

滑坡稳定性评价及防治方案优化筛选设计

周 冬

(陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘要: 为确保滑坡区内居民的生命财产安全, 基于滑坡的地质条件, 利用传递系数法等方法对滑坡稳定性进行研究, 并筛选合适的滑坡防治方案; 通过支持向量机实现滑坡防治后的变形预测, 并以预测结果评价滑坡防治效果。结果表明: 1) 滑坡稳定性的定性评价结果与定量评价结果具有较好的一致性, 综合评估得出, 滑坡稳定性总体处于不稳定 - 基本稳定, 尤其是在暴雨工况条件下, 滑坡失稳风险较大; 2) 经滑坡防治方案的筛选, 得出方案 1 “抗滑桩 + 排水” 的适用性相对最佳, 其适用性等级为 4 级, 优于其他两类防治方案; 3) 通过对滑坡防治实施后抗滑桩的变形监测成果分析可知, 抗滑桩的变形已趋于收敛, 最终预测值范围为 24.45 ~ 27.82 mm, 始终在变形控制限值范围内, 充分说明滑坡防治措施合理且有效, 达到了预期的防治目的。

关键词: 滑坡; 稳定性评价; 防治方案; 变形预测; 支持向量机

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1673 - 8993(2025)07 - 0062 - 07

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.07.090

Landslide stability evaluation and optimal screening design of prevention and control schemes

ZHOU Dong

(Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, Shanxi, China)

Abstract: In order to ensure the safety of life and property of residents in the landslide area, based on the geological conditions of the landslide, the stability of the landslide is studied by using the transfer coefficient method and other methods, and the appropriate landslide prevention and control schemes are screened. The support vector machine is used to predict the deformation after landslide prevention, and the prediction results are used to evaluate the landslide prevention and control effect. The results show that: 1) The qualitative evaluation results of landslide stability have good consistency with the quantitative evaluation results. Comprehensive evaluation shows that the stability of landslides is generally unstable-basically stable, especially under heavy rain conditions, where the risk of landslide instability is high; 2) After the screening of landslide prevention and control schemes, it is concluded that scheme 1 “anti-slide pile + drainage” has the best applicability, and its applicability level is level 4, which is better than the other two types of prevention and control schemes; 3) Through the analysis of the deformation monitoring results of the anti-slide pile after the implementation of landslide prevention and control, it can be seen that the deformation of the anti-slide pile has tended to converge, and the final predicted value range is 24.45 ~ 27.82 mm, which is always within the range of deformation control limit, which fully shows that the landslide prevention and control measures are reasonable and effective, and the expected prevention and control purpose has been achieved.

Key words: landslide; stability evaluation; prevention and control schemes; deformation prediction; support vector machines

收稿日期: 2024 - 10 - 25

基金项目: 陕西铁路工程职业技术学院科研基金资助项目(KY2021 - 62)

作者简介: 周 冬(1982—), 男, 讲师, 从事地下工程与桥梁施工方面的研究。

近年来,滑坡灾害的发生频率较高,并呈逐年增加的趋势。为确保区域内居民的生命财产安全,开展其稳定性评价及防治方案筛选具有重要的现实意义^[1-2]。在开展滑坡防治前,滑坡稳定性评价能够有效掌握滑坡的当前状态,并为后续设计提供推力参数的基础,其研究必要性显著,如:李如仁等^[3]利用数值模拟对滑坡稳定性进行了评价;李佳航等^[4]探究了传递系数法在滑坡稳定性评价中的适用性;左文贵等^[5]利用数值模拟软件分析了滑坡的稳定性。依据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016),传递系数法在滑坡稳定性评价中表现出较强的适用性。因此本文结合工程实际传递系数法将作为滑坡稳定性的评价方法,为滑坡防治奠定基础。然而,一般来说,滑坡防治方案并非唯一,其适用性可能存在一定差异。为确保防治方案的合理性,开展防治方案筛选显得十分必要。概率-后果分析法(Probability-Consequence Analysis, P×C法)能够有效构建滑坡防治方案筛选体系^[6],其适用性已被验证。在滑坡防治后,运营期观测必不可少。因此,可以利用防治后运营期的变形预测分析结果来评价防治效果。根据宁波等^[7]、耿海深等^[8]的研究成果,支持向量机适用于滑坡变形预测且具有较高的预测精度,其作为滑坡防治后运营期的变形预测方法是合适的。同时,根据预测结果,若滑坡防治措施在运营期的变形趋于收敛且预测值均在变形控制限值范围内,则说明滑坡防治效果良好,从而验证了防治方案筛选结果的准确性。综合上述内容,以滑坡勘查成果为基础,利用传递系数法开展滑坡稳定性研究,并通过P×C法筛选滑坡防治方案;利用支持向量机实现滑坡变形预测,并以预测结果评价滑坡防治效果,以期为区域内类似滑坡防治工作提供一点经验。

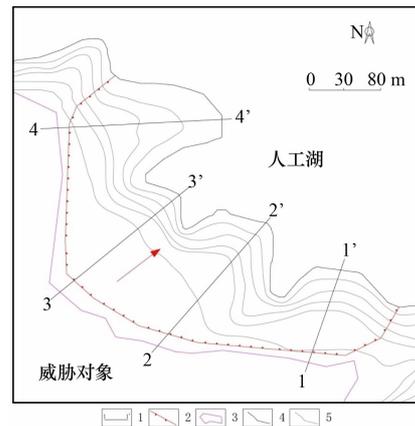
1 工程概况

1.1 滑坡基本特征

某滑坡工程位于广西南宁市武鸣区,平面形态呈“圈椅状”(图1)。其后缘以错动陡坎为界,前缘以基岩出露处为界,左、右两侧以冲沟(即变形终止处)为界,边界特征较为清晰。根据调查结

果,滑坡主滑方向为 34° ,纵向长度约为100 m,横向宽度约为200 m,平均厚度约为5.5 m,体积约为 $1.1 \times 10^5 \text{ m}^3$,属于中型土质滑坡。

在周边环境条件方面,滑坡前侧紧邻人工湖,湖水位较为稳定,波动幅度较小;后缘邻近居民聚集区,居民为主要威胁对象,总计威胁61户237人。因此,虽然滑坡区周边环境条件相对简单,但由于威胁对象较多,潜在经济损失较大,开展后续稳定性分析及防治方案筛选具有重要的现实意义。



1—剖面; 2—滑坡边界; 3—威胁对象;
4—水位线; 5—等高线。

图1 滑坡平面形态及周边形态

1.2 滑坡物质组成特征

根据钻探成果,滑坡物质组成如图2所示,其中K1、K2为钻孔编号。

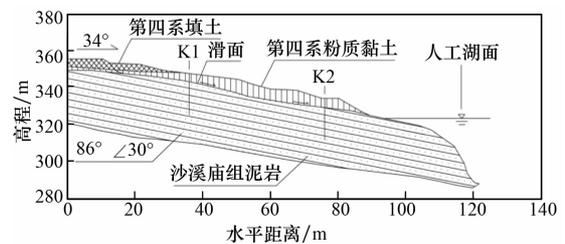


图2 滑坡物质组成特征

(1) 滑体土。滑体岩性主要包括填土和粉质黏土。其中:填土为素填土,黑色,稍湿~湿,结构松散,局部夹杂少量碎块石,厚度为0.5~1.1 m;粉质黏土为灰黑色,以可塑为主,局部偶见硬塑或软塑,均匀性一般,含少量腐殖质,压缩性中等,分布厚度为3.5~6.8 m。总体而言,滑体厚度范围为4.0~7.0 m,平均厚度约为5.5 m。

(2) 滑带土。滑带位于基覆界面,岩性为粉质黏土,褐色,可塑,易软化,主要由下覆泥岩软

化、泥化形成,厚度为 15 ~ 30 cm,局部夹杂少量角砾,角砾质量分数约为 7%。此外,滑面倾角除后缘较陡外,中、前缘滑面倾角相对较为稳定。

(3) 滑床。滑床岩性主要为侏罗系沙溪庙组泥岩,紫红色,泥质结构,中厚层状,岩芯多为柱状,完整性较好,但敲击声沉闷,强度较低,产状为 $86^\circ \angle 30^\circ$ 。

1.3 滑坡变形特征

经调查访问,该滑坡最早于 2014 年 8 月开始出现变形,在历年强降雨或持续降雨条件下均发生规模不等的变形现象,如裂缝和垮塌等。本次调查过程中共发现 4 条裂缝,其特征统计如表 1 所示。由表 1 可知:滑坡变形特征较为显著,存在较大的失稳风险。

2 滑坡稳定性评价

2.1 稳定性评价方法

结合工程实际,为确保滑坡稳定性分析结果的准确性,将分析过程划分为两步:1) 根据现场调查成果,开展滑坡稳定性的定性评价;2) 依据勘查资料,开展滑坡稳定性的定量评价。

按照上述思路,重点介绍滑坡稳定性的定量评价方法,并依据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016),确定采用传递系数法作为评价方法。根据传递系数法原理,首先计算条块间的传递系数 c_i ,其公式为

$$c_i = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \psi_{i+1} \quad (1)$$

式中: θ_i 为第 i 条块倾角, ($^\circ$); ψ_{i+1} 为第 $i+1$ 条块内摩擦角, ($^\circ$)。 θ_{i+1} 为第 $i+1$ 条块倾角, ($^\circ$)。

在传递系数计算的基础上,滑坡稳定系数 F_s 的计算公式可表示为

$$F_s = \left[\sum_{i=1}^{n-1} R_i c_i + R_n \right] / \left[\sum_{i=1}^{n-1} T_i c_i + T_n \right] \quad (2)$$

式中: n 为划分条块数; c_i 为对应条块的传递系

数; R_i 为条块抗滑力, kN; T_i 为条块下滑力, kN; R_n 为第 n 个条块的抗滑力, kN; T_n 为第 n 个条块的抗滑力, kN。

根据 F_s 的计算结果,对滑坡稳定状态进行划分,具体划分标准如表 2 所示。

结合工程实际,对滑坡稳定性计算的剖面、工况及参数等进行设计。

(1) 滑坡稳定性计算剖面。考虑到滑坡横向延伸长度较长,共设计 4 个计算剖面,分别为 1-1' 剖面、2-2' 剖面、3-3' 剖面和 4-4' 剖面,具体位置如图 1 所示。

(2) 滑坡稳定性计算工况。根据《滑坡防治工程勘查规范》(GB/T 32864—2016),共设计 3 个工况:1) 工况 I: 仅考虑“自重”,采用天然状态下的滑体自重及滑带抗剪参数进行计算;2) 工况 II: 考虑“自重+暴雨”,采用饱和状态下的滑体自重及滑带抗剪参数进行计算;3) 工况 III: 考虑“自重+地震”,采用天然状态下的滑体自重及滑带抗剪参数进行计算,并在计算过程中计入地震力。

(3) 滑坡稳定性计算参数。根据试验结果及经验值统计,确定滑坡稳定性计算参数,具体结果如表 3 所示。

2.2 稳定性评价结果

2.2.1 滑坡稳定性的定性评价

滑坡地表错动台坎发育,局部坍塌较为严重,且变形特征明显,存在失稳风险。因此,定性判断滑坡处于欠稳定-基本稳定状态。

2.2.2 滑坡稳定性的定量评价

滑坡稳定性定量计算结果如表 4 所示。由表 4 可知:4 个剖面的稳定性计算结果存在一定差异,在相应工况条件下,2-2' 剖面的稳定性相对最差,其次是 3-3' 剖面、4-4' 剖面和 1-1' 剖面;在相应剖面条件下,工况 II 的稳定性相对最

表 1 滑坡裂缝特征参数

裂缝序号	延伸方向/ $^\circ$	延伸长度/m	宽度/cm	下错高度/m	可见深度/m
P1	85	11.92	8.6 ~ 16.5	0.10 ~ 0.15	0.8
P2	62	10.36	11.4 ~ 20.6	0.32 ~ 0.48	0.4 ~ 0.8
P3	91	12.54	12.9 ~ 20.1	0.05 ~ 0.13	0.6
P4	103	5.88	10.9 ~ 18.7	0.20 ~ 0.30	0.4

表 2 滑坡稳定状态划分

<1	[1, 1.05)	[1.05, 1.15)	≥1.15
不稳定	欠稳定	基本稳定	稳定

表 3 滑坡稳定性计算参数

状态	滑体容重/ (kN·m ⁻³)	内摩擦 角/(°)	黏聚力/ kPa
天然状态	19.3	18.42	14.62
饱和状态	20.4	13.70	12.08

差,属于滑坡防治的设计工况,表明降雨是该滑坡失稳的重要诱因。

经统计,在工况Ⅱ条件下,2-2'剖面 and 3-3'剖面处于不稳定状态,其余两个剖面处于欠稳定状态。因此,结合滑坡稳定性定量评价结果可知,滑坡在不利工况下的失稳风险较大。

2.2.3 滑坡稳定性的综合评价

滑坡稳定性的定性评价结果与定量评价结果具有较好的一致性。综合分析表明,滑坡稳定性总体处于不稳定~基本稳定,即在不利工况条件下稳定性较差,存在较大的失稳风险。因此,开展其防治方案设计是十分必要的。

3 滑坡防治方案优化筛选设计

3.1 滑坡防治方案初拟

结合滑坡工程实际,初拟 3 套防治方案,具体设计如下。

(1) 抗滑桩+排水:抗滑桩拟设于滑坡前缘,共布置 43 根(编号为 T1~T43),截面尺寸为 1.5 m×1.8 m,桩中心距为 5 m,桩长为 12 m(6 m 长悬臂段+6 m 长嵌固段);排水沟拟沿滑坡边界外侧布置,断面为矩形,净空尺寸为 0.5 m×0.5 m,壁厚为 20 cm,并按 10 m 间距设置伸缩缝。

(2) 坡脚反压+排水:对滑坡前缘坡脚进行

反压处理,以提高滑坡抗滑力;在反压过程中,应对反压体进行坡面整理,确保其与原始地形平缓顺接;排水设计与方案 1 相同。

(3) 锚索格构+排水:锚索设计长度为 20~35 m,采用 KM15-1860 型,格构截面形式为矩形,截面尺寸为 0.4 m×0.4 m,水平和竖向间距均为 2 m;排水设计与方案 1 相同。

3.2 滑坡防治方案筛选结果

3.2.1 筛选方法构建

滑坡防治方案的影响因素较多,且各因素的影响程度存在差异。因此,提出基于 P×C 法^[9]构建滑坡防治方案筛选方法。首先,利用层次分析法构建筛选体系,设定目标为“滑坡防治方案筛选体系 A”,并在其下设置 6 个评价指标,包括安全性指标 B1、工程造价指标 B2、工程工期指标 B3、工程施工难易程度 B4、工程施工条件 B5 和环境影响指标 B6。其次,对各指标进行权值和隶属度参数计算,其中权值计算采用 1~9 标度法,隶属度计算采用专家法。

根据 1~9 标度法,先构建判断矩阵,并计算其一致性判断指标(σ_{CR})。

$$\sigma_{CR} = \frac{\lambda_{\max} - n}{R(n-1)} \quad (3)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征值; R 为标度指标参数; n 为评价指标数。

在隶属度计算过程中,调查的专家数量不宜过少,建议至少为 15 人,且各专家的职称应不低于高级工程师。

最后,根据权值和隶属度的计算结果,进一步开展滑坡防治方案适用性的定量计算,并依据其计算结果设计分级标准:1)适用性等级为 1 级,适用性评分范围为 0~60,表明防治方案的适用性较差;2)适用性等级为 2 级,适用性评分范

表 4 滑坡稳定性定量计算结果

计算剖面	滑坡稳定系数			稳定状态		
	工况 I	工况 II	工况 III	工况 I	工况 II	工况 III
1-1'	1.348	1.030	1.154	稳定	欠稳定	稳定
2-2'	1.050	0.934	1.010	基本稳定	不稳定	欠稳定
3-3'	1.290	0.979	1.116	稳定	不稳定	基本稳定
4-4'	1.339	1.010	1.164	稳定	欠稳定	稳定

围为 60~75, 表明防治方案的适用性一般; 3) 适用性等级为 3 级, 适用性评分范围为 75~90, 表明防治方案的适用性良好; 4) 适用性等级为 4 级, 适用性评分范围为 90~100, 表明防治方案的适用性很好。

3.2.2 筛选结果分析

以方案 1 为例, 详细对比不同评价指标及其整体适用性的计算结果。经统计, 方案 1 的评价指标适用性结果如表 5 所示。由表 5 可知: 在方案 1 条件下, 6 个评价指标的适用性存在一定差异, 其适用性得分范围为 79.41~93.75, 对应的适用性等级为 3~4 级。

表 5 方案 1 的评价指标适用性结果

评价指标	适用性得分	适用性等级
安全性指标	91.87	4
工程造价指标	82.91	3
工程工期指标	92.09	4
工程施工难易程度	93.75	4
工程施工条件	79.41	3
环境影响指标	85.03	3

在完成评价指标适用性计算的基础上, 进一步对方案 1 的整体适用性进行评价。经统计计算, 得到 6 个评价指标的隶属度矩阵 $M = [0.051 \ 0.073 \ 0.104 \ 0.772]$, 相应得分矩阵 $P = [55 \ 70 \ 85 \ 95]$ 。由此计算得出方案 1 的整体适用性得分为 90.10, 表明方案 1 的整体适用性等级为 4 级, 对滑坡防治的适用性很好。

采用相同方法, 对其他两个防治方案进行适用性分析, 其计算结果如表 6 所示。由表 6 可知: 方案 1 的适用性得分最高, 其适用性等级为 4 级, 而其余两种防治方案的适用性等级均为 3 级。因此, 综合分析后确定该滑坡的防治方案为方案 1。

表 6 不同防治方案的适用性计算结果

方案类型	适用性得分	适用性等级
1	90.10	4
2	82.16	3
3	84.60	3

表 7 各抗滑桩运营期变形监测值

									mm
T3	T7	T11	T15	T19	T23	T27	T31	T35	T39
26.92	22.44	19.44	20.12	21.47	27.51	25.71	22.05	24.34	19.82

4 滑坡防治效果分析

4.1 分析思路及方法构建

滑坡防治完成后的运营期观测是必要的, 尤其是抗滑桩变形监测。为此, 通过分析滑坡防治后抗滑桩的变形成果来评价其防治效果。具体分析思路: 若抗滑桩变形趋于收敛且预测值均在变形控制限值(50 mm)范围内, 则表明滑坡防治效果较好; 反之, 则说明滑坡防治效果较差。

由于支持向量机具有很强的非线性预测能力^[10-12], 选择支持向量机作为滑坡变形预测模型, 其训练函数公式为

$$f(x) = \mathbf{W}^T \varnothing(x) + b \quad (4)$$

式中: $f(x)$ 为训练预测值; $\varnothing(x)$ 为核函数; \mathbf{W}^T 、 b 为偏置向量; x 为输入值。

为确保预测精度, 需将预测过程的风险最小化, 对应的约束条件:

$$\begin{cases} \mathbf{W}^T \varnothing(x_i) + b - f(x_i) \leq \varepsilon + \xi_i \\ f(x_i) - \mathbf{W}^T \varnothing(x_i) - b \leq \varepsilon + \xi_i^* \\ \xi_i \geq 0; \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\varnothing(x_i)$ 为输入信息为 x_i 时的核函数; $f(x_i)$ 为输入信息为 x_i 时的预测值; ε 为损失参数; c 为惩罚参数; ξ_i 、 ξ_i^* 为松弛参数。

对预测过程进行风险约束处理后, 支持向量机的预测值 Y_i 的计算公式为

$$Y_i = \sum_{i=1}^i (-a_i - a_i^*) K(x_i, x) + b \quad (6)$$

式中: $K(x_i, x)$ 为核函数; a_i 、 a_i^* 为乘子变量。

4.2 防治效果分析

在滑坡防治措施实施后, 选择 10 根抗滑桩进行运营期变形监测, 监测频率为每两周一次, 共计获得 48 期变形监测成果。经统计分析, 各抗滑桩的运营期变形监测值如表 7 所示。

由表 7 可知: 10 根抗滑桩的变形范围为 19.44~27.51 mm, 均值为 22.98 mm, 均小于变形控制限值(50 mm), 因此此阶段抗滑桩的变形效果处于可控范围内。结合变形控制限值, 进一

步构建抗滑桩运营期的剩余变形裕度参数 T , 其计算公式:

$$T = 100 \times (S_1 - S_2) / S_1 \quad (7)$$

式中: S_1 为抗滑桩变形控制值; S_2 为抗滑桩变形监测值。

经统计计算, T 的变化范围为 44.98%~61.12%, 均值为 54.04%。这表明抗滑桩在运营期变形的剩余裕度空间相对较大, 具有较好的控制效果。

利用支持向量机对变形最大的 T3、T23、T27 和 T35 桩进行变形预测, 其预测结果如表 8 所示。由表 8 可知: 在 T3 的预测结果中, 相对误差范围为 1.94%~2.15%, 均值为 2.04%; 在 T23 的预测结果中, 相对误差范围为 1.97%~2.14%, 均值为 2.07%; 在 T27 的预测结果中, 相对误差范围为 2.03%~2.14%, 均值为 2.10%; 在 T35 的预测结果中, 相对误差范围为 1.97%~2.11%, 均值为 2.05%。通过对比这 4 个监测点的预测结果可知, 它们均具有较高的预测精度, 因此后续预测结果可信度较高。

根据表 8 的预测结果, T3、T23、T27 和 T35 桩在后续 4 期的变形均值依次为 0.18、0.22、0.20、0.15 mm/期, 这些数值均较小, 表明抗滑桩变形已趋于收敛。其最终预测值范围为 24.45~27.82 mm, 仍显著小于变形控制限值。因此, 可以说明滑坡防治效果良好, 达到了预期的灾害防治目的。

5 结 论

(1) 滑坡稳定性的定性评价结果与定量评价

结果具有较好的一致性。综合分析得出, 滑坡稳定性总体处于不稳定-基本稳定, 即在不利工况条件下, 其稳定性较差, 存在较大的失稳风险。

(2) 3 种滑坡防治方案的适用性存在一定差异。其中, 方案 1 的适用性相对最佳, 达到 4 级适用性等级; 其余两种防治方案的适用性等级均为 3 级。因此, 确定该滑坡的防治方案为方案 1, 即“抗滑桩+排水”。

(3) 经防治措施实施后的变形分析表明, 抗滑桩的变形已趋于收敛, 其最终预测值范围为 24.45~27.82 mm, 显著小于变形控制限值。这一结果验证了滑坡防治措施的有效性。

参考文献:

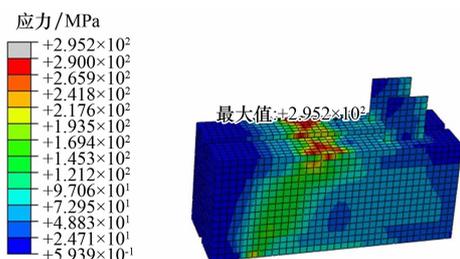
- [1] 杨校辉, 朱鹏, 窦晓东, 等. 甘肃舟曲江顶崖古滑坡复活变形特征与稳定性分析[J]. 地质通报, 2024, 43(6):947-957.
- [2] 林轩, 张枝华, 黄波林, 等. 顺层岩质滑坡防治方案研究: 以重庆市石柱县龙井滑坡为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(18):7935-7944.
- [3] 李如仁, 李梦晨, 葛永权. InSAR 与数值模拟协同的排土场边坡稳定性分析及变形预测研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(6):217-227.
- [4] 李佳航, 郭明伟, 杨智. 基于边坡下滑方向的传递系数法[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊 2):4261-4270.
- [5] 左文贵, 范平阳, 王旭, 等. 基于模糊数学与 ABAQUS 的滑坡综合稳定性分析[J]. 工程建设, 2023, 55(7):7-12.

表 8 不同桩的变形预测结果

监测周 期/期	变形值/mm				预测值/mm				相对误差值/%			
	T3	T23	T27	T35	T3	T23	T27	T35	T3	T23	T27	T35
44	25.82	25.62	24.56	23.14	25.30	25.08	24.03	22.67	2.03	2.08	2.14	2.03
45	26.06	26.13	24.88	23.46	25.50	25.58	24.35	22.96	2.15	2.12	2.13	2.11
46	26.34	26.56	25.13	23.75	25.79	25.99	24.60	23.26	2.07	2.14	2.10	2.09
47	26.59	27.18	25.43	24.06	26.05	26.64	24.90	23.58	2.02	1.97	2.09	1.97
48	26.91	27.51	25.71	24.34	26.39	26.95	25.19	23.84	1.94	2.04	2.03	2.05
49	—	—	—	—	26.81	27.20	25.47	23.94	—	—	—	—
50	—	—	—	—	26.97	27.44	25.60	24.08	—	—	—	—
51	—	—	—	—	27.02	27.68	25.73	24.22	—	—	—	—
52	—	—	—	—	27.13	27.82	25.99	24.45	—	—	—	—

- [6] 李志强,徐斌,王升,等. 基于改进的 AHP-SPA 的边坡稳定性评价及工程应用[J]. 公路交通科技,2022,39(1):56-64.
- [7] 宁波,刘玉健,王安东. 巨型古滑坡的稳定性评价及发展趋势分析[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(5):515-519.
- [8] 耿海深,吕文斌,栗燊,等. 滑坡失稳机理分析及预警预测研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版),2021,57(6):103-109.
- [9] 赵瑛,王显彪,陈菊林,等. 古滑坡活动诱发次级滑坡的稳定性评价及变形潜势分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2022,44(3):27-33.
- [10] 袁旭山,刘京会,黄龙生,等. 基于机器学习模型的新源县滑坡易发性评估[J]. 科学技术与工程,2025,25(5):1815-1826.
- [11] 薛晓辉,周玲,秦爱红. 库岸涉水滑坡危险性现状分析与预测评价[J]. 中国安全生产科学技术,2021,17(5):169-175.
- [12] 黄奕朝,孙希延,纪元法,等. 基于改进麻雀优化与 SVR 滑坡位移预测[J]. 电子测量技术,2024,47(20):32-40.

(上接第 56 页)



(a) 构件 1; (b) 构件 2

图 15 外伸牛腿应力云图

(2) 基于智能顶升模架系统的施工安全模拟分析结果,在顶模系统设计过程中应注意事项:由于钢平台堆载可能产生局部弯矩的影响,与最大正截面应力比对应的下弦杆和上弦杆的应力比通常较大,因此需要对其进行合理化的优化设计。此外,在支撑钢梁分析时,应充分考虑水平风荷载引起格构柱柱底的倾覆弯矩,这将导致各柱肢产生轴力差,从而使钢箱梁跨中竖向变形略小于理论计算值。

参考文献:

- [1] 钱志伟. 我国超高层建筑的现状及发展趋势[J]. 中国住宅设施,2018(10):61-62.
- [2] 张琨. 超高层建筑施工技术发展展望[J]. 施工技术,2018,47(6):13-18;93.
- [3] 季万年,杨玮,顾国荣,等. 广州珠江新城西塔新型模板体系设计与应用[J]. 施工技术,2009,38(12):13-15.
- [4] 王善库,梁森,夏立志. 滑升模板系统主要构件的计算方法[J]. 山西建筑,2010,36(15):39-41.
- [5] 白雪,马海彬,姚传勤,等. 超高层建筑顶升模板体系设计及模态分析[J]. 工业建筑,2013,43(5):14-17;51.
- [6] 曾凡奎,刘新钊,潘壮,等. 超高层建筑的顶升模架结构施工模拟与监测[J]. 工业建筑,2021,51(11):127-131;136.
- [7] 余浩铭. 超高层顶升模架钢平台的现场监测与数值模拟对比分析[D]. 西安:西安工业大学,2021.