

非开挖穿河管道工程对堤基渗流稳定的影响评价

周贤金 邓正东

(江苏省地质矿产勘查局第五地质大队, 江苏徐州 221004)

【摘要】 非开挖穿河管道工程在河流与堤基下的地层中形成一条隐蔽、弯曲的扰动带, 为了评价该扰动带诱发渗透破坏的可能性, 结合工程实例建立了相应的地下水数值模拟模型。利用该模型, 在极端不利的水文、气象条件下, 计算地下水流场中最大水力坡度; 依据临界水力梯度法, 定量评价工程诱发渗透破坏的可能性。实例研究表明, 最大水力坡度值随河水水位上升而逐渐增大, 但增速逐渐变缓; 河道底部厚度不大但渗透系数很小的淤泥层, 对最大水力坡度值的影响十分明显。

【关键词】 非开挖; 扰动带; 设计洪水; 冲刷作用; 渗透破坏

【中图分类号】 TU 94+1

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2010.04.003

Seepage Stability Analysis on the Dyke Through by Trenchless Pipeline

Zhou Xianjin Deng Zhengdong

(Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources Geology Fifth Brigade, Xuzhou 221004, Jiangsu, China)

【Abstract】 A covert and curving zone, which is disturbed by trenchless pipeline engineering, is formed under the river and dyke stratum. Based on an actual engineering, a corresponding groundwater simulation model is proposed for evaluating the possibility of seepage failure induced by the disturbed zone. Under the extremely unfavorable hydrology-weather conditions, the maximum groundwater flow gradient is estimated by the simulation model. Then, the possibility of seepage failure induced by engineering can be quantitatively analyzed based on the critical hydraulic gradient method. The result shows that the maximum groundwater flow gradient is increasing gradually and its acceleration is decreasing corresponding to increasing river level. The maximum groundwater flow gradient is influenced obviously by the thin and low-permeability silt layer of river bed.

【Key words】 trenchless; disturbed zone; design flood; washing action; seepage failure

0 引言

利用非开挖技术, 使得穿越河流的管道工程可以绕开河道堤身, 避免直接损坏堤防; 但管道在河流与堤基下的地层中穿越时, 将形成隐蔽、弯曲的扰动带, 该扰动带对地下水渗流场形成一定影响。如果管道所穿越的地层具有一定的渗透性、且与河流水位有一定的水力联系时, 扰动带对渗流场形成的影响更加复杂^[1]; 此时, 在评估工程建设能否诱发渗透破坏时, 不仅要考虑扰动带对渗流场的影响, 而且还要考虑极端不利水文条件的影响^[2,3]。

渗透破坏作为堤(坝)最常见的危害形式之一, 有众多的相关文献^[2-7], 但关于工程建设诱发渗透破坏的可能性方面的定量分析研究, 文献相对较少^[8]。

本文依据成品油管道穿越杭埠河的工程实例, 结合极端不利的水文、气象条件(如迅速上涨且长时间持续的洪水水位、洪水对河道冲刷等), 建立地下水流数值模拟模型; 根据地下水流场的模拟结果, 利用临界水力坡度法, 对实例中非开挖穿堤管道工程诱发渗透破坏的可能性, 进行定量分析。

1 工程概述

1.1 非开挖技术及其特点

非开挖铺管技术, 是利用钻掘定向与测控等技术手段, 在地表不挖槽的条件下完成管线铺设。管道穿河时, 首先在河底一定深度范围内的松散地层中, 利用定向钻进建成导向孔; 再沿导向孔返回扩孔, 在回扩过程中同时将管道拖进成孔中, 由此完成管道穿越河流。

穿越杭埠河的管道为 $\phi 273.1 \times 7.1$ mm 钢管, 在距右岸堤脚线 70 m 处以 10° 角入土, 在距左堤脚线 122 m 处以 6° 角出土, 穿越河床段管道与河道最深点间距离 9.0 m, 穿越管道水平长度 491 m、管道实长 494 m, 管道穿越河段水文地质剖面见图 1。

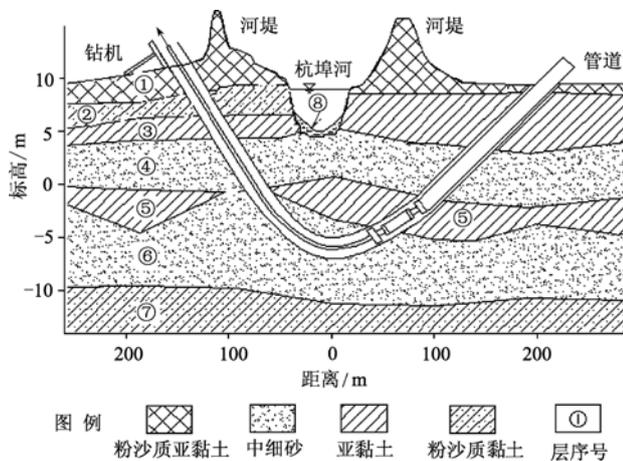


图 1 管道穿越河段水文地质剖面图

非开挖铺管方法, 使得管道“绕道”避开堤防的有效断面从而避免了对堤身的直接破坏, 而且对堤基地层的影响也仅限于钻探扰动带, 但扰动带是隐蔽、弯曲的, 这使得定量评价扰动带对渗流场影响相对比较困难。

1.2 河道与堤防

位于安徽省中部的杭埠河, 是巢湖的一条重要支流, 流域面积 4150 km^2 、河道全长 145.5 km 。穿越河段的河道基本顺直, 河道两侧是平原圩区, 地形平坦, 地面高程 $8 \sim 9 \text{ m}$; 两岸堤距为 240 m 、河宽约 135 m 、河底高程 $5.5 \sim 6.0 \text{ m}$ 、河道比降为 0.02% , 现状堤顶高程 $15.0 \sim 16.0 \text{ m}$; 穿越段堤防的规划设计标准为 20 年一遇, 相应的设计洪水位 16.4 m 、设计流量 $1960 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

1.3 水文地质与工程地质条件

据管道工程勘察钻孔所揭示, 穿越地段在 $0 \sim 19.4 \text{ m}$ 的深度范围内属第四系松散地层, 地层分布与主要水文地质特性, 见表 1。

表 1 穿越工程地质勘探成果

层序	岩性	层厚/m	岩性描述	渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	孔隙度 $n/\%$
①	粉砂质亚黏土	1.30~5.40	河堤两侧表层有 0.5 m 厚的耕作土	0.2	0.41
②	粉砂质黏土	1.50~3.50	该层仅在左岸发育, 在右岸缺失	0.25	0.40
③	亚黏土	1.20~5.80	呈连续分布	0.10	0.41
④	中细砂	2.40~8.00	含少量黏性土; 呈连续分布	8.90	0.41
⑤	亚黏土	1.60~5.10	呈不连续分布	0.15	0.40
⑥	中细砂	3.10~9.00	局部夹粗砂、砾砂; 呈连续分布	13.00	0.39
⑦	粉砂质黏土	1.50~3.60	连续分布	0.27	0.41
⑧	淤泥质黏土	0~1.50	沿河道底部、鱼塘底部分布	0.23	0.47

由表 1 可见主要渗透层是第 4 层、第 6 层的中细砂层, 由于两主渗透层之间的弱透水层 (即第 5 层黏性土层) 呈不连续状分布, 主渗透层中地下水之间水力联系密切; 据野外钻孔试验, 两主渗透层中地下水具有统一的水头分布; 虽然河流直接切割到第 4 地层中, 但沿河道底部分布的淤泥质黏土层 (即第 8 层) 削弱了河水与主渗透层中地下水之间的水力联系。

根据埋藏条件和主要渗透层地下水力学性质, 地下水属弱承压水; 现状条件下, 地下水基本没有开采, 地下水动态基本属水文型, 水位埋深一般为 $1.0 \sim 1.5 \text{ m}$ 。

2 渗透破坏及其判别方法

2.1 工程诱发渗透破坏的途径

渗透破坏也称渗透变形, 由形成机理, 渗透破坏可分为管涌、流土、接触冲刷和接触流土四种类

型^[8]。堤基的渗透破坏通常表现为泡泉、沙沸、土层隆起、浮动、膨胀等,一般将其统称为管涌;堤基管涌,尤其是近堤脚的管涌,一旦处理不得当或不及时,易迅速发展成管涌洞并导致溃堤。

非开挖穿河管道工程,在导向钻进与扩孔过程中,对钻孔(钻孔基本被铺进的管道所占据)周边地层产生扰动,使得扰动带中的地层渗透性增大;在渗透水流作用下,地层中的细颗粒物质能否在组成粗颗粒空隙中移动,如果形成移动以至流失,就有可能将这扰动带逐渐改造成“主渗漏带”^[4],进而进一步发展形成管涌。

2.2 允许水力坡度

判断管涌能否形成的方法,主要有总水头法和临界水力坡度法,其中临界水力坡度法应用相对更为广泛^[3-8]。针对特定的地层条件,根据临界水力坡度的方法原理,可计算出产生管涌的临界水力坡度理论值^[9];实际应用中,再考虑一定的安全系数,由此给出允许水力坡度计算公式:

$$I_m = I_{cr} / K = (G_s - 1)(1 - n) / K \quad (1)$$

式中: I_m 是允许水力坡度; I_{cr} 是临界水力坡度理论值; K 是安全系数; G_s 是细颗粒土粒密度; n 是渗透地层的孔隙度。

就本次工程实例,由工程样测试分析数据,主渗透层中细颗粒物质主要是黏性土,相对密度(G_s)为 2.71 g/cm^3 ,孔隙度按主渗透层(中细砂层)扰动带的孔隙度取值,实际工作中对这个带中的砂层孔隙度很难直接测定,计算中考虑到扰动使砂层松动进而使孔隙度增大这一因素,从偏安全角度将扰动带的砂层孔隙度取为原状砂层孔隙度的1.5倍,原状砂层中最大孔隙度为0.41,则扰动带的砂层孔隙度 n 为0.615;安全系数通常取2.0~2.5,计算中将 K 取为2.5。由式(1):

$$I_m = (2.71 - 1) \times (1 - 0.615) / 2.5 = 0.263$$

即,在本工程实例中,当地下水流场中的最大水力坡度小于允许水力坡度0.263时,管道工程建设诱发渗流破坏可能性很小。

3 地下水渗流场模拟

在确定允许水力坡度后,只要计算出工程影响段的地下水流场中的最大水力坡度,就可对工程建设能否诱发渗流破坏进行定量判断。计算地下水流场中的水力坡度方法有很多,但由于穿越河段有多套渗透性不同的地层,而且工程形成的扰动带是弯曲的,所以采用数值模拟方法;在进行地下水流场数值模拟时,要考虑极端不利水文条

件对渗流的影响。

3.1 极端不利水文条件及其概化

对研究中的渗流问题形成影响的不利水文条件,主要有三个方面:洪水位、洪水位上涨过程与洪水位持续时间、洪水对河道的冲刷。洪水位高低决定地下水补给源的水头压力,洪水位的上涨过程与持续时间影响地下水渗流的变化过程,洪水对河道的冲刷程度影响到河水与地下水间的水力联系密切程度。一般而言,上涨快、持续时间长的高洪水位、冲刷程度,出现渗流破坏的可能性越大。

现状堤顶高程为15.0~15.5 m,堤防规划标准为二十年一遇,相应的设计洪水位为16.4 m。计算中,考虑到未来堤防建设,最高洪水位应按设计洪水位16.4 m处理。

研究区地处北亚热带季风气候区,特大洪水往往有水位暴涨、长时间持续的特点。根据历史洪水的实测数据,往往在一天之内,河道水位就可由正常水位暴涨至高洪水位;高洪水位的持续时间,可达20 d以上。计算中,按汛前水位1天内上升至设计洪水位,洪水持续时间按超过1个月考虑。

穿越段河床,在0~1.5 m深度范围内的岩性主要是淤泥质黏土,以下3.0 m深度范围内主要是中细砂。洪水对河道的冲刷程度,采用沙莫夫公式^[10]估算设计洪水对河槽最大冲刷深度;在16.4 m设计洪水位时,平均水深6.65 m、最大水深10.4 m、断面面积2380 m²、流量1960 m³/s,如岩性都按黏土考虑,用恒定流清水冲刷算式,计算出最大冲刷深度为1.87 m。

3.2 水文地质概念模型

穿越工程所在处的河段基本呈直线型,通过条件概化,水文地质概念模型可概括如下:

1) 计算区域在平面上,以管道平面投影为中线两侧各取1000 m,以河道中泓为中线两侧各取2000 m,计算区平面范围为2000 m×4000 m;垂向上,取高程-19.00~16.40 m的范围内的地层作为研究对象。

2) 河道附近地层,按非均质各向异性处理。

3) 管道工程扰动带,在野外难以进行准确测验^[11],根据对垂直地层钻孔的野外观测,在粉砂质黏土中,钻孔对地层的扰动半径小于0.2 m;计算中,扰动带取以管道为中心、半径为0.5 m的范围,扰动带渗透系数取对应地层的1.5倍,管道所占位置的渗透系数取0;根据工程勘察资料所计算出的各层渗透系数见表1。

4)与河道垂直的计算边界,取为零流量边界;与河道平行的计算边界,取为定水头边界,考虑到汛期地下水水位埋深一般比较高,水位埋深取为1.0 m,对应的水头值为7.8 m。

5)河流是地下水系统内的已知水头边界。

6)在垂向上,上界面可以产生垂向交换水量,接受降水等补给为正、潜水蒸发和开采为负;研究区底部为隔水边界。

7)两主渗透层中地下水水力联系密切、具有统一的地下水流动场,地下水流动可近似看作为承压水二维流。

3.3 数值模拟模型

根据上述水文地质概念模型,建立相应的数学模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(F_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(F_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + W = \mu^* \frac{\partial H}{\partial t} \\ H(x, y, t) \Big|_{t=0} = H_0(x, y) & (x, y) \in D \\ H(x, y, t) \Big|_{\Gamma_1} = H_1(x, y, t) & (x, y) \in \Gamma_1 \\ \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{\Gamma_2} = 0 \end{cases}$$

式中: K_{xx} 、 K_{yy} 为渗透系数在 x 、 y 方向的分量; H 为水位; W 为水量垂向交换强度(补给为正); μ^* 为弹性释水系数; H_0 为初始水位; H_1 为计算期间边界处的地下水水位; t 为时间; D 为模拟区范围; Γ_1 为一类边界; Γ_2 为二类边界; n 为边界外法线方向。

对上述数学模型,利用 Modflow 软件,采用有限差分解法。空间剖分,将整个研究区域划分为 40×40 个网格,其中,网格在河流、管道附近适当加密。

研究中,首先利用实际施工期间的河流实际水位、地下水实测水位,对模拟模型进行识别;利用识别后的模型,模拟高洪期间的地下水流动场。

3.4 计算结果分析

通过模型识别,确定弹性释水系数值为 0.6×10^{-5} 、第④和⑥层的渗透系数分别为 10.1 m/d 和 11.8 m/d;利用河流初始水位取汛前多年平均偏枯水位值 8.5 m,水位在 24 h 内上升到二十年一遇洪水水位 16.4 m,地下水初始水头按地面以下 0.5 m;计算时段为 3 个月(高洪水位持续 3 个月)、计算步长为 1 d。

计算结果表明,在上述条件下,地下水渗流场中的最大水力坡度,发生时间在第 30.5 天,发生地点在右岸堤脚线内约 30 m 处,最大值为 0.244,接近允许水力坡度 0.263。

冲刷作用和洪水位高低的影响见图 2。同河水

大水力坡度明显偏小;以在设计洪水位 16.4 m 为例,不考虑冲刷作用条件下的最大水力坡度为 0.150,比考虑冲刷作用条件下的 0.244 小 48.5%;这主要是因为河道底部有一层厚度不大但渗透系数很小的淤泥质黏土层,很大程度地削弱了河水与地下水之间的水力联系^[1],设计洪水可以将这一层完全冲刷掉,所以导致两条件下的计算结果差别很大。

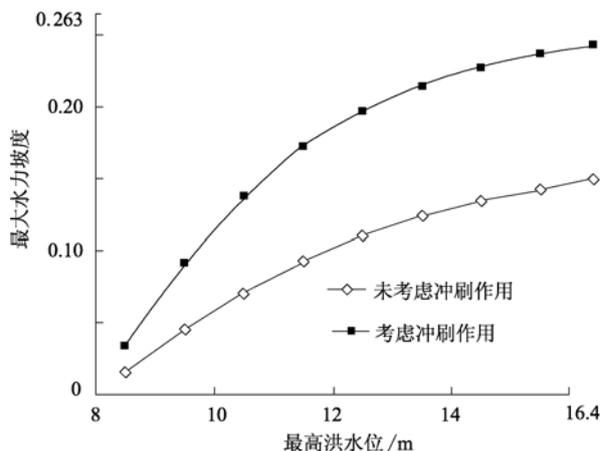


图 2 冲刷与洪水位对最大水力坡度的影响

对地下水渗流场中的最大水力坡度值,洪水位高低影响十分明显,但随着河水位的不断上升,最大水力坡度值的上升速度有逐渐变缓的趋势;这与地层渗透的延迟效应有关^[12];在考虑冲刷作用的条件下,在洪水达到现状堤顶高度(15.0 m)时,最大水力坡度值为 0.231,比设计洪水位条件下的 0.244 小 5.3%。

4 讨论与结论

由于非开挖铺管技术具有环保、高效、安全等优点,20 世纪九十年代后期开始,在我国得到了迅速推广,现在被广泛应用于诸如水、气、油、电等管线的铺设中。结合工程实例,在评估非开挖穿河管道工程诱发渗透破坏可能性的过程中,形成以下认识:

1) 利用非开挖铺管技术完成管道穿越河流,不仅避免了对堤防的直接损害,而且只要设计合理也可有效避免诱发渗透破坏问题的发生。就实例中的有关评估结果而言,工程建设尚不至于诱发渗透破坏。

2) 在评估非开挖穿河工程对地下水渗流场影响时,由于相关条件较复杂,现有解析方法往往难以适用。在实例中,穿河工程不仅要穿越几套不同的地层,而且形成的扰动带是一弯曲的管道状通道,很难将上述条件简化以适用现有的解析算法。

3) 当管道所穿越的地层具有一定的渗透性、且

与河流水位有一定的水力联系时,不仅要考虑扰动带对渗流场的影响,而且还要考虑极端不利水文条件的影响。在实例中,冲刷作用和洪水位高低的影响明显;在考虑冲刷作用的条件下,在设计洪水(16.4 m)持续达30.5 d时,地下水渗流场中的最大水力坡度值为0.244,虽然仍然小于允许水力坡度0.263,但两者已经比较接近;因此,要注意增加适当的防护措施,如在管道出、入口四周一定范围内修建防渗层等。

参 考 文 献

- [1] 束龙仓, Chen X H. 河流-含水层系统中水文要素的变化过程分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(3): 251-254.
- [2] Richards K S, Reddy K R. Critical appraisal of piping phenomena in earth dams[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2007, 66(4): 381-402.
- [3] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 洪峰过程非稳定渗流管涌试验研究与理论分析[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1105-1114.
- [4] 陈建生, 李兴文, 赵维炳. 堤防管涌产生集中渗漏通道机理与探测方法研究[J]. 水利学报, 2000, 31(9): 0048-0055.
- [5] 易朝路, 汪丙国, 郭志高, 等. 荆江大堤盐卡险段地下水渗流场模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1285-1290.
- [6] C Yi, B Wang, M Jin et al. Two-dimensional simulation of underground seepage in a dangerous piping zone of the Jingjiang Great Levee, the middle reach of the Yangtze River[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2007, 40(1): 85-92.
- [7] Foster, M.; Fell, R.; Spannagle, M. A method for assessing the relative likelihood of failure of embankment dams by piping: Reply [J] Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(2): 497-500.
- [8] 周建, 张刚. 管涌现象研究的进展与展望[J]. 地下空间与工程学报, 2004, 24(4): 536-542.
- [9] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] 陈立主编. 河流动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社出版, 2001.
- [11] 丁鹏, 闫相祯, 杨秀娟. 水平定向钻管道穿越中力学参数研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 153-155.
- [12] TAO YueZan, XIE DaoYing. Rule of transient phreatic flow subjected to vertical and horizontal seepage [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(1): 53-59.

收稿日期: 2010-05-26

(上接第165页)

- [3] 何昌荣, 杨桂芳, 邓肯-张模型参数变化对计算结果的影响[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 170-174.
- [4] 罗刚, 张建民. 邓肯-张模型和沈珠江双屈服面模型的改进[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 887-888.
- [5] Kondner R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils. [J] Soil Mech, Fdns., ASCE, 1963, 89(1): 115-143.
- [6] 陈晓平, 杨春和, 白世伟. 软基上吹填边坡蠕变特性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 514-518.
- [7] 王常明, 王清, 张淑华. 滨海软土蠕变特性及蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 227-230.
- [8] 许宏发, 钱七虎, 吴华杰等. 确定软土流变模型参数的回归反演法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(3): 365-367.
- [9] 张军辉, 缪林昌. 连云港海相软土流变特性试验及双屈服面流变模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 143-149.
- [10] 王志亮, 黄景忠, 夏红. 考虑软土流变特性的沉降预测研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1567-1570.
- [11] 龚晓南, 袁静, 益德清. 岩土流变模型研究的现状与展望[J]. 工程力学增刊, 2000(3): 145-154.
- [12] 张学言, 闫澍旺. 岩土塑性力学基础[M]. 天津: 天津大学出版社, 2006.
- [13] Singh A, Mitchell J K. General stress-strain-time function for soils, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(1): 21-46.
- [14] Mesri G, Febres-Cordero E, Shields D R & Castro A. Shear stress-strain-time behaviour of clays. Geotechnique, 1981, 31(4): 537-552.
- [15] 李世军, 林永梅. 上海淤泥质粉质粘土的 Singh-Mitchell 蠕变模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(4): 363-366.
- [16] 李世军, 孙钧. 上海淤泥质粘土的 Mesri 蠕变模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(6): 74-79.
- [17] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.
- [18] 刘思峰, 党耀国, 方志耕等著. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

收稿日期: 2010-05-17