

# 三角网体积曲面法在潜坝冲刷监测及断面验收中的应用

李明益

(中交天津航道局有限公司, 天津 300457)

**摘要:** 针对长江流域航道整治工程中潜坝结构断面监测频次高、受“涨淤落冲”水文规律影响大, 传统固定断面监测法覆盖面小, 难以准确检测断面合格率及全面评估冲刷趋势的问题, 为提升施工验收与汛期安全监测的精准性与科学性, 从断面验收和冲刷监测两个方向入手进行了潜坝断面监测方法的对比与应用研究。基于两个典型的航道整治项目实例, 采用三角网体积曲面法与传统固定断面法并行监测与对比分析。结果表明: 与传统方法相比, 三角网体积曲面法分析通过构建高精度三维数字模型, 能够实现对坝体及周边河床形态的100%全覆盖量测, 从而更精确地捕捉到传统固定断面以外的局部不合格点、冲刷坑、淤积体的分布与变化, 能够为潜坝施工质量的精细验收、汛期冲刷动态的精准预判以及防护加固方案的制定提供科学数据支持, 有效保障整治建筑物的长期稳定与安全度汛。

**关键词:** 航道整治; 三角网体积曲面分析; 潜坝; 冲刷监测; 断面验收

中图分类号: U619.9+1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0233-08

## Application of triangle network volume surface method in scour monitoring and section acceptance in submerged dams

LI Mingyi

(CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin, 300457, China)

**Abstract:** Addressing the challenges in the Yangtze River waterway regulation projects, where frequent monitoring of submerged dam cross-sections is required and structures are significantly influenced by the hydrological cycle of “deposition during rising water and scouring during falling water,” the conventional fixed-cross-section monitoring method often falls short due to its limited coverage. This limitation hinders accurate assessment of section compliance rates and comprehensive evaluation of scouring trends. To enhance the precision and scientific rigor of construction acceptance and flood season safety monitoring, a comparative and applied study of monitoring methods is conducted, focusing on both section acceptance and scouring assessment. Based on two typical regulation project cases, a comparative analysis is performed using the triangle network volume surface method alongside the traditional fixed-cross-section method. The results indicate that compared with the traditional method, the triangle network volume surface method analysis, by constructing a high-precision 3D digital model, achieves 100% comprehensive measurement of the dam and its surrounding riverbed morphology. This allows for more precise detection of localized non-compliant points, scouring pits, and siltation bodies that are missed between traditional fixed sections, along with their spatial distribution and volumetric changes. Consequently, this method provides powerful scientific data support for the detailed acceptance of construction quality, accurate prediction of scouring dynamics during flood seasons, and the formulation of protection and reinforcement plans, thereby effectively ensuring the long-term stability and safe operation of the regulation structures through flood periods.

**Keywords:** waterway regulation; triangle network volume surface analysis; submerged dam; scour monitoring; section acceptance

收稿日期: 2025-09-24 录用日期: 2025-12-12

作者简介: 李明益(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为港口与航道整治施工技术工艺。

潜坝在长江航道整治项目施工中是一种常见的整治建筑物,一般作为长江航道整治的主体工程,在调整航道水面比降、限制河底冲刷等方面发挥着重要作用。联锁软体排、排上抛石与边缘透水框架等共同构成了潜坝的主体。其淤积效果主要由潜坝对局部流场的改造效果决定。施工质量在此过程中至关重要,它通过保证结构的整体性与稳定性,为流场按设计预期变化、进而产生理想淤积提供了根本前提。同时,其层状结构导致坝体容易在主汛期受到大流速清水冲刷。因此,施工质量检测及度汛监测则尤为重要。长江主汛期通常为7—10月,潜坝的施工主线围绕主汛期展开。一般在汛期前完成主体结构并进行抛石临时压载,汛期后抛石全面压载,周边抛投透水框架进行促淤。汛期前施工节奏快,断面检测及验收频次高。汛期中,需要对所有已建或在建的水下整治建筑物进行观测,频率通常为每月1~2次,监测分析精确度要求高,部分出现损毁的需要加密观测<sup>[1]</sup>。

传统验收及监测方法为固定断面法,分析原理为:在整治建筑物上布设若干条间距20~50 m(断面验收常用)、100~200 m(汛期监测常用)的固定横断面和一条位于轴线区域贯穿整个整治建筑物的纵断面<sup>[2]</sup>,采用hypack等分析软件提取断面线上的高程数据生成验收断面或汛期监测断面<sup>[3]</sup>,与工前数据进行增厚对比分析。其优点是数据处理工作量小、断面数量少,缺点是分析范围有限,容易忽略断面之间的变化情况。尤其是在汛期监测中,如果固定断面的选择位置偏离冲刷区域,忽略已经出现或可正在发展的线状过水通道,该分析方法就会出现较大失误,严重的可能造成线状过水通道继续发展掏空坝底,瞬间击溃整个坝体。

针对传统固定断面监测法覆盖面小,难以准确检测断面合格率及全面评估冲刷趋势的问题,采用三角网体积曲面分析法,将线状监测断面扩展为面状,结合长江航道整治项目潜坝工程断面

验收和汛期监测中的应用实例,总结出一种基于AutoCAD Civil 3D的坝体断面验收和冲淤监测技术,在过程断面验收中可为阶段性施工提供更为全面的辅助验收工具。在汛期监测中,可以分析潜坝周边冲刷情况,预判冲刷发展趋势,及时提供更为准确、全面的监测数据。

## 1 三角网体积曲面分析法原理

三角网体积曲面分析法利用现场测量的坐标和高程数据建立工前、工后三角网地形模型,即三角网体积曲面,通过两曲面高程点差值计算,进行差值体积分析。借助Civil 3D计算软件建立三角网地形模型,并进行差值分析。Civil 3D是AutoCAD平台之上的软件包,广泛应用于地形勘测、场地设计、道路和管道建模、土石方计算等工程领域。采用三角网体积曲面分析法,可根据水深扫测数据对整个整治建筑物的增厚区域进行统计分析,通过设置目标增厚值,为断面验收及冲刷分析提供可视化图形显示<sup>[4-5]</sup>。

三角网体积曲面分析法技术路线主要包括:测量并加载高程文件-构建曲面模型并进行参数设置-构建体积曲面模型并进行参数设置。

### 1.1 测量并制作特定高程文件

提取水深数据为特定高程文件,Civil 3D建立曲面可支持加载的文件格式有NEZ、PENZ、PNE、PNEZD等(逗号或空格分隔)、XYZ\_Intensity、XYZ\_RGB等文件格式,在此采用较为常见的XYZ格式文件,数据形式体现平面坐标及高程数据,即 $(x,y,z)$ 。

### 1.2 构建三角网曲面模型

在模型板块的点文件中加载XYZ格式文件,同时命名曲面,可标记为工前/汛前,后续比对的曲面可标记为工后。需要注意的是,后续建立曲面模型时,选取的文件格式尽量保持一致,保持东距、北距的一致性,否则将导致前后导入的数据位置出现异常偏离<sup>[6]</sup>。

### 1.3 建立三角网体积曲面

工前、工后两个曲面建立完毕后,进行差值

计算，即建立三角网体积曲面。该曲面表现工前、工后曲面的差值信息，即增厚或冲刷情况分布图。默认生成的增厚分布图叠加工前、工后的和增厚 3 个曲面，在此仅需要增厚曲面，见图 1。默认的配色偏暗，图形显示不明确，见图 1a)。

通过曲面样式中的显示模块对增厚幅度和对应配色进行调整<sup>[7-8]</sup>，在冲刷区按照冲刷幅度降序，颜色从深到浅，在增厚区按照增厚幅度升序，见图 1b)。

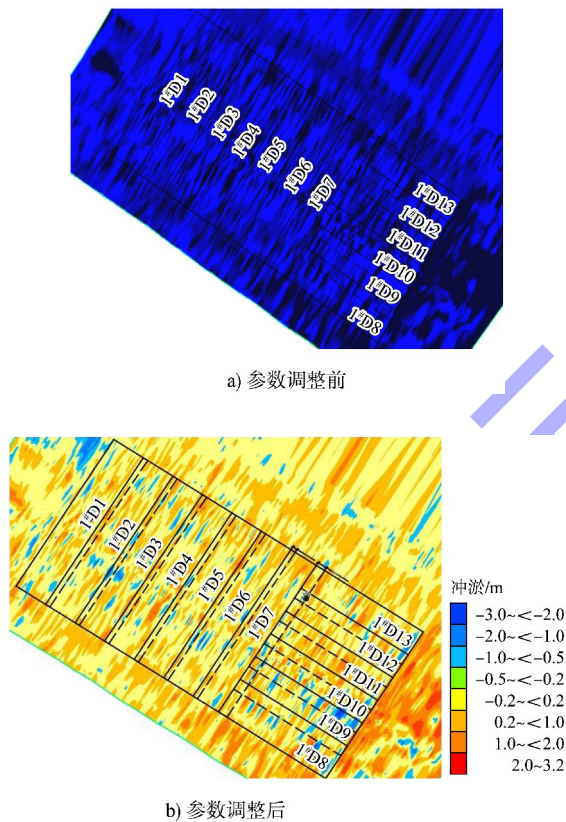


图 1 Civil 3D 断面增厚信息分布界面

Fig. 1 Distribution of section thickening information in Civil 3D

## 2 断面验收应用

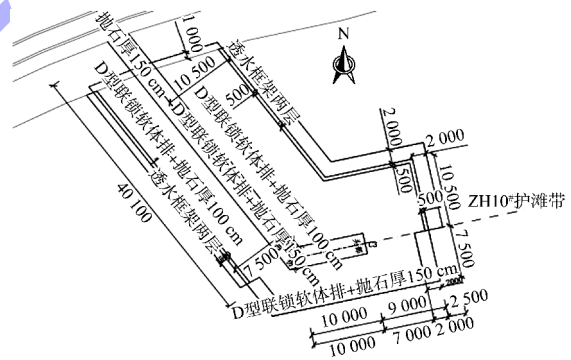
### 2.1 工程概况

应用区域选择在长江航道整治工程瓜子号洲右侧中部护滩带工程，该工程位于东流水道，建设内容为新建 3 条护滩带，长度为 336、290 和 401 m。本次主要选择其中的 10# 护滩带散抛石压载区域进行研究，其平面位置和平面布置见图 2。

工程主要结构形式为铺设 D 形软体排，排上抛石，抛投透水框架，其中散抛石压载区域约 24.5 万 m<sup>2</sup>，中部 3 m 范围抛石压载设计厚度 1.5 m，两侧区域设计厚度 1 m。典型断面见图 3。



a) 施工区域工程平面位置



b) 平面布置(单位:mm)

图 2 平面位置和布置

Fig. 2 Plan position and layout

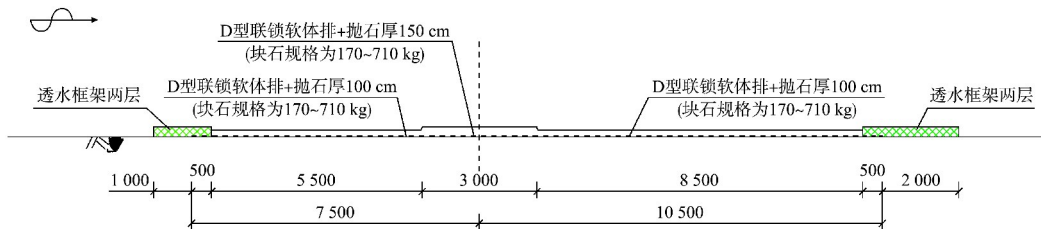


图 3 结构典型断面(单位:mm)

Fig. 3 Typical structural cross-section (unit:mm)

### 2.2 固定断面法结果分析

第1阶段抛石压载结束后进行断面验收自检，自检断面线垂直于轴线方向布置，断面间距10 m，按照规范布设8个检测点。本次取该阶段完成的ZH10-06~ZH10-18等13条自检断面，断面的位置见图4。采用hypack软件提取多波束测量数据进行两期断面差值统计分析<sup>[9]</sup>，分析结果见表1。

从断面分析数据来看，本检验批共计13个断面，合格断面11个，断面合格率84.6%；共计104个测点，合格测点数92个，测点合格率88.5%。满足规范及设计要求<sup>[10]</sup>。

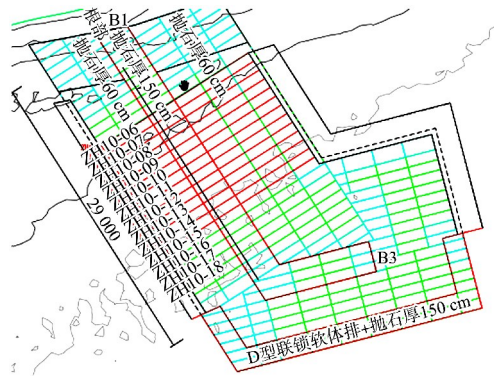


图4 ZH10-06~ZH10-18断面分布  
Fig. 4 Cross-section distribution  
(from ZH10-06 to ZH10-18)

表1 ZH10-06~ZH10-18断面测点增厚值统计

Tab. 1 Thickness increase statistics of cross-sectional survey points (from ZH10-06 to ZH10-18)

测点 编号	设计增 厚值/m	断面测点增厚值/m												
		ZH10-06	ZH10-07	ZH10-08	ZH10-09	ZH10-10	ZH10-11	ZH10-12	ZH10-13	ZH10-14	ZH10-15	ZH10-16	ZH10-17	ZH10-18
1	1.0	1.16	1.05	0.87	1.05	0.72	0.87	1.47	1.45	1.21	0.59	0.81	0.65	0.51
2	1.0	0.79	1.47	1.47	1.45	1.42	1.22	1.34	1.01	0.67	0.98	0.56	0.71	0.96
3	1.5	1.29	1.09	1.06	1.08	1.21	0.87	1.06	1.27	1.98	2.01	1.01	1.06	1.07
4	1.5	0.84	1.21	1.16	1.63	1.08	1.23	0.99	0.85	1.63	1.57	1.58	1.46	1.20
5	1.0	0.79	1.27	0.98	1.25	1.31	0.91	0.81	1.17	0.81	0.75	1.01	1.29	0.97
6	1.0	0.72	1.07	1.48	1.67	0.76	0.72	0.71	0.76	0.74	0.86	0.87	1.31	0.63
7	1.0	0.75	0.80	0.71	0.95	1.12	1.19	1.09	1.33	1.35	1.27	1.16	1.27	1.16
8	1.0	1.17	1.06	0.88	1.24	0.93	1.04	1.06	0.73	0.75	0.71	0.82	0.85	1.24
合格率		87.50%	100.00%	100.00%	87.50%	100.00%	87.50%	87.50%	87.50%	87.50%	87.50%	75.00%	87.50%	75.00%

注：设计允许偏差为：-0.3H，+0.5H（H为设计增厚值），加粗为不合格增厚值。

### 2.3 三角网体积法复核分析

将2.2节中的两期多波束测量数据导入Civil 3D中，分别建立三角网曲面。

采用三角网体积分析法对两期三角网曲面进行体积差值分析，发现垂直于固定断面方向的抛石区域出现明显条带状。测线附近普遍增厚明显，测线中间区域增厚不足，存在人为的“按线抛投”现象，压载的均匀效果较差，见图5。

然后对ZH10-06~ZH10-18断面之间的区域进行整体增厚数据分析，利用面积统计功能，将研究区分为合格区、不合格区，进行面积统计。研究区的总面积为20 317.56 m<sup>2</sup>，经自动统计，满足设计和规范增厚要求的区域面积为13 466.1 m<sup>2</sup>，面

积合格率为66.3%。总体不满足规范及设计要求，见图6。

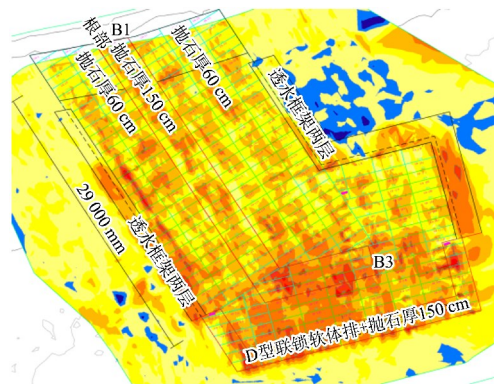


图5 两期三角网曲面体积差值处理结果  
Fig. 5 Processing results of two-epoch triangular mesh  
surface volume differences

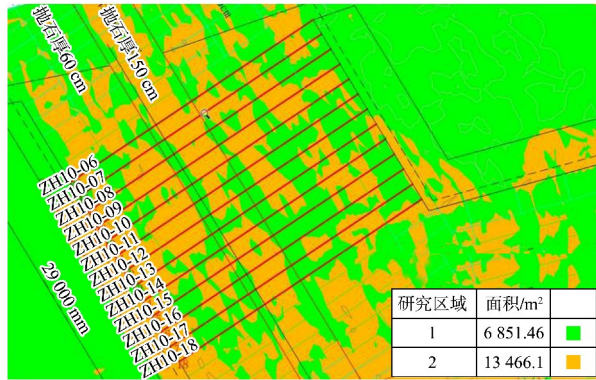


图 6 Civil 3D 分区调整及面积统计结果  
Fig. 6 Civil 3D zone adjustments and area summary

固定断面法和三角网体积曲面法合格率出现差异的原因：固定断面通常为开工前与抛石网格同步划定，为达到测点合格率，水下抛投的位置往往向测线附近聚集，造成测线虚高，两侧不足的现象。该结果容易造成断面合格的假象，在

变更固定断面及测点位置后，合格率往往出现较大偏差，造成工程返工、工期延误的后果。

### 3 潜坝软体排冲刷监测应用

#### 3.1 工程概况

研究区选择在长江航道整治项目的一个潜坝工程。为了解软体排外侧冲刷发展态势，将研究区域上下游边界各超出软体排铺设范围不少于 50 m，其中顺水流方向 335 m，垂直水流方向 1 460 m，共计 42 张软体排。

该研究区软体排在汛期前施工完毕，随后停工进入汛期监测，监测仍采用固定断面法。每 200 m 取 1 条垂直于轴线方向断面 (Z0+000~Z1+200)，进行比对分析。研究区软体排编号及断面位置，见图 7。

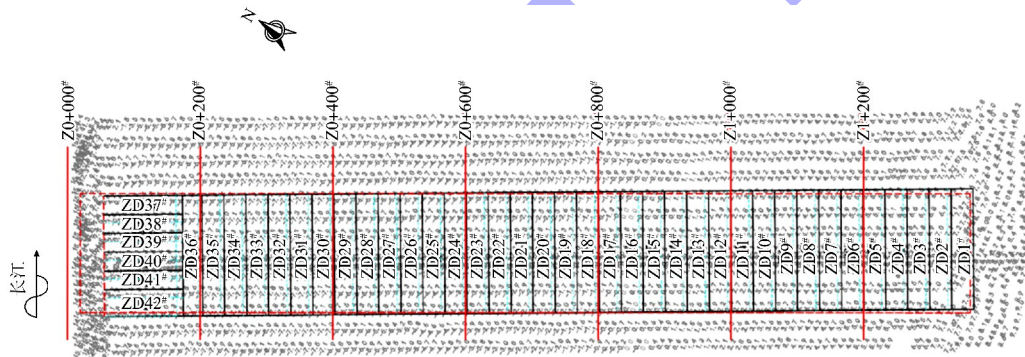
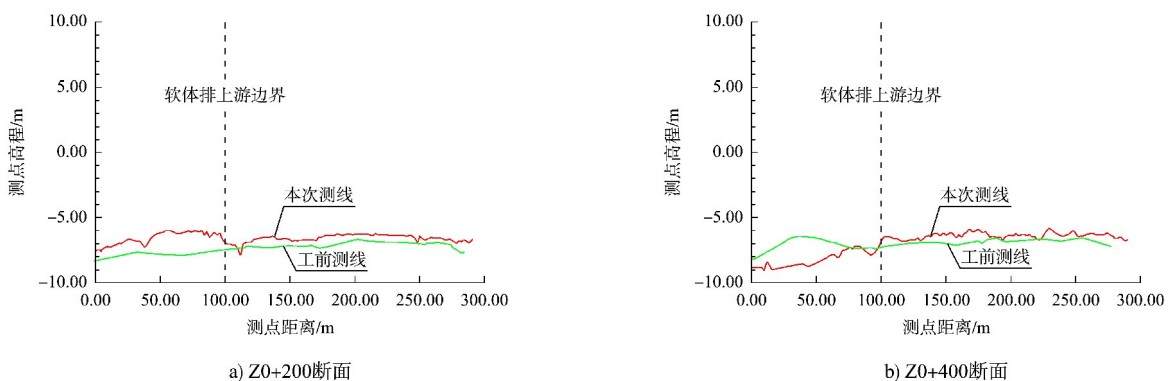


图 7 软体排及固定断面布置  
Fig. 7 Mattress revetment and fixed cross-section layout

#### 3.2 监测分析效果

按照整治建筑物度汛观测方案及观测计划，每月进行 1 次固定断面监测分析，出现水毁情况时，提高监测频率。潜坝研究区施工期阶段性监测数据及汛期工况数据显示，在断面 Z0+200~Z0+800 之间汛期最大水深可达 27.06 m，且流速大、流态紊

乱，冲刷的风险较大，因此将其列为汛期固定断面监测关注的重点。在 8 月份第 1 次汛期监测中发现 Z0+200、Z0+400、Z0+600、Z0+800 断面在软体排范围均未出现冲刷，仅在 Z0+400 断面软体排施工范围外侧上游出现最大约 3 m 的冲刷坑，见图 8。



a) Z0+200断面

b) Z0+400断面

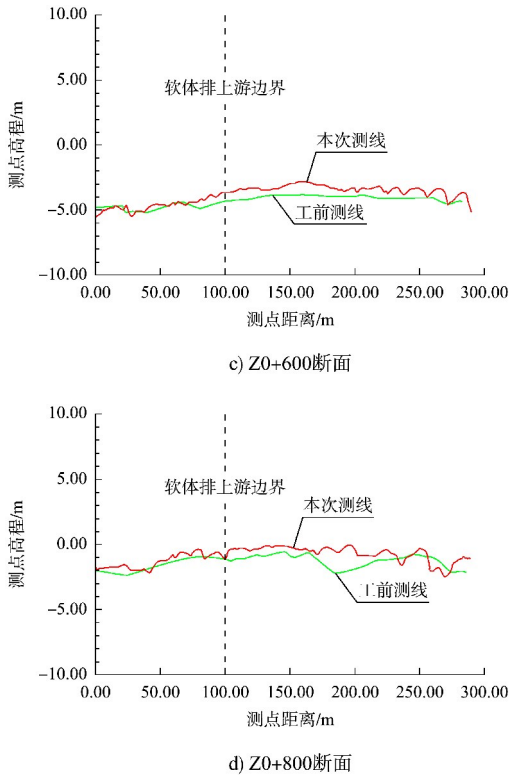


图 8 Z0+200~Z0+800 固定断面测图  
Fig. 8 Fixed cross-section survey  
(from station Z0+200 to Z0+800)

由于固定断面数据无法确定其他区域冲刷情况及冲刷范围，为防止其他区域出现类似情况，采用 Civil 3D 三角网体积曲面对风险区域进行分析，见图 9。

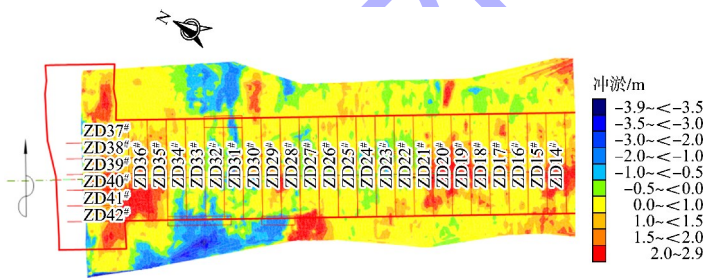


图 9 主要冲淤区位置及严重性分布  
Fig. 9 Location and severity of primary scour and siltation zones

分析结果显示 Z0+400 断面上游施工范围外出现了冲刷，但范围较小，施工区内正常淤积，冲刷发展的可能性较小。而 Z0+200~Z0+400 之间，尤其是 33# 软体排上游出现的冲刷坑更加危险，有向排体方向移动的迹象，部分排体下方已经出现小幅度的冲刷，一旦冲刷坑蔓延到排体下方，将

会掏空排体底部河床，造成软体排下陷，进而从排体搭接处形成串沟，威胁到整个潜坝的安全。鉴于传统的固定断面图无法准确描述需要压护的范围、工程量，经反复试验采用 Civil 3D 曲面分析的优势，将线概念上升为面概念，统计出需要压护的确切位置和深度信息，同时加密观测，预判后续冲刷趋势。

经过 Civil 3D 的冲刷量计算，对 3 个可能继续冲刷的区域准备进行沙枕抛投，并对抛投量进行计算，其中区域 1 抛投量为 4 206 m<sup>3</sup>，区域 2 抛投量为 3 906 m<sup>3</sup>，区域 3 抛投量为 5 400 m<sup>3</sup>，见图 10。依据分析结果将备用方案所增加的工程费用进行了计算，为采取进一步的压护措施提供了技术和费用方面的支撑。

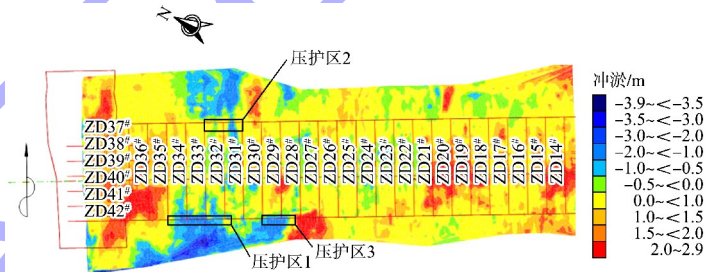


图 10 3 个计划压护区布置  
Fig. 10 Layout plan for three proposed mattress protection areas

在采取抛投压载和后续的透水框架促淤措施后，可以通过冲淤分析发现 33# 上游的冲刷坑已不再继续向排体方向发展，而是平行于排体向 28# 排体方向蔓延，潜坝冲刷态势未进一步严重，见图 11，之后按原计划继续进行 28# 排边的抛石压载。

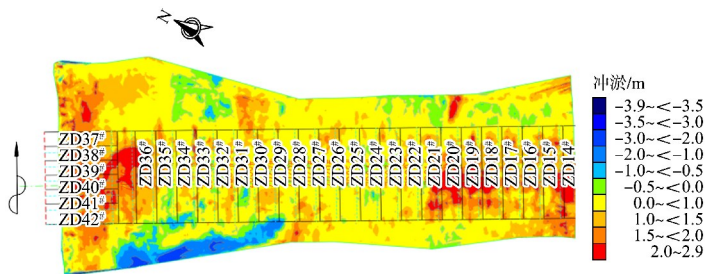
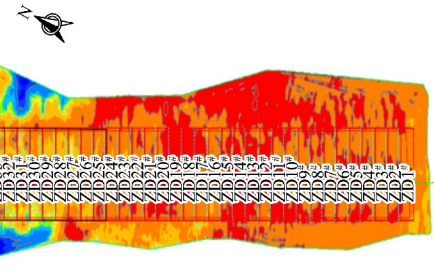
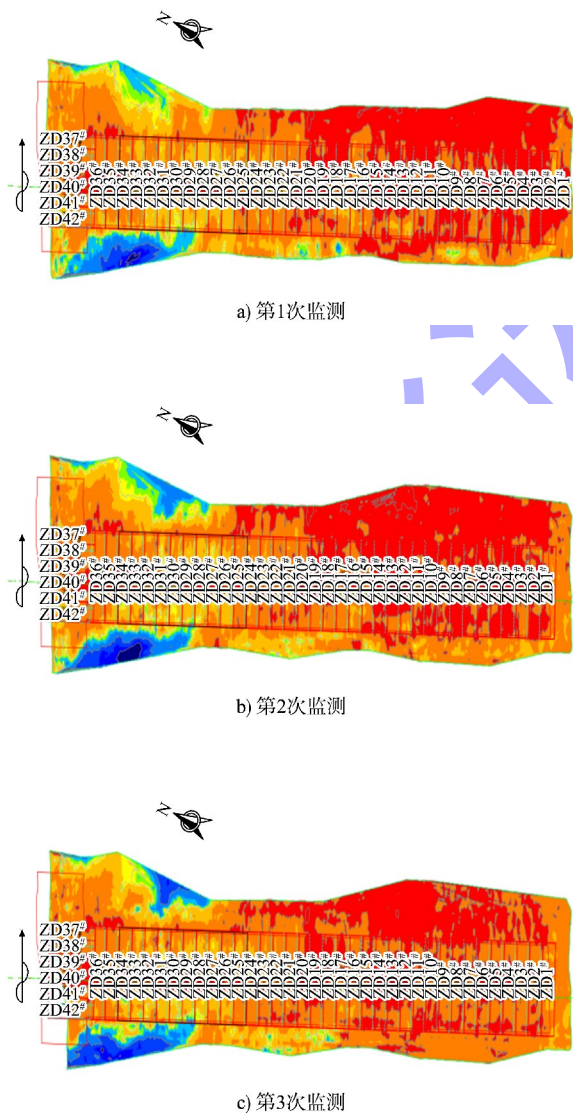


图 11 排体抢护后坝体的冲淤变化  
Fig. 11 Dam scour and siltation changes after mattress protection

在水位回落阶段,为防止“落冲”现象,继续保持每周1次的观测密度,将每次观测结果与工前和上期分别比对1次,并在Civil 3D中建立连续观测日期对应的独立图层,汇总水下坝体历次的冲淤演变过程,在冲淤预测、对外展示、总结报告中形成了比较明晰的思路。

第2次汛期前,该潜坝完成了所有排上块石压载、轴线部位抛石筑坝和双侧透水框架抛投工作。4次汛期监测数据结果见图12,由图可知,整个施工区维持在比较稳定的冲淤范围内,整治建筑物顺利度汛。



d) 第4次监测

图12 第2个汛期监测结果

Fig. 12 Second flood season monitoring results

#### 4 结论

1) 检测精度显著提升:相比传统固定断面法,三角网体积曲面分析法更能真实地反映潜坝水下成型状况,有效避免因断面选择不当造成的数据失真,提高检测结果的准确性。

2) 分析过程直观高效:通过图形界面数值调整,实现两期数据的快速、直观对比,有助于预判冲刷发展趋势,为软体排压护措施的制定提供可靠依据。

3) 工程量统计与定位能力强:结合工程量统计模块,可快速获取冲刷量数据,并精确定位冲刷位置与范围,为材料与设备调配提供决策支持。

4) 应用范围广泛,实用性强:该方法适用于水下排体冲刷、抛石压载效果评估、透水框架淤积监测及断面辅助验收等多个场景,是潜坝冲刷监测与施工质量控制的可靠技术手段,有助于保障工程安全度汛。

#### 参考文献:

[1] 长江航道局,长江航道规划设计研究院.长江干线武汉至安庆河段航道整治工程实践与创新[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2023.

Changjiang Waterway Bureau, Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute. Practice and innovation of waterway regulation project in Wuhan-Anqing section of Yangtze River trunk line[M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2023.

- [2] 航道整治工程施工规范: JTS 224—2016 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.  
Construction code of channel regulation works: JTS 224-2016 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016.
- [3] 水运工程测量规范: JTS 131—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.  
Specifications for port and waterway engineering survey: JTS 131-2012[S]. Beijing: China Communications Press, 2012.
- [4] 李明益. GIS 技术在长江扬中河段护岸抛石效果分析中的应用[J]. 水运工程, 2016(6): 7-11.  
LI M Y. Application of GIS in analyzing effect of riprap revetment in Yangzhong part of the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2016(6): 7-11.
- [5] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006.  
TANG G A, YANG X. Experimental course of spatial analysis of ArcGIS geographic information system [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [6] 王敏, 李韬, 王小龙. 水下铺排检测技术[J]. 水运工程, 2020(S1): 137-140.  
WANG M, LI T, WANG X L. Detection technology for underwater laying of concrete interlocking blocks [J]. Port & waterway engineering, 2020(S1): 137-140.
- [7] 鲁琦. 潍坊港潮流分析及航道回淤预测[J]. 水运工程, 2020(S1): 141-146.  
LU Q. Tidal current analysis and channel siltation prediction of Weifang Port [J]. Port & waterway engineering, 2020(S1): 141-146.
- [8] 袁占全, 李明益. 基于 BIM+GIS 的航道三维漫游系统设计及实现[J]. 水运工程, 2022(2): 153-157, 178.  
YUAN Z Q, LI M Y. Design and implementation of three-dimensional waterway roaming system based on BIM +GIS [J]. Port & waterway engineering, 2022(2): 153-157, 178.
- [9] 张有锁, 郭龙, 李明益, 等. 船载土石方量测算的无人机图像采集方案研究[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(7): 40-42.  
ZHANG Y S, GUO L, LI M Y, et al. Research on UAV image acquisition scheme for ship-borne earthwork calculation [J]. China water transport (the second half of the month), 2020, 20(7): 40-42.
- [10] 水运工程质量检验标准: JTS 257—2008 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.  
Standard for quality inspection of port and waterway engineering construction: JTS 257-2008 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- ( 本文编辑 赵娟)
- 
- (上接第 232 页)
- [7] 林鸣, 林巍, 王汝凯, 等. 人工岛快速成岛技术: 深插大直径钢圆筒与副格[J]. 水道港口, 2018, 39 (S2): 32-42.  
LIN M, LIN W, WANG R K, et al. Artificial island rapid construction technique: Deep-insert and large diameter steel cylinders and auxiliary cells [J]. Journal of waterway and harbor, 2018, 39(S2): 32-42.
- [8] 刘健, 夏丰勇, 唐一夫. 深中通道西人工岛总体设计及大直径钢圆筒快速成岛技术[J]. 水运工程, 2021(6): 13-19.  
LIU J, XIA F Y, TANG Y F. Overall design of western artificial island of Shenzhen-Zhongshan link and rapid island-formation technology by large-diameter steel cylinder [J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 13-19.
- [9] Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan [S]. Tokyo: The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, 2025.
- [10] Bentley Systems. PLAXIS 3D manuals [M]. Delft: Plaxis B. V., 2025.
- [11] U. S. Army Corps of Engineers. Coastal engineering manual “EM 1110-2-1100 (Part I)” [M]. Washington: U. S. Army Corps of Engineers, 2002.
- ( 本文编辑 赵娟)