

破碎岩体洞室稳定性模糊综合评判

杨野，王舟

(重庆市水利电力建筑勘察设计研究院 地质勘查一所,重庆 江北 400000)

摘要:水利水电工程中,当水工地下洞室不得不穿越断层破碎带时,分析围岩稳定性并提出建议是进行设计工作的必要条件之一。模糊综合评判法已经被广泛应用于岩土工程中用以评判岩土体的稳定性。以渡口坝水电站引水隧洞穿越的断层破碎带实际工况为例,以模糊数学为理论基础,从围岩岩体特征、围岩岩体构造、洞室埋深、水文地质条件以及地质构造等级5个方面出发,分为2个层次,总共7个因子,建立了评判模型,确定了各因素等级标准和权重。根据最大隶属度原则,计算得到洞室开挖时的稳定性等级,用以评判其稳定性,取得了较好地效果。

关键词:断层破碎带;地下洞室稳定性;模糊综合评判;渡口坝水电站

中图分类号:TV7;[TV221.2]

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2014)03-0092-05

西南地区多崇山峻岭,地质构造复杂,在水利水电工程建设中,常常不可避免地会遇到断层、褶皱等地质构造。在这些构造作用下形成的破碎岩体往往会对工程造成不可忽视的影响。当水工隧洞开挖遇到这些不良地质状况时,其对地下洞室围岩稳定性的影响具有决定性的作用。

目前评判洞室稳定性的方法有工程类比法、块体平衡理论法、解析法及数值模拟法等,但这些方法自身均存在优点及局限性。如工程类比法无法用于特殊地质条件下的稳定性分析;块体理论法由于岩体中各类结构面的分布规律和几何形态千差万别,不易准确把握,结构面也并不是全部为平面,这些条件往往与块体理论的假定存在差异,从而使该方法的应用受到了很大的限制;解析法的局限性在于很难建立一个与复杂的工况条件相同的模型以及相对应的目标函数;而应用数值模拟方法,由于破碎岩土内部岩土体结构复杂,内部强度随空间变化较大,参数获取较为困难,并且采用模拟试验又存在取样困难、尺寸效应等问题^[1,2]。

为此,笔者采用模糊综合评判法用以评判破碎岩体洞室开挖的稳定性。该方法所具有的系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适用于各种非确定性问题的解决^[3]。

1 模糊综合评判法

该方法是一种运用模糊数学原理分析和评判

收稿日期:2013-12-11

具有“模糊性”事物的系统分析方法。它是一种以模糊推理为主的定性与定量相结合、精确与非精确相统一的分析评判方法。由于该方法在处理各种难以用精确数学方法描述的复杂系统问题方面所表现出的独特的优越性,近年来已在许多学科领域中得到了十分广泛的应用。

1.1 理论基础

1.1.1 隶属度

隶属度属于模糊评判函数中的概念:模糊综合评判是对受多种因素影响的事物做出全面评判的、一种十分有效的多因素决策方法,其特点为评判结果不是绝对地肯定或否定,而是以一个模糊集合来表示。

若所研究的范围 U 中的任一元素 x ,都有一个数 $A(x) \in (0,1)$ 与之对应,则称 A 为 U 上的模糊集, $A(x)$ 称为 x 对 A 的隶属度。当 x 在 U 中变动时, $A(x)$ 就是一个函数,称为 A 的隶属函数^[4]。

1.1.2 权重

权重是一个相对的概念,系针对某一指标而言。某一指标的权重是指该指标在整体评判中的相对重要程度。权重是要从若干评判指标中分出轻重,一组评价指标体系相对应的权重组成了权重体系^[4]。

1.1.3 最大隶属度

在模糊综合评判中,每个等级都有相应的隶属度,各个隶属度中的最大值表示该模糊综合评判所处的等级,这就是最大隶属度原则^[4,5]。

1.2 如何建立模糊综合评判模型^[6-8]

1.2.1 确定模糊综合评判因子

对于评判因素集合 U ,按某个属性,将其划分成 m 个子集,使它们满足:集合 U 所有 m 个子集之和等于集合 U ,各子集之间的交集为空集。

1.2.2 确定评判因子的权重

对于每一个子集 U_i 中的 n_k 个评判因素,按单层次模糊综合评判模型进行评判,如果 U_i 中的诸因数的权数分配为 A_i ,则其评判决策矩阵为 R_i 。

1.2.3 模糊综合评判矩阵的确定及评判结果计算

首先,对每个滑坡的稳定性进行单因素 u_i ($i=1,2,\dots,m$) 评判,从因素 u_i 着眼,该事物对抉择等级 v_j ($j=1,2,\dots,n$) 的隶属度为 r_{ij} ,从而可以得到第 i 个因素 u_i 的单因素评判集 $r_i=(r_{i1},r_{i2},\dots,r_{in})$,构造出一个总的评判矩阵 R ,从而给定了从有限论域 U 到有限论域 V 的模糊关系,隶属度称为 u,v 对模糊关系的相关程度,此时,把隶属度 R 排成表格,并令 R 等同于矩阵^[2]。

$$R = (r_{ij}) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_1 & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

如果 U 中各因数子集的权数分配为 A ,则可得综合评判结果:

$$B = A \times R \quad (2)$$

最后,根据最大隶属度原则,评判模型处于何种状态。

2 渡口坝水电站引水隧洞模糊综合评判

2.1 研究区的地质情况

该引水隧洞沿线为深~中切中~低山区,山势陡峻,沟谷深切,山体总体走向为 NWW,高程一般为 600~1 200 m,相对高差 400~600 m。

洞线穿越地层为三叠系上统须家河组、侏罗系下统珍珠冲组、中下统自流井组、中统新田沟组、下沙溪庙组、上沙溪庙组及上统遂宁组,岩性为岩屑长石石英砂岩、长石砂岩、粉砂岩、页岩、泥岩夹薄煤层及煤线;岩屑长石石英砂岩为坚硬岩,长石砂岩为中硬岩,粉砂岩、页岩、泥岩为软~较软岩。

喀斯特水为测区主要地下水类型,主要赋存于二叠系~三迭系碳酸盐岩地层内。测区南部喀斯特强烈发育地区以大泉、暗河为主,泉流量大于 10 L/s;中、北部喀斯特中等~弱发育地区以小泉为主,泉流量为 1~10 L/s。

笔者以梅溪河渡口坝水电站引水发电工程中的隧洞 K0+432~K0+577 段作为实例,具体情况如图 1 所示。由于受 F1、F2、F3 三个断层的影响,在该段区域内形成了影响范围为 127 m 的断层破碎带,隧洞在该段的稳定性存在较大的安全隐患。笔者对该段进行了稳定性评价。

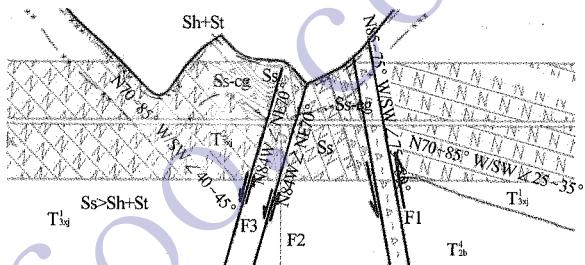


图 1 研究区地质条件示意图

2.2 模糊综合评判因子的确定^[6-8]

研究区所处的地质条件决定了该工程的工况,在野外地质基础资料收集的基础上,以相应的水利水电工程规范为准则,确定了影响该地区地下洞室稳定性的因子。围岩岩体特征和围岩岩体构造影响洞身岩体的物理力学性质,进而影响到围岩的稳定性;查清该区域的水文地质情况对洞室影响非常大,不仅水压力的存在是分析洞室稳定性必须考虑的因素,而且破碎岩体在水的作用下其物理力学性质也会受到很大的影响;埋深是确定围岩稳定性的基本因素之一,它直接决定垂直方向原岩应力的大小。地质构造等级不仅影响岩体的破碎状况,同时根据所揭示的地应力状况对洞室稳定性进行的分析也具有积极的指导作用。

综上所述,笔者选取的、影响洞室稳定性的一级因子主要有:围岩岩体特征、围岩岩体构造、水文地质条件、洞室埋深、构造等级标准,用符号表示为 $A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ 。围岩岩体特征由围岩强度和刚度、围岩岩体结构特征两个方面体现,将以上两者构成的洞室稳定性二级影响因子符号表示为: $a_1 = (a_{11}, a_{12})$ 。围岩岩体构造由岩体完整程度和结构面状态体现,从而构成了一个二级

影响因子,记为 $a_2 = (a_{21}, a_{22})$ 。

上述7个因子对洞室的稳定性具有决定性作用,各个因子都存在不同的级别,这些不同的级别对洞室安全的影响一一对应且各有不同,在本文

中定义为四个等级,分别为:危险、比较危险、比较安全及安全(表1)。这里的等级标准对于各个因子来说其意义在于对稳定性影响的程度。

2.2.1 围岩岩体特征影响因素

表1 围岩岩体特征因素等级确定表

项 目	等 级 标 准			
	危 险	比 较 危 险	比 较 安 全	安 全
围岩强度和刚度	极软岩/破碎岩体	软岩/较破碎岩体	硬质岩	极硬岩
围岩岩体结构特征	碎块状	薄层状	中厚层状	巨厚层状

洞身围岩为须家河上亚组岩屑长石砂岩、泥岩与泥质粉砂岩、页岩不等厚互层。由于该段受到F1逆断层,F2、F3正断层的影响,形成了较大的断层破碎带及影响带。破碎带物质为碎裂岩、角砾岩及糜棱岩;影响带为碎块岩、碎裂岩。岩体破碎,稳定性差。围岩的强度和刚度均极差,围岩

岩体构造多呈碎块状。围岩类别为IV~V类。

2.2.2 围岩岩体构造的影响因素

由于断层的发育导致岩体破碎,在构造应力的作用下岩层拉裂滑动,形成次一级的节理裂隙,故岩体整体构造较差。此时,岩体的构造可由岩体的完整程度和结构面的状态共同体现(表2)。

表2 岩体构造等级标准确定表

项 目	等 级 标 准			
	危 险	比 较 危 险	比 较 安 全	安 全
岩体完整程度	极软岩/破碎岩体	软岩/较破碎岩体	硬质岩	极硬岩
结构面状态	张开无充填	张开充填	微张无充填	闭合

2.2.3 水文地质条件

测区碎屑岩分布区水文地质条件简单,地下水类型主要为第四系孔隙水和基岩裂隙水。第四系孔隙水赋存于第四系松散堆积层中,因其分布

零星,厚度薄、水量有限,仅具象征意义。喀斯特水为测区主要地下水类型,主要赋存于寒武系~三迭系碳酸盐岩地层内(表3)。

表3 水文地质条件等级确定标准确定表

项 目	等 级 标 准			
	危 险	比 较 危 险	比 较 安 全	安 全
水文地质条件	裂隙水丰富,喀斯特发育	喀斯特较发育,裂隙水较丰富	裂隙水较丰富,喀斯特不发育	少量裂隙水

文中所述洞身穿越的地层为三叠系须家河组地层,该层岩性以长石砂岩为主,为喀斯特不发育地段。但是,由于该段岩性破碎,断层破碎带的存在可能导致地下水通道的形成。

一,它直接决定垂直方向原岩应力的大小。随着深度的增加,围岩位移不断增加,塑性区亦会增大,将直接影响到地下洞室在开挖时围岩的应力分布而导致围岩变形。据有限元软件ANSYS计算得到的围岩竖直向应力分布情况见表4。

2.2.4 洞室埋深

洞室埋深是确定围岩稳定性的重要因素之

表4 不同洞室埋深对围岩稳定影响因素等级标准确定表

项 目	等 级 标 准			
	危 险	比 较 危 险	比 较 安 全	安 全
洞室埋深 / m	>500	100~500	50~100	3倍洞径~50

文中所研究的洞室埋深为30~150m,其中15%段埋深为30~50m,60%段埋深为50~100m,25%段埋深为100~150m。由此可以确定该因素对稳定性影响的等级标准。

2.2.5 地质构造等级(表5)

研究区所穿越的断层F1、F2以及F3皆为区域性小断层,并且3个断层均横穿该研究区,是造成该区域岩体破碎的主要原因。

2.3 权重的确定

对于模糊综合评判来说,权重的确定具有决

表5 地质构造等级标准确定表

项 目	等 级 标 准			
	危 险	比 较 危 险	比 较 安 全	安 全
断层	被多条断层切割,处于 断层中心地带	离大断层较近或仅有 一条小断层穿过	距大断层较远或离中 小断层较近	规模小、距离远,不足 以构成威胁

定性意义,目前确定权值的方法有:专家打分法、频数统计分析法、层次分析法等。相对于其它两种方法来说,专家打分法在把握实际工况的情况下并经专家具有的经验和工程类比更加贴近工程实际,笔者对各分类指标应用专家打分法确定权值^[9,10]。

渡口坝水电站引水隧洞断层破碎段模糊综合评判一级影响因子权重确定为: $A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) = (0.3, 0.3, 0.15, 0.13, 0.12)$ 。二级影响因子权重确定为: $a_1 = (a_{11}, a_{12}) = (0.55, 0.45)$;

表6 洞室稳定性各因素模糊隶属评分细则表

等 级	围 岩 强 度 和 刚 度	围 岩 岩 体 结 构 特 征	岩 体 完 整 程 度	结 构 面 状 态	水 文 地 质 条 件	洞 室 埋 深	地 质 构 造 等 级
严 重	4	4	3	1	1	0	6
比 较 严 重	3	3	4	4	3.5	2.5	3
一 般	1	2	2	4	3.5	6	1
微 弱	2	1	1	1	2	1.5	0

各个影响因子经专家赋值得到的权重所组成的矩阵用 A 表示,各个影响因子模糊隶属矩阵用 R 表示。为了表示各等级模糊的隶属程度,采用公式 $B = A \cdot R$ 计算得到最后的隶属矩阵。由最大隶属度原则即可得到破碎岩体洞室开挖后将处于何种状态。

由于 a_1, a_2 各自是由两个二级因子组成,若要得到一级因子的权重因子,必须先求解 a_1, a_2 的隶属矩阵。

两个二级模糊因子隶属矩阵为:

$$R_1 = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0.2 \\ 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix},$$

$$R_2 = \begin{pmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \end{pmatrix}$$

求解二级因子所属一级因子的隶属度矩阵求解使用公式 $B = A \cdot R$,如下所示:

$$B = A \cdot R = (0.3, 0.3, 0.15, 0.13, 0.12) \times \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.145 & 0.155 \\ 0.184 & 0.4 & 0.316 & 0.1 \\ 0.1 & 0.35 & 0.35 & 0.2 \\ 0 & 0.25 & 0.6 & 0.15 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{pmatrix} = (0.2502, 0.331, 0.2928, 0.126)$$

根据模糊数学中的最大隶属度原则可以得到最终的结果:该破碎带地下洞室研究区所处的危

$$a_2 = (a_{21}, a_{22}) = (0.42, 0.58)。$$

2.4 洞室稳定性各影响因子的专家打分赋值

洞室稳定性影响因素由两级因子组成,总共7个因子,需对这7个因子进行单因素模糊评判。以野外收集资料为基础,专家经验判断为评分标准,给出具体分值,具体步骤为:①各个单因素分值共10分,对于各单因素所处的层次进行赋分;②结合表1~5,确定各因素模糊隶属程度分值^[9](表6)。

2.5 模糊综合评判的计算结果

$$B_1 = a_1 R_1 = (0.55 \quad 0.45) \times \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.1 & 0.2 \\ 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix} = (0.4 \quad 0.3 \quad 0.145 \quad 0.155)$$

$$B_2 = a_2 R_2 = (0.42 \quad 0.58) \times \begin{pmatrix} 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.4 & 0.4 & 0.1 \end{pmatrix} = (0.184 \quad 0.4 \quad 0.316 \quad 0.1)$$

在求解并得到一级因子 a_1, a_2 的隶属矩阵后,它们与 a_3, a_4, a_5 共同构成了整个一级因子的模糊隶属矩阵 R ,表示为:

$$R = \begin{pmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.145 & 0.155 \\ 0.184 & 0.4 & 0.316 & 0.1 \\ 0.1 & 0.35 & 0.35 & 0.2 \\ 0 & 0.25 & 0.6 & 0.15 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{pmatrix}$$

最后,表示该被评事物总体上来看对各等级模糊的隶属程度求解,采用公式 $B = A \cdot R$,可得:

险等级为:比较危险。

3 结语

文中对破碎带岩体洞室的稳定性分析受到多因子、多层次的影响。通过采用模糊综合评判的方法计算得到破碎带开挖洞室的隶属程度矩阵，根据最大隶属度原则得到该研究区在进行洞室开挖时，洞室围岩处于比较危险的状态。

模糊综合评判方法以其自身具有的优点为多层次、多因子的评价提供了一种行之有效的手段，其独特的“模糊化”处理在破碎带地下洞室稳定性分析中显示了其优越性，从而为分析地下洞室的稳定性提供了一个新的研究课题。

参考文献：

- [1] 秦红玉. 地下洞室围岩稳定分析方法的研究现状[J]. 现代矿业, 2009, 19(5): 24~27.
- [2] 瑚海明, 谭玉才, 李巍. 层状岩体地下洞室围岩稳定性的模糊评价[J]. 山西建筑, 2009, 35(24): 117~118.
- [3] 邵中勇, 冯德顺. 公路隧道围岩稳定性模糊评判方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(1): 771~774.
- [4] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及其应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [5] 陈耀辉, 孙春燕. 模糊综合评判法中的最大隶属度原则有效度[J]. 重庆师范学院学报(自然科学版), 2001, 18(1): 45~47.
- [6] 张志斌, 杨小礼, 黄阜. 基于模糊数学和粒子群算法的边坡参数反分析[J]. 华南理工大学学报, 2011, 39(6): 137~142.
- [7] 霍张丽, 梁收运. 模糊数学方法在滑坡稳定性评价中的应用[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 35~39.
- [8] 韩桂武, 刘斌, 范鹤. 模糊择近原则在隧洞围岩分类中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(7): 819~823.
- [9] 孙文怀, 王舟. 滑坡稳定性的模糊综合评价[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(4): 86~89.
- [10] 吴丽萍. 模糊综合评价方法及其应用研究[D]. 太原理工大学, 2006.

作者简介：

杨野(1978-), 男, 重庆云阳人, 工程师, 学士, 从事水利水电工程地质勘查与地质力学研究;
王舟(1986-), 男, 重庆黔江人, 苗族, 助理工程师, 硕士, 从事水利水电工程地质勘查与地质力学研究。

(责任编辑:李燕辉)

(上接第20页)

测资料进行统计, 外江侧平台最大月沉降量为44 mm, 堤顶最大月沉降量为62 mm, 满足设计要求。围堤吹填完成了围堤基底处理和堤身填筑两个分部工程, 共评定220个单元, 全部为合格, 其中166个评定为优良, 优良率为75.4%, 质量满足设计要求。

5.3 减少了施工成本

铺排船虽然租金或摊销费用较高, 但铺排船施工较其它方式效率高, 所需施工人员也较少, 从而大大降低了施工成本。就本工程而言, 东堤采用两条铺排船施工, 在施工过程中跨越了春节, 春节期间民工假期较长, 但不影响施工进度计划的安排, 按时完成了任务。而北堤工程量较少, 施工条件较好且投入了较多的作业人员, 春节期间没有放假, 发放了40多万元的加班工资, 但工期仍然落后于东堤, 施工成本也增加了不少。

经核算, 通过采用铺排船施工方案, 使承包商获得了超过240.4万元的经济效益。

6 结论及建议

本工程的实践证明: 深水区采用铺排船排袋是合理的选择, 不仅施工进度快、质量有保障, 而且也获得了较好的经济效益。笔者结合工程实际

对铺排船在充泥管袋施工中提出以下建议:

- (1)要结合工程工期因素、滩面及潮汐变化等施工条件, 认真分析和研究采用铺排船施工是否可行;
- (2)采用接长吹沙管至深水区域的方式, 以减少潮汐对吹填施工的影响;
- (3)施工中, 在浅水区挖船坞和航道, 减少吹沙管长度, 提高了工作效率, 从而加快了施工进度;
- (4)施工中增加了沙库, 减少了沙土供应不及时对施工造成的影响, 减少了受大风大雾天气或低潮位时对施工的影响, 从而加快了施工进度;
- (5)采用每400 m施工一个工作岛的方式, 提前将工作岛施工出水面, 以增加人工铺袋工作面, 从而加快了施工进度;
- (6)要预留一定的抛高, 根据地勘报告确定沉降的比例。

作者简介:

兰昌志(1980-), 男, 贵州毕节人, 项目副经理, 工程师, 一级建造师, 从事水电工程施工技术与管理工作;
蔡亮(1984-), 男, 江苏宿迁人, 项目副总工程师, 助理工程师, 从事水电及公路工程施工技术与管理工作;
李建(1974-), 男, 四川金堂人, 项目经理, 工程师, 从事水利水电及公路工程施工技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)