

变坡潜堤周围水流结构对软体排破坏的影响因素分析

蔡建冬

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032)

摘要: 针对变坡潜堤周围水流结构复杂多变的问题, 依托和畅洲潜堤工程, 分析潜堤地形冲刷、软体排破坏原因。采用资料搜集和模型分析的方法, 归纳冲刷部位堤顶高程与水位、汛期的相关性, 分析水动力特性。得出以下影响因素: 越堤流和绕堤流组合水流强劲, 长江大流量及快速退水, 二元土层结构河床稳定性差。采用抛填砂袋和抛填块石加固措施, 可抑制冲刷发展。

关键词: 航道整治; 变坡潜堤; 水流结构; 软体排; 破坏

中图分类号: U 617.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0135-07

Influential factors of flow structure around variable slope submerged dike on failure of soft bank

CAI Jian-dong

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The structure of water flow around the submerged dike with variable slope is complex and changeable. Based on the Hechangzhou submersible dike project, this paper analyzes the reasons of topographic scour and soft bank damage for the submersible dike. Based on data collection and model analysis, this paper summarizes the correlation between the elevation of the dike top and water level and flood season at the scour site, and analyzes the hydrodynamic characteristics. The following influential factors are obtained: strong combined flow over the dike and around the dike, large flow and rapid retreat of the Yangtze River, and poor stability of the riverbed of the binary soil layer structure. The scour development can be restrained by using the sandbag and stone.

Keywords: channel regulation; variable slope submerged dike; flow structure; soft mattress; failure

护底软体排是整治建筑物的重要组成部分, 可阻隔水流对河床的直接冲刷, 能起到良好的透水固沙作用, 从而避免河床破坏。但当软体排周围存在长期作用的不利流态和易冲刷的河床组成时, 排体边缘河床易冲刷下切产生冲刷坑, 当水流持续掏刷时将向排体内部发展, 引起排体破坏。

国内关于排体冲刷的研究较多, 多集中于软体排破坏机理及防护措施的研究。武永新^[1]回顾了国内外丁坝工程冲刷与防护安全的研究进展,

对丁坝冲刷及防护的研究成果进行综述; 付中敏^[2]分析了护底软体排变形破坏的主要影响因素有水流条件、河床组成、软体排自身结构、余排宽度及施工工艺等, 探讨了护底软体排破坏的力学机理。

对于变坡潜堤, 由于堤顶沿程变化, 增加了水流结构多样性, 从而使得引发冲刷的因素更加复杂。本文结合和畅洲潜堤实施实例, 综合分析水流结构有关的流量、水位、水流周期, 分析变

坡潜堤的冲刷和软体排破坏原因，提出修复加固措施，可为类似工程的冲刷防护提供参考。

1 和畅洲变坡潜堤概况

和畅洲潜堤工程位于长江镇扬河段畅洲左汊水道，主体建筑物为2道拦江平行设置的“一”字形潜堤，1[#]、2[#]潜堤长度分别为1 817、1 919 m，间距1 000 m。考虑远期汊道通航的要求，潜堤堤顶高程和堤身高度沿程变化较大，轴线断面构成了3级

平台2道折线变坡的形式，两端堤顶位于平均水位之上，其余部位位于水下(图 1)。堤身结构采用袋装砂芯堤和抛石斜坡堤的组合方案。对堤高大于5 m的区段采用袋装砂芯堤，堤高小于5 m以及两端接岸段采用抛石斜坡堤。潜堤余排为混凝土联锁块压载软体排，余排宽度上游100~150 m，下游100~450 m，排体下游侧设置消能结构，采用抛设带状扭工字透水框架方式，抛投2层，每道宽20~30 m，间隔约60 m。

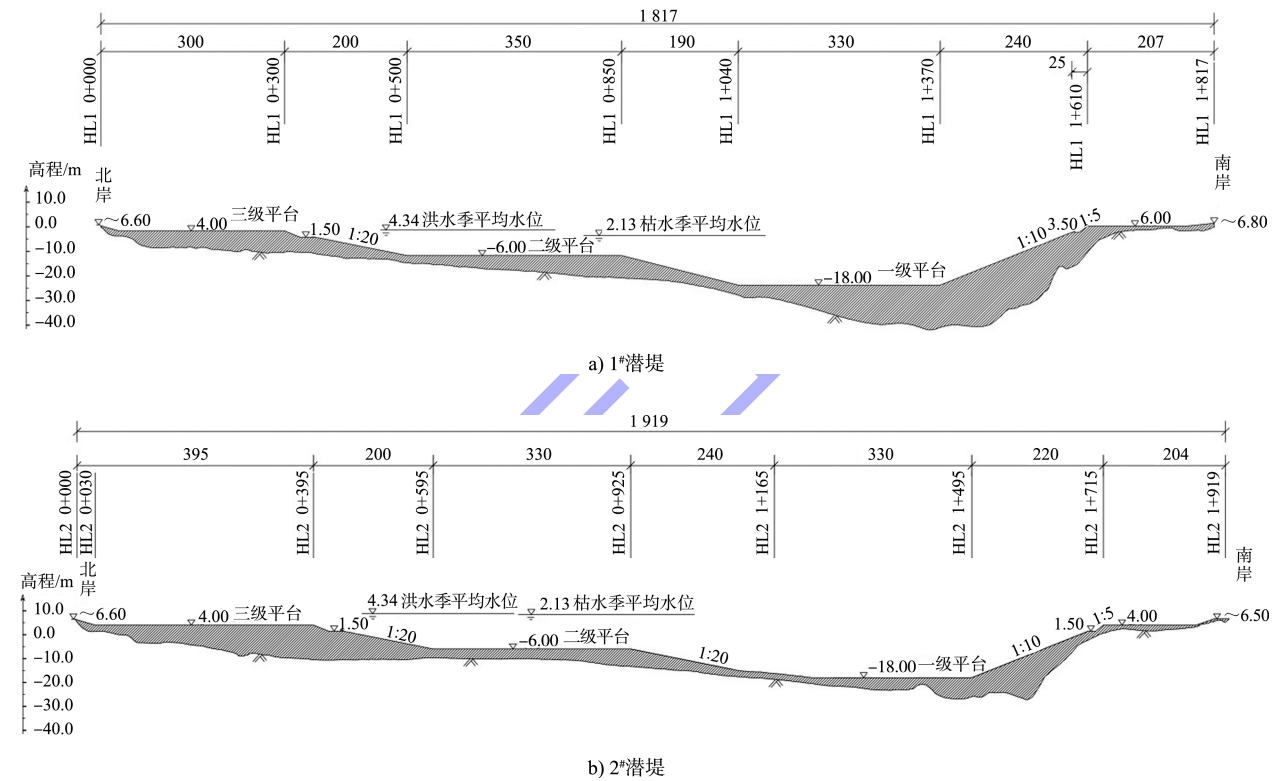


图 1 潜堤纵断面 (单位: m)

2 历次冲刷情况

和畅洲潜堤工程施工周期较长，经历了2个水文年。工程于2015年5月开工，2016年3月(汛期前)完成全部铺排护底施工，高于-5 m的浅水段堤身起高1.5 m厚堤心材料和两侧压脚块石，对堤身砂肋排形成压护；低于-5 m的深水区段抬高至-26 m高程。2017年3月(汛期前)深水区段抬高至设计高程-18.0 m，浅水区段堤身施工完成。

工程实施过程中及完成后，每月对工程区开展了固定断面监测及分析工作，监测结果显示，2016—2019年间潜堤附近共发生了3次较大幅度冲刷，均位于潜堤下游侧排体边缘。其中，2处位于一级平台下游侧，1处位于二级平台下游侧。冲刷坑均由排外逐渐向排内延伸形成(图 2、3)，冲刷坑范围内排体出现褶皱现象(图 4)。冲刷形成时间集中在每年的7—9月洪水期和1—2月枯水期^[3]，冲刷数据见表1。

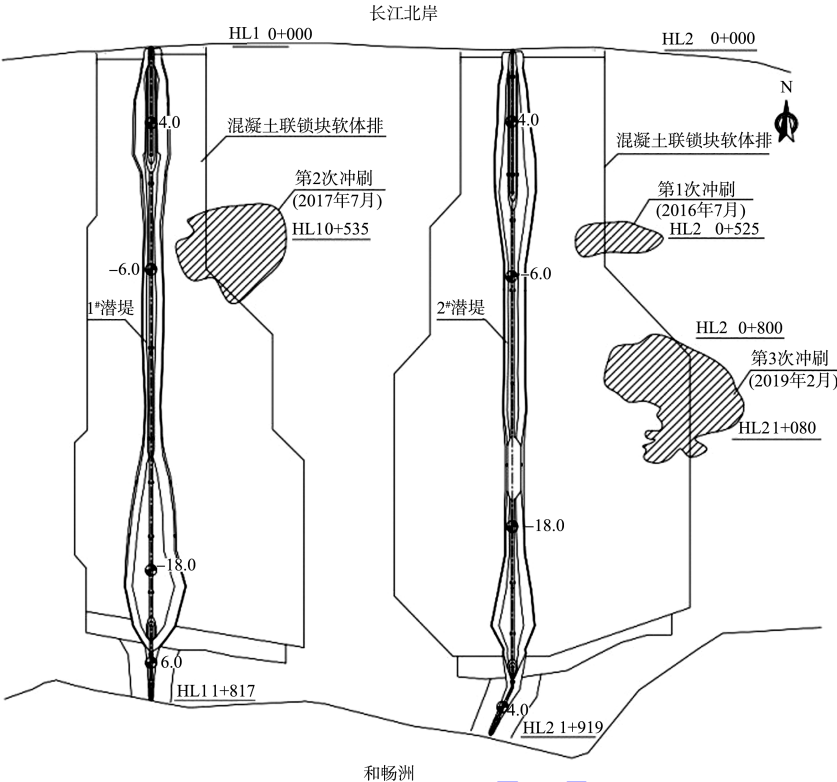


图 2 历次冲刷坑分布

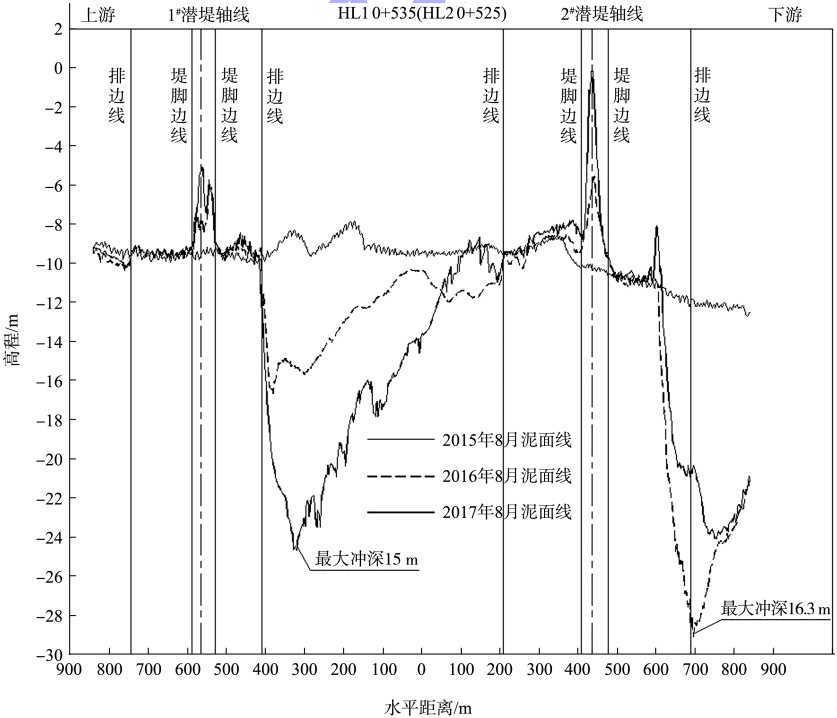


图 3 HL1 #0+535 冲刷坑断面

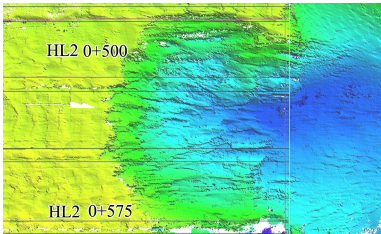


图 4 冲刷坑多波束图像(侵入余排)

对表 1 中历次冲刷发生的流量、水位、部位进行分析可知,冲刷发展最剧烈的时段多为汛期(6—8 月)及汛后退水初期,水位略高于堤顶,多位于潜堤下游侧排边水流动力较强部位。

表 1 冲刷情况

冲刷部位	时间	断面里程号	冲刷坑尺寸 (长×宽)/(m×m)	冲刷 深度/m	大通流量平均值 (最小值~最大值)/(m ³ ·s ⁻¹)	冲刷剧烈 时水位/m
2#潜堤下游排边	2016 年洪水季 7—8 月	HL2 0+525	160×100	16.3	61 487 (51 200~70 800)	4.34
1#潜堤下游排边	2017 年洪水季 7—8 月	HL1 0+535	300×270	15.0	49 334 (35 100~67 400)	4.34
2#潜堤下游排体边缘	2019 年枯水季 2—3 月	HL2 0+800	380×350	13.4	27 325 (16 700~33 900)	2.13~3.13

3 排体失稳常见原因

3.1 河床冲刷常见类型

从泥沙启动流速的角度分析,当底部水流流速大于表层泥沙的启动流速时,泥沙开始启动,此时冲刷发生。当水流流速小于河床泥沙的冲止流速时,河床达到动态冲淤平衡。整治建筑物周边局部冲刷机理十分复杂,国内对此研究成果较多,研究学者观点不一,主要有马蹄形漩涡说、水流压力差说、河道紧缩说以及综合因素说等4 种说法。

3.2 冲刷深度到排体变形的一般过程

从软体排抗拉强度角度看,当排体附近床面发生冲刷时,排体利用其柔性特点,将顺应河床变化下降,当冲坑坑坡度进一步变陡、排体抗拉强度不足以承受排体重力侧向下滑分力时,连接绳断裂,压载体移动或脱落,冲刷坑向软体排内部深入发展,软体排丧失护底功能。

排体分幅搭接垂直于排体边缘,当冲刷坑发展引发排体滑动移位时,搭接处河床易出露,使得冲刷加速向软体排内部发展。另外,受加工工艺限制,排垫横向未加筋,使得排体柔性不足以适应排体横向悬挂,排体横向更易发生撕裂。

4 变坡潜堤冲刷原因

4.1 水流动力条件研究

4.1.1 二维断面水力特性试验

1) 试验水流条件。本研究建立了二维物理模

型研究潜堤水力特性,潜堤断面模型采用 1:60 正态比尺,断面结构水力特性出于对结构稳定不利的角度,考虑 2 种水位(设计高水位 6.62 m、设计低水位-0.35 m)、2 种堤顶垂线平均流速(3.5、4.0 m/s)(表 2)。

表 2 断面结构水力特性试验组次

组次	设计水位/m	堤顶垂线平均 流速/(m·s ⁻¹)	堤顶水深/ m
1	6.62	3.5	24.62
2	-0.35	3.5	17.65
3	-0.35	4.0	17.65

2) 垂线流速测点布置。考虑到设计高、低水位时,潜堤堤顶水深达 24.62、17.65 m,垂线流速测量采用六点法,分别为近床面(0.1h)、0.2h、0.4h、0.6h、0.8h、近水面(0.9h),共测量垂线 18 条。

3) 断面流速、紊动强度分布变化。研究结果显示,在设计高水位、堤顶流速 3.5 m/s 时,水流越过潜堤后水流强烈掺混,在下游一定区域形成强紊动区(图 5);在下游 144 m 区域存在紊动峰值区,最大紊动强度为 0.8 m/s。断面模型试验报告表明,受堤体挤压后的坝后水流跌水明显,水流三维特征显著,紊动强度大,影响范围广,堤后排体及排后河床处于流场剧烈紊动区和变坡平台挑流后的流速增加区^[4]。因此,堤后极其复杂紊乱的水流流态是排体及排后河床受到较大幅度冲刷的主要水流动力原因。

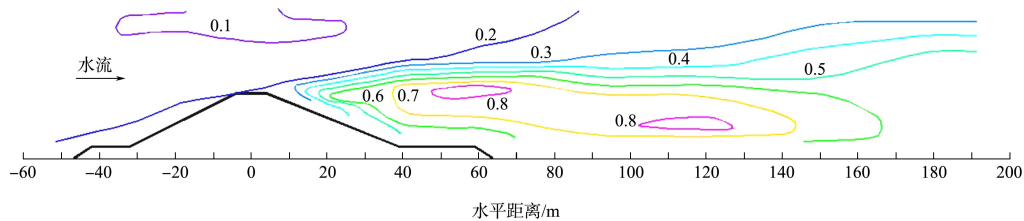


图 5 潜堤结构断面水流紊动强度分布（单位：m/s）

4.1.2 三维水动力数学模型试验

建立三维水动力数学模型以研究河道内潜堤形成带来的水流结构变化。根据施工前实测地形资料建立镇扬河段长约 30 km 的三维水动力数学模型(瓜州—大港)，模型垂向分为 10 层^[5]。模型计算采用 2014 年 6 月实测水文资料，上游进口边界来流量 35 370 m³/s，下游水位由大港水道水位控制。水流计算条件采用恒定流方式，以近年中水期平均流量条件进行计算，上游来流量为35 000 m³/s。

在潜堤三维数学模型中，根据潜堤建成前后垂线平均流速变化对比，潜堤施工完成后，由于整条潜堤的抬高对水体产生挤压，潜堤堤顶流速增大，最大增加约 0.7 m/s，出现潜堤左侧浅水区域(图 6)，深水区域堤顶流速最大增加不超过 0.5 m/s。浅水区域上、下游分别受抬高的潜堤阻水和掩护作用，流速减缓，最大降低约 0.5 m/s；深水区域上下游流速略增大，增幅一般不超过 0.1 m/s^[6]。

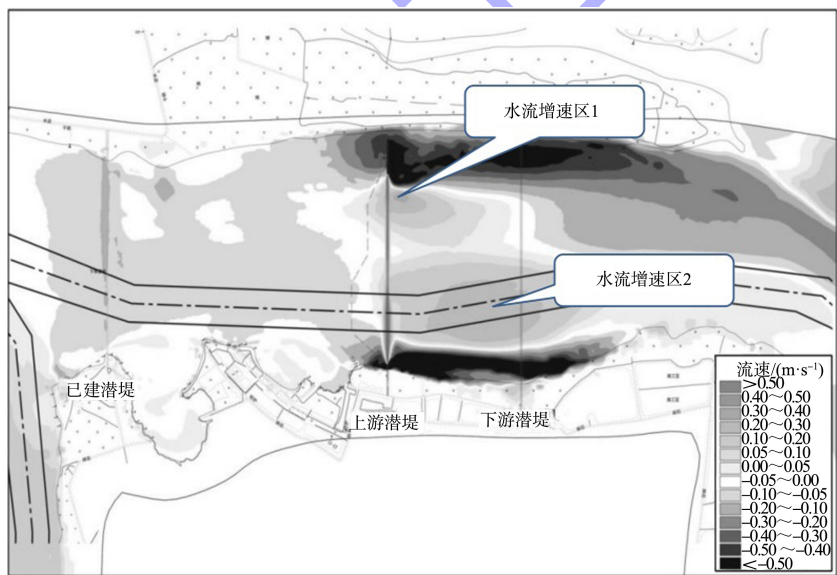


图 6 潜堤施工前后垂线平均流速变化

4.1.3 近年长江来水量大,退水期流量迅速下降

2015 年前长江来水量普遍偏小，而近年(2015—2017 年)长江来水量比前几年明显增大，潜坝工程竣工前后的 2017 年 7 月月径流量为 1 750 亿 m³(图 7)，最大洪峰流量达 70 900 m³/s 以上，超过平滩流量 45 000 m³/s 的天数长达 34 d。由于 2017 年的来水量相对较大，其水流动力相对

要强，对河床和岸坡的冲刷作用也增强。

受三峡水库每年汛后蓄水的影响，长江流域退水期时间较蓄水前明显缩短，退水速率加快。从图 7 可知，7 月下旬至 8 月下旬存在一个明显的流量陡降退水过程。近年长江流域第 1、2 季度降雨较往年丰富，干支流来水偏大，洪水起涨时间提前，起涨期内大水持续时间较长，其中 2016 年

7月出现洪峰 70 100 m³/s, 为近年来最大值。在出现年内最大洪峰后, 洪水退水速度较快, 到9月

底流量即降至 17 900 m³/s, 退水速度明显高于往年, 水流快速归槽, 加剧了河槽冲刷。

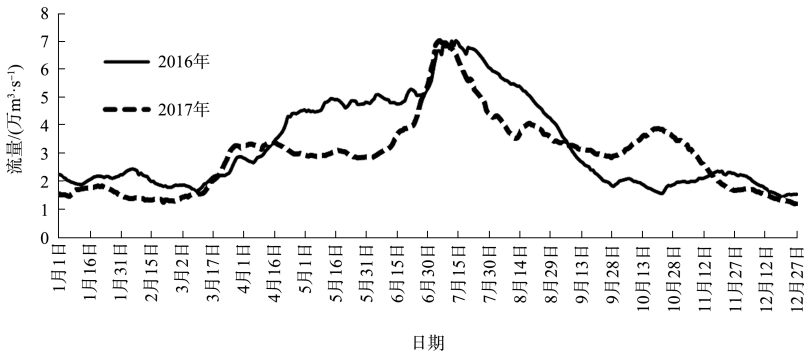


图 7 大通站日均流量过程线

4.2 变坡潜堤的纵向阶梯式堤顶结构

由于考虑了今后畅洲水道左汊通航的要求, 潜坝轴线断面设计为 3 级平台 2 道折线变坡的形式, 预留深水航道区堤顶高程 - 18.0 m (一级平台), 预留万吨级航道区堤顶高程 - 6.0 m (二级平台), 接岸段堤顶高程 4.0 m (三级平台)。洪水期平均水位为 4.34 m, 对于近岸三级平台来说, 是绕堤流, 对于二级平台来说, 是越堤流。冲刷发生期间, 水位略高于三级平台, 坝体变坡平台类似长丁坝, 使得挑流作用十分强劲, 下潜水流和绕过坝头的水流及它们的相互作用所产生马蹄形漩涡, 马蹄涡具有极强的河床剪力和搬运泥沙颗粒能力, 造成局部冲刷。

4.3 河床边界条件促进冲刷

和畅洲潜堤位于长江中下游冲积平原河道, 堤身附近河床土层为典型的“二元结构”, - 5 m 以上为淤泥质粉质黏土或粉质黏土为主, - 5 m 以下为粉细砂。河床土质贯入击数较低, 由于沉积

年代新, 含水量高, 凝聚力低, 所以结构松散, 河床组成物抗冲性能较差, 受水流冲刷后, 很容易冲深形成冲刷坑。此外, 三峡蓄水以来, 长江流域来沙量急剧减少, 近年长江中下游河床整体呈现冲刷下切的态势, 多个港区码头前方等深线后退也验证了上述现象。因此, 河床稳定性差是冲刷发生的主要的客观原因。

5 冲刷处理措施及效果

局部冲刷发生后, 为了抑制冲刷坑进一步发展而威胁排体稳定, 对冲刷部位进行防护, 重点防护部位为余排范围内冲刷坑边坡, 防护边界超出排体 10 m。HL2 0+525、HL1 0+535 部位防护方式为抛填 3 m 厚砂袋, 砂袋规格为 4 m × 6 m (图 8); HL2 0+800 部位由于砂源紧张, 遏制冲刷坑进一步向堤身方向发展。冲刷处理采用抛石的方式, 块石规格为 100~200 kg, 上游侧 20 m 宽范围厚度 1.0 m, 其余范围厚度 1.5 m。

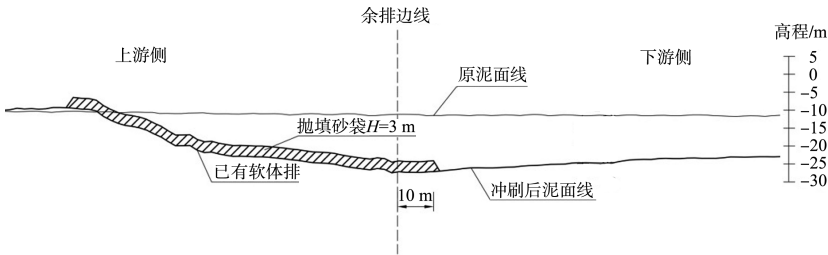


图 8 冲刷坑处理典型断面

冲刷防护后对潜堤周边地形进行持续观测，根据加固后每月的固定断面监测，加固后排体范围内泥面基本无变化，排体范围内未发生进一步冲刷，采取的冲刷措施是有效的。

6 结语

1)和畅洲潜堤为变坡潜堤，周边发生多处局部冲刷。针对潜堤堤顶沿程变化对水流结构的影响及其与流量、水位、水流周期的相关性研究表明，潜堤 3 级平台 2 道折线的纵断面形式为冲刷发生的结构原因，复杂的越堤流和绕堤流组合水流形态与强劲的水流动力是直接原因，洪峰大流量下水位与水流的不利组合是间接原因，不稳定砂质河床是冲刷发生的客观原因。

2)局部冲刷发生后，为了抑制冲刷坑进一步发展而威胁堤身稳定，和畅洲潜堤冲刷区采用了抛填砂袋和抛石的方式进行处理，对余排内冲刷区进行了覆盖，抛填厚度 1.5~3.0 m，边界超出排体 10 m。加固后每月的固定断面监测结果显示，该区域稳定，达到了预期效果。

(上接第 105 页)

4 结论

1)随着斜坡堤垫层块石质量逐渐减小，斜坡堤堤身的稳定性逐渐减弱，其所能抵御的波浪波高逐渐减小。斜坡堤的稳定性与垫层块石的质量关系密切。

2)垫层块石质量为 1/40~1/10 护面扭王字块质量时，在护面块体稳定波高下，斜坡堤均可保持稳定。

3)采用相同的垫层块石质量，淹没堤的稳定性优于出水堤。由于淹没堤潜于水下，其对波浪的阻挡作用弱于出水堤，堤身承受的波浪能量小于出水堤，因此其稳定性较强。

参考文献：

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.防波堤设计

3)对于类似潜堤变坡区段，需要对变坡位置上下游河床加强防护，减少水流对河床的冲击。越堤流能量释放需要较长距离，潜堤外侧须充分考虑余排宽度。搭接区为薄弱环节，河床外露易加速冲刷，须针对性增加搭接宽度和压载块质量。

参考文献：

[1] 武永新, 王建家, 苑希民.丁坝工程冲刷与防护措施研究综述[J].自然灾害学报, 2020, 29(1) : 1-10.
[2] 付中敏.护底软体排破坏机理及应对措施[J].水运工程, 2015(7) : 114-118, 128.
[3] 长江航道规划设计研究院.长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程整治建筑物冲刷及加固情况分析[R].武汉: 长江航道规划设计研究院, 2019.
[4] 南京水利科学研究院.和畅洲汉道限流潜堤断面试验研究[R].南京: 南京水利科学研究院, 2017.
[5] 胡颖, 马爱兴, 曹民雄, 等.和畅洲汉道限流潜堤施工顺序研究[J].水运工程, 2018(5) : 8-15.
[6] 胡颖, 文天翼, 马爱兴, 等.和畅洲水道深水潜堤施工过程引起的水动力变化[J].水运工程, 2018(4) : 1-7.

(本文编辑 郭雪珍)

与施工规范: JTS 154—2018[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[2] 姜振春, 马帅, 梁丙臣.人工块体替代垫层块石的数值试验研究[J].水运工程, 2018(3) : 1-6.
[3] MEER V D J W.Stability of breakwater armour layers-design formulae[J].Coastal engineering, 1987, 11(3) : 219-239.
[4] 高洪斌.斜坡堤护面块体的垫层块石重量[J].港工技术, 1992(3) : 30-31, 37.
[5] 任意, 琚烈红, 冯卫兵.护坡垫层渗透系数对面层波浪上举力的影响[J].水运工程, 2016(3) : 14-18, 39.
[6] 姜振春, 马帅, 梁丙臣.人工块体替代垫层块石的数值试验研究[J].水运工程, 2018(3) : 1-6.
[7] 南京水利科学研究院.波浪模型试验规程: JTS/T 234—2001[S].北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 王璁)