

文章编号: 1008-2786-(2020)2-241-11

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000506

山地河流穿越管道冲坑扩展规律的试验研究

杨 乾, 杨庆华*, 姚锦涛, 张宇倩, 王子聪

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘 要: 合理预测山地河流穿越管道的未来埋深和悬空长度对其安全运营至关重要。本文以北干线输气管道穿越工程为研究对象开展了水槽模型试验, 观测分析河流穿越管道附近河床演变趋势, 研究流量、水深和管径等因素对冲坑扩展规律的影响。结果表明: 河床演变主要由推移质泥沙输移引起, 而随着管径的增大, 在管底形成冲坑点的次数逐渐减少; 管底形成冲刷之时冲坑竖向扩展速率很大, 随着管涌的发生, 冲刷速率逐渐减小, 冲刷深度逐渐增大; 管底冲坑竖向扩展过程满足一级动力学反应方程, 归一化处理后得到了冲刷深度与冲刷时间之间关系式; 水动力条件、管径和沙粒特性共同影响管底极限冲刷深度, 采用 Gauss-Seidel 迭代法得到无量纲冲刷深度与相对泥沙粒径和弗劳德数 Fr 参数的关系式; 当 $Fr > 0.6$ 时, 冲坑横向扩展仅为初级扩展一个阶段, 当 $Fr < 0.6$ 时, 冲坑横向扩展过程包含初级扩展和次级扩展两阶段; 最后, 结合试验数据和冲坑竖向扩展经验模型, 推导出冲坑横向扩展速率计算公式, 且模型预测结果较好。研究结果可为探究山地河流穿越管道冲坑扩展规律及管道后期安全运营维护提供重要参考价值。

关键词: 水下穿越管道; 冲坑; 扩展速率; 冲刷深度; 水槽试验

中图分类号: TV147+.5

文献标志码: A

石油天然气管道作为能源物资输送的大动脉, 在我国国防和国民经济建设中起到重要作用^[1]。作为细长型结构, 管道需要穿越大量江河湖泊等水域, 由于河床下切冲刷和水流冲击等作用, 容易导致穿越管道出现裸露或悬空, 从而产生安全隐患。尤其是山地河流, 具有坡降大、水流湍急、下切侵蚀力强等特点, 更容易使穿越管道发生露管和局部悬空, 严重威胁管道的安全运行。此外, 由于山地河流穿越管道地处山区, 从发现隐患到治理完成需要较长时间, 并且山地河流强烈的冲刷能力加速了穿越管道冲坑的扩展过程, 因此, 研究山地河流穿越管道冲坑的扩展规律对其安全运营极其重要。

目前, 国内外学者关于水下穿越管道冲刷问题

的研究主要集中在竖向二维冲刷方面^[2-9]。其中, 水流流速^[10]和冲刷角度^[11]对管道局部冲刷影响的研究较为深入。此外, 在管道冲刷深度估算方面, 采用人工神经网络方法预测冲刷深度具有一定的优越性^[12-13]。对于海底少见的子母管, 同样引起了一些学者的关注^[14-15]。这些研究的对象主要针对的是海底穿越管道, 其冲刷过程属于典型的三维冲刷, 发展阶段和冲刷特性的研究较为完善^[16]。海底穿越管道与河流穿越管道虽有相似之处, 但河流穿越管道处于全埋状态, 而海底穿越管道一般处于不埋或半埋状态, 其两者的泥沙初始条件不同。而目前对于河流穿越管道的研究主要是针对悬空段长度的动态演变过程及管道临界悬空长度^[17-19], 还有学者对

收稿日期 (Received date): 2019-12-30; **改回日期** (Accepted date): 2020-03-04

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (51478403)。[National Natural Science Foundation of China (51478403)]

作者简介 (Biography): 杨乾 (1990-), 男, 甘肃天水人, 博士研究生, 从事水动力学与泥沙研究。[YANG Qian (1990-), male, born in Tianshui, Gansu province, Ph. D. candidate, research on hydrodynamics and sediment] E-mail: yangqian-swjtu@foxmail.com

* **通讯作者** (Corresponding author): 杨庆华 (1976-), 男, 博士, 副教授, 从事流体力学研究。[YANG Qinghua (1976-), male, Ph. D., associate professor, research on fluid mechanics] E-mail: qhyang@home.swjtu.edu.cn

水下穿越管道冲刷深度的计算方法进行了研究^[20-22]。

由于河流穿越管道的泥沙初始条件不同于海底穿越管道,导致两者的冲刷特性相异。此外,山地河流穿越管道的冲坑扩展过程包含竖向(深度方向)扩展和横向(管轴方向)扩展两方面,属于三维冲刷过程,而目前对于该方面的研究甚少。为此,本研究借助水槽试验系统,观测山地河流穿越管道发生局部冲刷的演变过程,研究穿越管道冲坑三维冲刷的扩展规律,并建立穿越管道冲坑横向和竖向扩展预测模型,为山地河流穿越管道未来埋深和悬空长度预测及后期安全运营提供重要技术支持。

1 管道穿越河段特性

四川境内的北干线输气管道横穿一山地河流,穿越处河床宽度约 80 m,输气管道直径 0.8 m,穿越管道埋于卵石层,平均埋深 2 m,卵石中值粒径 $d_{50} = 44.25 \text{ mm}$,卵石重度 $\gamma_s = 20.5 \text{ kN/m}^3$ 。该穿越管道工程等级为中型,设计洪水频率 $P = 2\%$,设计洪峰流量 $1014 \text{ m}^3/\text{s}$,水面宽度 105 m,平均流速 2.5 m/s ,平均水深 3.5 m,平均比降 8.9‰ 。

2 试验模型设计

2.1 试验装置

根据山地河流穿越管道局部冲刷特性和实验场地条件,采用正态概化模型,选取长度比尺 $\lambda_L = \lambda_h = 80$,以单宽流量作为试验的控制条件,并使比尺换算后的各个参数控制在合理的试验范围之内。本试验在单向循环水槽系统内开展,试验系统如图 1 所示,其中水槽长宽高为 $10 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$,为便于观测管道局部冲刷特性,水槽侧壁采用透明钢化玻璃。水槽下游设置沉砂池和清水池,系统由水泵提供循环水流,流量大小由阀门控制。为了提供稳定的试验流量,在水槽上游设置稳流板和梯形堰,梯形堰为希普列蒂堰。试验段全长 1.5 m,布置在距离稳流板下游 2 m 处。为减小水槽尾水段对河床冲淤的影响,试验段上下游各铺设 0.3 m 长护坡段,坡度为 $1:4 \sim 1:3$,护坡段采用粒径介于 $1 \sim 1.5 \text{ cm}$ 的粗砾石,中间为模型沙和模拟管道。试验水深由尾门开关控制调节。



图 1 水槽试验系统图

Fig. 1 View of flume test system

表 1 模型沙颗粒级配^[23]

Tab.1 Particle size distribution of model sand

筛孔孔径/mm	通过质量百分率/%
0.75	100.00
0.50	78.35
0.25	45.40
0.125	34.10
0.0625	27.25
0.025	18.45
0.01	13.85
0.00625	3.85

2.2 模型沙和模拟管道

《水电水利工程常规水工模型试验规程》规定^[24],当模拟砂砾石河床覆盖层时,宜选择碎石散粒体作为模型冲刷材料,且可按照长度比尺换算粒径,因此,试验选择石英砂作为模型沙,长度比尺取 $1:80$,根据河床卵石层颗粒级配分析得到模型沙颗粒级配,如表 1 所示。试验前进行级配分析,得到模型沙的中值粒径 $d_{50} = 0.55 \text{ mm}$ 。采用泥沙起动流速计算公式^[25]得到模型沙的临界起动流速 $V_c = 0.2 \text{ m/s}$ 。模拟管道采用有机玻璃管,其管径 D 分别为 10、15 和 20 mm。模拟管道垂直于水流方向布置于试验段中部,两端与水槽边壁固定,管道埋深 2.5 cm 。

2.3 试验工况和流程

研究表明,影响水下穿越管道附近河床演变特性的因素较多,主要包括河床沙粒特性、管径和水流条件等,并且这些因素之间的相互关系复杂,由于山地河流具有洪峰高、形成时间短、冲刷破坏力强的特点,导致河流水力特性较为复杂。因此,本文主要针对山地河流水力特性对穿越管道河床冲刷问题的影响开展研究。试验共设计 9 种工况,其中流量为

4.05、5.40 和 6.75 L/s, 分别为设计洪峰流量的 0.75、1 和 1.25 倍, 试验流速根据河床泥沙启动流速的 1.25、1.5 和 2 倍设计, 即 0.25、0.30 和 0.40 m/s, 试验工况及每组对应的水力参数如表 2 所示。

表 2 试验因素水平表^[23]

Tab. 2 Factors of the orthogonal test

工况	设计流量 ($L \cdot s^{-1}$)	试验流速 $v_1/(m \cdot s^{-1})$	下游水深 h_2/cm	弗劳德数 Fr	希尔兹参数 θ ^[26]
A	4.05	0.25	4.1	0.394	0.027
B	4.05	0.30	3.4	0.520	0.033
C	4.05	0.40	2.5	0.808	0.044
D	5.40	0.25	5.4	0.344	0.027
E	5.40	0.30	4.5	0.452	0.033
F	5.40	0.40	3.4	0.693	0.044
G	6.75	0.25	6.8	0.306	0.027
H	6.75	0.30	5.6	0.405	0.033
I	6.75	0.40	4.2	0.623	0.044

注: 表中 $Fr = v/(gh)^{1/2}$, $\theta = \tau/[\rho g(\rho_s/\rho - 1)d_{50}]$ 。式中, v 为试验流速 (m/s); h 为下游水深 (m); g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; τ 为床面切应力 (Pa); ρ 为水的密度, 取 $1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; ρ_s/ρ 为泥沙相对密度, 取 2.7; d_{50} 为中值粒径, 为 $0.55 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

为保证水力条件的准确性, 在每次试验工况前, 采用高精流速仪对水槽断面和模拟河流断面的流速进行测试, 图 2 为组别 I ($v_1 = 0.4 \text{ m/s}$ 、 $h_2 = 4.2 \text{ cm}$) 条件下各测点断面 (I~VI) 的流速分布图, 可以看出, 水槽断面和河床初始冲刷断面的流速分布比较均匀, 满足试验水力条件。

根据试验段布置方案, 在水槽下游端铺设 8 cm 厚模型沙, 将水槽尾端尾门关闭, 向水槽头部注水, 待下游水深达到 15 cm 后, 试验系统静置 24 小时,

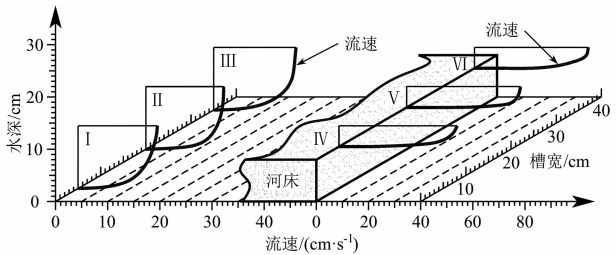


图 2 断面流速分布图

Fig. 2 Distribution of horizontal velocity component across flume

使模型沙达到充分饱和。试验开始, 启动水泵, 调节阀门, 待试验系统的循环流量达到设计工况流量后, 通过调节尾门使下游水深 h_2 到达设计水位。采用高清数码相机全程记录试验过程, 探针逐点测量冲刷河床面的高程和坐标, 当河床测量数据连续 3 次不发生变化时, 认为冲刷过程达到平衡, 数据采集完成。

3 试验结果分析

3.1 试验现象分析

3.1.1 泥沙运动

通过试验观察发现, 当试验流速小于沙粒临界起动流速时, 床面部分泥沙已开始起动; 而当试验流速大于沙粒临界起动流速时, 床面上仍有部分泥沙未起动。本试验模型沙临界起动流速 $V_c = 0.2 \text{ m/s}$, 试验选择 3 种不同流速, 分别为 V_c 的 1.25、1.5 和 2 倍, 即 0.25、0.30 和 0.40 m/s, 根据学者对泥沙起动状态的定义^[27], 三种试验流速条件下河床表面的泥沙运动主要表现出少量运动、中等运动和普遍运动 3 种状态。由于模型沙选用石英砂, 其中细颗粒含量较少, 所以试验河床的悬移质比例较低, 推移质比例较高。因此, 河床的演变过程主要以推移质泥沙运动为主, 如图 3 所示。

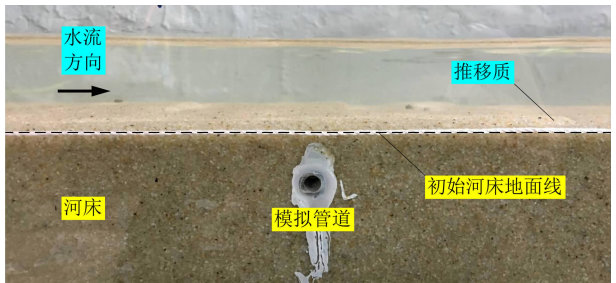


图 3 推移质泥沙运动过程

Fig. 3 Moving process of bed load

3.1.2 波流运动

在水流作用下河床表面的泥沙向水槽下游运动, 沙粒在河床上重新分布, 随着泥沙运动的持续, 河床表面出现波浪起伏的形态, 并随水流缓慢移动, 形成沙波。由于波浪起伏的床面, 导致水流出现变化, 从刚开始的稳定水流逐渐变为微波流, 再转变为强波流, 波流运动变化趋势如图 4 所示, 并且水流变化与沙波变化同时发生, 两者之间相互影响。

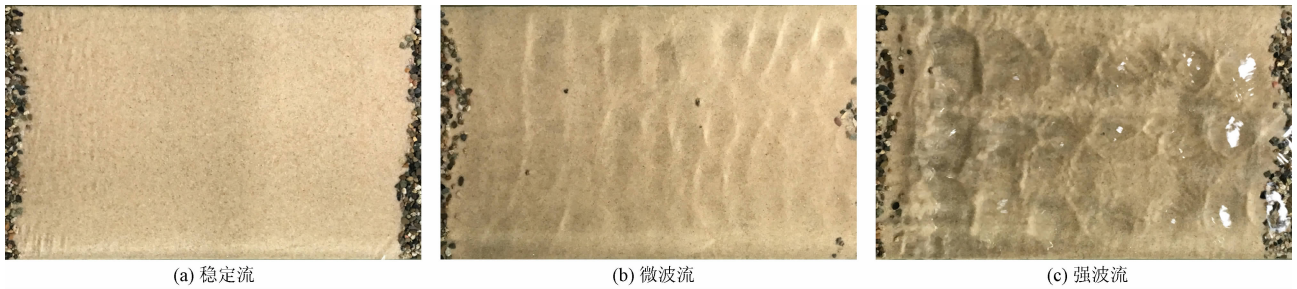


图 4 波流运动变化趋势

Fig. 4 Trend of wave and flow

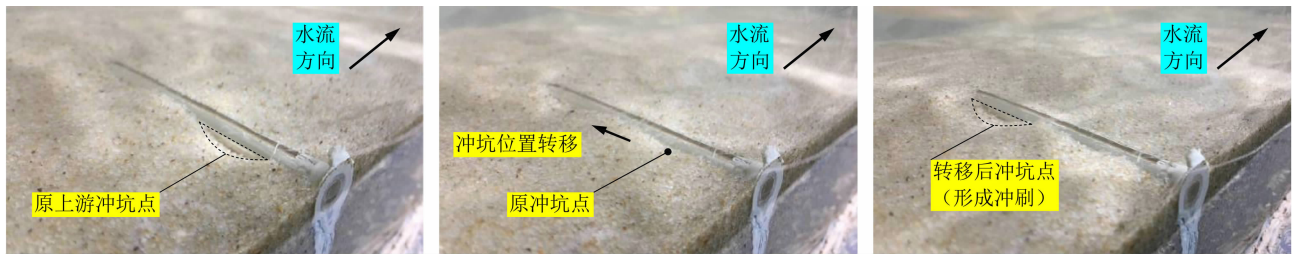


图 5 冲坑位置转移过程示意图

Fig. 5 Transfer process of scour hole

3.1.3 冲坑扩展

试验观察发现,山地河流穿越管道附近河床的冲刷与海底管道冲刷演变过程较为相似,但由于河床沙粒的启动存在随机性,一方面和水动力条件有关,另一方面还跟沙粒特性有关。因此,可以先根据试验观测结果定性分析穿越管道竖向冲刷过程,主要包括河床下切、管道暴露、微孔形成、冲坑扩展、管道悬空和冲刷平衡 6 个阶段,文献[28]已对各阶段的几何形态及冲刷特征进行了详细描述,此处不再赘述。

此外,试验中还发现,管道上游冲坑形成早于管道下游冲坑,下游冲坑未形成时,上游来沙无法从管道底部通过,若来沙条件或水力条件发生改变,上游冲坑可能会被来沙所覆盖,原冲坑被填平,无法在此继续扩展,冲坑点位置将会在其它地方产生并形成局部冲刷,变化过程如图 5 所示。当同一管道上出现多个冲坑时,冲坑沿管轴方向自由扩展,最终形成贯通冲坑,使管道完全悬空。

试验记录了所有工况下冲坑出现的位置及冲坑发育出现顺序,如图 6 所示,可以看出冲坑出现在沿管轴方向的任意位置,具有很强的随机性,而在实际工程中,冲坑位置往往出现在河流中心流速较大的地方,这是由于试验模拟中管道均匀布置在河床中,且河床无起伏,图 2 也可以看出同一断面的流速大

小相同,因此在管道任意位置都有可能出现局部冲刷。统计出不同管径的冲坑出现次数, DN10 管道出现冲坑 27 次, DN15 管道出现冲坑 14 次, DN20 管道出现冲坑 9 次,可以看出随着管径增大,冲坑出现次数减小。根据管周河床冲刷机理,当沙—管接触面减小至某一值时,作用在沙粒上的渗透力大于浮重力,导致管底出现管涌,局部冲刷形成^[23]。当管径越大时,沙—管接触面也越大,因此在大管径管道下方形成管涌的条件是管道上游和下游均出现较大的冲坑,而在同一试验工况下,这些冲坑不易被上游来沙所覆盖,冲坑难以转移,从原冲坑点继续发展直至形成冲刷。因此,随着管径越大,上游冲坑出现次数随之减小,冲坑位置不易水平转移。

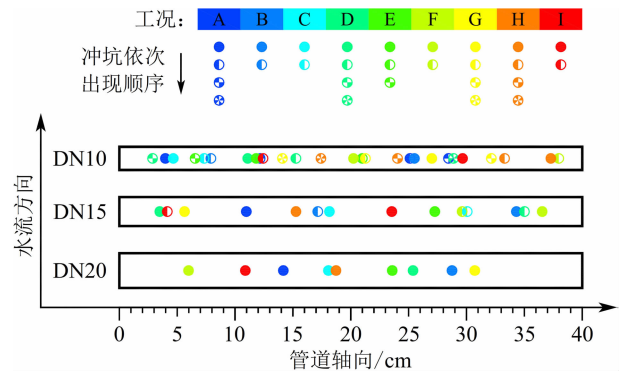


图 6 冲坑出现位置分布图

Fig. 6 Sketch of test section

3.2 冲坑竖向扩展规律研究

3.2.1 冲坑竖向扩展速率

当穿越管道底部出现冲坑后,将沿着竖向方向不断扩展,冲刷深度随冲刷时间逐渐增大,根据试验数据绘制出冲刷深度随时间的变化规律,如图7所示。从图中可以看出,对于 $D = 10\text{ mm}$ 管道,在工况A、B、C条件下,管底冲刷以一个极快的速率进行竖向扩展,然后逐步降低并趋于稳定。管底极限冲刷深度随着弗劳德数 Fr 增大而增大,且冲刷平衡历时随着流速的增大而缩短。

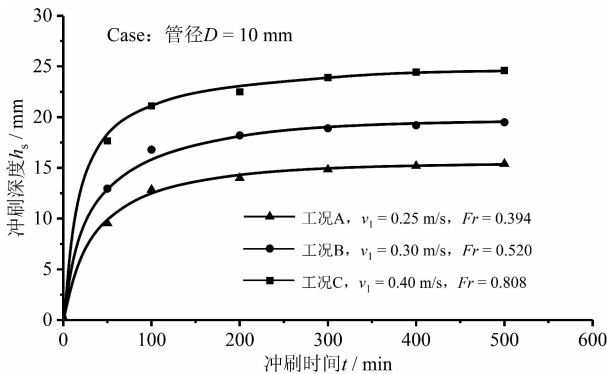


图7 冲刷深度扩展过程曲线图

Fig.7 Scouring process curve of scour depth

竖向扩展速率是反映管底冲坑深度沿竖向发展快慢的物理量,可根据平均时间段内冲刷深度增值与冲刷时间的比值计算得到。图8为工况A、B、C条件下 $D = 10\text{ mm}$ 管道的平均冲刷速率随时间的变化曲线。管底形成冲刷之时,由于冲坑扩展速率非常快,以致于无法采用实验手段测量,这是由于管底发生管涌效应^[23],使冲刷扩展瞬间完成。图8可以看出,冲刷速率在初始的几十分钟内非常大,然后快

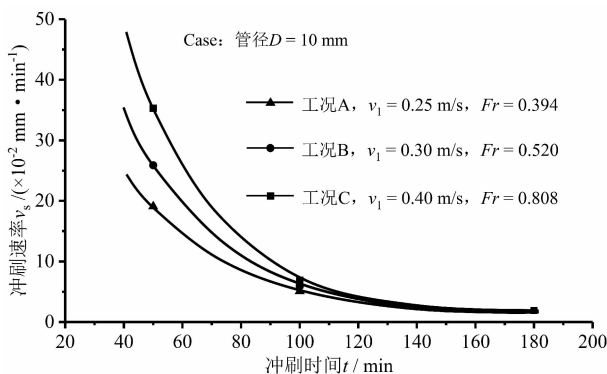


图8 竖向扩展速率时程曲线图

Fig.8 Time history curve of vertical scour velocity

速减小,100 min时冲刷速率变化甚微,160 min后已接近于0,冲刷逐渐达到平衡。比较三种工况可以看出,冲坑竖向冲刷速率随着弗劳德数的增大而增大,水流越快,管底冲刷速率也越大。

3.2.2 冲刷历时和极限平衡冲刷深度

当管道下方冲坑的床面临界剪切应力等于水流作用于管底泥沙的实际剪切应力时,冲坑不再沿竖直方向扩展,而是沿管轴方向或水平方向进行扩展,此时管底的冲刷已达到极限平衡状态。关于极限平衡冲刷深度的表述分为绝对冲刷深度和相对冲刷深度两种,前者为最大冲刷深度值,后者则是冲刷深度与管径的比值。本文提到的极限冲刷深度为绝对极限平衡冲刷深度,即管底距冲坑床面的最大距离,用 h_m 表示。文献[23]中已对穿越管道的冲刷历时和极限平衡冲刷深度进行了详细分析,此处不再赘述,下文将直接利用冲刷历时和极限平衡冲刷深度的试验数据。

3.2.3 冲坑竖向扩展经验模型

试验过程中观测发现,管底冲坑形成之时,管涌效应瞬间完成,扩展速率非常快,无法实时测出冲坑扩展之初的速率,随着管底冲坑扩展,管底冲刷深度增大,但是冲刷速率逐渐减小,剩余冲刷深度也减小,此过程类似于放射性物质衰减、污染物降解、药物吸收排出等现象,可采用一级动力学反应方程进行模拟,即管底冲刷速率与系统中剩余冲刷深度的一次方成正比,则有:

$$\frac{h_s - h_0}{h_m} = 1 - e^{-kt} \quad (1)$$

式中, t 为冲刷时间(min); h_s 为 t 时刻管底冲刷深度值(mm); h_0 为初始时刻管底冲刷深度值,取0; h_m 为极限冲刷深度值(mm);比例系数 k 是冲刷速率常数, $k > 0$,指数上负号表示剩余冲刷深度值在减小, e 为自然对数底。

对公式(1)进行无量纲化,得到:

$$\frac{h_s}{h_m} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \quad (2)$$

式中, T 为达到冲刷平衡历时(min)。

选取 $D = 10\text{ mm}$ 管道为研究对象,通过图7和文献[23]中A、B、C三种工况下冲刷深度扩展过程及冲刷平衡状态,绘制出不同工况下相对冲刷时间和相对冲刷深度特征离散点,采用最小二乘法拟合曲线,得到三种工况下冲刷时间与冲刷深度之间数

学关系,如图9所示,可以看出三条曲线趋势相似,拟合度 $R^2 > 9.5$ 。

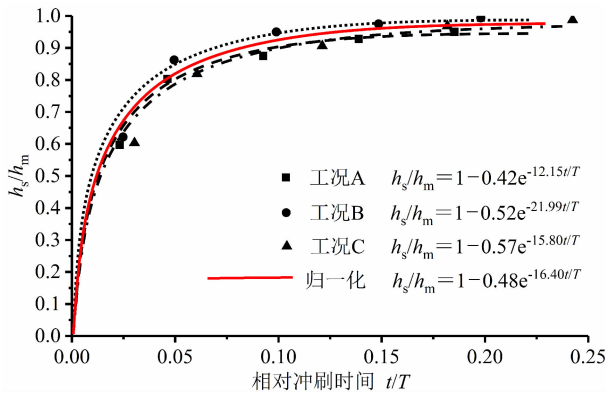


图9 无量纲化后冲刷过程变化曲线

Fig. 9 Scouring process curve based on dimensionless data

在水下穿越管道冲坑扩展过程的模拟中,需要确定唯一数学关系进行冲坑扩展规律模拟,这就需要将多条拟合曲线进行归一化处理,对多个离散点仍采用最小二乘法进行拟合,得到归一化后的模拟曲线:

$$\frac{h_s}{h_m} = 1 - 0.48e^{-16.4\frac{t}{T}} \quad (3)$$

可以看出,当冲刷形成之时,管底冲刷深度为0,随着管涌瞬时发生,冲刷深度迅速增大,当相对冲刷时间为0.1时,冲刷速率减小,随后便是一个较为缓慢的冲刷过程,当达到极限平衡状态时,随着时间的推移,管底冲刷深度不再发生变化。

3.2.4 冲刷深度经验公式拟合与验证

水下穿越管道附近河床冲刷是流体、管道和河床三者相互作用的结果。因此,穿越管道局部冲刷直接受水动力条件、管道参数和沙粒特性的影响。其中,水动力因素有:水深 h 、水流流速 v 、重力加速度 g ;管道参数有:管径 D 、埋深 d 、水流作用角 α ;河床沙粒特性参数有:中值粒径 d_{50} 、泥沙重度 γ_s 等。用 h_m 表示极限平衡冲刷深度,可由如下函数式表示:

$$h_m = f(v, h, g, D, d, \alpha, d_{50}, \gamma_s) \quad (4)$$

本次试验水流作用角 $\alpha = 90^\circ$,暂不考虑作用角对冲刷深度的影响,其次,一般条件下河床泥沙重度 γ_s 为常数,不作为变量考虑。因此,式(4)可简化为:

$$h_m = f(v, h, g, D, d, d_{50}) \quad (5)$$

公式两边均采用无量纲表示:

$$\frac{h_m}{D} = \psi\left(\frac{d_{50}}{D}, Fr\right) \quad (6)$$

其中, Fr 为弗劳德数。

基于 BIJKE、IBRAHIM 和 MONCADA-M 等学者的研究成果^[29-31],并结合本文冲刷试验结果,采用 Gauss - Seidel 迭代法,对无量纲冲刷深度 h_m/D 与相对泥沙粒径 d_{50}/D 和 Fr 的关系进行拟合,得到如下公式:

$$\frac{h_m}{D} = 1.5\left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{-0.24} (Fr)^{0.74} \quad (7)$$

公式(7)适用于 $Fr < 1$ 的砂质河床的穿越管道冲刷平衡深度预测。为验证经验公式(7)的准确性和适应性,图10列出了冲刷深度实测值与公式计算值对比,可以看出,两者结果基本一致,说明经验公式(7)对预测穿越管道冲坑竖向冲刷深度具有较高的准确性和较强的适应性。

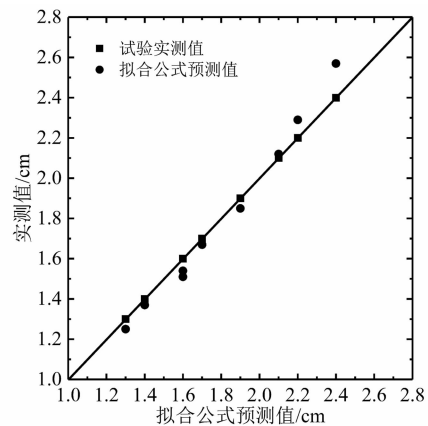


图10 水流作用下冲刷深度实测值与公式计算值验证

Fig. 10 The comparison of the measured value and the predicted value of scour depth

3.3 冲坑横向扩展规律研究

3.3.1 冲坑横向扩展速率

当管底冲刷形成以后,冲坑不仅竖向扩展,还沿着管轴方向向两端扩展,导致管道悬空长度不断增大,由于管轴方向与水流方向垂直,因此冲坑向管道两端扩展的速率相同。试验记录了冲坑形成后管道暴露长度随时间变化的过程,如图11所示,其中扩展长度 L 为管道单侧暴露长度,斜率则为冲坑沿管轴方向扩展的速率大小。图11列出 $D = 20$ mm 条件下4种典型工况的冲坑横向扩展过程,可以看出工况F和工况I的冲坑以某一固定速率沿管轴方向向两端匀速扩展,而工况G和工况H的冲坑以两个不同

阶段速率向管道两端匀速扩展,当 $t < t_0$ (t_0 为扩展速度临界时刻,见图 11)时,冲坑以一个较大速率匀速扩展,称为初级扩展速率,当 $t > t_0$ 时,冲坑以一个较小速率匀速扩展,称为次级扩展速率,表 3 列出所有工况下不同管径的初级扩展速率和次级扩展速率。

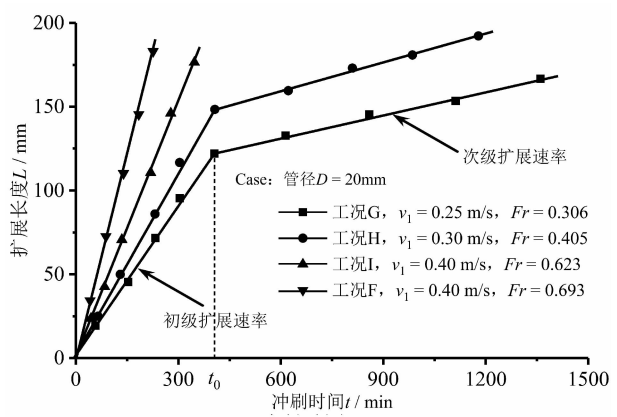


图 11 冲坑横向扩展初级速率和次级速率
Fig. 11 Primary and secondary propagation velocity of scour hole

从表 3 中可以发现,对于类似于工况 I 和工况 F 的情况,当 $Fr > 0.6$ 时,管底冲坑扩展过程仅为一个阶段,而对类似于工况 G 和工况 H 的情况, $Fr < 0.6$ 时,此时管底冲坑的扩展过程包含初级扩展和次级扩展两阶段。这是由于在冲坑形成之初,管底空隙很小,管道悬空段长度很短,此时管道上下游之间存在较大的压力梯度,使得水流从管底空隙快速通过,

从而引起冲坑沿管轴方向向两端快速扩展。对于弗劳德数较大的工况,水流紊动效应较为强烈,使得冲坑以一个较大速率进行横向扩展,而对于弗劳德数较小的工况,随着管底冲坑的继续扩展,管道悬空段长度逐渐增大,水流紊动效应逐渐减弱,管道上下游之间的压力梯度也随之减小,此时管道与河床交界面(图 12 中线段 2-5)的冲刷主要是由该处产生的螺旋形涡管所引起^[32],但此时的冲刷速率明显小于上下游压力梯度所产生的冲刷速率,因此扩展阶段由初级扩展转变为次级扩展。

3.3.2 冲坑横向扩展经验模型

图 12 为水下穿越管道沿管轴方向扩展区域示意图,折线 1-2-5-6 为水沙分界线,其中线段 1-2 为冲刷平衡以后的河床线,此刻管底冲刷深度达到极限值 h_m ;线段 2-3 为冲刷未达到平衡的河床底面,斜坡与水平方向的夹角为 β ,选取坡面的任意一点,该点距管底高度为 h_s ,距坡底点 2 的水平距离为 x ,该点轴向扩展速率为 v_h ,竖向扩展速率为 v_v ;线段 3-5-6 为管道未悬空的河床底面。由于管底绕流的侵蚀作用,坡面 2-3 上各点的冲刷深度 h_s 不断增大,进而引起坡面 2-3 整体以速率 v_h 向右扩展,从而导致穿越管道悬空长度不断增大。

本文主要研究管底冲坑扩展规律,选取坡面 2-3 为研究对象。通过对试验过程的观测和局部冲刷机理的认识,当管底冲坑形成以后,开始沿管

表 3 不同工况下冲坑横向扩展速率
Tab. 3 Propagation velocity of scour hole under different conditions

工况	弗劳德数 Fr	希尔兹 参数 θ	$D = 10\text{ mm}$		$D = 15\text{ mm}$		$D = 20\text{ mm}$	
			$v_{初}$	$v_{次}$	$v_{初}$	$v_{次}$	$v_{初}$	$v_{次}$
A	0.394	0.027	0.452	0.082	0.33	0.053	0.313	0.042
B	0.520	0.033	0.813	0.135	0.568	0.086	0.491	0.076
C	0.808	0.044	1.586	—	1.256	—	1.124	—
D	0.344	0.027	0.405	0.065	0.302	0.046	0.227	0.048
E	0.452	0.033	0.801	0.112	0.553	0.092	0.446	0.069
F	0.693	0.044	1.608	—	1.061	—	0.805	—
G	0.306	0.027	0.334	0.067	0.277	0.045	0.308	0.045
H	0.405	0.033	0.601	0.118	0.428	0.078	0.377	0.059
I	0.623	0.044	1.505	—	0.986	—	0.513	—

注: $v_{初}$ 为初级扩展速率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); $v_{次}$ 为次级扩展速率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。表中“—”表示该工况下无次级扩展速率。

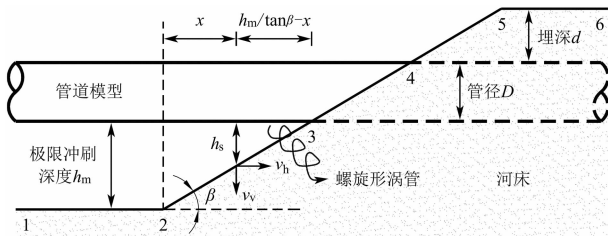


图 12 管道横向扩展区域示意图

Fig. 12 Propagation schematic for scour hole through horizontal

轴方向向两端不断扩展,而扩展的根本原因是由于坡面 2-3 上各点的竖向冲刷深度 h_s 不断增大,从而导致坡面 2-3 整体向右移动。此外,由于坡面 2-3 距管底距离不等,坡面上各点的竖向扩展速率 v_v 也不同,靠近点 3 的扩展速率大于靠近点 2 的扩展速率,因此随着冲坑的不断扩展,坡角 β 不断减小。为了便于冲坑横向扩展经验模型的理论分析,提出以下两点假设:①冲坑沿管轴方向横向扩展的主要原因是由于坡面 2-3 上各点的 h_s 不断增大所导致;②冲坑横向扩展过程中沙粒水下休止角 β 保持不变。因此,对于坡面 2-3 上任意一点的轴向扩展速率为:

$$v_h = v_v / \tan \beta \quad (8)$$

坡面 2-3 上任意一点的竖向扩展速率为:

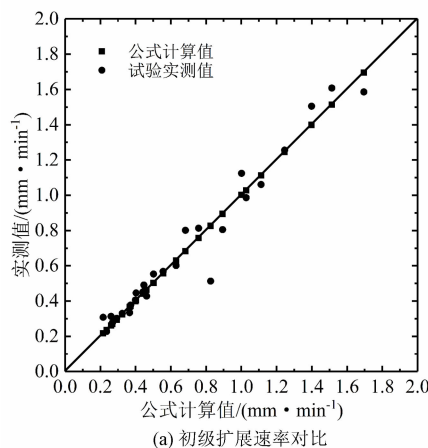
$$v_v = dh_s / dt \quad (9)$$

将式(3)代入式(9)得到:

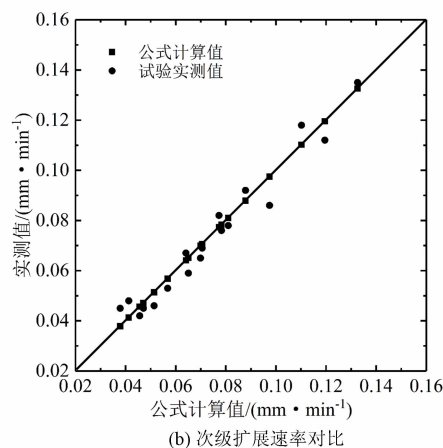
$$v_v = \frac{dh_s}{dt} = 7.872 \frac{h_m}{T} e^{-16.4 \frac{t}{T}} \quad (10)$$

式中, T 为竖向冲刷达到平衡时所需时长 (min)。

根据 FREDSOE^[33] 给出的计算公式:



(a) 初级扩展速率对比



(b) 次级扩展速率对比

图 13 冲坑横向扩展速率实测值与公式计算值对比

Fig. 13 Comparison of the measured value and the calculated value of propagation velocity of scour hole

$$T = \frac{\theta^{-5/3} D^2}{50 \sqrt{g(s-1)} d_{50}^3} \quad (11)$$

将式(7)、式(10)和式(11)代入式(8),可以最终得到冲坑沿管轴方向扩展的速率公式:

$$v_h = k \frac{(d_{50})^{1.26} (Fr)^{0.74} \theta^{5/3} \sqrt{g(s-1)}}{D^{0.76} \tan \beta} \quad (12)$$

式中, k 为扩展系数,初级扩展速率 $k = 0.4$,次级扩展速率 $k = 0.07$; $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; s 为泥沙相对密度; D 为管径 (m)。

公式(12)适用于 $Fr < 1$ 的砂质河床的穿越管道冲坑横向扩展速率计算。为验证预测公式的准确性和适应性,图 13 列出公式(12)与表 3 实测扩展速率与公式计算值的对比,可以看出,两者结果基本一致,说明经验公式(12)对预测穿越管道冲坑横向扩展速率具有较高的准确性和较强的适应性。

4 结论

基于水槽模型试验,分析观测山地河流穿越管道附近河床演变趋势,研究水动力条件、管径等因素对冲坑扩展规律的影响,并建立穿越管道冲坑横向和竖向扩展预测模型。结论如下:

(1) 试验观测得知,河床演变主要由推移质输移引起,管底冲刷形成以后,冲坑将沿着轴向和竖向方向同时扩展,随着管径的增大,冲坑点出现次数随之减小,并且冲坑位置不易沿管轴方向转移。

(2) 管底形成冲刷之时是一个极速过程,随着管涌的发生,冲刷速率逐渐减小,冲刷深度逐渐增大,水深和流速共同影响冲坑平衡冲刷历时和极限

冲刷深度。

(3)管底冲坑竖向扩展过程满足一级动力学反应方程,针对试验数据离散点,采用最小二乘法进行拟合,得到归一化后的冲刷深度和冲刷时间关系曲线为 $h_s/h_m = 1 - 0.48e^{-16.4t/T}$ 。

(4)采用 G-S 迭代法得到无量纲冲刷深度 d_s/D 与相对泥沙粒径 d_{50}/D 和 Fr 的关系: $h_m/D = 150 (d_{50}/D)^{-0.24} Fr^{0.74}$, 通过对比得到拟合公式预测值与试验实测值基本一致。

(5)当 $Fr > 0.6$ 时,管底冲坑横向扩展过程仅为一个阶段,即初级扩展阶段,当 $Fr < 0.6$,管底冲坑的扩展过程包含初级扩展和次级扩展两阶段。

(6)结合试验数据和冲坑竖向扩展经验模型,推导出冲坑沿管轴方向扩展速率的计算公式,该公式适用于缓流条件下的冲坑横向扩展速率计算,且模型预测结果较好。

参考文献 (References)

- [1] 陈仲科. 管道穿越大中型江河方案比较[J]. 天然气工业, 2000, **20**(2): 83-86+2. [CHEN Zhongke. A comparison among the plans of pipeline crossing over large-medium river [J]. Natural Gas Industry, 2000, **20**(2): 83-86+2]
- [2] FUHRMAN D R, BAYKAL C, SUMER B M, et al. Numerical simulation of wave-induced scour and backfilling processes beneath submarine pipelines [J]. Coastal Engineering, 2014, **94**(7): 10-22.
- [3] MIRMOHAMMADI A, KETABDARI M J. Numerical simulation of wave scouring beneath Marine pipeline using smoothed particle hydrodynamics [J]. International Journal of Sediment Research, 2011, **26**(3): 331-342.
- [4] ZHAO Zhihe, FERNANDO H S. Numerical simulation of scour around pipelines using an Euler - Euler coupled two-phase model [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2007, **7**(2): 121-142.
- [5] LIN Lu, LI Yucheng, QIN Jianmin. Numerical simulation of the equilibrium profile of local scour around submarine pipelines based on renormalized group turbulence model [J]. Ocean Engineering, 2005, **32**(17/18): 2007-2019.
- [6] ZHAO Ming, CHENG Liang. Numerical investigation of local scour below a vibrating pipeline under steady currents [J]. Coastal Engineering, 2010, **57**(4): 397-406.
- [7] LUAN Y, LIANG D, RANA R. Scour depth beneath a pipeline undergoing forced vibration [J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2015, **5**(2): 97-100.
- [8] 刘延鑫,王早祥,王苗. 海底管道局部冲刷数值模拟分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, **36**(6): 118-122. [LIU Yanxin, WANG Hanxiang, WANG Miao. Numerical simulation analysis of local scour around submarine pipeline [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, **36**(6): 118-122]
- [9] 孙建伟,耿红,孙昭晨. 海底管道周围局部冲刷数值模拟分析[J]. 海洋技术, 2010, **29**(1): 51-55. [SUN Jianwei, GENG Hong, SUN Zhaochen. Numerical model for local scour around offshore pipelines [J]. Ocean Technology, 2010, **29**(1): 51-55]
- [10] YANG Lipeng, SHI Bing, GUO Yakun, et al. Calculation and experiment on scour depth for submarine pipeline with a spoiler [J]. Ocean Engineering, 2012, **55**(1): 191-198.
- [11] AZAMATHULLA H M, YUSOFF M M, HASAN Z A. Scour below submerged skewed pipeline [J]. Journal of Hydrology, 2014, **509**(13): 615-620.
- [12] AZAMATHULLA H M, ZAKARIA N A. Prediction of scour below submerged pipeline crossing a river using ANN [J]. Water Science and Technology, 2011, **63**(10): 2225-2230.
- [13] AZAMATHULLA H M, YUSOFF M A M. Soft computing for prediction of river pipeline scour depth [J]. Neural Computing and Applications, 2013, **23**(7/8): 2465-2469.
- [14] MING Zhao, VAIDYA S, QIN Zhang, et al. Local scour around two pipelines in tandem in steady current [J]. Coastal Engineering, 2015, **98**: 1-15.
- [15] 潘新颖,赵恩金,拾兵,等. 海底子母管作用下海床冲刷的试验研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, **47**(11): 109-116. [PAN Xinying, ZHAO Enjin, SHE Bing, et al. Experimental study on the local scour around the piggyback pipeline [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, **47**(11): 109-116]
- [16] 臧志鹏,滕斌,程亮,等. 水流作用下海底管线三维冲刷扩展速度实验研究[J]. 大连理工大学学报, 2009, **49**(1): 110-114. [ZANG Zhipeng, TENG Bin, CHENG Liang, et al. Experimental research on propagation velocity of 3-D scour of pipelines on sea floor under action of currents [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, **49**(1): 110-114]
- [17] 徐涛龙,曾祥国,姚安林,等. 河流穿越高压输气管道悬空长度的动态演变过程及临界状态的数值方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, **44**(6): 79-85. [XU Taolong, ZENG Xiangguo, YAO Anlin, et al. Study of numerical method on critical suspended length and critical failure state of high-pressure gas pipeline crossing riverbed [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, **44**(6): 79-85]
- [18] 姚安林,徐涛龙,郑健,等. 河流穿越高压输气管道临界悬空长度的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2013, **30**(3): 152-158. [YAO Anlin, XU Taolong, ZHENG Jian, et al. Study on numerical simulation of critical suspended length of high-pressure gas pipeline crossing riverbed [J]. Engineering Mechanics, 2013, **30**(3): 152-158]
- [19] 付冉,姚安林,刘霖聪,等. 穿越水域输气管道裸露悬空段的应力敏感性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, **11**(11):

- 106–111. [FU Ran, YAO Anlin, LIU Lincong, et al. Analysis on stress sensitivity for exposed and suspended section of water crossing gas pipeline [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, **11**(11): 106–111]
- [20] 江海洋,王淑英,许泽星,等.管道穿越山地河段冲刷深度计算方法的比较研究[J].山地学报,2019,**37**(3): 462–467. [JIANG Haiyang, WANG Shuying, XU Zexing, et al. Comparative study on calculation methods of scour depth over riverbed traversed by pipeline [J]. Mountain Research, 2019, **37**(3): 462–467]
- [21] 白路遥,李亮亮,马云宾,等.穿河管道河床冲刷的改进计算模型及应用[J].人民黄河,2015,**37**(4): 55–57+61. [BAI Luyao, LI Liangliang, MA Yunbin, et al. Improvement of calculation model and its application in river bed scour of river-crossing pipeline [J]. Yellow River, 2015, **37**(4): 55–57+61]
- [22] 唐万金,王吉祥,杨鸣.某穿越长江输油管道工程中河床冲刷深度计算[J].人民长江,2013,**44**(6): 59–61. [TANG Wanjin, WANG Jixiang, YANG Ming. WANG jixiang YANG Ming. Calculation of scoring depth for oil pipeline crossing Yangtze river [J]. Yangtze River, 2013, **44**(6): 59–61]
- [23] 杨乾,孙明楠,何沫,等.水下穿越管道附近河床演变特性试验[J].天然气工业,2019,**39**(10): 110–117. [YANG Qian, SUN Mingnan, HE Mo, et al. Evolution features of riverbeds near underwater crossing line pipes: An experimental study [J]. Natural Gas Industry, 2019, **39**(10): 110–117]
- [24] DL/T 5244–2010,电水利工程常规水工模型试验规程[S].北京:电力出版社,2010 [DL/T 5244–2010, Code for normal hydraulics model investigation for hydropower & water resources [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010]
- [25] 张红武.泥沙起动流速的统一公式[J].水利学报,2012,**43**(12): 1387–1396. [ZHANG Hongwu. A unified formula for incipient velocity of sediment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **43**(12): 1387–1396]
- [26] 刘盈溢,吕林,郑苗子,等.波浪作用下海床稳定性和海底管道局部冲刷分析[J].浙江大学学报(工学版),2012,**46**(6): 1135–1142. [LIU Yingyi, LV Lin, ZHENG Miaozi, et al. Analysis of seabed stability and local scour around submarine pipelines under waves and current [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, **46**(6): 1135–1142]
- [27] 何文社,方铎,杨具瑞,等.泥沙起动流速研究[J].水利学报,2002,**33**(10): 51–56. [HE Wenshe, FANG Duo, YANG Jurui, et al. Study on incipient velocity of sediment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, **33**(10): 51–56]
- [28] 吴钰骅,金伟良,毛根海,等.海底输油管道底砂床冲刷机理研究[J].海洋工程,2006,**24**(4): 43–48. [WU Yuhua, JIN Weiliang, MAO Genhai, et al. Study on the scour mechanism of sandy seabed below submarine pipelines [J]. The Ocean Engineering, 2006, **24**(4): 43–48]
- [29] BIJKER E W, LEEUWESTEIN W. Interaction between pipelines and the seabed under the influence of waves and currents [C]// DENNESS B. Seabed Mechanics. Netherlands: Springer, 1984: 235–242.
- [30] IBRAHIM A, NALLURI C. Scour prediction around marine pipelines [C]// Proceedings of 5th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1986: 679–684.
- [31] MONCADA-M A T, AGUIRRE-PE J. Scour below Pipeline in River Crossings [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, **125**(9): 953–958.
- [32] CHEN Bing, CHENG Liang. Numerical investigation of three-dimensional flow and bed shear stress distribution around the span shoulder of pipeline [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. B), 2004, **16**(6): 687–694.
- [33] FREDSOE J, SUMER B M, ARNSKOV M M. Time scale for wave/current scour below pipelines [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1992, **2**(1): 13–17.

Experimental Study in Expansion Law of Scour Hole of Pipeline Crossing Mountain River

YANG Qian, YANG Qinghua*, YAO Jintao, ZHANG Yuqian, WANG Zicong

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: It's very important for safety of the pipeline crossing the mountain river to predict reasonably future scour depth and suspended length. A flume model test was carried out for the Beiganxian gas pipeline crossing engineering, the evolution tendency of riverbed around underwater crossing pipeline was observed and analyzed from the test, and the influencing factors of the expansion law of scour hole were studied, such as flow rates, water

depths, pipe diameters and so on. The results showed that the riverbed evolution was mainly caused by bed load transport, the number of scour points formed at the bottom of the pipe decreased gradually with the increase of pipe diameter. The vertical expansion rate of the scour hole was very large when the scour was formed at the bottom of the pipe, with the occurrence of the canal gush, the scour rate decreased and the scour depth increased gradually. The vertical expansion process of the scour hole at the bottom of the pipe satisfied the first-order dynamic response equation, the relationship between scour depth and scour time was obtained after normalization. The hydraulic parameters, pipe diameters and sand characteristics all affected the scour depth of the underwater crossing pipeline. The dimensionless equation of scour depth between the relative sediment grain size and Froude number (Fr) was obtained by using the Gauss - Seidel iteration method. There was only one primary stage of horizontal expansion of the scour hole when $Fr > 0.6$, and another following expansion process was added to the primary stage when $Fr < 0.6$. Finally, the horizontal expansion calculation model of the scour hole was derived combined with test data and empirical model of vertical expansion, and the prediction result of the model was very good. It could provide an important reference for exploring the expansion law of the scour hole and the safe operation of the underwater crossing pipeline.

Key words: underwater crossing pipeline; scour hole; expansion rate; scour depth; flume model test