

华东岩土工程学术大会
论文集

PROCEEDINGS OF THE 1ST ACADEMIC SYMPOSIUM
ON ROCK AND SOIL ENGINEERING

第一届华东岩土工程 学术大会论文集

1990年10月26~28日

中国·无锡

Proceedings of the 1st Academic Symposium
on Rock and Soil Engineering

26~28 Oct., 1990

Wu Xi, East China

编辑委员会 Editorial Committee

主编: 钱七虎 王良玺 徐志英
Chief editor

委员: (以姓氏笔划为序)
Members

王良玺	王桐封	方家骅	沈家荫
郑必勇	卓家寿	罗国煜	张诚厚
徐志英	姚禹谟	钱七虎	黄作勤
韩云乔	彭长生	蔡钟业	



责任编辑: 蔡钟业 郑必勇
Responsible editors

前 言

第一届华东岩土工程学术大会由江苏省岩石力学与工程学会和扬子石化公司共同主办，于1990年10月在江苏无锡太湖之滨召开。标志着华东地区岩土工程领域的研究进入了一个新阶段。

在中国岩石力学与工程学会的领导和支持下，全国各地岩土工程专家教授和工程师们踊跃投稿，会议共收到论文近80篇，因篇幅和专业内容所限，经编委会教授们的认真审稿，本文集收入了其中的58篇。论文涉及岩土工程进展、软土地基加固与处理、桩基及测试、各类岩土工程、岩石力学计算等多方面的内容，表明岩土工程密切结合国民经济建设和国防建设的实际，在广阔的天地里发挥出巨大的作用、显示其无比的生命力。中国岩石力学与工程学会理事长陈德基先生一贯倡导岩石力学工作者要面向经济建设，为资源开发、能源开发、城乡建设作贡献。本次大会正以此为宗旨，希望通过会议的召开和论文集的印刷出版，有助于同行们相互了解，进一步切磋学问，研讨技术，加强合作，推进岩石力学在华东地区的发展，促进岩土工程学科的进步。希望岩石力学这把金钥匙为我国的资源开发、能源利用、城乡建设、灾害防治发挥更大的作用！

本届大会的召开得到了扬子石化公司的鼎力支持。扬子石公司为会议给予了经济支持、物质保障，为与会者提供了太湖疗养院这一幽静舒适的会议地点，使得本次大会能圆满召开。在此，谨允许我代表江苏省岩石力学与工程学会和本次大会的全体与会者向扬子石化公司致以衷心的感谢！

江苏省岩石力学与工程学会

理事长：

钱七虎

1990年9月10日

目 录

第一篇 岩土工程及环境工程地质

软科学方法在岩土工程中的应用	钱七虎 (1)
略论岩土工程的国内外发展趋势	罗国煜等 (14)
试谈城市环境岩土工程	郑必勇 (19)
环境中的氮污染及其治理对策	孔宪洪等 (25)
我国岩土工程基础设计与处理现状浅谈	汪承武 (33)
优势面理论及其实践	罗国煜等 (37)
结构面的分类及其工程意义	魏 琅 (49)
苏南抽水蓄能电站的水文地质工程地质特征和开发优势	王 浣 (54)
长江岸线南通农场段工程地质评价	刘福庆等 (58)
对仪征化纤工地耕植土的工程性质的探讨	刘仁智等 (63)
福建地区特殊土壤分析及经济效果	杨国安等 (70)

第二篇 软土地基处理及加固

南京市软土地基处理综述	韩云乔 (74)
软土地基中环形桩基的应用实例	彭长生 (87)
三重管高压喷射注浆法在沉井工程中的应用	杨惠兰等 (94)
扬子乙烯工程桩基	方荣耀 (100)
新吹填软土地基超前加固处理的工程实践	戴兴忠等 (111)
静压生石灰斜直桩改良危险房屋地基	韩选江等 (125)
高压旋喷法注浆在人防工程基坑围护中的应用	陈嘉昌 (133)
用 RT3-S 钻机进行大直径钻孔桩的施工	张志良 (139)
混凝土灌注桩设计和试压浅析	顾鸿高 (145)
胜利油田自备电厂试桩综合分析报告	孟广训等 (150)
振冲法加固扬子油灌地基	张鲁年等 (166)

第三篇 桩基检测及物探在岩石工程中的应用

锤击法动测桩基完整性的理论与实践	黄理兴 (173)
桩基应力波检测中的拍现象分析	黄永林等 (188)
机械阻抗法检测桩实践认识	戴镇华 (193)
机械阻抗法测桩基质量的体会	冯 卫等 (198)
莲花铁路初勘工程炎陵、文竹桥地区地震物探	张四维 (204)

钻孔岩石崩落与原地应力测量.....	吴少武等 (216)
用剪切波速度 V_s 值判别饱和和轻亚粘土的液化	袁灿勤 (224)
声波技术在岩石力学中的应用.....	周楚良等 (229)

第四篇 地下岩石工程

采用围岩卸压法维护软岩硐室的模拟研究.....	王悦汉等 (244)
高应力区巷道维护的新途径.....	高树棠 (254)
地下结构地震动土压力分析.....	徐志英等 (259)
高地应力区地下洞室围岩稳定和变形分析.....	张志良等 (269)
应用塑性强化理论推求地下高压球型洞室岩石抗力系数“K”	蔡晓鸿等 (279)
破碎矿体采场联合控顶技术的试验研究.....	朱挺廷 (291)
七宝山铁矿主井注浆加固.....	杨洪元 (298)
超前喷锚网支护技术在龙泉矿主斜坡道中的应用.....	唐长松等 (305)
喷锚支护围岩参数三维位移反分析.....	翟恩地等 (312)
坑道工程围岩分类专家系统 TERC	邓恢煌等 (321)
考虑框架填充墙基础梁共同工作的框架结构计算模式.....	张明明 (329)
地下排污管“跨越工程”土力学分析.....	邵 正 (334)
徐州矿物局张小楼、张集煤矿立井井壁破坏的围岩分析.....	侯金龙 (341)

第五篇 地面岩石工程及岩石测试计算

岩土工程数值分析中若干问题的研究.....	卓家寿等 (346)
小浪底坝石料浸水变形特性研究.....	左元明等 (363)
用破坏密度最大概率点法评价边坡可靠度.....	鲁兆明等 (371)
伺服试验机刚度及测试技术.....	徐梓忻等 (381)
岩石冰胀性与其含水量关系的试验研究.....	陶履彬 (387)
奉化县横山水库扩建坝体堆石料石料爆破及碾压试验... 浙江省水利厅情报站 (397)	
用套筒裂法测定岩石试件抗拉强度的试验研究.....	刘万禧等 (408)
浙江某电厂输煤栈桥附近江堤稳定分析.....	华家池 (417)
金川露天矿边坡倾倒变形的简单力学机制和应用.....	岳 斌 (429)
混凝土强度与坚硬基岩胶结面抗剪强度关系的研究.....	吴放鹤 (442)
岩石破坏准则简论.....	徐志英 (458)
非均质非线性各向异性岩石的破坏准则研究.....	阮怀宁 (467)
岩体力学反演分析的概率方法及其工程应用.....	孙 均 (477)
饱和砂层震动孔隙水压力二维扩散解析理论的研究.....	张建民等 (484)
富贵山隧道南口路堑护坡及城墙基础加固技术.....	蔡体龙等 (494)

软科学方法在岩土工程中的应用

工程兵工程学院 钱七虎

现代科学技术的发展趋势日益明显表现为高度分化高度综合与学科间的相互渗透。高度分化表现为学科划分越来越细,分支越来越多,出现了很多研究对象窄细的新兴学科。高度综合则表现为学科内的综合化,如几何学中的“群”理论,代数学中的“格”理论,数学中的“范畴”与“函子”理论,物理学中的“统一场论”;综合科学的出现,如环境科学、能源科学、海洋科学、生态科学等。学科间的相互渗透表现为边缘科学的出现、横向科学的出现,如系统论、信息论、控制论,以及不同学科研究方法的互相应用,如硬科学的软化与软科学的硬化。

软科学是一门尚未定型的新兴学科,其内涵和外延随着社会需要的变化而发展,尚未定型。其定义在不断完善和精确化。一般说,它是一类学科的总称,它们综合运用自然科学、社会科学、以及数学、哲学的理论和方法,去解决由于现代科学、技术和生产的发展而带来的各种复杂的社会现象和问题,从而为它们的发展提供最优或满意的方案和决策。软科学的硬化指的是软科学研究中自然科学、数学等理论和方法应用的加强。如软科学中计量化研究的加强,计算机技术,物理和数学模拟方法以及仿真技术应用的加强。

软科学研究对象——社会系统的各个环节(分系统)如经济、科学,技术、管理、教育等明显具有系统性以及其系统参数的不充分性(灰色性质)、随机性和模糊性。所以在软科学研究中广泛地和成功地应用了运筹学,系统分析,灰色系统理论,模糊分析,统计和概率论的方法。而在硬科学的传统的研究方法中则得复杂因素简单化,模糊因素“精确”化,随机因素平均化。随着硬科学的发展,精度要求的提高,硬科学的系统性和不确定性(随机性,模糊性和不充分性)逐渐得到普遍的承认,比较科学的处理系统性和不确定性的方法得到逐步应用和发展。在这方面可以借鉴软科学中的研究方法。例如地震科学的研究对象和内容是一个具有高度不确性的大系统。地震的发生过程、地震波在岩土中的传播方式以及最后地表输出的信息都认识的不太清楚,只是一个模糊的不确定规律以及随机的不确定规律。所以目前在地面震动参数的衰减分析、震害面积的估计,地震预报的定量分析以及地震烈度的预测以及设计烈度的评定等方面的研究中正在广泛地采用模糊分析和随机分析的方法。

众所周知,岩体工程是一个具有众多因素的由天然系统和人工系统组成的复杂系统。其因素有岩石质量(包括岩石强度和岩石变形性能)岩体结构(岩体完整性结构面断层、节理、裂隙、层理、破碎带等)地下水,地应力;人工系统如峒室结构的形状,尺寸以及施工开挖及支护方法、施工的组织等。这些因素相互作用相互制约,具有较强的模糊不确定性,如岩石强度的高与低,裂隙的发育与不发育,围岩的稳定与不稳定等,还具有较强的随机不确定性。例如节理、裂隙的分布、间距、长度、产状、粗糙度以及地下水位的高低等,由于岩体的复杂性,观测资料的有限性(常常利用钻孔获得的岩石测定),因此岩体系统的性质严格说是灰色的,即未知的不充分性。所以在岩体工程的研究中应用软科学研究的方法具有很大的必要性。

一.模糊综合评判(综合决策)在岩体工程稳定性,围岩压力及其它方面中的应用

1.模糊综合评判方法在洞室稳定方案分析中的应用

岩体工程在可行性研究阶段常常需要进行方案比较,以确定工程布置在哪里。应用系统工程方法进行方案比较,一般应按照搞清目标—系统分析—系统选择的三个步骤进行。在洞室稳定方案分析中,分析的目标就是选择稳定性相对好的方案。围岩稳定与否是受一系列有机联系的复杂因素所控制,存在着不少模糊概念,很难用某一个精确的关系式来表达,与其人为的“精确”,不如求自然的“概略”,采用模糊数学综合评判不失为一个较好的方法。应用这个方法,根据比较稳定性的分析目标,可以采用如下评价集构成的论域V:

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$$

式中 v_1 至 v_5 相应为稳定性很差、差、一般、好和很好五个稳定评价等级。一般地可以有 n 级。

在系统分析阶段,首要的是分析影响洞室稳定的因素,因素考虑的多少决定了问题的精确程度,但取决于分析目标的需要。对于可行性研究阶段的方案比较来说,只考虑一些控制稳定的主要影响因素就可以了。例如围岩岩石的抗压强度 R_w , 节理间距 J_d , 洞室段地下水量 Q , 围岩强度与围岩的应力比 $\frac{R}{\sigma}$, 洞室跨度 T_d 等。这些主控评判因素集就构成了论域 U : $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ 一般地, 主控因素集有 n 个。

模糊综合评判在系统分析阶段的关键是用评价集 V 对因素集 U 中诸因素进行评价,也就是分析确定论域 U 中各因素对论域 V 的各等级的隶属度,即在数量上对每一个主控因素评定属于那一个稳定等级的程度。具体确定时,可根据专家系统、工程类比的经验或相应的工程规范来进行。其表达方式可为数学表达式,一般采用隶属函数图形为简单。例如对于节理间距 J_d 相应于论域 V 的五级,根据工程经验,可具体分为五个区间:

0—20cm、20—60cm、60—100cm、100—200cm、>200cm 显然,当主控因素值等于各区间的中间值时,对该等级的隶属关系最清晰,即最高,所以对该等级的隶属度等于1,对其它等级则为0。而当等于各区间的端值时,即两区间的交界值时,属于两个区间,故应分属于两个评价等级,隶属关系模糊,所以对这两个等级的均隶属度取为0.5。这样就构成了如下的隶属函数图形(图1):

在隶属函数图形的基础上,用实际工程资料,即每一个工程方案所决定的论域 U 中各因素的具体数据,分别作模糊映射得到模糊向量 R_i , 即根据实际工程的具体数据,如 J_d 等的具体数值,互相应的隶属函数图形上查得具体隶属度值。如某一工程方案围岩的 J_d 为180cm,则其相应的模糊向量由图1查得:

$$R_i = \{r_{i1}, r_{i2}, r_{i3}, r_{i4}, r_{i5}\} = \{0, 0, 0, 0.7, 0.3\}$$

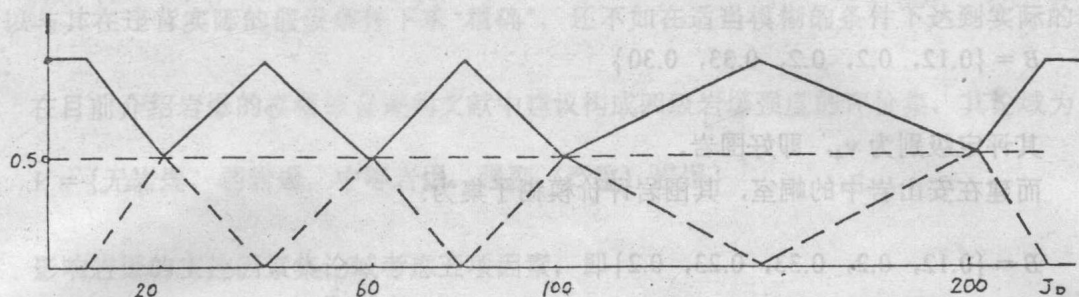


图 1

同理得到其它模糊向量，组成模糊矩阵，记作

$$R = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1n} \\ r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2n} \\ \vdots \\ r_{m1}, r_{m2}, \dots, r_{mn} \end{Bmatrix}$$

根据论域因素集 U 中各因素对于研究问题及工程稳定的重要程度，在合成运算前，或由专家经验咨询（及专家系统），或由勘探硐室围岩稳定的实际资料进行模糊综合分析的求逆来确定“权”重分配，用 A 表示。它是论域 U 上的一个模糊向量，其分向量总和为 1。

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}, \sum_{i=1}^m a_i = 1$$

在此基础上作模糊变换，又称合成运算，得到评判结果 B

$$B = A \cdot R$$

$$= \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \cdot \begin{Bmatrix} r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1n} \\ r_{21}, r_{22}, \dots, r_{2n} \\ \vdots \\ r_{m1}, r_{m2}, \dots, r_{mn} \end{Bmatrix}$$

$$= \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$$

B 为评价集 V 上的模糊子集, 其分向量最高者所在 V 中所属的位置即为评定级别。如在十三陵蓄能电站工程可行性阶段峒室稳定性方案比较评价时, 建在复杂成分砾岩中的峒室围岩的评价模糊子集为

$$B = \{0.12, 0.2, 0.2, 0.33, 0.30\}$$

其评定级别为 v_4 , 即好围岩。

而建在安山岩中的峒室, 其围岩评价模糊子集为:

$$B = \{0.12, 0.2, 0.33, 0.23, 0.2\}$$

其评定级别为 v_3 , 即一般围岩。

合成运算过程, 需根据研究问题的实质确定采用相应的数学模型, 上述的权向量相乘的办法, 即为非主因素突出型数学模型, 即综合考虑各因素, B 的分向量表达式为:

$$b_j = \sum_{i=1}^m a_i r_{ij}$$

还有主因素突出型数学模型, 即某一因素占十分突出的地位, 此时

$$b_j = m_{ax} \{a_1 r_{1j}, a_2 r_{2j}, \dots, a_n r_{mj}\}$$

还有其它模型, 根据问题的物理实质选用, 此处不再赘述。

2. 模糊综合评判方法在围岩压力确定及围岩分类中的应用

我国大多数地下工程确定围岩压力的方法, 大都是先进行围岩分类, 然后按不同具体情况的经验公式来估算围岩压力。所以关键是围岩分类。早期的围岩分类法实质上是以单一因素为基础进行分类, 如普氏法是以岩石强度为基础。目前流行较多的分类法大都不是考虑单一因素, 而是考虑综合因素, 即认为围岩的稳定与围岩压力的确定不仅与岩石强度有关, 而且与围岩构造的整体性密切相关, 节理、断层、地下水、风化程度都可影响围岩的稳定与压力的数值。但目前, 采用的弹性波速、“岩心质量指标”、多参数组合的岩石结构评价法 (R.S.R) 以及岩体质量指标法 (Q 法) 等。虽然对于岩体构造特征的描述已从定性走向定量, 并采用先进的地质勘探方法, 但是在因素的科学综合上尚嫌简单, 而国内的分类法大都是在工程类比与经验归纳的基础上提出的, 因而在综合的严密程度和特征因素的定量上尚显不足。因此, 如何科学地综合有显著影响的因素, 是围岩分类法继续发展的值得重视的主要方向。具体来说, 应当在引入岩体力学、地质力学和应力分析等有关的指标来定量评价岩体构造特征状态和岩石性能的基础上, 引用模糊数学综合评判等方法来系统综合所有影响围岩稳定和确定围岩压力的主要因素予以科学分类。然后针对不同的围岩种类, 提出不同的估算和计算围岩压力的方法和公式。

3 模糊综合评判方法在岩爆预测中的应用

岩爆能否发生, 岩爆烈度的强弱, 存在很多模糊的不确定性。传统的研究方法, 无视

其客观存在的模糊性,把岩体假定为匀质、连续各向同性的材料,并将岩石变形限制在达到峰值强度前的变形范围进行分析。但是实际上,岩爆之前,岩体必须在变成非匀质、非连续体的基础上,才能发生岩爆弹射。而且弹射过程一定发生在岩体达到峰值强度之后,所以与其在违背实际的假设条件下求“精确”,还不如在适当模糊的条件下达到实际的精确。

在目前介绍岩爆的模糊综合评判文献中建议构成四级岩爆强度的评价集,其论域为:

$$V = \{\text{无岩爆, 弱岩爆, 中等岩爆, 强烈(严重)岩爆}\}$$

影响岩爆的主控因素集论域考虑五项因素,即

$$U = \{\sigma_1/\sigma_c, \beta, k_u, k_\sigma, k_w\}$$

式中: σ_1/σ_c 为洞室围岩切向应力与围岩岩石单轴抗压强度比; β 为主节理组与最大主应力夹角,由野外节理统计资料及地应力方向的赤平投影得到; $k_u = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_1}$, 为岩爆岩石的脆性指数,是岩石峰值强度前的总变形与永久变形之比,比值越大,脆性越高; $k_\sigma = \frac{\sigma_c - \sigma_{drc}}{\sigma_{drc}}$ 为应力下降指数,为岩石峰值强度与残余强度之差,再与岩爆临界应力降之比,它反映岩石峰值强度后的应力释放性能; $k_w = \frac{W_E}{W_{EC}}$ 为岩石的弹性能量指数,是岩石峰值强度前弹性应变能的积累量与岩石岩爆临界弹性能之比。 k_u, k_σ, k_w 均由岩爆岩石力学试验获得。

U 论域中各因素对于评价论域 V 的隶属度值可由隶属系数图形来描述。岩爆各主控因素对于相应各岩爆烈度划分等级区间的依据是:

σ_1/σ_c 是综合以前研究专家的经验判据而构成; β 是根据实际工程调查资料,结合大量岩爆有效弹射能试验研究结果得出; k_u, k_σ, k_w 是根据岩爆岩石力学试验有效弹射能曲线计算的结果得出。具体数值见下表:

U \ V	无	弱	中等	强烈-严重
σ_1/σ_c	<0.4	0.4-0.7	0.7-0.9	>0.9
β (度)	30-42	20-30, >42	10-20	0-10
k_u	0-4	3.5-5.5	5-7.8	>7
k_σ	0-1.33	1-1.9	1.67-2.67	>2.2
k_w	0-1.2	1-1.8	1.5-2.2	>2

在隶属函数图形的基础上,按实际工程资料,即评判工程的相应论域 U 中各因素的具体数据,分别作模糊映射,得到模糊向量 R_i 而后组成模糊矩阵。

在岩爆模糊数学合成运算前, 还需根据专家经验咨询或实际工程岩爆烈度经分析求逆来确定各因素的“权”重分配。仍用向量 A 表示。最后得到评判结果 $B = A \cdot R = \{b_1, b_2, b_3, b_4\}$ 。其分向量最高者相应应在 V 中所属的位置, 即为预测的工程岩爆等级。

对于天生桥水电站工程, 曾进行过在断层上下游三段的岩爆预测。岩爆的预测强度相应为强烈、中等、中等。随后的实际工程开挖初步证明了上述预测的正确性。

4. 模糊综合评判方法在确定岩体泥化夹层抗剪强度中的应用。

岩石边坡失稳破坏常常是沿着具有泥化夹层的节理面、断层面发生的。判定岩坡是否失稳, 计算岩坡的破坏概率时重要而又困难的工作是计算岩体泥化夹层的抗剪强度。岩体泥化夹层结构面的抗剪强度确定的影响因素很多, 它们相互作用与制约, 存在着不少模糊不确定性, 所以采用模糊综合评判法比较适宜。

此时, 评价集论域直接由抗剪强度的分级构成, 主控因素论域由确定抗剪强度的主要影响因素构成, 可以考虑有: 夹层结构面的起伏度; 夹层间物质的充填度; 夹层中粗粒的含量; 夹层中粗粒径; 夹层中粘土含量。各主控因素对各级抗剪强度的划分依据是专家经验研究资料的归纳, 工程类比以及试验结果。权重分配一般是根据专家咨询方法确定。主控因素论域中各因素的具体数据是通过工程勘探和实际试验而得。由于在实际工程的泥化夹层中各处所得的主控因素数据不尽相同, 所以最后评判得到的抗剪强度分级在夹层各处也不同, 这是符合实际情况的。所以最后还要予以综合, 得到整个夹层的抗剪强度。当然, 在这方面也可应灰色统计来进行统计综合。

二、灰色系统分析在岩体工程中的应用

所谓灰色系统是其系统内部有部分特性和参数已知 (白色元素)、有部分未知 (黑色元素) 的 (黑白) 混合系统。灰色系统理论领域很多, 有灰色预测、灰色统计、灰色决策、灰色聚类分析和关联分析等。所谓灰色预测是凭逻辑推理对系统的结构、关系进行论证、建立模型, 通过对模型值的加工、求预测值。可以预计, 灰色预测的理论对岩体工程将有特殊的适应性。这是因为岩体力学的测试量只能在局部的地点和有限的时间内 (常常是在工程施工前或施工中) 进行, 所以得到的是离散的不充分信息。而灰色预测方法可以把有限时空的信息延拓到整个实际工程的有效运转时间。从而得到有效的利用, 这是为大量的成功实践所证明。

具体来说, 灰色预测的步骤如下:

首先对于含有误差影响、呈离散状态的原始数据作生成处理, 即所谓滤波, 以淡化随机性引起的脉动误差影响。然后对动态过程用微分方程逼近, 即为微分拟合建模法, 拟合所得的模型称为灰色动态模型, 记为 $GM(n, h)$, 其中 n 为方程阶数, h 为处理数据序列阶数。灰色预测中, 一般为线性拟合模型, 而且生成处理一次, 则应为 $GM(1, 1)$ 。微分方程就是模型值, 通过对模型值的远原 (生成的逆运算), 求得预测值。

根据上述的灰色预测步骤, 将其数学形式表达如下:

有灰色原始数据序列

$$X^{(0)}(k) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(m)\}$$

进行一次累加生成处理。按第 γ 次累加生成处理的一般公式

$$X^{(\gamma)}(k) = \sum_{m=1}^k (\gamma-1) X^{(0)}(m)$$

有

$$X^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k X^{(0)}(m)$$

于是

$$X^{(1)}(1) = X^{(0)}(1)$$

$$X^{(1)}(2) = X^{(0)}(1) + X^{(0)}(2)$$

$$X^{(1)}(3) = X^{(0)}(1) + X^{(0)}(2) + X^{(0)}(3)$$

.....

由灰导数空间变换理论可以证明：对于一次生成处理的数列 $x^{(1)}(k)$ ，近似成立相应白化形式的一阶微分方程：

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (*)$$

若记上述方程的参数矩阵为

$$\hat{a} = \{a, u\}^T$$

则应成立

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y_N$$

式中矩阵

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}$$

向量 $Y_N = \{X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n)\}$ 。

解上述微分方程后，可得白化形式数列 $X^{(1)}$

$$X^{(1)}(t) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a}) e^{-a(t-1)} + \frac{u}{a}$$

为区别于以前灰色数据序列 $X^{(1)}$
记为

$$\hat{X}^{(1)}(k+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a}) e^{-ak} + \frac{u}{a}$$

将模型值经累减处理还原得白化原始数列，即预测值

$$\hat{X}^{(0)}(k+1) = \hat{X}^{(1)}(k+1) - \hat{X}^{(1)}(k)$$

对预测值还应进行误差估计：

误差 $e^{(k)} = X^{(0)}(k) - \hat{X}^{(0)}(k)$ ，如误差太大，精度不够，还可再调整，即进行多阶生成处理，予以提高。

1. 灰色预测在岩石蠕变断裂时间预测中的应用

蠕变断裂时间与加载水平有关，在低作用应力水平，试验时间很长，例如为确定葛洲坝红砂岩的长期强度与蠕变断裂性质的关系。有的机构试验了一年多。为此，如从高应力水平的短期蠕变断裂结果来预测低应力作用下的蠕变断裂时间，这将有实际的工程意义。现以硬石膏室内蠕变断裂时间测定为例来看灰色预测方法的可行性。

实测结果及有关拟合结果见下表：

数 据 序 号 K 项 目	1	2	3	4	5
加载应力 τ (Kg/cm ²)	41.0	38.0	35.0	32.0	29
$X^{(0)}(k)$	1.6	5.4	8.2	10.6	
$X^{(1)}(k)$	1.6	7.0	15.0	25.8	
GM (1, 1) 拟合 $\hat{X}^{(1)}(k)$		7.16	14.67	25.8	

解：(1) 求 $\hat{a}$ ：

$$B = \begin{bmatrix} -4.3 & 1 \\ -11.1 & 1 \\ -20.5 & 1 \end{bmatrix}$$

$$B^T = \begin{bmatrix} -4.3 & -11.1 & -20.5 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$(B^T B) = \begin{bmatrix} 561.95 & -35.9 \\ -35.9 & 3 \end{bmatrix}$$

$$(B^T B)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0075 & 0.0904 \\ 0.0904 & 1.4155 \end{bmatrix}$$

$$(B^T B)^{-1} B^T = \begin{bmatrix} -0.0581 & 0.0072 & -0.0634 \\ 1.0266 & 0.4118 & -0.4379 \end{bmatrix}$$

$$Y_N = [5.4 \ 8.2 \ 10.6]^T$$

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} -0.2992 \\ 4.278 \end{bmatrix}$$

(2) 求 $\hat{X}^{(1)}(K)$:

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(1)}(K) &= (1.6 - \frac{4.278}{0.2992}) e^{0.2992(K-1)} + \frac{4.278}{0.2992} \\ &= 15.9e^{0.2992(K-1)} + 14.3 \end{aligned}$$

$K=2, 3, 4$ 时

$$\hat{X}^{(1)} = \{7.16, 14.67, 25.8\}$$

(3) 预测应力水平 $\tau = 29\text{Kg/cm}^2$ 时的断裂时间:

对应 $\tau = 29\text{Kg/cm}^2$ 的 $K=5$

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(1)}(5) &= 15.9e^{0.2992 \times (5-1)} + 14.3 \\ &= 38.32 \end{aligned}$$

还原后得预测断裂时间

$$\begin{aligned} \hat{X}^{(0)}(5) &= \hat{X}^{(1)}(5) - \hat{X}^{(1)}(4) \\ &= 12.5\text{天} \end{aligned}$$

实验实测断裂时间为 14 天。

2. 土石边坡滑坡时间的灰色预测

西陵峡新滩大滑坡发生之前进行了拾多年的变形监测工作, 得到了边坡蠕变滑动变形—时间曲线。当边坡滑动位移从匀速阶段进入加速阶段, 则可认为边坡失稳已开始。其破坏时间可预测发生在当蠕变滑动曲线斜率趋于 ∞ 时, 即切线角趋于 $\frac{\pi}{2}$ 时。预测时, 应选择位移变化最大的监测点的变形—时间曲线。利用灰色 GM(1, 1) 建模, 对新滩滑动变形—时间曲线预测其切线角趋于 $\pi/2$ 的日期, 其预测结果为 1985 年 6 月 15 日左右。最后的实际日期为 1985 年 6 月 12 日。

三、地基和岩坡失稳的系统分析

地基和岩坡的稳定是由很多因素决定的，这些因素相互制约、相互作用。所以判定某一地基，某一岩坡稳定与否应按系统分析的方法进行为宜。此外地基土的性状和行为，岩石软弱结构面的性状都存在天然的变异性，这些变异具有明显的随机不确定性质。所以用安全系数是否小于1或大于1来判定地基或岩坡的稳定没有全面反映问题的情况。有的情况下，安全系数 K 大于1，甚至大于1.2的实际工程仍然破坏。当然其破坏可能性小些而已。用概率论的方法可使地基和岩坡性状的天然的随机的变异性的定量评价成为可能，即破坏（或失效）概率来反映其稳定可能更全面，更符合实际。

1. 地基安全（失稳）的系统分析和概率计算

地基的失稳可以由地基上的荷载超过地基承载力引起，也可以由地基在荷载作用下的变形超过变形极限而产生，再可以当地下水位上升使得地基应力超过地基湿陷发生的起始应力。产生了足以引起基础及上部结构破坏的湿陷变形。

所以土壤地基稳定和系统分析框图可写成：

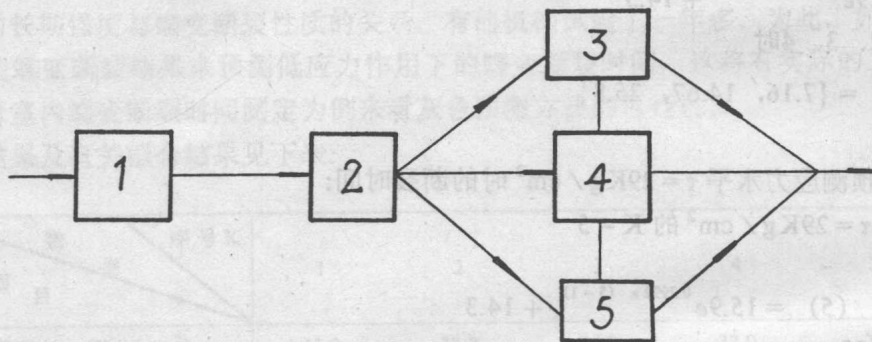


图2

图中1表示荷载超过地基承载力极限；2表示地基沉降超过变形极限；3表示地下水位上升到湿陷土层中去；4表示附加应力大于地基湿陷起始应力；5表示产生足以引起基础及上部结构破坏的湿陷变形。

显然串联线路上某一单元失效就引起地基失效，而并联线路上，则要所有并联单元失效才引起地基失效。

即对于串联线路，地基可靠性概率为

$$R = \prod_{i=1}^n R_i$$

或地基失效概率为

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$$

式中 R_i , P_i 为系统中每一单元的可靠性概率和失效概率 (破坏概率)。

而对于并联线路, 地基的失效概率为 $P_f = \prod_{i=1}^n P_i$

这样, 整个地基系统的失效概率为:

$$P_f = 1 - (1 - P_1) (1 - P_2) \cdots (1 - \prod_{i=1}^n P_i)$$

某一单元的失效概率, 按照概率设计理论计算:

$$\text{即 } P_i = P[C_i - D_i \leq 0]$$

C——能力设计值 (如地基承载力, ……)

D——为需求设计值 (如地基上的荷载, ……)

具体的计算公式为:

$$P_f = 1 - F\left(\frac{\bar{C} - \bar{D}}{\sqrt{\hat{\sigma}_c^2 + \hat{\sigma}_d^2}}\right)$$

式中: $\bar{C}$, $\bar{D}$ 为变量 C, D 的均值;

$\hat{C}$, $\hat{D}$ 为变量 C, D 的方差;

F 为正态分布函数

2、岩坡安全 (失稳) 的系统分析

岩坡的稳定比土壤地基的情况复杂得多; 因为岩坡被很多软弱结构面所交叉切割, 即它由很多分离结构体所组成的复杂系统。而每一分离体是由几组结构面所包围。产生滑坡失稳的分离体是由很多结构面所包围。产生滑坡失稳的分离体一定是由优势指标较高的优势面所切割。这些优势指标为: 空间优势——其产状允许与其它结构面构成可以滑动的分离体; 力学性质优势指标——抗剪强度小于滑动体重量产生的滑动强度; 以及水力优势指标——地下水水位的影响等。真正可能发生失稳滑坡的岩体是由真正的优势面 (最软弱结构面) 所分割的分离岩体, 其安全系数较小, 破坏概率较大。

所以, 岩坡破坏的系统分析的大致步骤是:

(1) 确定分析目标——寻求真正的优势面; 寻求岩坡的可能破坏模式, 即寻求可滑动的最危险的分离岩体。

(2) 系统分析建模——建立目标函数 (评价准则), 即建立优势指标的计算公式; 建立计算岩坡稳定的安全系数公式和计算失稳概率公式。

(3) 系统优化——循环寻优, 即按评价准则出真正优势面和最危险的可能分离岩体及其失稳概率。因而, 分析岩坡稳定的系统分析框图如下

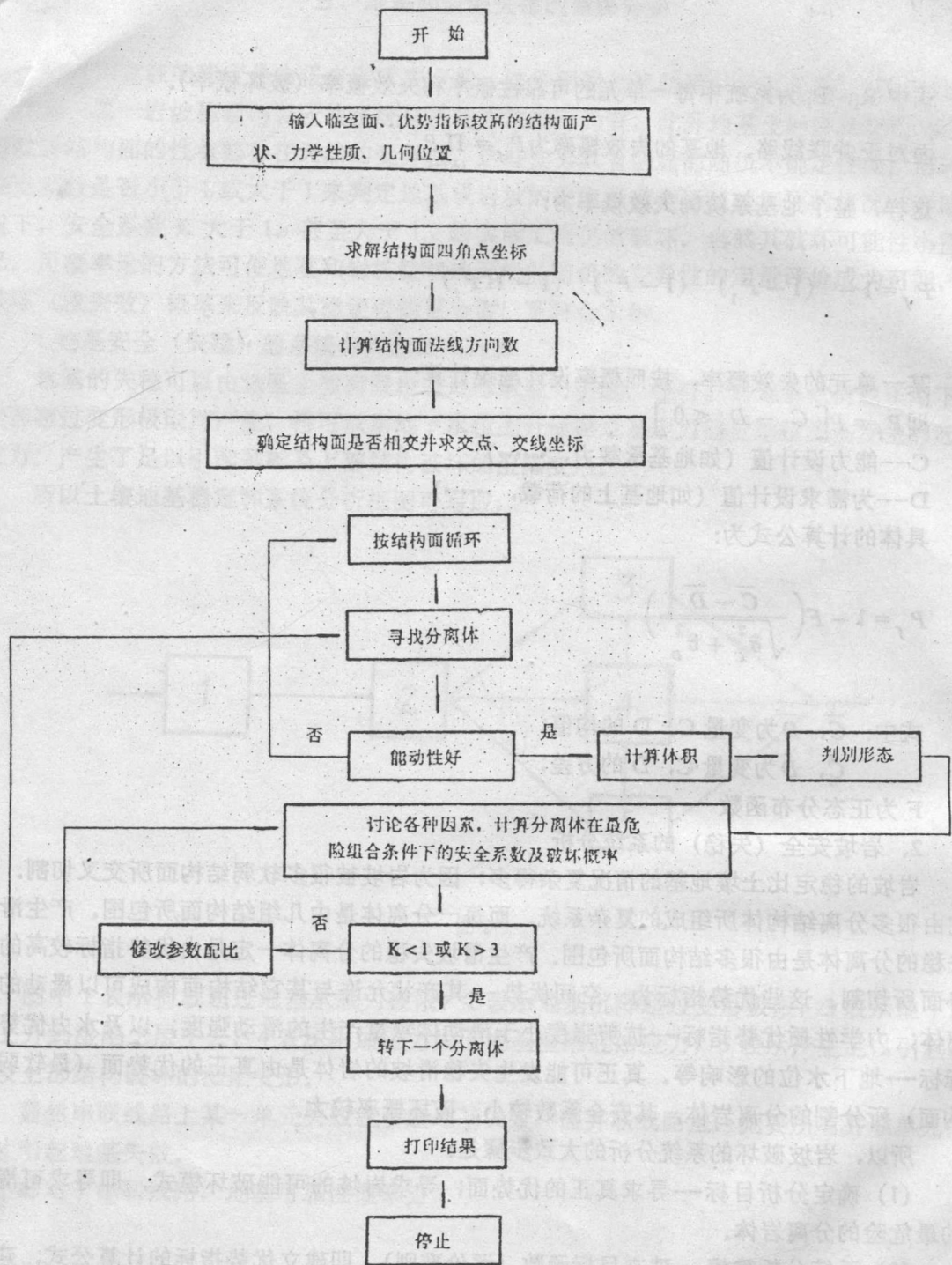


图3