 纵剖面沿程断面能量变化

不同行洪流量方案下地涵纵剖面沿程断面能量变化如图 11 所示。在地涵水流的流动过程中,当水流从上游明渠进入地涵时,部分势能转化为动能,表现为测压管水头下降,流速水头上升;当水流从地涵出口进入下游明渠时,部分动能重新转化为势能,表现为测压管水头回升,流速水头下降;因此,沿水流方向,测压管水头呈现先减小后增大的变化趋势;而流速水头与之相反,呈现先增大后减小的规律;总水头则呈现沿程逐渐减小的规律。根据总水头的沿程水力坡降分布,地涵水流在上下游连接段、上下游涵首以及涵身处均产生不同程度的水力坡降,其中下

游涵首及连接段水力坡降最大,说明该区域为能量损失的主要区域。对比数值模拟和模型试验中地涵纵剖面总水头不难发现,模型试验的总水头整体上呈现沿程逐渐减小的趋势,但在流态过渡过程中的测点,例如地涵进出口断面 CS3 在不同方案下均出现了总水头大于后续点位的现象;相对而言,数值模拟的总水头沿程逐渐减小,并未出现总水头沿程升高的现象。引起这种现象的原因可能是地涵进口流速分布不均匀,导致整个断面的测压管水头分布不均匀,进而引起地涵进口断面总水头测量误差较大;而数值模拟由于对整个断面进行积分加权计算处理,避免了断面数据选取带来的误差,因此整体的总水头变化更加合理。

### 3.2.4 水头损失

不同行洪流量方案下地涵不同部位的水头损失计算结果如表 5 所示。结果表明:地涵总水头损失以及各部位水头损失总体上随行洪流量的减小而逐渐减小,水头损失系数随流量变化较小。具体来说,在方案 6、11、12 条件下,地涵总水头损失随行洪流量减小,由 0.358 m 逐渐减小至 0.178 m。总水头损失中下游涵首及连接段水头损失占比超过一半,为 56.71%~57.54%;其次是上游涵首及连接段水头损失,占比为 25.84%~28.86%;涵身水头损失占比最小,为 13.97%~16.85%。各部位水头损失系数的变化范围分别为:上游涵首及连接段 0.219~0.284,涵身 0.121~0.149,下游涵首及连接段 0.484~0.559。由此可见,下游涵首及连接段是影响地涵过流能力的主要位置,该结论与前述总水头沿程变化规律相一致。

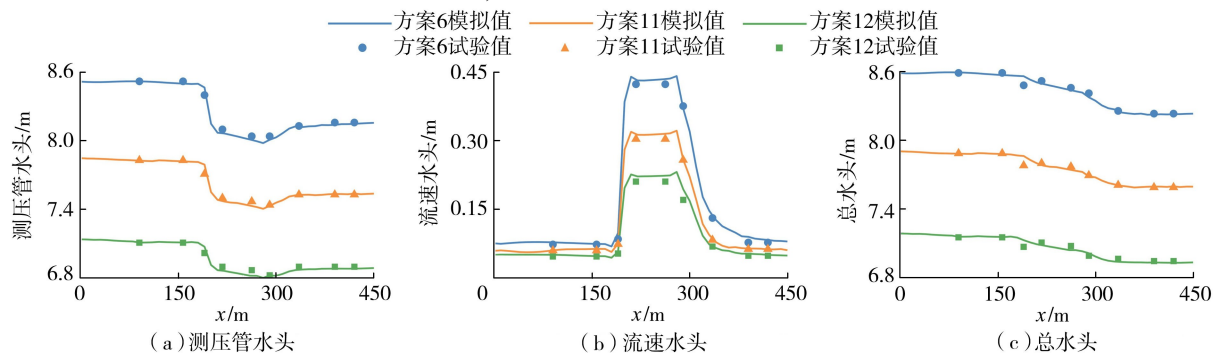


图 11 地涵纵剖面沿程断面能量分布

表 5 不同行洪流量下水头损失计算结果

方案编号	上游涵首及连接段水头损失/m		上游涵首及连接段水头损失系数		涵身水头损失/m		涵身水头损失系数		下游涵首及连接段水头损失/m		下游涵首及连接段水头损失系数		总水头损失/m	
	物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	物理模型	数学模型
6	0.102	0.101	0.247	0.244	0.050	0.051	0.121	0.123	0.206	0.204	0.498	0.492	0.358	0.355
11	0.086	0.084	0.284	0.276	0.043	0.045	0.141	0.149	0.169	0.170	0.556	0.559	0.298	0.299
12	0.046	0.049	0.219	0.234	0.030	0.031	0.142	0.147	0.102	0.108	0.484	0.511	0.178	0.188

### 3.2.5 湍动能

基于数值模拟结果对地涵纵剖面流场数据进行深入对比分析,进一步探究影响地涵水力特性的主要原因和位置。不同方案下地涵纵剖面湍动能分布如图 12 所示。整体上,地涵湍动能主要分布在下游连接段以及下游明渠段。在最优方案条件下,随着行洪流量的减小,其湍动能的主要分布范围以及大小均逐步减小。随着行洪流量由  $7000\text{ m}^3/\text{s}$  减小至  $5000\text{ m}^3/\text{s}$ ,地涵下游连接段最大湍动能由  $0.231\text{ m}^2/\text{s}^2$  逐渐减小至  $0.146\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。造成这种现象的主要原因是流速分布引起的流速梯度差异,根据湍动能生成项的公式,湍动能主要由平均速度梯度产生,结合图 8 的流速分布结果,地涵下游连接段存在较大的流速梯度,地涵出口底部高流速带动顶部水流运动,存在剧烈的水流剪切,并且下游明渠段的流速分布不均匀程度相对更高。因此,湍动能主要集中在分布在地涵下游连接段及下游明渠段位置。同时,随着行洪流量的减小,下游连接段底部水流流速减小,与顶部水体的剪切作用减弱,流速梯度减小,下游流速分布更加均匀,湍动能分布范围以及大小也因此逐渐减小。

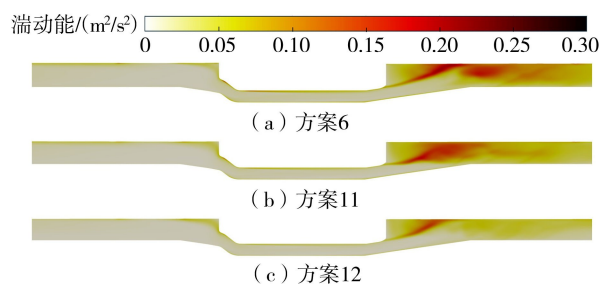


图 12 地涵纵剖面湍动能分布

### 3.2.6 湍动能耗散率

湍动能耗散率代表了单位体积流体中湍动能转化为内能的速率,是衡量湍流运动过程中能量转化的关键指标,对于理解流体运动过程具有重要意义。地涵纵剖面湍动能耗散率分布见图 13。总的来看,地涵的湍动能耗散率主要分布在下游连接段。随着行洪流量的减小,地涵下游连接段的湍动能耗散率范围和大小均逐渐减小。地涵湍动能耗散率主要分布在下游连接段,表明在该位置水流更多的湍动能转化为水体的内能,也因此导致地涵水头损失主要集中在该位置。随着行洪流量由  $7000\text{ m}^3/\text{s}$  减小至  $5000\text{ m}^3/\text{s}$ ,地涵下游连接段湍动能耗散率最大值由  $0.063\text{ m}^2/\text{s}^3$  逐渐减小至  $0.035\text{ m}^2/\text{s}^3$ 。引起这种现象的主要原因是水流之间的剪切作用引起的分子交换能力的变化。与地涵上游相比,地涵下游连接段底部高流速水流与顶部水体的剪切作用更强,导致分子之间的交换作用相对更强,最终导致该位置为

湍动能耗散率主要分布位置。其次,随着行洪流量的减小,纵剖面流速梯度减小,连接段的流体剪切作用逐步减弱,分子之间的交换能力减小,导致湍动能耗散率减小且范围缩小。

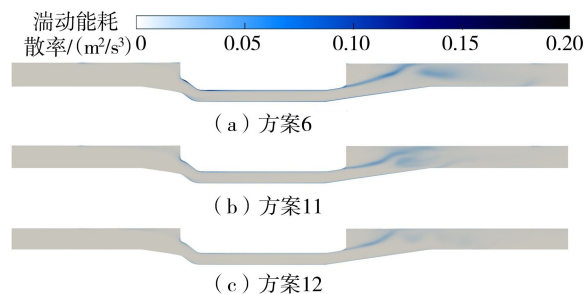


图 13 地涵纵剖面湍动能耗散率分布

## 4 结论

a. 地涵上下游连接段底坡坡比过大或过小均会在地涵运行过程中产生不良流态。尤其在坡比过大情况下,地涵会形成明显负流速区域。底坡坡比为  $1:3$ 、 $1:5$ 、 $1:7$  时水流平顺过渡,无明显不良流态。

b. 地涵总水头损失随上下游连接段底坡坡比的增大呈现先缓慢减小后迅速增大的变化规律。下游涵首及连接段水头损失占比最大为  $55.07\% \sim 72.67\%$ ,并且对于底坡坡比因素更加敏感。当坡比较大时( $n < 1.5$ ),该位置水头损失会明显增大。综合比较,上下游连接段底坡坡比为  $1:7$  时地涵总水头损失最小,流态最为平顺,为最优坡比方案。

c. 在最优坡比方案下,立交地涵在不同流量工况下均表现出良好的过流能力,其流量系数为  $0.868 \sim 0.928$ ,均大于设计流量系数,满足工程设计行洪要求。地涵总水头损失及各部位水头损失整体上随流量减小而逐渐减小。流体的剪切作用是引起地涵下游连接段较高水头损失的主要原因。各流量工况下地涵水流流态平顺,无明显不良流态。

## 参考文献:

[1] 周剑,甘磊,蔡勇,等. 软土地基上立交地涵渗流-应力耦合及敏感性分析[J]. 水电能源科学, 2025, 43(12): 152-156. (Zhou Jian, Gan Lei, Cai Yong, et al. Seepage-stress coupling and sensitivity analysis of soft ground interchange culvert [J]. Water Resources and Power, 2025, 43(12): 152-156. (in Chinese))

[2] 苑希民,兰卓青,王丽娜,等. 极端天气城市特大暴雨洪涝灾害特征再分析及应对策略[J]. 水利学报, 2024, 55(11): 1298-1308. (Yuan Ximin, Lan Zhuoqing, Wang Lina, et al. Reanalysis of the characteristics of extreme rainstorm and flood disaster in urban areas and coping countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(11): 1298-1308. (in Chinese))

- [ 3 ] 谢松,王磊之,覃光华,等. 深隧排涝工程对特大城市防洪排涝情势的影响[J]. 水资源保护,2025,41(3):111-118. (Xie Song,Wang Leizhi,Qin Guanghua,et al. Impact of deep tunnel drainage project on flood control and drainage situation in mega cities [J]. Water Resources Protection,2025,41(3):111-118. (in Chinese))
- [ 4 ] 李强,马福恒,李子阳,等. 极端天气下土石坝风险致因链解析及风险率预测[J/OL]. 水利水电科技进展,(2025-12-15). <https://link.cnki.net/urlid/32.1439.TV.20251213.1832.002>. (Li Qiang, Ma Fuheng, Li Ziyang, et al. Analysis of risk causation chain and prediction of risk rate for earth-rock dams under Extreme Weather Conditions [J/OL]. Advances in Science and Technology of Water Resources, (2025-12-15). <https://link.cnki.net/urlid/32.1439.TV.20251213.1832.002>.)
- [ 5 ] 张金良. 关于完善黄河流域防洪工程体系相关举措的思考[J]. 人民黄河,2022,44(1):5-9. (Zhang Jinliang. Thoughts on measures for improving the Flood Control Engineering System of the Yellow River Basin[J]. Yellow River,2022,44(1):5-9. (in Chinese))
- [ 6 ] 李曦亨,王磊之,商守卫,等. 流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):12-18. (Li Xiting, Wang Leizhi,Shang Shouwei,et al. Research on mute feed effect of flood and waterlogging under change of working condition and dispatching of flood control project in basin, sub-basin and urban [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):12-18. (in Chinese))
- [ 7 ] Zayed M. Blockage slope and ratio effects on box culvert hydraulics[J]. Discover Water,2023,3(1):23.
- [ 8 ] 王亦勤. 通榆河废黄河立交地涵工程防淤设计[J]. 水利水电科技进展,2003,23(2):44-45. (Wang Yiqin. Sediment control design for grade separation culverts at Tongyuhe River and abandoned Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003,23(2):44-45. (in Chinese))
- [ 9 ] Aghniaey N, Rodgers N. Sustainability in design, construction and rehabilitation of culverts [C]// Proceedings of the CSECE 2014 General Conference. Halifax, NS, Canada; Canadian Society for Civil Engineering (CSECE),2014.
- [ 10 ] 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):33-38. (Xu Jinhuan. Study on characteristics of water and sediment transportation in crossing underground culverts [J]. Journal of Sediment Research,1999(1):33-38. (in Chinese))
- [ 11 ] 徐金环. 废黄河立交地下涵洞输送水沙特性研究[J]. 水利水电科技进展,1997(4):38-41. (Xu Jinhuan. Study on characteristics of water and sediment transport in underground culvert of Feihuanghe Interchange [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1997(4):38-41. (in Chinese))
- [ 12 ] 周名德,周益人. 通榆河立交地涵泄流试验研究[J]. 江苏水利,1999(1):28-31. (Zhou Mingde, Zhou Yiren. Experimental study on discharge capacity of Tongyuhe Interchange underground culvert [J]. Jiangsu Water Resources,1999(1):28-31. (in Chinese))
- [ 13 ] 周名德. 立交地涵泥沙问题实例研究[J]. 水利水电科技进展,1996(3):210-219. (Zhou Mingde. An example for study on sedimentation of grade separation underground culvert [J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(3):210-219. (in Chinese))
- [ 14 ] 吴时强,吴修锋,周辉. 淮河入海水道淮安地涵枢纽河道水流数值计算[J]. 河海大学学报(自然科学版),2001,29(3):27-32. (Wu Shiqiang, Wu Xiufeng, Zhou Hui. Numerical simulation of transient channel flow for Huai'an Culvert Project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2001,29(3):27-32. (in Chinese))
- [ 15 ] 傅朝康. 废黄河地涵工程对上下游河床演变的影响研究[D]. 扬州:扬州大学,2019.
- [ 16 ] 朱明成,甘申东,李寿千. 流域骨干水网立交地涵淤积规律与减淤措施研究[C]//中国水利学会. 2023 中国水利学术大会论文集(第三分册). 郑州:中国水利学会,2023:178-182.
- [ 17 ] Nassralla T H. Effect of inlet and outlet geometric shape variations of a pipe culvert on local head losses [J]. Journal of Engineering Sciences, Assiut University Faculty of Engineering,2015,43(6):807-822.
- [ 18 ] Jaeger R. Hydraulic improvements in culverts for climate change adaptation [D]. Queensland: University of the Sunshine Coast,2020.
- [ 19 ] Jaeger R, Tondera K, Pather S, et al. Flow control in culverts: a performance comparison between inlet and outlet control [J]. Water,2019,11(7):1408.
- [ 20 ] Sellevold J, Bruland O, Pummer E. Hydraulic efficiency and optimization of pipe culvert inlet edges [J]. VANN, 2023(4):235-250.
- [ 21 ] McKay G R. Design of minimum energy culverts [R]. Brisbane: Department of Civil Engineering, University of Queensland,1971.
- [ 22 ] Chanson H. Hydraulic performances of minimum energy loss culverts in Australia [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2007,21(4):264-272.
- [ 23 ] 葛均建,马山玉,李政鹏,等. 大型输水渠道倒虹吸流态优化试验研究[J]. 中国农村水利水电,2025(9):77-84. (Ge Junjian, Ma Shanyu, Li Zhengpeng, et al. Study on flow optimization in large transmission channel with siphon [J]. China Rural Water and Hydropower, 2025(9):77-84. (in Chinese))
- [ 24 ] 曾诚,尹雨然,陈辰,等. 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2023,43(2):9-15. (Zeng Cheng, Yin Yuran, Chen Chen, et al. Numerical

- simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(2): 9-15. (in Chinese))
- [25] 王浩博,周大庆,郭俊勋. 基于 PIMPLE 算法的低负荷水泵水轮机内部流态研究[J]. *人民长江*, 2023, 54(11): 152-157. (Wang Haobo, Zhou Daqing, Guo Junxun. Research on internal flow pattern of low-load pump-turbine based on PIMPLE algorithm[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(11): 152-157. (in Chinese))
- [26] 张小康,杨建东. 水头损失的 CFD 计算[J]. *中国农村水利水电*, 2009(5): 105-107. (Zhang Xiaokang, Yang Jiandong. Computation of head losses by CFD[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(5): 105-107. (in Chinese))
- [27] 刘荆辉,胡明. 动能修正系数对城门洞形尾水隧洞水头损失及其系数的影响[J]. *水电能源科学*, 2016, 34(6): 146-149. (Liu Jinghui, Hu Ming. Impact of kinetic energy correction factor on head loss and head loss coefficient of city gate-shaped tailrace tunnel[J]. *Water Resources and Power*, 2016, 34(6): 146-149. (in Chinese))
- (收稿日期:2026-01-14 编辑:俞云利)
- 
- (上接第 30 页)
- [64] Ali M I, Hashim M, Zin H S M. Assessing water availability over peninsular Malaysia using public domain satellite data products[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, 18: 012187.
- [65] 李学辉,谷桂华,余守龙,等. 基于水量平衡和误差控制的出入境水量研究[J]. *人民长江*, 2020, 51(2): 97-100. (Li Xuehui, Gu Guihua, Yu Shoulong, et al. Study on inflow and outflow volumes of an area based on water balance and error control criteria[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(2): 97-100. (in Chinese))
- [66] 刘伟苹. 长江大通至河口段沿江引水变化特征及其对河口的影响分析[D]. 上海:华东师范大学, 2016.
- [67] 顾圣华. 长江口环境用水量计算方法探讨[J]. *水文*, 2004, 24(6): 35-37. (Gu Shenghua. Study on the computational method for environmental water use in the Yangtze River Estuary[J]. *Hydrology*, 2004, 24(6): 35-37. (in Chinese))
- [68] 严鑫,孙昭华,谢翠松,等. 基于经验模型的长江口南支上段压咸临界流量[J]. *地理学报*, 2019, 74(5): 935-947. (Yan Xin, Sun Zhaohua, Xie Cuisong, et al. Estimation of critical discharge for saltwater intrusion in the upper south branch of the Yangtze River Estuary using empirical models[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(5): 935-947. (in Chinese))
- [69] 陈庆江,徐建益,朱建荣,等. 长江口水源地咸潮控制临界流量确定及保障措施[J]. *人民长江*, 2011, 42(18): 68-72. (Chen Qingjiang, Xu Jianyi, Zhu Jianrong, et al. Determination of critical flow for saline water intrusion into water source area of Yangtze River estuary and guarantee measures[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(18): 68-72. (in Chinese))
- [70] 高华斌,唐兵. 应对长江口咸潮入侵的临界流量经验模型研究[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(4): 25-29. (Gao Huabin, Tang Bing. Empirical model of critical flow rate in response to salt water intrusion in the Yangtze River Estuary[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(4): 25-29. (in Chinese))
- [71] 王高旭,李褪来,陈敏建. 长江口生态流量研究[J]. *水利水运工程学报*, 2010(3): 53-58. (Wang Gaoxu, Li Tilai, Chen Minjian. Analysis and calculation of ecological flow in Yangtze River Estuary[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(3): 53-58. (in Chinese))
- [72] 阮仁良,韩昌来. 长江流域发展对长江口水域功能开发的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2003, 12(5): 427-432. (Ruan Renliang, Han Changlai. Effect of development in the Yangtze Basin on the exploitation of the water function in the mouth of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, 12(5): 427-432. (in Chinese))
- [73] 刘水芹,田华,易文林. 太浦闸调度对黄浦江水源地水质影响数值模拟[J]. *人民长江*, 2012, 43(12): 33-36. (Liu Shuiqin, Tian Hua, Yi Wenlin. Digital simulation for influence of Taipu Sluice operation on water quality of water source of Huangpu River[J]. *Yangtze River*, 2012, 43(12): 33-36. (in Chinese))
- [74] 彭焱梅,曹菊萍,周宏伟,等. 不同典型年太浦闸控制运用对流域区域及黄浦江上游水源地影响研究[J]. *水利发展研究*, 2020, 20(7): 43-48. (Peng Yanmei, Cao Juping, Zhou Hongwei, et al. Study on the impact of Taipu Sluice control and operation in different typical years on the basin area and the upstream water source of the Huangpu River[J]. *Water Resources Development Research*, 2020, 20(7): 43-48. (in Chinese))
- [75] 毛兴华,李琪,陈澄. 感潮河流生态流量保障目标研究[J]. *水利发展研究*, 2025, 25(9): 90-94. (Mao Xinghua, Li Qi, Chen Cheng. Research on ecological flow guarantee targets tive of tidal rivers[J]. *Water Resources Development Research*, 2025, 25(9): 90-94. (in Chinese))
- (收稿日期:2025-03-20 编辑:俞云利)