

黄河滩区生产堤装配式生态挡墙 结构设计与应用

王卫慧, 徐丹丹

(濮阳黄河河务局濮阳第一黄河河务局, 河南 濮阳 457000)

摘要 针对黄河滩区生产堤传统挡墙生态兼容性差、适应性低等问题, 本文利用拉压杆模型和抗滑挡墙受力机理, 提出了一种新型装配式生态挡墙结构。利用拓扑优化拉压杆模型, 得到侧墙压碎、临水面拉裂、连接节点破坏三种典型的失效模式及承载力公式。据此设计, 形成集束连接式预制箱体和植被混凝土面层复合生态挡墙, 用 BIM 和柔性连接技术做模块化低碳施工, 以期为黄河滩区生产堤绿色治理提供新的思路。

关键词 绿色治理; 黄河滩区; 生产堤; 装配式生态挡墙

中图分类号: TV861

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.039

0 引言

黄河滩区生产堤长久以来被洪水侧蚀和复杂的荷载所影响。传统的重力式挡墙虽然有一定的抗滑性, 但是存在材料消耗大、生态兼容性差、适应性低等缺点, 不能满足滩区安全和可持续发展的双重要求。因此, 本研究以拉压杆模型和抗滑挡墙机理为基础, 提出了一种新型装配式生态挡墙, 并用理论、设计、施工的综合评价来为生产堤建设提供理论参考。

1 黄河滩区生产堤工况特征与结构需求

1.1 水文地质条件与荷载特征

黄河滩区典型断面呈现“地上河”特征, 生产堤临水侧长期受高水位浸泡及周期性洪水冲刷, 背水侧为滩区农田, 地下水位较高, 土体饱和度大。水位年变幅达 3 m ~ 5 m, 洪水期水流流速较大, 对堤脚形成强烈冲刷。滩区易发生管涌与渗透变形。主要荷载包括: 临水侧周期性变化水压力; 对含水率敏感的背水侧土压力; 洪水期风浪冲击力; 以及由较大昼夜温差引起的温度与收缩应力。

1.2 结构设计需求

生产堤挡墙要达到承载力、生态兼容性、施工效率和环境适应性等综合要求^[1]。结构要能承受最大的水土压力, 抗滑抗倾覆, 生态上有利于植被的恢复和水土的交换, 施工上需要适应滩区短窗口期, 高效拼装; 同时具有抵抗水位变化、地基沉降和温度应力的能力^[2]。

2 装配式生态挡墙结构设计

2.1 结构总体布置

装配式生态挡墙采用预制箱体、柔性连接层和植被混凝土面层的协同结构^[3]。标准化箱体竖向叠放、水平拼装, 以集束钢筋和柔性拉结件形成刚柔结合体系。临水侧为带菱形植生孔的植被混凝土面层, 内填营养基质与乡土植物种子, 实现生态防护。结构总高 3 m ~ 5 m, 分 2 层 ~ 3 层; 底层埋深 0.6 m ~ 1.2 m; 顶层设生态压顶梁; 背水侧设透水滤层。

2.2 预制箱体设计

箱体两侧设有带定位卡槽的集束钢筋孔道, 底部设梯形分布的锯齿形齿坎来增大抗滑力, 临水侧设阶梯式凹凸锚固槽, 提高与植被混凝土面层的黏结, 箱内纵向排水通道与面层透水结构、背水滤层贯通, 实现墙体内外水压力快速平衡。

2.3 生态面层设计

植被混凝土复合面层采用透水混凝土基层—功能型营养基材层—乡土植被层的三层梯度结构, 协同实现结构防护、生态修复与排水防渗一体化功能。

底层为透水混凝土, 用粒径 8 mm ~ 20 mm 的级配再生骨料, 孔隙率 28% ~ 32%, 厚度 10 cm ~ 12 cm。中层为含保水剂与微生物菌剂的营养基材, 保水率不低于 500%。表层选择狗牙根、紫穗槐、爬山虎等耐淹耐旱的乡土灌草藤植物, 通过喷播与植生袋结合施工, 形成稳定群落。

作者简介: 王卫慧 (1995-), 女, 本科, 助理工程师, 研究方向: 水利工程。

2.4 连接节点设计

连接节点采用“集束钢筋+灌浆套筒+柔性止水”一体化设计。考虑刚性受力、施工方便和防渗止水，在滩区潮湿、工期紧的条件下使用。箱体四个角各设一个直径为150 mm带防渗槽的灌浆孔道，内设6根直径为25 mm的HRB400E抗震钢筋，上下层对中后灌注高强灌浆料形成刚性节点。水平相邻的箱体用预埋钢板焊接和柔性拉结带相结合的方式连接。接缝处用遇水膨胀橡胶止水条和聚合物水泥砂浆双重止水。所有节点均设置防腐保护层。

3 基于拉压杆模型的受力机理分析

3.1 拉压杆模型构建

采用ABAQUS软件内置的Tosca模块，进行侧墙的拓扑优化。使精准揭示装配式生态挡墙在水土压力耦合下的内部传力机制，以预制箱体+生态面层组合结构为对象，基于拓扑优化与有限元仿真耦合方法构建专属拉压杆模型^[4]（见图1）。

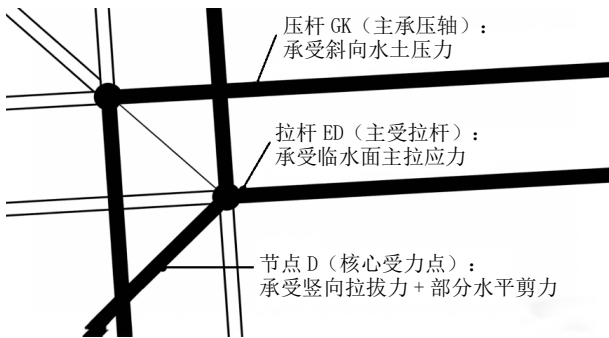


图1 拉压杆模型

采用ABAQUS-Tosca模块，以体积最小化、应变能最优为优化目标，考虑界面黏结效应和节点刚性约束，经过多次迭代优化得到符合结构受力特点的最优传力路径。优化结果表明压应力是斜向主传递的，由临水面中下部经箱体骨架传到墙趾和集束连接节点，拉应力集中在临水面生态面层与箱体衔接处、背水面上部土体接触处，形成斜向主压杆、竖向次拉杆、水平联络杆的三维受力骨架，不同于传统的挡墙平面受力模式。根据以上建立空间拉压杆分析模型，压杆GK为主承压轴，主要承受斜向水土压力，拉杆ED为主受拉杆，主要承受临水面主拉应力，节点D为集束连接关键受力点，主要承受竖向拉拔力和部分水平剪力，是模型受力核心。

3.2 三种破坏模式与承载力计算式

根据拉压杆模型可以得到三种典型的失效模式如下所示。模型中 h 为墙高， d 为压杆计算高度， q_1 、 q_2 分别为临水侧水压力、背水侧土压力（kPa）， f_c 为混凝土抗压强度， b_1 为压杆宽度， F_N 为生态面层附加约

束反力， d_1 、 d_2 为钢筋直径， f_{y1} 、 f_{y2} 为钢筋抗拉强度， a 为钢筋间距， F_{ge} 为土工格栅抗拉承载力。

1. 侧墙受压溃损模式。以节点K为平衡中心，考虑生态面层附加约束反力，推导压杆GK内力表达式，得到承载力控制方程：

$$hdq_2 - hdq_1 \leq \frac{d}{1.2f_c} b_1 F_N \quad (1)$$

2. 临水面挡墙拉裂破坏模式。对应拉杆ED受拉屈服及界面剥离，由偏心弯矩导致临水面拉应力过大，得到破坏控制条件：

$$0.42hdq_1 - 0.2hdq_2 \leq 0.164\pi d^2 a f_{y1} h + 1.2F_N + F_{ge} \quad (2)$$

3. 集束连接受拉拔坏模式。对应节点D处集束钢筋拉拔失效，因倾覆趋势产生过大竖向拉拔力，推导承载力控制条件：

$$hdq_2 - hdq_1 \leq 0.454\pi d^2 f_{y2} + F_N \quad (3)$$

在工程设计中，取上述三种破坏模式下承载力计算值的最小值，作为装配式生态挡墙结构设计的主控指标，确保结构在水土压力耦合作用下的整体安全性。

3.3 工程实例对比验证

以黄河滩区某生产堤生态整治工程为实例，验证拉压杆模型及承载力计算式的合理性。该工程设计通航水位4.0 m，临水面最大水压力58.8 kPa，背水侧土压力93.0 kPa，挡墙总高4.5 m，采用2层预制箱体+植被混凝土复合面层结构，底层箱体埋深0.8 m，集束连接节点采用6Φ25 HRB400E钢筋+高强灌浆套筒。分别采用拉压杆模型、《水利水电工程边坡与挡土墙设计规范》（SL/T 386-2025）方法、ABAQUS有限元仿真三种方式计算结构承载力，结果如表1所示。

表1 承载能力值

计算方法	承载力值(kN)
拉压杆模型	681.4
《水利水电工程边坡与挡土墙设计规范》（SL/T 386-2025）	791.6
ABAQUS有限元仿真	704.0

本文模型和ABAQUS仿真结果误差仅3.2%，证明了模型是可靠的。为了评价承载力下降的影响，同传统的C25混凝土重力式挡墙相比，传统挡墙的抗滑承载力为824.3 kN（安全系数1.82），本文生态挡墙的抗滑承载力为681.4 kN（比传统降低17.3%），抗滑安全系数为1.58、抗倾覆安全系数为1.71，均满足《水利水电工程边坡与挡土墙设计规范》（SL/T 386-2025）相应级别挡土墙的抗滑稳定安全系数（ $K_c \geq 1.30 \sim 1.35$ ）和抗倾覆稳定安全系数（ $K_t \geq 1.50$ ）要求。结果表明，承载力降低是由于轻量化设计造成的，不构成安全隐患，模型可以很好地反映生态挡墙实际受力。

4 生态与施工技术优化

4.1 植被混凝土面层一体化施工工艺优化

针对植被混凝土面层与预制箱体的界面黏结性、植被存活率及施工便捷性，优化采用“分层喷射一植生孔补强—养护一体化”施工工艺，如表 2 所示。

表 2 植被混凝土面层施工工艺

施工步骤	具体操作内容	关键参数要求	质量控制目标
基层处理	清理箱体临水面凹凸锚固槽，去除灰尘、杂质	—	基层洁净无杂物，为喷射施工提供良好基底
主体层喷射	采用高压喷射设备，从下至上分层喷射再生骨料透水混凝土	单次喷射厚度 4 cm ~ 5 cm，总厚度 8 cm；喷射压力 0.3 MPa ~ 0.5 MPa；喷射角度 75° ~ 85°	成型后混凝土孔隙率不低于 25%，且预留贯通孔隙
功能层铺设	底层初凝后，喷射功能型营养基材	基材总厚度 5 cm	营养基材均匀覆盖主体层，为植物生长提供基础养分
植生孔填充	针对菱形植生孔，单独填充高浓度营养基质与乡土草灌藤本混合种子	—	增强局部种子萌发率，促进植物根系生长
面层养护	施工完成后覆盖透气保湿无纺布，采用雾化喷淋方式养护	总养护时长 21 d（较传统延长 7 d）；前 7 d 每天喷淋 3 次 ~ 4 次，后期根据环境湿度动态调整喷淋频次	维持面层湿润，防止开裂、脱落，保障植物成活
全程检测	施工全过程同步开展平整度与孔隙率检测	—	确保面层与锚固槽紧密咬合，避免后期冲刷脱落

水平接缝：设置“高弹性聚氨酯密封胶+聚酯纤维柔性拉结带”复合构造，密封胶抗水渗、抗老化，允许接缝产生≤5 mm 横向位移，柔性拉结带间隔 50 cm 布置，兼顾变形适应性与结构整体性；竖向连接：在集束钢筋灌浆套筒与箱体混凝土衔接处设置弹性缓冲垫层，消解收缩变形应力^[5]；节点周边：在集束连接、预埋钢板等关键节点周边采用柔性防水砂浆抹面，替代传统刚性砂浆，避免局部应力集中产生裂缝。

4.2.2 BIM 全流程数字化协同管理

依靠 BIM 技术创建装配式生态挡墙的设计、生产、施工、运维全流程三维数字化模型，达成各个阶段的协同控制，改善施工速度和精确度：设计阶段用 BIM 模型做预制构件碰撞检测，改良箱体尺寸，连接节点和植生孔布置，防止出现设计矛盾。生产阶段把 BIM 模型参数直接对接到预制构件工厂，让箱体钢筋绑扎，预留孔道定位等数字化加工得以执行，从而保证构件生产的精确度。施工阶段依照 BIM 模型开展施工工序模拟，改良现场拼装流程，且可对构件运输，吊装，安装的全部过程加以追踪，准确掌控施工进度。材料管理借助 BIM 模型统计各个构件，材料的准确用量，进而达成现场材料的精细化管控，削减材料浪费，缩减现场返工率至 3% 以下。

4.2 滩区适配型柔性连接与 BIM 全流程协同施工

4.2.1 多维度柔性连接体系设计

针对黄河滩区地基易沉降、温度变化大的工程特点，构建“水平接缝+竖向连接+节点周边”多维度柔性连接体系，有效消解结构变形应力、防止刚性开裂。

5 结束语

本研究就黄河滩区生产堤所处的复杂工况，提出了装配式生态挡墙结构，结合拉压杆受力机理和生态防护理念，使结构安全、生态恢复和低碳施工三者达到协同统一的效果。通过对预制箱体、植被混凝土面层以及柔性连接节点进行系统的分析，得到墙体内部力流传递路径以及三种典型的破坏模式，建立相应的承载力计算方法并进行工程应用验证，有广阔的工程应用和推广前景。

参考文献：

[1] 潘昊鹏,吴宜夏,潘阳,等.装配式生态框式挡墙抗冲刷能力研究[J].水利技术监督,2026(06):181-183,251.
[2] 赵凯,吴宜夏,潘阳,等.新型装配式岸线生态框式挡墙施工技术[J].水利技术监督,2026(06):324-328.
[3] 蔡建国,钱润民,陈中向,等.基于拉压杆模型的装配式混凝土挡墙结构设计方法[J].东南大学学报(自然科学版),2024,54(03):639-646.
[4] 王坤.箱式挡墙生态护岸技术在河道治理中的应用[J].陕西水利,2025(12):10-13.
[5] 陈怀林,饶云康,高经纬,等.抗滑挡墙受力机理及结构设计研究[J].工程地质学报,2025,33(04):1591-1601.