

工字型双排框架式防冲墙结构安全稳定分析

侯跃华¹, 张仪桢², 陈志朋¹, 苑晨阳³, 李海涛¹, 白卫峰³, 谢芸菲²

(1. 北京金河水务建设集团有限公司, 北京 102206; 2. 华北水利水电大学 人居科学与设计学院, 河南 郑州 450046; 3. 华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要:【目的】针对采用工字型截面、前后双排布置, 并通过顶部冠梁和拉结板形成空间框架体系的新型防冲墙, 分析其不同水位工况下的力学响应与稳定性变化规律, 为同类地下防冲结构的优化设计和安全评估提供参考。【方法】以典型断面为研究对象, 建立三维有限元模型, 采用地应力平衡和分步施工模拟还原初始应力场与建造过程; 在正常水位、100 年一遇、200 年一遇及 10000 年一遇洪水水位工况下开展渗流-应力耦合分析, 并依据相关规范进行抗倾覆和抗滑稳定性验算。【结果】①结构竖向位移随水位升高呈先减小后增大的趋势, 10000 年一遇工况下最大沉降为 26.97mm, 整体变形可控。②混凝土最大拉、压应力随水位上升而增大, 拉应力由 1.37MPa 增至 3.02MPa, 压应力绝对值由 2.10MPa 增至 5.09MPa, 但高应力区仅局限于局部节点, 绝大部分区域应力水平较低; 钢筋最大 Mises 应力始终低于 30MPa, 远低于屈服强度, 强度储备充足。③各工况下抗倾覆安全系数为 1.52~1.67, 抗滑安全系数为 1.88~2.02, 均大于规范限值, 稳定性裕度充分。【结论】新型工字型双排框架式防冲墙在正常及极端洪水条件下均具有较好的安全稳定性能, 其空间框架特征可有效提升整体抗倾覆与抗滑能力。渗流-应力耦合分析方法可为类似河流防护工程中地下防冲结构的精细化设计提供依据。

关键词: 渗流-应力耦合; 极端情况; 安全稳定性能; 数值仿真

中图分类号: TV311

文献标识码: A

地下连续墙是河道防洪工程中的核心刚性防护结构^[1,2], 其安全稳定性能直接关系到堤防体系的整体可靠性与沿岸人民生命财产的安全。全球气候变化加剧导致极端洪涝灾害频发^[3,4], 河道防护工程面临的环境与荷载因素愈发严酷, 对防冲结构的抗冲刷能力、结构形式及整体稳定性提出了更高要求。工字型双排框架式防冲墙作为一种新型地下连续墙结构, 由前后双墙及中间连接墙构成空间框架体系, 与传统的单片式防冲墙相比, 具有抗侧刚度大、整体稳定性好、前后墙受力协同性强等优点, 逐渐成为提升河道防洪能力的重要结构形式。因此, 开展该类结构在正常及极端条件下的受力性能与安全稳定性能研究, 具有重要的工程意义与现实紧迫性。

目前, 国内外学者围绕防冲墙及地下连续墙

已开展相关研究, 形成了较为完善的理论与实践体系。施工工艺方面, 针对复杂地层适应性、造槽破岩效率、钢筋笼吊装变形控制、接头防渗等技术难点, 刘海乐等^[5]提出了 T 型钢筋笼和接头箱法, Miao Richeng 等^[6]研究了泥浆作用下冲击成槽的破岩机理, 徐云超等^[7]分析了双机抬吊法在钢筋笼吊装中的应用; 结构性能方面, 研究多聚焦于墙体整体稳定性、参数敏感性及极端工况下的变化规律, 邓会元等^[8]通过数值模拟分析了地下连续墙的竖向承载特性和应力场变化, 陈旻瑞等^[9]基于 HS 模型探讨了地下连续墙水平位移对开挖深度、宽度、支撑间距等的敏感性, 喻莹等^[10]研究了不同工况下地下连续墙土压力的变化规律, 王逸辰^[11]分析了防冲墙在洪水工况下的结构稳定性。部分研究通过数值仿真或现场监测,

收稿日期/Received: 2026-05-01

修回日期/Revised: 2026-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51679092); 河南省自然科学基金面上项目 (252300421337; 252300421923)。

第一作者: 侯跃华 (1983—), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事防冲墙结构安全稳定方面研究。

E-mail: 307047364@qq.com。

通信作者: 白卫峰 (1982—), 男, 教授, 博士, 主要从事混凝土损伤理论和混凝土结构数值模拟方面研究。

E-mail: baiweifeng@ncwu.edu.cn。

明确了防冲墙在水、土压力下的应力变形规律, 陕耀等^[12]通过现场实测揭示了双墙间土压力演变规律及土拱效应; 渗流分析方面, 相关研究揭示了地质水文条件对防冲墙防渗性能与受力机制的影响, Ding Jihui 等^[13]通过室内试验分析了水灰比、水膨润土比等因素对水泥-膨润土防渗墙渗透系数的影响规律; 安全稳定性方面, 抗倾覆、抗滑及整体稳定验算方法已较为成熟。

然而, 现有研究仍存在不足: 多数研究对象为传统矩形或圆形截面的二维简化模型, 针对工字型这种新型三维空间受力结构在正常至极端洪水位下的安全稳定性研究比较有限^[14-17]。鉴于此, 本文以工字型双排框架式防冲墙为研究对象, 建立高精细化整体模型, 系统开展以下研究: ①通过地应力平衡和“生死单元”方法, 模拟施工过程; ②开展不同水位工况下的稳态渗流-应力耦合分析, 揭示结构位移场、应力场的演化规律; ③进行抗倾覆与抗滑稳定性验算, 量化评估各工况下的安全储备, 以期同类地下防冲结构的设计优化与安全评估提供理论依据与量化参考。

1 渗流-应力耦合分析理论及稳定性计算

1.1 渗流-应力耦合分析理论

防冲墙的“渗流-应力”耦合属于典型的非饱和问题。根据非饱和达西定律, 得出非稳定饱和-非饱和渗流基本微分方程为^[18]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_r(h_c) \right] - Q = [C(h_c + \beta S_s)] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中, x_i 、 x_j 为坐标值 ($i, j=1, 2, 3$); h_c 为压力水头, m; k_{ij}^s 为饱和渗透张量, 其中 k_{i3}^s 为仅和第 3 坐标轴有关的渗透系数, m/s; $k_r(h_c)$ 为相对透率, 在 0 到 1 之间; C 为比容水度, m^{-1} ; β 为饱和-非饱和选择常数, 在非饱和区取 0, 在饱和区取 1; S_s 为弹性贮水率, m^{-1} ; Q 为渗流源汇项, m^3/s ; t 为时间, s。

基于式 (1) 所得的水头函数, 进一步求解渗透压力和渗透体积力^[19]。其中, 渗透体积力 f 的计算方程为:

$$f = \sqrt{\sum f_i^2} = \gamma_w \sqrt{\sum \left(\frac{\partial h_c}{\partial x_i} \right)^2} = \gamma_w \sqrt{\sum J_i^2} \quad (2)$$

式中, γ_w 为水的重度; f_i 为各方向的渗透体积力; J_i 为在各方向的水力坡降。

1.2 抗倾覆与抗滑稳定性分析理论

为评估新型工字型防冲墙结构在不同工况下

的安全性能, 依据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)^[20], 采用抗倾覆稳定性与抗滑稳定性两个核心指标对结构进行定量评价。该规程适用于基坑支护结构, 本文将工字型防冲墙结构, 代入有限元应力结果计算安全系数, 评估各洪水工况下的抗倾覆与抗滑能力。

1.2.1 抗倾覆稳定性分析

图 1 给出了抗倾覆稳定性分析示意图, 对应计算公式如下:

$$\frac{E_{pk} Z_p + G Z_G}{E_{ak} Z_a} \geq K_e \quad (3)$$

式中: K_e 为抗倾覆稳定安全系数, 安全等级为一级、二级、三级的支挡式结构, K_e 分别不应小于 1.25、1.2、1.15; E_{ak} 、 E_{pk} 分别为基坑外侧主动土压力、基坑内侧被动土压力的标准值, kN; Z_a 、 Z_p 分别为基坑外侧主动土压力、基坑内侧被动土压力的合力作用点至挡土构件底端的距离, m; G 为排桩、桩顶连梁和桩间土的自重之和, kN; Z_G 为双排桩、桩顶连梁和桩间土的重心至前排桩边缘的水平距离, m。

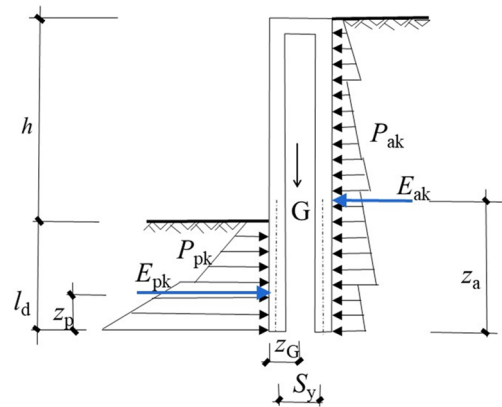


图 1 抗倾覆稳定性分析示意图

Fig.1 Schematic diagram of anti-overturning stability analysis

1.2.2 抗滑稳定性分析

图 2 给出了抗滑稳定性分析示意图, 对应计算公式如下:

$$\frac{E_{pk} + (G - u_m B) \tan \varphi + cB}{E_{ak}} \geq K_{sl} \quad (4)$$

式中: K_{sl} 为抗滑移安全系数, 其值不应小于 1.2; E_{ak} 、 E_{pk} 分别为水泥土墙上的主动土压力、被动土压力的标准值, kN/m; G 为水泥土墙的自重, kN; u_m 为水泥土墙底面上的水压力, kPa, 水泥土墙底位于含水层时, 可取 $u_m = \gamma_w (h_{wa} + h_{wp})/2$, 在地下水位以上时, 取 $u_m=0$; c 、 φ 分别为水泥土

墙底面下土层的黏聚力(kPa)、内摩擦角($^{\circ}$)； B 为双排桩的底面宽度，m； h_{wa} 为基坑外侧水泥土墙底处的压力水头，m； h_{wp} 为基坑内侧水泥土墙底处的压力水头，m。

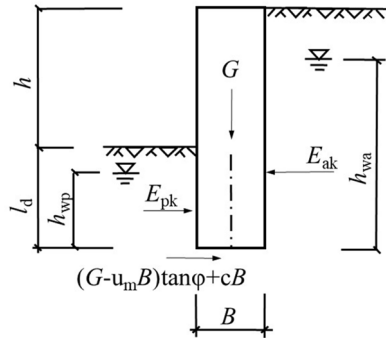


图 2 抗滑稳定性分析示意图

Fig.2 Schematic diagram of anti-sliding stability analysis

2 精细化数值仿真模型

2.1 模型建立

防冲墙主体为高 23 m 的钢筋混凝土工字型地下连续墙，由前排墙板（防冲墙面 1）、后排墙板（防冲墙面 2）、中间连接墙以及墙顶设置的冠梁与拉结板共同构成空间框架体系。主要几何尺寸为：前排墙板与后排墙板厚度均为 0.8 m、宽度 6.25 m，中间连接墙厚度 0.6 m、高度 14 m，冠梁截面 0.8 m×1.2 m，拉结板厚度 0.4 m；墙前布置备塌体（宽 3 m）以减缓水流冲刷，主体结构顶部另设高 7 m、底部厚 1.2 m 的挡墙。依据工程设计图纸，建立包含主体结构、备塌体及周边土体的整体连接模型，如图 3 和图 4 所示。

在网格划分时，对防冲墙主体及邻近土体进行局部加密，远离区域采用较疏网格，以平衡计算规模与精度。混凝土与土体均生成规整的六面体网格，钢筋为两节点单元。整体模型共包含 304460 个单元和 318634 个节点。模型针对不同材料选用适配的单元类型：混凝土结构采用八节点六面体减缩积分单元，可有效避免剪切闭锁；土体采用八节点孔隙流体/应力耦合单元，节点同时包含位移与孔隙压力自由度，可直接求解固液耦合方程，是渗流-应力分析的关键；钢筋采用两节点桁架单元，通过嵌入设置与混凝土共同工作；混凝土与土体之间采用共节点连接。混凝土及岩土均采用线弹性本构模型，模型相关属性参数依

据地质报告与设计资料确定。图 5 从不同角度展示了模型：整体几何与网格模型、工字型防冲墙主体的细化模型以及钢筋网格模型。

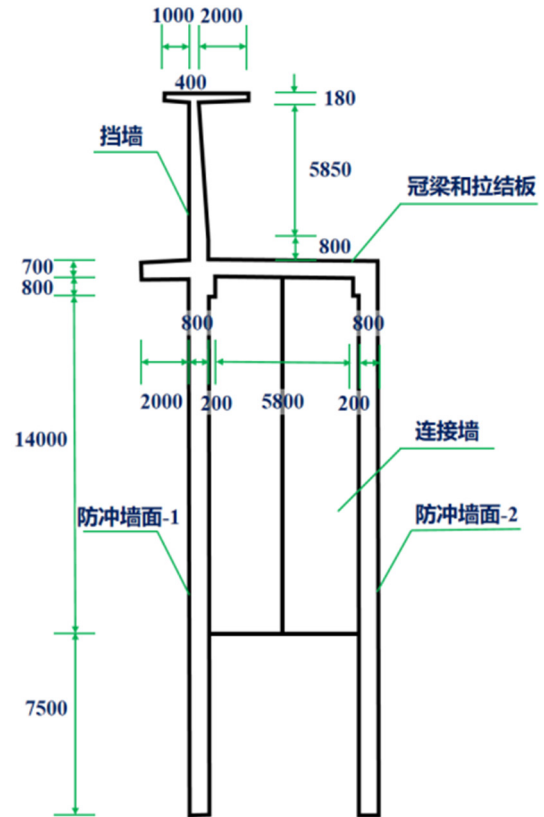


图 3 防冲墙尺寸示意图（单位：mm）

Fig.3 Schematic diagram of anti-scour wall dimensions

数值模拟采用 ABAQUS（2023 版）。边界条件设置为：底部土体全固定，四周土体施加水平向约束，防冲墙底部仅约束竖向位移，土体顶面自由；水位荷载以静水压力施加于面水侧和背水侧（图 6）。

渗流边界条件设置为：模型底面及四周设为不透水边界；防冲墙迎水侧与背水侧按不同水位施加静水压力（图 6），自由水面以上区域孔隙水压力为零。本研究采用间接耦合方法开展计算：首先通过稳态渗流分析得到孔隙水压力场分布，再由水头梯度计算渗透体积力，并将其作为节点荷载导入应力分析模型，迭代至计算收敛。由于研究聚焦于极端洪水水位下的稳态渗流工况，不考虑孔压随时间的消散过程，因此各工况均采用稳态渗流场结果进行静力分析，以满足最不利工况下的稳定性评估要求。

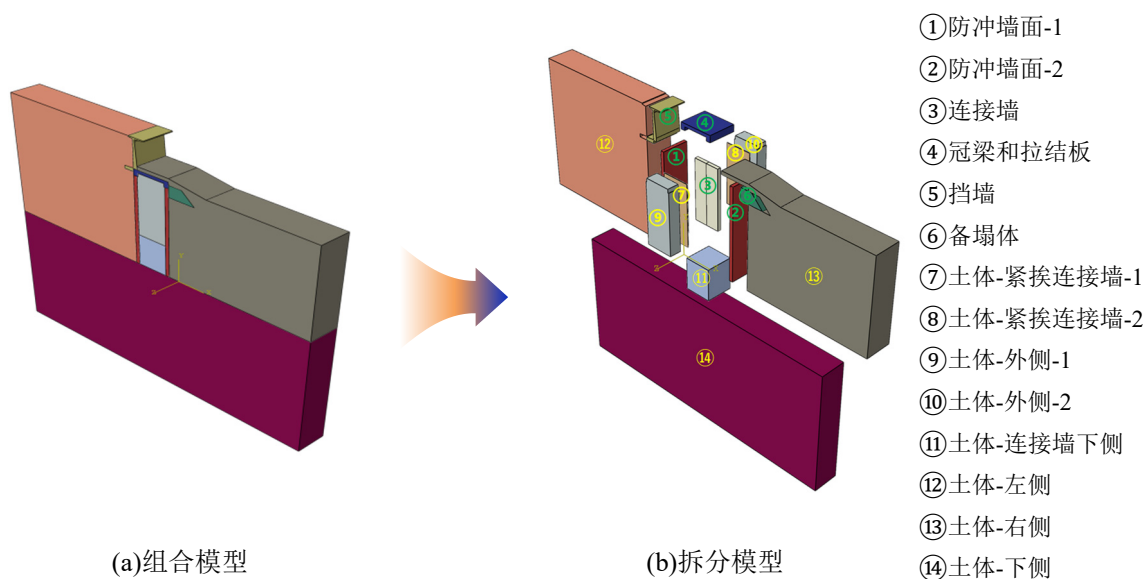


图 4 防冲墙整体模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of the overall model of the anti-scour wall

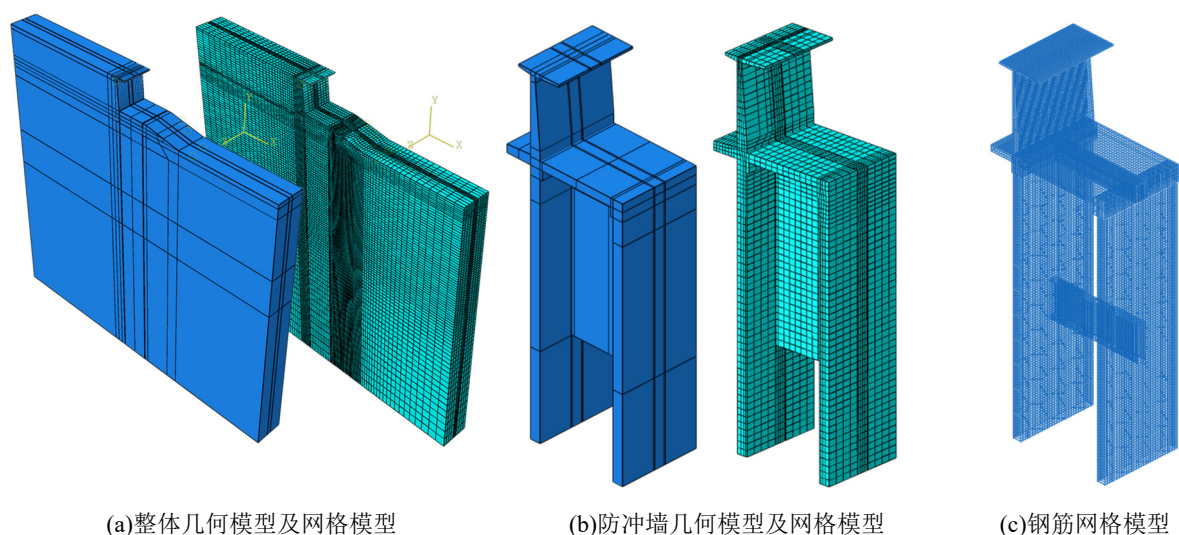


图 5 几何模型与网格模型示意图

Fig.5 Schematic diagram of geometric model and mesh model

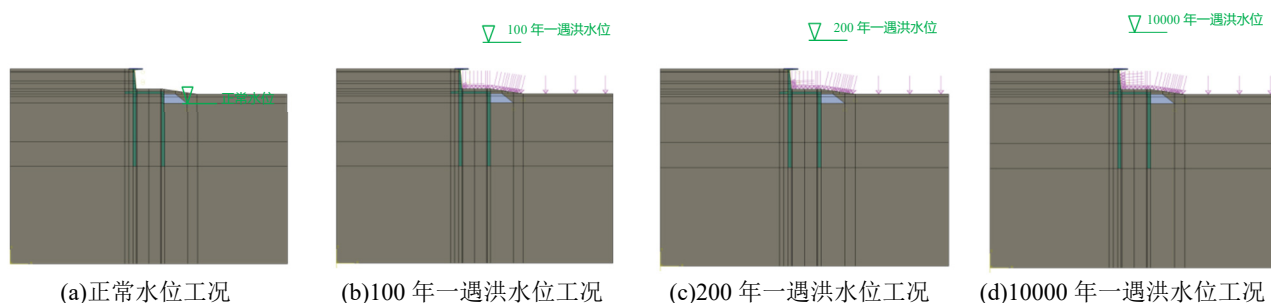


图 6 计算工况图

Fig.6 Computational condition diagram

2.2 计算工况

为系统评估工字型防冲墙在正常及极端洪水条件下的安全性能，共设计四种水位工况，如图 6 所示，涵盖从日常运行至超标准洪水全范围，

各工况设计如下：

工况 1（正常水位）：防冲墙背水侧与面水侧水位齐平，作为基准工况。该设定基于防冲墙施工完成后处于相对稳定的地下水位状态，此时

两侧水头差极小，可忽略不计，因此采用齐平水位模拟正常工况下的静水压力分布。

工况 2（100 年一遇洪水位）：防冲墙面水侧水位显著抬升，防冲墙两侧出现 2.9 m 水头差。

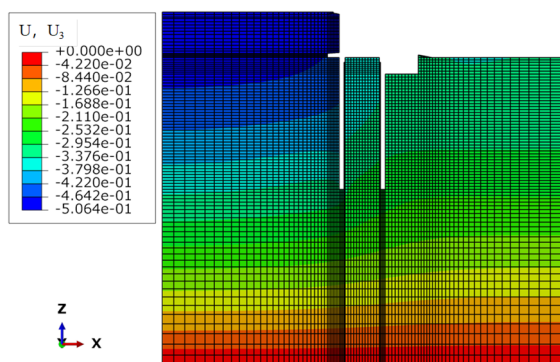
工况 3（200 年一遇洪水位）：水位进一步升高，防冲墙两侧出现 3.5 m 水头差。

工况 4（10000 年一遇洪水位）：作为校核工况，防冲墙两侧出现 5.8 m 水头差。

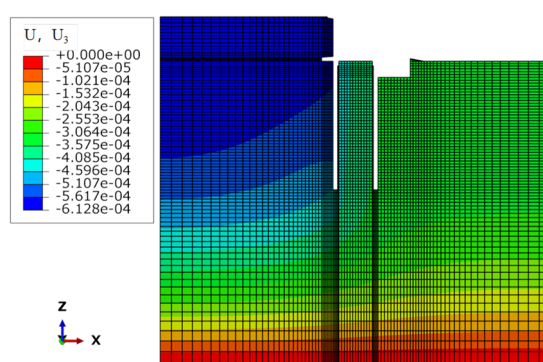
3 结果与讨论

3.1 地应力平衡

地应力平衡是岩土数值分析的关键基础步骤，



(a) 地应力平衡前 U_3



(b) 地应力平衡后 U_3

图 7 地应力平衡前后竖向位移 U_3 图（单位：m）

Fig.7 Vertical displacement U_3 diagrams before and after geostress balancing

3.2 不同工况下的力学性能

本文针对四种水位工况均进行了计算与对比分析。计算结果显示，各工况对应物理量的空间分布规律整体一致，差异主要体现在数值大小及局部高值区范围。因此，后文云图仅选取正常水位和 10000 年一遇洪水位两种代表工况进行展示，100 年一遇和 200 年一遇洪水位工况则结合峰值结果进行对比分析。

图 8 为不同工况下防冲墙结构的竖向位移 U_3 云图。正常水位下，最大竖向位移为 -28.51 mm，源于施工后自重引起的基础沉降；水位升至 100 年一遇洪水位，浮托效应抵消部分自重，竖向最大位移减至 -23.84 mm；水位升至 200 年及 10000 年一遇，水压力与浮托力共同作用使最大竖向位移增至 -24.46 mm 和 -26.97 mm。总体来看，竖向位移随水位升高先减后增。

图 9 给出了不同工况下的孔隙水压力分布规律。正常水位工况下，防冲墙背水侧与面水侧水位齐平，孔压分布较为均匀，最大值为 4.85×10^5 Pa；随着洪水重现期增加，面水侧孔压显著上升，100 年、200 年及 10000 年一遇洪水位工况下的最大孔压依次为 5.19×10^5 Pa、 5.23×10^5 Pa 和 5.38

其精度直接影响后续加载模拟结果的可靠性。图 7 对比了地应力平衡前后模型的竖向位移 U_3 分布云图。平衡前，由于未考虑初始应力场，土体在自重作用下产生最大约 -506 mm 的沉降；平衡后，竖向位移显著减小至 -0.61 mm，降幅达 99.88%。这表明初始地应力场得到了准确恢复，为后续施工过程模拟及渗流-应力耦合分析奠定了可靠的初始条件。

$\times 10^5$ Pa。出现洪水情况下，在同一高程面上，面水侧孔压明显高于背水侧，形成显著的水头差，且随着水位升高，孔压梯度持续增大，表明渗流作用的影响逐步增强。孔压的分布特征直观反映了不同条件下的渗流场变化。

图 10 展示了不同工况下模型孔隙流体有效速度（FLVEL）的分布特征。正常水位工况下，防冲墙两侧无水头差，渗流可忽略不计；100 年一遇洪水位时，水头差形成驱动渗流的动力，最大渗流速度达到 6.24×10^{-8} m/s，渗流主要集中在防冲墙右下侧等渗径较短的区域；随着水位升高至 200 年及 10000 年一遇洪水位，水头差进一步增大，最大渗流速度分别上升至 6.96×10^{-8} m/s 和 9.77×10^{-8} m/s，渗流范围也有所扩大。渗流速度的变化直观反映了水头差与渗流作用的正相关性。

图 11 展示了不同工况下混凝土最大主应力的分布特征，并通过显示设置突出显示了防冲墙结构的受拉区域。各工况下混凝土受拉区主要集中在挡墙根部、墙板与连接墙连接处、拉结板与冠梁连接区域等部位。正常水位、100 年、200 年及 10000 年一遇洪水位工况下，混凝土最大拉应力分别为 1.37 MPa、2.36 MPa、2.44 MPa 和 3.02

MPa, 但高应力区范围极小, 主要由于应力集中所致。本研究采用线弹性本构模型, 所得拉应力为名义应力值, 未考虑材料非线性及开裂后应力重分布。在 10000 年一遇工况下, 名义拉应力 3.02 MPa 已超过混凝土轴心抗拉强度标准值 2.01 MPa (等级为 C30), 挡墙根部及连接墙结合处存在开裂风险。由于高应力区范围极小, 且混凝土具有开裂后应力重分布能力, 局部开裂不会立即导致结构失效。此外, 模型中采用共节点连接, 未设置界面单元, 使得名义拉应力计算值偏大, 因此计算结果主要用于判断应力分布情况及开裂风险区域。

图 12 展示了不同工况下混凝土最小主应力的分布特征。各水位工况下, 受压区分布规律基本一致。正常水位工况下, 混凝土最大压应力为 -2.10 MPa, 位于挡墙与冠梁结合处; 随着洪水位等级提升, 水压力与土压力共同作用使压应力持续增大, 在 100 年、200 年及 10000 年一遇洪水位工况下, 最大压应力依次为 -3.36 MPa、-3.54 MPa、-5.09 MPa, 主要位于挡墙与冠梁结合处、

连接墙下部等结构传力关键部位。尽管压应力数值随水位升高显著增加, 但均远小于混凝土抗压强度。

图 13 展示了钢筋 Mises 应力的分布特征。正常水位工况下, 钢筋最大 Mises 应力为 25.54 MPa, 位于挑板根部; 在 100 年与 200 年一遇洪水位工况下, 最大 Mises 应力随水压力荷载增加而小幅上升, 分别为 27.47 MPa 和 28.17 MPa, 位于挡墙与冠梁结合处; 在 10000 年一遇洪水位工况下, 由于外界荷载综合作用, 最大 Mises 应力略有减小, 为 27.15 MPa。各工况下整体应力水平均远低于钢筋屈服强度, 且高应力区域范围非常有限, 主要为局部应力集中所致。

基于上述计算结果, 可根据混凝土拉应力分布与钢筋应力水平用于指导配筋优化。混凝土最大拉应力 (1.37~3.02 MPa) 仅集中在挡墙根部等局部节点, 其余区域应力较低; 钢筋 Mises 应力均低于 30 MPa, 远小于屈服强度。建议结合应力分布情况可进行配筋优化, 保证安全前提下降低成本。

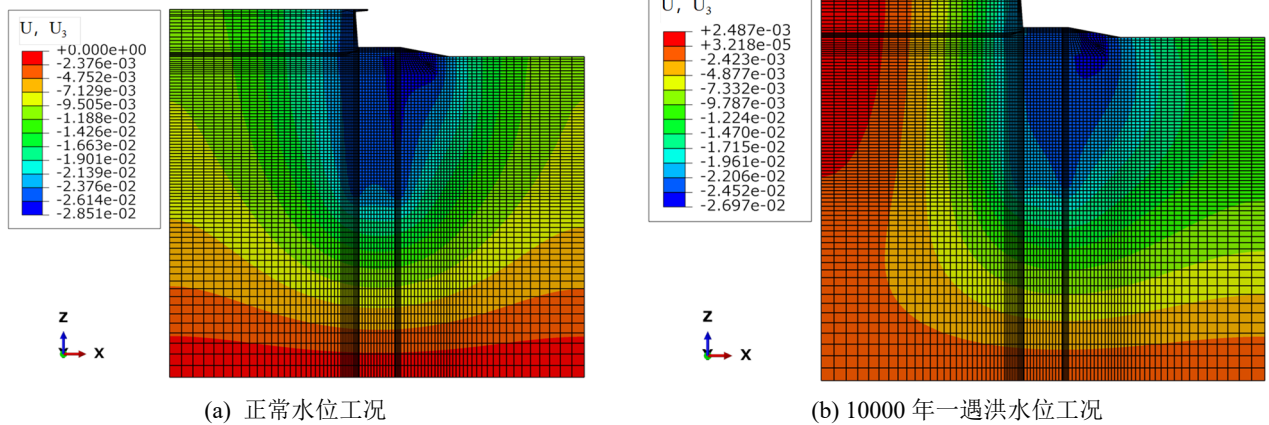


图 8 不同工况下模型竖向位移 U_3 图 (单位: m)

Fig.8 U_3 diagram of model vertical displacement under different working conditions

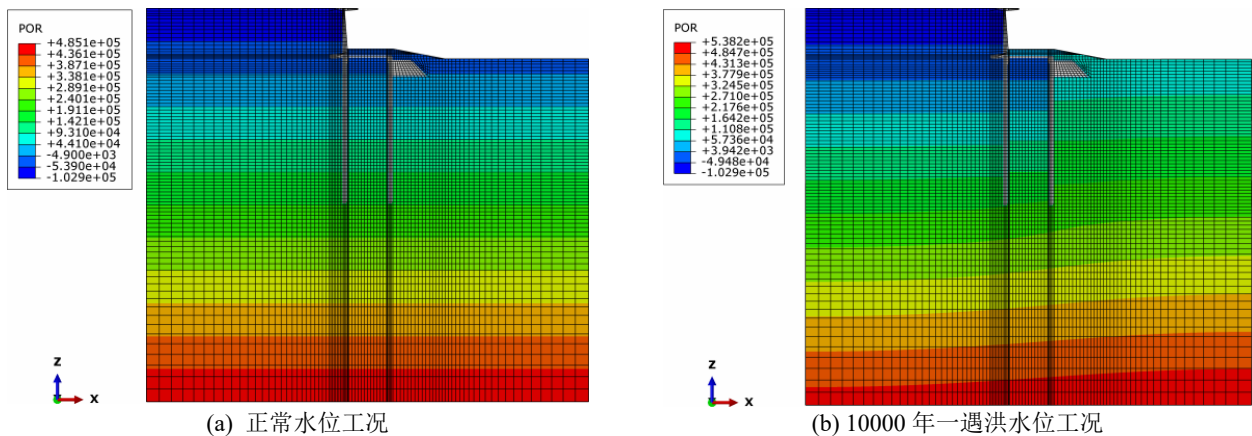


图 9 不同工况下模型孔压图 (单位: Pa)

Fig.9 Pore pressure diagram of the model under different working conditions

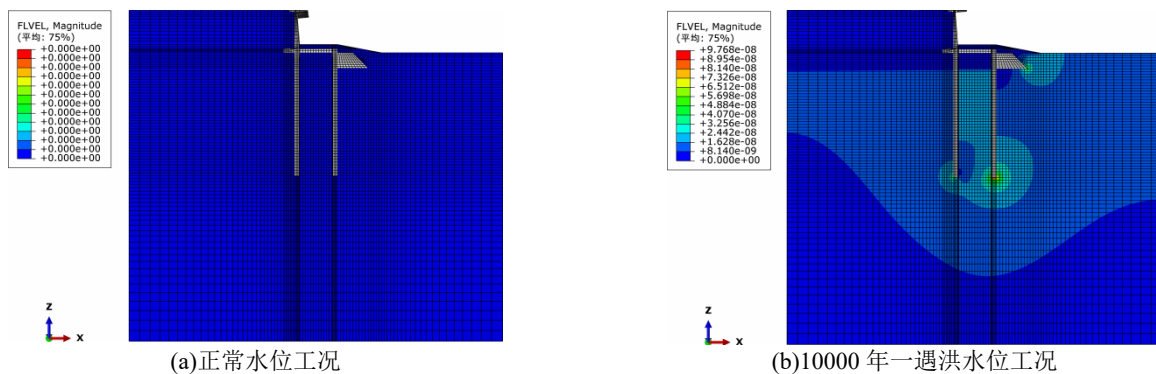


图 10 不同工况下模型 FLVEL 图 (单位: m/s)

Fig.10 Model FLVEL diagram under different operating conditions

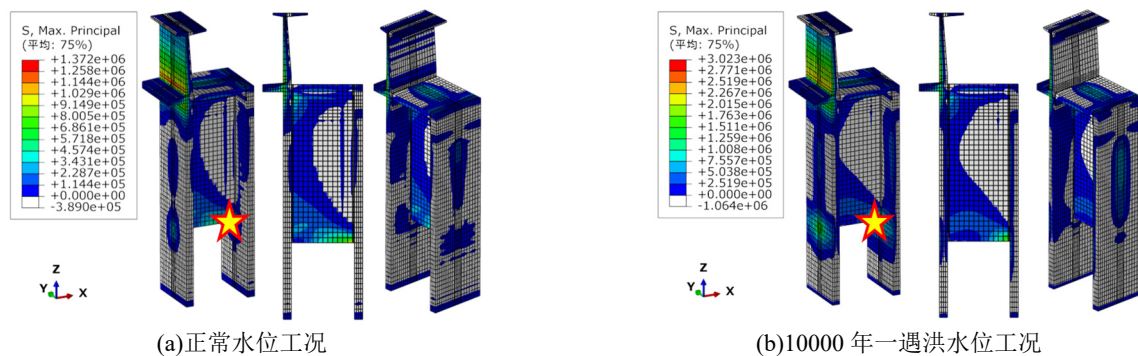


图 11 不同工况下模型混凝土最大主应力分布图 (单位: Pa)

Fig.11 Distribution diagram of maximum principal stress of model concrete under different working conditions

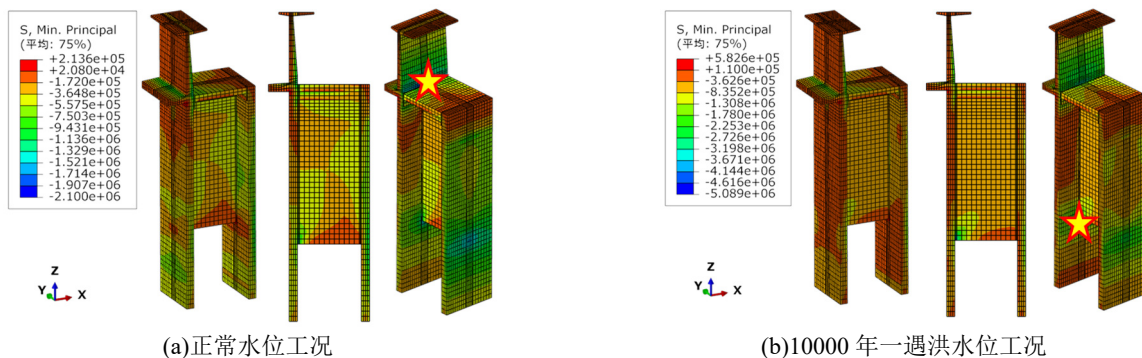


图 12 不同工况下模型混凝土最大压应力图 (单位: Pa)

Fig.12 Maximum compressive stress diagram of model concrete under different working conditions

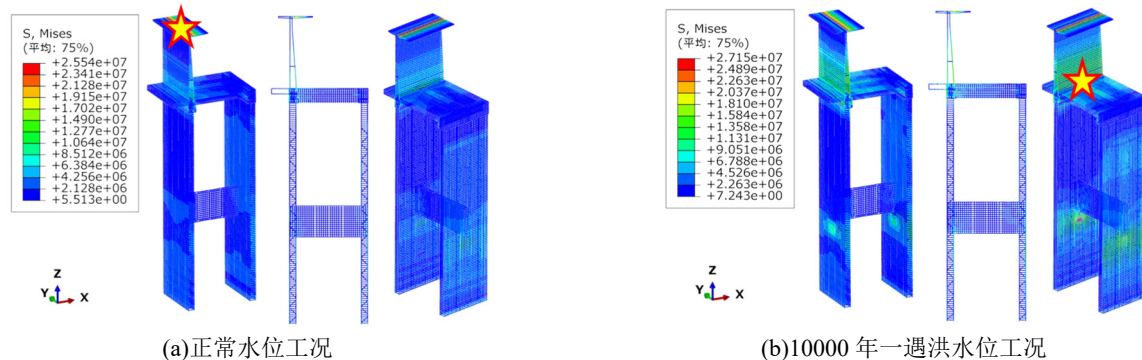


图 13 不同工况下模型钢筋 Mises 应力图 (单位: Pa)

Fig.13 Mises stress diagram of model reinforcement under different working conditions

3.3 安全稳定性分析

基于渗流-应力耦合分析结果,对防冲墙结构进行抗倾覆与抗滑稳定性验算。各工况下的 K_e 和 K_{sl} 计算结果列于表 1,安全系数随水位的变化规律如图 14 所示。由表 1 和图 14 可见,随着水位升高,抗倾覆与抗滑稳定系数均呈逐渐下降趋势,但始终高于规范^[20]限值。其中,随着水位升高, K_e 分别为规范限值的 1.34 倍、1.28 倍、1.27 倍和 1.22 倍, K_{sl} 分别为规范限值的 1.68 倍、1.62 倍、1.60 倍和 1.57 倍,表明结构具有充足的安全储备。综上,新型工字型防冲墙结构在正常至极端洪水条件下均表现出良好的安全性能。

表 1 不同工况下防冲墙结构的稳定系数

Tab.1 Stability coefficient of anti-scour wall structure under different working conditions

工况	K_e	K_{sl}
正常水位	1.67	2.02
100 年一遇洪水位	1.60	1.94
200 年一遇洪水位	1.59	1.92
10000 年一遇洪水位	1.52	1.88
规范 ^[20] 限值	1.25	1.20

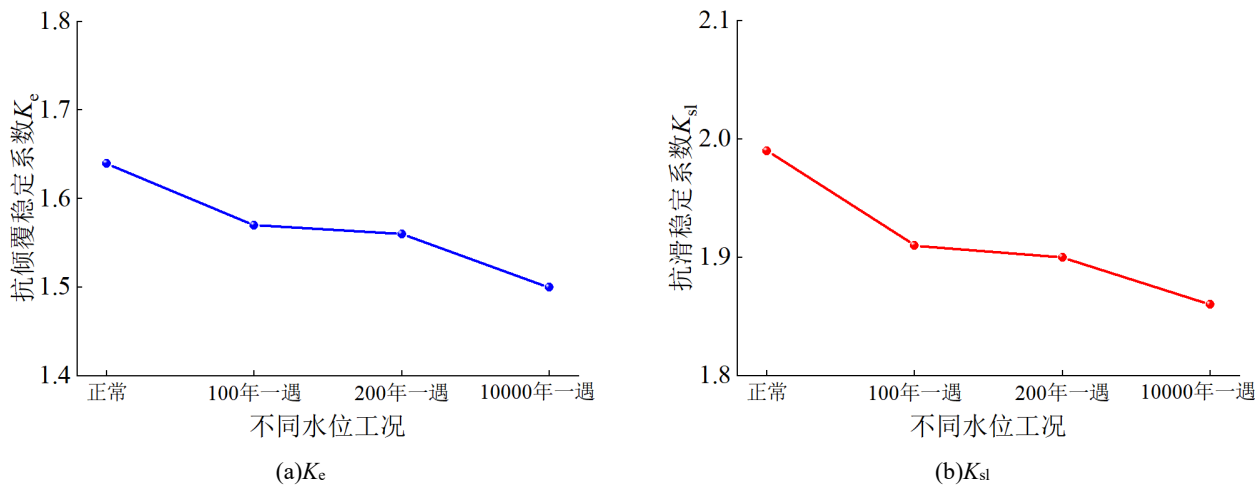


图 14 安全稳定系数随水位变化的规律

Fig.14 The pattern of safety and stability coefficient variation with water level

4 结论与展望

本研究针对新型工字型双排框架式防冲墙结构,建立了高精细化三维有限元模型,开展了正常水位至 10000 年一遇洪水位工况下的渗流-应力耦合分析,系统评估了结构的受力特性与安全稳定性。主要结论如下:

1)随着水位由正常工况升至 10000 年一遇极端洪水位,在水压力、浮托力与自重共同作用下,防冲墙最大竖向位移呈先减小后增大的非单调变化特征;混凝土最大拉应力由 1.37 MPa 增至 3.02 MPa,最大压应力绝对值由 -2.10 MPa 增至 -5.09 MPa,均表现为分布范围极小的局部应力集中,绝大部分区域应力水平较低;钢筋最大 Mises 应力始终低于 30 MPa,远小于屈服强度,整体处于弹性工作状态。

2)渗流场分析表明,随着水头差增大,渗流速度逐渐升高,由正常水位工况下的 0 增至 10000 年一遇洪水位的 $9.77 \times 10^{-8} \text{ m/s}$,渗流路径主要集

中在防冲墙底部及绕流区域。渗流作用引起土体孔隙水压力分布发生显著调整,进而对土体有效应力产生不可忽视的影响,进一步验证了极端条件下开展渗流-应力耦合分析的必要性。

3)抗倾覆与抗滑稳定性验算结果显示,各工况下抗倾覆安全系数 K_e 介于 1.52~1.67 之间,抗滑安全系数 K_{sl} 介于 1.88~2.02 之间,均满足规范限值要求,表明该新型工字型防冲墙在正常至极端洪水条件下具有充足的安全储备。

研究表明,工字型双排框架式防冲墙结构充分发挥了双墙与连接墙协同受力的结构优势,具有良好的整体抗倾覆与抗滑能力。本研究构建的精细化数值仿真模型与分析方法,可为同类地下防冲结构的安全评估提供理论依据与量化参考,对提升河道防洪工程在极端工况下的可靠性具有重要意义。后续研究将进一步考虑材料非线性和接触非线性等因素,分析防冲墙在复杂应力状态下的裂缝扩展规律和安全性;同时,结合渗流-应力耦合分析得到的应力场分布特征,开展防冲墙配筋优化研究。

参 考 文 献

- [1] 陈艳强,汪涛,王礼峰,等.永定河卢三段卵石地层防冲墙导墙结构施工优化研究[J].北京水务,2025(2):46-51.[Chen Yanqiang,Wang Tao,Wang Lifeng,et al.Construction optimization of diaphragm wall guide wall structure in pebble stratum of Lusan section of Yongding River[J].Beijing Water,2025(2):46-51.]
- [2] Kong Heng,Dong Miao,Cao Xitailang,et al.Global analysis approach of stability of deep foundation pit slopes reinforced by underground diaphragm walls and prestressed anchor cables[J].Computers and Geotechnics,2023,163:105744.
- [3] 徐宗学,陈浩,任梅芳.变化环境下我国典型特大城市洪涝灾害成因分析[J].水资源保护,2025,41(5):33-40,51.[Xu Zongxue,Chen Hao,Ren Meifang.Analysis of causes of flood disasters in typical megacities in China under changing environment[J].Water Resources Protection,2025,41(5):33-40,51.]
- [4] 张建云,贺瑞敏,金君良,等.变化环境下中国洪涝灾害新特征及科技需求[J].水科学进展,2026,37(2):197-206.[Zhang Jianyun,He Ruimin,Jin Junliang,et al.New characteristics of flood disasters in China under changing environment and technology demands[J].Advances in Water Science,2026,37(2):197-206.]
- [5] 刘海乐,庞旭东,洪艳生,等.基于T型钢筋笼的横隔梁式工字型防冲墙施工技术要点分析[J].北京水务,2025,(2):51-56.[Liu Haile,Pang Xudong,Hong Yansheng,et al.Analysis of key construction technology points of I-shaped anti-scour wall with diaphragm beam based on T-shaped steel cage[J].Beijing Water,2025,(2):51-56.]
- [6] Miao Richeng,Gu Zihan,Wang Cao,et al.Study on rock-breaking mechanism of impact trenching in underground diaphragm wall with consideration of slurry effects[J].Computers and Geotechnics,2025,179:106998.
- [7] 徐云超,李海涛,孙雨晨.双机抬吊法在防冲墙钢筋笼吊装施工中的应用[J].中国水能及电气化,2025,(11):7-13.[Xu Yunchao,Li Haitao,Sun Yuchen.Application of double-crane lifting method in construction of reinforcement cage of anti-scour wall[J].China Water Power&Electrification,2025,(11):7-13.]
- [8] 邓会元,张翌欣,戴国亮,等.地下连续墙基础竖向承载特性研究[J].建筑结构,2022,52(增刊 1):2396-2400.[Deng Huiyuan,Zhang Yixin,Dai Guoliang,et al. Study on vertical bearing characteristics of diaphragm wall foundation[J].Building Structure,2022,52(S1):2396-2400.]
- [9] 陈旻瑞,雷毅,万灵,等.基于HS模型的地下连续墙水平位移影响因素敏感性分析[J].建筑科学,2025,41(03):103-109,148.[Chen Minrui,Lei Yi,Wan Ling,et al.Sensitivity analysis of influencing factors for horizontal displacement of diaphragm wall based on HS model[J].Building Science,2025,41(03):103-109,148.]
- [10] 喻莹,王忠凯,王翠英.不同工况下地下连续墙内支撑支护结构的土压力[J].安全与环境工程,2024,31(6):57-66.[Yu Ying,Wang Zhongkai,Wang Cuiying.Earth pressure of internal support structure of diaphragm wall under different working conditions[J].Safety and Environmental Engineering,2024,31(6):57-66.]
- [11] 王逸辰.永定河卢三段水毁修复防洪工程措施研究[J].人民黄河,2024,46(增刊 2):31-32.[Wang Yichen.Study on flood control engineering measures for restoration of water-damaged section in Lusan section of Yongding River[J].Yellow River,2024,46(S2):31-32.]
- [12] 陕耀,董雅丞,张旭辉,等.双层地下连续墙土压力的现场实测研究[J].岩土力学,2024,45(增刊 1):507-516.[Shan Yao,Dong Yacheng,Zhang Xuhui,et al.Field measurement study on earth pressure of double-layer diaphragm wall[J].Rock and Soil Mechanics,2024,45(S1):507-516.]
- [13] Ding Jihui,Gan Yu,Zhang Tianyu,Yan Meng,Zhao Qi.Analysis of factors affecting performance of cement-bentonite mud impervious wall[J].IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2019,611(1):012047.
- [14] 文龙龙.防冲墙施工技术与应用[J].大众标准化,2023(8):56-58.[Wen Longlong.Construction technology and application of anti-scour wall[J].Popular Standardization,2023(8):56-58.]
- [15] Zhuang Haiyang,Yang Jing,Chen Su,et al.Seismic performance of underground subway station structure considering connection modes and diaphragm wall[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,127:105842.
- [16] Gao Zhidong,Li Mingbo,Zhao Mi,Du Xiuli.Seismic and vibration control of segmented isolation layer in underground structure-diaphragm wall system[J].Underground Space,2024,19(6):72-86.
- [17] Zhuang Haiyang,Wang Rui,Shi Peixin,et al.Seismic response and damage analysis of underground structures considering the effect of concrete diaphragm wall[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2019,116:278-288.

- [18] 王硕,沈振中,姬阳,等.某深厚覆盖层上引水式电站防渗系统优化研究[J].水资源与水工程学报,2022,33(1):144–151,158.[Wang Shuo,Shen Zhenzhong,Ji Yang,et al.Optimization of anti-seepage system of a diversion hydropower station on deep overburden layer[J].Journal of Water Resources and Water Engineering,2022,33(1):144–151,158.]
- [19] 毕志刚,李旭哲,李子钦,等.渗流—应力耦合下隧道爆破开挖对邻近水坝影响因素分析[J].水电能源科学,2024,42(6):148–152.[Bi Zhigang,Li Xuzhe,Li Ziqin,et al.Analysis of influencing factors of tunnel blasting excavation on adjacent dam under seepage-stress coupling[J].Water Resources and Power,2024,42(6):148–152.]
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑支护技术规程 :JGJ 120 — 2012[S].[Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012[S].

Analysis of the Safety and Stability of I-shaped Double-row Frame-type Anti-scour Wall Structure

Hou Yuehua¹, Zhang Yizhen², Chen Zhipeng¹, Yuan Chenyang², Li Haitao¹, Bai Weifeng², Xie Yunfei²

(1. Beijing Jinhe Water Affairs Construction Group Co., Ltd, Beijing 102206, China; 2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: 【Objective】 For the new type of anti-scour wall featuring an I-shaped cross-section, double-row arrangement at the front and rear, and a spatial frame system formed by the top crown beam and tie plate, the mechanical response and stability variation under different water level conditions are analyzed, providing a reference for the optimal design and safety assessment of similar underground anti-scour structures. **【Methods】** Taking typical sections as the research object, a three-dimensional finite element model is established to restore the initial stress field and construction process through in-situ stress balance and step-by-step construction simulation. Seepage-stress coupling analysis is conducted under normal water level, 100-year flood level, 200-year flood level, and 10,000-year flood level conditions, and anti-overturning and anti-sliding stability calculations are performed according to relevant specifications. **【Results】** (1) The vertical displacement of the structure decreases first and then increases with the rise of water level. Under the condition of a 10,000-year return period, the maximum settlement is 26.97 mm, and the overall deformation is controllable. (2) The maximum tensile and compressive stresses of concrete increase with the rise of water level. The tensile stress increases from 1.37 MPa to 3.02 MPa, and the absolute value of compressive stress increases from 2.10 MPa to 5.09 MPa. However, the high stress area is limited to local nodes, and the stress level in most areas is relatively low. The maximum Mises stress of reinforcement is always below 30 MPa, far below the yield strength, indicating sufficient strength margin. (3) Under various conditions, the anti-overturning safety factor ranges from 1.52 to 1.67, and the anti-sliding safety factor ranges from 1.88 to 2.02, both of which are greater than the specification limits, indicating sufficient stability margin. **【Conclusion】** The new I-shaped double-row frame-type anti-scour wall exhibits good safety and stability under both normal and extreme flood conditions. Its spatial frame characteristics effectively enhance the overall anti-overturning and anti-sliding capabilities. The coupled seepage-stress analysis method can provide a basis for the refined design of underground anti-scour structures in similar river protection projects.

Keywords: seepage-stress coupling; extreme conditions; safety and stability; numerical simulation