

基于 MIKE21 的河底膜袋砂对河道行洪的影响分析

张 飞,张施跃,王 洁

(南京市水利规划设计院股份有限公司,江苏 南京 210006)

摘 要:为分析宁芜铁路下穿秦淮新河隧道工程施工期河底铺设膜袋砂对河道行洪的影响程度,利用 MIKE21 构建水动力模型,对工程段河道流场进行数值模拟,分析膜袋砂对河道水位、流速、流向的影响。结果表明:膜袋砂造成的上游水位壅高影响有限,河道流场变化主要局限于隧道附近,流速有所增大,流向变化较小;总体来说,施工期间工程河段整体流态较为平顺,膜袋砂对河道行洪安全影响较小。分析结果可为宁芜铁路隧道设计施工和防洪评价工作提供一定的技术参考。

关键词:膜袋砂;MIKE21;壅水;行洪影响;秦淮新河

中图分类号:TV131

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)09-0145-05

0 引 言

MIKE21 是丹麦水力研究所(DHI)开发的平面二维数学模型,目前在国内的应用发展很快,在长江口综合治理、上海苏州河治理、香港新机场工程等河道治理、涉河工程建设项目中得到广泛应用并取得了较好的模拟效果。其中 MIKE21 FM 水动力模块以三角形网格为基础,可根据实测地形进行网格概化,能够较好地模拟河道水流特性及涉河建筑物的壅水影响^[1]。

鉴于 MIKE21 模型的精确性与可视化性^[2],本文以南京市宁芜铁路下穿秦淮新河隧道工程为例,运用 MIKE21 建立工程段秦淮新河数学模型,对施工期间河道及隧道处水位和流场进行数值模拟,对比分析施工前与施工期间水位、流场变化情况,为水行政主管部门审批涉河建设方案提供技术支撑,相关研究成果也可为类似工程提供参考。

1 研究区概况

1.1 河流概况

秦淮新河为 20 世纪 70 年代末开通的人工河道,其主要作用是扩大秦淮河洪水出路。河道上起江宁河定桥,经过雨花台区铁心桥、西善桥,至金胜村入长江,全长约 16.8 km,设计流量 800 m³/s,河底高

程 -1.9~0.1 m(1985 国家高程基准,下同),河底宽 40~68 m,河槽边坡 1:2~1:3.5,河口宽 164~180 m,堤(岸)顶高程 10.1~11.6 m。

1.2 工程概况

宁芜铁路于里程 DK24+326.4~DK24+679.5 段以隧道形式下穿秦淮新河,穿越长度 353.1 m,位于秦淮新河入江口上游约 12.1 km。隧道中心线与河道夹角约 41°,采用盾构法施工,隧道外径 9.0 m,结构顶面高程 -3.26~-4.02 m,河底高程 -0.95 m,隧道拱顶至河床底最小覆土厚度 2.59 m。为保证盾构法具有可实施性,针对隧道覆土小于 4.8 m 的区段(DK24+431~DK24+531),施工期采用河底换填 C15 混凝土+膜袋砂压重的方式解决抗浮问题。混凝土换填深度为河底至隧道顶,最小换填深度为 5.2 m,横向换填范围为隧道结构两侧各 5 m,总宽 19 m,两端 1:2 刷坡;纵向长 100 m,两端 1:3 刷坡。河底混凝土换填完成后,在河底铺设膜袋砂,膜袋砂高 1.4 m,堆填宽度为隧道正上方及两侧各 3 m,总宽度 15 m,河底沿隧道走向长约 84.1 m,占用河道断面 91.7 m²。工程平面布置图见图 1,纵断面图见图 2;河底隧道剖面图见图 3。

根据施工组织设计,工期安排如下:(1)河底换填混凝土施工约 14 个月,计划采用水上浮动平台施工;(2)河底铺设膜袋砂施工 2 个月,在首年汛期结束时开始实施,即 10 月初—11 月底施工完成;(3)盾构穿河段安排在首年 12 月初—次年 1 月底施工完成;(4)盾构内现浇套衬结构安排在次年 2 月初—3 月底

收稿日期:2023-11-06

作者简介:张飞(1991—),男,硕士,工程师,从事水利规划工作。

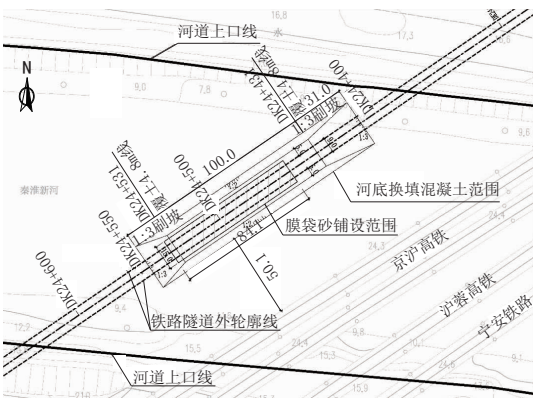


图 1 工程平面布置图(单位:m)

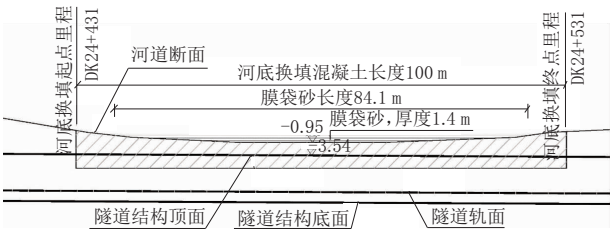


图 2 工程纵断面图

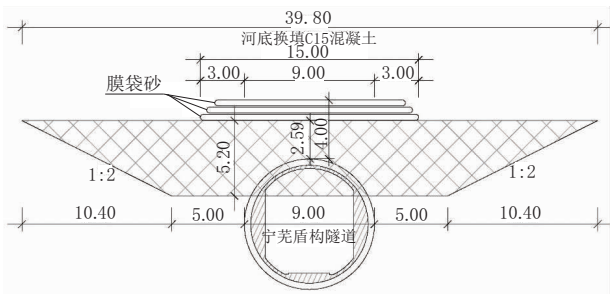


图 3 河底隧道剖面图(单位:m)

施工完成;(5)膜袋砂拆除安排在次年3月底至4月底实施完成。

综上,施工期间河底铺设的膜袋砂占用了河道行洪断面,在河道内存留时间为首年10月初一次年4月底(非汛期),时长共7个月。本文采用 MIKE21 FM 水动力模块模拟施工期间相应设计工况下,河底铺设膜袋砂对河道水位、流场的影响。

2 水动力模型的建立

2.1 地形数据

模型采用的地形数据为秦淮新河带状地形图(比例尺1:1 000)和河道实测断面数据(每隔50 m,隧道位置处加密测量)。施工前现状河道水下地形根据上述实测点位数据构造。施工期间水下地形根据膜袋砂平面、竖向设计尺寸,对隧道上方河底高程进行抬高处理。河道内现有桥墩根据实际尺寸、角度,采用模型内置的 Piers 模块进行模拟^[3]。

2.2 模型计算范围及网格剖分

综合考虑工程所在河段的水文资料、拟建隧道

影响范围以及模型分析成果精度等因素,并结合模型计算的稳健性和高效性需求,本次二维模型上边界取隧道上游1 km处,下边界取隧道下游0.4 km处,模拟河段全长1.4 km;两岸边界为河道上口线,河宽160~165 m,模型模拟平面面积合计230 190 m²。

本次模型采用三角形网格对模拟河段进行剖分。在河道高程变化平缓,岸线较为平顺的位置,网格尺寸适当加大,以减小模型计算时间。在拟建隧道附近、局部地形突变或高程变化较为剧烈的位置,适当进行网格加密处理,以保证计算精度要求^[4]。本次计算范围内网格面积一般控制在30 m²左右,加密区域网格最大面积不大于10 m²。模型计算网格数合计14 951个,节点数合计7 740个。

工程段河道网格图见图4,隧道附近局部网格图见图5。

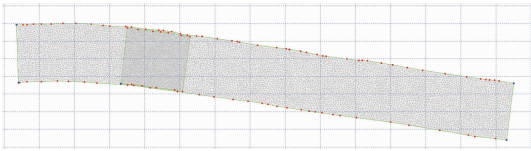


图 4 工程段河道网格图

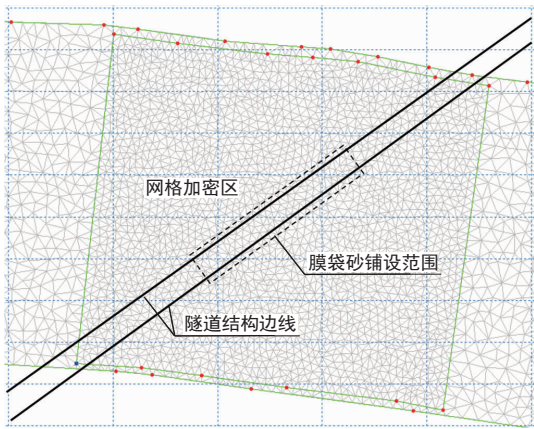


图 5 隧道附近局部网格图

2.3 边界条件和计算工况

模型上游采用流量边界条件,下游采用水位边界条件。宁芜铁路为Ⅰ级铁路,设计防洪标准为100 a一遇^[5]。本次模型流量、水位边界条件取100、50、20 a一遇共3种洪水标准,以模拟不同洪水频率条件下,膜袋砂对河道水位、流场的影响。

根据秦淮河流域东山水位站、秦淮新河闸水文站1980—2016年每年10月次年4月逐日水位、流量资料,绘制P-Ⅲ型频率曲线,并通过水面线插值,得到不同洪水频率条件下,模型上游边界设计流量和下游边界设计水位,见表1。

模型计算采用2种工况。工况一:施工期间河底

无膜袋砂;工况二:施工期间河底铺设膜袋砂。

表 1 不同洪水频率条件下边界条件取值

洪水频率 $P/\%$	下游边界设计 水位 /m	上游边界设计 流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$
1(100 a 一遇)	7.76	560.2
2(50 a 一遇)	7.49	506.5
5(20 a 一遇)	7.12	430.6

2.4 模型计算参数

MIKE21 FM 模型需设定的参数主要包括:计算区域的曼宁系数、涡黏系数、模型干湿度等。

根据《南京城市防洪规划—秦淮河设计洪水研究》相关成果,经实测流量和水位数据验证,工程段河道河床综合糙率取 0.027;曼宁系数 M 取 37;涡黏系数采用默认值 0.28;干水深取 0.005 m,淹没水深取 0.05 m,湿水深取 0.1 m。

2.5 监测点布置

为比较隧道施工前和施工期间河道水位、流场变化情况,在隧道上游主河槽位置共布置 17 个监测点。其中,1# 监测点位于膜袋砂正上方,1#~9# 监测点各点间距 25 m,9#~17# 监测点各点间距 100 m。监测点平面布置示意图见图 6。

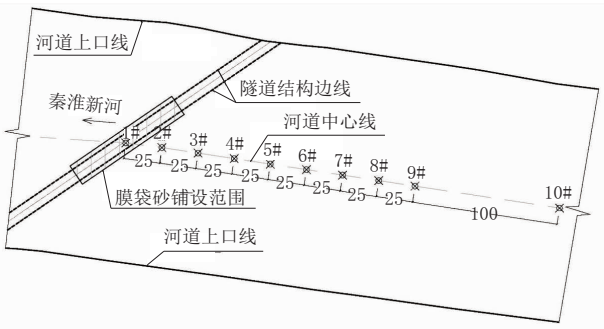


图 6 监测点平面布置示意图

2.6 模型率定

采用 2010 年 2 月 11 日秦淮新河闸站实测流量和隧道处实测插值水位数据进行模型验证。模型中隧道处的计算水位与实测水位对比见表 2。计算水位与实测水位差值为 0.02 m,说明模型能够较好地反映河底地形,所采用的参数较合理,模拟效果较理想。

表 2 模型验证成果表

断面位置	上游流量 / $(m^3 \cdot s^{-1})$	计算水位 / m	实测插值 水位 /m	差值 /m
隧道处	407.7	7.18	7.16	0.02

3 模拟结果分析

3.1 阻水率

膜袋砂阻水面积(垂直于水流流向的投影面积)

为 91.7 m²。根据模型计算结果,隧道处 100、50、20 a 一遇设计水位分别为 7.83、7.56、7.18 m,相应膜袋砂阻水率分别为 17.3%、18.3%、19.9%。不同洪水频率条件下膜袋砂阻水率见表 3。

表 3 不同洪水频率条件下膜袋砂阻水率

洪水频率 $P/\%$	隧道处 水位 /m	河道过水断面 面积 /m ²	膜袋砂阻水 面积 /m ²	阻水率 / %
1(100 a 一遇)	7.83	530.8	91.7	17.3
2(50 a 一遇)	7.56	501.6	91.7	18.3
5(20 a 一遇)	7.18	461.7	91.7	19.9

3.2 水位变化分析

不同洪水频率条件下,隧道上游沿程水位见表 4,水位壅高值见图 7。

由表 4、图 7 可知:

(1)1#、2# 监测点施工期间水位反而较施工前有所降低,尤其是 1# 监测点,下降幅度较大。分析原因可能是河底膜袋砂相当于一个宽顶堰,水流进入有底坎的堰顶后,在垂直方向上受堰坎边界的约束,堰顶上方过流断面缩小,流速增大,势能转换为动能;同时堰坎前后产生的局部水头损失也在一定程度上导致堰顶上方势能减小,所以造成宽顶堰进水口处水面发生明显跌落的过堰水流特征。

(2)除 1#、2# 监测点,其余隧道上游各监测点施工期间水位均较施工前有所抬高,说明膜袋砂会在隧道上游一定范围内产生壅水。

(3)施工膜袋砂造成的水位壅高最大值位于隧道上游 150 m(7# 监测点)附近,如图 7 所示。在 100、50、20 a 一遇洪水标准下,水位壅高最大值分别为 9.80、10.17、10.33 mm。由此可见,膜袋砂造成的上游水位壅高影响有限,对非汛期秦淮新河行洪安全影响较小。

(4)以 100 a 一遇洪水标准为例,隧道上游 150~400 m 段水位壅高值下降速率较快,为 1.52 mm/100 m;隧道上游 400~900 m 段水位壅高值下降缓慢,仅 0.05 mm/100 m。50、20 a 一遇洪水标准工况下具有相似规律。

(5)同一监测点,洪水标准越低,水位壅高值反而越高。分析原因可能是设计水位越低,膜袋砂阻水率越大,对上游水位壅高的影响相对更加显著。

3.3 流速、流场变化分析

不同洪水频率条件下,施工前、施工期间工程段河道流场图^[6]见图 8、图 9;隧道上游沿程流速见表 5。从模拟结果分析得出:

表 4 水位变化统计 单位:m

监测点 编号	与隧道 距离 /m	P=1%			P=2%			P=5%		
		施工前	施工期间	水位壅高值	施工前	施工期间	水位壅高值	施工前	施工期间	水位壅高值
1#	0	7.82	7.79	-25.22	7.55	7.52	-25.37	7.17	7.15	-24.2
2#	25	7.82	7.82	-0.80	7.55	7.55	-0.57	7.17	7.17	-0.30
3#	50	7.83	7.83	3.03	7.56	7.56	3.36	7.18	7.19	3.61
4#	75	7.84	7.85	8.83	7.56	7.57	9.10	7.19	7.20	9.06
5#	100	7.84	7.85	8.95	7.57	7.58	9.31	7.19	7.20	9.41
6#	125	7.86	7.87	9.31	7.59	7.60	9.64	7.21	7.22	9.77
7#	150	7.86	7.87	9.80	7.59	7.60	10.17	7.21	7.22	10.33
8#	175	7.87	7.88	8.77	7.60	7.61	9.13	7.22	7.22	9.47
9#	200	7.89	7.90	8.24	7.61	7.62	8.49	7.23	7.24	9.00
10#	300	7.91	7.92	8.71	7.63	7.64	8.93	7.25	7.26	9.14
11#	400	7.93	7.93	6.01	7.65	7.65	6.39	7.26	7.27	6.64
12#	500	7.94	7.95	5.95	7.66	7.67	6.36	7.27	7.28	6.48
13#	600	7.96	7.96	5.90	7.68	7.68	6.26	7.29	7.29	6.42
14#	700	7.97	7.98	5.84	7.69	7.70	6.21	7.30	7.31	6.39
15#	800	8.00	8.00	5.76	7.72	7.72	6.15	7.32	7.33	6.28
16#	900	8.01	8.02	5.69	7.73	7.74	6.10	7.34	7.34	6.22
17#	1 000	8.03	8.03	5.72	7.74	7.75	6.06	7.35	7.36	6.18

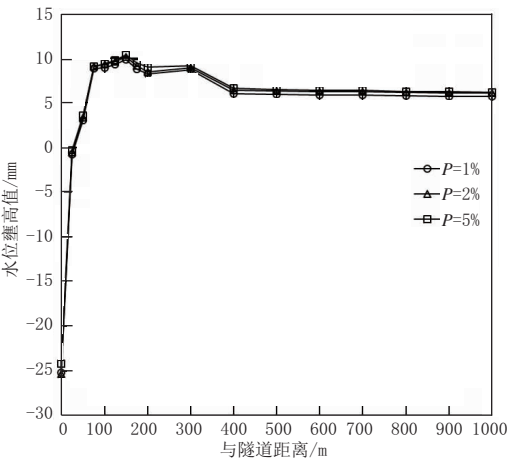


图 7 不同洪水频率条件下水位壅高值

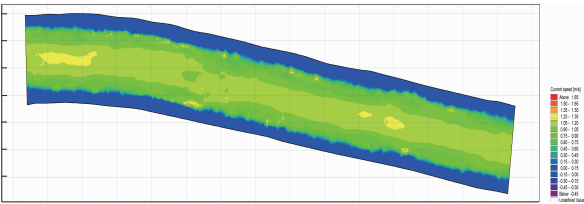


图 8 施工前工程段河道流场图(100 a 一遇洪水标准)

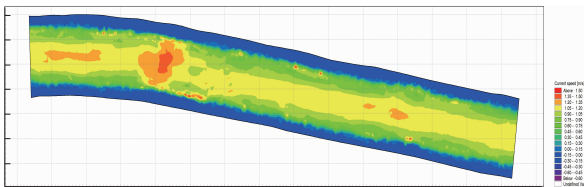


图 9 施工期间工程段河道流场图(100 a 一遇洪水标准)

(1)以 100 a 一遇洪水标准为例,隧道处局部流场变化较大,其余河段流场变化较小。隧道处流场变化主要表现在流速增大,施工期间流速由施工前 1.15 m/s 增大至 1.38 m/s。隧道处河道流向改变较小,与施工前流向基本一致。总体来说,施工期间隧道处河道流速有所增大,流向基本保持不变,整体流态较为平顺,河底膜袋砂对河道非汛期行洪影响较小。

(2)1# 监测点流速变化最大,这是由于膜袋砂上方河道过流断面缩小,在流量相对不变的条件下,流速增加较为明显,符合宽顶堰对水流的一般性影响规律。

(3)河底膜袋砂对隧道上游 50 m 内河段流速影响较大,流速变化值为 0.05~0.25 m/s;对隧道上游 50 m 外河段流速影响很小,流速变化值在 0.01 m/s 以下。说明河底膜袋砂对河道流速的影响范围较为有限,主要局限在隧道附近。

4 结 语

(1)本文构建的 MIKE21 模型具有精确性和可视化性,能够较准确和直观地模拟隧道处铺设膜袋砂前后水位、流场变化情况。模拟结果可为工程设计施工和防洪评价工作提供一定的技术参考。

表 5 流速变化统计

单位:m/s

监测点 编号	与隧道 距离 /m	P=1%			P =2%			P =5%		
		施工前	施工期间	流速变化值	施工前	施工期间	流速变化值	施工前	施工期间	流速变化值
1#	0	1.15	1.38	0.234	1.11	1.35	0.243	1.03	1.28	0.250
2#	25	1.13	1.20	0.065	1.09	1.16	0.069	1.01	1.09	0.073
3#	50	1.07	1.13	0.052	1.03	1.09	0.053	0.96	1.01	0.057
4#	75	1.02	1.02	0.003	0.98	0.98	0.003	0.91	0.91	0.005
5#	100	1.03	1.03	-0.004	0.99	0.98	-0.005	0.91	0.91	-0.003
6#	125	1.14	1.14	0.006	1.09	1.09	0.005	1.00	1.01	0.005
7#	150	1.18	1.17	-0.009	1.13	1.12	-0.010	1.04	1.03	-0.010
8#	175	1.14	1.13	-0.006	1.09	1.08	-0.006	1.00	1.00	-0.006
9#	200	1.17	1.17	0.005	1.12	1.12	0.005	1.03	1.03	0.004
10#	300	1.15	1.15	-0.003	1.10	1.10	-0.003	1.02	1.02	-0.003
11#	400	1.16	1.16	-0.002	1.11	1.11	-0.002	1.04	1.04	-0.002
12#	500	1.18	1.18	-0.001	1.13	1.13	-0.002	1.05	1.04	-0.001
13#	600	1.20	1.20	-0.001	1.15	1.15	-0.001	1.06	1.06	-0.001
14#	700	1.22	1.21	-0.001	1.17	1.17	-0.001	1.09	1.08	-0.002
15#	800	1.14	1.14	-0.001	1.09	1.09	-0.001	1.01	1.01	-0.002
16#	900	1.13	1.13	-0.001	1.08	1.08	-0.001	1.00	1.00	-0.001
17#	1 000	1.15	1.15	-0.001	1.11	1.10	-0.001	1.02	1.02	-0.001

(2)通过 MIKE21 模型计算分析可知,膜袋砂造成的上游水位壅高影响有限,河道流场变化主要局限于隧道附近,流速有所增大,流向变化较小。总体来说,施工期间工程河段整体流态较为平顺,因此河底铺设膜袋砂对秦淮新河行洪安全影响较小。

(3)本次宁芜铁路隧道下穿秦淮新河段主体工程安排在非汛期实施(首年 10 月一次年 4 月底),工期安排较为紧张,应充分做好人力、物力等各项保障措施,保证各施工节点衔接有序,确保河底铺设的膜袋砂在汛期来临之前拆除完毕,以免妨碍行洪。

参考文献:

[1] 张利,孟晓路.基于 MIKE21 FM 模型的跨河桥梁壅水影响研究[J].中国防汛抗旱,2018(4):44-47.
[2] 张健,王霞,任锦亮,等.浅谈 MIKE21 模型在桥梁防洪评价补偿方案中的应用[J].水利技术监督,2019(6):64-69,222.
[3] 刘顺萍,果有娜,丁志宏.MIKE21 FM 中的涉水建筑物不同概化方法效果分析[J].海河水利,2018(6):46-48.
[4] 刘雪聪,耿鹏程,曹立,等.MIKE21 模拟跨河桥梁对河势的影响[J].人民黄河,2020(增刊 1):24-25,29.
[5] GB 50201—2014,防洪标准[S].
[6] 张志林,贾艾晨.基于 MIKE21 FM 模型的河道流场图绘制[J].东北水利水电,2016,34(10):35-37,70.

(上接第 131 页)

[6] 付晓鹏,马晴,廖贵星,等.桥梁梁柱式型钢护栏结构优化研究[J].桥梁建设,2020(增刊 1):44-50.
[7] 王英,杜明峰,张大伟.基于屈服线理论的组合式防撞护栏设计方法[J].城市道桥与防洪,2020(3):98-99.
[8] 孙胜江,朱长华,梅葵花.玄武岩纤维复合材料梁-柱式护栏防撞性能[J].振动与冲击,2019(21):265-270.
[9] 焦宇,亢寒晶,龚帅,等.GFRP 筋混凝土护栏设计与安全性能分析[J].城市道桥与防洪,2019(1):176-180.
[10] 杨志杰.桥梁护栏与基础桥面板的匹配性防撞设计[J].城市道桥与防洪,2022(6):93-99.
[11] 宗志荣.基于新规范的桥梁防撞护栏设计[J].城市道桥与防洪,2020(6):94-97.
[12] 黄宗根.某上跨铁路立交桥防撞护栏维修加固设计[J].城市道桥与防洪,2018(4):162-165.
[13] 杨维威.大吨位宽幅长节段后支点菱形挂篮同步行走施工技术[J].铁道建筑技术,2019(5):60-63.