DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260452

浅谈强降雨下跨河桥梁风险辨识与应急管控

高　昌
(甘肃省平凉公路事业发展中心,甘肃　平凉　744000)

摘　要: 针对强降雨条件下跨河桥梁基础冲刷加剧、结构稳定性降低等问题,以甘肃省平凉市G22青兰高速泾川2号桥暴雨过程中的运行与处置情况为研究对象,从桥梁结构特征、工程地质条件及河道水动力变化入手,结合雨前风险排查、雨中巡查监测、洪峰期冲刷检测和现场抢护处置,对全过程管控措施进行系统梳理,构建了分级辨识与动态响应相结合的技术路径。结果表明,强降雨会显著加剧桥梁基础局部冲刷,增大桩基自由长度和结构受力不利效应;通过提前建立风险清单、强化多源监测、实施交通管控和采取临时防护措施,有效延缓风险演化并保持结构总体稳定。

关键词: 跨河桥梁;风险辨识;应急管控
中图分类号:　　**文献标志码:**　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0231-05

Brief Discussion on Risk Identification and Emergency Control of River-Crossing Bridges under Heavy Rainfall

GAO Chang
(Gansu Pingliang Highway Development Center, Pingliang 744000, China)

Abstract: In response to the problems such as intensified erosion of the foundation and reduced structural stability of cross-river bridges under conditions of heavy rainfall, taking the operation and handling situation of Jingchuan No. 2 Bridge on G22 Qinglan Expressway in Pingliang City, Gansu Province during the rainstorm as the research object, starting from the structural characteristics, engineering geological condition and changes in river hydrodynamics, and combined with the pre-rain risk inspection, in-rain patrol monitoring, peak flood period erosion detection and on-site emergency rescue and handling, the full-process control measures are systematically sorted out, and a technical path combining hierarchical identification and dynamic response is constructed. The results show that heavy rainfall can significantly intensify local scour around bridge foundations, increase the unsupported length of pile foundations and produce the adverse effects on structural force conditions. By establishing a risk checklist in advance, strengthening multi-source monitoring, implementing traffic control and adopting temporary protective measures, the evolution of risk is effectively delayed, and the overall structural stability is maintained.

Keywords: river-crossing bridge; risk identification; emergency control

0　引　言

跨河桥梁作为多学科交叉的复杂工程,其规划标准与所在河段防洪要求、水利规划之间的适配性,是项目顺利实施和极端气候条件下安全运行的重要前提[1]。随着极端降雨事件频发,强降雨引发的洪峰流量骤增、河床下切和局部冲刷等问题不断加剧桥梁基础受力不利影响,已成为山区高速公路跨河桥梁管养的重点[2]。2024年7月22日至24日,平凉地区遭遇1961年以来最强区域性暴雨,局地累计雨量接近200 mm,泾川2号桥所在河段洪峰流量骤升,河床快速下切,桥墩桩基大面积外露,桥梁在短时间内由常态运行转入高风险状态。该过程暴露出部分跨河桥梁在基础冲刷预估、监测预警手段和应急响应流程等方面仍存在薄弱环节。基于这一典型工程案例,本文围绕强降雨情景下跨河桥梁风险辨识与应急管控的内在逻辑,对工程结构参数、地质河势条件、暴雨洪水特征及运营管理策略进行综合分析,梳理从预警研判、应急抢护到事后复盘与机制固化的闭环流程,为提升公路桥梁汛期安全韧性提供经验借鉴和方法参考。

收稿日期:2026-04-27
作者简介:高昌(1991—),男,本科,工程师,从事公路养护工作。

1　桥梁概况

从跨河桥梁在高速公路路网中的功能定位看,泾川2号桥既是区域干线的重要组成部分,也是中

长联跨预应力混凝土空心板桥的典型工程实例。该桥位于G22青兰高速平定段，桥长约500 m，采用多孔预应力混凝土空心板上部结构和双柱式墩台组合形式，按公路-Ⅰ级荷载标准设计，左右幅分离设置以适应双向交通。桥台桩基直径1.3 m，桥墩桩基直径1.5 m，桩长约8.5～11.0 m，桩端嵌入下伏较高强度的粉砂质泥岩与泥质砂岩层，形成相对可靠的持力体系。桥位处河床未设置大面积铺砌防护，桥梁轴线与主流流向夹角接近直角，洪水来临时，上游绕流与局部冲刷效应较为显著[3-4]。近年来，该桥技术状况评定总体保持较好水平，但在极端洪水作用下，桩基埋置深度与河床冲刷深度之间的安全储备仍需结合现场观测和计算分析进行复核[5]。

1.1　桥梁结构信息

从结构体系与受力路径看，泾川2号桥在多跨布置和桩基嵌岩形式方面具有较强代表性。桥梁上部结构由数孔20 m级预应力混凝土空心板组成，纵向荷载通过横梁与支座体系传递；下部结构采用双柱式桥墩、台身和群桩基础组合，整体形成刚度适中、传力明确的空间受力体系。桥台桩基直径1.3 m，桥墩桩基直径1.5 m，通过合理布桩和嵌岩深度控制，在常年河床高程条件下能够满足竖向承载与水平抗力要求。由于设计阶段对河床冲刷的考虑主要依据多年平均洪水资料，对极端暴雨引发短时强冲刷的认识相对有限[6]，汛期超常洪峰作用下，局部桥墩易出现冲坑扩大、桩身裸露和自由长度增加等现象，进而导致桩基附加弯矩显著增大。结合泾川2号桥本次强降雨过程中的监测情况可知，结构体系本身具有一定冗余度，但当基础冲刷超出预期范围时，原有安全储备可能被削弱，需要通过实时监测、交通管控与应急加固共同维护结构整体稳定[7]。

1.2　桥梁地质情况

从场地工程地质特征看，泾川2号桥所在河段地层组合呈现软硬相间、强风化至微风化过渡的特点。河床表层主要为厚度不均的亚砂土，局部夹杂缺失段；下伏1.5～2.4 m厚圆砾土与卵石土层，颗粒级配较好，但在洪水高流速作用下易被搬运冲走；再下伏约1.5～3.2 m厚强风化泥质细砂岩，结构松散、软弱夹层较多，在持续冲刷作用下仍可能发生局部剥蚀；最下层为弱风化或微风化粉砂质泥岩与泥质砂岩，抗剪强度较高，结构相对完整，是桥梁桩基设计持力层。实际度汛过程中，河床上部亚砂土与卵石混合层被迅速冲空，局部强风化岩层亦出现被切割现象，导致有效埋置长度减小与嵌岩深度降低并存。地层软硬相间的特征意味着，当冲刷发展至岩层顶面附近时，冲坑边界可能由平缓过渡转变为陡坎形态，进一步加剧流速集中和局部冲刷，对桩基弯曲、剪切承载能力提出更高要求。

1.3　桥梁跨越河流河势及河床情况

从河势演变和水力条件分析，泾川2号桥所跨泾河河段兼具山区河流陡涨陡落和河床可塑性强的特点[8]。强降雨期间，流域汇流迅速，桥址处平均水深可达4 m左右，洪峰流量约为2 600 m^3/s，较平常流量放大近10倍；主流集中在桥梁第三至第五跨附近，河床整体呈西高东低的斜坡形态。上游多年实施的疏浚采砂与局部整治工程在改善行洪条件的同时，也改变了桥位附近比降和主槽位置，使局部河床抗冲稳定性减弱[9]。洪水来临时，高水头差叠加桥墩绕流，引发第三至第五跨桥墩前方形成深冲坑，下游300 m范围内出现河床跌坎。为清晰呈现本次洪水工况的关键参数，将监测与复核数据进行整理，具体内容如表1所示。

表1　泾川2号桥强降雨过程主要水文工况

指标项目	典型数值范围	说明
累计雨量	140～200 mm	区域性持续强降雨，历时3 d
最大小时雨强	40～60 mm	多次出现短历时强降雨
洪峰平均水深	约4 m	相对常水位抬升约1～2 m
洪峰流量	约2 673 m^3/s	较多年平均径流放大近10倍
主流作用跨径	主要集中在第三至第五跨	局部流速显著增大
河床纵向比降	下游300 m内比降增大	形成局部跌坎与强冲刷区

在上述水文与河势条件共同作用下，桥位河床呈现明显的不均匀下切特征，东岸侧局部顶冲严重，桥台前缘护坡稳定性受到威胁。地形条件与水流动力的耦合作用，使泾川2号桥具有典型的强降雨冲刷风险特征。

2　汛期跨河桥梁运行风险辨识

从全过程风险管理理念看，跨河桥梁汛期安全管控需要由静态评价转向动态辨识[10]，既要依托设计资料和既往运行资料进行雨前预判，也要在洪水发展过程中结合现场信息实时修正风险等级。泾川2号桥在本次暴雨中采用雨前预警研判、雨中现场巡查与信息化监测相结合的方式，对桥梁冲刷风险进行分级辨识。雨前阶段重点分析桥梁结构参数、地质条件与河床形态，结合气象部门发布的红色预警

信号，判断该桥属于冲刷敏感桥梁并提前纳入重点盯防清单。雨中阶段依托固定视频监控、临时布控摄像头和人工巡查，对水位变化、流态特征、桥墩涡流及桥台顶冲情况进行连续观察，形成风险状态动态研判依据。通过将监测信息与既有冲刷计算成果进行比对，管理部门将风险等级由中等逐步调整为较高，并据此触发限速、单车道通行、应急检测和临时抢护等分级管控措施，实现由经验判断向证据支撑的风险辨识转变[11]。

2.1　雨前排查

从预防性安全治理角度看，雨前排查是跨河桥梁应对强降雨风险的起点，也是后续应急行动的重要依据。针对气象部门发布的暴雨红色预警，养护与运营单位首先对管养路段跨河桥梁进行筛查，依据桥梁结构形式、基础埋置深度、河势条件和设计年代编制风险分级清单，将泾川 2 号桥确定为重点关注对象。随后，技术人员查阅设计图纸、历年检测报告和水文资料，对桩基长度与预计冲刷深度之间的安全裕度进行复核，并综合桥轴与主流夹角较大、河床西高东低、上游多年采砂等因素，判断洪水来临时桥墩前方易形成强烈冲坑。在此基础上，管理部门提前明确强降雨期间的工作路线与岗位责任，细化现场巡查频次和重点部位、信息化监测设备布设点位、应急物资与机械预布控位置，以及可能采取的交通组织方式，为暴雨来临后的快速决策争取时间。

2.2　雨中巡查

从动态监测与快速研判角度看，雨中巡查是检验雨前预判合理性并及时修正风险等级的关键环节。暴雨开始后，巡查人员按照预定路线对泾川 2 号桥上下游河道进行高频巡查，重点观测水位上涨速度、流速变化和桥下流态。随着雨势增强，桥下水位快速接近设计洪水位，局部河床高地及菜地被淹没，第三至第五跨桥墩处出现强烈涡流和明显下切趋势，东岸桥台前护坡遭受顶冲。现场人员通过图像回传和口头汇报，将上述现象及时报送养护与运营指挥平台。技术人员一方面利用布控球和固定监控设备对关键断面水位进行连续记录，另一方面以 6 h 为步长分析水位抬升速度与历年极值之间的差距。当观测到局部水位短时间内持续攀升且桥墩涡流增强后，管理部门随即将该桥风险等级上调至高位，启动限速与居中单车道通行措施，并同步调集桥检车和潜水检测设备，为后续冲刷量实测和应急抢护创造条件。

3　汛期跨河桥梁管控措施

从风险闭环控制角度看，汛期跨河桥梁安全保障需要管理措施、技术手段与应急体系协同发力，形成“发现问题—验证风险—实施干预—评估效果”的完整链条。泾川 2 号桥在本次强降雨期间的管控实践，体现了信息化监测、部门联动、工程抢护与预案优化的综合应用。在管理层面，通过建立桥梁风险分级管控清单，将强降雨情景下关键阈值与响应级别对应，实现预警到管制的快速转换。在技术层面，依托桥检车冲刷实测、视频监控和水位标尺观测，完成对桩基暴露程度与河床下切范围的精细化评估[12]。在工程层面，针对冲刷严重部位采取吨袋、石笼、抛石等临时防护措施，并结合河道整体行洪需求疏浚主槽、设置临时拦水梁[13]。在应急体系层面，通过跨部门联合会商和现场指挥，统一交通组织与抢险操作，在保证人员安全的前提下最大限度维护桥梁结构安全，最终实现安全度汛。

3.1　管理措施

管理措施是跨河桥梁在强降雨条件下保持安全运行的重要保障，关键在于提前部署、分级响应、统一指挥和快速处置。针对泾川 2 号桥汛期运行风险，养护单位结合桥梁基础条件、河道变化特点和历年防汛经验，提前建立专项巡查制度与风险分级标准，将降雨强度、水位变化、桥下冲刷迹象和交通运行状态等内容纳入重点监测范围，使桥梁风险判断有据可依。暴雨发生后，指挥部门依据实时监测结果及时研判桥梁安全状况，动态调整响应等级，并通过信息平台和通信设备迅速下达调度指令，推动交警、路政、收费运营、养护抢险等力量同步到位，确保现场处置统一有序。风险升高后，在桥梁两端及时设置限速标志、警示设施和导向装置，调整车辆通行方式，实行单车道居中通行，以减轻不利荷载对受冲刷部位的影响。与此同时，抢险人员提前驻守桥头，对重点桥墩、桥台和河道水流变化进行持续观察。一旦发现冲刷扩大、水位异常上涨等险情，立即采取交通封闭、现场警戒、人员疏散等应急措施。上述做法推动管理措施由事后应对转向全过程防控，既提高了风险识别的及时性，也增强了应急处置的针对性，为桥梁安全度汛提供了保障。

3.2　技术措施

从工程技术支撑层面看，准确掌握桩基冲刷状况并实施针对性抢护，是避免跨河桥梁在强降雨过

程中发生失稳的关键。采用安全预警监测系统监测桥梁质量时，需综合考虑桥梁样式及构造，明确监测范围，合理设置监测点[14]。洪水过程趋于稳定后，养护部门迅速调派桥检车与专业技术人员，对泾川2号桥左右幅各桥墩桩基冲刷深度开展专项检测，利用测深、探杆和水下摄像等手段获取桩身裸露长度与冲坑形态数据。根据检测成果整理的左、右幅部分桩基冲刷深度如表2、表3所示。

表2　泾川2号桥左幅部分桩基冲刷深度实测结果

桩基编号	设计长度/m	实测冲刷深度/m	冲刷深度占比/%
Z2-1	9.100	3.250	35.71
Z3-1	8.900	3.500	39.33
Z4-1	9.100	4.000	43.96
Z5-1	9.300	4.100	44.09
Z6-1	9.500	4.300	44.74
Z7-1	9.500	3.600	37.89
Z8-1	8.900	2.650	29.78
Z9-1	8.900	3.050	34.27
Z10-1	9.400	3.150	33.51
Z11-1	9.800	2.600	26.53

表3　泾川2号桥右幅部分桩基冲刷深度实测结果

桩基编号	设计长度/m	实测冲刷深度/m	冲刷深度占比
Y2-2	9.100	3.900	42.86%
Y3-2	8.900	3.650	41.01%
Y4-2	9.100	3.900	42.86%
Y5-2	9.300	2.600	27.96%
Y6-2	9.500	2.850	30.00%
Y7-2	9.500	2.550	26.84%
Y8-2	8.900	2.100	23.60%

实测数据表明，多数桩基冲刷深度为2.6～4.3 m，部分桥墩冲刷深度占设计桩长比例接近45%，说明河床上覆亚砂土、圆砾土和卵石层基本被冲空。技术人员结合设计图纸与地勘资料判定，冲刷已局部发展至强风化岩层顶面，桩基有效嵌岩深度有所减小。鉴于洪水尚未完全消退，为防止冲刷继续向下发展，抢险队伍立即从桥面吊装装满块石的吨袋和铅丝石笼，对Z5-1、Z6-1等冲刷较重桥墩周边进行包裹围护，同时向冲坑内抛填块石和碎石土，以减缓水流冲击并恢复一定覆土厚度[15]。配合临时抢护措施，工程人员在上游适当位置疏浚主槽、设置导流堤身，引导主流远离冲刷敏感墩台，整体降低桥下流速水平；洪水完全退去后，再根据实测河床高程在桥墩周边布置永久性铅丝石笼和抛石护脚，将临时抢护成果转化为长期防护体系。

3.3　应急体系措施

应急体系是跨河桥梁在强降雨条件下保障安全运行的重要支撑，核心在于完善预案体系、强化队伍建设、落实物资储备和提升实战能力。针对泾川2号桥汛期运行特点，相关单位在既有度汛预案基础上进行针对性优化，将气象预警等级、桥下水位变化和冲刷发展情况等关键指标与响应级别对应划分，使各阶段处置措施具有明确依据。同时细化各相关单位职责，确保指挥体系清晰高效。围绕现场处置需求，组建由技术人员、抢险作业人员和设备操作人员组成的专项应急队伍，实行全天候值守机制，确保接到指令后能够迅速集结并开展作业。在物资准备方面，提前在桥头及周边区域布设应急物资储备点，配备沙袋、石笼、吨袋和块石等抢险材料，并对装载机、吊车、桥检车等关键设备进行全面检修，使其保持良好工作状态。为提高预案可操作性，结合历史汛情和桥梁结构特点，设计多种典型情景开展演练，覆盖交通管控、人员疏散、物资调配、现场抢护等关键环节，通过反复推演检验各环节衔接情况并及时优化流程。实际强降雨过程验证表明，该应急体系在指挥协调、快速响应和现场处置方面运行稳定，有效提升了桥梁突发风险应对能力，可为区域跨河桥梁应急管理提供借鉴。

4　结　语

基于泾川2号桥强降雨过程中的风险演化、现场监测与应急处置实践，可得出以下结论。

（1）强降雨条件下，跨河桥梁风险具有气象、水文、地质和运营多因素耦合特征。暴雨引发的洪峰流量骤增、河床快速下切和桥墩绕流效应，会显著加剧桩基局部冲刷，使桥梁安全状态在短时间内由常态运行转入高风险状态。

（2）风险辨识应由静态资料复核向全过程动态研判转变。通过雨前风险清单、雨中高频巡查、视频监控、水位观测和冲刷实测等手段，可以及时掌握河床下切、桩基外露和桥台顶冲等关键风险信息，为分级响应提供依据。

（3）应急管控应坚持交通组织、工程抢护和部门协同并重。限速、单车道居中通行等交通管控措施可降低不利荷载影响。吨袋、石笼、抛石和导流等临时防护措施可延缓冲刷发展。多部门联合会商和现场统一指挥是保障处置效率的关键。

（4）山区跨河桥梁汛期安全保障需要形成“预警—排查—监测—处置—复盘”的闭环机制。后续应在更大范围内推广冲刷监测与应急管控经验，结合

数值模拟和风险评估模型，进一步完善适应强降雨频发背景的桥梁安全保障体系。

参考文献：

[1] 常红杰.跨河桥梁工程的防洪能力评价分析[J].全面腐蚀控制，2025，39(7)：230-233.

[2] 何明星.跨河桥梁防洪风险分析研究[J].上海公路，2023(2)：57-61；189.

[3] 陈猇，徐杰梁，陈启刚，等.跨度不等并行桥梁局部冲刷最不利桥墩位置研究[J].公路交通科技，2024，41(4)：99-109.

[4] 陈猇，陈启刚，张汁，等.跨度不等并行桥梁壅水规律试验研究[J].公路交通科技，2023，40(10)：116-125.

[5] 陈启刚，赵恒，杨文杰.采沙河段桥下溯源冲刷深度计算方法研究[J].铁道技术标准(中英文)，2023，5(3)：45-50.

[6] 尹光耀，陈启刚.铁路简支梁桥上部结构洪水荷载计算方法及应用[J].铁道建筑，2024，64(10)：78-87.

[7] 黄建玲，蔡威，阮春生.东海大桥桥墩桩基冲刷分析及防护关键技术[J].中国港湾建设，2023，43(7)：66-71.

[8] 展士杰.图昆公路跨夏可河大桥防洪影响分析与评价[J].黑龙江水利科技，2023，51(5)：55-59.

[9] 孙付展.水利工程对桥梁稳定性与承载能力的影响分析[J].汽车博览，2024(11)：130-132.

[10] 孟晓凤.跨河桥梁工程防洪评价研究[J].珠江水运，2020(15)：53-54.

[11] 李最森，章琪，魏荣灏，等.多波束定点实时冲刷监测系统构建及应用[J].水利水运工程学报，2023(6)：176-182.

[12] 叶淑琴.公路桥梁健康监测及安全预警技术探讨[J].中国房地产业，2024(35)：198-201.

[13] 邹小华.山区公路水毁修复施工关键技术和监理管理重点[J].黑龙江交通科技，2025，48(1)：42-45.

[14] 邓卫平.公路桥梁项目健康监测及安全预警[J].交通科技与管理，2023(12)：147-149.

[15] 王会丽.海域桥梁桩基冲刷固化土防护施工方案比选研究[J].上海公路，2024(3)：27-33；204.

(上接第 214 页)

量特征[J].建筑材料学报，2022，25(4)：344-352.

[6] 侯东序，董伟，吴智敏，等.碳纤维增强复合材料加固局部混凝土薄弱柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报，2014，35(9)：48-56.

[7] 唐杨，任荣.中、小公路桥梁病害与加固方法综述[J].长江工程职业技术学院学报，2020，37(2)：19-25.

[8] Sajid H U, Kiran R. Effect of Fiber Reinforcement, Mineral Admixtures, and Air Entrainment on the Fire Performance of Concrete in Bridges: A review[J]. Construction and Building Materials, 2024, 430: 136420.

[9] 王金暖.空心板桥横向裂缝病害分析及加固方案探讨[J].北方交通，2019(7)：44-47.

[10] Shoukat T, Yoo P J, Kim J H, et al. Comparative Study on Fiber Reinforcement and Geogrid for Enhancing the Long-Term Performance of Asphalt Pavements Against Rutting Failure[J]. Construction and Building Materials, 2025, 499: 144083.

[11] 许鹏，杨涛，袁理中，等.预应力混凝土T梁腹板竖向开裂原因分析与处治[J].交通科技与管理，2024，5(14)：89-91.

[12] 张国辉，李大茂，谢峻，等.预应力混凝土T梁桥腹板竖向裂缝成因分析与处治[J].公路交通科技(应用技术版)，2017，13(1)：12-14.

[13] 秦鹏飞.化学注浆技术及其应用进展[J].城市轨道交通研究，2020，23(9)：157-161.

[14] 徐启利.灌浆法在公路桥梁施工中的多元应用及效果[J].交通节能与环保，2025，21(2)：198-201.

[15] 姜宏维，郭建明.某钢箱梁悬索桥加固方案设计与分析[J].公路，2024，69(3)：104-110.

[16] 宗如欢.T形刚构桥病害成因及加固方案[J].交通世界，2025(35)：187-189.

[17] 李友河，武刚，文竞舟，等.在役装配式预应力砼T梁桥体外预应力钢绞线加固关键技术[J].材料导报，2025，39(增刊1)：285-290.

[18] 刘格安.公路桥梁预应力碳纤维板加固技术[J].交通世界，2024(35)：142-144.

[19] 杨泽波.预应力碳纤维板加固技术在桥梁箱梁底部裂缝修复中的应用研究[J].交通科技与管理，2025，6(8)：110-112.

[20] Zhang K, Qi T Y, Li D C, et al. Research on Innovative Reinforcement of Prestressed T-beam Bridge[J]. International Journal of Structural Integrity, 2020, 12(6): 922-937.

[21] 廖军.桥梁维修加固施工要点及处治方案研究[J].交通科技与管理，2025，6(12)：105-107.