山东农业大学学报(自然科学版),2026,57(4):632-639 VOL.57 NO.4 2026
Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition) doi:10.3969/j.issn.1000-2324.2026.04.005

某尾矿坝坝体稳定性分析和锚固支护评估

杨 彦,张 健,吴多华,胡 枫,高 强*
山东农业大学水利土木工程学院,山东 泰安 271018

摘 要: 本研究以山东某尾矿坝作为研究对象,鉴于其高坝体、复杂地质条件以及潜在环境风险,运用瑞典圆弧法理论计算与数值模拟,对坝体在正常运行、洪水运行以及特殊运行工况(洪水与地震同时发生)下的稳定性进行了评估。结合稳定性结果并针对深层滑动问题,提出了分级锚索支护方案,探讨了不同长度和倾角下的锚索对尾矿坝的加固效果。研究结果表明:在未加固情况下,坝体正常运行时的安全系数符合规范要求,洪水运行以及特殊运行时的安全系数均低于规范阈值,存在失稳风险。在加固情况下,锚索长度与倾角对稳定性提升有协同效应,该坝体最优支护参数组合为锚索倾角20°,锚索长度区间为50~105 m(根据滑动面位置进行调整)。在正常、洪水以及特殊工况下,采用此参数组合的加固坝体均能满足规范要求,加固后的坝体变形速率以及剪应变降低,有效抑制了坝体滑动面的扩展。研究验证了锚索支护在尾矿坝加固中的适用性,为类似工程提供了参数优化方面的依据。

关键词: 尾矿坝稳定性;瑞典圆弧法;锚索支护;变形速率
中图法分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2324(2026)04-0632-08

Stability Analysis and Anchored Support Evaluation of a Tailings Dam in Shandong Province

YANG Yan, ZHANG Jian, WU Duo-hua, HU Feng, GAO Qiang*
College of Water Conservancy and Civil Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018,China

Abstract: This study takes a tailings dam in Shandong Province as the research object. Given its high dam structure, complex geological conditions, and potential environmental risks, the stability of the dam is evaluated under normal operation, flood operation, and special operational conditions (simultaneous occurrence of flood and earthquake) by applying the Swedish Circle Method for theoretical calculation and numerical simulation. Based on the stability analysis results and in view of the issue of deep-seated sliding, a staged anchor cable support scheme is proposed to explore the reinforcement effects of anchor cables with different lengths and inclination angles on the tailings dam. The research findings indicate that under unreinforced conditions, the safety factor of the dam under normal operation meets regulatory requirements. However, during flood operation and special operating conditions, the safety factors fall below the regulatory thresholds, posing instability risks. Under reinforced conditions, the length and inclination angle of the anchor cables exhibit a synergistic effect on stability improvement. The optimal support parameter combination for this dam is an anchor cable inclination angle of 20° and a length range of 50–105 m (adjusted according to the position of the sliding surface). Under normal, flood, and special operation conditions, the reinforced dam with this parameter combination satisfies regulatory requirements. The deformation rate and shear strain of the reinforced dam are reduced, effectively suppressing the propagation of the sliding surface. The study verifies the applicability of anchor cable reinforcement in tailings dam stabilization and provides a basis for parameter optimization in similar engineering projects.

Keywords: Tailings dam stability; Swedish circle method; anchor cable support; deformation rate

尾矿坝作为矿山开采过程中尾矿与废渣堆积形成的关键设施,其稳定性直接关系到下游居民生命财产安全及区域生态环境安全。与天然岩土体相比,尾矿砂通常具有高含水率、低渗透性等特殊工程性质,更易在极端工况下发生失稳,历史上多次溃坝事故也充分警示其安全风险[1-3]。因此,开展尾矿坝在不同运行状态下的系统性稳定性评价与支护优化研究,对保障矿山安全生产与实现区域可持续发展具有重要意义[4]。

目前,尾矿坝稳定性研究已形成试验分析、理论模型与数值模拟等多种方法体系。在试验分析方面,刘静媛等[5]通过室内试验揭示了尾砂粒径对强度的影响机制,杨安银等[6]基于动三轴

收稿日期: 2025-07-12 **修回日期:** 2026-06-18
第1作者简介: 杨 彦(2003-),男,本科生,研究方向:岩土工程。E-mail:Y2282245302@163.com
***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:gaoqiang@sdau.edu.cn

试验分析了地震作用下的坝体动力响应；在理论模型方面，Dai等[7]构建了AHP-云模型用于安全评价，张文浩[8]基于极限平衡法研究了不同工况下的坝体稳定性；在数值模拟方面，王亨通[9]、谢孔金等[10]分别借助GEO-SLOPE与FLAC3D研究了渗流－稳定耦合作用下坝体的安全系数，为坝体稳定性分析提供了较全面的方法论支持。

在支护方面，Song[11]、魏作安等[12]从浅层支护方面探讨了护堤与土工格栅的加固效果；言志信[13]、Wang[14]、李晶等[15,16]从深层支护方面研究了锚杆、锚索等锚固结构在地震荷载下的响应及其支护效能。值得注意的是，现有超长预应力锚索支护技术多借鉴常规边坡工程[17-19]，而针对尾矿坝高坝体、深滑动面等复杂条件的专项支护研究仍较为薄弱，特别是超长预应力锚索在尾矿坝中的应用尚未见系统报道，其设计参数与适用性缺乏理论依据与工程验证。

鉴于此，本文聚焦于超长预应力锚索这一适用于高尾矿坝深部滑移控制的支护方式，综合运用极限平衡法（瑞典圆弧法）与数值模拟（强度折减法），系统评价尾矿坝在不同工况下的稳定性，深入分析该支护形式在尾矿坝中的适用性，并揭示关键锚索参数对坝体稳定性的影响规律，以期为相关工程设计提供理论参考与实践依据。

1　工程概况

尾矿坝地处山东省济南市莱芜区张家洼街道御驾泉村村北，位于鲁中泰山东麓，地势东高西低。总坝高115 m，主要由初期坝、尾矿堆积坝及排水系统组成，根据坝高及库容综合判定，其等级为Ⅱ等。该工程需考虑坝体在正常运行、洪水运行及特殊运行（洪水与地震同时发生）工况下的稳定性。

该尾矿坝土层较为复杂，各土层参数见表1。

表1 岩土体物理力学参数取值

Table 1 Values of physical and mechanical parameters of rock and soil mass

岩层 Stratum	容重/(kN/m³) Bulk density	内聚力/kPa Cohesion	内摩擦角/° Internal friction angle	变形参数/MPa Deformation parameters	泊松比 Poisson's ratio	渗透系数/(10^{-4} cm/s) Permeability coefficient	土层厚度/m Soil thickness
	γ	c	φ	E	μ	K	h
尾粉细砂 Tailings silty fine sand	20.1	3.8	21.1	68.6	0.28	2.06×10^{-4}	11.13
尾粉土 Tailings silt	20.2	3.9	16.6	53.8	0.29	1.25×10^{-4}	40.12
尾黏土 Tailings clay	18.7	16.1	9.3	139.4	0.36	2.3×10^{-7}	15.46
子坝 Dam raise	20.7	0	38	6×10^{3}	0.36	600	19.60
初期坝 Starter dam	20.7	0	38	6×10^{3}	0.36	600	32.01
混合花岗岩 Migmatitic granite	26	0	45	6×10^{4}	0.17	—	28.22

注：因混合花岗岩为完整岩体，渗透系数极小可忽略。

Note: Since migmatitic granite forms a massive rock body, its permeability coefficient is extremely small and negligible.

经抗震设防专项论证，本工程所在区域抗震设防烈度确定为Ⅶ度（0.10 g），场地特征周期取值为0.40 s。坝基抗震设计采用基于场地类别的反应谱分析方法，其设计反应谱特征周期参数符合《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010，2016年版）[20]的相关规定。

2　尾矿坝稳定性分析方法

2.1　瑞典圆弧法

在尾矿坝稳定性分析领域，极限平衡法作为经典的理论体系，其核心原理是通过建立滑体力学平衡方程求解边坡安全系数。基于该理论体

系发展形成的瑞典圆弧法和简化Bishop法均为典型代表方法。本研究采用理正岩土边坡稳定性分析软件内置的瑞典圆弧法计算模块进行系统分析，具体计算公式如下[21]：

$$K=\frac{\sum\left[W_i\cos\alpha_i-F_i\sin\alpha_i+Pw_i\sin\left(\alpha_i-\theta_i\right)\right]\tan\varphi_i+\sum c_i l_i}{\sum\left[W_i\sin\alpha_i+F_i\cos\alpha_i+Pw_i\cos\left(\alpha_i-\theta_i\right)\right]} \tag{1}$$

式中：

K——整个滑体剩余下滑力计算的稳定系数；

l_i——单个土条的滑动面长度(m)；

W_i——条块重力(kN)，浸润线以上取重度，以下取饱和重度；

Pw_i——条块所受的水压力(kN)；

F_i——条块所受的地震力(kN)；

α——条块的重力线与通过此条块底面中点半径之间的夹角(°)；

θ_i——条块的水位线与水平线的夹角(°)；

c_i——土的粘聚力(kPa)；

φ_i——土的内摩擦角(°)。

2.2 数值模拟

坝体正常运行及洪水运行稳定性分析采用强度折减法，通过引入折减系数等比例同步降低岩土体的黏聚力c与内摩擦角φ，逐级降低材料抗剪强度并迭代计算，直至数值模型达到临界失稳状态，从而确定坝体安全系数。折减后的参数表达式如下所示[21]：

$$\varphi_r=\arctan\left(\tan\varphi/f_s\right) \tag{2}$$

$$c_r=c/f_s \tag{3}$$

式中：

φ_r——折减后的摩擦角(°)；

c_r——折减后的黏聚力(kPa)。

特殊运行计算采用数值模拟软件的动力分析模块进行，边界类型采用自由场边界，阻尼类型采用局部阻尼。地震加速度时程曲线如图1所示，地震波采用校正后的El Centro波，依据区域抗震设防烈度，校正后地震波峰值加速度为0.109 g，持续时间为6.9 s。

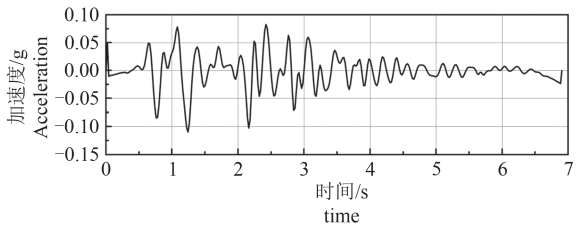


图1 校正后地震波时程曲线

Fig. 1 The corrected seismic wave time history curve

3 支护前坝体稳定性分析

3.1 瑞典圆弧法分析结果

基于瑞典圆弧法计算原理，支护前尾矿坝坝体各运行工况下滑动面信息及安全系数计算结果如图2所示。安全系数分析结果见表2。

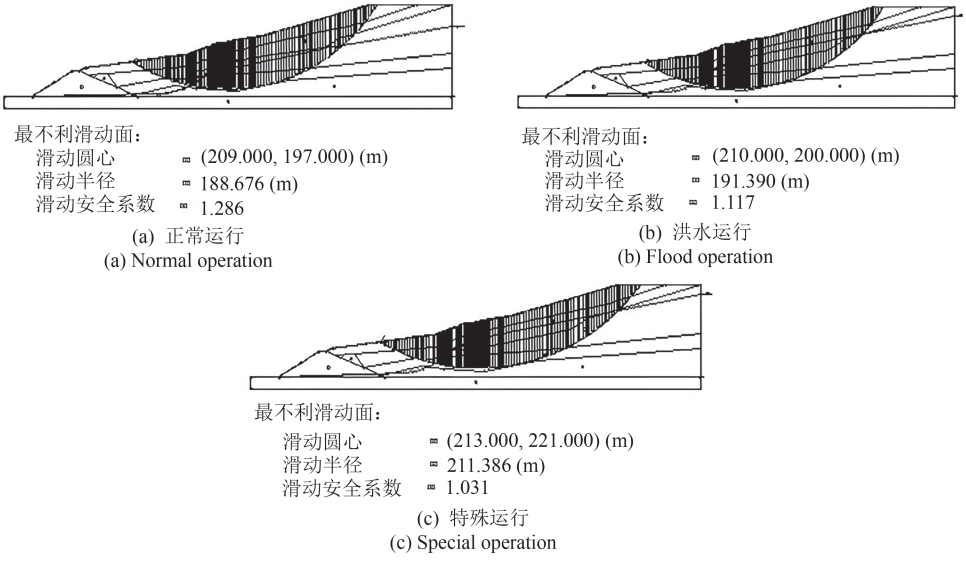


图2 支护前尾矿坝瑞典圆弧法计算结果

Fig. 2 Calculation results of Swedish arc method for tailings dam before support

表 2 支护前瑞典圆弧法得到的安全系数

Table 2 Safety factors obtained by Swedish circle method before support

工况 Working condition	安全系数 Safety factor	规范要求 Specification requirements	稳定性评价 Stability evaluation
正常运行 Normal operation	1.286	≥1.25	满足要求
洪水运行 Flood operation	1.117	≥1.15	不满足要求
特殊运行 Special operation	1.031	≥1.05	不满足要求

表 2 的验算结果表明，在正常运行、洪水运行和特殊运行三种工况下，现状尾矿坝坝体斜坡的稳定系数分别为 1.286、1.117 和 1.031，正常运行满足《尾矿设施设计规范》(GB50863-2013)[22] 不小于 1.25 的要求，而洪水运行和特殊运行工况下不满足规程不小于 1.15 和 1.05 的要求。

3.2　数值模拟分析结果

采用数值模拟对尾矿坝剖面在三种运行状态下的稳定性进行模拟计算，建立坝体剖面模型如图 3 所示。

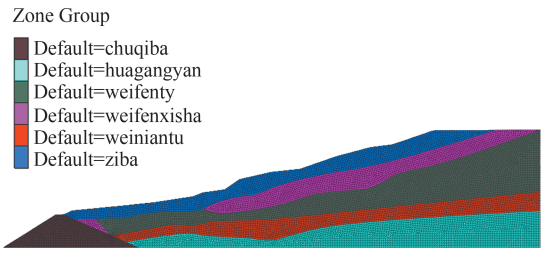


图 3 尾矿坝二维数值模型

Fig. 3 Two-dimensional numerical model of tailings dam

在数值模拟过程中，本构模型选取 Mohr-Coulomb 模型。考虑到尾矿坝属于后期堆积而成的工程结构，其稳定性受周边山体初始应力场的影响相对较小。因此，在构建计算模型时，左右边界以尾矿坝的上下限为界定范围。其中，左右边界在 x 方向上进行固定约束，下部边界则在 x、y 两个方向上同时进行固定约束。

尾矿坝支护前边坡数值模拟结果见图 4，稳定性评价见表 3。其中正常运行及洪水运行云图为坝体经强度折减法计算后得到的速度云图，在这个过程中，速度云图反映的是在强度参数不断折减情况下边坡的相对速度变化情况，主要用于判断边坡的破坏模式和潜在滑动面等，与坝体在实际工程中的真实速度有较大差异。特殊运行云图为在洪水运行基础上，运行持续自然地震波后的速度云图。

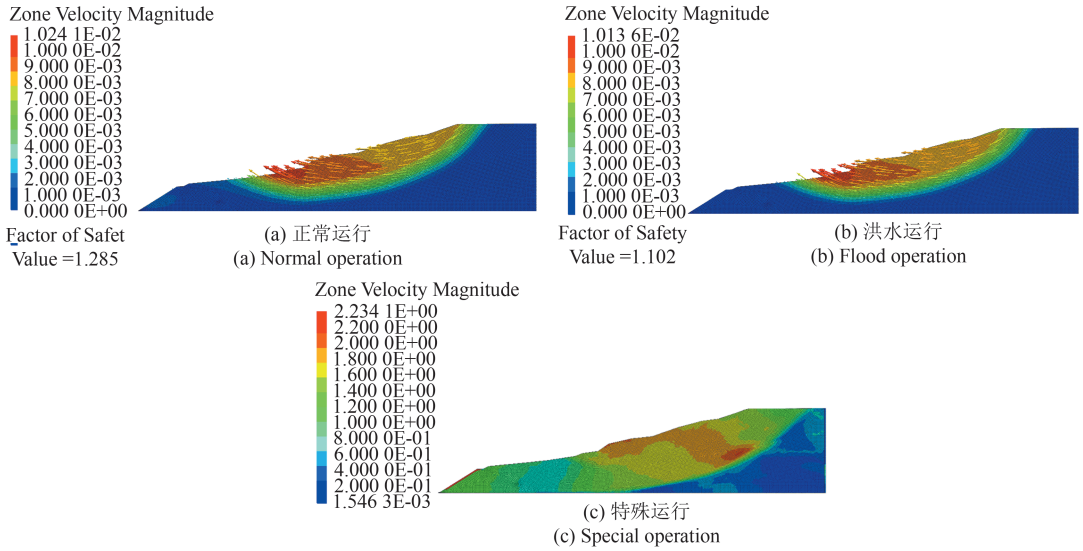


图 4 支护前尾矿坝数值模拟结果

Fig. 4 Numerical simulation results of tailings dam before support

从计算结果看，尾矿坝底部和坝体内部速度较小，相对稳定。坝体上部尤其是坡附近区域速度较大，是变形相对活跃的部分，且呈现圆弧滑动的破坏形式，中下部埋深较大，上部埋深较小。

在正常运行、洪水运行工况下，现状尾矿坝坝体斜坡的稳定系数分别为 1.285 和 1.102，正常

表3 支护前数值模拟得到的安全系数
Table 3 Safety factors obtained by numerical simulation before support

工况 Working condition	安全系数 Safety factor	规范要求 Specification requirements	稳定性评价 Stability evaluation
正常运行 Normal operation	1.285	≥1.25	满足要求
洪水运行 Flood operation	1.102	≥1.15	不满足要求
特殊运行 Special operation	—	≥1.05	—

运行满足规范要求，而洪水运行工况下不满足规范要求，这与瑞典圆弧法得到的结果大致相同。

通过瑞典圆弧法及数值模拟结果可知，坝体在正常运行时，稳定系数符合规范要求，而在洪水运行及特殊运行时，不符合规范要求，故需进行支护加固。

4 尾矿坝坝体支护稳定性分析

根据现场工程地质勘察资料，经多方案比选，确定采用锚索支护方案[23]。锚索支护技术通过柔性锚固体系的变形协调，能有效抵抗地震、暴雨等极端工况下的动荷载作用，提升边坡长期稳定性。因尾矿坝在特殊运行工况下稳定性最差，现根据规范，设计尾矿坝支护试验方案，选取抗拉力为800 kN的锚索，研究不同锚索长度及锚索倾角在坝体特殊运行工况下对坝体稳定性的影响，对比获得最优的支护方案。

4.1 锚索长度和锚索倾角对安全系数的影响

锚索长度(L)应保证其能提供足够的锚固力，确保被锚固结构的稳定性。为了确保锚索的锚固效果，锚索长度应超过潜在滑动面埋置深度。

锚索倾角(α)是指锚索轴线与水平面的夹角。它直接影响锚索的受力分布和对边坡的锚固效果。根据《建筑边坡工程技术规范》(GB 50330-2013)[24]的相关规定，锚杆的安装倾角应控制在10°至35°的合理区间范围内，并应避免对相邻建筑物产生不利影响。

不同锚索参数对应的安全系数见表4。

将表4中不同锚索参数对应的边坡安全系数列于图5。

表4 不同锚索参数对应的安全系数
Table 4 Safety factors corresponding to various anchor cable parameters

锚索参数 Anchoring cable parameters		锚索倾角/° Slope of anchoring cables				
		15	20	25	30	35
锚索长度/m Length of cables	65	1.133	1.133	1.135	1.133	1.136
	75	1.141	1.141	1.147	1.148	1.159
	85	1.149	1.149	1.161	1.175	1.177
	95	1.155	1.162	1.181	1.183	1.177
	105	1.161	1.198	1.195	1.183	1.177

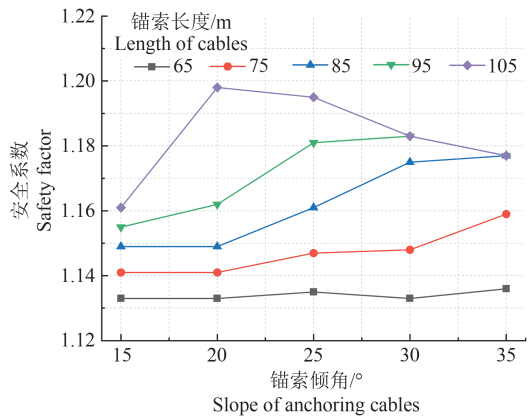


图5 不同锚索参数对应的安全系数
Fig. 5 Safety factors corresponding to various anchoring cable parameters

锚索长度较短时，随着锚索倾角的增大，坝体的安全系数随之增大。当锚索长度较长时，随着锚索倾角的增大，结构安全系数呈现典型的单峰曲线变化规律，即先单调递增后单调递减。锚索长度的增加会使得该峰值对应的安全系数值逐渐增大。锚索长度的增加也会使单峰曲线的峰值位置发生左移。

在同一锚索倾角条件下，锚索穿过滑动面一定长度前，坝体的安全系数随锚索长度增长而增大。当锚索穿过滑动面一定长度后，锚索长度增长对坝体稳定性无显著影响。

根据数值模拟得到的滑动面几何特征及力学响应分析结果，并以现行工程规范规定的安全系数为设计准则，经综合论证后最终确定的锚索基本支护参数如下：锚索设计长度为105 m，倾角设置为20°。此外，基于坝体滑面空间分布特征的数值模拟结果表明，该滑面中下部埋深较大，而上部埋深相对较小。

为了减少施工费用,增加工程效益,仅需要将锚索穿越斜坡滑动面,并将其锚固段嵌入下部稳定区域,而不需要设置太长的锚索。

因此,综合考虑数值试验结果与工程经济效益,最终确定的边坡支护方案如图6所示。

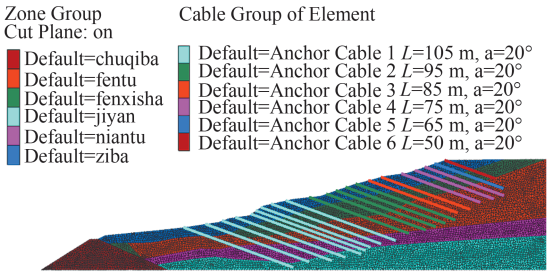


图6 锚索支护方案

Fig 6 Anchoring cable support scheme

本支护方案采用超长锚索,其轴向力沿长度方向呈非线性衰减,锚固段前端应力集中显著,中后段应力则逐步降低并趋于稳定。在持续荷载作用下,受岩土体蠕变及注浆体收缩影响,锚索预应力可能产生损失,需通过超张拉工艺进行应力补偿。

钻孔施工过程中,采用“开孔定型限位+螺旋钻杆+扶正钻杆”综合防斜工艺,以确保钻孔精度。在穿越破碎带及富水砂层时,采用双套管护壁技术,配合循环泥浆排渣,有效防止塌孔与涌砂。注浆工艺分为两次进行:第一次注浆采用水泥砂浆,注浆至浆液从孔中溢出为止;第二次注浆选用水灰比为0.45的纯水泥浆,实施25 MPa高压注浆,使水泥浆能够冲破初凝砂浆渗入至砂浆与松散层界面,待注浆压力达到设计要求且浆液溢出孔口时终止。张拉过程中应确保锚垫板与孔道轴线垂直,安装误差不超过2°。张拉采取分级加载方式,达到1.1倍设计荷载后稳压10 min,再进行锁定。

4.2　尾矿坝支护方案验证

利用理正岩土瑞典圆弧法(如图7所示)对加固后的尾矿坝进行稳定性分析。支护后坝体运行工况计算结果如下图。

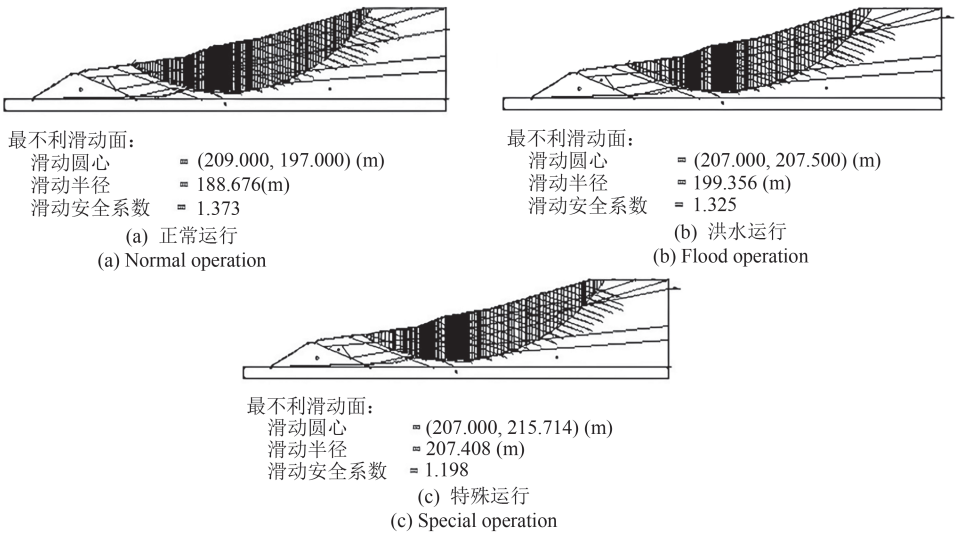


图7 支护后尾矿坝瑞典圆弧法计算结果

Fig. 7 Swedish arc method calculation results of tailings dam after support

对比表4中锚索倾角20°,锚索长度105 m计算结果可以发现,采用此支护方案得到的安全系数与在20°锚索倾角时锚索长度全部取105 m的安全系数相同。再次说明,在同一锚索倾角条件下,当锚索长度穿过滑动面一定长度后,其继续增加对安全系数无明显影响。

表5为坝体加固后瑞典圆弧法计算的安全系数。

数值模拟获得支护后尾矿坝各运行工况速度云图如图8所示,安全系数结果见表6。

通过正常和洪水运行速度云图可以看出,其滑动破坏形式仍为圆弧滑动,但由于锚索的支护作用,坝体滑动面的滑移速度较支护前有了明显的减小。由特殊运行加固前后速度云图可知,支护后,坝体的滑动面发生改变。锚索对坝体上部滑动面下移起到了阻止作用,一定程度上改变了

表5 支护后瑞典圆弧法得到的安全系数

Table 5 Safety factors obtained by the Swedish circle method after support

工况 Working condition	安全系数 Safety factor	规范要求 Specification requirements	稳定性评价 Stability evaluation
正常运行 Normal operation	1.373	≥1.25	满足要求
洪水运行 Flood operation	1.325	≥1.15	满足要求
特殊运行 Special operation	1.198	≥1.05	满足要求

表6 支护后数值模拟得到的安全系数

Table 6 Safety factors obtained by numerical simulation after supporting

工况 Working condition	安全系数 Safety factor	规范要求 Specification requirements	稳定性评价 Stability evaluation
正常运行 Normal operation	1.390	≥1.25	满足要求
洪水运行 Flood operation	1.320	≥1.15	满足要求
特殊运行 Special operation	—	≥1.05	—

滑动形式。

从以上瑞典圆弧法计算与数值模拟分析结果可以看出，在使用该支护方案对坝体加固后，尾矿坝安全系数有了明显提升，且各运行状态均已满足规范要求。

5 结论

本研究通过数值模拟与理论分析，对山东省某尾矿坝的稳定性及锚固支护效果进行系统研究，主要结论如下：

（1）此尾矿坝支护前采用瑞典圆弧法计算出的坝体正常运行、洪水运行及特殊运行工况下的安全系数分别为1.286、1.117和1.031。采用数值模拟得到的正常运行和洪水运行下的安全系数分别为1.285和1.102。故该坝体在正常运行工况下安全系数满足规范要求，而在洪水运行及特殊运行工况下的安全系数不满足规范要求，需进行加固处理。

（2）当锚索长度为105 m，锚索倾角为20°时，锚索穿过滑动面后，在同一锚索倾角条件下，

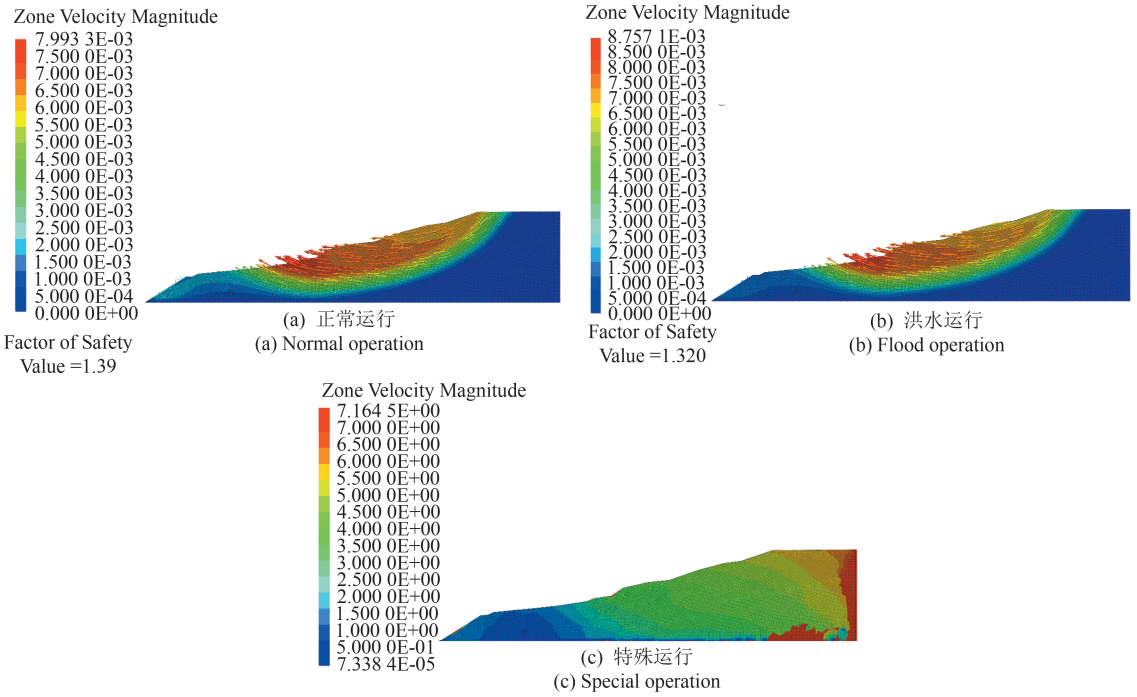


图8 支护后尾矿坝数值模拟结果

Fig. 8 Numerical simulation results of tailings dam after support

坝体稳定性随锚索长度增长无明显变化。在同一锚索长度条件下,坝体稳定性随锚索倾角增大而减小。提出的最优支护方案为锚索倾角20°,长度根据滑动面位置分段设计。

(3)瑞典圆弧法与数值模拟分析结果表明,在正常运行及洪水运行工况下,采用锚索支护方案后的尾矿坝体安全系数均符合相关规范要求。

参考文献

[1] Freitas M R, Pires R A, Ferreira F F, et al. Metal concentrations, oxidative status and histopathological evaluation of fish species from Doce River, Brazil, after the Fundao dam collapse[J]. Aquatic Toxicology, 2025,279:107204

[2] Adria D A M, Ghahramani N, Rana N M, et al. Insights from the compilation and critical assessment of breach and runout characteristics from historical tailings dam failures: Implications for numerical modelling[J]. Mine Water and the Environment,2023, 42(4):650-669.

[3] 郑 欣,安华明,张 放,等.尾矿坝溃坝生命损失风险控制[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(04):566-570.

[4] 吴宗之,梅国栋.尾矿库事故统计分析及溃坝成因研究[J].中国安全科学学报,2014,24(09):70-76.

[5] 刘静媛,柴修伟.饱和细粒尾矿砂的物理力学性质[J].武汉工程大学学报,2022,44(04):462-467.

[6] 杨安银,王光进,杨春和,等.坝体动力抗震及尾矿动力特性分析[J].中国安全生产科学技术,2019,15(04):122-127.

[7] Dai X, Wu X, Hong Y, et al. Safety and stability evaluation of the uranium tailings impoundment dam: Based on the improved AHP-cloud model[J]. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 2022,15(1):21-31.

[8] 张文浩,褚衍玉,任高峰,等.不同扰动作用下尾矿坝稳定性分析[J].武汉理工大学学报,2019,41(01):63-69.

[9] 王亨通,孙世国,王瑞龙.某尾矿库的安全稳定性分析[J].矿业研究与开发,2025,45(03):177-184.

[10] 谢孔金,王 霞,谢一鸣.基于数值模拟的尾矿坝坝体边坡稳定性分析[C].贵州省岩石力学与工程学会,中国建筑学会工程勘察分会,中国水利学会勘测专业委员会,中国岩石力学与工程学会滑坡与工程边坡分会,北京华森启达企业管理咨询有限公司.第十二届全国边坡工程技术大会论文集.山东正元地质资源勘查有限责任公司;山东正元建设工程有限责任公司;山东建筑大学土木工程学院,2020:4-9.

[11] Song C, Yu G, Wang P. Influence of berm number on safety factor of tailings dam[J]. Advanced Materials Research,2011,374(37):2488-2492.

[12] 魏作安,徐佳俊,陈宇龙,等.端部卷轴式土工格栅加固尾矿堆积坝[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(06):880-884.

[13] 言志信,刘春波,龙 哲,等.含软弱层顺倾岩体边坡锚固地震响应试验研究[J].岩土工程学报,2020,42(12):2180-2188.

[14] Wang Y , Zheng T , Sun R , et al. Influence of the anchor angle on the seismic response of anchored stabilizing piles: Centrifuge modeling tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 180: 108575.

[15] 李 晶,梁力川,邵雪停,等.考虑降雨和地震作用下的铁路边坡稳定性分析[J].山东农业大学学报(自然科学版),2023,54(06):887-896.

[16] 何 伟,韦 宏,罗文峰.某回填高度15m的边坡支护方案比选[J].建筑结构,2024,54(15):122-127.

[17] 黄 辉.大吨位、超长预应力锚索施工难点控制[J].云南水力发电,2018,34(02):137-139.

[18] 李 季,刘洪涛,王志刚,等.薄基岩大断面切眼超长锚杆锚索联合支护技术研究[J].煤炭工程,2013,45(07):36-38+41.

[19] 王 伟,赵文军,毕晓鹏.超长预应力锚索跟管钻进施工技术[J].山西建筑,2016,42(03):84-85.

[20] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50011-2010建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2016:191.

[21] 王启耀,何仕朝,谢孔金.御驾泉尾矿坝稳定性计算与分析[J].金属矿山,2012(01):55-57.

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50863-2013尾矿设施设计规范[S].北京:中国计划出版社,2013:14-16.

[23] 马 锋,黄 鹤,马璐珂,等.多震地区公路边坡支护方案及稳定性研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(02):322-327.

[24] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB 50330-2013建筑边坡工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013:46.