

长江三峡黄腊石和黄土坡滑坡分形分维分析

吴树仁¹ 石 玲¹ 谭成轩¹ 胡道功¹ 梅应堂² 徐瑞春²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 长江水利委员会三峡勘测研究院, 宜昌 443003)

摘要: 为了探索复杂滑坡轨迹结构演化及其稳定性定量分析计算的新途径, 利用分形分维理论, 分析三峡库首区黄腊石滑坡和黄土坡滑坡边界轨迹的几何分形结构, 并采用盒维数法分别求得黄腊石滑坡西部活动性滑坡群、东部小滑坡群和整个滑坡系统及黄土坡滑坡分形结构的特征性斜率曲线和分维值。计算结果表明: 每个滑坡群的轨迹结构具有其特征性的分维值, 轨迹结构越复杂, 结构层次越清楚, 分维值越高。其中, 黄腊石滑坡西部活动性滑坡群的分维值最高, $D = 1.483$, 黄土坡滑坡的分维值最低, $D = 1.111$ 。主要结论包括: (1) 滑坡边界轨迹存在统计上的自相似性, 具有分形结构特征; (2) 滑坡轨迹结构的宏观扩展变形过程是一个增维过程, 而不是降维过程; (3) 滑坡轨迹结构越复杂, 有序性越好, 分维值越高, 其稳定性越差; 因此, 分数维可作为衡量滑坡轨迹结构复杂性和稳定性的重要标志。

关键词: 黄腊石滑坡; 黄土坡滑坡; 滑坡轨迹结构; 分形分维。

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)01-0061-05

作者简介: 吴树仁, 男, 研究员, 1956 生, 1994 年毕业于中国地质大学(武汉), 获工程地质博士学位, 现主要从事工程地质和构造地质研究。

20 世纪 90 年代以来, 分形分维在工程地质方面的应用^[1,2], 特别是在活动断层方面的应用逐渐受到普遍重视和关注^[3,4]。但是, 滑坡几何学的分形分维研究却涉及较少, 目前尚处于起步探索阶段^[5,6]。本文试图以长江三峡地区著名的黄腊石滑坡和黄土坡滑坡为例, 探讨典型滑坡系统的几何分形结构特征、分数维计算及其滑坡动力学信息和意义。

1 滑坡基本特征概述

黄腊石滑坡和黄土坡滑坡紧邻巴东县城, 分别位于长江左岸和右岸彼此斜对面展布。受沿长江展布的东西向次级向斜控制, 滑坡区出露的中三叠统巴东组中薄层泥灰岩缓倾角倾向北, 因此, 位于左岸的黄腊石滑坡属于逆向切层滑坡, 而右岸的黄土坡滑坡则是顺层滑坡(图 1)。

1.1 黄腊石滑坡基本特征

黄腊石滑坡是由古滑坡和新滑坡复合组成的一



图 1 滑坡区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the landslide area

1. 中三叠统巴东组泥灰岩; 2. 下三叠统嘉陵江组灰岩; 3. 背斜和向斜轴线; 4. 断层; 5. 岩层产状; 6. 滑坡体

个大型滑坡群体, 总面积约 1.58 km^2 , 总体积近 $4000 \times 10^4 \text{ m}^3$; 早期古滑坡形成年代距今约 $2 \times 10^4 \text{ a}$, 新滑坡在 20 世纪 80 年代以来变形、滑动痕迹明显。平面上滑坡群体分为东、西两部分: 其东部小滑坡群由几个小规模的新、老滑坡组成; 西部为活动性滑坡群, 是黄腊石滑坡的主体, 总体积大约 $2606 \times 10^4 \text{ m}^3$, 主要由相互套置的横坪滑坡和大石板—台子角滑坡组成(图 2a)。



图 2 黄腊石滑坡(a)和黄土坡滑坡(b)平面展布

Fig. 2 Plane map of the Huanglashi landslide (a) and Huangtupo landslide (b)

a 图据文献[7]略修改, b 图据文献[8]略修改. 1. 第四系坡积物; 2. 下侏罗统灰岩; 3. 中三叠统巴东组泥灰岩; 4. 新滑坡; 5. 古滑坡; 6. 泉眼; 7. 滑坡台陷; 8. 裂缝和剪切带

西部主体滑坡群形似舌状, 南北长约 1 200 m, 东西宽 400~650 m; 滑体主要由巴东组泥岩、粉砂岩和泥灰岩经不同程度的破坏而形成的散裂岩、碎裂岩和部分层状块裂岩组成, 表层堆积少量第四系崩坡积碎块石土; 滑体中部和前缘泉眼呈带分布; 主滑带厚 0.3~1.1 m, 代表性产状为 $185^{\circ}\angle 35^{\circ}$, 主要由粘土质摩擦泥、摩擦叶理、胶结疏松的碎裂岩、方解石脉体和摩擦薄膜组成, 据方解石微观变形构造和摩擦面上的擦痕分析^[9], 滑坡至少经历过 3 次明显的滑动.

20 世纪 80 年代以来, 西部主体滑坡群现今变形迹象明显^[7], 其现象和痕迹主要表现为: 横张裂缝和局部滑塌, 后部裂缝已构成弧形拉裂圈; 局部扩展变形均发生在每年的雨季, 表明降雨是现今变形的主要诱发因素; 变形范围有从前缘向后扩展的趋势, 滑坡前缘、中部和后缘均发生过局部扩展变形形成的小滑坡(图 2a), 显示滑坡处于全面启动的临滑状态; 目前变形明显集中在主体滑坡群的中上部, 滑坡变形从局部蠕动向整体蠕动发展, 存在整体下滑的潜在危险.

1.2 黄土坡滑坡基本特征

黄土坡滑坡是由多个较小的古滑坡组成的一个大型滑坡, 滑坡区的自然岸坡坡角较缓, 平均坡角 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$, 有多个平台, 因此是山区主要公路和城镇

场址首选地. 滑坡平面上整体呈上部稍尖的躺椅形, 南北长约 1 700 m, 上部宽 50~100 m, 沿江宽约 1 200 m(图 2b), 面积约为 1.15 km^2 , 总体积约 $3\,500\times 10^4\text{ m}^3$. 滑体平均厚度约 35 m, 上部 5~15 m 为厚度不等的第四系松散坡积层, 下部为被扰动或破裂的块状、层状破裂岩(原岩为巴东组泥灰岩和泥岩). 主滑带大致平行岩层面, 局部切割层面, 倾向北, 倾角 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$, 由若干个次级古滑带组成, 整体滑带还没有全线贯通. 因此, 目前黄土坡滑坡整体滑动的可能性很小, 但是, 20 世纪 90 年代以来, 随着巴东新县城建设的开展, 滑体局部变形加剧^[8], 主要表现为: 从 1991 年起, 滑坡区小型泥石流、崩塌、滑坡不断; 1993 年起多处出现裂缝, 并逐渐发展为有一定规模的变形域; 1995 年 6 月, 在三道沟沟口和二道沟下部分别形成变形体和小滑坡(图 2b). 其中, 二道沟下部的小滑坡面积约 $2\times 10^4\text{ m}^2$, 冲毁房屋 3 栋, 毁坏公路 100 m, 死亡 5 人, 重伤 2 人.

2 滑坡几何分形分维分析

2.1 滑坡轨迹分形含义及分维计算方法

目前, 关于分形几何学有多种定义^[10], 其中, 在地质上比较通用的是自相似分形定义, 即局部与整体以某种方式相似的形叫分形. 滑坡几何边界与海

岸线和河谷形态相类似具有自相似分形结构特性.以黄腊石滑坡为例,构成西部主体滑坡群的边界轨迹形态表现为:在后缘分布有大石板小滑坡、在中部有周家湾小滑坡、而在前缘展布有横坪小滑坡,这些小滑坡构成整体滑坡的局部边界,其形态与整体滑坡相似(图 2a).除此之外,从统计角度分析,复杂滑坡边界轨迹的自相似性普遍存在,因此,可以用分形分维来定量刻划滑坡边界轨迹结构.

分形分维的测量计算方法有多种^[10],对于一定小区的统计测量而言,盒维数法(box-counting techniques)简单而又客观,故目前得到普遍推广应用^[4].具体方法是:用不同边长 ζ 的正方形网格分别度量滑坡几何边界轨迹图,计算边界轨迹所充填的不同级别的方格数 $N(\zeta)$,并利用下式计算分维值:

$$D = - \lim_{\zeta \rightarrow 0} [\lg N(\zeta) / \lg \zeta].$$

实际计算时,在以 ζ 为横坐标, $N(\zeta)$ 为纵坐标的双对数坐标图上,用最小二乘法拟合直线段的斜率,即为所求的分数维 D .

2.2 黄土坡滑坡分维计算

根据滑坡轨迹的成图比例尺,这里采用 5 mm 为边长的方格作为基本单元构成测量网络分布图(图 2b),由此量得黄土坡滑坡轨迹占满 5, 10, 20, 40 和 80 mm 方格数(表 1),将这些数据投影到双对数坐标图上,获得其特征性的曲线,并由最小二乘法求得分维值 $D = 1.111$, 相关系数 $r = 0.997$ (图 3a).分维值较小,这表明黄土坡滑坡的边界轨迹分形结构相对较简单.

表 1 黄土坡滑坡边界轨迹测量数据
Table 1 Measurement data of the boundary trace pattern of the Huangtupo landslide

方格大小/mm	5	10	20	40	80
轨迹长度 ζ /m	>80	>160	>320	>640	>1 280
统计数量 $N(\zeta)$	66	29	12	7	3

2.3 黄腊石滑坡分维计算

黄腊石滑坡群的几何边界轨迹相对较复杂,并且东西两部分有所差异,彼此并没有连通,其分形结构各自存在相对独立性(图 2a),因此,在分数维测量计算过程中,分别计量整个滑坡系统、西部主体滑坡群和东部小滑坡群的边界轨迹.三者测量资料在双对数坐标上各自存在相对独立特性的曲线(图 3b).相对而言,西部主体滑坡群分维值最高,整个滑坡系统次之,东部小滑坡群分维值较低.从几何涵义



图 3 滑坡边界轨迹结构分维计算图解
Fig. 3 Fractal dimensions of the landslide boundary trace pattern
a. 黄土坡滑坡分维计算曲线; b. 黄腊石滑坡分维计算曲线, D_1 , D_2 和 D_3 分别为整体滑坡系统、西部主体滑坡群和东部小滑坡群计算曲线的分维值

上分析,这表示西部主体滑坡群几何边界轨迹相对复杂、分形结构层次清楚、滑坡(几何和运动)轨迹的有序性较好;而东部小滑坡群尽管边界轨迹也较复杂,但是,主体滑坡边界还未形成,分形结构层次较差,有序度相对较低(还未形成滑坡统一的轨迹结构和主体运动方向,图 2a).

尽管通过滑坡展布图的对比分析(图 2),也可判断黄土坡和黄腊石滑坡两者间的相对简单与复杂,但是,简单与复杂之间到底有多大的差别,其分数维值的相对大小是一种定量刻划标志,这也是分维计算最重要的几何意义之一.

3 滑坡边界轨迹分形分维意义探讨

这里以本文的典型研究资料为基础,将分形分维与滑坡演化过程分析相结合,探讨滑坡边界轨迹结构的分形分维涵义,重点是关于滑坡结构稳定性和动力学分析方面的意义.

(1)滑坡的形成发展实质上是河谷岸坡自身演化(不断求得稳定状态)的一个自组织过程^[1,6],而滑坡边界轨迹则记录了这个复杂演化过程的某些现象和信息.其中,有关滑坡几何结构的定性描述已经成为滑坡学研究的经典^[11];而定量刻划却一直处于探索阶段,分形结构及其自相似性分析为滑坡边界轨迹结构的定量研究开拓了行之有效的新思路,特别是在刻划滑坡自组织有序性方面具有重要意义.

(2)黄腊石滑坡西部主体滑坡群的分维值 $D_2 = 1.483$,黄土坡滑坡的分维值 $D = 1.111$ (图 3),这种

分维值的差异,既直观地记录了两者边界轨迹分形结构的区别(图 2),同时也反映了两者在滑坡动态演化阶段上的差异.对比而言,黄腊石滑坡西部主体滑坡群的整体滑动轨迹结构业已形成,结构层次清楚;滑坡前缘扩展域、中部扩展域和后缘扩展域相继启动(起爆滑动)分别形成横坪、周家湾和大石板小滑坡(图 2a)——滑坡已处于前、中、后全面启动的整体滑动状态,并且前缘扩展域与中部扩展域已经连通,导致中后部形成众多拉裂缝和两级滑坡台陷(图 2a),使滑坡全线滑动贯通的趋势逐渐明显.因此,其分形结构层次清楚,分维值高达 1.483,似乎接近于极限分维值.尽管,黄土坡滑坡的整体轨迹结构也已形成(古滑坡复合体),但是,其结构简单、缺乏层次,仅在滑坡前缘局部开始出现扩展变形域,后缘还没有明显的响应,中部也没有明显的扩展变形现象和信息(图 2b).因此,滑坡整体处于相对稳定状态,其分形结构所表征的分维值相对较低.

这些资料表明:在河谷岸坡从稳定到失稳崩滑再求稳定的自组织演化过程中,黄土坡滑坡作为古滑坡的相对稳定静止期已经结束,新的滑坡启动变形阶段才刚刚开始,故其轨迹分形结构开始增殖,分维值也开始大于 1.0;而黄腊石滑坡西部主体滑坡群则处于新的滑坡启动变形阶段的高峰期,积累了前期多次局部叠加变形滑动的现象和信息,轨迹分形结构从一个侧面记录了这些信息和轨迹增殖现象,故分维值高达 1.483;可见两者轨迹分形结构差异反映了其变形阶段的区别,分维值则定量刻划了不同演化阶段的轨迹分形结构特性;由此推断,随着滑坡宏观扩展变形的发展,其轨迹分形结构的分维值逐渐增加,即滑坡破裂发展增殖表现为一个增维过程,而不是降维过程.

(3)滑坡扩展变形存在一个极限,超过这个极限滑坡的局部失稳就转化为整体滑动;相应地滑坡轨迹分形结构的分维值也应存在一个极值,在极值点滑坡体处于临滑状态,一旦整体滑动发生,其主体滑坡边界轨迹会归并各分支小滑坡轨迹,其分维值将迅速降低,即滑坡整体滑动现象表现为降维过程.由此分析,滑坡形成演化到消亡的全过程,即从滑坡变形开始启动(岸坡开始失稳),到扩展变形发展高峰,直至整体滑动发生使岸坡获得新的稳定状态,表现为轨迹分形结构所记录的渐变增维过程和瞬间突变降维过程.问题的关键是如何确定增维和降维的转化点,也即如何确定具有普遍意义的滑坡轨迹分形

结构的分维极值,目前还缺乏统计性的大量研究资料.但是,地壳表层脆性断裂带在平面上扩展增殖的分维极值为 $1.60 \sim 1.80^{[12 \sim 16]}$.借鉴这些资料,则可推测滑坡轨迹结构的分维极值应小于 1.60,因为,岸坡在重力荷载下,其破裂密度比断层带小就会发生整体性失稳滑动.结合黄腊石滑坡西部主体滑坡群的稳定性和分形结构分析,其滑坡处于整体性的临滑状态,因此,其分维值 1.483 可能接近于分维极值.用这种标准来衡量黄腊石滑坡的东部小滑坡群和黄土坡滑坡,则可判断它们的轨迹结构处于整体上相对稳定的局部失稳发展阶段.

4 结论

(1)滑坡边界轨迹存在统计上的自相似性,具有分形结构特征,可用分数维定量刻划;(2)滑坡轨迹结构的宏观扩展变形过程是一个增维过程,而不是降维过程;(3)滑坡轨迹结构越复杂,有序性越好,分维值越高,其稳定性越差,因此,分数维可作为衡量滑坡轨迹结构复杂性和稳定性的重要标志;(4)滑坡临界滑动状态的轨迹分形结构,可用临界分维值——极限分维值来定量刻划,初步估算典型滑坡平面轨迹结构的极限分维值大致为 1.50(还有待统计资料的进一步证实).

需要说明的是:本文的资料有限,还有很多疑难问题有待进一步积累资料深入研究探讨,尤其是下面两方面的问题:(1)滑坡结构失稳临界分维值的确定,这需要对大量处于临界滑动状态的滑坡结构(包括边界轨迹的精确厘定)进行分形分维的统计分析;(2)滑坡分形结构是否独立于岸坡的岩土性质、结构和其他环境条件,或者它们对滑坡分形结构和分维值的影响程度.

参考文献:

- [1] 黄润秋,许强.工程地质广义系统科学分析原理及应用[M].北京:地质出版社,1997. 61~124.
- [2] 秦四清,张倬元,王士天,等.非线性工程地质学导引[M].成都:西南交通大学出版社,1993. 5~30.
- [3] 易顺民,唐辉明.活动断裂的分形结构特征[J].地球科学——中国地质大学学报,1995, 20(1): 58~62.
- [4] Cello G. Fractal analyses of a Quaternary fault array in the central Apennines, Italy [J]. Journal of Structural Geology, 1997, 19(7): 945~953.

[5] 易顺民,晏同珍. 滑坡定量预测的非线性方法[J]. 地学前缘, 1996, (1): 77~85.

[6] 周萃英,汤连生,晏同珍. 滑坡灾害系统的自组织[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1996, 21(6): 604~607.

[7] 李玉生,钟荫乾. 长江三峡工程库区大型滑坡崩塌[M]. 广州:广东旅游出版社, 1993.

[8] 崔政权. 巴东县城区主要地质问题暨紧急防治对策[A]. 见:何满潮,蒋宇静编. 三峡库区地质环境暨第二届中日地层环境力学国际学术讨论会论文集[C]. 北京:煤炭工业出版社, 1997. 15~22.

[9] 吴树仁,晏同珍,吴光. 长江三峡黄腊石滑坡缓倾角断裂显微构造研究[J]. 水文地质工程地质, 1993, (2): 27~31.

[10] 谢和平. 分形—岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社, 1996.

[11] 晏同珍. 滑坡构造力学某些特征分析[J]. 地球科学——武汉地质学院学报, 1981, (2): 223~239.

[12] Babaie H A, Hadizadeh J, Babaei A. Self-similar cataclasis in the Saltville thrust zone, Knoxville Tennessee [J]. J Geophys Res, 1995, 139(B9): 18075~18084.

[13] Cowie P A, Sornette D, Vanneste C. Multifractal scaling properties of a growing fault population [J]. Geophysics Journal International, 1995, 122: 457~469.

[14] Cowie P A, Knipe R J, Main I G, et al. Scaling laws for fault and fracture populations: analyses and applications [J]. Journal of Structural Geology, 1996, 18: 135~383.

[15] Wojtal S F. Fault scaling laws and temporal evolution of fault systems [J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16: 603~612.

[16] 赵中岩,王毅. 碎裂岩的分数维分析:理论、方法及地质意义[J]. 地质科学, 1992, (3): 282~290.

FRACTAL ANALYSIS OF HUANGLASHI AND HUANGTUPO LANDSLIDES
IN THREE GORGES, CHANGJIANG RIVER, CHINA

Wu Shuren¹ Shi Ling¹ Tan Chengxuan¹ Hu Daogong¹ Mei Yingtang² Xu Ruichun²
(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China; 2. Sanxia Exploration Survey Institute, Changjiang Water Conservancy Commission, Yichang 443003, China)

Abstract: In order to discover a new approach to the quantitative analysis of the evolution and stability of the complex landslide trace pattern, the fractal theory is employed to analyze the geometrical fractal pattern of the self-similar boundary trace between the Huanglashi landslide and the Huangtupo landslide in the fore-reservoir region of the Three Gorges, Changjiang River. In addition, the box dimension method is employed to obtain the characteristic slope curves and fractal values for the corresponding fractal patterns of the active landslide cluster in the west of the Huanglashi landslide, the small landslide cluster in the east of the Huanglashi landslide, the whole landslide system of the Huanglashi landslide, and the Huangtupo landslide respectively. The computation results show that the trace pattern of each landslide cluster is characterized by its characteristic fractal value. The more complex the trace pattern, the clearer the structure layers, and the higher the fractal value. In particular, the highest fractal value is $D = 1.483$ located in the active landslide cluster in the west of the Huanglashi landslide, and the lowest fractal value $D = 1.111$ located in the Huangtupo landslide. The fractal analysis of the Huangtupo landslide and the Huanglashi landslide provides us with the following major conclusions: (1) The statistical self-similarity and the fractal structure are both present in the boundary trace between the landslides. (2) The macro-extension deformation process of the landslide trace pattern is characterized by the increase in the dimension instead of the decrease in the dimension. (3) The more complex the landslide trace pattern, the better the sequential order, the higher the fractal value, and the poorer the stability of the corresponding landslide. Therefore, the fractal dimension may serve as a statistical assessment criterion for the analysis of the complexity and stability of the landslide trace pattern.

Key words: Huanglashi landslide; Huangtupo landslide; landslide trace pattern; fractal dimension.