

基于模糊综合评价和数值模拟方法的 石浦港岸坡稳定性分析

于超云¹,董贤哲^{2,3},徐鹏雷²,王舒锐¹,张 威^{2,3}

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江 宁波 315012;

3. 浙江省水文地质工程地质大队, 浙江 宁波 315012)

摘 要: 由于影响港岸边坡稳定性的因素较多,且许多因素难以量化,因此分析和评价港岸边坡稳定性一直是个难点。为查明石浦港岸坡稳定性,基于现场地质调查情况,选取岸坡坡度、地层岩性、岸线类型、波浪作用、人类工程活动5个评价指标,构建评价指标体系,分别采用模糊综合评价法和数值计算法对石浦港岸坡进行稳定性分析。结果表明,石浦港岸坡19个研究区块,其中有7个稳定性相对较差,主要分布于港区水下岸坡坡度较大,软土厚度较厚岸段,评价结果与实际情况较为吻合;石浦港岸坡部分岸段的数值计算结果与模糊综合评价结果一致,表明模糊综合评判方法的可行性和合理性。该研究对于港口边坡稳定性评价、灾害预测预报及后续工程治理具有一定的参考价值。

关键词: 岸坡稳定性;隶属度;模糊综合评价;数值模拟

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)04—0169—07

Stability Analysis of Shipu Port Bank Slope Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation and Numerical Simulation Method

YU Chaoyun¹, DONG Xianzhe^{2,3}, XU Penglei², WANG Shurui¹, ZHANG Wei^{2,3}

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;

2. Zhejiang Engineering Survey And Design Institute Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315012, China;

3. Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ningbo, Zhejiang 315012, China)

Abstract: It is always difficult to analyze and evaluate the stability of port bank slope because the stability of port bank slope is affected by many factors which are difficult to quantify. In order to find out the stability of the bank slope of Shipu Port, based on the on-site geological investigation, 5 evaluation indicators, namely slope gradient, stratum lithology, shoreline type, wave action, and human engineering activities, were selected to construct an evaluation index system. The fuzzy comprehensive evaluation and numerical simulation method were adopted respectively. The results show that among the 19 research blocks of Shipu Port bank slope, 7 of them have relatively poor stability, which are mainly distributed in the underwater bank section of the port area with large slope and thick soft soil thickness. The evaluation results are in good agreement with the actual situation. The numerical simulation results of some sections of Shipu Port bank slope are consistent with the fuzzy comprehensive evaluation results, indicating the feasibility and rationality of the fuzzy comprehensive evaluation method. The study has certain reference value for port slope stability evaluation, disaster prediction and subsequent engineering treatment.

Keywords: bank slope stability; membership; fuzzy comprehensive evaluation; numerical simulation

模糊综合评价是一种基于模糊数学的综合评价方法,可以对评价过程中含有模糊的、明确的等多种因素影响的事物或对象进行综合评价,通过隶属度理论把定性评价转化为定量评价。模糊综合评判方法已被认为是一种行之有效的评价边坡稳定性的方法,目前学者们已经将该方法用于评判各类岩土边坡稳定性^[1]。黄建文等^[2]探讨了基于 AHP 的模糊评判方法在边坡稳定性评价中的应用。翟友成等^[3]考虑评价指标重要程度取值的不确定性、专家判断的模糊性以及群组决策的优势,建立基于群组决策的不确定型层次分析(AHP)方法确定权重,进而建立了基于 AHP 的锚固边坡稳定模糊评判方法。王浩等^[4]结合复杂路堑高边坡病害特征,应用模糊层次评价方法,建立一套复杂边坡病害治理效果评估方法。徐建等基于改进 AHP-模糊综合评判方法模型对矿坑边坡进行稳定性综合评价。张存勇^[5]根据淤泥质海底航道的特点,选择 4 个一级评价指标和 14 个二级评价指标,建立了淤泥质海底航道边坡稳定性分析的模糊综合评价模型。罗轶等^[6]、赵建军^[7]分别对水库岸坡采用模糊综合评价方法进行了稳定性分析。上述研究促进了模糊评判方法在岩土边坡稳定性评价中的应用。

港口岸坡稳定性问题,不仅与港口建设、航道安全、沿线城镇开发等直接相关,也是沿岸工农业布局与防灾工作的重要前提。因此,评价港口岸坡的稳定性,圈定潜在的危险地区,预先对其监测和防范,对港口沿线建设显得尤为重要^[8-9]。影响岸坡稳定性的因素指标多且复杂,如何从众多因素中确定影响岸坡稳定性的评价指标,建立评价标准,并对各指标进行量化,是港口库岸边坡稳定性评价的一大难题。

鉴于此,本文以石浦港岸坡为实例,合理选择评价指标,确定影响边坡稳定性的各指标权重,通过隶属度理论确定各指标对边坡稳定级别的隶属度,采用模糊综合评判方法构建评价指标体系,从而实现对港岸边坡进行模糊综合评价。同时采用数值方法对石浦港岸坡局部区域的稳定性系数和塑性区做进一步的评价分析。

1 研究区概况

石浦港区属亚热带季风气候区,雨水充沛,台风暴雨成灾较为频繁。石浦港潮汐属于正规半日潮,潮差 4 m~6 m。石浦港岸线多以人工岸线为主,局部为自然岸线,其多为淤泥质海岸和基岩海岸。岸线沿线分布居民区和码头,人类工程活动较为频繁。岸线出露第四系主要为全新统,上部为青灰、黑灰色

淤泥、淤泥质粉质黏土及粉细砂等;下部为灰黄色粉质黏土,青灰、灰黑色淤泥质粉质黏土、粉土、粉细砂等,厚度一般 5 m~40 m,最大可达 50 m。港区水深一般 10 m~15 m,局部水深超过 25 m,水下岸坡以淤泥质土为主,坡度 6°为主,局部超过 10°。水下地形的起伏波动及水深的突变,都对岸坡的稳定性产生较大的影响。

2 评价指标体系建立

2.1 评价指标的确定

影响岸坡稳定性的因素多种多样,包括地质结构特征和地形地貌特征等岸坡内在影响因素,以及降雨、地震、人类工程活动等外在环境影响因素,诸多因素的相互作用共同改变岸坡的外形、岩体结构和力学性质。尽管影响岸坡稳定性的因素多而复杂,但往往有起控制性作用的因素,综合考虑石浦港岸坡的地质条件特点,选取对岸坡变形破坏影响较大的因素作为评价指标,据此构建岸坡稳定性评价指标体系。本文综合考虑影响研究区域岸坡稳定性的情况,确定了 5 个评价指标,分别是岸坡坡度(U_1)、地层岩性(U_2)、岸线类型(U_3)、波浪作用(U_4)、人类工程活动(U_5),构建评价因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5\}$ 。将岸坡稳定性程度划分为 4 个等级,即稳定性高、稳定性较高、稳定性较低、稳定性低,分别用 I、II、III、IV 表示,综合模糊评判集 $V = \{I, II, III, IV\}$ 。其中,地层岩性(U_2)、岸线类型(U_3)、波浪作用(U_4)及人类工程活动(U_5)为定性指标,岸坡坡度(U_1)为定量指标。对定性指标进行量化使其转化为定量数据是建立评价标准的关键,应在综合分析评价指标对岸坡稳定性影响的基础上进行量化分析。岸坡坡度(U_1)采用实际测量值,地层岩性(U_2)、岸线类型(U_3)、波浪作用(U_4)及人类工程活动(U_5)按照定性分析结果分别赋予量化值。具体评价指标及分类标准见表 1。

表 1 评价指标及分级标准

稳定性程度	高(I)	较高(II)	较低(III)	低(IV)
岸坡坡度 $\theta/(^{\circ})$	$\theta < 6$	$6 \leq \theta < 10$	$10 \leq \theta < 15$	$\theta \geq 15$
地层岩性	软土厚度 小于 5 m	软土厚度 5 m~10 m	软土厚度 10 m~15 m	软土厚度 大于 15 m
岸线类型	基岩岸线	人工岸线 大于 60%	人工岸线 小于 60%	淤泥质岸线
混合型岸线				
波浪作用	稳定岸段	缓慢淤积岸段	快速淤积岸段	侵蚀岸段
人类工程活动	无	较弱	中等	强

2.2 权重的确定

评价指标体系中各指标对岸坡稳定性影响的重要程度具有一定的差异,评价中需按照其对评价目标的重要性给出一定的权重值。本次评价采用专家打分法对指标相对上层指标的重要性进行两两比较、判断,构建比较判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,为使评价指标的相对重要性加以量化,采用 1~9 倒数标度法作为判断尺度。判断矩阵标度及含义见表 2。

表 2 判断矩阵的标度及含义	
重要程度标度 a_{ij}	含义
1	表示因素 i 比因素 j 具有相同的重要性
3	表示因素 i 比因素 j 稍微重要
5	表示因素 i 比因素 j 明显重要
7	表示因素 i 比因素 j 强烈重要
9	表示因素 i 比因素 j 极端重要
2,4,6,8	表示因素 i 比因素 j 重要程度介于上述指标之间
倒数 a_{ji}	表示因素 i 比因素 j 相比的重要程度

判断矩阵具有如下性质: $a_{ij} > 0, a_{ij} = a_{ji}, a_{ii} = 1(i, j = 1, 2, 3, \cdots, n)$ 。保持判断矩阵的一致性(通过公式 $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1)$ 来判断, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵特征值, n 为指标个数),最后计算得出各个评价指标的权重值。评价指标权重计算方法:对判断矩阵 A ,计算满足 $AW = \lambda_{\max} W$ ($\lambda_{\max}$ 为 A 的最大特征根, W 为对应与 $\lambda_{\max}$ 的正规化特征向量, W 的分量 W_i 就是对应元素相对上层相应要素的权重值)。应用方根法求解归一化特征向量和特征值。即首先计算判断矩阵每一行标度的成绩的 n 次方根 $\bar{W}_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}$,将方根向量进行归一化处理,得到特征向量 W 的第 i 个分量 $W_i = \bar{W}_i / \sum_{i=1}^n \bar{W}_i$,最后计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n (AW)_i / (nW_i)$ 。利用各层指标间的相对权重关系,可以计算指标层各评价指标相对目标层的权重值 $W_n = \sum_{i=1}^n a_j b_n^i$,式中: W_n 为指标层权重, a_j 为准则层各要素相对于目标层的权重, b_n^i 为指标层各因素相对于准则层的权重。本文对岸坡稳定性评价所选取的岸坡坡度、地层岩性、岸线类型、波浪作用以及人类工程活动等 5 个评价指标构造判断矩阵,见表 3。

通过 Matlab 软件,计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 为 5.2034,根据公式计算一致性指标 CI ,即 $CI = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) = 0.05085 < 0.10$,判定判断矩

阵的一致性良好,通过一致性检验。计算岸坡稳定性评价指标的权重值,即 $W = [0.5506, 0.2266, 0.1149, 0.0701, 0.0377]$ 。然后将各指标权重值保留小数点后三位,并进行微调后得到各指标权重值,即 $W = [0.551, 0.227, 0.115, 0.070, 0.038]$ 。

表 3 岸坡稳定性评价指标判断矩阵

评价指标	岸坡坡度	地层岩性	岸线类型	波浪作用	人类工程活动
岸坡坡度	1	3	7	7	9
地层岩性	1/3	1	2	5	5
岸线类型	1/7	1/2	1	2	4
波浪作用	1/7	1/5	1/2	1	3
人类工程活动	1/9	1/5	1/4	1/3	1

2.3 隶属度的确定

由于部分不确定因素无法量化,目前确定岸坡影响因素的隶属度尚无一套完整而且具有普遍意义的确定办法,因此本文结合研究区的特点,采用模糊数学建立隶属函数确定指标的隶属度。

本文中岸坡坡度为定量指标,属连续型变量。连续型变量因为用的是隶属函数确定隶属度,客观性较强。隶属函数种类很多,本次综合各因子数据的分布特征,采用三相线性隶属函数,其公式如下:

$$Y_1 = \begin{cases} 1 & x \leq S_1 \\ \frac{S_2 - x}{S_2 - S_1} & S_1 < x \leq S_2 \\ 0 & x > S_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$Y_2 = \begin{cases} 0 & x \leq S_1, x > S_3 \\ -\frac{S_1 - x}{S_2 - S_1} & S_1 < x \leq S_2 \\ \frac{S_3 - x}{S_3 - S_2} & S_2 < x \leq S_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$Y_3 = \begin{cases} 0 & x \leq S_2, x > S_4 \\ -\frac{S_2 - x}{S_3 - S_2} & S_2 < x \leq S_3 \\ \frac{S_4 - x}{S_4 - S_3} & S_3 < x \leq S_4 \end{cases} \quad (3)$$

$$Y_4 = \begin{cases} 0 & x \leq S_3 \\ -\frac{S_3 - x}{S_4 - S_3} & S_3 < x < S_4 \\ 1 & x \geq S_4 \end{cases} \quad (4)$$

在上式中, x 为测量值, S_1, S_2, S_3, S_4 分别为评价指标对应岸坡稳定性等级的分级阈值,并有 $S_1 < S_2 < S_3 < S_4$ 。例如,岸坡坡度指标的分级阈值为 6、10、

15、20,假设某一区域的平均坡度为 8.5° ,计算可得岸坡坡度的单因子隶属度为 $U_1 = [0.375,0.625,0,0]$ 。

本文中地层岩性、岸线类型、波浪作用及人类工程活动为定性指标,按照定性分析结果分别赋予量化值,属离散型变量。离散型变量采用专家经验法来确定隶属度,主观性较强。即通过实际现场地质调查情况,结合地层岩性、岸线类型、波浪作用及人类工程活动对岸坡稳定性影响的大小,确定各影响因素因子对不同稳定性岸坡的隶属度,建立模糊矩阵,进行综合评价,各定性指标的隶属度取值见表 4。

3 综合评价模型的建立与求解

根据各影响因子对 I、II、III、IV 类岸坡的隶属度,由此可得到各单因素分别对隶属度按隶属函数确定 I、II、III、IV 类岸坡的评价矩阵 R_n ,即:

$$R_n = \begin{Bmatrix} X_{(n-1)1} & X_{(n-1)2} & \cdots & X_{(n-1)m} \\ X_{(n-2)1} & X_{(n-2)2} & \cdots & X_{(n-2)m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{(n-i)1} & X_{(n-i)2} & \cdots & X_{(n-i)m} \end{Bmatrix}$$

式中: $n=1,2,3,4,i=1,2,3,4$ 。再根据各评价因素的权重 W ,进行模糊变换,即 $B=W \cdot R$,按加权平均型合成运算,得综合评价向量 $B=(b_1,b_2,b_3,b_4)$ 。按照最大隶属度原则, $b=\max(b_i)$ 所对应的分级,即为岸坡稳定性等级。

根据上述原则得出研究区内 19 个区段的综合

评价向量,然后按照最大隶属度原则,评价各个区段的稳定性,其结果如图 1 所示。区块 2、5、8、9、11~18 共计 12 个区块属于稳定性高(I),占总区块的 63.2%;区块 1、3、4、6、7、10、19 共计 7 个区块属于稳定性较高(II),占总区块的 36.8%。稳定性较好的 7 个区块,主要分布于港区水下岸坡坡度较大,软土厚度较厚岸段,和实际观测情况相符,表明模糊综合评判方法在港口岸坡稳定性评价应用中的可行性和合理性。

表 4 各指标隶属度取值表

评价指标	指标分类	隶属度值			
		I	II	III	IV
地层岩性	I	0.8	0.2	0	0
	II	0	0.6	0.4	0
	III	0	0.4	0.6	0
	IV	0	0	0.2	0.8
岸线类型	I	1	0	0	0
	II	0	0.8	0.2	0
	III	0	0.2	0.8	0
	IV	0	0	0.4	0.6
波浪作用	I	1	0	0	0
	II	0	0.7	0.3	0
	III	0	0.3	0.7	0
	IV	0	0	0.2	0.8
人类工程活动	I	1	0	0	0
	II	0	0.85	0.15	0
	III	0	0.15	0.85	0
	IV	0	0	0.2	0.8

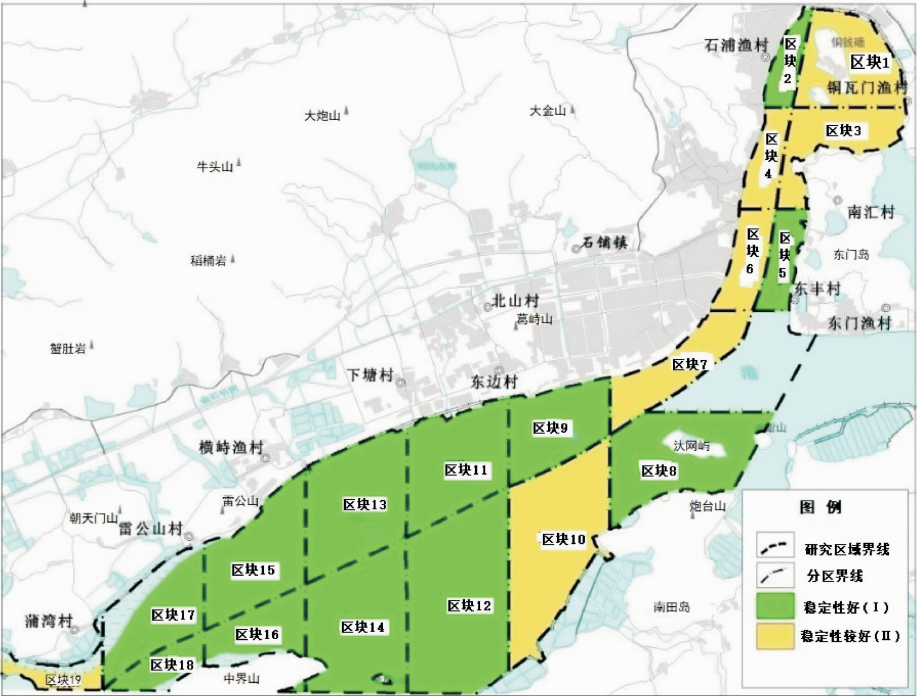


图 1 石浦海岸坡稳定性综合评价图

4 岸坡稳定性数值分析

尽管采用综合模糊评价方法分析石浦港岸坡稳定性的结果和实际情况吻合,但模糊综合评价的标准相对主观。随着计算机一级通用计算软件的快速发展,数值计算方法在边坡稳定性分析中得到了广泛应用^[10-12]。数值分析方法考虑土体本身的应力应变关系,同时可以处理复杂的边界条件及材料的非均匀性和各向异性,能对边坡的应力分布、塑性区范围和位移等进行有效的模拟,弥补了模糊综合评价方法的不足。

为了进一步确定石浦港岸坡稳定性的情况,本文选取水下岸坡较陡,稳定性相对较差的区块 7(见图 1)岸段,采用强度折减法^[13]对该段岸坡建立数值模型,求解自然状态下的安全系数以及强度折减后失稳状态下塑性变形区域。

Duncan 在 1996 年总结了边坡稳定分析的条分法和有限元法的进展。Duncan^[14]指出边坡安全系

数可以定义为使边坡刚好达到临界破坏状态时,对土的剪切强度进行折减的程度。在有限差分分析中,强度折减可以表述为:假设岩土体容重 g 恒定不变,通过局部或整体降低岩土体抗剪强度(c 、 φ),再将(c 、 φ)值同时除以一个系数,得到新的一组强度指标(c_i 、 φ_i),通过对新的强度参数值进行有限差分及反复计算,使边坡最终达到临界破坏状态。此时,得到的岩土体强度指标与原来强度指标的比值即为边坡的安全系数^[8]。

首先,选取区块 7 中水下岸坡较陡的断面,通过临近的钻孔资料以及水下坡度等值线在 CAD 中绘制剖面图,如图 2 所示。模型剖面土层由上到下依次为素填土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、黏土、含黏性土圆砾。坝体采用混凝土结构。其次,提取关键点坐标,在有限元软件 ANSYS 中建立二维平面模型。计算模型需要的参数有:泊松比、弹性模量、重度、黏聚力、内摩擦角,水面以下采用浮重度;最后,将计算模型导入 FLAC 软件^[15-16]中,进行结果分析。

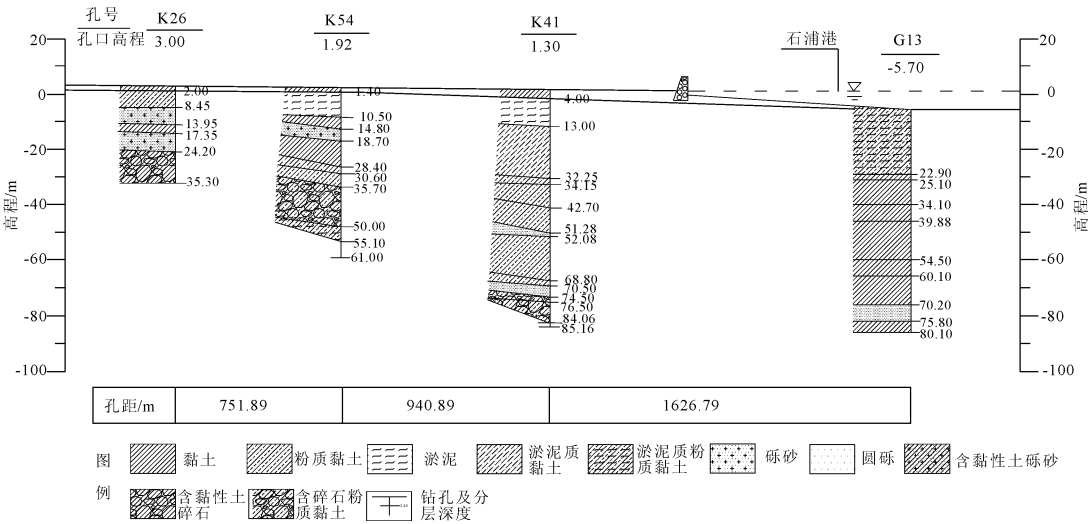


图 2 石浦港工程地质剖面图

采用强度折减法对剖面进行稳定性计算,判断失稳的依据为:(1)根据计算域内某一部位的位移与强度折减系数之间关系曲线的变化特征确定失稳状态,如当强度折减系数增大到某一特定值时,某一部位的位移突然增大,则认为边坡发生失稳;(2)通过域内广义剪应变等物理量的变化和分布来判断,如当域内的塑性区连通时,则判断边坡发生破坏。本次通过塑性区贯通后进一步观察变形或位移的大小,将特征点位移的突变性和塑性区的相互贯通性两者相结合综合评判边坡的临界极限平衡状态。

为避免折减系数取值的盲目性,先取强度折减系数为 1 时,进行天然状况下的计算,然后再根据观

察到的滑坡的破坏情况,不断增加或减小强度折减系数,直至达到某一值使得滑坡达到平衡状态。天然状态下水平位移及应力云图如图 3 所示。

利用强度折减法的思想,可计算不同强度折减系数下岸坡的变形状态。图 4 给出了两个位移监测点 P1 和 P2 不同强度折减系数对应该滑体上数值模拟追踪点的位移情况。由图可知,折减系数从 1.0 到 2.6 变化过程中,监测位移缓慢增大,变形量在 10 cm~20 cm 之间;当强度折减系数从 2.6 增加到 2.8 时,P1 和 P2 对应的位移值显著增大,这一段在曲线上呈现出上凹下凸的趋势,此时边坡变形较大但尚未失稳;当折减系数达到 3.0 时,监测点位移出

现较大的跳跃,从图 4 中可以看出,折线斜率突增,此时位移发生较大变化,此时岸坡变形失稳。

图 5 和图 6 给出了当折减系数分别 2.8 和 3.0 时的位移云图和塑性区图。对比分析发现,当折减系数为 2.8 时,水下岸坡坡度较陡的地段,坡脚和坡顶局部发生变形,由于受到张拉作用,坡顶局部变形过大,出现小范围塑性区,但岸坡整体稳定性仍较好,岸坡内部未见塑性区域;当折减系数为 3.0 时,岸坡较陡峭处位移明显增大,从位移云图上可以看出,内部颜色由橘黄色逐渐过渡为红色,同时相对应的塑性区图可见条带状塑性变形区域,塑性区逐渐贯通,说明此时岸坡已经失稳。

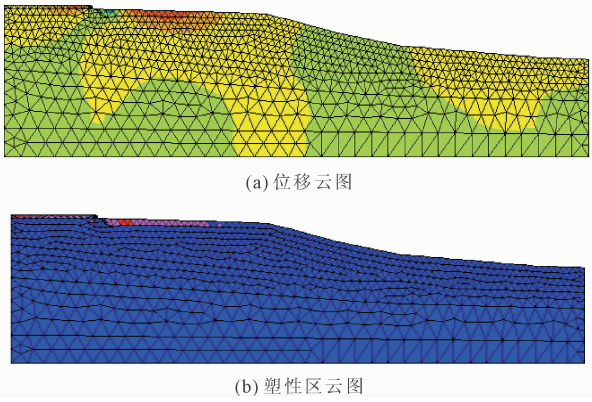


图 5 折减系数为 2.8 时变形云图

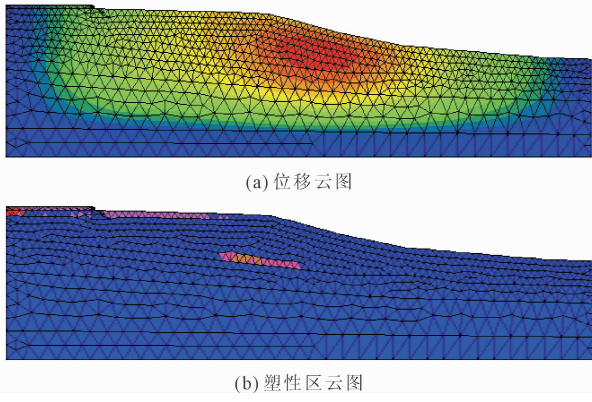


图 6 折减系数为 3.0 时变形云图

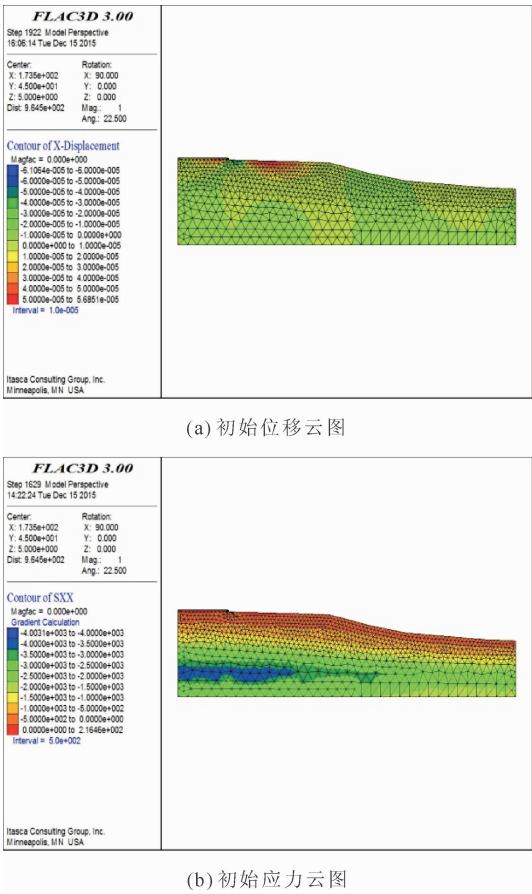
通过对石浦港区块 7 岸坡进行追踪点位移及塑性变形云图分析,判定岸坡稳定性系数为 2.8,说明目前岸坡现状稳定性较好,数值计算结果与模糊综合评判结果一致,反映了模糊综合评判方法的可行性和评价结果的正确性,进一步表明应用模糊综合评价方法在港口边坡稳定性分析中的意义。

5 结 论

本文以石浦岸坡为实例,在地质调查的基础上,选择对岸坡稳定性影响较大的 5 个因素建立评价指标体系,采用模糊综合评价法对石浦港岸坡稳定性进行定性量化评价及预测,另外通过数值模拟的方法对部分岸段的稳定性系数和塑性变形区做了分析,得到了以下结论:

(1) 采用模糊综合评价法对石浦港沿线岸坡进行定性量化分析可知,全区整体上稳定性高,稳定性相对较差岸段主要分布于港区水下岸坡坡度较大、软土厚度较厚岸段,和实际观测情况相符,说明了模糊综合评价方法的可行性、合理性和准确性。

(2) 选取典型区块 7 岸段建立数值计算模型,



(b) 初始应力云图

图 3 初始状态下边坡的位移和应力云图

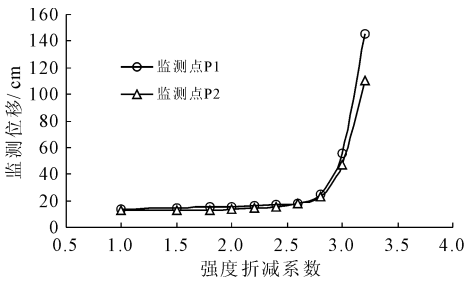


图 4 岸坡强度折减系数与监测点位移的关系图

采用强度折减法分析该区段的稳定性系数为 2.8,判定该岸坡的稳定性等级为较高,数值计算结果与模糊综合评价结果一致。

(3) 港口岸坡稳定性分析是一个复杂的过程。建议可采用定性和定量多种评价方法相结合的方式,通过相互验证、相互补充,进而对研究区域的稳定性做出全面准确的判断。本文采用模糊综合评价和数值计算相结合的方法可为分析评价港口岸坡稳定性提供一定的参考。

参考文献:

[1] 徐建,董杰华,徐中来,等.基于改进 AHP-模糊综合评判方法的露天矿边坡稳定性评价[J].水利与建筑工程学报,2020,18(6):1672-1144.

[2] 黄建文,李建林,周宜红.基于 AHP 的模糊评判法在边坡稳定性评价中的应用[J].岩石力学与工程学报,2007,26(S1):2627-2632.

[3] 翟友成,曹文贵,王江营,等.基于不确定型层次分析法的边坡稳定模糊评判方法[J].岩土力学,2011(S2):539-543.

[4] 王浩,林一夫,吴栋梁,等.复杂路堑高边坡病害治理效果模糊层次评价[J].工程地质学报,2014,22(5):936-943.

[5] 张存勇.淤泥质海底航道边坡稳定性模糊综合评价[J].安全与环境学报,2019,19(6):1892-1897.

[6] 罗轶,任光明,王志红,等.某水库库岸稳定性的模

糊综合评判[J].长江科学院院报,2011,28(6):67-70.

[7] 赵建军.金沙江下游(向家坝-溪洛渡段)河段岸坡稳定性量化评价[D].成都:成都理工大学,2004.

[8] 赵晓,袁立东.岸坡稳定性量化评价指标体系研究[J].西部探矿工程,2011,18(10):518-520.

[9] 赵建军,黄润秋,向喜琼.某水电站近坝库岸边坡稳定性二次模糊综合评判[J].水文地质工程地质,2004,31(2):45-49.

[10] 郑宏,田斌,刘德富,等.关于有限元边坡稳定分析中安全系数的定义问题[J].岩石力学与工程学报,2005,24(13):2225-2230.

[11] 史恒通,王成华.土坡有限元稳定分析若干问题探讨[J].岩土力学,2000,21(2):152-155.

[12] 郑颖人,赵尚毅.岩土工程极限分析有限元法及其应用[J].土木工程学报,2005,38(1):91-98,104.

[13] 刘金龙,栾茂田,赵少飞,等.关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J].岩土力学,2005,26(8):1345-1348.

[14] Duncan J M. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1996,123(7):577-596.

[15] 张廷国.基于 FLAC^{3D} 的库岸路基边坡稳定性分析[D].重庆:重庆交通大学,2013.

[16] 刘波,韩彦辉.FLAC 原理、实例与应用指南[M].北京:人民交通出版社,2005.



(上接第 168 页)

[6] Hou X K, Vanapalli S K, Li T L. Water infiltration characteristics in loess associated with irrigation activities and its influence on the slope stability in Heifangtai loess highland, China[J]. Engineering Geology, 2018,234: 27-37.

[7] 魏宁,茜平一,傅旭东,等.降雨和蒸发对土质边坡稳定性的影响[J].岩土力学,2006,27(5):778-781.

[8] 朱才辉,张世斌.降雨条件下压实黄土水分入渗规律模型试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(6):1117-1124.

[9] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.

[10] 土的工程分类标准:GB/T 50145—2007[S].北京:中国计划出版社,2008.

[11] Mu Q Y, Dong H, Liao H J, et al. Water-retention curves of loess under wetting-drying cycles [J].

Géotechnique Letters, 2020,10(2):135-140.

[12] Munoz Castelblanco J, Pereira J M, Delage P, et al. The water retention properties of a natural unsaturated loess from northern France[J]. Géotechnique, 2012,62(2):95-106.

[13] Ng C W W, Sadeghi H, Hossen S K B, et al. Water retention and volumetric characteristics of intact and re-compacted loess [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016,53(8):1258-1269.

[14] Lu N, Khorshidi M. Mechanisms for soil-water retention and hysteresis at high suction range[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2015, 141(8):04015032.

[15] Fredlund D G, Xing A Q. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994,31(4):521-532.