



# 三维激光扫描技术 在宽肩台抛石堤稳定性试验中的应用\*

费成鹏<sup>1</sup>, 刘鸣洋<sup>2</sup>, 朱颖涛<sup>2</sup>, 栾英妮<sup>2</sup>, 陈汉宝<sup>2</sup>

(1. 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

**摘要:** 三维激光扫描技术主要应用于地形测绘、建筑物建模以及文物修复等, 为了拓展这项技术在物理模型试验上的应用, 利用 Trimble CX 型三维激光扫描仪对宽肩台抛石堤物理模型整体形态进行测量, 并联合使用 Trimble realworks 9 和 GMT 5.4 两款软件对扫描数据进行处理并成图。与相机照片相比, 三维激光扫描技术具有操作更便捷、精度更高、可视化效果更突出等特点, 在物理模型上能够取代部分传统测量仪器的功能。试验前后扫描结果显示, 宽肩台抛石堤在波浪作用下会发生明显变形, 但最终会形成动态稳定的 S 形剖面形态。

**关键词:** 三维激光扫描; 宽肩台抛石堤; 物理模型试验

中图分类号: U652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0058-07

## Application of 3D laser scanning technology in stability test of riprap dike with broad shoulder

FEI Chengpeng<sup>1</sup>, LIU Mingyang<sup>2</sup>, ZHU Yingtao<sup>2</sup>, LUAN Yingni<sup>2</sup>, CHEN Hanbao<sup>2</sup>

(1. China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** 3D laser scanning technology is mainly used in topographic mapping, building modeling and cultural relic restoration. To expand the application of this technology in physical model test, Trimble CX 3D laser scanner is used to measure the overall shape of physical model of riprap dike with broad shoulder, and then the scanning data are processed and mapped by Trimble Realworks 9 and GMT 5.4. Compared with camera photos, 3D laser scanning technology possess the characteristics of more convenient operation, higher accuracy and more outstanding visualization, and it can replace some functions of traditional measuring instruments in physical model. The scanning results before and after the test show that the riprap dike with broad shoulder will deform obviously under the action of waves, but eventually changed into a dynamic stable S-shaped profile.

**Keywords:** 3D laser scanning technology; riprap dike with broad shoulder; physical model test

三维激光扫描技术又名实景复制技术, 能够快速获取地形或者结构物的三维云点数据集。根据测距原理, 三维激光扫描仪可大致分为 4 种: 脉冲式、脉冲-相位式、激光三角式和相位式, 其中激光三角式和相位式测距较短, 但精度很高,

适合高精度测量。该项技术在地形测绘、建筑物建模以及文物修复等方面得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。国外关于三维激光扫描技术成功应用的实例很多, 例如 2011 年日本利用三维激光技术获取核电站周边危险区域的三维数据, 了解灾区的受灾情况, 以

收稿日期: 2023-05-11

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB3207400); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(TKS20230205)

作者简介: 费成鹏(1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事海洋工程环境研究。

便灾区重建工作<sup>[4]</sup>。Nabbout<sup>[5]</sup>运用三维激光扫描技术完成铁路、隧道等的三维建模。国内在该技术上的应用发展较晚,但是目前也涌现出大量的应用实例。钟维林等<sup>[6]</sup>通过三维激光扫描技术分析筒仓内壁防护层磨损检测,发现该技术在不可目视、环境复杂的工况下具有独特的优势。李鸿均等<sup>[7]</sup>通过三维激光扫描技术在滑坡监测中的应用解决了传统监测人员难以到达危险区域作业的问题,证明了三维激光扫描技术应用在安全监测灾后滑坡体变形的有效性和可靠性。

物理模型是实际结构物的缩影,其尺寸、形态等直接影响整个模型试验结果的精度<sup>[8]</sup>。传统物理模型试验的主要记录方式以照片、全站仪、水准仪等为主,难以得到高精度的物理模型整体形态和剖面形态。为此,三维激光扫描技术逐渐被运用到海洋工程物理模型实验室,但是应用程度还远远不够,目前应用最广泛的是在岸滩演变和泥沙冲淤方面,对防波堤等结构物整体三维扫描的实例还较少。宽肩台抛石堤在波浪作用下堤身会发生明显变形<sup>[9]</sup>,因此尝试在宽肩台抛石堤稳定性物理模型试验上进行三维激光扫描技术的试用,以此来拓展这项高精度测试手段的应用范围。

## 1 方案设计

### 1.1 模型制作

模型按重力相似准则设计,采用正态、定床模型。结合试验场地大小(42.8 m×56.0 m),考虑试验内容,选定模型试验几何比尺为1:40。结构断面尺寸满足几何相似。模型平面布置见图1。模型采用常规桩点法和断面法相结合,平面尺寸及高程按几何相似原则控制。桩点按1.0 m×1.0 m布设桩,场地平面尺寸和地形桩点高程均用日本索佳IM-52型全站仪控制,平面尺寸偏差小于±10 mm;高程偏差小于±1 mm。模型地形填沙后用水泥沙浆抹平压光。模型挡浪墙采用混凝土制作,沉箱采用塑料板制作,几何尺寸偏差控制在±1%以内,且不超过±5 mm,质量偏差控制在±3%以内。

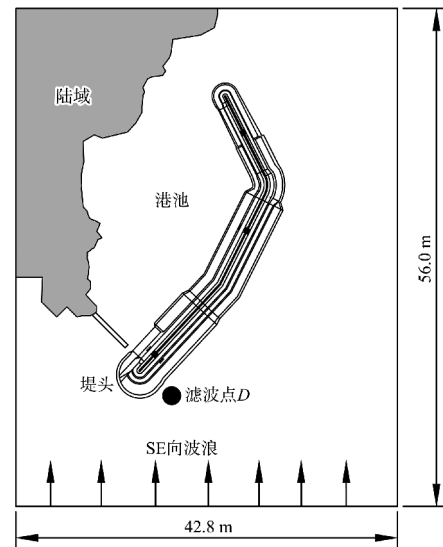


图1 模型平面布置

### 1.2 水位及波浪要素设计

试验根据100 a一遇的工况,共设置4个水位,高程参照1985国家高程。以模型制作前的D点为波浪控制点完成造波机滤波。水位及D点波浪要素见表1。

表1 水位及波浪要素设计

水位	波高 $H_{1\%}/m$	波高 $H_{5\%}/m$	波高 $H_{13\%}/m$	平均周期 $T/s$
极端高水位(4.65 m)	6.76	5.77	5.01	11.6
设计高水位(3.15 m)	6.30	5.39	4.69	11.6
设计低水位(-3.76 m)	4.58	4.50	4.14	11.6
极端低水位(-3.79 m)	3.83	3.83	3.83	11.6

### 1.3 仪器设备

模型试验在交通运输部天津水运工程科学研究所海洋动力综合厅试验港池中进行,试验水池长60 m、宽42.8 m、高1.0 m。造波系统为40 m长可移动推板式不规则波造波机及其控制系统,其能产生的最大波高为250 mm,最大周期2.0 s。波高和周期数据的采集与分析采用TK2008型动态采集分析系统。通过对D点波高传感器采集的数据率定造波机的造波参数。防波堤形态测量采用Trimble CX型3D激光扫描仪。该扫描仪标准条件下测程为80 m(90%反射表面)和50 m(18%反射表面),扫描速度为54 000点/s,视场360°×300°。标准偏差30 m以内1.00 mm,30~50 m为1.25 mm,50~80 m为1.80 mm。工作温度0~40℃。在试验

场区内布设 4 个直径 100 mm 的靶球校准多次扫描的云点文件。

### 1.4 数据处理方法

三维激光点云数据通过 Trimble realworks 9.0 进行数据前处理，删除无效数据和异常数据，提取测量的有效区域，最终输出成 .xyz 文件。通过地球物理软件 GMT5.4 处理 .xyz 文件，形成防波堤的高程平面图。运用 surfer 11 软件提取防波堤断面数据，运用 grapher 9 软件绘制防波堤断面图。

## 2 试验过程

### 2.1 防波堤整体形态变化

试验按照从极端低水位(100 a 一遇)到极端高水位(100 a 一遇)、再从极端高水位到极端低水位的往复顺序循环进行(简称极端低—设计低—设计高—极端高—设计高 2—设计低 2—极端低 2)，每种工况波浪作用 20 min，相当于原型时间 2 个多小时。运用三维激光扫描仪和相机照片两种方式对防波堤的最终动态平衡形态进行记录。试验前后防波堤整体的激光点云三维形态见图 2，传统相机照片见图 3。

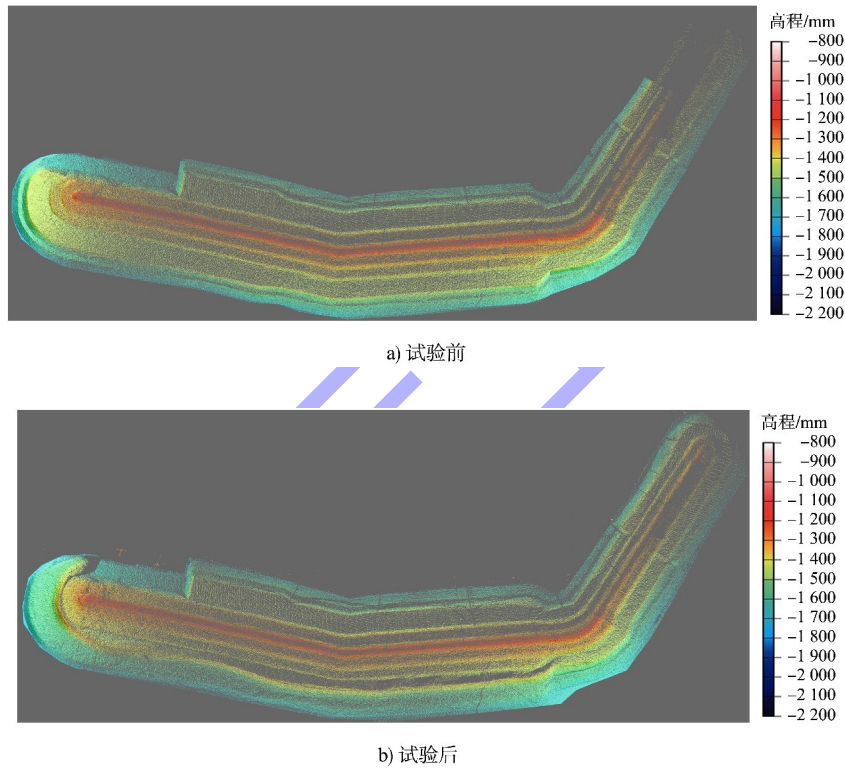


图 2 试验前后防波堤整体形态 (三维激光点云成图)

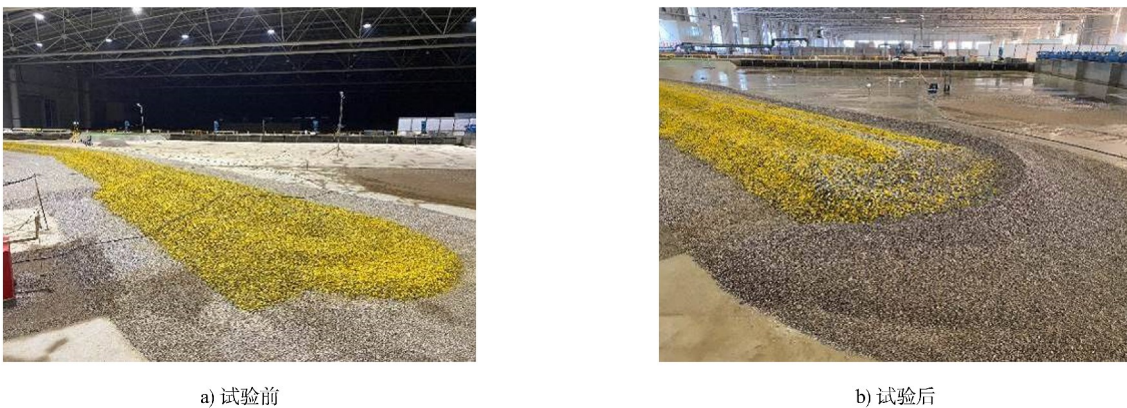


图 3 试验前后防波堤堤头形态

从图 2 可见, 防波堤堤头变化最为显著, 从护底到护坡块石均有明显的移动, 堤身护底物质也明显向堤顶汇集。从图 3 可见, 照片由于视角等限制, 难以拍摄出模型整体的形态。所以这种高分辨率的点云数据集成图效果比传统相机照片具有明显的优势, 防波堤整体形态呈现效果更加直观。

### 2.2 防波堤堤头形态变化

通过防波堤整体形态结果可以看出, 堤头段在 SE 向波浪条件作用下的变化最为显著, 截取堤头段进行对比分析。各条件波浪作用下防波堤堤

头整体形态见图 4。图中可见极端低水位下波浪作用后, 防波堤形态变化主要在于堤头护底块石彻底失稳, 并向护坡堆积。设计低水位下波浪作用后, 护底块石继续往护坡堆积, 护坡块石也开始失稳, 肩台变窄。从设计高后到设计高 2 后, 防波堤形态相对稳定。设计低 2 后和极端低 2 后, 防波堤护底和护坡变形加剧。

三维扫描对模型整体的形态变化控制很好, 但对变形或失稳不明显的结构物, 则难以判别块石的滚落情况。此时需采用与传统照片相结合的方式鉴别。

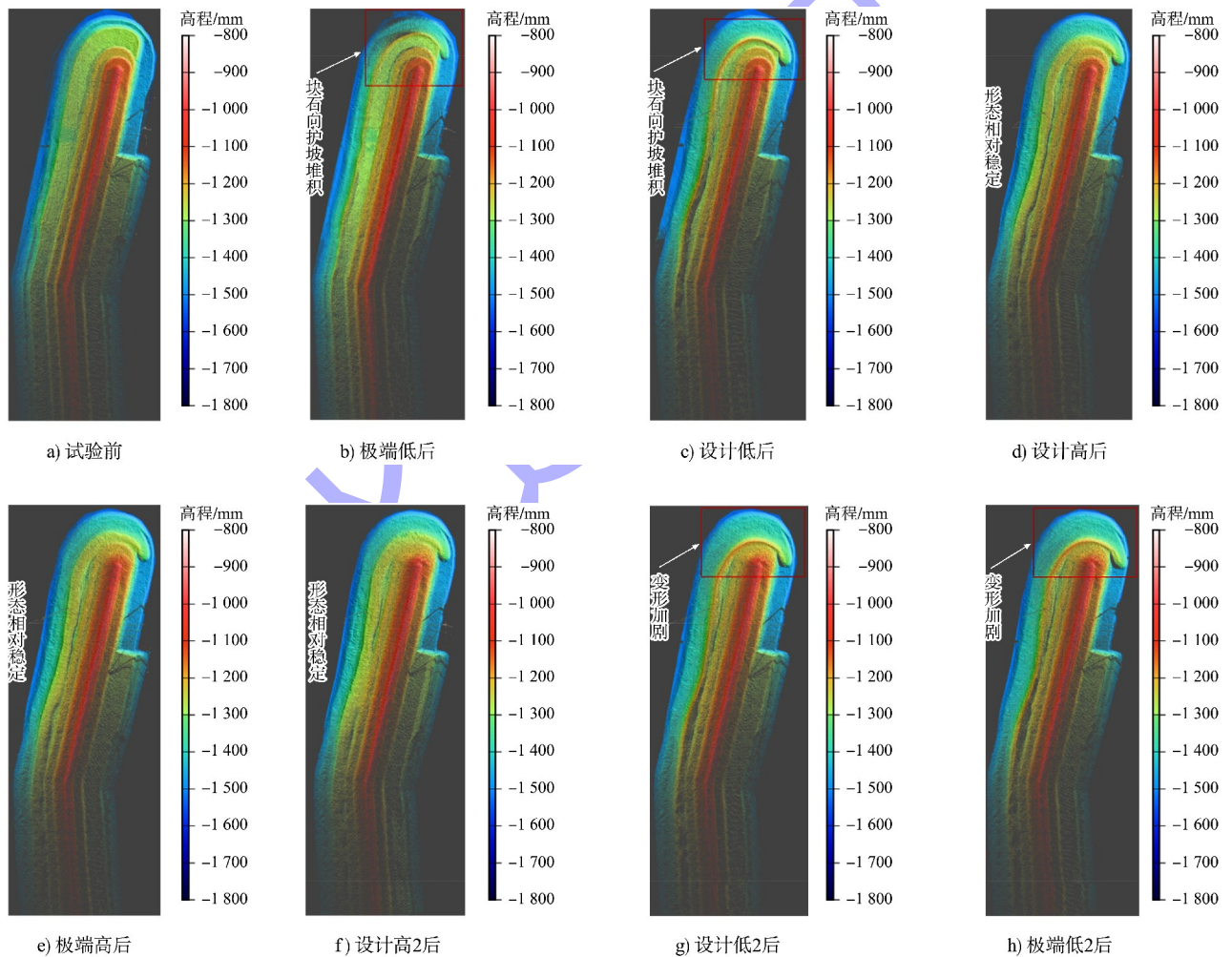


图 4 各波浪条件作用后防波堤堤头三维形态

### 2.3 防波堤典型断面形态变化

三维激光点云数据集不仅在模型整体形态上表现突出, 还可根据需求随意选择断面进行分析。根据整体变形情况, 选择变形明显的 9 个断面进

行分析, 断面位置见图 5。根据模型比尺将断面数据换算成实际尺寸, 并与原始断面对比分析。对变形最大的  $T_1 \sim T_5$  堤头断面进行每种工况后的剖面形态对比分析, 对  $T_6 \sim T_9$  堤身断面进行试验前后的

对比分析,如图6所示。 $T_1 \sim T_5$  断面结果显示,护底块石由于质量较小,发生的位移较大。极端低和设计低水位是护底块石向上推移最明显的工况,设计高和极端高水位主要塑造护面的形态。一个循环往复试验后,宽肩台抛石堤剖面已经被塑造

成了宽平的S形,这一试验结果与前人的研究很好地契合<sup>[10-11]</sup>。 $T_6 \sim T_9$  断面形态改变主要发生在防波堤外侧,前端护底物质推到后端护底之上,使得护底宽度缩短,厚度增大。

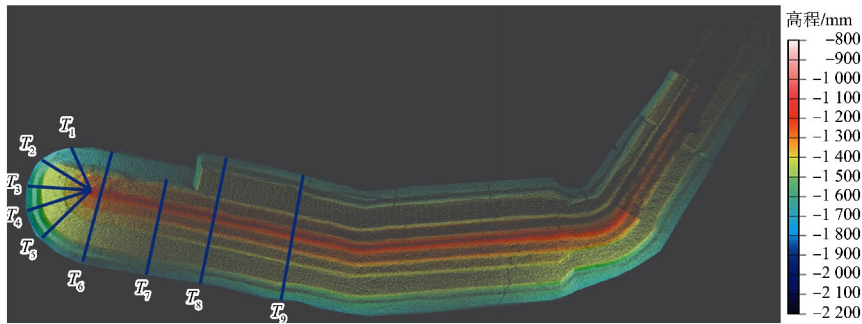
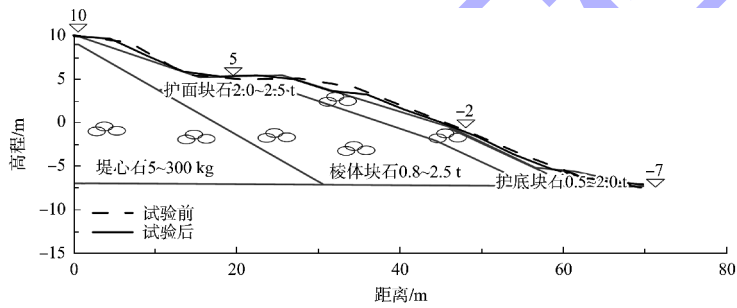
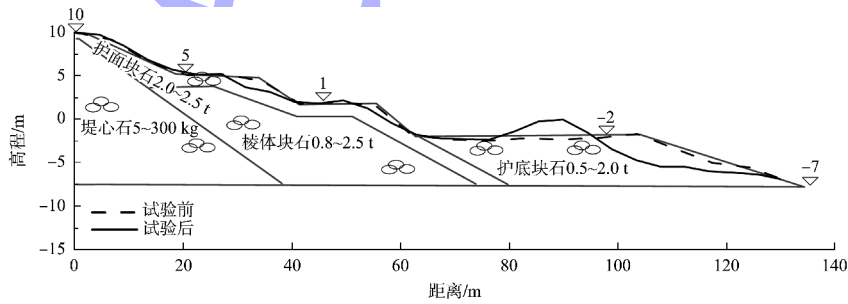


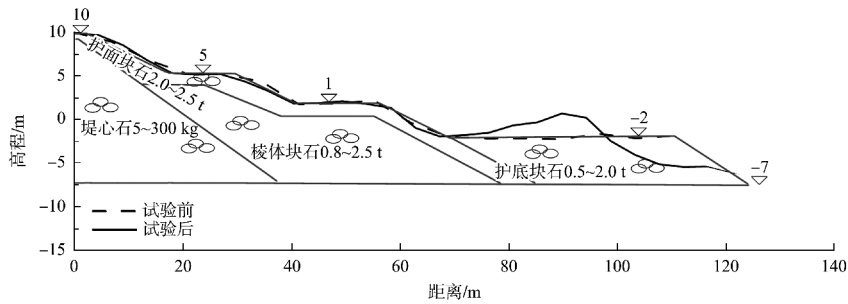
图5 断面位置分布



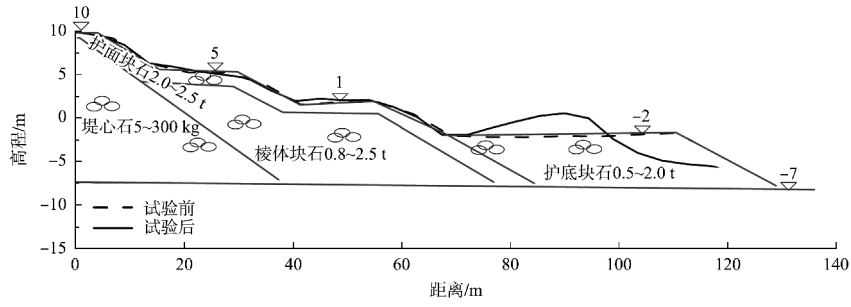
a)  $T_1$



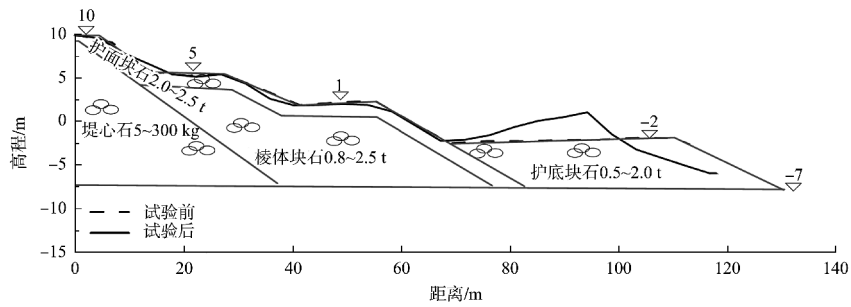
b)  $T_2$



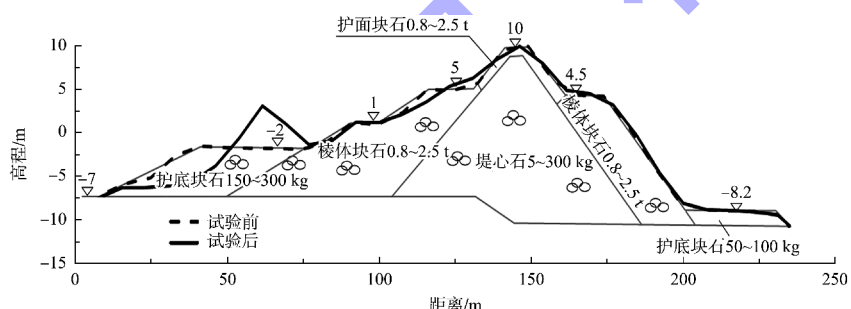
c)  $T_3$



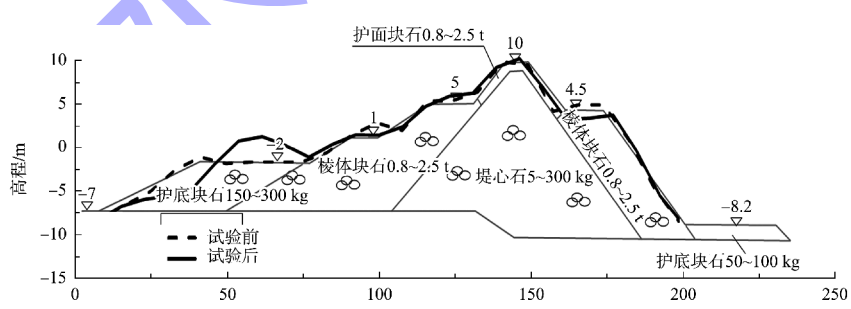
d)  $T_4$



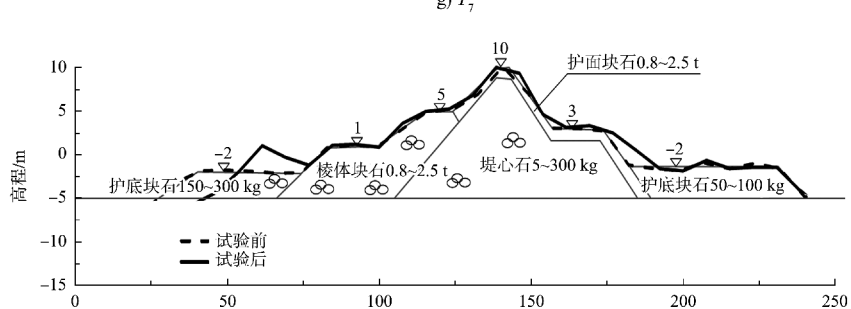
e)  $T_5$



f)  $T_6$



g)  $T_7$



h)  $T_8$

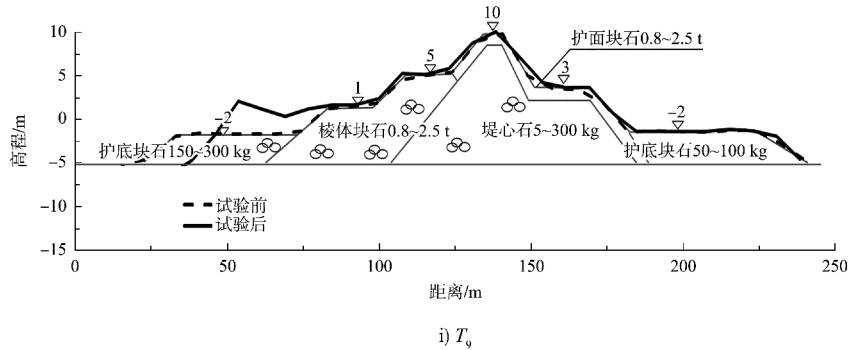


图6 各断面形态变化特征

3 结论

- 1) 宽肩台抛石堤在波浪作用下形态变化剧烈，最终形成动态平衡的S形剖面形态。
- 2) 与相机照片相比，三维激光扫描技术具有精度高、操作便捷、可视化效果突出等特点，在物理模型上能够取代部分传统照片和全站仪等测量仪器的功能。
- 3) 三维激光扫描技术在判别块体翻转、轻微移动等过程上还有待改进，需要与传统手段相结合。总体而言，三维激光扫描技术在物理模型试验上的应用前景值得期待。

参考文献:

[1] 郭江宁, 陈年青, 李得军, 等. 一种基于激光扫描的采动区公路路面监测方法[J]. 北京测绘, 2020, 34(11): 1520-1524.

[2] 苟鑫. 三维激光扫描技术在地形地质测量中的运用分析[J]. 石化技术, 2020, 27(11): 50-51.

[3] 李宝瑞. 地面三维激光扫描技术在古建筑测绘中的应

用研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.

[4] 黄传朋. 基于三维激光扫描仪的三维地形获取及应用[D]. 天津: 天津理工大学, 2019.

[5] NABBOUT K E. Terrestrial laser scan application in urban planning[J]. True-3D in cartography: autostereoscopic and solid visualisation of geodata, 2012: 259-264.

[6] 钟维林, 孙治林, 宁环波, 等. 三维激光扫描技术在港口筒仓内壁磨损检测中的应用[J]. 水道港口, 2020, 41(2): 185-190.

[7] 李鸿均, 邱延林. 基于三维激光扫描技术对灾后滑坡的应急监测[J]. 科学技术创新, 2020(34): 52-53.

[8] 黄传朋, 王晨阳, 金瑞佳, 等. 围油栏水动力特性大比尺物理模型试验研究[J]. 水道港口, 2019, 40(4): 391-396.

[9] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程抗震设计规范: JTS 146—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

[10] 卢少彦, 谢乔木. 一种宽肩台护岸的应用研究[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(3): 5-7.

[11] 刘志远, 佟德胜, 张文忠. 宽肩台防波堤稳定性研究[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(1): 25-30.

(本文编辑 王传瑜)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费，所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部