

双排钢板桩围堰稳定性参数敏感性与安全储备研究

潘子洋

(安徽建工建设投资集团有限公司, 安徽 合肥 230000)

摘要: 以平天湖隧道明挖段双排钢板桩围堰为工程背景, 针对传统确定性设计难以反映土体参数与水位条件不确定性对稳定性影响的问题, 开展围堰稳定性参数敏感性与安全储备研究。基于现行规范的抗倾覆与抗隆起验算模型, 采用单因素扰动的参数敏感性分析方法, 引入无量纲敏感性系数与安全储备系数, 系统评估内摩擦角、黏聚力、土体重度、入岩深度及水位差变化对稳定性安全系数的影响规律, 并对安全裕度进行定量统计。结果表明: 围堰稳定性对内摩擦角与黏聚力最为敏感, 入岩深度与水位差次之, 土体重度影响相对较小; 在合理参数扰动范围内, 整体满足规范要求但局部工况存在一定保守空间。研究成果可为类似复杂水文地质条件下围堰设计取值与风险控制提供参考。

关键词: 双排钢板桩围堰; 参数敏感性; 安全储备; 稳定性分析; 湖底隧道

中图分类号: U445; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0044-06

Analysis on Parameter Sensitivity and Safety Reserve of Double-row Sheet Pile Cofferdam Stability

PAN Ziyang

(Anhui Construction Engineering and Investment Group Co., Ltd., Hefei 230000, China)

Abstract: Taking the double-row steel sheet pile cofferdam in the excavated section of the Pingtian Lake Tunnel as the engineering background, and aiming at the problem that the traditional deterministic design fails to reflect the influence of the uncertainty of soil parameters and water level conditions on the stability, a study on the parameter sensitivity and safety reserve of cofferdam stability is carried out. Based on the anti-overturning and anti-uplift checking models specified in the current codes, the single-factor disturbance parameter sensitivity analysis method is adopted, and the dimensionless sensitivity coefficient and safety reserve coefficient are introduced to systematically evaluate the influence laws of changes in internal friction angle, cohesion, soil density, rock penetration depth and water level difference on the stability safety factor. And the quantitative statistics is conducted on the safety margin. The results show that the cofferdam stability is the most sensitive to the internal friction angle and cohesion, followed by the rock penetration depth and water level difference, and the soil density has a relatively minor influence. Within the reasonable range of parameter disturbance, the overall requirements of the codes are satisfied, yet there is a certain conservative space under local working conditions. The research results can provide a reference for the design value selection and risk control of cofferdams under similar complex hydrogeological conditions.

Keywords: double-row steel sheet pile cofferdam; parameter sensitivity; safety reserve; stability analysis; lakebed tunnel

0 引言

随着城市化进程的不断推进, 城市交通系统逐渐向水域空间延伸, 湖泊、水库等区域内的隧道工程数量显著增加。在浅埋条件下, 明挖法因其施工组织相对灵活、结构形式清晰以及质量可控性较好等优点, 仍被广泛应用于湖域隧道工程中。然而, 明挖法施工必须依托可靠的临时挡水结构, 以保证基坑

施工期间形成稳定的干地作业环境, 其中围堰结构的安全性和稳定性直接关系到工程成败。

双排钢板桩围堰(见图1)通过两排钢板桩、围檩、拉杆以及堰心填筑体的共同作用形成整体受力体系, 兼具板桩围堰与重力式围堰的结构特征, 在深水、高水位及软弱地层条件下表现出较好的适应性。近年来, 该类围堰在跨江、跨湖及沿海工程中得到一定程度的应用, 其结构受力特性及施工工艺也逐渐受到关注。

现有研究多集中于围堰结构型式选择、施工关键技术以及稳定性验算方法等方面, 通常采用确定

收稿日期: 2026-01-17

作者简介: 潘子洋(1997—), 男, 本科, 工程师, 从事市政施工工作。

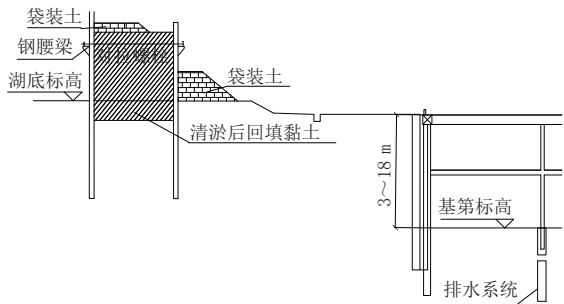


图1 标准断面图

性参数进行抗倾覆、抗隆起等稳定性分析,以判断是否满足规范要求。这类研究在工程实践中具有重要指导意义,但其前提假设往往是土体参数、水位条件等输入量为确定值,而忽略了实际工程中参数不可避免的离散性与不确定性。

从工程实际情况看,围堰稳定性计算所涉及的土体物理力学参数受勘察取样、试验方法及空间变异性的影响,往往存在一定偏差;施工过程中水位变化、开挖卸荷及扰动效应也可能进一步放大参数不确定性。在此背景下,仅依赖单一确定性计算结果评价围堰安全性,难以全面反映结构的安全裕度及潜在风险。因此,有必要在传统稳定性验算的基础上,引入参数敏感性与安全储备分析方法,对围堰结构的安全性进行更为全面的认识。

基于上述认识,本文以大型湖底隧道工程中采用的双排钢板桩围堰为研究对象,在满足现行规范要求的前提下,引入参数敏感性分析方法,系统研究关键参数扰动对围堰抗倾覆与抗隆起稳定性的影响规律,并进一步对结构安全储备水平进行定量评价,以期类似工程的设计取值与风险控制提供参考。

1 工程概况与计算模型

1.1 工程简介

研究依托平天湖隧道工程,项目为大型湖底隧道明挖施工段,本标段湖域施工长度约 900 m,常水位条件下水深约 4.0 ~ 4.5 m。隧道采用明挖法施工,基坑最大开挖深度约 18 m。为形成干地施工条件,沿隧道轴线在湖中修筑临时围堰。

1.2 工程地质与水文地质条件

工程区位于典型湖域环境,湖底地貌整体较为平缓,但局部存在岩面起伏。根据工程勘察资料,场区地层自上而下主要为淤泥质粉质黏土、粉质黏土及局部砂层,下伏为强~中风化岩层。上覆软土层孔隙比大、压缩性高,抗剪强度指标较低,对围堰稳定性不利。

水文地质条件方面,湖水与地下水之间水力联系密切,地下水位受湖水水位变化影响明显。施工期间受季节性降雨及调蓄影响,湖水水位存在一定幅度波动,围堰在施工期内需长期承受较大的水压力及不利水位差。

1.3 围堰结构形式

围堰采用对拉式双排钢板桩结构,两侧均设置拉森Ⅳ型钢板桩,桩长随水深及地层条件变化,范围为 10 ~ 17 m。两排钢板桩之间填筑低渗透性黏性土,分层压实形成堰心防渗体。围堰与水平拉杆将两排钢板桩连接为整体,以提高围堰整体刚度和抗变形能力。

双排结构通过钢板桩与堰心填筑体的协同作用,使围堰在承受水土压力时具有较好的整体性与稳定性。相比单排钢板桩围堰,该结构在复杂水文地质条件下具有更高的安全冗余度,适用于水深较大、软弱地层发育的湖域工程。

1.4 稳定性计算方法

围堰稳定性主要从抗倾覆与抗隆起两个方面进行验算。抗倾覆稳定性安全系数可表示为:

$$K_{ov} = \frac{\sum M_{res}}{\sum M_{act}} \quad (1)$$

式中: $\sum M_{res}$ 为抗倾覆稳定矩; $\sum M_{act}$ 为倾覆力矩。

抗隆起稳定性安全系数按规范方法计算,综合考虑土体自重、抗剪强度及水压力等因素。

1.5 稳定性计算模型与基本假定

为便于开展参数敏感性分析,围堰稳定性计算在满足规范要求的基础上作如下基本假定:

- (1)围堰结构在计算过程中视为平面问题,各断面沿纵向受力条件相同;
- (2)土体参数在同一计算断面内取均值,不考虑空间变异性影响;
- (3)围堰变形较小,不影响土压力分布形式;
- (4)各稳定性验算工况相互独立,参数扰动时不考虑耦合效应。

上述假定在一定程度上简化了计算模型,有利于突出参数变化对稳定性结果的影响规律。

2 稳定性计算参数及其不确定性分析

2.1 参数来源与工程代表性分析

围堰稳定性计算参数主要来源于工程勘察报告、室内试验结果及相关设计文件。需要指出的是,勘察参数通常反映的是有限取样点处的土体特性,

而围堰沿线地层条件存在一定差异。因此,设计取值在一定程度上属于工程代表值,而非精确值。

2.2 参数不确定性的工程表现

从工程角度看,参数不确定性主要体现在以下几个方面:一是勘察试验结果的离散性;二是施工扰动对土体结构的影响;三是水位变化导致的有效应力状态调整。这些因素均可能使实际工况偏离设计假定条件,见表1。

表1 围堰稳定性分析关键参数及取值范围

参数	基准值	变化范围
内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	14	12 ~ 16
黏聚力/kPa	18	14 ~ 22
土体重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	18.5	17.5 ~ 19.5
入岩深度 h/m	1.5	1.0 ~ 2.0
水位差 $\Delta H/\text{m}$	4.5	3.5 ~ 5.5

3 稳定性参数敏感性分析

3.1 分析方法

为保证不同参数影响程度的可比性,引入无量纲敏感性系数:

$$S_i = \frac{\Delta K / K_0}{\Delta X_i / X_0} \quad (2)$$

式中: S_i 为无量纲敏感性系数; K_0 为基准工况下的稳定性安全系数; ΔK 为参数扰动引起的稳定性安全系数变化量; X_0 为参数基准值; ΔX_i 为评价参数的基准值。

计算过程中仅改变单一参数,其余参数均保持为基准值不变。

3.2 抗倾覆稳定性对内摩擦角的敏感性

除计算结果本身外,从受力机理角度分析,内摩擦角的变化直接影响主动土压力系数与被动土压力系数,从而改变围堰两侧土压力合力及其作用位置。由于抗倾覆稳定性本质上是稳定力矩与倾覆力矩之间的平衡问题,因此内摩擦角的变化会被直接放大至安全系数结果中,这也是其敏感性较高的根本原因,见图2。

3.3 抗隆起稳定性对黏聚力的敏感性

抗隆起稳定性主要受基底土体抗剪强度控制。在软弱土层条件下,黏聚力往往在抗剪强度中占据较大比例,因此其变化对抗隆起安全系数的影响更为显著。这一结果与工程经验具有良好一致性,见图3。

3.4 参数敏感性结果的工程对比分析

将本文分析结果与类似湖域工程经验进行对比

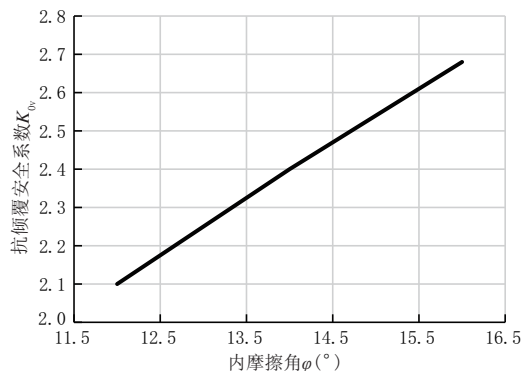


图2 抗倾覆稳定性安全系数随内摩擦角变化关系

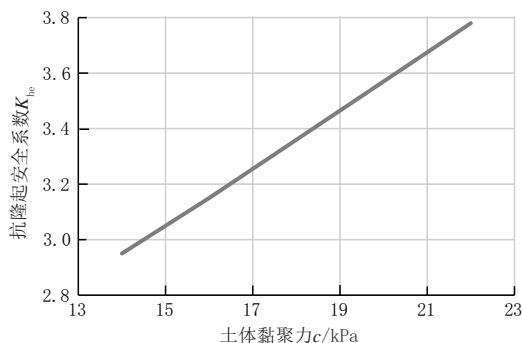


图3 抗隆起稳定性安全系数随黏聚力变化

可以发现,不同工程中参数敏感性排序总体一致,但具体敏感程度受地层条件与结构型式影响存在差异。这表明,参数敏感性分析结果具有一定工程共性,但仍需结合具体工程条件进行理解,见图4。

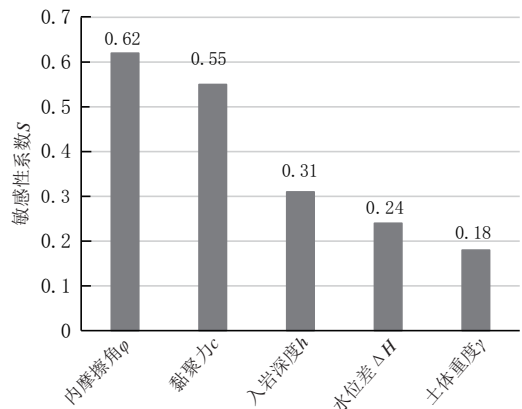


图4 不同参数敏感性系数对比

4 安全储备水平分析

4.1 安全储备定义

为定量评价围堰设计的安全裕度,引入安全储备系数:

$$R = \frac{K_{\text{calc}}}{K_{\text{code}}} \quad (3)$$

式中: K_{calc} 为计算得到的稳定性安全系数; K_{code} 为规范限值。

4.2 安全储备区间的工程意义

安全储备区间反映了围堰结构在参数扰动条件下的安全冗余水平。对于临时结构而言,适当的安全储备有助于抵御施工期间的不确定因素,但过大的安全冗余也可能带来材料用量增加及施工成本上升的问题。因此,对安全储备区间的合理性进行分析,对于设计优化具有重要意义,结果见图 5。

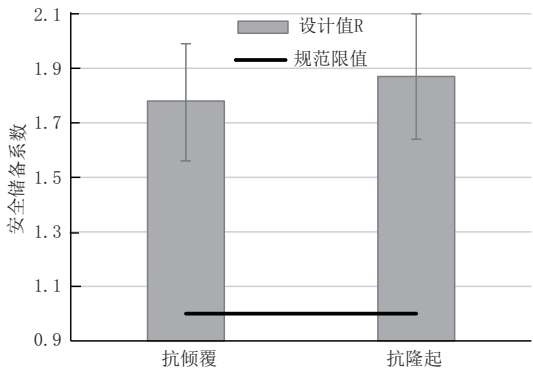


图 5 参数扰动条件下围堰稳定性安全储备变化区间同时汇总计算结果见表 2。

表 2 围堰稳定性安全储备统计结果

稳定性类型	R_{min}	R_{design}	R_{max}
抗倾覆	1.56	1.78	1.99
抗隆起	1.64	1.87	2.10

结果表明,在多数参数扰动范围内,围堰整体安全系数大于规范限值,具备一定的安全储备;但在最不利参数组合条件下(见图 5 和表 2 中的最小值区间),计算结果已击穿现行规范的安全限值。此时,结构的安全储备被耗尽,正式进入安全风险区间。这一现象客观反映了现行设计在局部极端工况下存在失稳隐患。因此,针对此类低概率但高风险的工况区间,工程实践不能仅依赖静态的安全储备设计,而必须建立动态的施工监测预警体系,并提前制定针对水土参数劣化的应急加固预案。

4.3 与传统确定性设计方法的对比

传统确定性设计方法通常仅关注计算安全系数是否满足规范限值,而未对安全裕度大小进行进一步讨论。相比之下,引入安全储备分析能够更直观地反映设计取值在不确定条件下的可靠程度,为设计决策提供更多信息。

5 工程监测反馈与稳定性验证

5.1 监测布置与监测内容

为验证围堰设计计算及参数敏感性分析结果的合理性,并及时掌握围堰在施工过程中的实际工作状态,工程在围堰施工及基坑开挖阶段同步布置了

系统性的监测体系。监测内容主要包括:钢板桩桩顶水平位移、桩身深层水平位移、围堰内外水位变化以及局部沉降情况。监测断面沿围堰纵向分布,重点布设在水深较大、地层条件相对不利及结构形式变化位置。

监测频率根据施工阶段动态调整,在围堰成堰及基坑抽水初期适当提高监测频率,以捕捉围堰受力状态的快速变化特征;在施工进入相对稳定阶段后,监测频率相应降低。通过上述布置,可较为全面地反映围堰在不同施工阶段的变形与受力响应。

5.2 施工阶段围堰变形特征分析

监测结果表明,围堰水平位移的发展具有明显的阶段性特征。在围堰施工完成但尚未抽水阶段,钢板桩位移整体较小,变形主要来源于施工扰动及局部不均匀填筑影响;随着围堰内抽水和基坑开挖的进行,内外水位差逐渐形成,围堰水平位移出现明显增长。

值得注意的是,位移增长并非持续线性发展,而是在抽水初期出现相对较快的增长速率,随后逐渐趋于平缓。这一现象与参数敏感性分析结果具有较好一致性:水位差作为影响围堰稳定性的重要参数,其变化在施工早期对围堰受力状态的影响更为显著。当水位差达到稳定水平后,围堰结构进入新的受力平衡状态,位移增长速率明显减小。

5.3 监测结果与计算结果的对比分析

将监测得到的围堰最大水平位移与稳定性计算结果进行对比可以发现,在参数合理取值条件下,围堰实际变形水平明显低于设计允许值,未出现异常变形或突变现象。这从侧面验证了围堰结构在参数扰动范围内具有较为充足的安全储备。

同时,监测结果也表明,不同断面围堰变形水平存在一定差异,主要受局部地层条件及施工工序影响。这一差异性提示,在类似工程中,参数敏感性分析宜结合分段设计和分区控制思路进行应用,而不宜简单采用统一参数进行整体评价。

6 参数不确定性来源及工程控制对策

6.1 勘察阶段参数不确定性的来源

在湖域工程中,地层条件往往具有一定的空间变异性。受勘探点数量和布设条件限制,勘察成果通常只能反映局部范围内的土体特性,而难以全面覆盖围堰沿线的所有不利部位。此外,软土层取样和试验过程中易受到扰动影响,导致室内试验参数

与原状土体特性存在差异。这些因素均可能使设计参数偏离实际工况。

前文敏感性分析证实,土体的内摩擦角与黏聚力是对围堰稳定性影响最为显著的一阶控制参数,这意味着前期勘察对这两项核心指标的精准获取具有决定性意义。为有效降低参数不确定性向施工期传导的安全风险,要求勘察阶段在确定重要抗剪强度参数时,其室内土工试验与原位测试方法必须尽可能贴合实际施工工况。例如,应根据围堰基坑开挖的卸荷路径、抽水过程中的排水条件及固结状态,针对性地选择剪切试验方法(如固结快剪或慢剪)。只有试验条件真实模拟了复杂水土耦合作用下的施工受力状态,才能获取高可靠度的强度指标,为围堰的稳定性设计提供坚实的数据输入。

6.2 施工阶段对参数有效值的影响

施工过程本身也会对土体参数的“有效值”产生影响。例如,围堰施工及基坑开挖过程中,土体应力状态发生调整,局部土体结构可能被破坏,进而影响其抗剪强度指标;长期水位变化及渗流作用也可能导致软土强度的时变效应。这些因素在传统确定性设计中往往难以充分考虑。

6.3 针对不确定性的工程控制对策

结合参数敏感性分析结果,工程中可针对关键参数采取有针对性的控制措施。例如,在勘察阶段适当增加关键部位的勘探点密度,提高内摩擦角和黏聚力参数的代表性;在施工阶段通过控制抽水速率和加强水位监测,降低不利水位差对围堰稳定性的影响;必要时可结合监测结果对施工方案进行动态调整。

7 方法适用性、局限性与进一步研究方向

7.1 方法适用性分析

本文提出的参数敏感性与安全储备分析方法以现行规范稳定性验算模型为基础,计算思路清晰、工程可操作性强,适用于类似湖域隧道工程中双排钢板桩围堰的稳定性评价。该方法无需引入复杂的概率模型,便于在工程设计阶段推广应用。

7.2 方法局限性讨论

需要指出的是,本文分析过程中对参数扰动采用的是单参数控制变量法,未考虑多参数同时变化的耦合效应;同时,计算模型基于二维平面假定,未考虑围堰纵向不均匀受力及空间效应。这些简化假定在一定程度上限制了分析结果的精细程度。

7.3 进一步研究方向

后续研究可在以下几个方面进一步深化:一是引入概率分析或随机有限元方法,对参数不确定性进行更系统的量化;二是结合三维数值模拟手段,分析围堰在复杂施工工序下的空间受力特征;三是进一步积累不同工程案例数据,完善参数敏感性分析结果的工程适用范围。

8 施工组织与围堰稳定性的协同影响分析

8.1 施工组织方式对围堰受力状态的影响

在湖域隧道明挖工程中,围堰并非孤立结构,其受力状态与施工组织方式密切相关。围堰施工完成后,往往需经历抽水、分层开挖、主体结构施工及回填等多个阶段,不同阶段的施工顺序、节奏及作业范围均可能对围堰稳定性产生影响。因此,在分析围堰稳定性时,有必要将施工组织因素纳入综合考虑。

以本工程为例,围堰沿隧道轴线长度较大,施工过程中采用分段、分仓流水作业的组织方式。该组织方式在降低单次施工风险的同时,也使围堰在不同区段处于不同施工阶段,围堰结构沿纵向呈现出非均匀受力特征。监测结果显示,处于抽水与开挖初期阶段的仓段,其围堰水平位移增长速率明显高于已进入主体结构施工阶段的仓段,表明施工阶段差异对围堰稳定性具有直接影响。

8.2 分阶段施工对关键参数敏感性的影响

从参数敏感性角度看,施工阶段的变化实质上改变了部分参数的“有效作用范围”。例如,在抽水初期,围堰内外水位差快速增大,水位差参数对围堰稳定性的影响被显著放大;而在开挖后期,随着围堰内结构逐步成型,部分土体参数对整体稳定性的影响程度相对减弱。

这一现象提示,参数敏感性并非在整个施工周期内保持不变,而是与施工阶段密切相关。若仅基于单一施工阶段进行稳定性评价,可能无法全面反映围堰在全过程中的安全状况。因此,在类似工程中,可结合施工阶段划分,对关键参数敏感性进行分阶段分析,以提高稳定性评价的针对性。

8.3 施工组织优化对安全储备的调控作用

施工组织方式的合理调整在一定程度上可作为“非结构性安全储备”的补充手段。例如,通过控制抽水速率、合理安排开挖顺序、避免大范围同步作业等措施,可有效减缓围堰受力状态的突变,降低不利参数组合出现的概率。

结合本工程实践,在严格控制抽水速率和分仓施工节奏的条件下,围堰结构的实际变形水平始终处于较低范围内。这表明,合理的施工组织不仅有助于降低施工风险,也可在不增加结构材料用量的前提下,提高围堰整体安全储备水平。

9 典型断面稳定性差异分析

9.1 不同断面地质条件差异

围堰沿线地质条件并非完全一致,局部区段存在软土层厚度变化、岩面埋深起伏等情况。为进一步分析上述差异对围堰稳定性的影响,选取具有代表性的不同断面进行对比分析。

对比结果表明,在软土层较厚且入岩深度较小的断面,围堰抗隆起稳定性对黏聚力参数的敏感性明显增强;而在岩面埋深较浅、入岩条件较好的断面,围堰整体稳定性主要受内摩擦角和水位差控制。这一差异性进一步说明,参数敏感性分析结果应结合具体断面条件进行理解。

9.2 断面差异对设计取值的启示

从工程设计角度看,不同断面的稳定性差异意味着设计参数宜进行分段取值,而非沿线统一采用单一保守参数。对于地质条件相对不利的断面,可适当提高关键参数取值的安全裕度;而在条件相对有利的断面,则可在满足规范要求的前提下适度优化设计参数,以实现安全性与经济性的平衡。

10 结 论

(1)双排钢板桩围堰稳定性受多参数共同影响,其中土体内摩擦角与黏聚力为一阶控制参数,入岩深度与水位差为二阶影响因素。该结论对复杂水文地质条件下市政工程具有直接指导意义:在勘察与设计阶段应优先保证强度指标的代表性与可靠性(如加密软弱段勘探与试验),在施工阶段应将水位差作为关键过程控制量,以降低不利工况触发概率,从源头提升临时结构安全水平。

(2)在合理参数扰动范围内,围堰整体安全储备较为充足,但局部工况存在保守空间,极端组合下稳定性下降明显。该发现表明:对于市政工程这种“工

期约束强、成本敏感度高”的建设场景,安全储备并非越大越好,而应在满足规范与风险可控的前提下,通过识别敏感参数与不利工况,实现“有针对性的安全冗余”。这有助于减少不必要的钢材与填筑用量、降低施工难度与工期压力,从而提升工程经济性与资源利用效率。

(3)引入参数敏感性与安全储备分析,可在不改变现行规范验算体系的基础上,为设计决策提供更充分的信息增量:既能够解释“满足规范但仍需关注的风险边界”,也能够量化“可优化的保守空间”。因此,该方法适用于复杂水文地质条件下市政隧道明挖、深基坑及临水临湖临江工程的临时结构设计与评估,可支撑勘察投入、施工组织(抽排水速率、分仓开挖节奏等)与结构参数优化的协同决策,实现安全可控、经济合理的工程建设目标。

参考文献:

- [1] GB/T 51295—2018 钢围堰工程技术标准[S].
- [2] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S].
- [3] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
- [4] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [5] 龚晓南.深基坑工程[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [6] 张雅维.双排抗滑桩变形与受力的滑坡参数敏感性分析[J].路基工程,2015(1):63-67.
- [7] 许明军.双排钢板桩围堰结构选型设计与计算[J].内蒙古公路与运输,2020(3):34-37.
- [8] 刘迪,余龙,陈勇.双排钢板桩围堰设计计算方法探讨[J].公路,2023(6):272-282.
- [9] 雷晗.双排桩支护结构的抗倾覆稳定性计算方法研究[J].城市道桥与防洪,2019(6):108-112.
- [10] 石坚,陈鹏冲,陈倩倩,等.基于正交法的边坡安全系数敏感性分析[J].路基工程,2017(2):33-36.
- [11] 吕擎峰,邵金,赵彦旭.兰渝铁路盖家阴山滑坡稳定系数水敏性分析[J].路基工程,2014(5):35-39.
- [12] 明德江,陈勉,姚德波,等.基于弹性地基梁法的钢围堰计算分析[J].公路与汽运,2025(2):92-97.
- [13] 阳吉宝.计算基坑抗隆起稳定安全系数的卸荷法[J].城市道桥与防洪,2021(11):194-198.
- [14] 钱骥,茱瑞馨,宋世杰,等.重庆官栈河大桥主桥主墩基础锁口钢管桩围堰加固[J].桥梁建设,2024(1):148-154.
- [15] 陈少轩,余臣相,杜勤.基于离散元的顺层岩质边坡加固及稳定性分析[J].城市道桥与防洪,2024(4):234-237;241.