



新沂河险工险段成因和治理措施^{*}

王为正^{1,2}, 魏松^{1,2}, 周静³, 李德娟¹, 章飞凡¹, 陈清¹

- (1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;
3. 淮河水利委员会沂沭泗水利管理局, 江苏 徐州 221018)

摘要: 作为控制洪水建筑物, 堤防因所处环境恶劣, 极易产生险工、险段。针对新沂河堤防的险工、险段问题, 收集了相关的地质、水文资料。结合现场调查, 系统分析新沂河险工成因, 提出了不同险工的治理措施。结果表明: 1) 汛期水位骤升骤降是新沂河形成险工、险段的重要外因, 堤基透水性较强、土质不均形成险工险段的重要内因; 2) 按照险工成因, 新沂河的险工可以分为 3 种类型; 3) 根据不同的险工类型提出了不同的治理措施, 并以沙湾险工段为例论证了治理方案的正确性。

关键词: 新沂河; 险工险段; 治理; 崩岸; 渗水

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0112-07

Causes and control measures for dangerous sections of the Xinyi River

WANG Wei-zheng^{1,2}, WEI Song^{1,2}, ZHOU Jing³, LI De-juan¹, ZHANG Fei-fan¹, CHEN Qing¹

- (1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China;
3. Yi-Shu-Si River Basin Administration of Huaihe River Commission, Xuzhou 221018, China)

Abstract: As a flood control building, the embankment can easily lead to dangerous sections due to the harsh surrounding environment. In view of the dangerous sections of the Xinyi River embankment, relevant geological and hydrological data are collected. In combination with on-site investigations, the causes of the dangerous sections of the Xinyi River are systematically analyzed, and control measures for different dangerous sections are proposed. The results show that: 1) The sudden rise and fall of water level in the flood season is the important external cause for the dangerous sections of the Xinyi River, and the strong permeability of the embankment foundation and the uneven soil quality are the important internal causes. 2) According to these causes, the dangerous sections of the Xinyi River can be divided into three types. 3) Different control measures are proposed in light of different types of dangerous sections, and the correctness of the control plan is demonstrated by the Shawan dangerous section.

Keywords: the Xinyi River; dangerous sections; control; bank collapse; seepage

险工是指堤防险段所修的防护工程; 险段是指堤身单薄、土质不好、施工质量差或隐患较多而易发生险情的薄弱堤段和堤距过窄、易于卡阻洪水或冰凌的堤段, 或历史上多次发生险情的堤段; 险工治理, 其主要目的是防止河岸坍塌、稳

定河势、确保堤防安全^[1]。近代以来, 在险工成因机理方面, 随着流体力学、土力学等学科的发展, 国内外学者从水流结构、堤基土质等方面揭示了部分险工成因; 在险工治理技术方面, 混凝土材料、有机高分子材料的出现, 提供了更好的

收稿日期: 2021-04-20

^{*}基金项目: 国家自然科学基金项目(51979068)

作者简介: 王为正(1996—), 男, 硕士研究生, 从事水利工程的研究。

通讯作者: 魏松(1970—), 男, 博士, 副教授, 从事水利工程教学和科学研究。E-mail: 910884583@qq.com

治理方法，我国大多采用混凝土护坡^[2]、垂直铺塑防渗^[3]、黏土灌浆、滤层结构^[4]等措施治理堤防险工、险段。为适应现代生态水利建设需求，选择了生态混凝土、生态护坡、生态膜袋等^[5-7]险工治理技术对堤防岸坡进行治理。基于我国水利工程现状，险工治理仍将是水利工程建设的重要组成部分，也是抵御洪水、保证堤防工程安全的必要工程措施。

我国河道堤防较长，随着运行时间的增加，新的险工、险段不断出现。黄扬一等^[8]曾指出：只要大堤临水侧和背水侧存在水头差就会有渗流产生，且随着汛期水位的升高，江水通过透水层向堤内渗透，当渗透比降大于临界比降时，背水侧土体将产生渗透破坏。而在非汛期时，地质因素可能比河势水流的影响更大。贾恺等^[9]曾对广东省省管河道范围内的历史险工、险段进行了调研并发现，若地质条件较好，即使水流条件较差也不会形成险段。吴昌瑜等^[10]同样指出，堤身填土不均和土质较差是最有可能发生渗透变形的。与此同时，由于险工、险段的研究受到更多重视，相应的监测和评价体系得到了发展。张幸农等^[11]提出，长江中下游存在较为严重的崩岸险情，最好的预防措施就是对其水文、近岸河床地形、水文地质等内容进行监测，合理预测分析，能够有效地避免险工失事。戴永琪等^[12]曾对里运河的堤防进行了相应的定级，为里运河堤防加固与检测设计工作提供了依据。

由于险工、险段受堤防地质条件和河势水流影响较大，因此，不同区域、不同河流的险工成因各不相同。新沂河的多数堤防，堤基为砂性土、粉质壤土，且受汛期洪水影响较大，形成了一系列的险工。虽然新沂河的险工、险段经历过长期的治理，但是在成因、机理和治理技术上，仍缺乏理论指导。本文收集了新沂河地区水文气象、地形地质等资料，从河流流态、渗流作用等因素分析，探究了新沂河险工、险段的治理方案。

1 研究区域概况

1.1 水文气象及地形地质条件

水文气象条件往往决定了河道的基本条件(水位、流量等)，是形成险工、险段的重要客观因素。新沂河所属的沂沭泗水系是淮河流域的重要水系之一，见图 1，流域总面积约 7.96 万 km²，占淮河流域面积的 29%。新沂河所属区域位于东经 118°10′~119°50′、北纬 34°5′~34°30′范围内，地处亚热带向暖温带过渡性气候带中，属暖温带半湿润季风气候区，冬干冷、夏湿热，四季分明。多年年平均降水量为 883.6 mm、最大年降水量为 1 396.0 mm、最小年降水量为 531.9 mm，年内分布极不均匀，全年降水量的 70%集中在 6—9 月，而 12 月—次年 2 月仅占全年降水量的 8%左右。作为典型的季节性河道，新沂河仅在汛期承担排洪任务，其洪水特性为峰高量大、来猛去缓、大流量、高水位历时较长。

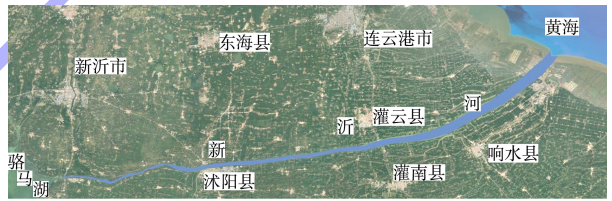


图 1 新沂河地形全貌

新沂河的地质条件是形成险工、险段的另一个客观因素，见图 2。新沂河上游河道相对窄小且蜿蜒曲折，下游河道较为平整顺直，且自西向东地势渐低，坡度西陡东缓，南北堤距西窄东宽，山东河口以上为嶂山切岭段、河道纵坡 1/1 000，口头—沐阳段纵坡 1/3 000。除此之外，由于侍岭段、沙湾段皆坐落在弯道处，在中、高等洪水流量下，顶冲淘刷对岸坡影响较大。新沂河两岸的堤防土质较为复杂，且多为渗透性较大的土质，如轻粉质砂壤土，多数堤基是砂性土质，以砂土、粉质壤土为主，夹带些许黏土，使堤基自身的防渗能力不足。此外，新沂河河沙被人为大量开采，使得部分堤段的河床下切，进一步削弱了堤基的防渗能力。



图 2 新沂河上游段地形

1.2 堤防现状及治理历史

新沂河始自江苏省骆马湖嶂山闸，途径徐州、宿迁、连云港 3 市后入海，全长 146 km，原设计堤防标准为 20 a 一遇，经过多次险工、险段治理后，目前新沂河堤防级别为 1 级，防洪标准为 50 a 一遇。新沂河的险工、险段曾在不同时期进行了多次治理，其中，2005 年的新沂河整治工程极大地提升了新沂河的堤防稳定性，保证了骆马湖周边和沂南、沂北 802 万亩 (5 346.67 km²) 耕地、570 万人民生命财产安全，对江苏省淮北地区防洪保安、经济发展的影响至关重要。

新沂河险工治理历史悠久、经验丰富。自 1949 年苏北“导沂整沭”开挖以来，新沂河一直承担着排泄上游洪水的重要任务，多次经受洪水考验。1950 年洪水后，曾发现原设计堤身断面不够、超高不足、滩地行洪水流紊乱等问题，因此汛期后进行了全面复堤；随着新沂河行洪流量的加大，新沂河大堤曾按行洪 6 000 m³/s 的标准全面加高，并在部分堤段的背水面增做戗台。之后，新沂河又对河床比降较大的河段，采用护岸、护坡、抛石等方式进行治理。21 世纪后，新沂河整治工程开工，针对七雄段、沙湾段、大小陆湖段等渗透破坏严重的堤段，采用垂直铺塑防渗、多头小直径深层搅拌桩防渗墙等现代防渗手段进行了治理。新沂河的治理历史，为险工治理技术提供了参考，积累了宝贵的工程经验。本文通过归纳总结新沂河的水文特点与地质条件，系统分析新沂河险工的形成机理，得到新沂河险工治理的

总体思路，并结合已有险工治理技术，提出了适用于新沂河险工治理的技术类型，为新沂河以及相似河道的险工治理提供理论依据和技术指导。

2 险工成因机理分析

河道险工种类较为繁多、成因复杂，即使同一种险工，其成因也不尽相同。对于险工成因方面，张广恕^[13]提出，险工成因大致分为 6 类：水流冲淘、堤岸抗剪强度的减弱、土体产生裂隙破坏、水位骤降、上提下挫和地下水冲刷。该险工成因的分类方法适用于北方水系，而南北方水系特点大相径庭，黄功学等^[14]指出史灌河的险工成因以土壤松软、水流紊乱为主。由此可见，不同水系的险工类型虽大体相同，但险工成因却略有差异，新沂河也不例外。

2.1 冲刷作用

从水文气象资料来看，新沂河的洪水特点是来猛去缓、峰高量大、历时较长。张凤翔等^[15]对 2018 年“温比亚”台风影响下的新沂河流量进行统计，沭阳站监测的最大洪峰流量为 4 380 m³/s，上游下泄流量由 500 m³/s 逐渐加大，一度达到 4 590 m³/s，其流量增加之快、增量之大，可见一斑。从近两年的水文数据看，新沂河汛期流量在 4 000 m³/s 左右，见表 1。2019 年受到“利奇马”台风的影响，新沂河沭阳站流量一度达到 5 900 m³/s，见图 3。流量的增加，就会引起水位的上涨，2019 年 8 月 12 日前后的沭阳站水位出现了明显的骤增、骤降，变化幅度接近非汛期水位的 200%。

表 1 新沂河主要站最高水位、最大流量

水文站	年份	最高水位/m	最大流量/(m ³ ·s ⁻¹)	出现日期
嶂山闸(闸下)	2018	19.65	4 590	8 月 20 日
	2019	20.24	5 020	8 月 11 日
沭阳	2018	10.11	3 860	8 月 21 日
	2019	11.31	5 900	8 月 12 日

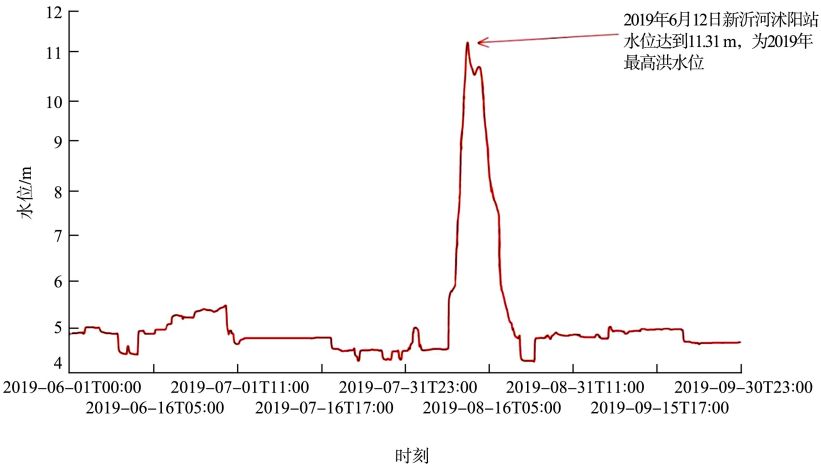


图 3 2019 年沭阳站洪水过程曲线

由于堤防迎水侧水位急剧增加, 护岸、护坡工程表面会产生较大的压应力, 指向堤外; 同时, 当水流以较高的流速从护坡表面流过时, 根据流体力学切应力公式, 护坡表面会产生较大的切应力, 在压应力和切应力的共同作用下, 堤防土体就会发生剪切破坏^[16]。一旦水位骤降, 堤防迎水侧失去荷载作用, 且局部土体内部已被破坏, 极易形成崩岸险工。此外, 护坡工程表面还会受到水流剥蚀的作用, 使护坡变得更加脆弱, 甚至产生部分裂隙, 这也增加了堤防崩岸的危险。

除了汛期流量较大、流速较快之外, 新沂河上游段河道本身存在走势弯曲、比降陡等问题, 河道水流遇弯曲处, 常会出现弯道环流, 即主流集中于凹岸, 使其水面升高, 而凸岸水面降低, 进而形成水面横比降。我国现用计算弯道环流的通用公式如下^[17]:

$$\frac{\partial v_{\theta}}{\partial t} + v_{\theta} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial s} + v_r \frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_{\theta}}{\partial z} = -\frac{v_{\theta} v_r}{r} + gJ_{\theta} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\theta}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_{\theta} \frac{\partial v_r}{\partial s} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = \frac{v_{\theta}^2}{r} - gJ_r + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_r}{\partial z} \quad (2)$$

式中: v_{θ} 、 v_r 、 v_z 为纵向、横向和垂向流速; J_{θ} 、 J_r 为纵向和横向的水面比降; τ_{θ} 、 τ_r 为纵向和横向水流切应力。

从公式中可以看到, 弯道环流的强度与水流流速有着密切的关系, 水流流速越大则弯道环流强度就会越高。当汛期来临时, 新沂河的河道流

量、流速都会增加, 因此会产生更加强烈的弯道环流, 不断地冲刷着凹岸和附近的河底, 由于水流具有一定的挟沙能力^[18], 可以把冲刷的泥沙携带到凸岸, 淤积并形成浅滩, 使凹岸的坡脚变陡或掏空, 失去支持力, 进而形成险工、险段^[19]。

2.2 渗流作用

从水文资料分析, 新沂河在汛期会有大幅度的水位增长。对于河道两侧的堤防工程而言, 水位增长意味着迎水侧与背水侧产生了较大的水位差, 在堤防工程内部, 会形成较大的水力坡降。在水力坡降的影响下, 土体内部会形成较强的渗流力, 且该渗流力是指向堤外的, 文献[20]指出渗流力在指向堤外时会成为破坏力。之前的河道流态分析中指出, 汛期洪水会一定程度上破坏护坡工程, 形成裂隙, 加之渗流力的作用, 堤防内部就容易产生渗透破坏, 新沂河上常见的渗透破坏类型为管涌破坏。根据土骨架内部力的平衡方程, 得到管涌发生的临界水力坡降公式^[21]:

$$J_{cr} = \alpha(G_s - 1)(1 - n) \frac{d_b}{d_e} \quad (3)$$

式中: J_{cr} 为临界水力坡降; α 为形状系数, 一般砂粒可取 1.17; G_s 为土体比重; n 为土体孔隙率; d_b 为土体的起动粒径 (mm); d_e 为土体的等效粒径 (mm)。

由此可见, 孔隙率 n 是堤防渗透破坏的参数之一。由于新沂河堤防经历数次复堤、加高, 受 20 世纪施工技术的限制, 其堤身内部存在部分薄

弱环节、或者不够密实，导致其孔隙率相对较大，堤身的临界水力坡降则较小，容易发生渗透破坏。S. Camici 等^[22]指出堤防工程中存在的孔隙是威胁堤防安全的重要因素，而相比于堤身上的孔隙，堤基中的孔隙更加容易造成堤身失稳。从新沂河的地质勘测资料看，新沂河堤基的压实情况较好，但堤基的土质问题是新沂河多处发生渗透破坏的重要内因。

新沂河上多个堤段坐落于砂性堤基上，当汛期来临时，堤基中的砂性土质并不能完全满足防渗需求，在渗流的作用下，会在堤后发生泉涌、沙沸等现象，即管涌现象，新沂河大小陆湖段就是典型的管涌堤段。

2.3 其他因素

窄小的弯曲河道常使水流产生扰动，造成主流流态不稳，如遇现存的险工，可能加重其危险程度。尤其在河道内出现采砂情况时，采砂所引起的河床下切，使原有的水流进入河道后产生紊流，甚至引起主流的横向摆动^[23-24]，如遇到弯曲河道，横向摆动的水流会直冲堤岸，造成堤防损毁；同时，主流不稳在一定程度上会产生淘沙的效果，将河道底部的细砂涌起，并随着水流带走，造成水土流失，且含沙量较大的水流会影响堤防安全。例如新沂河的沙湾堤段，存在严重的人工采砂问题，致使其堤岸受到较大的河流冲击。王普庆等^[25]指出，高含沙量洪水的主要特性表现在冲淤变化方面，主槽的剧烈冲刷和滩地的大量淤积，使水位居高不下、持续时间较长，造成堤防工程偎水。

综上所述，新沂河作为季节性河道，其险工成因与水位的骤升、骤降有着密切的联系，尤其在束窄的河道堤段，其水位的升降更为明显。当水位骤升时，高水位带来的侧向荷载以及水流在护坡工程表面的冲刷，使得地方土体内部产生剪切破坏；当水位骤降时，卸荷作用容易使受破坏的边坡失稳。同时，新沂河上游河道蜿蜒曲折，易形成弯道环流，甚至在曲率较大的河道，洪峰的主流会直冲堤岸，造成堤防工程损毁。

3 险工类型与治理技术研究

3.1 险工类型

新沂河险工类型应结合其不同堤段的不同成因进行分类。首先，在汛期行洪时，新沂河所有堤防工程都会受到一定程度的剪切破坏，若破坏程度较为严重，在水位骤降后，容易造成边坡失稳；其次，新沂河上游河道蜿蜒曲折，弯道环流作用以及主流冲击作用明显，强大的水流作用力会使堤防工程损毁，形成崩岸险工；最后，新沂河下游存在土质问题，多数堤防坐落于砂性土质的堤基之上，在汛期高水位的作用下，渗流作用明显，常常形成管涌破坏。

结合险工成因，将新沂河的险工类型分为以下3类：1)剪切作用下的崩岸险工。分布于新沂河全部河道，在部分束窄河道处尤为明显，例如沙湾险工。2)水流淘冲作用下的崩岸险工。主要分布于新沂河上游河道，水流淘冲作用会随着河道曲率的增加而增加，当曲率达到一定值时，会形成坐湾迎溜、主流直冲堤岸等现象。3)土质问题引起的渗水险工。主要分布于新沂河下游，其土质是以砂性土、粉质壤土为主，不能够满足汛期防渗需求，在背水侧易出现泉涌、沙沸等现象，形成管涌破坏。

3.2 治理技术

新沂河险工治理技术采用了防护工程和防渗工程相结合的方式，但由于新沂河不同堤段的险工类型以及成因存在差别，因此，选用治理技术时，应遵循因地制宜的原则，针对不同的险工类型及成因，采用相应的治理技术。

1)对于剪切作用下的崩岸险工。由于汛期的高水位、高流速是堤防土体发生剪切破坏的动力因素，因此，应及时在汛期分泄洪水，减少高水位持续时间；采用琐坝、挑流坝等措施，延缓水流流速；汛期后及时维修受损毁的护坡工程，以免堤防中已破坏的土体滑落。

2)对于水流淘冲作用下的崩岸险工。稳定河流流态、保证护坡工程安全是治理该类型险工的总体思路。可采取短丁坝群、抛石固基等方式，减少水流对护坡工程的冲刷；对于曲率较大、坐

湾迎溜的堤段,可以采用裁弯取直的方式改变河流走势,也可以采用分水鱼嘴等方式进行分流,减轻洪峰对堤防工程的冲击。

3)对于土质问题引起的渗水险工。治理渗水险工应以防渗工程为主,以改善堤防浸润曲线、降低水力坡降为目标。其中,防渗工程大致可以

分为堤身灌浆工程和堤后盖重工程,堤身灌浆工程能极大改善堤防的浸润线,增加堤防稳定性;堤后盖重工程能有效抑制沙沸现象,防止管涌或流土等渗透破坏。

综上所述,新沂河险工治理技术应因地制宜,可供选用的技术布置见图4。

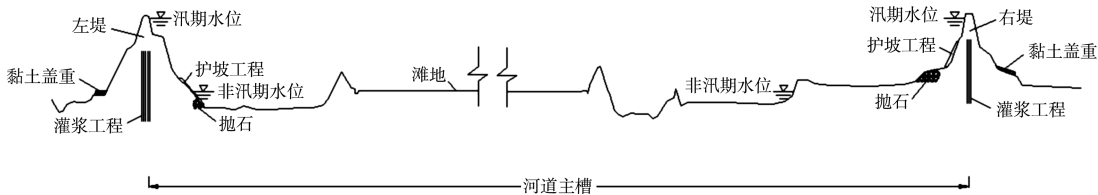


图4 险工治理方案

4 沙湾险工治理剖析

新沂河沙湾险工是较为经典的治理案例。由于新沂河河道在沙湾段,被较大程度束窄,相比上下游,其过水断面减少29%~39%,平均流速较大,为削减洪峰,沙湾险工段设置锁坝、挑流坝和丁坝等护岸工程,并修建分鱼嘴控制北、中泓分流比,取得较好治理效果,为相似河道的险工治理提供了宝贵经验。

新沂河沙湾险工(左堤桩号18+000—33+000)位于沭阳县颜集镇和新河镇境内的沙湾—龙埭,全长15 km,见图5。该段临水滩地宽32~170 m,滩面高程10.71~15.61 m,堤顶高程17.81~21.21 m,堤后地面高程13.61~14.11 m,是新沂河北堤最主要的险工、险段。该段河道设防标准为50 a一遇,设计流量7 800 m³/s,上游设计洪水位16.64 m(口头)、下游设计洪水位11.21 m(沭阳)。



图5 沙湾险工位置

沙湾险工属于典型的剪切作用下的崩岸险工。由于河道被较大程度束窄,在水流经过沙湾段时,河道水位和平均流速将会增加,从而产生更大的侧向压应力和剪切力,使堤防土体发生剪切破坏,

严重时引起崩岸。沙湾险工的治理技术以改善河流流态、加固堤防岸坡为主。1982年,沙湾险工修建潜设丁坝1座,在老沭河旧槽内采用锁坝护岸进行治理,以减缓水流流速、降低水流对坡脚处的冲刷。除此之外,沙湾险工还受到部分水流淘冲的影响,虽然其河道曲率并不是特别大,非汛期时能够满足过水要求,但是汛期的高流速水流会产生较大的弯道环流作用,加之洪峰的冲击力,会在弯道处形成险工。1988年,根据安徽省水科所气流模型试验,沙湾险工修建了护岸工程和分水鱼嘴工程,进一步削减洪峰对堤防工程的破坏。21世纪,沙湾险工进行了多次维修养护,但未进行大规模治理。经过系统性分析,沙湾险工段已经可以较好地抵抗洪水形成的剪切应力和淘冲作用,满足行洪要求。

经过多次治理,沙湾险工形成了锁坝、挑流坝、丁坝群为主的岸坡防护体系,修建了分水鱼嘴,使沙湾段能够安全度过汛期,并且较好地控制了分流比。沙湾险工的治理过程积累了水利工程的宝贵经验,为险工险段治理提供了参考依据。同时,沙湾险工的治理过程充分说明了,所有险工的治理都是持久战,并非一劳永逸,长期的维修养护才能保证河道的防洪安全。

5 结语

1)新沂河险工类型主要包括剪切作用下的崩

岸险工、水流淘冲作用下的崩岸险工和土质问题引起的渗水险工 3 种。

2)从成因分析来看,汛期时水位的骤升、骤降是新沂河形成险工、险段的重要外因,堤基透水性较强、土质不均是新沂河形成险工、险段的重要内因。汛期时高水位、高流速对堤防土体的剪切作用、对护坡工程的剥蚀作用使新沂河部分堤防存在崩岸的危险。新沂河上游蜿蜒型河道所产生的水流淘冲作用是崩岸险工的另一个成因。新沂河下游存在的土质问题是形成其渗水险工的主要成因。

3)新沂河险工治理技术总体上采用了防护工程和防渗工程相结合的方式,而针对不同险工的治理,在选用治理技术时,应遵循因地制宜的原则,针对不同的险工类型及成因采用对应的治理技术。

4)新沂河沙湾险工,经过约 40 年的治理,形成了以分水鱼嘴为主的防护体系,结合琐坝、挑流坝、丁坝群,步步为营,削减洪峰,使沙湾险工能够安全度汛。沙湾险工段的成功经验,为类似的险工段治理提供了参考。

参考文献:

[1] 张世建,李新媛,田时昌.浅谈河道险工治理[J].河南水利与南水北调,2008(2):33,36.

[2] 肖焕雄,韩采燕.过水围堰下游边坡混凝土护坡板的稳定性分析[J].水利水运科学研究,1991(2):201-212.

[3] 杨小凤.垂直铺塑防渗技术的改进及推广应用[D].济南:山东大学,2007.

[4] 陶同康,鄢俊.堤防管涌的破坏机理和新型滤层结构设计[J].水利水运工程学报,2003(4):7-13.

[5] 曾贺,湛奔波,张晓华.黄河下游生态护坡构建研究[J].人民黄河,2010,32(2):23-24.

[6] 邢振贤,王雅楠,谢琰.混凝土生态护岸试验与工程效果分析[J].中国农村水利水电,2013(10):51-53,56.

[7] 庞崇安,张云莲,沈镇伟.生态护坡在防洪工程中的应用[J].中国水利,2011(16):66-67.

[8] 黄扬一,彭良余,罗仁辉.阳新长江干堤险工险段工程地质分析与评价[J].人民长江,2002(07):11-12,22.

[9] 贾恺,杨光华.基于水流与地质双因素的险工险段成因调查研究[J].长江科学院院报,2020,37(1):50-55.

[10] 吴昌瑜,丁金华.九江长江干堤溃口段破坏机理及处理措施[J].岩土工程学报,2001(5):557-562.

[11] 张幸农,应强,陈长英.长江中下游崩岸险情类型及预测预防[J].水利学报,2007(S1):246-250.

[12] 戴永琪,李宏恩,刘晓青.里运河堤防险工险段典型失效模式分析[J].水利水运工程学报,2019(2):104-110.

[13] 张广恕.试论河道险工成因及治理方法[J].民营科技,2015(6):186.

[14] 黄功学,蔡世祥,马立群.淮河流域史灌河险工成因与对策[J].河南水利,2002(3):46.

[15] 张凤翔,李开峰.2018 年沂沭泗河水系洪水防御效果分析与思考[J].中国防汛抗旱,2019,29(9):35-37.

[16] 包小华,廖志广,徐长节,等.不同渗流边界条件下粉砂边坡失稳模型试验研究[J].岩土力学,2019,40(10):3789-3796.

[17] 宋志尧.计算弯道环流的通用公式[J].泥沙研究,2003(4):19-23.

[18] 那利.浑河河岸险工现状成因及治理措施分析[J].安徽农业科学,2007(11):3447-3448.

[19] 周园.浑河险工治理技术研究[J].河南水利与南水北调,2012(6):30-32.

[20] 滕帅,王世梅,余文鹏.三峡水库水位升降对土质岸坡塌岸力学影响机制研究[J].水电能源科学,2019,37(4):127-130.

[21] 毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].北京:水利电力出版社,1990.

[22] CAMICI S, BARBETTA S, MORAMARCO T. Levee body vulnerability to seepage: the case study of the levee failure along the Foenna stream on 1 January 2006 (central Italy) [J]. Journal of flood risk management, 2017, 10(3): 314-325.

[23] 冯新伟,刘瑞霞,李斌,等.辽河保护区河道险工治理研究[J].环境工程技术学报,2013,3(6):498-502.

[24] 赵彦彦,毋甜,刘欣.赵口—黑岗口河段河势演变特点分析[J].人民黄河,2014,36(12):31-34.

[25] 王普庆,武彩萍,常温花,等.黄河下游河道工程险情特点及出险原因的概括分析[J].水利建设与管理,2001,21(2):37-39.

(本文编辑 武亚庆)