

滩坑水电站溢洪道表孔闸墩配筋设计及非线性有限元分析

赵兰浩¹, 韩修宇¹, 黄智², 毛佳¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027)

摘要:【目的】针对弧形闸门大推力作用下闸墩与牛腿连接部位易发生应力集中的问题, 构建闸墩配筋设计与非线性有限元分析方法, 探讨配筋对闸墩受力性能的影响, 为同类水工结构的配筋设计与安全评估提供理论依据。【方法】以滩坑水电站溢洪道表孔闸墩为研究对象, 建立三维有限元模型, 基于线弹性应力图形法提出配筋方案, 采用单弹簧联结单元模拟钢筋与混凝土的黏结滑移行为, 并结合混凝土四参数损伤模型进行非线性有限元计算。研究配筋前后闸墩的应力、损伤分布以及钢筋的受力情况, 并进行结构限裂复核算。【结果】①配置钢筋后, 闸墩与牛腿连接处混凝土最大拉应力降低, 损伤最大值下降约 25%, 损伤分布范围减小。②钢筋总体应力水平较低, 最大拉应力为 24.97 MPa, 最大裂缝宽度为 0.032 mm, 显著低于规范限值 0.30 mm, 适当减小配筋量后结构仍处于安全状态。【结论】配置钢筋能在一定程度上改善局部混凝土的受力状态, 减小混凝土损伤程度。基于线弹性应力图形法设计的配筋方案具有较大的安全裕度, 可适当优化配筋量。

关键词: 闸墩; 配筋; 钢筋混凝土黏结滑移; 单弹簧联结单元法; 混凝土四参数损伤模型

中图分类号: TV33

文献标识码: A

溢洪道是水电站的关键泄洪设施, 其闸墩与牛腿连接处承受闸门传递的巨大推力, 易出现应力集中, 导致混凝土损伤开裂^[1-2], 需合理配筋以保障结构安全^[3]。应力图形法操作简便, 易于掌握, 是当前闸墩这类非杆系结构配筋设计的主流方法^[4-5]。不少学者对应力图形法在各个结构中的配筋计算展开了研究。王竞等^[6]对角木塘水电站表孔闸墩进行三维有限元数值分析, 并针对其中薄弱部位采用应力图形法进行配筋计算, 但没有检验配筋方案的合理性; 王勤振等^[7]采用传统手算方法、有限元应力积分法和应力图形法三种配筋方法对某闸室边墩墙进行配筋计算, 对比结果表明应力图形法配置的钢筋更合理, 但缺乏混凝土裂缝宽度的验算^[8]; 涂承义等^[9]结合沙坪一级水电站泄洪闸闸墩的受力特点, 采用应力图形法确定钢筋的布置方式和配筋量, 但没有考虑混凝土的损伤^[10]。

工程实践表明, 线弹性应力图形法一般能够满足结构承载力的要求, 但无法得到混凝土结构裂缝宽度及实际变形状态^[11], 且得出的配筋量偏于保守。对于未开裂截面, 混凝土通常处于全截面受拉但拉应力水平较低的状态, 但线弹性应力图形法完全不

考虑混凝土的抗拉能力, 从而导致配筋保守; 对于贯穿性裂缝截面, 开裂引起应力重分布^[12], 钢筋承担的应力显著增大, 混凝土承担的应力相应减小, 但线弹性计算模型未能反映出这种应力重分布机制^[13], 从而导致配筋量高于实际需求。因此, 采用线弹性应力图形法进行配筋计算后, 应采用钢筋混凝土非线性有限元法^[14]对配筋方案进行分析与调整。

本文采用单弹簧联结单元模拟钢筋与混凝土之间的相互作用, 通过固定双节点法向位移, 克服双弹簧单元法中法向刚度的人为取值困难; 同时结合混凝土四参数损伤模型, 将复杂的多轴损伤问题转化为单轴等效应变空间中的损伤问题求解。基于上述模型, 对静力工况下滩坑水电站溢洪道表孔闸墩进行非线性有限元计算和配筋方案调整, 分析钢筋对结构性能的改善效果, 检验应力图形法配筋方案的合理性。研究成果可为同类结构的配筋设计提供理论依据与科学指导。

1 计算方法

1.1 单弹簧联结单元法

单弹簧联结单元法中混凝土材料按照实体单

收稿日期/Received: 2025-11-26

修回日期/Revised: 2026-01-26

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFC3210603); 江苏省水利科技项目(2023050)。

第一作者: 赵兰浩(1980—), 男, 教授, 博导, 博士, 从事水工结构方面的研究。E-mail: zhaolanhao@hhu.edu.cn。

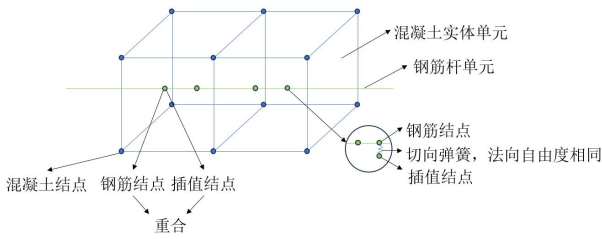
元模拟,钢筋材料按照杆单元模拟,在钢筋结点同一坐标处设置插值结点,插值结点和钢筋结点之间通过弹簧单元来连接,具体示意如图 1(a)所示。单弹簧联结单元法令双节点法向自由度相等,有效解决了传统双弹簧联结单元法需人为假定法向刚度的局限性,提高了计算效率^[15]。

单弹簧联结单元法基于混合坐标系,示意图如图 1(b)所示。分别为混凝土实体单元整体坐标系 $Oxyz$,钢筋单元局部坐标系 $O'x'y'z'$,钢筋单元节点局部坐标系 $O^*x^*y^*z^*$ 。三个坐标系 $Oxyz$ 、 $O'x'y'z'$ 、 $O^*x^*y^*z^*$ 内的刚度矩阵分别为 \mathbf{k} 、 \mathbf{k}' 、 \mathbf{k}^* ,荷载向量分别为 \mathbf{F} 、 \mathbf{F}' 、 \mathbf{F}^* ,位移向量分别为 \mathbf{u} 、 \mathbf{u}' 、 \mathbf{u}^* 。不同坐标系之间的转换关系为:

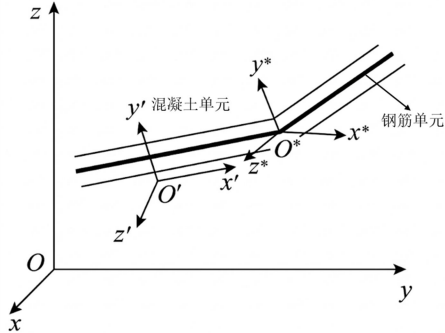
$$\mathbf{u}' = \mathbf{R}\mathbf{u}, \mathbf{F}' = \mathbf{R}\mathbf{F} \quad (1)$$

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{r}\mathbf{u}, \mathbf{F}^* = \mathbf{r}\mathbf{F} \quad (2)$$

式中: \mathbf{R} 、 \mathbf{r} 为坐标系 $Oxyz$ 、 $O'x'y'z'$ 、 $O^*x^*y^*z^*$ 之间的坐标转换矩阵。



(a) 单弹簧联结单元法示意图



(b) 混合坐标系示意图

图 1 单弹簧联结单元法和混合坐标系示意图

Fig.1 Schematic diagrams of single-spring joint element method and mixed coordinate system

结点局部坐标系 $O^*x^*y^*z^*$ 下的有限元平衡方程可以通过式(1)和式(2)得到:

$$\mathbf{k}^* \mathbf{u}^* = \mathbf{F}^* \quad (3)$$

$$\mathbf{k}^* = \mathbf{r}\mathbf{k}\mathbf{r}^T = \mathbf{r}\mathbf{R}^T\mathbf{k}'\mathbf{R}\mathbf{r}^T \quad (4)$$

基于不协调网格协调位移解法^[16]的思想,建立钢筋与混凝土在法线方向上的关系,钢筋单元在法向的位移插值方程为:

$$\mathbf{u}_i^* = \sum_{j=1}^n \mathbf{r}_{ij} \mathbf{u}_j \quad (i=2,3) \quad (5)$$

式中: n 为维数; \mathbf{r}_{ij} 为插值系数; \mathbf{u}_j 为混凝土周边 m 个结点位移的线性组合。

$O^*x^*y^*z^*$ 坐标系内混凝土对钢筋的作用力为 \mathbf{f}^* , $Oxyz$ 坐标系内钢筋对混凝土的反作用力为 $-\mathbf{r}^T \mathbf{f}^*$,以增量形式建立钢筋混凝土有限元平衡方程:

$$\mathbf{k}\Delta\mathbf{u} = \Delta\mathbf{F} - \mathbf{r}^T \Delta\mathbf{f}^* \quad (6)$$

$$\mathbf{k}^* \Delta\mathbf{u}^* = \Delta\mathbf{F}^* + \Delta\mathbf{f}^* \quad (7)$$

由式(3)和式(5)可以表示钢筋混凝土间切向黏结力增量为:

$$\Delta\mathbf{f}^* = \mathbf{K}_s \Delta\mathbf{s} = \mathbf{K}_s (\mathbf{r}\Delta\mathbf{u} - \Delta\mathbf{u}^*) \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_s = \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; k_s = \frac{\partial \tau}{\partial s} \pi d l \quad (9)$$

式中: τ 为实验所得的黏结应力; s 为实验所得的滑移量; d 、 l 分别为钢筋的直径和长度; $\Delta\mathbf{s}$ 为滑移量增量; k_s 为切向的刚度。

将式(6)代入式(3)和式(5)可得混合坐标系下单弹簧联结单元法有限元方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{k} + \mathbf{r}^T k_s \mathbf{r} & -\mathbf{r}^T k_s \\ -k_s \mathbf{r} & \mathbf{k}^* + k_s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\mathbf{u} \\ \Delta\mathbf{u}^* \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta\mathbf{F} \\ \Delta\mathbf{F}^* \end{Bmatrix} \quad (10)$$

1.2 基于四参数等效应变的混凝土损伤模型

基于 Hsieh-Ting-Chen 四参数(A 、 B 、 C 、 D)破坏准则^[17],在应变空间建立新的四参数(A 、 B 、 C 、 D)破坏准则^[18-19]:

$$F(I'_1, J'_2, \varepsilon_0) = A \frac{J'_2}{\varepsilon_0} + B \sqrt{J'_2} + C \varepsilon_1 + D I'_1 - \varepsilon_0 = 0 \quad (11)$$

$$I'_1 = \varepsilon_{ii} \quad (i=1,2,3) \quad (12)$$

$$J'_2 = \frac{e_{ij} e_{ij}}{2} \quad (i, j=1,2,3) \quad (13)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J'_2} \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) + \frac{1}{3} I'_1 \quad (14)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arcsin\left(-\frac{3\sqrt{3}J'_3}{2\sqrt{J'_2}}\right) \quad (15)$$

$$J'_3 = \frac{e_{ij} e_{jk} e_{ki}}{3} \quad (i, j, k=1,2,3) \quad (16)$$

$$\varepsilon_0 = C_t f_c / E = f_t / E \quad (17)$$

式中: I'_1 为应变张量的第一不变量; J'_2 为应变偏量的第二不变量; ε_1 为最大主应变; J'_3 为应变偏量的第三不变量; ε_0 为材料达到抗拉强度时的应变; E 为材料弹性模量; C_t 为抗拉强度比; f_t 为材料抗拉强度; 四参数 A 、 B 、 C 、 D 分别通过单轴拉伸、单

轴压缩、双轴等压和三轴压缩试验确定。

复杂的多轴应力状态可以通过等效应变原理转化为简单的单轴应力状态^[20-21],多轴应力状态下,式(11)中 ε_0 被等效应变 ε^* 所替代:

$$\varepsilon^* = \frac{(B\sqrt{J'_2} + C\varepsilon_1 + DI'_1) + \sqrt{(B\sqrt{J'_2} + C\varepsilon_1 + DI'_1)^2 + 4AJ'_2}}{2} \quad (18)$$

再采用 GHRIB 等^[22]提出的基于能量等价原理的损伤演化方程:

$$D = \begin{cases} 0, & (\varepsilon^* \leq \varepsilon_0) \\ 1 - \sqrt{\frac{f_t}{E\varepsilon^*} [2e^{-b(\varepsilon^* - \varepsilon_0)} - e^{-2b(\varepsilon^* - \varepsilon_0)}]}, & (\varepsilon^* > \varepsilon_0) \end{cases} \quad (19)$$

$$b = 3 / \left[\varepsilon_0 \left(\frac{2G_f E}{l_{ch} f_t^2} - 1 \right) \right] \quad (20)$$

式中: D 为无量纲损伤指数,数值在 0(完好)到 1(完全破坏)之间; l_{ch} 为特征长度, G_f 为断裂能。

2 配筋设计

2.1 工程概况

滩坑水电站位于浙江省青田县境内的瓯江支流小溪中段。溢洪道为开敞式,全长约 1 500 m,自上游至下游依次为进水渠、控制段、泄槽、挑流鼻坎及出水渠 5 个区段。控制段由 6 孔宽 12 m 的表孔泄洪闸组成,闸墩宽 3 m,横缝设在溢流堰中间,闸室上、下游总长 41.71 m。闸顶高程 171.00 m,与大坝齐平。溢流堰为 WES 曲线,堰顶高程 148.00 m,由弧形工作闸门控制。闸墩结构设计图如图 2 所示。弧形闸门全关时,承担的总水压力为 12 010 kN。在如此量级的弧形闸门推力作用下,闸墩与支撑结构连接处将产生较大的拉应力,在超过混凝土抗拉强度的区域发生损伤。为提升整体结构的安全性和研究闸墩的真实应力分布状态,有必要对闸墩进行配筋设计和非线性分析。

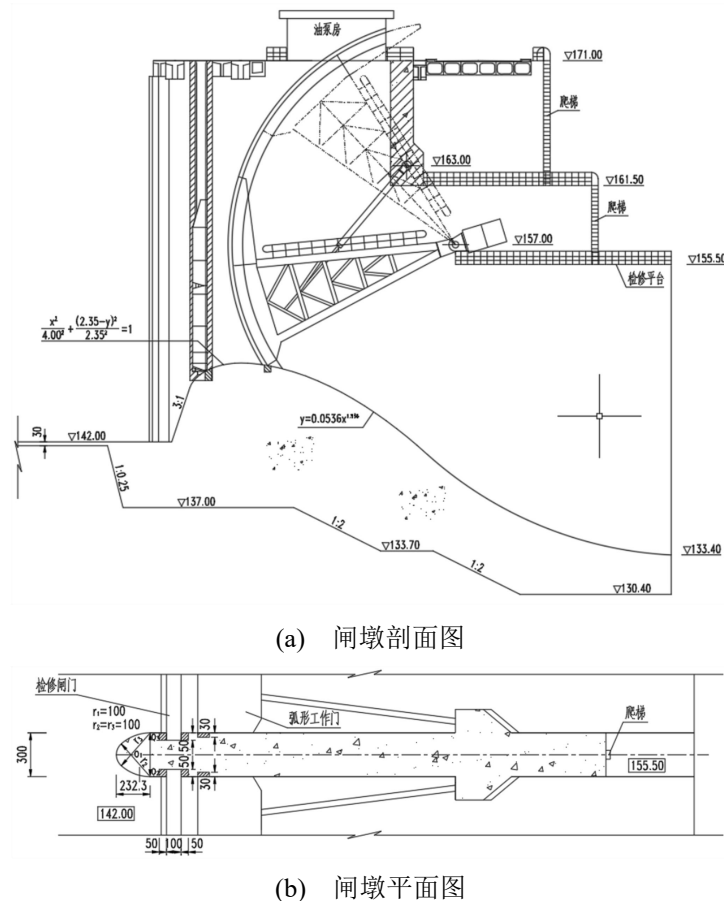


图 2 闸墩结构设计图

Fig.2 Structural design drawing of the pier

2.2 三维有限元模型

建立滩坑水电站溢洪道控制段整体三维有限元模型,包括中墩、边墩、溢流堰、断层及地基等

结构,如图 3 所示。整体模型共有 160 379 个节点,139 302 个单元,全部采用八结点六面体单元进行空间离散。坐标系采用右手法则, x 轴正向取为顺

河向指向下游方向,y轴正向取为横河向指向左岸方向,z轴正向取为竖直向上,对地基部分的四个侧

边界进行法向约束,地基底部边界进行三向固定约束。

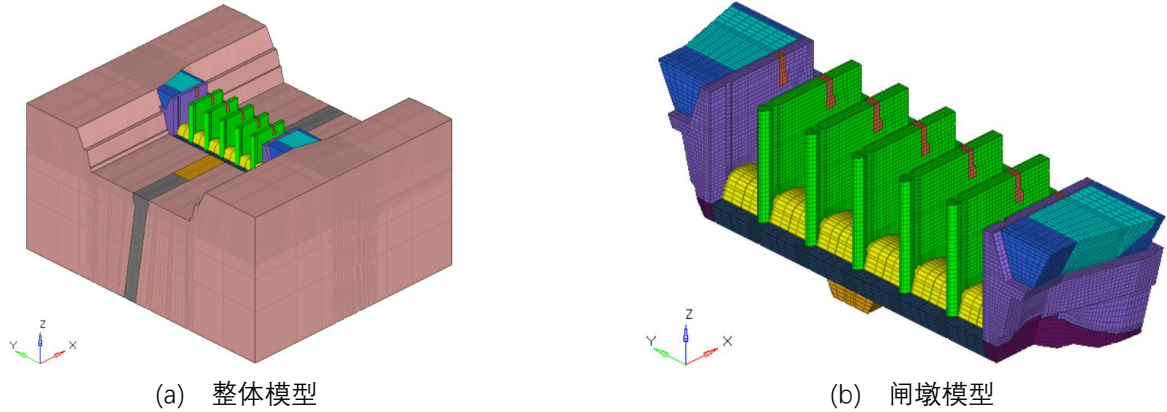


图3 溢洪道控制段整体三维有限元模型

Fig.3 Overall three-dimensional finite element model of the control section of the spillway

2.3 力学参数和计算工况

主要结构材料设计如下:中墩和边墩(C25 混凝土)、牛腿(C30 混凝土)、钢筋(HRB400)。具体材料力学参数见表 1。C25 和 C30 混凝土的四参数 A 、

B 、 C 、 D 分别通过单轴拉伸、单轴压缩、双轴等压和三轴压缩试验确定,C25 混凝土的分别为 0.0135、0.1315、0.7420、0.2452,C30 混凝土的分别为 0.0130、0.1177、0.7509、0.2460。

表 1 力学参数

Tab.1 Material parameters

材料	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度标准值/MPa	抗拉强度标准值/MPa	屈服强度/MPa
C25 混凝土	24.0	28.0	0.167	16.7	1.78	—
C30 混凝土	24.0	30.0	0.167	20.1	2.01	—
HRB400 钢筋	78.5	200.0	0.300	—	—	400.00

选取静力工况下最不利工况(闸墩和牛腿连接处拉应力最大的工况)作为配筋设计的控制工况,该工况需要考虑的荷载有结构自重、正常蓄水位时的水荷载和弧形闸门推力。

2.4 配筋方案

表孔闸墩依据应力图图形法进行配筋设计时,需分别在水平向与竖直向配置受力钢筋。对于布置弧形闸门的闸墩而言,在闸门挡水时,闸墩在牛腿上游侧会出现扇形受拉区域。为抑制裂缝的产生,闸墩在支座推力方向上应布置局部扇形受拉钢筋,钢筋

的布置形式参照《水工混凝土结构设计规范》(NB/T 11011—2022)^[23]的布置要求,其中边缘钢筋与支座推力方向夹角应小于 30° ,扇形钢筋布置在 2 倍的支座宽度范围内并至少向上游延伸 2.5 倍的支座高度。本工程牛腿支座宽度为 2.8 m,高度为 3.4m,因此支座推力方向的钢筋布置在牛腿上游宽 5.6 m,长 10 m 的范围内。同时,牛腿部位位于横河向也需设置专门受拉钢筋,以承担该方向的弯矩与拉力。根据计算,各部位具体配筋面积见表 2。

表 2 配筋量计算结果

Tab.2 Calculation results of reinforcement quantity

部位	配筋方向	控制应力/MPa	截面拉应力图形总面积 (10^6N)	单宽计算钢筋量/ mm^2	配置钢筋
中墩	水平向	0.787	0.992	3 969	$\phi 32@200$
	竖直向	0.010	0.027	108	$\phi 14@250$
	支座推力方向	0.703	1.690	6 760	$\phi 32$
	牛腿横河向	0.643	0.930	3 720	$\phi 28@150$
边墩	水平向	0.782	0.455	1 822	$\phi 25@200$
	竖直向	0.110	0.113	451	$\phi 14@250$
	支座推力方向	0.698	1.683	6 712	$\phi 32$
	牛腿横河向	0.646	0.921	3 683	$\phi 28@150$

3 非线性有限元分析

3.1 钢筋混凝土模型

根据应力图形法计算的钢筋布置方案,在混凝土三维有限元模型的基础上建立钢筋杆单元,如图

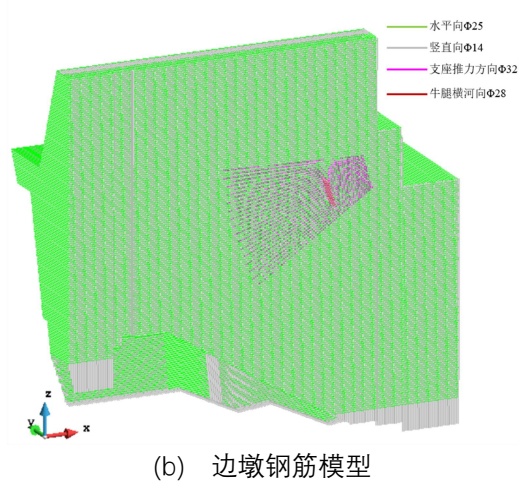
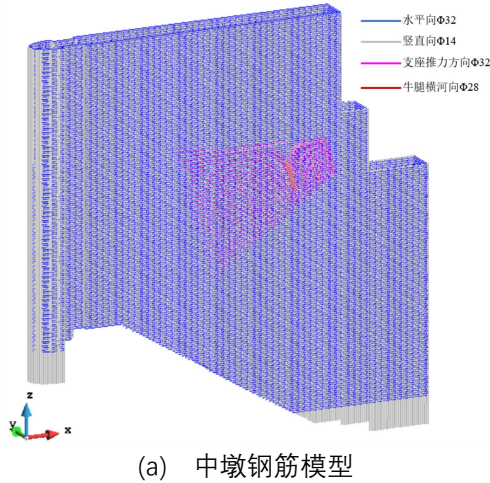


图4 闸墩钢筋混凝土有限元模型

Fig.4 Pier reinforced concrete finite element model

3.2 混凝土应力分析

闸墩混凝土应力峰值计算结果见表3。在无钢筋情况下,中墩和边墩的混凝土最大拉应力发生位置基本不变,均出现在闸墩与牛腿连接处的上游侧。加入钢筋后,中墩和边墩的应力峰值均有所减小。

表3 闸墩混凝土应力峰值

Tab.3 Maximum stress value of the pier concrete

部位	最大拉应力/MPa		出现位置
	无钢筋	有钢筋	
中墩	1.500	1.437	中墩与牛腿连接处的上游侧
边墩	1.426	1.362	边墩与牛腿连接处的上游侧

4所示。基于单弹簧联结单元法和混凝土四参数损伤模型进行闸墩结构三维非线性有限元计算,分析配筋前后闸墩混凝土的应力、损伤分布以及钢筋的受力情况。

为分析加入钢筋模型前后混凝土内部应力的变化情况,在中墩和边墩上切取了不同的特征剖面(图5),计算结果见表4。对比分析可知,有无钢筋配置对中墩与边墩的混凝土应力分布形态影响较小,但会引起应力数值的变化。这是因为在静力工况下,除闸墩与牛腿连接处发生应力集中外,中墩和边墩的绝大部分区域应力水平较低,配置钢筋对该部位混凝土的应力分布影响有限;但对于拉应力显著集中的闸墩与牛腿连接区域,钢筋也承担了较大拉应力,配置钢筋能够有效降低该部位的最大拉应力值,改善混凝土的受力状态。

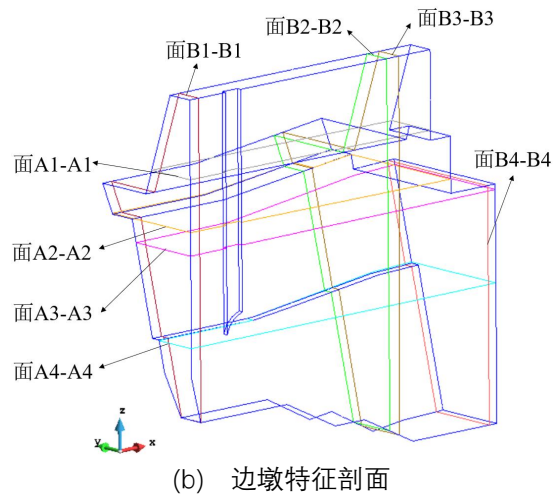
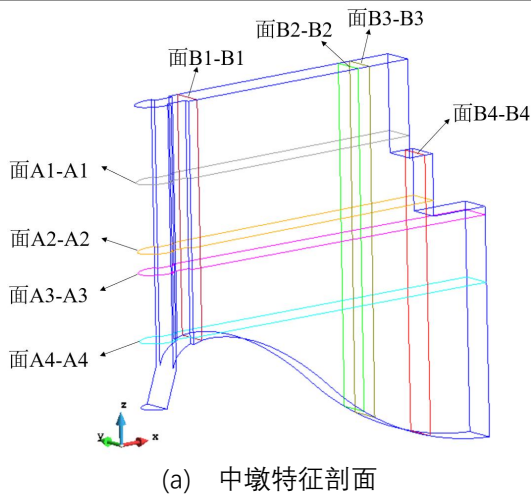


图5 闸墩特征剖面

Fig.5 Characteristic section of the pier

表 4 闸墩特征剖面应力峰值

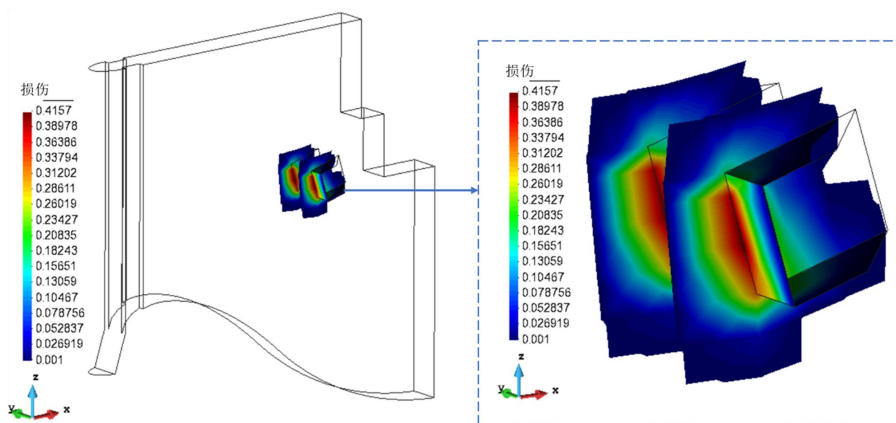
Tab.4 Maximum stress value of the characteristic profile of the pier

截取切面	最大拉应力/MPa			
	中墩无钢筋	中墩有钢筋	边墩无钢筋	边墩有钢筋
面 A1-A1	0.072	0.064	0.046	0.045
面 A2-A2	1.495	1.211	1.425	1.185
面 A3-A3	1.386	1.136	1.403	1.154
面 A4-A4	0.195	0.188	0.224	0.223
面 B1-B1	0.014	0.013	0.386	0.384
面 B2-B2	1.386	1.210	1.407	1.247
面 B3-B3	1.492	1.395	1.414	1.361
面 B4-B4	0.096	0.095	0.406	0.401

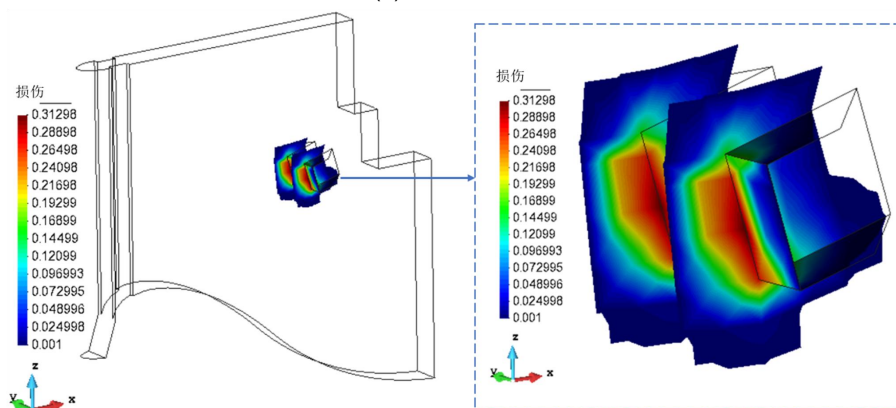
3.3 混凝土损伤分析

闸墩损伤分布如图 6 所示。有无钢筋情况下, 闸墩混凝土的整体损伤程度均较轻, 损伤区域主要集中于中墩与牛腿的连接部位。这是因为弧形闸门推力通过闸墩大梁传递至闸墩过程中, 在连接区域形成小范围拉应力集中现象, 导致该区域拉应力超过混凝土抗拉强度。在未配置钢筋时, 中墩与边墩

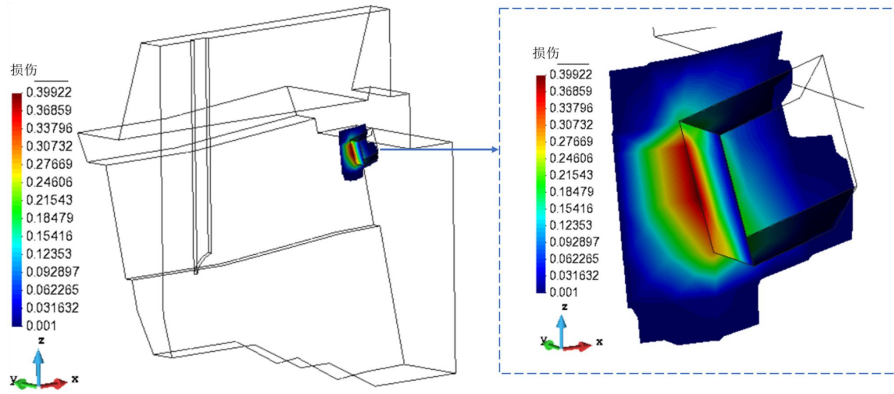
的损伤最大值分别为 0.416 和 0.399; 而配置钢筋后, 中墩与边墩的损伤最大值分别下降至 0.313 和 0.307, 降幅分别约为 24.8% 和 23.1%, 且损伤分布区域有所减小。由此可见, 配置钢筋可以在一定程度上限制损伤的增大和扩展, 提升结构的整体耐久性与承载可靠性。



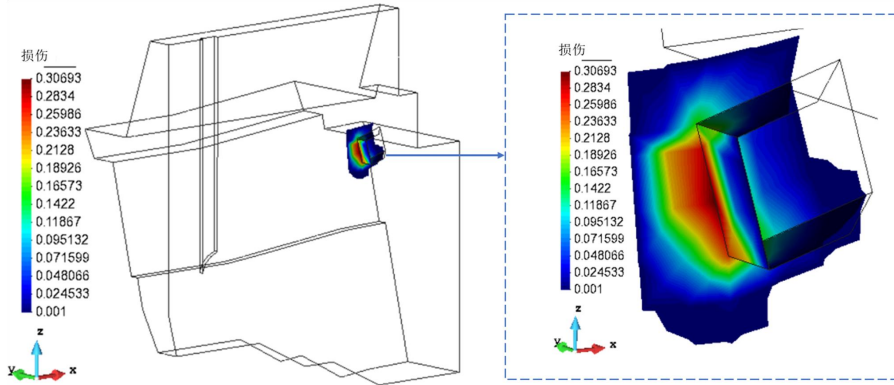
(a) 中墩无钢筋



(b) 中墩有钢筋



(c) 边墩无钢筋



(d) 边墩有钢筋

图 6 闸墩损伤分布

Fig.6 Damage distribution of the pier

3.4 钢筋应力分析

静力工况下闸墩受到侧水压力和闸门推力作用,在牛腿附近产生较大拉应力。根据《水工混凝土结构设计规范》(NB/T 11011—2022)^[23],混凝土最大裂缝宽度 w_{\max} 计算公式为:

$$w_{\max} = \alpha_{\text{cr}} \psi \frac{\sigma_{\text{sk}} - \sigma_0}{E_s} l_{\text{cr}} \quad (21)$$

式中: α_{cr} 为考虑构件受力特征的系数,取 2.05; ψ 为裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数,当 ψ 小于 0.3 时,取 0.3; σ_{sk} 为纵向受拉钢筋应力; σ_0 为钢筋初始应力,取 0 N/mm²; E_s 为钢筋弹性模量,取 2.0×10^5 N/mm²; l_{cr} 为平均裂缝间距。

闸墩钢筋最大应力和混凝土最大裂缝宽度见表 5。竖直向钢筋受结构荷载变化的影响较小,应力状态以受压为主,但压应力值不大;水平向钢筋受结构荷载变化的影响较大,最大拉应力为 23.84 MPa,位于牛腿与闸墩连接处的上游侧;支座推力方向上的钢筋应力分布规律与水平向一致,但由于钢筋布置在局部受拉区域,应力比水平向要略大一点,为 24.97 MPa。由于在静力工况下,闸墩混凝土整体损伤较轻,尚未发生大范围开裂,拉应力仍主要由混凝土自身承担,钢筋尚未充分发挥其抗拉强度,故钢筋

总体应力水平处于较低范围。

表 5 闸墩最大钢筋应力及裂缝宽度

Tab.5 Maximum rebar stress and crack width of the pier

钢筋位置	最大拉应力/ MPa	裂缝宽度/ mm
中墩竖直向钢筋	1.008	0.001
中墩水平向钢筋	23.835	0.030
中墩牛腿及拉锚钢筋	24.965	0.032
边墩竖直向钢筋	4.769	0.006
边墩水平向钢筋	20.763	0.026
边墩牛腿及拉锚钢筋	23.576	0.030

闸墩由于闸门推力作用,最大裂缝宽度均发生在支座推力方向,闸墩最大裂缝宽度为 0.032 mm,远低于规范规定的二类环境条件下裂缝宽度限值 0.30 mm,满足规范要求。结构在正常使用状态下安全裕度较高,基于应力图形法设计的配筋量和布置方式能够满足闸墩在静力工况下的正常运行要求。

3.5 配筋方案调整

按照初始配筋方案,闸墩混凝土整体损伤程度较低,钢筋总体应力较小,且闸墩最大裂缝宽度显著低于规范限值,仅达到规范限值的 10.7%,说明采用

线弹性应力图形法进行配筋设计有较高的安全储备,具备适当减小配筋量的条件。

应力分析显示,应力集中现象主要发生在闸墩和牛腿连接处。基于上述受力特征,在保持支座推力方向钢筋固定根数扇形布置、钢筋空间位置不变的前提下,仅对钢筋直径进行替换,以避免钢筋根数、扇形展开角度与布置稀疏度变化引入的耦合影响,从而更清晰地量化配筋面积变化对闸墩和牛腿连接区应力、损伤与裂缝宽度的影响规律,并用于检验线弹性应力图形法配筋的保守性。在初始配筋方案的基础上,将钢筋直径由 $\phi 32$ 依次替换成 $\phi 28$ 、 $\phi 25$ 及 $\phi 22$,计算得到相应配筋率分别为0.44%、0.33%、0.27%和0.21%,满足《水工混凝土结构设计规范》(NB/T 11011—2022)^[23]关于承受弧门支座推力所需的纵向受力钢筋配筋率不应小于0.20%的规定。计算工况保持不变,为静力工况下最不利工况(闸墩和牛腿连接处拉应力最大的工况)。闸墩混凝土与钢筋的最大拉应力计算结果如图7所示。由图分析可知,混凝土与钢筋最大拉应力随着钢筋直径的减小呈现逐步增大的变化趋势,但总体增幅较小,混凝土拉应力峰值最大增幅为2.9%,钢筋拉应力峰值最大增幅为4.8%。且二者增大到一定程度后应力增长速率明显放缓,并逐渐趋于稳定。

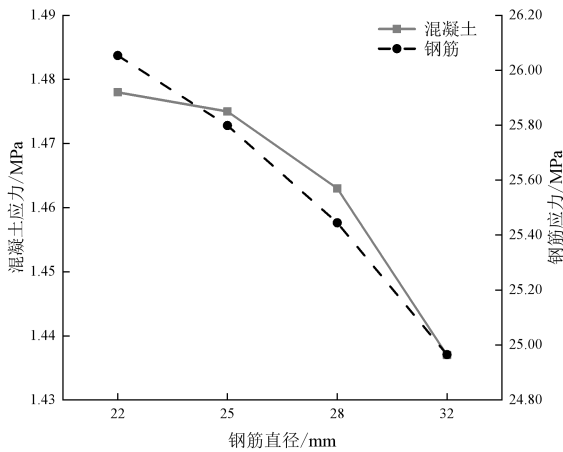


图7 闸墩混凝土和钢筋应力峰值变化曲线

Fig.7 Maximum stress variation curves of the concrete and reinforcing bars of the pier

图8展示了闸墩结构最大裂缝宽度随配筋量变化的关系曲线。由图可知,当钢筋直径减小即配筋量减小时,闸墩最大裂缝宽度虽然逐渐增大,但其值始终处于较低水平,且变化程度很小。最大裂缝宽度为0.033 mm,依旧满足规范规定的二类环境条件下裂缝宽度限值0.30 mm的要求。综上所述,基于线弹性应力图形法设计的配筋方案偏于保守,在削减配筋用量的情况下,闸墩在静力最不利工况下

仍可以保持安全运行。

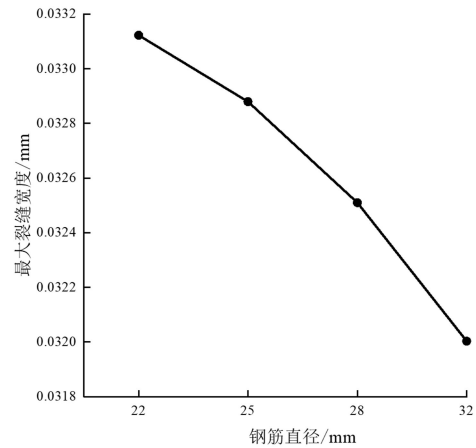


图8 闸墩裂缝宽度峰值变化曲线

Fig.8 Curve of maximum crack width of the pier

4 结论

本文基于线弹性应力图形法提出滩坑水电站溢洪道闸室结构配筋方案,采用单弹簧联结单元法和混凝土四参数损伤模型进行三维非线性有限元计算分析,得到的结论如下:

1)采用基于混合坐标系的单弹簧联结单元法克服了传统双弹簧联结单元法需人为设定法向刚度引起的收敛性难题;同时结合混凝土四参数损伤模型,将复杂的多轴损伤问题转化为单轴等效应变空间中的损伤问题求解。

2)静力工况下,损伤主要发生在闸墩与牛腿连接部位,配置钢筋可以在一定程度上降低混凝土的损伤程度和范围,改善局部混凝土的受力状态;闸墩钢筋最大拉应力为24.97 MPa,最大裂缝宽度为0.032 mm,仅占规范限值0.30 mm的10.7%,闸墩结构在正常使用状态下具有较高的安全裕度。

3)静力工况下,采用线弹性应力图形法进行配筋设计安全裕度较大。在满足闸室结构构造要求的前提下,适度调整钢筋规格对关键应力指标和裂缝宽度影响有限,结构仍能满足正常使用要求。

参考文献

- [1] 朱光明,尹进步,刘志明,等.超长溢流宽度大流量溢洪道泄洪水力特性研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(4):77-84.[Zhu G M, Yin J B, Liu Z M, et al. Study on the hydraulic characteristics of flood discharge from a large flow spillway with extra long overflow width[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2024, 45(4): 77-84.]
- [2] 韩玉龙.开敞式防洪闸闸室结构抗震能力分析[D].郑州:华

- 北水利水电大学,2022.[Han Y L.Analysis on seismic capacity of open flood gate chamber structure[D].Zhengzhou:North China University of Water Resources and Electric Power,2022.]
- [3] 郭博文,范冰,宋力,等.开敞式防洪闸室结构抗震安全分析及加固措施研究[J].人民黄河,2024,46(4):153-156,162.[Guo B W,Fan B,Song L,et al.Seismic safety analysis and reinforcement measures research of open floodgate chamber structure[J].Yellow River, 2024,46(4):153-156,162.]
- [4] 孔词,肖明.地下洞室复杂水工结构的数值配筋方法[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(12):4394-4404.[Kong C, Xiao M.Numerical reinforcement method for complex hydraulic structures of underground caverns[J].Journal of Central South University (Science and Technology), 2021,52(12):4394-4404.]
- [5] 田羽,张小飞,覃佳宇,等.考虑黏结滑移的型钢混凝土弧形门墩型钢锚固长度研究[J].水利水电技术(中英文),2021,52(7):103-113.[Tian Y,Zhang X F,Qin J Y,et al.Bond slip considered-study on sectional steel anchoring length of pier of sectional steel-reinforced concrete radial gate[J].Water Resources and Hydropower Engineerin,2021,52(7):103-113.]
- [6] 王竞,何蕴龙,白新革.角木塘水电站预应力闸墩三维有限元分析与配筋方案研究[J].中国农村水利水电,2017,418(8):170-176.[Wang J,He Y L,Bai X G.3D finite element analysis and reinforcement design on prestressed piers of the jiaomutang hydropower project[J].China Rural Water and Hydropower,2017,418(8):170-176.]
- [7] 王勤振,刘海民,冯超.非杆件大体积混凝土结构内力及配筋计算合理性分析[J].水运工程,2021,587(10):295-299.[Wang Q Z,Liu H M,Feng C.Rationality analysis of internal force and reinforcement calculation of non-member mass concrete structure[J].Port & Waterway Engineering,2021,587(10):295-299.]
- [8] Xu W T, Ma Z, Wu H G, et al. Bearing characteristics with effect of bond-slip behavior in massive ring-type reinforced concrete structures[J]. Buildings, 2024, 14(5): 1-17.
- [9] 涂承义,章莉,黄维,等.沙坪一级水电站泄洪闸三维有限元分析及配筋设计[J].水电能源科学,2022,40(5):186-189,185.[Tu C Y,Zhang L,Huang W,et al.Three-dimensional finite element analysis and reinforcement design of flood discharge sluice of shaping level I hydropower station[J]. Water Resources and Power,2022,40(5):186-189,185.]
- [10] Abdul Gafoor A H M, Dinkler D. Modeling damage behavior of concrete subjected to cyclic and multiaxial loading conditions[J]. Structural Concrete, 2022, 23(4): 2322-2336.
- [11] 伍鹤皋,高晓峰,傅丹.水电站蜗壳结构研究及应用的回顾与展望[J].水利学报,2021,52(7):770-780.[Wu H G,Gao X F, Fu D.Review and prospect in research and application of spiral case structure in hydropower plant[J].Journal of Hydraulic Engineering,2021,52(7):770-780.]
- [12] 施成华,王祖贤,刘建文,等.基于混凝土损伤模型的盾构隧道极限承载力研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(11):4310-4325.[Shi C H,Wang Z X,Liu J W,et al.Study on ultimate bearing capacity of shield tunnel based on damage model of concrete[J].Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(11):4310-4325.]
- [13] 崔光耀,韩驰,马华兵,等.大直径钢筋钢管混凝土排水管外压承载特性影响因素研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(4):110-118.[Cui G Y,Han C, Ma H B, et al. Study on influence factors of external pressure bearing characteristics of large-diameter reinforced concrete cylinder pipes[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2025, 46(4): 110-118.]
- [14] 赵兰浩,张梦迪,张云峰.表孔闸墩颈部钢筋混凝土非线性有限元分析[J].水电能源科学,2018,36(1):120-123,115.[Zhao L H,Zhang M D,Zhang Y F.Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete on the neck of pier[J].Water Resources and Power,2018,36(1):120-123,115.]
- [15] Zhao L H, Zhang W, Bai X, et al. Single spring joint element based on the mixed coordinate system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015, 2015(1): 1-16.
- [16] 李同春,李淼,温召旺,等.局部非协调网格在高拱坝应力分析中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2003,31(1):42-45.[Li T C,Li M,Wen Z W,et al.Application of locally incompatible meshes to stress analysis of high arch dams[J].Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003,31(1):42-45.]
- [17] Hsieh S S, Ting E C, Chen W F. A plastic-fracture model for concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1982, 18(3): 181-197.
- [18] 章莉,赵兰浩,刘智,等.循环荷载作用下的混凝土弹塑性损伤本构模型及数值实现[J].工程力学,2023,40(4):152-161.[Zhang L,Zhao L H,Liu Z,et al.An elastic-plastic damage constitutive model of concrete under cyclic loading and its numerical implementation[J].Engineering Mechanics,2023,40(4):152-161.]
- [19] Zhang L, Mao J, Zhao L H. Nonlinear seismic assessment of concrete dams using a novel elastoplastic damage numerical framework[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2025,

- 151(4):1-17.
- [20] 刘智,赵兰浩,吴晓彬,等.基于动态黏结滑移性能的钢筋混凝土分离式模型研究[J].振动与冲击,2021,40(2):1-8,48. [Liu Z,Zhao L H,Wu X B,et al.Reinforced concrete separation model based on dynamic bond-slip performances[J].Journal of Vibration and Shock,2021,40(2): 1-8,48.]
- [21] Liu Z,Zhang L,Zhao L H,et al.A damage model of concrete including hysteretic effect under cyclic loading[J].Materials, 2022,15(14):1-18.
- [22] Ghrib F,Tinawi R.Nonlinear behavior of concrete dams using damage mechanics[J].Journal of Engineering Mechanics,1995,121(4):513-527.
- [23] NB/T 11011—2022 水工混凝土结构设计规范[S].[NB/T 11011 — 2022 Code for design of hydraulic concrete structures[S].]

Reinforcement Design and Nonlinear Finite Element Analysis of Spillway Surface Hole Pier of Tankeng Hydropower Station

ZHAO Lanhao¹, HAN Xiuyu¹, HUANG Zhi², MAO Jia¹

(1.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2.China Harbour Engineering Company Limited, Beijing 100027, China)

Abstract: **【Objective】** To address stress concentration at the connection between the gate pier and corbel under large thrust of a radial gate, this study aims to establish a reinforcement design and nonlinear finite element analysis method for piers, to investigate the influence of reinforcement on the mechanical behavior of the piers, and to provide a theoretical basis for the reinforcement design and safety assessment of similar hydraulic structures. **【Methods】** Taking the spillway surface hole pier of Tankeng Hydropower Station as the study object, a three-dimensional finite element model was developed, and a reinforcement scheme is proposed based on the linear-elastic stress graph method. The bond-slip behavior between reinforcing steel and concrete was simulated using a single-spring joint element, and a four-parameter damage model for concrete was incorporated. Nonlinear finite element analyses were performed for the spillway surface hole pier of Tankeng Hydropower Station to investigate stress responses, damage evolution, and reinforcement forces before and after strengthening. In addition, a crack-width check was conducted for serviceability verification. **【Results】** ① After reinforcement, the maximum tensile stress of concrete at the pier-corbel junction decreased, and the peak damage index was reduced by approximately 25%, accompanied by a shrinkage of the damaged zone. ② The reinforcement stress level remained low, with a maximum tensile stress of 24.97 MPa; the maximum crack width was 0.032 mm, which is far below the code limit of 0.30 mm. The structure remained in a safe state after a moderate reduction in reinforcement ratio. **【Conclusion】** Reinforcement can improve the local stress state of concrete and mitigate damage at the pier-corbel junction. The reinforcement scheme designed using the linear-elastic stress graph method exhibits a considerable safety margin, indicating potential for rational optimization of the reinforcement amount.

Keywords: pier; reinforcement; reinforced concrete bond-slip; single-spring joint element method; four-parameter damage model for concrete