



# 整治建筑物周边局部冲刷速率研究方法初探

陈琳, 方华山

(中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 通过统计大量整治建筑物外局部冲刷实测数据, 分析冲刷发展规律, 并结合半经验冲刷公式, 拟合出符合本区域特点的局部冲刷公式, 供相关设计人员参考。

**关键词:** 整治建筑物; 局部冲刷; 经验公式

中图分类号: U 617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)12-0188-06

## Preliminary discussion of rate of local scour depth surrounding regulating structures

CHEN Lin, FANG Hua-shan

(Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** This paper analyzes the law of local scour development based on the statistics of a mass of field investigation data. The local scour equation conforming to engineering in the Yangtze estuary is given by fitting based on the real-measured data and semi-empirical equation, so as to provide reference for the design.

**Key words:** regulating structure; local scour; empirical equation

航道治理工程中整治建筑物沿堤冲刷直接影响着工程结构安全, 但由于影响因素众多、机理复杂, 对其进行准确预测难度很大, 给工程设计带来了许多问题和困扰。长江口南北港分汉口河段新浏河沙护滩及南沙头限流潜堤工程(以下简称护滩工程)位于长江口历史上河势变化最为复杂、最不稳定的二级分汉口河段上, 其整治建筑物采用Y型布置, 兼具固滩和限流功能, 在航道治理工程中具有代表性。工程于2007年9月开始实施, 主体工程于2009年9月底完工。本文通过统计2008年2月—2012年2月间工程区冲刷最严重的滩头堤HT3+00~HT4+400段6个固定断面实测月度冲刷数据, 分析冲刷发展规律, 并结合由输沙率推导出的半经验冲刷速率公式, 拟合出符合本区域特点的局部冲刷公式, 供相关设计参考。

### 1 工程概况

护滩工程总长11 km, 包括新浏河沙护滩

堤和南沙头限流潜堤。新浏河沙护滩堤中桩号HT2+500~HT5+133段为滩头堤段, 滩头堤段设计顶高程2.0 m(本文高程与水深均以吴淞基面为基准面), 为抛石斜坡堤结构。堤心采用10~100 kg重块石, 护面为2 t扭王字块体, 堤心石和护面块体间设厚0.8 m的垫层, 垫层石重100~200 kg; 堤身两侧设宽4 m厚1.5 m的护脚棱体; 护底采用堤身砂肋排+混凝土联锁块余排的混合型护底软体排结构(图1)。

### 2 周边流速

中交上海航道勘察设计研究院有限公司于2011-12-11T21:00时—2011-12-13T1:00时大潮期(农历: 2011-11-17—19)在滩头堤HT3+000~HT4+400段进行ADCP走线和定点水文测验。测得各断面冲刷沟处沿垂线按2 m分层平均的近底涨落急最大流速见表1。

收稿日期: 2012-10-10

作者简介: 陈琳(1969—), 女, 高级工程师, 主要从事港口与航道工程设计工作。

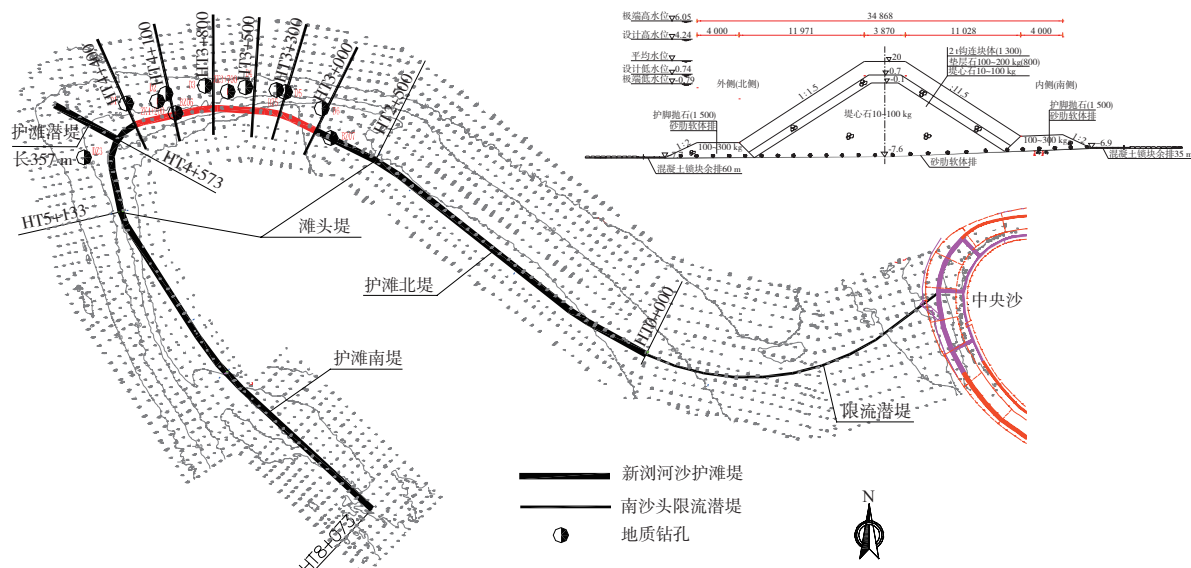


图1 护滩工程平面布置及滩头堤结构

表1 断面外(北)侧冲刷沟处实测涨落急最大流速 m/s

位置	涨急	落急
HT4+400	1.30	1.56
HT4+100	1.43	1.69
HT3+800	1.47	1.79
HT3+500	1.40	1.85
HT3+300	1.35	1.84
HT3+000	1.30	1.76

3 工程区地质

为了了解工程区域地基土的构成和特性, 分别于2007年1月、2010年11月和2012年1月进行了3次地质勘探(图1), 勘察表明: 工程区域由上到下主要分布着深厚的松散-稍密的粉细砂层(即②<sub>3</sub>、③<sub>2</sub>和⑤<sub>2</sub>)。上部②<sub>3</sub>中普遍存在厚度1~2 m的②<sub>3</sub>夹层; ③<sub>2</sub>与②<sub>3</sub>间分布着厚度在0~4 m的③<sub>2</sub><sub>1</sub>

夹层。⑤<sub>1</sub>层为灰色淤泥质粉质黏土夹粉细砂, 在HT3+000~HT3+800段均有分布但埋藏较深, 顶标高在-22 m左右且厚度不一。各土层的性质和分布见表2和图2。

4 冲刷情况

工程建设以来, 滩头堤HT3+000~HT4+400段堤身外(北)侧持续冲刷, 至2012年2月该区段冲刷坑最大水深均在30 m左右<sup>[1]</sup>。根据月度固定断面测量资料, 笔者统计了2008年2月—2012年2月间HT3+000~HT4+400共6个断面逐月最大冲刷的深度和位置、冲刷断面面积等。分析单宽流量、季节变化、流速和地质等因素与断面冲刷的相关性, 发现在众多的影响因素中, 地基土的特性与冲刷速率有较直接关系, 见图3。

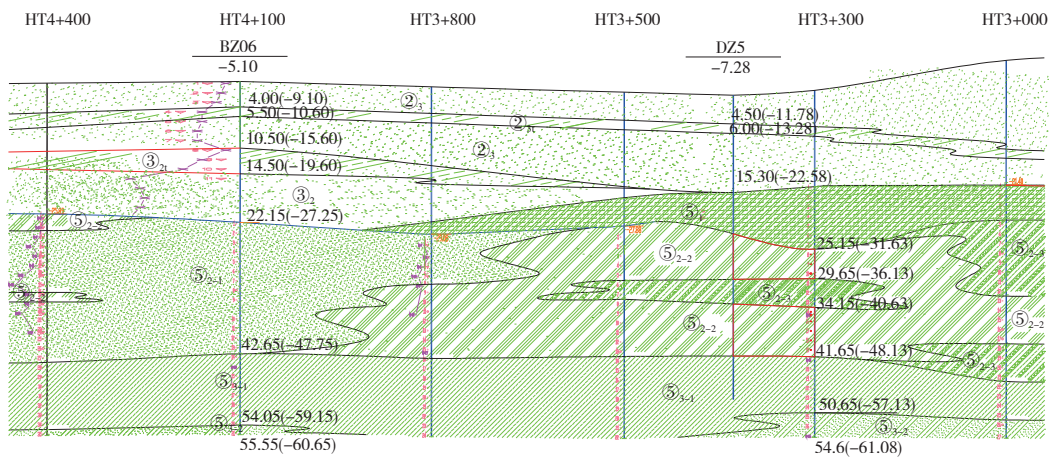
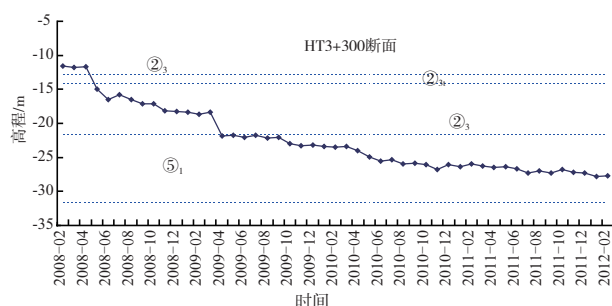


图2 地质剖面

表2 各土层性质和部分指标

层号	土层名称	比重	粒径 $d_{50}/\text{mm}$	标贯击数/击	特征描述
② <sub>3</sub>	灰黄色粉细砂	2.69	0.135	3~10	饱和、松散，局部呈稍密状
② <sub>3i</sub>	灰黄色粉细砂夹粉质黏土	2.71	0.063	2~8	饱和、松散。土质不均匀以透镜状零星分布于② <sub>3</sub> 中
③ <sub>2</sub>	灰色粉细砂	2.69	0.137	11~22	饱和、松散-稍密。砂质较纯，夹少量黏性土薄层
③ <sub>2i</sub>	灰色粉细砂夹粉质黏土	2.70	0.063	7~12	饱和、松散-稍密。土质不均匀，以透镜状零星分布于③ <sub>2</sub> 中
⑤ <sub>1</sub>	灰色淤泥质粉质黏土夹粉细砂	2.72	0.005		饱和，流塑-软塑。土质不均匀，夹较多粉细砂薄层。
⑤ <sub>2-1</sub>	粉细砂	2.68	0.109	7~25	饱和，松散-稍密，局部呈中密状。砂质纯，颗粒均匀，偶夹黏性土薄层
⑤ <sub>2-2</sub>	粉细砂夹粉质黏土	2.70	0.061	15左右	饱和，松散-稍密，局部中密。土质不均匀，粉质黏土夹层单层厚度0.1~0.4 cm

图3 HT3+300断面实测月度最大冲深曲线  
(2008-02—2012-02)

当工程区域水流流速超过了底层泥沙起动流速时，工程区域土层分布和性质是决定冲刷速率的关键因素。

## 5 冲刷公式研究

冲刷深度公式目前已有几十个，它们之间的计算差别也很大，主要原因是所依据的分析理论和考虑的冲刷因素不同。大致可分为考虑单宽流量或不冲流速的普遍冲刷公式、借助急流扩散理论的局部冲刷公式以及由输沙率推导的冲刷公式等几类。护滩工程冲刷情况与采用输沙率概念的冲刷公式推导背景和适用范围类似，鉴于此，笔者选取从输沙率出发推导出随时间变化的冲刷深度公式与工程实际进行拟合，以期推导出符合本工程特点的冲刷公式。

### 5.1 冲刷速率研究

#### 5.1.1 半经验冲刷公式简介

较早地引用输沙率概念确定局部冲刷输沙率函数式的是卡斯吞斯(Carstens, 1966)和阿廷比列克(Altibilek, 1973)等人<sup>[2]</sup>，下面介绍尼克哈森(N. Hassen)等的一篇文章“护坦下游局部冲

刷”<sup>[3]</sup>来说明此种方法。该篇认为冲刷能力取决于水冲力与抗冲的泥沙浮重两者的相对比值，前者可选用冲坑的最大流速 $v_{\max}$ 作为特性流速且正比于 $\rho v_{\max}^2$ ，后者与 $\rho g(s-1)d$ 成比例，则冲坑深 $h$ 随时间 $t$ 变化的冲刷速率可写为尺度和谐式如下：

$$\frac{dh}{dt} = \beta_1 v_{\max} \left[ \frac{v_{\max}^2}{g(s-1)d} \right] \quad (1)$$

式中： $h$ 为最大冲刷深度； $\beta_1$ 为无量纲的系数； $s$ 为泥沙的比重； $d$ 为底沙的粒径； $v_{\max}$ 为冲刷坑最大流速； $g$ 为重力加速度； $t$ 为时间。

式(1)是假设泥沙全部被冲出去落淤到坑的下游的，而实际上只有一部分冲刷泥沙被搬运越过坑下游坡顶冲走，其量正比于泥沙质量的动能与势能相对比值的 $n$ 次方，即 $\left[ \frac{v_{\max}^2}{g(s-1)h} \right]^n$ ，则式(1)可写为

$$\frac{dh}{dt} = \beta_1 \left[ \frac{v_{\max}^2}{g(s-1)h} \right]^n v_{\max} \left[ \frac{v_{\max}^2}{g(s-1)d} \right] \quad (2)$$

将式(2)右边的 $h$ 移到左边可得：

$$\frac{1}{(n+1)} \frac{d}{dt} [h^{n+1}] = \beta_1 \left[ \frac{v_{\max}^2}{g(s-1)} \right]^n v_{\max} \left[ \frac{v_{\max}^2}{g(s-1)d} \right] \quad (3)$$

式(3)初始条件 $t=0, h=0$ 时，可根据冲刷深度与时间的试验或实测资料来确定指数 $n$ 和系数 $\beta_1$ 。积分式(3)，则：

$$h = \left\{ \beta_1 \left[ \frac{v_{\max}^2}{g(s-1)} \right]^n v_{\max} \left[ \frac{v_{\max}^2}{g(s-1)d} \right] (n+1)t \right\}^{\frac{1}{n+1}} \quad (4)$$

本文以实测资料通过试算确定 $n$ 及 $\beta_1$ ，将试算值 $n$ 及 $\beta_1$ 代入式(4)即可求得函数为时间 $t$ 的冲坑深度 $h$ 计算公式。

5.1.2 局部冲刷公式中参数的确定

5.1.2.1 试算的前提条件

1) 对统计的数据进行分析, 剔除不合理的数据, 选取各土层连续的、稳定的实测数据进行试算。

2) 选取近底落潮最大流速作为各断面的特征流速  $v_{max}$  (表1)。

3) 公式中底沙的粒径取  $d_{50} (\times 10^{-3} \text{mm})$ 。

4) 为了能使试算结果尽可能贴近工程实际又避免相关参数过于发散没有实用价值, 拟定同一土层的  $n$  值一致。

5.1.2.2 各土层试算情况

根据地质勘察资料, 冲刷涉及3大系列共6个土层。图2中地质剖面的上表面为2007年1月时的工前泥面, 实测冲深数据统计的最早时间为2008年2月, 其时6个断面的冲刷沟最大水深度均在10 m以上, 也就是说进行统计时图2中最上的②<sub>3</sub>层和②<sub>3</sub>夹层已在工前和施工中冲掉了, 统计

数据始于②<sub>3</sub>夹层下方的②<sub>3</sub>层。

1) ②<sub>3</sub>层 (灰黄色粉细砂)。

②<sub>3</sub>层粉细砂在工程区表层普遍分布, 在HT3+000、HT3+500和HT3+800断面中分布较厚, 根据3个断面实测月度冲刷统计数据进行试算, 得出  $n=0.342$  时,  $\beta_1$  分别为  $1.14 \times 10^{-10}$ 、 $1.17 \times 10^{-10}$  和  $3.19 \times 10^{-10}$  (图4, 表3)。

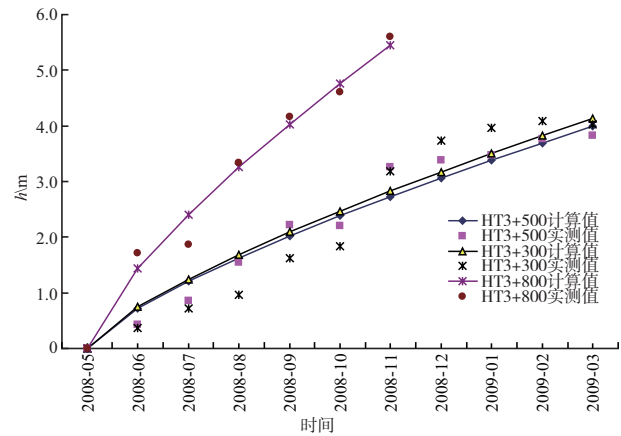


图4 ②<sub>3</sub>层冲深与时间关系

表3 ②<sub>3</sub>层冲深值数据

时间	HT3+300			HT3+500			HT3+800		
	实测值		计算值/m	实测值		计算值/m	实测值		计算值/m
	冲刷坑最大水深/m	逐月累计冲深h/m		冲刷坑最大水深/m	逐月累计冲深h/m		冲刷坑最大水深/m	逐月累计冲深h/m	
2008-05	14.92	0	0	15.16	0	0	12.02	0	0
2008-06	15.35	0.43	0.72	15.52	0.36	0.74	13.74	1.72	1.43
2008-07	15.78	0.86	1.20	15.88	0.72	1.25	13.88	1.86	2.40
2008-08	16.46	1.54	1.63	16.12	0.96	1.69	15.36	3.34	3.25
2008-09	17.14	2.22	2.02	16.78	1.62	2.09	16.18	4.16	4.03
2008-10	17.12	2.2	2.38	17.00	1.84	2.47	16.62	4.60	4.76
2008-11	18.18	3.26	2.73	18.34	3.18	2.83	17.62	5.60	5.45
2008-12	18.30	3.38	3.06	18.90	3.74	3.17			
2009-01	18.40	3.48	3.38	19.12	3.96	3.50			
2009-02	18.68	3.76	3.70	19.24	4.08	3.82			
2009-03	18.32	3.40	4.00	19.18	4.02	4.14			

2) ③<sub>2</sub>层 (灰色粉细砂夹粉质黏土)。

该土层为含有黏土的粉砂夹层, 厚度较薄, 数据较少, 未作计算。

3) ③<sub>2</sub>层 (灰色粉细砂)。

③<sub>2</sub>层主要分布在HT3+800、HT4+100和HT4+400断面中, 通过试算得出  $n=0.065$  时, 3个断面的  $\beta_1$  值分别为  $0.9 \times 10^{-10}$ 、 $2.49 \times 10^{-10}$  和  $1.44 \times 10^{-10}$  (图5)。

4) ⑤<sub>1</sub>层 (灰色淤泥质粉质黏土夹粉细砂)。

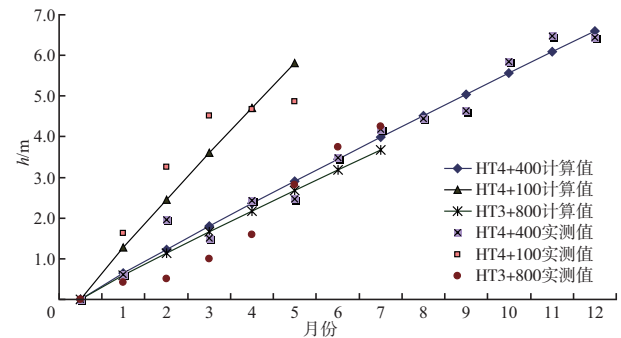


图5 ③<sub>2</sub>层冲深与时间关系



⑤<sub>1</sub>层主要分布在HT3+300、HT3+500和HT3+800断面中。通过试算得出 $n=0.2417$ 时，3个断面的 $\beta_1$ 值分别为 $1.83 \times 10^{-12}$ 、 $1.33 \times 10^{-12}$ 和 $1.87 \times 10^{-12}$ 。3个断面的 $\beta_1$ 值均较为接近（图6）。

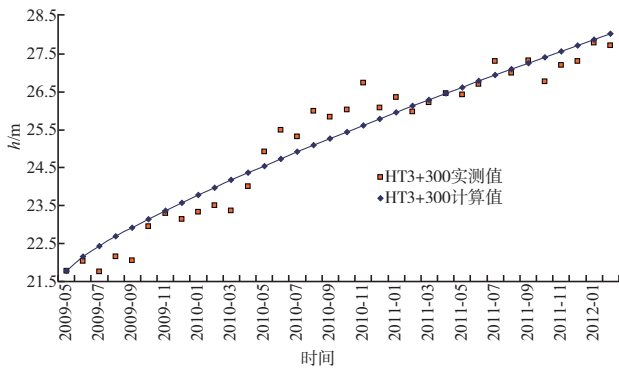


图6 ⑤<sub>1</sub>层冲深与时间关系

5) ⑤<sub>2-1</sub>层（粉细砂）。

⑤<sub>2-1</sub>层主要分布在HT4+100和HT3+800断面中。通过试算得出 $n=-0.24$ 时， $\beta_1 = 2.465 \times 10^{-11}$ 和 $2.21 \times 10^{-11}$ 。拟合曲线呈凹型（图7）。

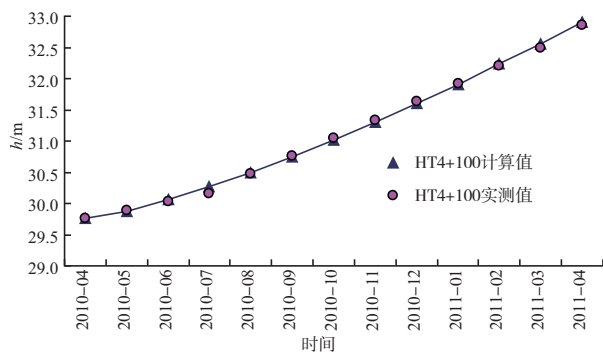


图7 ⑤<sub>2-1</sub>层冲深与时间关系

6) ⑤<sub>2-2</sub>层（粉细砂夹粉质黏土）。

⑤<sub>2-2</sub>层主要分布在HT3+500断面中，通过试算得出 $n=0.7531$ ， $\beta_1 = 1.72 \times 10^{-11}$ （图8）。

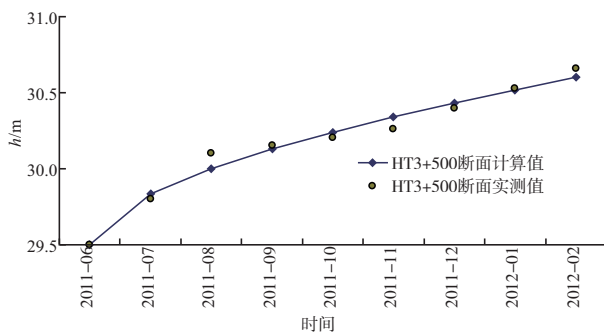


图8 ⑤<sub>2-2</sub>层冲深与时间关系

## 5.2 合理性和实用性讨论

尽管各土层冲刷数据和公式计算值拟合效果良好，但参数 $n$ 和 $\beta_1$ 值较为分散，需研究是否存在过分强调拟合效果，而使计算结果缺乏实用性和合理性的问题。

### 5.2.1 合理性分析

HT3+500和HT3+800断面中包含了工程区域主要土层，笔者列出断面中各土层按试算得出的局部冲刷公式计算的月度冲深值进行比较（表4，5）。

从表4，5和图9，10中可以看出采用冲刷公式计算出的各土层冲深与相互关系，与土层性质一致，符合人们对各土层冲刷性质的认知，用冲刷公式计算出的冲深值不仅定量上十分接近工程实际，在定性上也十分合理。

表4 HT3+500断面各土层冲刷深度计算值 m

时间	② <sub>3</sub> 层	⑤ <sub>1</sub> 层	⑤ <sub>2-2</sub> 层
1个月	0.74	0.29	0.34
2个月	1.25	0.51	0.50
3个月	1.69	0.71	0.63
4个月	2.09	0.90	0.74
5个月	2.47	1.07	0.84
6个月	2.83	1.24	0.93
7个月	3.17	1.41	1.02
8个月	3.50	1.57	1.10
9个月	3.82	1.73	1.18
10个月	4.14	1.88	1.25
参数	$n=0.342$	$n=0.2417$	$n=0.7531$
取值	$\beta_1=1.17 \times 10^{-10}$	$\beta_1=1.33 \times 10^{-12}$	$\beta_1=1.72 \times 10^{-11}$

表5 HT3+800断面各土层冲刷深度计算值 m

时间	② <sub>3</sub> 层	③ <sub>2</sub> 层	⑤ <sub>1</sub> 层	⑤ <sub>2-1</sub> 层
1个月	1.43	0.59	0.35	0.13
2个月	2.40	1.14	0.62	0.31
3个月	3.25	1.66	0.85	0.53
4个月	4.03	2.18	1.08	0.78
5个月	4.76	2.69	1.29	1.04
6个月	5.45	3.19	1.49	1.32
7个月	6.12	3.68	1.69	1.62
8个月	6.76	4.17	1.88	1.93
9个月	7.38	4.66	2.07	2.25
10个月	7.98	5.15	2.25	2.59
参数	$n=0.342$	$n=0.0655$	$n=0.2417$	$n=-0.24$
取值	$\beta_1=3.19 \times 10^{-10}$	$\beta_1=0.9 \times 10^{-10}$	$\beta_1=1.87 \times 10^{-12}$	$\beta_1=2.21 \times 10^{-11}$

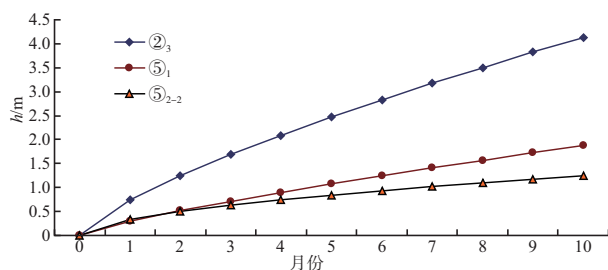


图9 HT3+500断面各土层计算冲深与时间关系

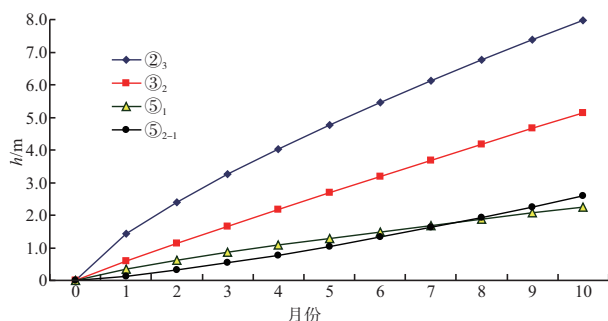


图10 HT3+800断面各土层计算冲深与时间关系

由输沙率推导的冲刷公式本身较为复杂,  $n$  值的大小更多的是与曲线形状和曲率有关, 与土层特性无关。笔者曾尝试采用统一的  $n$  值进行试算, 但效果不够理想。

### 5.2.2 工程实用性研究

上述研究的最终目的是运用于工程实践, 工程区域情况复杂, 局部冲刷公式应在贴近工程实际的前提下力求简便。建议:

1) ②<sub>3</sub> 粉细砂层可按试算出的计算公式预测随时间变化的局部冲深,  $n$  取 0.342,  $\beta_1$  取  $1 \sim 3 (\times 10^{-10})$ 。

2) ③<sub>2</sub> 层细砂层也可按采用试算出的计算公式预测,  $n$  取 0.065 5,  $\beta_1$  取  $1 \sim 2.5 (\times 10^{-10})$ 。

3) ⑤系列土层建议统一采用按⑤<sub>1</sub> 试算出的计算公式预测: 图9和表4表明, 采用⑤<sub>1</sub> 公式代替⑤<sub>2-2</sub> 更为安全; 图10和表5也表明, 按公式计算⑤<sub>1</sub> 与⑤<sub>2-1</sub> 层冲刷值相差不大, 采用⑤<sub>1</sub> 公式代替⑤<sub>2-1</sub> 至少前8个月更偏于安全的, 且收敛性更符合工程实际。所以, ⑤系列土层  $n$  取 0.241 7,  $\beta_1$  取

$1 \sim 2 (\times 10^{-12})$ 。

### 5.2.3 滩头堤段冲刷深度预测

根据上述分析结果, 假定工程区域下方土层均为⑤系列土层且密实度大于已冲刷土层, 预测该区段在设计年限内的最大冲刷深度, 结果为: 25 a时, 该区段会在现有基础上再冲深10~15 m, 冲刷坑高程-35.7~-46.8 m; 50 a时, 会在现有基础上再冲深20~30 m, 冲刷坑高程-47.5~-63.5 m。

### 5.2.4 相关问题

本文是基于仅有初始状态下设计流速时, 对整治建筑物周边局部冲刷深度的预测, 故拟合时断面特征流速取同一值。实际上随着工程区局部冲刷发展和河势变化, 冲刷处近底流速是变化的, 并最终为不冲流速, 均采用初始设计流速会造成收敛速度慢和计算结果偏于保守等问题。为此, 建议通过建立模型或动态观测取得不同冲刷阶段对应的特征流速, 再代入公式中。

## 6 结语

整治建筑物冲刷问题较为复杂, 本文尝试利用丰富的现场实测资料探讨局部冲刷速率问题, 为类似工程设计提供一些参考和佐证, 推导的冲刷公式还会在后续研究和实践中不断地丰富和完善。

### 参考文献:

- [1] 交通运输部长江口航道管理局. 长江口深水航道南北港分汉口河段新浏河沙护滩及南沙头通道潜堤工程固定断面监测[R]. 上海: 交通运输部长江口航道管理局, 2008-2012.
- [2] Carstens M R. Similarity laws for localized scour[J]. Journal of Hydraulics Division: ASCE, 1966, 92(3): 13-36.
- [3] Hassan N M K, Narayanan R. Local scour downstream of an apron[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111(11): 1 371-1 385.

(本文编辑 郭雪珍)