

矿冶技术

盲数理论在采空区地基稳定性评价中的应用

贾磊^{1,2} 解咏平² 李明³ 钱国锋⁴

(兰州交通大学土木工程学院¹, 兰州 730070; 石家庄经济学院勘查技术与工程学院², 石家庄 050031;
兰州铁道设计院有限公司³, 兰州 730000; 中交水运规划设计院有限公司⁴, 北京 100007)

摘要 采空区地质条件错综复杂, 针对其物理力学参数具有多种不确定性信息共存的特点, 将盲数理论引入采空区地基稳定性评价领域; 结合巷道顶板的受力平衡分析, 建立了基于盲数理论的评价模型, 并将该模型应用于某工程实例, 定量地评价了采空区地基的稳定程度。分析结果表明: 运用盲数运算法则可以计算地基稳定性在不同取值区间内的可信度, 它弥补了传统确定性方法描述过于绝对化的问题, 为采空区地基稳定性的判别提供了更全面的依据, 并为相近领域工程问题的解决提供了新的方法和思路。

关键词 盲数 小窑采空区 地基稳定性 参数不确定性 临界深度

中图法分类号 TD73 X935; **文献标志码** A

随着我国基础建设的不断发展, 许多交通、工民建等建设工程不得不穿越或建设在老采空区上。在这些新增加的外荷载作用下, 围岩应力场必然发生改变, 使得原本处于平衡状态的采空区可能出现某些部位的“活化”现象, 从而导致地标建筑物受到不同程度的破坏, 对建筑工程安全造成严重的威胁^[1,2]。因此, 迫切需要对采空区建筑地基的开展稳定性研究。

采空区地基稳定性的研究涉及到多个学科领域, 近几年来国内外学者取得了一些有价值的研究成果, 如附加应力分析法、力学平衡分析法、数值模拟分析法等^[3]。这些方法都是采用确定性方法研究的, 常常把参数用均值和方差进行处理, 忽略岩土体力学参数的不确定性信息, 如凝聚力、内摩擦角、重度等指标的不确定性。如何全面考虑这些不确定信息, 是确保准确进行采空区地基稳定性分析的基础。

然而, 由于岩土体内部的复杂性、试验的有限性和随机性, 以及试验误差等大量不确定性因素的存在, 使得几乎无法得到参数的精确值。而且采空区地基稳定性评价中的参数一般是多种不确定性的组合^[4,5]。不同于概率统计、未确知性、模糊数学等数据处理方法, 刘开第提出了一种新的数学方法来表达信息的不确定性, 把含有随机不确定性、模糊不确

定性、灰性及未确知不确定性两种或两种以上不确定性的信息组合称为盲信息, 而盲数则是处理和表达盲信息的数学工具^[6-10]。本文基于力学平衡分析法, 将盲数理论作为数学工具, 就不确定信息下的小窑采空区稳定进行了探讨, 以期能为更客观、准确地评价采空区地基稳定性寻求新思路。

1 盲数的基本理论

1.1 盲数号黑体

对于含有两种或两种以上不确定性(随机性、模糊性、灰性、未确知性)的复杂信息称为盲信息, 盲数则是未确知数学中表达和处理盲信息的数学工具。显然, 对于具有不确定性特征的研究对象, 其实际值不可能为一个定值, 而应该是分布在一个区间中^[11-13]。

设 G 为一个灰数集:

$$a_i \in G, \alpha \in [0, 1]; i = 1, 2, \dots, n.$$

$$f(x) = \begin{cases} \alpha_i, & x = a_i (i = 1, 2, \dots, n) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

若 $i \neq j$ 时, $a_i \neq a_j$, 且 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = \alpha \leq 1$, 则称函数 $f(x)$ 为一个盲数, 记为 $\{\lfloor a_i, a_j \rfloor, f(x)\}$ 。 α 为 $f(x)$ 总可信区间, α_i 为 $f(x)$ 在点 a_i 的可信度。

1.2 盲数的运算法则

设加、减、乘、除的运算用 $*$ 表示, $f(x)$ 和 $g(y)$ 分别表示两个盲数。

$$f(x) = \begin{cases} \alpha_i, & x = x_i (i = 1, 2, \dots, m) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

2014年2月12日收到 河北省教育厅高等学校科学技术研究项目(Z2011224)、河北省科技研究与发展计划项目13274216)资助
第一作者简介: 贾磊(1978—), 男, 副教授, 博士研究生。研究方向: 地质工程。E-mail: jialei1978@126.com。

在临界深度计算公式中,地质体的构成是错综复杂的,其物理力学参数也是众多因素影响的结果,这些参数通常包含多种不确定性,因此借助盲数来描述参数的不确定性成为一种可能。本模型仅考虑重度 γ 和内摩擦角 φ 为盲数的情况,则临界深度表示为:

$$H_0 = \frac{B\tilde{\gamma} + \sqrt{B^2\tilde{\gamma}^2 + 4BP_0\tilde{\gamma}\tan\tilde{\varphi}\tan^2(45^\circ - \tilde{\varphi}/2)}}{2\tilde{\gamma}\tan\tilde{\varphi}\tan^2(45^\circ - \tilde{\varphi}/2)} \quad (9)$$

式(9)中: $\tilde{\gamma}$ 和 $\tilde{\varphi}$ 表示重度和内摩擦角的取值区间。

3 应用实例

拟建工程场地位于山西某小采煤场 13[#]采空区上方,资料显示 13[#]采空区已经终采多年,采空区地层不存在大的裂隙和贯通性结构面,其地表移动变形的活跃期早已结束,其埋深为 39 ~ 45 m,巷道宽度为 3 m,小区规划有 6 栋住宅高楼,建筑物长 35 ~ 52 m,宽 20 ~ 25 m,地上部分为 17 层,地下部分为 4 层,基础埋深为 12 m,则巷道顶板到基地的最小埋深 $H = 27$ m,估算建筑物基地单位压力为 $P_0 = 410$ kPa。土体的重度和内摩擦角用盲数表示为:

$$f(\gamma) = \begin{cases} 0.250, & \tilde{\gamma} = [20.1, 21.8] \\ 0.500, & \tilde{\gamma} = [22.2, 23.7] \\ 0.250, & \tilde{\gamma} = [24.3, 25.5] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$g(\varphi) = \begin{cases} 0.250, & \tilde{\varphi} = [27.3, 32.5] \\ 0.375, & \tilde{\varphi} = [39.2, 43.0] \\ 0.375, & \tilde{\varphi} = [45.4, 49.2] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

临界深度 H_0 的各种可能值区间及其相应的可信度,可以通过把上述各参数带入公式(9)中,应用盲数的四则运算计算获得,结果见表 4。

表 4 临界深度的可能值区间及其可信度

Table 4 Range of possible values to critical depth and their corresponding reliability

H_0 可能值	可信度	H_0 可能值	可信度
[25.54, 25.91]	0.062 5	[26.87, 28.77]	0.187 5
[26.07, 26.59]	0.125	[27.37, 27.70]	0.187 5
[26.33, 28.05]	0.093 75	[27.52, 29.59]	0.093 75
[26.71, 27.38]	0.062 5	[28.18, 28.36]	0.093 75
[26.68, 27.15]	0.093 75	其他	0

显然,表 4 中各可能值区间存在交叉重叠情况。考虑到小窑采空区地基稳定性评价建立的是临界深度 H_0 与顶板有效埋置深度 H 之间的关系,因此

本文通过内插法,以 $H/1.5$ 和 H 为边界,将表 4 临界深度的可能值区间进一步转化为互不相交的区间上,详见表 5。

表 5 转化处理后在可能区间及其可信度

Table 5 Range of possible values to critical depth and their corresponding reliability by consolidation

H_0 可能值	可信度	地基稳定评价	地基稳定状态
[27.00, 29.59]	0.672	$H < H_0$	地基不稳定
[25.54, 27.00]	0.328	$H_0 < H < 1.5H_0$	地基稳定性差
[18.00, 27.00]	0.000	$H > 1.5H_0$	地基稳定

为了验证该模型计算结果的正确性,本文又依据《建筑地基基础设计规范》,估算了建筑物基础中点的地基变形计算深度:

$$Z_n = b(2.5 - 0.4\ln b) \quad (12)$$

式(12)中: b 为地基宽度。

由表 5 结果可知,拟建建筑物在该场地中建设,地基不稳定的概率是 67.2%,地基稳定性差的概率是 32.8%。显然拟建建筑物的基底附加压力引起小窑采空区“活化”的可能性很高,可能使得地面的沉降变形进一步加剧,所以该场地的规划不适宜。

考虑到建筑物宽度为 20 ~ 25 m,带入式(12)计算结果表明 Z_n 取值范围为 26 ~ 30 m,显然采空区顶板埋置深度尚处于地基附加应力的影响范围内,可见盲数模型的计算结果与式(12)结果是相一致的。

4 结语

实际工程中由于场地和地质条件的限制,很难对地层进行大量的原位测试和室内试验;没有大量数据的支撑,参数的概率分布很难准确表述,这就大大限制了随机分析、模糊数学等数学方法的引用。采用盲信息来表达采空区地基稳定性分析中信息的不确定性,可以较好地解决这些问题。

(1)考虑到地质体错综复杂,其物理力学参数具有不确定性,这些参数信息都是在一系列灰区间上变化的,本文借助未确知数学知识,基于小窑顶板的受力平衡,尝试用盲数理论评价上覆土层性质较好的浅埋采空区的地基稳定性,取得了较好的效果。

(2)建立了采空区地基稳定性评价的盲数模型,该模型相对于传统方法,可以更为科学、准确地评价采空区地基的稳定性,若适当增加盲参数的划分的精细程度,还可以进一步提高评价的效果。但采空区稳定性分析涉及因素众多,特别是在岩体中分析时,岩体破碎程度、结构面等影响甚大,本模型尚未能解决此类问题。

(3)在采空区设计新建筑时,应该充分重视地表沉降变形的分析,在有效的地基处理手段基础上,采取必要的建筑和结构措施。如设置圈梁、基础联系梁等,提高建筑物的刚度和整体性;设置变形缝等提高建筑物适应地表变形的能力等。

参 考 文 献

- 1 朱元武,刘春香,贺金强. 采空区场地高层建筑地基稳定性评价. 工业建筑, 2009;(z1): 738—740
Zhu Yuanwu, Liu Chunxiang, He Jinqiang. Stability evaluation of foundation for tall buildings in gob sites. Industrial Construction, 2009;(z1): 738—740
- 2 马春艳. 荆各庄矿塌陷区建筑地基稳定性研究. 焦作:河南理工大学, 2011
Ma Chunyan. Research on stability of building foundation the subdi-dence area on Jinggezhuang mine. Jiaozuo: Henan Polytechnic Univer-sity, 2011
- 3 张观瑞. 老采空区建筑地基稳定性分析的数值模拟研究. 太原:太原理工大学, 2005
Zhang Guanrui. Umerical simulation of the building foundation stabil-ity analysis with old goaf. Taiyuan; Taiyuan University of Technology, 2005
- 4 赵志峰,徐卫亚. 基于盲数理论的边坡安全稳定分析研究. 岩土力学, 2007;28(11): 2401—2404
Zhao Zhifeng, Xu Weiya. Slope stability analysis based on the blind data theory. Rock and Soil Mechanics, 2007;28(11): 2401—2404
- 5 谢晓龙,汪明武,葛 康. 基于盲数理论的深基坑抗隆起安全稳定分析. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010;33(7): 1039—1041
Xie Xiaolong, Wang Mingwu, Ge Kang. Analysis of stability against upheaval deep excavation based on blind number theory. Journal of Hefei University of Technology, 2010;33(7): 1039—1041
- 6 李如忠,汪家权,钱家忠. 地下水允许开采量的未确知风险分析. 水利学报, 2004;35(4): 54—60
Li Ruzhong, Wang Jiaquan, Qian Jiazhong. Unascertained risk analysis of ground water allowable withdrawal evaluation. Shuili Xuebao, 2004;(4): 54—60
- 7 李如忠,钱家忠,汪家权. 河流水质未确知风险评价理论模式研究. 地理科学, 2004;24(2): 183—187
Li Ruzhong, Qian Jiazhong, Wang Jiaquan. Study on theory and meth-odology for unascertained risk analysis of river water quality. Scientia Geographica Sinica, 2004;(2): 183—187
- 8 龚 攀. 基于盲数测度理论的高速公路路基设计参数研究. 天津:河北工业大学, 2011
Gong Pan. Study on highway subgrade design parameters based on blind number theory. Tianjin: Hebei University of Technology, 2011
- 9 高 峰,张志镇,高亚楠,等. 基于盲数理论的冲击地压危险性评价模型. 煤炭学报, 2010;(z1): 28—32
Gao Feng, Zhang Zhizhen, Gao Yanan, et al. Evaluation model of rock burst risk in mining based on blind data theory. Journal of China Coal Society, 2010;(z1): 28—32
- 10 刘开第,吴和琴,庞彦军,等. 盲数的概念、运算与性质. 运筹与管理, 1998;7(3): 14—17
Liu Kaidi, Wu Heqin, Pang Yanjun, et al. The concept, operations and properties of blind number. Operations Research and Manage-ment Scienc, 1998;7(3): 14—17
- 11 石博强,赵德祥,李海鹏,等. 基于盲数理论的最优化方法与程序实现. 北京科技大学学报, 2007;29(5): 523—527
Shi Boqiang, Zhao Dexiang, Li Haipeng, et al. Optimization meth-od and computer program based on the blind number theory. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007; 29(5): 523—527
- 12 李如忠,洪天求. 盲数理论在湖泊水环境容量计算中的应用. 水利学报, 2005;36(7): 765—771
Li Ruzhong, Hong Tianqiu. Application of blind number theory in calculating water environmental carrying capacity of lakes. Shuili Xuebao, 2005;36(7): 765—771
- 13 王宝森,郑丕澍,李秋英. 在投资项目不确定性分析中盲数法与概率法的比较. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2003;36(5): 642—644
Wang Baosen, Zheng Pie, Li Qiuying. Comparison of blind numbers and probability analysis applied in the uncertainty analysis of invest-ment projects. Journal of Tianjin University, 2003; 36(5): 642—644
- 14 吕凡参,刘俊平. 采空区建筑地基稳定性评价. 岩土工程界, 2007;10(6): 28—30
Lü Fancan, Liu Junping. Stability evaluation of goaf building founda-tion. Geotechnical Engineering World, 2007;10(6): 28—30
- 15 李 斌,邓喀中,牛海鹏. 老采空区上方地基稳定性评价. 煤炭工程, 2012;(7): 64—67
Li Bin, Deng Kazhong, Niu Haipeng. Evaluationon stability of founda-tion above old mining goaf. Coal Engineering, 2012;(7): 64—67

(下转第 197 页)

The Evaluation of Feasibility of Advanced Gas Injection by CO₂ Flooding in Low Permeability Reservoir

LI Nan¹, TIAN Ji¹, JIAO Hong-mei¹, REN Zhong-ying²

(Development Research Department of CNOOC Research Institute¹, Beijing 100027, P. R. China;

Beijing Petroleum Machinery Factory², Beijing 100083, P. R. China)

[Abstract] Starts from the mechanism of advanced water injection, combines with the numerical simulation and actual production data, the pressure profiles under the different injection mode is contrasted. The water injection timing in ultra low permeability reservoirs, and under the optimal water injection timing is optimized. The effect on transmission of pressure by different ways of advanced gas injection, builds the effect evaluation method of different injection ways is analyzed. Based on low permeability reservoirs property exists start-up pressure gradient, stress the sensitive, thin pore throats, the effect on the lifting amplitude of oil wells, gas injection wells and the oil recovery and miscible affection by the different ways of advanced injection is analyzed. Advanced gas injection solves the poor effect of advanced water injection and the practical phenomenon of oil well critical flooding. Taking Daqing YSL oilfield for example, the development effect has been analyzed under the different gas injection, and the development effect of the method of advance gas injection, which has certain directive significance to set the technology policy is evaluated.

[Key words] low permeability reservoir advanced water injection advanced gas injection the development effect swept volume

(上接第 193 页)

Application of Blind Number Theory in the Evaluation of Goaf Foundation Stability

JIA Lei^{1,2}, XIE Yong-ping², LI Ming³, QIAN Guo-feng⁴

(College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University¹, Lanzhou 730070, P. R. China;

School of Exploration Technology and Engineering, Shijiazhuang University of Economics², Shijiazhuang 050031, P. R. China;

Lanzhou Railway Survey and Design Institute Co. Ltd³, Lanzhou, 730000, P. R. China;

CCCC Water Transportation Planning and Design Institute Co. Ltd.⁴, Beijing 100007, P. R. China)

[Abstract] In view of the complex geological conditions of the goaf and its physical and mechanical parameters characterized by the coexistence of various uncertain data and the field of Goaf foundation stability evaluation. Through the analysis of equilibrium condition of tunnel roof pressure, an evaluation model was established and applied in an engineering example. A quantitative evaluation is conducted to determine the Goaf foundation stability. The result demonstrates the feasibility of blind number operation rule in determining the credibility of foundation stability in different value range. It makes up for the absoluteness of traditional deterministic method and provides new methods and ideas for solving engineering problems in similar areas as well as a more comprehensive basis for the determining of the foundation stability.

[Key words] blind number small kiln gob area foundation stability parameter uncertainty critical depth