



船闸引航道内的异重流淤积计算*

徐进超, 李云, 宣国祥, 安建峰, 李君

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 异重流淤积是引航道的主要淤积之一, 其特点是淤积距离长、淤积总量大, 如不及时清淤, 则会减小通航水深、影响通航安全。在资料有限的条件下, 采用已有公式对引航道的异重流淤积量进行初步计算, 对认识引航道的淤积特性, 制定初步的清淤方案有着重要的意义。在现有异重流淤积计算公式的基础上, 提出了考虑异重流清水上升效应的沿程含沙量修正公式。与现有公式相比, 其计算结果与实测值更接近, 为异重流淤积量计算研究提供新途径。

关键词: 异重流; 淤积; 引航道; 船闸

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0089-06

Calculation of the deposition caused by density flow in approach channel of ship lock

XU Jin-chao, LI Yun, XUAN Guo-xiang, AN Jian-feng, LI Jun

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: The main deposition in approach channel of ship lock is caused by density flow with the characteristics of long distance and large total volume. If the deposition is not treated in time, the navigable depth will be reduced to influence on the navigation security. Due to the limited materials, it has great value for make dredging scheme to calculate the deposition volume by the existing formulas. This paper advances the improved sediment concentration correction formula along river considering the increase of clean water in density flow. The calculated results by the proposed formula matches the measured data well, which provides a new way for the density flow deposition calculation.

Keywords: density flow; deposition; approach channel; ship lock

船闸引航道中的异重流是指引航道口门区沿底层纵深潜入引航道内静水区的浑浊水流。浑浊水流潜入引航道落淤, 形成异重流淤积。异重流淤积是引航道的主要淤积之一, 其特点是淤积距离长、淤积总量大。据对广西、广东和湖南已建的 21 座船闸运行情况的调查, 泥沙淤积对通航有影响的占 14 个^[1]。三峡工程临时引航道因异重流引起的泥沙淤积量超过总淤积量的 80%^[2]; 葛洲坝三江引航道 1971 年以来的监测资料表明, 异重

流在 4 a 内产生的淤积总量为 56.98 万 m³, 如不及时清淤, 则会减小通航水深, 影响船舶进、出船闸和通航安全。

在资料有限的条件下, 采用已有公式对引航道的异重流淤积量进行初步计算, 对认识引航道的淤积特性、制定初步的清淤方案有着重要的意义。在现有异重流淤积量计算公式的基础上, 提出了考虑异重流清水上升效应的沿程含沙量修正公式, 并与以往公式及实测值进行了对比、分析。

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402003, 2016YFC0402004); 交通运输部科技项目(20113287461680); 国家自然科学基金青年基金(51509162); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20150079); 中国博士后科学基金面上资助(2015M581831)

作者简介: 徐进超(1983—), 男, 博士后, 从事水工水力学研究。

1 公式分析

国内外学者对水库、河道、船闸引航道等异重流进行了大量的研究,其研究成果主要集中在异重流潜入条件判别、异重流运动阻力、异重流持续条件、异重流排沙等方面。选取精度相对较高的金德春^[3]、范家骅^[4]、韩其为^[5]、李义天^[6]等4个异重流公式,对引航道中异重流的流速沿程变化、含沙量沿程变化进行分析。

1.1 金德春方法

金德春认为浑水异重流在一定时期内可认为是一种恒定均匀流,见图1。利用异重流下潜阻力损失最小原理,通过描述异重流恒定均匀变量流运动的一元能量方程,推导异重流的计算公式。

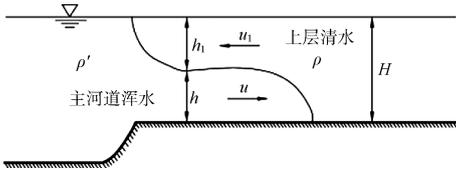


图1 异重流运动

1) 异重流水深和潜入流速。

$$h = \frac{2}{3}H \quad (1)$$

$$u_0 = \phi \sqrt{\frac{\rho - \rho'}{\rho'} g H} \quad (2)$$

式中: h 为异重流水深; H 为口门河道的平均水深; u_0 为异重流进口潜入速度; ρ' 、 ρ 分别为浑、清水密度; g 为重力加速度; ϕ 为系数,据室内和野外试验资料,取值 0.42。

2) 异重流流速沿程变化。

根据异重流运动方程式,并假定异重流运动厚度沿程不变,可得异重流流速沿程变化:

$$\frac{u}{u_0} = \exp\left(\frac{-x}{C_{0m}h}\right) \quad (3)$$

3) 异重流含沙量沿程变化。

根据输沙平衡原理,并假定泥沙沉速沿程变化与流速沿程变化有着类似的关系后,得到:

$$\frac{S}{S_0} = \exp\left(\frac{-K\omega_0 x}{u_y L}\right) \quad (4)$$

式中: S 为异重流含沙量; S_0 为异重流进口含沙量; K 为系数; u_y 为异重流清水上升流速,取平

均值; L 为异重流潜入长度; 因 ω_0 和 u_y 均为含沙量的函数,二者比值可看作一常数,由青山运河实测资料可得到 $\frac{-K\omega_0}{u_y L} = 0.03$,代入式(4),可得:

$$\frac{S}{S_0} = e^{-0.003x} \quad (5)$$

1.2 范家骅公式

范家骅探讨了河道低浓度浑水在人工运河或引航道进口形成异重流后其流速和含沙量沿程衰减的规律。根据试验和原观结果,异重流在沉淀过程中分离出清水,通过清浑水交界面而进入上层清水层。结合水槽试验和原型观测到的异重流沉淀现象,建立了一元浑水异重流沉淀模型,导出异重流的初始速度、异重流流速和含沙量的沿程变化。

1) 异重流进口速度。

在引航道口门,假定异重流水深 h 与上层清水厚度相等,则其初始速度为:

$$u_0 = 0.65 \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho'} gh} \quad (6)$$

式中: $h = 0.5H$, H 为口门水深。

2) 异重流沿程流速。

假定异重流水深 h 沿程不变、床底水平的情况下,由牛顿第二定律导出恒定异重流运动方程:

$$\frac{du}{u} = -\frac{\lambda}{8h} ds + \frac{u_y}{uh} ds \quad (7)$$

解此微分方程,并作一定的简化处理,得到异重流的沿程流速表达式:

$$u = u_0 \left[\left(e^{\frac{-C_{0m}}{8h} + \frac{8}{\lambda} \cdot \frac{u_y}{u_0}} \right) / \left(1 + \frac{8}{\lambda} \cdot \frac{u_y}{u_0} \right) \right] \quad (8)$$

式中: λ 由试验和原观资料可取 0.02~0.03; u_y 为清、浑水交界面上异重流上升的速度,可用下式计算:

$$u_y = 0.02S_0^{-2/3} \quad (9)$$

3) 异重流平均含沙量变化。

假定泥沙沉降速度沿程变化,且忽略清水上升带走的泥沙,则由连续性方程得到:

$$\frac{dS}{S} + \frac{du}{u} = -\frac{\omega dx}{uh} \quad (10)$$

假定动水沉速沿程变化关系为:

$$\omega = \omega_0 e^{\frac{Kx}{L}} \quad (11)$$

式中: ω_0 为 $x=0$ 处的中值粒径泥沙沉速值; L 为异重流沉降距离; K 为常数。且令起始断面泥沙的动水沉速与静水沉速的关系为: $\omega_0 = \alpha\omega'_0$, α 为常数, ω'_0 为静水沉速。将式(11)代入式(10), 并进行积分求解, 得到:

$$\frac{S}{S_0} = \exp\left\{-A \frac{\lambda}{8h} x - (1+A) \ln\left(\frac{A+e^{\frac{\lambda x}{8h}}}{A+1}\right) - \frac{\alpha\omega'_0 x(1+A)}{u_0 h} \left[1 - \frac{L}{Kx} \ln\left(\frac{1+Ae^{\frac{Kx}{L}}}{1+A}\right)\right]\right\} \quad (12)$$

式中: $A = (8u_y)/(\lambda u_0)$; α 取 1.4; $K/L = 0.0008$ 。

1.3 李义天公式

李义天^[6]采用范家骅公式计算了葛洲坝三江下引航道异重流流速及含沙量, 计算表明: 在水位较低、含沙量较小的情况下, 式(8)和式(12)在定性上是合理的; 在汛期含沙量较大、水位较高的情况下, 按式(12)计算所得的含沙量是沿程递增的。究其原因, 在于范氏公式中将异重流清水析出流速简化为一定值, 但实际上其为一沿程变化值。由连续性方程可得:

$$u_y = \frac{\partial(hu)}{\partial x} \quad (13)$$

根据式(13)所得的 u_y 值, 采用与范家骅公式中相同的假定, 得到异重流的沿程流速和含沙量分别为:

$$\frac{u}{u_0} = \exp\left(-\frac{\lambda}{16h}x\right) \quad (14)$$

$$\frac{S}{S_0} = \exp\left\{\frac{\lambda x}{16h} - \frac{16\alpha\omega_0}{\lambda u_0} \left[\exp\left(\frac{\lambda x}{16h}\right) - 1\right]\right\} \quad (15)$$

1.4 韩其为公式

韩其为^[5]推导出的异重流潜入速度和沿程衰减公式为:

1) 异重流潜入速度。

$$u_0 = \phi \sqrt{\frac{\rho - \rho'}{\rho'} gH} \quad (16)$$

式中: ϕ 的取值范围为 0.405~0.65。

2) 异重流流量沿程衰减。

针对异重流的倒灌长度, 韩其为通过取紧贴床底的一维管流, 对进出流管的前、后端建立 Bernoulli 方程, 得到异重流的倒灌长度:

$$L = 1.13h/(J_0 + 0.000926) \quad (17)$$

式中: L 为异重流的倒灌长度; h 为异重流的水深; J_0 为底坡。

3) 倒灌异重流含沙量沿程衰减。

倒灌异重流流量沿程衰减表达式:

$$S = S_0 e^{-\alpha\omega\beta x/u_y} = S_0 e^{-\frac{\alpha\omega x}{u_y H}} \quad (18)$$

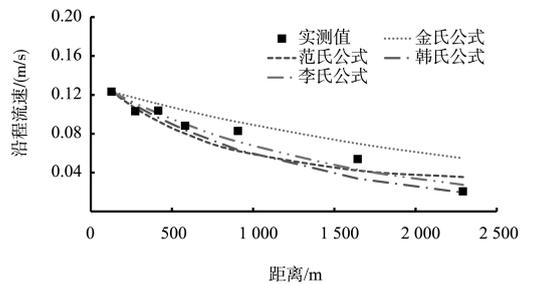
式中: α 为含沙量恢复饱和系数。

2 异重流淤积计算

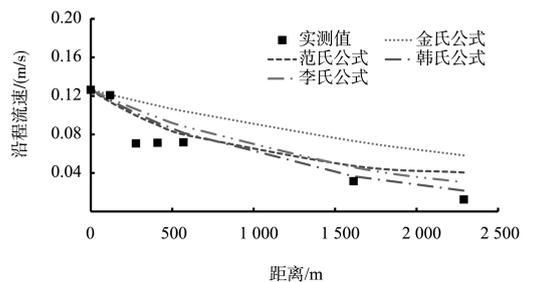
选取精度相对较高的金德春^[7]、范家骅、韩其为、李义天 4 个异重流公式, 对引航道中异重流的流速沿程变化、含沙量沿程变化进行分析。

2.1 沿程流速

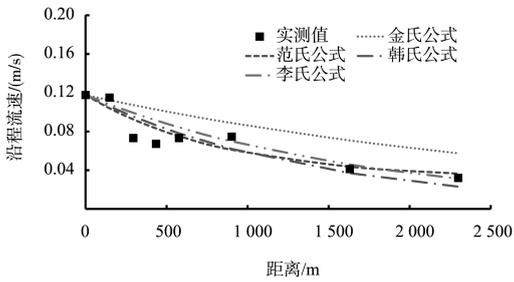
根据文献[4]中葛洲坝和青山运河中的实测资料, 对各公式的沿程流速值进行验证, 计算结果见图 2。



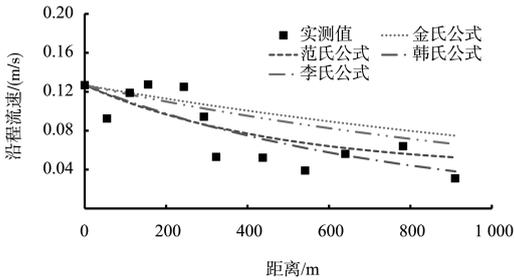
a) 1972年7月15日葛洲坝三江引航道



b) 1972年6月28日葛洲坝三江引航道



c) 1973年7月5日葛洲坝三江引航道



d) 1968年7月23日青山运河

图2 各公式异重流沿程流速对比

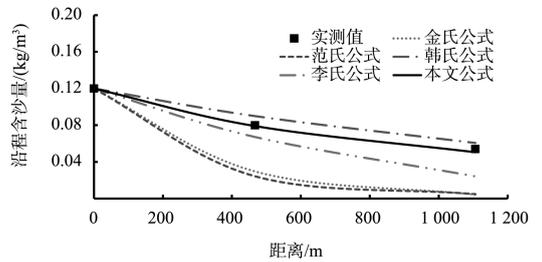
计算结果表明：李氏公式、范氏公式、韩氏公式与实测值较为接近，金氏公式中的沿程流速比实测值略大。其原因是金氏公式中综合阻力系数 C_{0m} 未知，计算中采用金德春在青山运河异重流研究中推荐的 $C_{0m} = 19.25$ 进行计算，如果此值减小，沿程流速也会相应减小。

李氏公式相对于另3个公式与实测值更为接近，其原因是范氏公式和韩氏公式均将异重流的清水上升速度假定为一定值，在异重流含沙量较小、初始速度较小时，此值的影响也相应较小；当异重流含沙量较大、初始流速也较大时，由此假定带来的差异也较大。

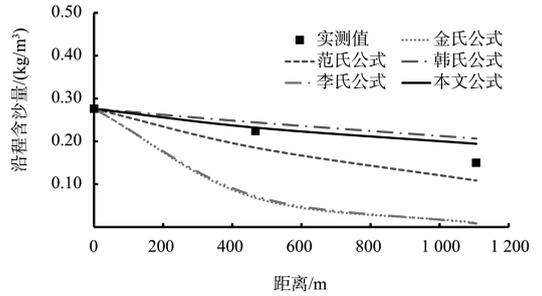
综上所述，在异重流的沿程流速计算中，需考虑清水上升速度随距离变化的影响；李氏公式的沿程流速计算方法在各实测值中的精度相对较高。

2.2 沿程含沙量

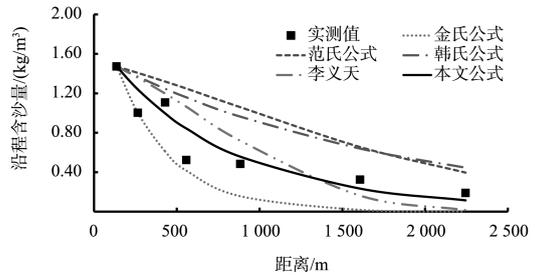
沿程含沙量的计算精度直接关系到淤积量的计算准确程度。采用文献[2, 4, 8]中的实测资料对4家公式中沿程含沙量进行计算，结果见图3。



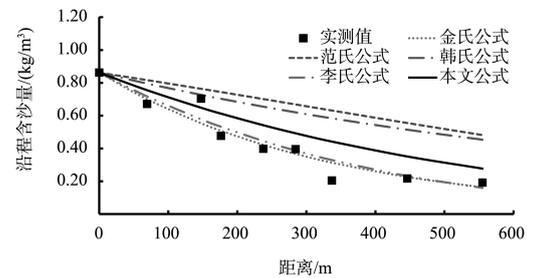
a) 2004年7月24日三峡船闸下引航道



b) 2004年9月11日三峡船闸下引航道



c) 1972年7月15日葛洲坝三江引航道



d) 1968年7月23日青山运河

图3 各公式异重流沿程含沙量对比

由图3可知，在异重流含沙量较小时，如三峡船闸下引航道2004年7月24日中初始含沙量小于 0.12 kg/m^3 时，金氏公式、范氏公式和李氏公式中含沙量衰减很快，与实测值相差较大；韩氏公式与实测值符合较好。

异重流含沙量增大时, 如三峡船闸下引航道 2004 年 9 月 11 日, 异重流含沙量在 0.276 kg/m^3 时, 范氏公式和韩氏公式的计算结果与实测值较为接近, 金氏公式和李氏公式计算结果小于实测值。

含沙量进一步增大, 如青山运河 1968 年 7 月 23 日中, 异重流含沙量 0.821 kg/m^3 时, 此时实测的含沙量衰减率增大, 金氏公式和李氏公式与实测值较为接近, 范氏公式和韩氏公式中衰减率偏小, 沿程含沙量较实测值低。

分析表明, 在韩氏公式中, 泥沙沿程衰减率较金氏公式和李氏公式低。在三峡引航道的沿程含沙量计算中, 韩氏公式的衰减率约为金氏公式的 5 倍左右^[2]; 范氏公式中泥沙的衰减率与含沙量有关, 含沙量大时衰减得慢, 含沙量小时衰减得快。

各公式中计算结果存在差异的原因主要有二, 其一是假定异重流中清水上升流速沿程不变, 如韩氏公式和范氏公式, 实际中, 在含沙量大时, 清水上升流速沿程变化对沿程含沙量有较大影响。另一个原因是, 公式推导时, 将异重流中的反向流看作清水, 实际上异重流清水上升时会带走一部分泥沙, 即上层清水中有一定的含沙量, 含沙量高时, 上层清水带走的泥沙也相应增加。为减少这些假定带来的误差, 在已有公式的基础上, 对异重流的沿程含沙量进行推导。

由连续性方程可知, 沿程含沙量的输沙率可表示为:

$$-\frac{\partial q_s}{\partial x} dx = \omega S dx + S \frac{\partial Q_y}{\partial x} dx \quad (19)$$

式中: q_s 为沿程输沙量; ω 为泥沙沉速; Q_y 为清水上升流量; S 为含沙量。根据连续性原则可知, 浑水流入量与清水流出量相等, 即 $Q_y = \frac{\partial(hu)}{\partial x}$,

代入式(19)化简得:

$$-\frac{\partial q_s}{\partial x} dx = \omega S dx + \left[-S \frac{\partial(hu)}{\partial x} dx \right] \quad (20)$$

因 $q_s = uhS$, 式(20)可化简为:

$$\frac{dS}{S} = \frac{-\omega S}{uh} dx \quad (21)$$

将范氏公式中泥沙沿程沉速公式(11)及李义天所

得的沿程流速公式(14)代入式(21)得到:

$$\frac{dS}{S} = \frac{-\alpha \omega_0}{u_0 h} e^{\left(\frac{\lambda}{16h} \frac{K}{L}\right) x} dx \quad (22)$$

式中: ω_0 为 $S=0$ 处、粒径为 d_{50} 的泥沙静水沉速; α 为常数。对式(22)积分求解可得:

$$\frac{S}{S_0} = \exp \left\{ \frac{-\alpha \omega_0}{u_0 h \left(\frac{\lambda}{16h} \frac{K}{L}\right)} \left[e^{\left(\frac{\lambda}{16h} \frac{K}{L}\right) x} - 1 \right] \right\} \quad (23)$$

由式(23)可得到引航道中沿程含沙量。将式(23)的计算结果与实测值进行对比可知, 在含沙量较大或较小的情况下二者均有较好的一致性, 见图 3。同时也可看出, 公式中 K/L 、 λ 、 ω_0 等各参数的取值对结果的影响较大。因此, 在实际工程的淤积量计算中, 应根据实测数据进行校验, 选取合适的参数计算淤积量。

2.3 淤积量估算

根据三峡枢纽 2004 年下游的水沙条件计算船闸下游引航道的异重流淤积。其中, 枢纽下游的水沙条件为黄陵庙的实测资料^[9], 见图 4。

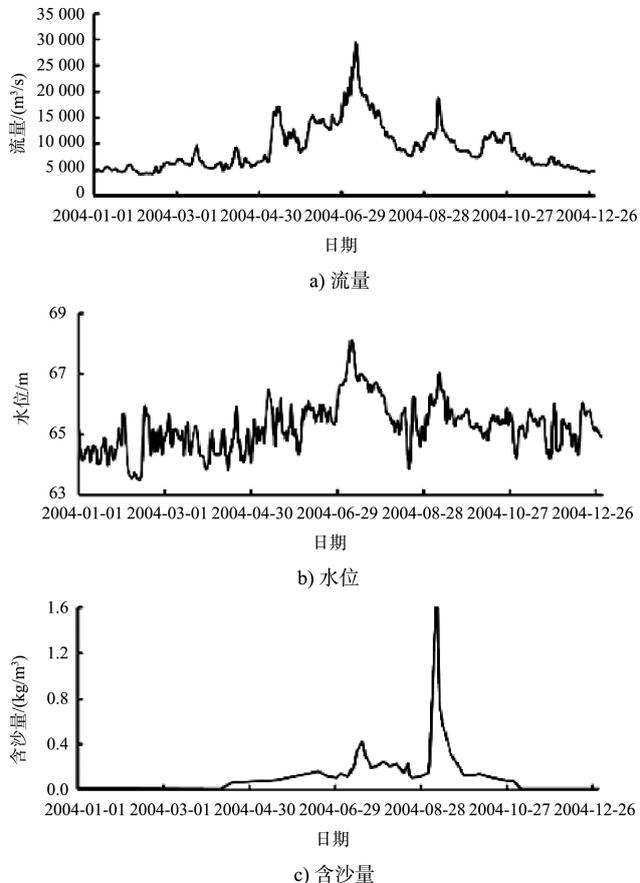


图 4 2003—2004 年黄陵庙来水、来沙条件

计算中,异重流潜入点的来沙量由黄陵庙站资料与引航道口门断面的相关关系进行推求^[8]:

$$S_{L_{23}} = 0.27S_{\text{huang}}^{0.62} \quad (24)$$

式中: $S_{L_{23}}$ 为口门处断面的平均含沙量 (kg/m^3); S_{huang} 为黄陵庙站断面平均含沙量 (kg/m^3)。

由式(23)逐日计算累加可知,2004年全年引航道泥沙淤积量为7.20万t,取淤积干密度为 $0.7\text{ t}/\text{m}^3$,则可得泥沙淤积量为 10.29 万 m^3 ,与实际淤积量 10.5 万 m^3 基本一致。

3 结论

1) 异重流的沿程流速计算式中,李氏公式相对于另3个公式与实测值更为接近。其原因是范氏公式和韩氏公式均将异重流的清水上升速度假定为一定值,在异重流含沙量较小,初始速度较小时,此值的影响也相应较小;当异重流含沙量较大,初始流速也较大时,由此假定带来的差异也越大。

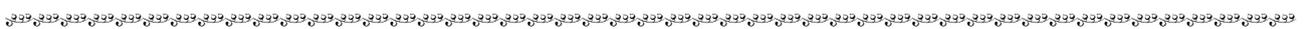
2) 在异重流的淤积计算中,将异重流中的反向流看作清水会造成淤积量的结果偏大。实际上异重流清水上升时会带走一部分泥沙,即上层清水中有一定的含沙量,在计算时需予以考虑。在

范家骅和李义天公式的基础上,对异重流的沿程含沙量进行推导,得到新的修正公式,计算结果与实测值更接近。

参考文献:

- [1] 涂启明.船闸总体设计中的泥沙淤积和防治问题[J].水运工程,1986(2):7-10.
- [2] 李国斌,许慧,尚倩倩,等.三峡工程下游引航道口门内泥沙淤积研究[J].泥沙研究,2011(6):27-31.
- [3] 金德春.浑水异重流的运动和淤积[J].水利学报,1981(2):45-48.
- [4] 范家骅.异重流泥沙淤积的分析[J].中国科学,1980(1):82-89.
- [5] 韩其为.水库淤积[M].北京:科学出版社,2003.
- [6] 李义天.引航道水沙运动数值模拟初探[J].泥沙研究,1990(1):20-29.
- [7] 金德春.广西贵县船闸引航道淤积分析报告[R].南京:南京水利科学研究院,1978.
- [8] 胡兴娥,李云中,李明超.三峡水库135m运行阶段永久船闸下引航道泥沙淤积分析[J].水科学进展,2008,19(1):1-7.
- [9] 董炳江,乔伟,许全喜.三峡水库汛期沙峰排沙调度研究与初步实践[J].人民长江,2014,45(3):7-11.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

重庆万州驸马长江大桥胜利合龙

11月23日,随着一公局建设者完成对驸马长江大桥合龙段4个匹配件螺杆的紧固作业,长江上游主跨最长的桥梁——重庆万州驸马长江大桥实现合龙,万里长江又迎来一座新的建设地标。

驸马长江大桥为悬索桥,全长2030m,主跨达1050m。从引桥步入大桥主跨,66节约标准篮球场大小的钢箱梁紧密相连,在南北两岸隧道锚重力锚、2座主塔、2根主缆以及132套吊索等主要构件的联合作用下,主桥稳稳盘踞在江面上。驸马长江大桥是重庆万州至湖北利川高速公路跨越长江的重要控制性工程,是三峡库区以及我国长江上游跨径最大的桥梁。

http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201611/t20161124_86675.html(2016-11-23)