



长江下游过江隧道工程河段极限冲刷深度研究*

赵维阳, 胡 勇, 张 胡

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 针对长江下游过江隧道工程设计中如何合理确定最大埋深问题, 以江阴第二过江通道隧道工程为例, 分析近年来工程河段河床演变特性和水沙运动特征, 从工程安全角度出发确定具有代表性的模型试验水沙控制条件。采用物理模型试验, 对江阴第二过江通道隧道工程附近河床极限冲刷深度进行预测, 并与数学模型计算结果进行对比分析。结果表明: 物理模型与数学模型研究成果较为一致; 不同水文条件下, 河床普遍受到冲刷, 左侧江阴副槽最大冲刷发生在深槽右侧, 右侧主槽最大冲刷发生在深槽左侧。

关键词: 隧道; 通航; 航道; 极限冲刷深度; 模型试验

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0120-07

Maximum scouring depth for river reach of underwater tunnel project in lower reaches of the Yangtze River

ZHAO Wei-yang, HU Yong, ZHANG Hu

(China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: It is important to reasonably determine the maximum burial depth for the design of the underwater tunnel project in the lower reaches of the Yangtze River. Taking the second tunnel project of Jiangyin as an example, this paper analyzes the characteristics of riverbed evolution and water and sediment movement of the project reach in recent years and determines the typical water and sediment control conditions for model tests from the point of view of engineering safety. The paper uses the physical model test to predict the maximum scouring depth of the riverbed near the second tunnel project of Jiangyin and compare the results with those calculated by the mathematical model. The results indicate that the research results of the physical model and mathematical model are consistent. Under different hydrological conditions, the riverbed is generally scoured. The maximum scour of the secondary channel of Jiangyin on the left side occurs on the right side of the deep channel, and the maximum scour of the main channel on the right side occurs on the left side of the deep channel.

Keywords: tunnel; navigation; waterway; maximum scouring depth; model test

随着长江经济带战略的深化实施及扬子江城市群建设的推进, 长江南北两岸城市产业向沿江地区集聚, 城市之间互动性不断增强, 一体化、集聚式发展态势明显。为缓解跨江交通问题, 修建过江通道不失为一项有效的工程措施。过江隧道工程因占地小、不影响通航, 近年来广受重视^[1]。在设计过江隧道时, 工程河段河床冲淤情

况直接影响隧道的埋设位置和工程建设方案, 同时也是确定隧道最大埋深的前提。埋深过小, 虽然可减少投资, 但一旦河床冲刷较大使隧道上方覆土层厚度小于设计标准或使隧道顶部出露, 则工程运营安全将受到严重威胁; 埋深过大, 虽然工程安全可得以保障, 但会增加工程投资及施工难度。如何合理确定最大埋深, 既能保证工程安

收稿日期: 2022-04-18

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600700)

作者简介: 赵维阳(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事河床演变及桥渡设计与研究。

全又能尽量减小投资, 是过江隧道工程设计中必须解决的关键问题。

隧道埋设在河床底下主要受自然冲刷为主, 众多学者通过物理模型试验和数学模型计算等方法对此类问题进行研究^[2-4]。本文在总结前人研究的基础上, 以江阴第二过江通道隧道工程为例, 通过河床演变分析、物理模型试验和数学模型计算相结合的方法对隧道工程河段河床极限冲刷深度进行研究, 为此类问题的研究提供参考。

1 河道概况

长江下游扬中河段上起五峰山, 下至鹅鼻嘴, 总长约 91.7 km, 该河段进出口均由山岩石矶形成良好的天然节点控制, 其间包含了太平洲、落成洲、炮子洲、录安洲等江心洲。扬中河段包括口岸直水道、泰兴水道和江阴水道。其中, 江阴第二过江通道隧道工程位于江阴水道, 上起连成洲, 下迄鹅鼻嘴, 全长约 22 km, 平面形态呈两端窄、中间宽的藕节状, 进口处受右岸天生港矶头导流岸壁控制, 河宽约 2.0 km, 出口鹅鼻嘴处河宽仅 1.4 km, 中间最宽处达 4.4 km, 见图 1。河道单一向南微弯, 近百年来主流及深槽紧贴南岸。因江面宽阔、水流分散, 泥沙易在六圩—八圩间落淤; 北侧为次深槽所在, 年际间河床冲淤变化幅度较南侧大。总体来看, 数十年来该河段除北侧局部区域冲淤明显外, 大部分地段深槽、岸线变化较小, 为长江中下游较为稳定的河段之一。

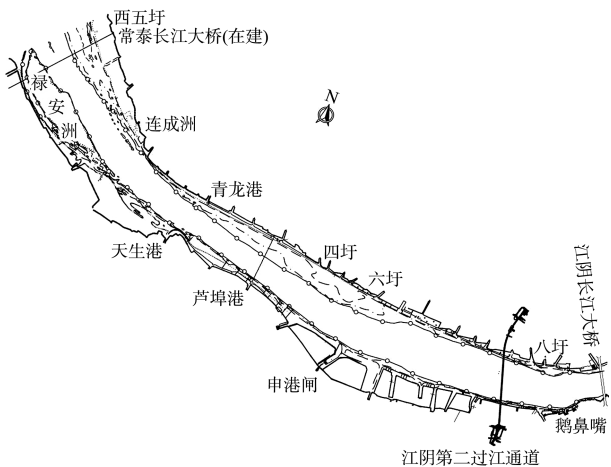


图 1 工程河段河势及隧道布置

江阴第二过江通道隧道工程上距在建的常泰长江大桥约 27 km, 下距已建的江阴长江大桥约 5 km。经深入分析比较, 推荐线位综合过江条件最优, 因此本文主要围绕推荐线位的极限冲刷深度进行分析研究。

2 工程河段近期河床演变特点

2.1 总体演变特性

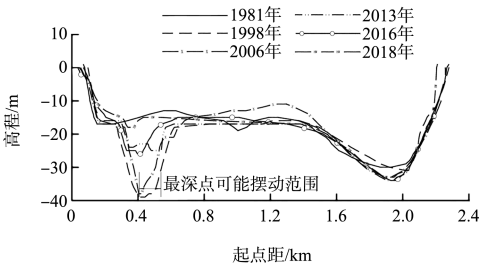
扬中河段进口段南岸有五峰山处河宽相对狭窄, 受南岸微弯形山丘节点的控制, 深槽紧靠南岸, 40 余年来河势稳定少变。随着扬中河段总体河势的稳定, 高港灯以下顺直段的入流条件也逐渐稳定, 虽然受落成洲右汊发展影响, 弯道出口处主流仍有所摆动, 但由于落成洲右汊分流仅占总流量 1/5, 其对出口段主流的改变有限, 再加上近期上游嘶马弯道崩退的趋势已得到控制, 弯道曲率半径基本保持稳定, 上游弯道段对下游顺直段的影响较小, 河道的演变主要表现出宽浅型长顺直河段的演变特性。

江阴水道为单一顺直微弯型河道, 该河段主槽偏靠南岸一侧, 受南岸临江山体阶地及抗冲性较强的土质制约, 长期以来南侧深槽及岸线变化较小, 南深槽以北的河床则年际间有所冲淤, 变化幅度较南侧略大。近 40 余年来该段除北侧局部冲淤明显外, 大部分深泓、岸线及断面形态变化较小, 保持相对的冲淤平衡状态。

2.2 工程附近河床冲淤变化

江阴第二过江通道隧道工程位于江阴水道下段, 该线位断面形态在不同年份呈现近似“W”或“V”形, 见图 2。断面主槽常年贴右岸, 1981 年以来深槽位置变化不大, 一直以来是该处河段的主航道, 河床有所冲淤变化, 1981—2006 年冲刷, 2006 年以后基本趋于稳定, 最深处高程约 -34 m, 深槽右侧岸坡自 1998 年以来一直保持相对稳定, 变动幅度不超过 40 m。断面左侧自岸线至江心在 1981 年分布有广阔的浅滩, 1998 年受洪水影响, 冲刷形成江阴副槽, 最大深度达 -39.7 m, 1998—2006 年该副槽有所淤积变窄, 最大深度仍达

-38 m, 2006—2011 年该副槽快速淤积消失, 2011—2016 年有所冲刷, 最大深度约-26 m, 2018 年淤积变浅, 最大深度为-18 m。断面中部是江阴水道左岸浅滩向下游延伸的尾端, 呈现冲淤交替的特征, 除 1998—2006 年右侧出现显著淤积, 其余年份保持相对稳定, 多年来高程在-20 m 以内。总体来看, 工程局部河床年际变化相对较大, 其最深点基本在 130 m 范围内变化。



注：采用 1985 国家高程基准。

图 2 过江通道推荐线位处横断面变化

2.3 江阴副槽演变分析

江阴副槽的变化同时受长江径流和潮流的影响, 其形成及发展过程与该河段心滩的演变相关联。大水年在洪水作用下江阴副槽冲刷扩大, 副槽右侧形成心滩, 心滩上段与江阴水道左岸边滩相连, 下段沿江阴副槽向下游延伸, 由推荐线位横断面变化情况可以看出(图 2), 大水年(如 1998 年)在汛期过滩水流的作用下心滩有所冲刷。而在枯水年, 潮流界上移, 江阴副槽所在河段涨潮流占优, 且持续时段比洪水年更长, 在涨潮流作用下副槽向上游冲刷发展, 其右侧心滩由于水深较浅, 泥沙易于落淤沉积, 因此, 心滩逐渐淤积展宽, 如推荐线位在极端枯水年 2006 年, 副槽冲刷发育, 心滩淤浅, 见图 3。

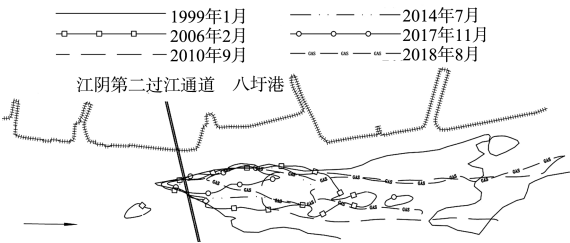


图 3 左侧副槽-20 m 等高线变化

总之, 江阴副槽随水文年不同而变化, 多年来无趋势性变化, 极端水文年条件下, 副槽仍然

存在冲刷加深的可能, 因此, 在确定隧道埋深时须充分考虑历年包络线确定的最深点。

2.4 河床演变影响因素分析

2.4.1 来水来沙条件

扬中河段虽位于长江河口地区, 但长江口潮流界随径流强弱和潮差大小等因素的变动而变动, 枯季潮流界可达镇江附近, 洪季潮流界可下移至江阴附近, 河段处于潮流界变化区, 主要受径流控制, 同时也受潮汐的影响。潮流和水沙特性表明: 中洪水期无涨潮流, 枯水大潮时涨潮流平均流速小于 0.5 m/s, 最大流速在 0.7 m/s 左右, 小于床沙起动流速。因此, 涨潮流对本河段河床演变不起主要作用, 影响河床冲淤变化的来水来沙条件主要是上游径流和来沙。

水沙条件变化特征主要表现为来沙量大幅减少, 来水量和泥沙粒径变化趋势不显著。河道水流处于不饱和状态, 引起河道发生持续的冲刷下切, 且冲刷主要发生在枯水河槽, 三峡工程蓄水运用以来扬中河段除部分浅滩淤积外基本上处于全线冲刷状态。

2.4.2 河床边界条件

在自然条件下, 南岸抗冲性强, 相对较稳定, 北岸抗冲性差, 容易冲刷变化。20 世纪 70 年代以后, 水利部门对嘶马弯道、白沙洲、小决港、录安洲等处崩岸严重的岸线进行重点守护, 两岸岸线逐渐趋于基本稳定。由于河床质为粒径 0.15~0.23 mm 的细沙, 而主槽内粒径较粗, 滩面粒径较细, 在河势基本稳定的前提下, 主要表现为滩槽的变化。

2.4.3 大洪水的影响

长江下游连续发生较大洪水, 其中 2016 年大通站实测最大流量 7.07 万 m³/s, 平均流量为 3.31 万 m³/s, 为 1998 年以来的首位, 日均流量大于 4.5 万 m³/s 的时间达到 120 d, 年输沙量仅为 1.52 亿 t; 2017 年来水也相对偏丰, 大通站实测最大流量也达到 7.06 万 m³/s。这两年来水量均较大, 而输沙量与前几年相比变化不大, 大洪水的造床作用显著, 在一定程度上起到了加快近期河

道冲刷下切的作用。

预计今后较长时间内仍将保持主流顶冲、前沿深槽贴岸的态势, 工程河段演变趋势与来水来沙条件密切相关, 目前右侧深槽常年维持在-35~-30 m 之间, 若后期来水以中、小水为主, 则深槽范围及变化会相对较小; 若来水较大, 则深槽及江阴副槽范围会进一步扩大。

2.4.4 上游三峡等枢纽工程蓄水影响

三峡枢纽工程蓄水运行对下游河道河床演变的影响主要表现在来水来沙条件的改变。一般情况下, 由于来水量变化不大, 来沙量剧减, 下游河道将产生冲刷下切。鉴于上游来沙量的减少, 实测资料分析表明, 河床总体表现为冲刷态势。

根据 1999 年 1 月和 2014 年 12 月地形测图比较, 扬中河段 0 m 线以下河槽冲刷泥沙 5.23 亿 m³, 河床平均冲深 2.32 m。上游溪洛渡、向家坝、白鹤滩、乌东德等水电枢纽工程建设运行后, 上游来沙量将进一步减小, 根据长河段数学模型未来 15 年河床冲淤演变预测分析表明, 扬中河段河床总体仍呈冲刷趋势, 但冲刷强度较三峡蓄水后 15 年变化来说有所减轻, 上游来沙减小后, 扬中河段总体河床稳定性有所提升, 不会对过江通道桥梁工程的布置带来明显影响, 但须关注河床总体冲刷问题。

3 物理模型

3.1 模型概况

物理模型试验研究范围上起江阴水道界河口, 下至通州沙龙爪岩, 全长约 88 km, 根据实测河床地形按平面比尺 600 和垂直比尺 125、变率为 4.8 缩制而成^[5-7], 模型平面布置见图 4。进口流量选用电磁流量计控制模型入流, 出口水位选用远程控制的自动翻板门进行调节。根据最新的实测地形及水文资料对模型水面线、断面流速分布及汉道分流比等进行验证, 验证结果满足有关规程、规范要求。

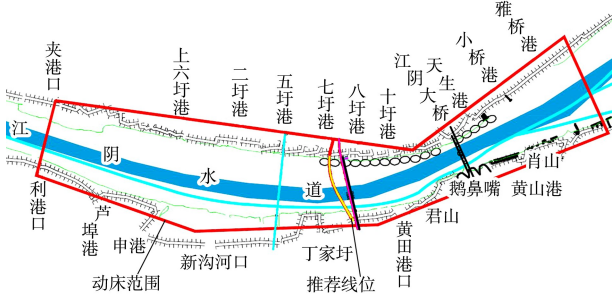


图 4 研究区域模型布置

3.2 试验工况

为了研究工程河段不利水文条件下的河床冲淤变化情况。动床模型试验条件不仅要考虑天然情况下的水沙过程, 同时还要考虑可能发生的最不利的水沙条件^[8-10]。

动床模型系列年水沙条件的选择应考虑三峡水库蓄水后的大水大沙、中水中沙、小水小沙系列, 还应考虑近几年实际发生的水沙系列, 再进行组合。100 a 一遇流量条件下, 三峡水库蓄水后, 由于蓄水拦沙的作用, 使得下游含沙量明显减小, 含沙量过程以 1998 年含沙量过程为基准, 100 a 一遇水文条件下含沙量均按减小 60% 处理。300 a 一遇流量条件下, 参照 100 a 一遇流量计算条件进行选取。系列年条件下, 三峡水库蓄水后, 长江下游的径流发生了较明显的变化, 主要表现在上游径流总量减小、洪季流量减小而枯季流量略有增加, 总输沙量与来水含沙量减小。2012—2016 年水沙系列包含了大水中沙、中水中沙、中水小沙、小水小沙的水沙年份, 可以代表三峡水库运行以来冲刷相对不利的系列组合。因此, 采用 2012—2016 年作为动床模型试验系列年, 同时考虑可能发生的最不利的水沙条件, 加上 100 a 和 300 a 一遇流量水文年作为试验条件。

流量以 1998 年作为典型年进行流量放大, 含沙量过程采用 1997—2016 年流量含沙量关系的下包线进行确定。水沙条件概化过程见图 5。

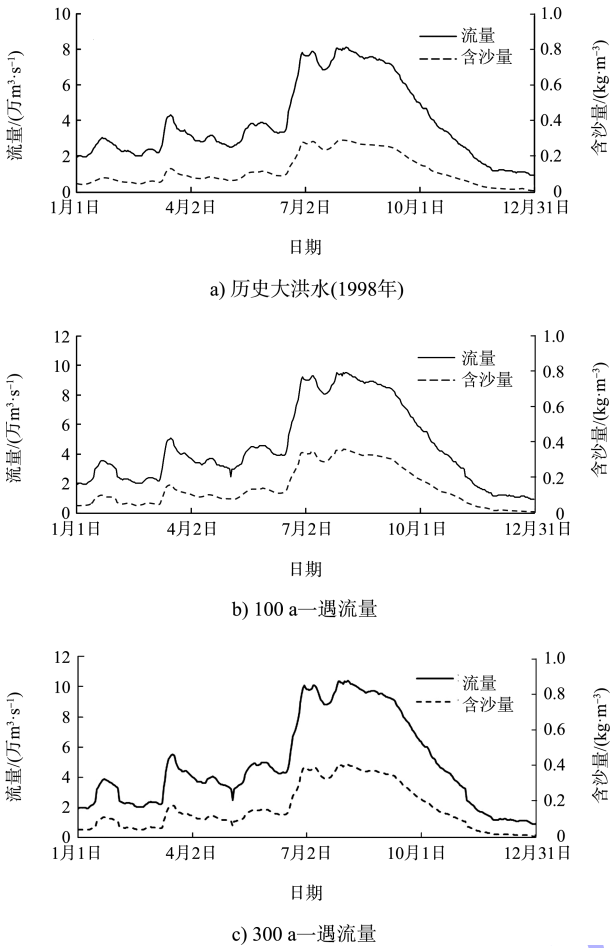


图5 水沙条件概化过程

4 河床冲刷深度分析

4.1 自然冲刷横断面包络线分析

结合工程附近河床冲淤变化情况，工程局部河床年际变化相对较大，其最深点基本在 130 m 范围内变化。从安全角度考虑，隧道断面左侧江阴副槽包络线最深点高程取-41.3 m，右侧主槽包络线最深点高程取-35.9 m，见图 6。

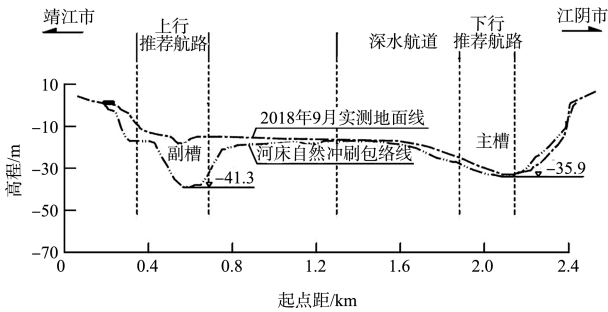


图6 推荐线位处横断面变化包络线（自然冲刷）

4.2 极限冲刷横断面包络线分析

推荐线位断面在不同水文条件下的最深点高程及深槽宽度见表 1。可以看出，在 2012—2016 系列年末，江阴主槽最深点达到-34.3 m，相对起始地形冲深 1.6 m，-30 m 等高线宽度增加 86 m；系列年+100 a 一遇流量水文年后，江阴主槽最深点高程达到-37.8 m，相对冲深 5.1 m，-30 m 等高线宽度增加 471 m；系列年+100 a 一遇流量+300 a 一遇流量水文年后，江阴主槽最深点高程达到-39.1 m，相对冲深 6.4 m。推荐线位左侧江阴副槽在初始地形（2018 年）时最深点高程为 -25.0 m，经 2012—2016 系列水文年后，最深点高程为-34.2 m，相对冲深 9.2 m，出现-25 m 等高线，宽度为 145 m；系列年+100 a 一遇流量水文年后，江阴副槽最深点高程降低至-45.4 m，相对冲深达到 20.4 m，-25 m 等高线由于与主槽 -25 m 等高线连成一片，宽度增大到 1 846 m，同时出现-30、-35、-40 m 等高线；系列年+100 a 一遇流量+300 a 一遇流量水文年后，江阴副槽最深点高程为-47.8 m，相对冲深 22.8 m，-25 m 等高线宽度增大至 1 910 m。

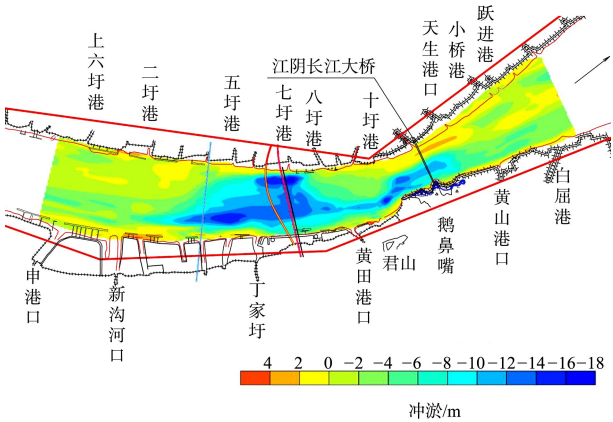
表 1 推荐线位断面最深点及深槽宽度

工况	江阴主槽					江阴副槽						
	最深点起 点距/m	最深点 高程/m	相对冲 深/m	-30 m 等高线 宽度/m	-35 m 等高线 宽度/m	最深点 起点距/ m	最深点 高程/m	相对冲 深/m	-25 m 等高线 宽度/m	-30 m 等高线 宽度/m	-35 m 等高线 宽度/m	-40 m 等高线 宽度/m
初始地形(2018 年)	2 670	-32.7	-	218	-	1 116	-25.0	-	-	-	-	-
系列年末(2016 年末)	2 670	-34.3	1.6	304	-	1 116	-34.2	9.2	145	-	-	-
系列年+100 a 一遇	2 730	-37.8	5.1	689	419	1 176	-45.4	20.4	1 846	244	159	81
系列年+100 a 一遇+300 a 一遇	2 670	-39.1	6.4	818	487	1 176	-47.8	22.8	1 910	330	215	131

注：取线位下最深点；江阴副槽-25 m 等高线与主槽连成一体。

总体来看，推荐线位断面地形变化主要表现为主槽冲刷下切和心滩的冲蚀，断面两侧边滩及

岸坡冲淤幅度相对较小，见图 7。



注：淤积为+，冲刷为-。

图 7 河床冲淤平面分布云图

综合分析推荐线位附近主槽和江阴副槽的冲淤变化，在系列年+100 a 一遇流量+300 a 一遇流量水文年作用下，主槽和副槽均以冲刷为主，平面形态上长度和宽度均有所增大。在极限冲刷情

况下，左侧江阴副槽最深点河床高程为-47.8 m，右侧主槽最深点河床高程为-39.1 m，见图 8。

将物理模型试验结果与数学模型计算结果进行比较，物理模型试验采用的起始地形及水沙条件与数学模型相同。数学模型计算结果表明，综合分析推荐线位中心断面及其左右两断面的冲刷结果，在极限冲刷情况下，江阴副槽位置出现-45.0 m 的冲刷坑，主槽局部位置形成-40.0 m 的冲刷坑，左侧江阴副槽最深点河床高程为-46.5 m，右侧主槽最深点河床高程为-40.6 m(图 8)。数学模型计算的推荐线位附近左侧江阴副槽最深点河床高程，相较于物理模型试验结果高约 1.3 m；数学模型计算的推荐线位附近右侧主槽最深点河床高程，相较于物理模型试验结果低约 1.5 m，其河床冲淤变化趋势基本一致。

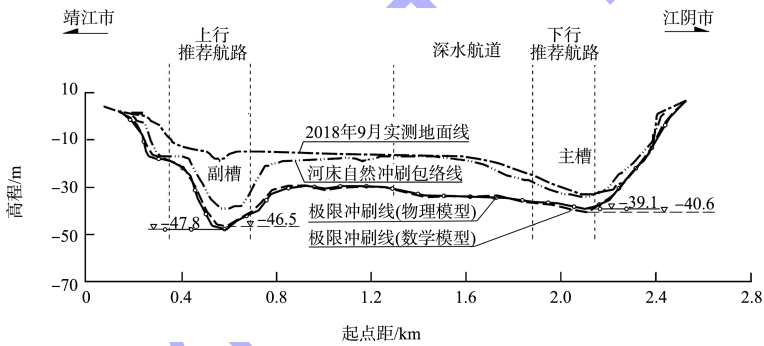


图 8 推荐线位处横断面变化包络线

综合以上物理模型试验及数学模型计算成果，在极限冲刷情况下，从偏安全角度考虑，选取其极小值作为最大冲刷取值，即推荐线位断面处左

侧江阴副槽外包络线最深点河床高程为-47.8 m，右侧主槽外包络线最深点河床高程为-40.6 m，见图 9。

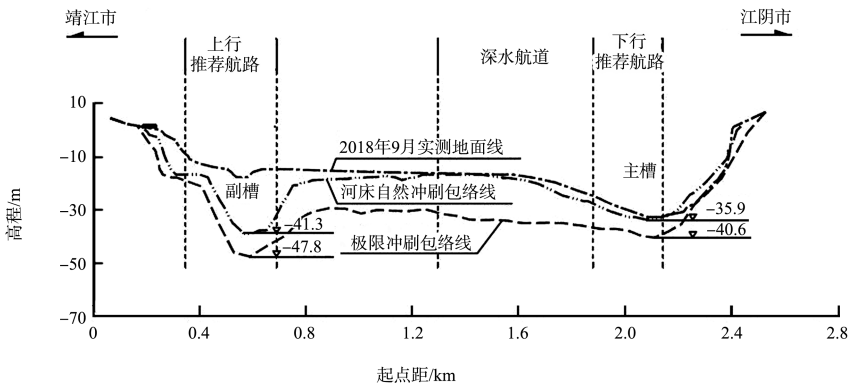


图 9 推荐线位处横断面综合包络线变化

5 结 论

- 1) 推荐线位断面地形变化主要表现为主槽冲刷下切和心滩的冲蚀，断面两侧边滩及岸坡冲淤幅度相对较小。
- 2) 不同水文条件下的隧道断面河床冲淤特性相似，均普遍受到冲刷，左侧江阴副槽最大冲刷发生在深槽右侧，右侧主槽最大冲刷发生在深槽左侧。
- 3) 在物理模型试验结果基础上，与数学模型计算成果进行对比，结果表明以上方法确定的极限冲刷深度是合理的，对工程而言是偏安全的，可为合理确定过江隧道工程埋置深度提供参考依据。

参考文献：

[1] 天津水运工程勘察设计院有限公司, 中铁武汉勘察设计院有限公司. 江阴第二过江通道工程航道通航条件影响评价报告[R]. 武汉: 中铁武汉勘察设计院有限公司, 2019.

[2] 于洋, 李瑞杰, 王华, 等. 南京市拟建过江隧道河段河床极限冲刷深度研究[J]. 人民长江, 2020, 51(9): 6-11.

[3] 魏帅, 李国禄, 陈述. 长江下游过江隧道河段最大冲深数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2016(1): 1-8.

[4] 王华, 曹双, 于洋, 等. 南京河段拟建过江隧道河段河床冲刷数值模拟[J]. 水运工程, 2019(11): 67-73.

[5] 孙凯旋, 高亚军, 李国斌, 等. 重庆长江隧道河床演变及冲刷预测[J]. 水运工程, 2020(7): 181-186, 198.

[6] 李靛亮, 李文全. 《内河通航标准》中水下隧道与锚地安全间距的探讨[J]. 水运工程, 2018(12): 99-103, 109.

[7] 代坤. 重庆主城区快轨过江隧道埋深设计标准的研究[J]. 重庆建筑, 2021, 20(5): 54-57.

[8] 郭文献, 李越, 卓志宇, 等. 三峡水库对长江中下游河流水文情势影响评估[J]. 水力发电, 2019, 45(5): 22-27.

[9] 徐宇程, 朱首贤, 张文静, 等. 长江大通站径流量的丰平枯水年划分探讨[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(6): 19-23.

[10] 付桂. 长江口近期来水来沙量及输沙粒径的变化[J]. 水运工程, 2018(2): 105-110. (本文编辑 王璁)

(上接第 119 页)

2.2 工作流程

由于不同规格的闸门重心线不同，但吊耳布置相同，在使用本装置启闭不同规格闸门时，会出现梁体与闸门绕启闭机动滑轮有一定旋转的情况。本装置通过液压油缸调整梁体与连接构件的距离，使液压抓梁和闸门由倾斜调整为水平，通过倾角传感器测量抓梁的水平度，并将液压油缸的动作与倾角传感器连锁，当抓梁水平度达到要求时，停止液压油缸的动作，控制系统存储液压缸行程位置，仅首次使用时须率定不同规格叠梁闸门的调平油缸行程并进行存储，后续可直接使用。四吊点液压自动抓梁自平衡功能见图 3。

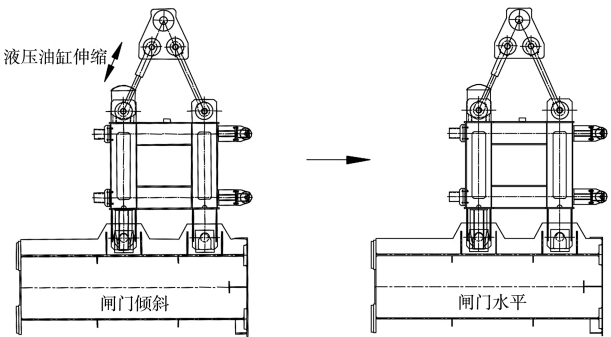


图 3 四吊点液压自动抓梁自平衡功能

3 结 论

- 1) 四吊点液压自动抓梁通过液压油缸的伸缩动作，使抓梁具有自平衡功能，可以适应不同重心闸门的启闭，提高其通用性。
- 2) 四吊点液压自动抓梁的自平衡功能使闸门无需设计配重，且不同规格闸门吊耳及定位杆布置相同，即简化了闸门设计，又减小了闸门工程量，降低工程投资。

参考文献：

[1] 刘晓光, 吕敏, 魏玲, 等. 船闸桁架式检修闸门的适用性分析[J]. 水运工程, 2021(10): 291-294.

[2] 陈仲盛, 舒斌. 桁架式叠梁闸门适配自动抓梁的改进设计[J]. 水运工程, 2020(1): 103-106.

[3] 王鹏, 安术鑫. 自动抓梁在水利水电工程中的应用[J]. 陕西水利, 2013(6): 98-99.

[4] 曾文, 范如谷, 赵明, 等. 液压自动抓梁模块化设计的研究及应用[J]. 四川水力发电, 2021, 40(5): 96-101.

[5] 刘晓光, 李树海, 陶书东, 等. 吊装装置和闸门组件: 202121698368.1[P]. 2021-07-23.

(本文编辑 王璁)