

武汉长江第一越江隧道工程动床模型试验研究

汪明娜¹, 汪达²

1. 水利部长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010
2. 水利部长江水利委员会长江水资源保护科学研究所, 武汉 430051

[摘要] 长江对武汉市三大市区的交通影响很大, 城市发展, 过江交通日益拥塞。为解决这一问题, 长江第一隧道现正设计、施工。在隧道工程定床河工模型试验的基础上又进行了动床模型试验, 目的是研究隧道对河势、河床冲淤、洲滩变迁、流速分布、主流摆幅等的变化影响, 以及隧道断面处的冲刷深度, 为隧道工程安全和设计决策提供科学依据。

[关键词] 动床模型试验; 隧道; 河床断面; 越江隧道

[中图分类号] TV554, U451+.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)02-0050-04

Study on Movable-bed Model Test for the First Tunnel Drilling Project Under the Yangtze River in Wuhan

WANG Mingna¹, WANG Da²

1. Yangtze River Scientific Research Institute, Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China
2. Changjiang Water Resources Protection Institute, Changjiang Water Resources Commission, Ministry of Water Resources, Wuhan 430051, China

Abstract: The first tunnel drilling project under the Yangtze River is being carried out, in order to solve the problem of congestion of communications on Yangtze River in Wuhan. The movable-bed model test is designed to study the variations of river regimes, scour-accretions of river bed, fluvial processes, flow velocities, flow patterns and erosions of the tunnel cross-section. Reliable results are obtained, and a preliminary basis for tunnel design is provided.

Key Words: movable-bed model test; tunnel; river bed cross section; under rivers tunnel drilling

CLC Numbers: TV554, U451+.5

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)01-0050-04

0 引言

交通繁忙拥塞是现代各大都市市政难以解决的棘手问题, 而公路、铁路隧道和过江隧道可缩短旅程, 直接快捷, 可解燃眉之急。

目前, 武汉市正动工兴建第一条长江过江隧道——武汉长江隧道。该隧道全长 3 609 m, 横断面为 3 孔 1 管廊, 其中公路孔 2 孔 (双向四车

道), 净高 4.5 m, 净宽 10 m, 设计通行车速为 50 km/h, 通行能力达 60.05 万辆/d; 地铁孔 1 孔 (双向二车道); 工期 45 个月, 预计于 2008 年建成。届时, 从武昌到汉口的行程约可缩短至 7 min。筹建的隧道位于长江大桥与长江二桥 (6.8 km) 之间, 距汉江汇入长江口下游约 2 km (见图 1)。月亮湾附近的“线路 1”、“线路 2”及“线路

3” 3 个比较方案, 因各方案线路最大间距小于 200 m, 故动床模型试验重点研究“线路 2”方案。

影响水下工程的因素复杂, 特别是对水文水力的影响尤为重要, 故在规划设计之前需要进行水工模型试验, 就建隧道前后的河势、河床冲淤变化、隧址断面的可能最低冲刷高程及深泓摆幅等问题进行深入研究, 确

收稿日期: 2006-11-08

作者简介: 汪明娜, 女, 武汉市后九万方长江科学院河流研究所, 高级工程师, 主要研究方向为河流泥沙和环境保护;

E-mail: wmn214@qq.com

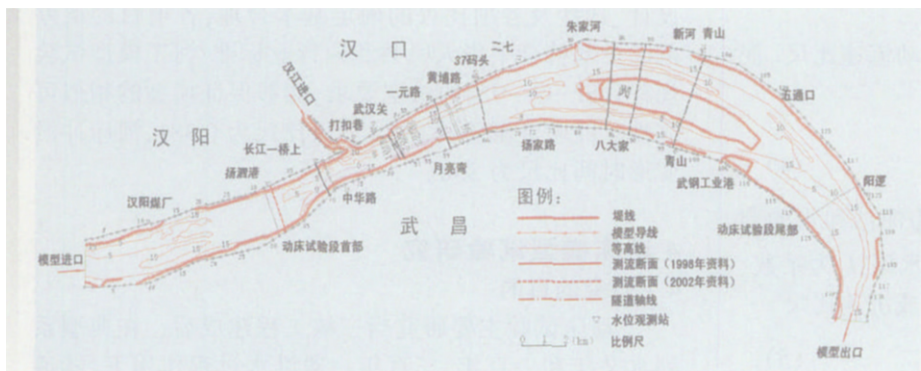


图 1 动床模型试验段布置示意图

Fig. 1 Layout plan of movable bed model test

保工程稳固安全。以下将对武汉长江隧道的河工动床模型试验进行分析研究。

1 武汉长江隧址河段河床基本情况

1.1 河床地质

武汉河段河床发育于沉积物上, 河岸大部分由粘土、亚粘土、亚砂土和粉砂组成, 局部为裸露的基岩山体和抗冲性较强的土层, 对河道有较强的控制作用。河底疏松沉积物厚度约 30 m, 砂砾层厚度约 20 m。

1.2 主流流向及深泓线走向

武汉河段主流在进口段由右向左岸过渡, 经白沙洲、潜洲的左汉, 过长江大桥转向沿右岸武昌深槽下行, 至徐家棚附近平顺进入天兴洲右汉, 左右汉在水口附近汇流后再沿左岸流出本河段。上述流经河段两岸建有堤防, 险工段已建护岸工程。沿江建有白沙洲长江大桥、长江大桥、汉口江滩公

园、长江二桥以及港口、码头等。隧址位于上段顺直分汉和下段微弯分汉河道的过渡段, 岸线较为顺直, 深泓线靠右岸, 多年来位置较稳定^[1]。

1.3 洲滩演变特点

近几十年来, 武汉河段洲滩的年内变化冲淤互现, 各洲滩的演变相互影响, 密切相关。主要特点是: 汉口边滩形成历史较长, 而汉阳边滩的演变直接影响汉口边滩的发展; 汉口边滩与武昌深槽相互依存。

1.4 隧址断面冲淤变化特点

隧址断面的冲淤变化除受隧址附近 W 形(见图 2)左右深槽演变的影响外, 还受隧址断面附近深泓线走势的影响。根据多年丰、中水年深泓线变化情况(除 1998 年 9 月隧址断面普遍冲深、局部深泓线左移外), 其余均在隧址断面右侧。隧址断面冲淤变化有如下特点。

1) 隧址断面所处河段深槽位于右岸, 且右深槽低于左深槽, 但左深

槽冲淤变幅大于右深槽。多年来, 左深槽最深点高程变化范围为 -12.1 ~ 2.2 m, 右深槽最深点高程变化范围为 -9.9 ~ 4 m。

2) 在长江和汉江水流作用下, 隧址断面, 特别是左深槽的冲淤变化受汉江洪流的影响较大, 主要表现为隧址断面左侧最深点高程值的变化与汉江入汇口处 0 m 深槽冲淤变化密切相关。

2 河工动床模型设计

2.1 动床试验模拟范围及几何比尺

动床模型是在定床模型基础上改制而成的。动床模型的试验范围以能反映隧址河段河势特点和隧道工程对上下游的河势及冲淤影响为前提。试验段上起长江大桥上游约 3 km, 下至天兴洲尾, 全长约 30 km。河床高程在 16 m 以上及有护岸工程处仍为定床范围, 其余均为动床河槽(见图 1)。动床模型平面比尺 $\alpha_L=450$, 垂直比尺 $\alpha_H=120$, 模型变率 $\eta=3.75$ 。动床模型试验应满足以下条件。

2.2 水流运动相似

惯性力重力比相似:

流速比尺

$$\alpha_v = \alpha_H^{1/2} = 10.95 \quad (1)$$

惯性力阻力比相似:

糙率比尺

$$\alpha_n = \alpha_H^{1/6} (\alpha_v / \alpha_L)^{1/2} = 1.15 \quad (2)$$

水流连续性要求:

流量比尺

$$\alpha_Q = \alpha_L \alpha_H \alpha_v = 591\,540 \quad (3)$$

2.3 泥沙运动相似

选用木屑作为模型沙。由实测资料分析可知, 汉口水文站多年平均悬移质中值粒径为 0.025 mm, 粒径大于 0.05 mm 的悬移质约占总量的 26.5%; 床沙中值粒径为 0.155 ~ 0.21 mm。天兴洲南汉床沙中值粒径为 0.088 ~ 0.191 mm。木屑模型沙容重为 1.05 t/m³, 干容重为 0.65 t/m³, 求得粒径比尺 $\alpha_d=0.65$, 中值粒径为 $d_{50}=0.27$ mm。本模型设计主要考虑悬移质中的床沙质运动相似, 据此确定泥沙运

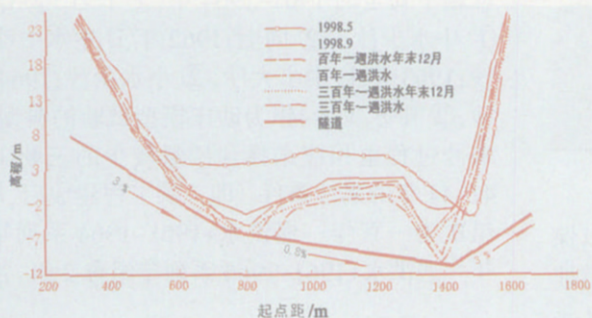


图 2 三峡建库后隧道线路 2 隧址河床横断面对比图

Fig. 2 A comparison of river bed cross sections in No. 2 tunnel after Three Gorges Project being completed

动相似的基本条件。

1) 起动相似。 $\alpha_{v_0} = \alpha_{v_i}$; 式中 α_{v_0} 为起动流速比尺。泥沙起动流速公式采用

$$V_0 = K \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g d} \left(\frac{h}{d} \right)^{1/6} \quad (4)$$

式中, V_0 为泥沙起动流速; γ_s 和 γ 分别为泥沙和水的容重; g 为重力加速度; d 为泥沙粒径; h 为水深; K 为系数。

2) 悬浮相似。根据阻力公式, 转化成沉速比尺

$$\alpha_{w_0} = \alpha_{v_i} \left(\frac{\alpha_h}{\alpha_L} \right)^{1/2} = 5.656 \quad (5)$$

3) 挟沙相似。即 $\alpha_s = \alpha_{s_i}$, 式中 α_s 和 α_{s_i} 分别为含沙量比尺和水流挟沙力比尺。悬移质含沙量比尺

$$\alpha_s = \alpha_{s_i} = \alpha_c \frac{\alpha_{\gamma_s}}{\alpha_{\gamma}} \left(\frac{\alpha_h}{\alpha_L} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中 α_c 为常数比尺, 取为 1。代入式(6)计算, 可得 $\alpha_s = 0.04$ 。

4) 河床变形相似。河床变形的时间比尺

$$\alpha_t = \frac{\alpha_L \alpha_{v_0}}{\alpha_v \alpha_s} \quad (7)$$

式中 t 为时间, α_{v_0} 为干容重比尺。

初步得出河床变形时间比尺 $\alpha_t = 2.055$ 。上述挟沙相似计算中, 假定 $\alpha_c = 1$, 与实际有差别, 因此最终的河床变形时间比尺、含沙量比尺需通过验证试验确定。模型设计的各项比尺见表 1。

表 1 动床模型比尺计算汇总

Tabel 1 Characteristic parameters of the movable-bed

相似条件	比尺名称	比尺符号	比尺值
几何相似	平面比尺	α	450
	垂直比尺	α_h	120
水流运动相似	流速比尺	α_v	10.95
	糙率比尺	α_n	1.15
	流量比尺	α_Q	591 540
	水流时间比尺	α_t	41.1
泥沙运动相似	起动流速比尺	α_{v_0}	10.95
	床沙粒径比尺	α_{d_0}	0.65
	悬移质粒径比尺	α_{d_2}	0.418
	沉速比尺	α_w	5.66
	含沙量比尺	α_s	0.381
	河床变形时间比尺	α_t	350

3 模型验证试验

为检验模型设计所确定的各项比尺的合理性, 以保证试验可靠, 必须先进行动床验证试验。同时, 考虑隧址可能的冲刷, 以汛期冲刷为验证重点, 分别采用 1998 年和 2002 年汛期实测资料进行以下重点验证试验: 地形与水沙条件验证; 水面线验证; 流速分布及分流比验证; 河床冲淤变形验证。验证结果表明, 模型

设计、选沙及各项比尺的确定基本合理, 各项目的误差范围全部符合中华人民共和国行业标准《河工模型试验规程》(SL 99—95) 的法定要求, 能够保证模型的相似可靠性。经验证试验确定, 含沙量比尺为 0.381, 河床冲淤变形时间比尺为 350。

4 动床模型试验研究

4.1 研究的目的

动床试验主要研究当三峡工程建成后, 在典型系列水文年和一百年、三百年一遇洪水过程作用下, 隧道工程河段的河势、水位、河床冲淤变化, 隧址断面处可能最低冲刷高程与深泓摆幅, 以及隧道修建对工程河段防洪、航运等方面可能产生的影响。

4.2 三峡工程建成后试验的水沙条件

根据三峡工程初步设计报告, 考虑三峡水库防洪调度和长江中下游规划蓄洪区配合计划分洪, 对 1954 年型洪水演算(不考虑三峡水库蓄水后河道冲淤变化的影响), 与现状计划分洪情况相比较, 三峡建库后武汉河段一百年一遇和三百年一遇洪水的水位值与建库前相比变化不明显, 故建库后一百年一遇和三百年一遇洪水过程近似采用与建库前相同。

三峡工程建成后, 由于水库拦蓄作用, 下泄水流含沙量减小, 虽经宜昌至武汉 600 km 河段冲刷, 含沙量沿程增大, 但进入武汉河段的水流含沙量在水库运用后 50 年内仍较建库前有所减少, 其中以第 41~50 年减少幅度最大, 较建库前平均减少了约 1/3, 其中汛期含沙量减少约 20%。

考虑本试验研究目的及对工程偏于安全的原则, 以上两条件均被采用, 即选择一百年一遇和三百年一遇洪水及对工程偏于安全的典型系列年进行现状情况的动床模型试验。

4.3 典型系列水文年选择

三峡工程坝下游冲刷一维数模计算结果表明: 武汉河段河床将发生冲刷, 历时较长, 但冲刷强度不大, 经过约 50 年冲刷量达最大值。在 1961~1970 年水文年系列中, 考虑多年平均来水来沙的情况, 选择水量偏大和对工程偏于安全的 1961~1964 年(长江, 汉江。1961 年中水少沙, 同上; 1962 年中水中沙, 中水少沙; 1963 年中水大沙, 小水少沙; 1964 年大水大沙, 中水少沙) 作为动床模型试验的典型系列年组合, 来沙过程也相应选择含沙量较少的三峡工程建成后第 41~44 年的来沙条件。即三峡工程建成后, 动床模型试验组次为一百年一遇洪水+1961~1964 系列年组合和三百年一遇洪水+1961~1964 系列年组合 2 组, 各历时 5 年^[2]。

5 隧道建成后的动床模型试验成果

5.1 试验条件

修建隧道工程后试验水文条件共 2 组, 即按上述三

峡工程建成 2 种情况, 分别进行动床模型试验。试验中隧道采用隧顶最低高程为 -11.55 m 的方案(见图 3)。

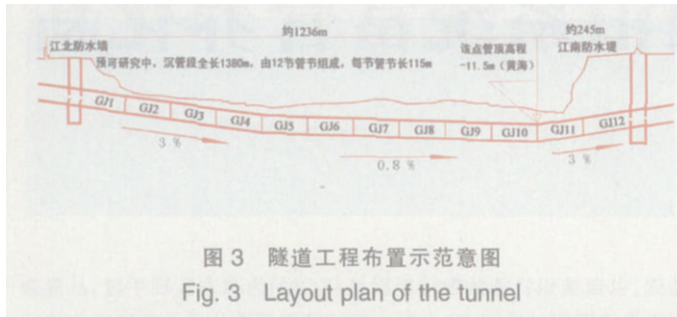


图 3 隧道工程布置示意图

Fig. 3 Layout plan of the tunnel

5.2 河床冲淤、水位、流速分布及汉道分流比变化

5.2.1 河床冲淤变化

修建隧道后, 隧道附近局部河床冲淤有所变化。2 种试验水文条件组合中, 在建库三百年一遇洪水+典型系列年试验条件下, 随着上游来水来沙条件的改变, 河床冲刷, 隧道顶部逐渐出露床面, 汛期出露程度加剧, 汛后 9-10 月达到最大, 出露长度约为 20~140 m, 出露高度约为 1~3 m^[3]。

5.2.2 水位变化

在长江河道中修建隧道, 若隧道露出河床, 占据部分过水断面面积时, 将产生阻水作用, 可能会造成隧址上游河段水位的抬高, 其影响范围主要取决于沉管阻水面积占断面总过水面积的比例。隧道修建前后, 在各级流量条件下, 隧址附近各水位站水位变化均在模型测量误差范围之内, 试验结果为 0.02%~0.6%。因此隧道的修建对其上、下游水位无明显影响^[3]。

5.2.3 流速分布变化

为了观测修建隧道前后隧址附近流速场的变化, 共布设了 3 个测流断面。在建库后三百年一遇洪水中, 当流量为 29 216 m³/s 时, 隧址附近流速场无明显变化, 最大相对差值不超过 5%, 大部分相对差值<3%^[3]。

5.2.4 天兴洲汉道分流比变化

三峡建库后, 在三百年一遇洪水年中, 流量为 46 079 m³/s 时, 隧道修建前, 天兴洲左汉分流比为 27.45%, 隧道修建后左汉分流比为 28.36%, 说明隧道修建前后天兴洲左汉分流比无明显变化。

5.3 对河势、防洪和航运影响的分析

5.3.1 河势变化

武汉河段由于受左右岸山矶节点的控制, 加之历年实施抛石护岸工程, 从 20 世纪 60 年代以来, 历年河道平面形态及河床深泓变化不大。在三峡工程建成后的三百年一遇洪水的年试验条件下, 建隧道后该河段上述规律没有发生明显改变, 河道深泓没有出现明显的易位。修建隧道前后, 隧址河段主流线随流量大小变化规律基本一致, 在三峡工程建成后一百年一遇洪水年试验条件下, 修建隧道后, 主流线沿程走势亦无明显变化。因此,

工程河段的河势不会因隧道的修建而改变。

5.3.2 防洪

试验成果表明, 隧道的修建对工程河段的水位、流速均无明显影响, 而且近岸流速没有明显增大的趋势。因此, 隧道的修建对武汉河段的防洪无明显影响。

5.3.3 航运

试验结果表明, 隧道的修建对工程河段的水位、流速无明显影响, 隧道的修建对航运也无明显影响。

6 结语

长江武汉河段进口的左右岸有龟山、蛇山控制节点, 近几十年来河势基本稳定。左岸汉阳和汉口的洲滩变化较小, 已建成长 10 km 护岸绿化的汉口江滩公园。隧址断面冲淤主要受上游长江水沙条件的影响, 同时还受到汉江来水来沙条件的影响。在一般水文年条件下, 无论是汛期还是非汛期, 隧址断面右侧最深点高程明显低于左侧。

隧道(右岸最低隧顶-11.55 m 方案)的实体模型试验结果表明, 三峡工程建成前后, 在一百年一遇洪水与典型系列年组合和三百年一遇洪水与典型系列年组合共 4 种水沙条件下, 左侧河床中的隧道顶部出露最大长度为 20~140 m, 出露最大高度为 1~3 m; 隧道附近局部河床冲淤有所变化。隧道的修建对其上下游水位、流速场和天兴洲汉道分流比均无明显影响, 对工程河段的河势、防洪、航运也无明显影响。

由于三峡工程建成后大坝下游(1 000 km 以内)将发生长时期、长距离的冲刷, 武汉河段来水来沙和河床冲淤情况非常复杂, 河工实体模型试验成果可作设计定性的依据。工程设计时隧道埋深应留有余地。右岸隧顶最低高程为 -5 m 的方案不安全, 不宜采用。隧道建成运行后, 需对隧道附近河床冲淤变化加强监测, 发现问题, 应及时采取措施, 以保证隧道安全、正常地运行。

参考文献(References)

- [1] WANG Mingna, LU Jinyou. Flood control and environmental improvement of Hankou Beack[C]//Proceedings of 12th International Soil Conservation Organtion Conference. Beijing, 2002: 373- 378.
- [2] 长江水利委员会. 三峡工程泥沙研究 [M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
Changjiang Water Resources Commission. Research on sediment problems in Three Gorges Project [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Publishing House, 1997.
- [3] 长江科学院. 长江隧道工程动床模型试验研究报告[R]. 2003-09.
Scientific Research Institute of the Yangtze River. Report on movable-bed model test for the tunnel through Yangtze River[R]. 2003- 09. (责任编辑 李慧政)