生态护岸型式选型及河道综合治理工程设计研究

王继春
中润智水（上海）工程设计有限公司杭州分公司　浙江　杭州　310000

摘　要：生态护岸分为植物型、土工复合型、硬柔结合型及轻量化型四类，各自具有特定的水力适应性和结构耐久条件。河道综合治理涵盖水系形态调整、行洪断面优化、底质改良及滨水空间重构，形成系统性设计框架。协同设计强调护岸与水力条件、防渗防冲、栖息地修复的匹配，并采用分段适配方法。通过水动力模拟、稳定计算及生态指标评估，可验证设计方案在多目标约束下的综合效果。整体上，护岸选型与河道治理需统筹安全、生态与耐久性，依托模拟分析实现方案量化优选。

关键词：生态护岸型式；河道综合治理；协同设计；分段适配

引言：河道治理需兼顾防洪安全与生态恢复，生态护岸选型是关键环节。按结构特征，护岸分为植物型、土工复合型、硬柔结合型及轻量化型四类，其水力响应与耐久性差异显著。治理设计涵盖水系形态调整、断面参数优化、底质改良及滨水空间重构，同时需实现护岸与水流条件、防渗防冲及栖息地修复的协同适配。采用分段差异化选型方法，并结合数值模拟量化水力特性、结构稳定及生态指标，可为方案优选提供依据，最终形成安全与生态并重的一体化设计路径。

1 常见生态护岸型式分类及性能特征研究

1.1 植物型生态护岸结构与适用性能

植物型护岸的核心作用来自根系网络对土体的三维裹缠效应，同时地上茎叶可衰减近岸波浪能量。结构形式通常分为单一草本覆盖层和乔灌草立体配置层，后者能形成多级根系锚固带。适用性能突出表现在水位变幅较小且年平均流速低于特定阈值的岸段，这类条件下植物可自然繁衍并维持盖度。该类护岸的透水特性有利于地表径流下渗，减少坡面细沟侵蚀，但高水位持续浸泡会抑制有氧呼吸，导致根系活力下降。施工过程对原地貌扰动轻微，生态恢复周期与植物生长速率直接关联，后期养护需关注物种竞争和枯落物堆积，整体抗滑能力受制于根系分布深度及土壤粘粒含量。

1.2 土工材料复合型生态护岸结构与适用性能

土工材料复合型护岸将合成纤维网垫、格栅或排水带埋设于坡体浅层，形成筋土摩擦咬合体系，有效约束侧向变形。结构层内布设纵向和横向排水管，加速暴雨期孔隙水消散，降低滑动风险。适用性能覆盖中等流速河道以及填方路堤边坡，尤其适合季节性冻融区域，因材料延展性可缓冲冰胀应力[1]。相比纯植物措施，该类型抗冲能力提高，但合成聚合物暴露于紫外线时易发生分子链断裂，需控制埋深或覆土厚度。施工宜在干燥季节进行，以便压实度达标，植被可通过网孔穿插生长，形成长期复合加固效果，整体服役年限取决于材料抗老化添加剂的有效周期。

1.3 硬质柔性结合型生态护岸结构与适用性能

硬质柔性结合型护岸采用混凝土预制块体、浆砌片石或金属石笼作为主骨架，各单元之间通过铰链、搭接或弹性垫层连接，实现刚性与变形的协调。结构能分散冲击荷载并将集中力转化为均布力，同时骨架空隙填充碎石或耕植土，为底栖生物提供隐蔽空间。适用性能显著于水位陡涨陡落、波浪爬高较大的河段，其抗漂浮和抗磨损能力优于纯柔性体系。透水铺装可削减扬压力，防止底板掀动，但刚性构件长期接触酸性或碱性水环境时，表面腐蚀速率加快，需预留检查通道。装配精度要求较高，地基处理不当易导致接缝错位，整体稳定性依赖于约束件疲劳强度。

1.4 新型轻量化生态护岸结构与适用性能

新型轻量化护岸选用高强聚酯纤维、泡沫轻质土或中空塑料模块作为主体材料，单位面积重量较传统砌石降低半数以上，显著减轻对软弱地基的附加荷载。结构多采用工厂预制标准件，现场通过卡扣或插接方式组装，缩短作业时间并减少大型机械使用。模块内部设置连续贯通孔洞，既便于植物根系向下伸展，又为鱼类和两栖动物提供迁徙通道。适用性能偏重于淤泥土层或狭窄施工带，也可用于应急抢险段的快速封堵。材料自身具备较好的抗化学腐蚀性能，但蠕变特性要求设计时预留变形余量，长期荷载下需定期监测位移量，整体维护成本较低，且拆除时材料可分类回收再利用。

2 河道综合治理工程总体设计体系构建

2.1 河道水系形态优化设计研究

水系形态优化着重调整河道平面蜿蜒轨迹与纵剖面起伏幅度，力求恢复天然河势固有的多样性结构。分析历史洪水痕迹及近期冲刷淤积数据，可确定适宜的弯道曲率半径及深潭浅滩相间布置方式，这样就能增强水流内部紊动强度和溶解氧传递效率。同时梳理主槽与支汊间的连通节点，拆除冗余阻水设施，消除以往裁弯取直工程导致的单一顺直弊端，使高水位期漫滩范围得到有效控制且泥沙落淤区域趋于分散。优化后的形态有助于降低同一断面峰值流速差值，并在枯水季节维持最低生态需水流量。设计环节还要权衡岸坡抗冲能力与形态自然属性，避免过度整形，最终依靠水流自身动力塑造长期稳定的河床微地貌。

2.2 河道行洪断面与水力参数优化设计

行洪断面设计需综合考量过流能力、泥沙输运及岸坡稳定三者关系，据此合理选定断面几何形状及底坡纵比降。针对不同河段水沙条件，采用复式断面或梯形断面形式，平衡枯水期航深要求与洪水期超高水位约束。水力参数优化涵盖糙率系数、水力半径及弗劳德数等指标的合理取值，确保设计流量下流速分布均匀，防止局部涡流引发淘刷破坏[2]。同时校核不同重现期洪水下的水位壅高及堤顶超高余量，并考虑床面可动性对过水面积的实际影响。通过调整断面宽深比，使水流剪切力分布与河床抗冲力相互协调，从而减少周期性疏浚清淤的工作量。

2.3 河道底质改良与水体净化设计

底质改良着重针对有机污染沉积层及硬化河床基底，采用物理翻松、覆盖洁净介质或原位稳定化等措施，切实提升底栖环境质量。同时构建生态净化系统，借助植物根系和附着微生物膜降解水中氮磷污染物，搭配人工水草或浮动湿地增加生物附着有效面积。设计阶段要明确不同河段接纳污染物的负荷阈值，并设置曝气装置提高溶解氧浓度，加速好氧分解进程。净化效能还依赖水力停留时间和接触反应时长，需协调水位变幅与净化单元布设高程。改良后的底质应具备良好渗透性能，促进地下水与地表水双向交换，维持水体自净能力长期稳定发挥。

2.4 河道滨水生态空间重构设计

滨水空间重构重点在于恢复陆生与水生生态系统的过渡带功能，设计兼顾水位变动区内的植物群落梯级配置及栖息地异质性构建。依据不同高程区域的水淹频率，分别划定湿生植被带、挺水植被带及沉水植被带，形成纵向连续、横向渐变的覆盖层。同时设置浅滩、回水区和深槽等多样微生境单元，为各类水生生物提供避难及繁殖场所。重构设计还要考虑人水互动的适度需求，布置低干扰游览路径和观景平台，但始终以生态保育作为核心导向。空间结构上保持纵向连通和横向渗透畅通，严防岸线硬化割裂生态流，最终建成结构稳固且物种丰富的滨水生态廊道。

3 生态护岸与河道综合治理的协同设计优化

3.1 护岸结构与河道水力运行的协同适配设计

护岸结构选型必须与河道实际水力条件紧密对应，重点分析设计洪水位下的近岸流速分布及切应力沿程变化，据此确定护面抗冲等级和垫层厚度。结构形式既要满足行洪期高流速冲击要求，又要避免枯水期低流速区出现过度阻水效应，也就是说护岸表面糙率应与断面综合糙率相互匹配。同时考虑弯道环流引起的横向比降差异，在凹岸段适当加强护脚埋深，凸岸段则可降低加固强度，这样就能节省材料投入又不削弱整体安全裕度。设计过程中还需模拟不同流量级下水位壅高变化，校核护岸顶高程与漫滩风险的关系，最终形成护岸刚度与水流动力特性之间的动态响应协调机制。

3.2 生态护岸防渗、防冲与河道稳定协同设计

生态护岸的防渗性能不宜过高，以便保持河岸两侧地下水与河水的自然交换通道，但过度透水又会引发管涌或流土破坏，因此需选定合理的渗透系数范围。防冲方面则依靠表层植被根系或土工网垫的加筋作用，削减近底湍流强度，同时设置护脚抛石或石笼抵御主流贴岸冲刷。河道整体稳定要求护岸底部埋深低于最大冲刷线以下，并控制坡面渗流出口的水力梯度，防止内部细颗粒迁移[3]。这三类性能往往相互制约，比如增强防渗会削弱生态交换，提高防冲厚度又可能改变岸坡自重应力，因此设计阶段应采用综合安全系数来统筹三者平衡，确保长期服役期内河势不发生剧烈变形。

3.3 护岸生态功能与河道生物栖息地修复协同设计

生态护岸的孔隙结构及表面粗糙度直接决定水生附着生物的定殖效率，因此设计时要将栖息地多样性需求纳入护岸构造细节。具体来说，护岸材料之间的缝隙尺寸应适配不同体型底栖动物的穿行要求，垂直方向上的凹凸变化则可营造缓流区和回流区，为产卵鱼类提供差异化的水流条件。同时护岸坡度的缓急控制着光照入射角度和水温分层状况，进而影响藻类初级生产力和溶解氧昼夜波动幅度。为了协同生物栖息地修复，护岸设计需保留自然岸坡的异质性特征，避免统一模数造成的生境均质化，并在护脚区域预留越冬深槽和夏季浅滩交替格局，使生态功能与防洪安全在同一空间内共存。

3.4 综合治理工程中护岸型式的分段适配设计方法

河道沿线地形地质、水流泥沙及生态敏感度均呈连续变化，故而护岸型式不能全线统一，应按照河段特征进行分段分区差异化选型。分段依据可包括岸坡稳定性分级、近岸流速强度、植被现状及底质组成等指标，每个分段内再结合施工条件和维护便利性确定主导护岸类别。分段之间需设置过渡段，长度一般取河道宽度的数倍，使护岸刚度、透水性和表面糙度逐步渐变，避免刚性突变引发局部冲刷或生态断裂[4]。适配方法还要求对各分段分别进行多目标比选，权衡工程造价、生态效益和耐久年限，最终形成一张分段型式的空间分布图，作为施工组织设计的直接依据。

4 河道综合治理与生态护岸设计效果模拟与分析

4.1 工程设计模拟参数选取与模型建立

模拟工作开展前先要确定一系列关键参数，包括河道断面糙率、底质渗透系数、床沙中值粒径及岸坡土体抗剪强度指标，这些数据直接左右模型计算的准确程度。水动力模型采用二维浅水方程作为控制基础，网格划分沿流向加密至能够捕捉近岸湍流细节，垂向则分层处理流速梯度。设定上下游边界条件，上游给定流量过程线，下游给定水位流量关系曲线，初始水深依据实测地形插值获得。模型建立后还需利用历史水文资料进行率定，通过调整糙率系数和涡粘参数使计算值与实测值误差控制在合理区间，确保后续模拟具备可靠的基准。

4.2 不同护岸型式下河道水力特性模拟分析

针对植物型、土工复合型、硬柔结合型及轻量化型四种护岸，分别赋予不同的表面粗糙高度和透水孔隙率，再输入同一组设计洪水序列，对比各方案的流速场和水面线变化。模拟结果显示，植物型护岸近岸流速削减最明显，但主槽流速有所增加；土工复合型糙率中等，水位壅高幅度居中；硬柔结合型由于相对光滑，过流能力最大，但近底剪切应力较高；轻量化型因模块开孔，局部紊动强度略有上升[5]。另外还分析了各方案下弯道横向比降和回流区尺度的差异，据此可判断不同护岸对行洪安全和河势稳定的潜在影响。

4.3 生态护岸结构稳定性与耐久性模拟验证

稳定性模拟采用有限元强度折减法，计算护岸坡体在不同水位骤降速率下的安全系数，同时分析植被根系的加筋效应及土工材料的抗拉贡献。耐久性方面则设置水流磨蚀和干湿交替循环工况，评估护面材料质量损失率和抗压强度衰减曲线，其中植物型主要考虑根系腐坏导致的强度退化，复合型关注紫外线老化年限，硬柔结合型侧重铰接点疲劳寿命，轻量化型聚焦蠕变变形累计量。

4.4 综合治理方案的生态改善效果模拟评估

生态效果模拟耦合水动力与水质扩散模块，并引入栖息地适宜度指数来量化生物可利用空间。先计算治理前后溶解氧浓度分布、氨氮降解速率及底栖动物可生存面积比例，再结合流速适宜性曲线评估不同护岸型式下鱼类产卵场有效范围。模拟时段覆盖全年水文过程，既包括汛期高流量冲刷期，也包括枯季低流量缓流期。

结束语：生态护岸型式的合理选择与河道综合治理设计的系统整合，是兼顾防洪安全与生态恢复的有效路径。植物型、土工复合型、硬柔结合型及轻量化型四类护岸各具水力适应性和耐久条件，需依据河段特征分段适配。治理体系涵盖形态调整、断面优化、底质改良及空间重构，并通过协同设计实现护岸与水流、防渗及栖息地修复的相互协调。借助数值模拟量化水力特性、结构稳定及生态指标，可为方案比选提供科学依据，最终形成安全可靠、生态友好且经济合理的综合治理方案。

参考文献

[1]詹明蕾.挡帕河生态综合治理护岸工程型式比选[J].河南水利与南水北调,2024,53(1):46-47.

[2]周贯奎.某平原河道生态综合治理工程中护岸设计要点[J].河南水利与南水北调,2023,52(7):84-85.

[3]艾利军.河道治理工程防洪堤护岸型式选择与评价——以西塔溪治理工程为例[J].水科学与工程技术,2024(6):68-71.

[4]郑红英.中小河流护岸结构型式比选与优化设计研究[J].水上安全,2026(8):37-39.

[5]虎营萍.河道综合治理工程中生态护坡设计[J].工程技术研究,2025,10(24):193-195.