

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.014

基于三维可视化模型的高边坡演化过程分析

郑文棠¹,张勇平²,李明卫³,马志强⁴

(1.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098;2.四川电力设计咨询有限责任公司,四川 成都 610016;
3.中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院,贵州 贵阳 550002;4.北京市勘察设计院,北京 100038)

摘要:以金沙江两家人滑石板高边坡为例,通过由 AutoLisp 语言编程提取的 AutoCAD 地形图元,给出了栅格网格地形和任意网格地形的可视化模型,并利用该模型分析了滑石板高边坡演化过程,同时根据该模型中的滑塌岩体体积及未滑塌地形特征还原了滑塌边坡原地形。仿真结果表明,三维 AutoCAD 可视化模型可为滑石板边坡的数值分析提供地质和力学模型,在水利水电工程的边坡工程中可取得较好的应用效果。

关键词:可视化模型;高边坡演化;滑坡仿真

中图分类号:TU457 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2009)01-0066-05

水利水电工程选址大多处于高山峡谷,地形险峻,交通不便,给现场工程地质勘察造成了巨大困难。如何利用计算机仿真手段处理航空遥感的地质图形资料,分析坝址区域高边坡的工程地质特征及其演化过程,是当今三维可视化研究的热点。文献[1-4]应用 OpenGL 技术探讨了非 AutoCAD 平台的可视化实现方法,但水利工程设计以 AutoCAD 平台为主,非 AutoCAD 平台可视化技术不能快速地提取工程资料信息。文献[5-6]虽然应用 AutoCAD 平台构建了地质模型,但在关键插值技术实现上仍采用其他软件。

本文以金沙江两家人滑石板高边坡(图 1)为例,给出了基于 AutoCAD 平台的栅格网格和非栅格网格的地质可视化实现方法,并根据可视化模型从地质力学角度分析了滑石板高边坡的演化过程,同时还根据可视化模型未滑塌地形特征及滑塌量探讨了滑坡原地形的还原方法。



图 1 滑石板高边坡地形
Fig. 1 Topography of Huashiban slope

1 三维地形可视化仿真

1.1 等高线、控制点、文本点的读取

地质测绘、航空遥感得到的等高线在 AutoCAD 的 DWG 文件中被保存为一系列的三维 POLYLINE 图元。这些图元实际上是由高程控制点(AutoCAD 中对应为 INSERT 图元)插值生成的。POLYLINE 图元和 INSERT 图元都是 AutoCAD 中专门设置的一种实体名,存储了一系列空间地形点的坐标信息。等高线及控制点的高程标注文本也是可以校勘和补充的三维地质点信息,在 AutoCAD 中对应为 TEXT 图元。AutoCAD 的各种图元如图 2 所示。本文编制了嵌入于 AutoCAD 内部的人工智能语言 AutoLisp^[7-8]程序,利用该程序可以读取各种 AutoCAD 图元信息。程序模块如下:

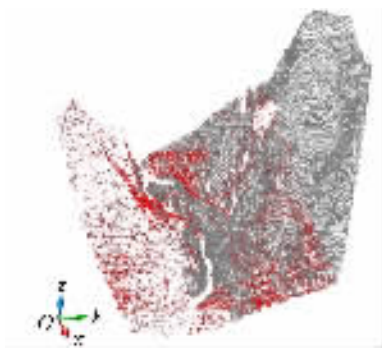


图 2 多图元信息综合 AutoCAD 图
Fig. 2 AutoCAD chart with multiple graphic elements

```
SelData( ssget " X "( List( cons 8 " 控制点 ")( cons 0 " INSERT ")))
SelData( ssget " X "( List( cons 8 " 等高线 ")( cons 0 " POLYLINE ")))
SelData( ssget " X "( List( cons 8 " 高程标注 ")( cons 0 " TEXT ")))
(setq PointData( entget SelectData ))
(setq SelectPoint( assoc 10 PointData )))
(setq x( rtos( cadr SelectPoint ) 2 4 )
y( rtos( caddr SelectPoint ) 2 4 )
z( rtos( caddr SelectPoint ) 2 4 ))
```

其中高程控制点图元代表了实际点的真实高程,其精度最高.当局部区域的控制点没有高程值或高程异常(为负值或超出最大高程)时,可用等高线及高程标注文本对应的高程值补充.

1.2 栅格插值点及地形网格点的生成

地形仿真比较简便的方法就是利用栅格网格来模拟地形起伏.设定区域边界及栅格网格的长度和宽度,就可以确定区域内均匀分布的栅格插值点的平面坐标 x,y .栅格点的高程插值采用滑动最小二乘法(MLSM)^[9].在采用 AutoLisp 程序导出地形点数据时,优先采用高程控制点,其次为等高线的地形点,这样可提高地形仿真的精度.缺失地形可用标注文本值补充.栅格化后的插值点阵如图 3 所示.

1.3 AutoCAD 三维可视化地形图的生成

利用生成的栅格点,由区域内部相邻 4 点构建四边形曲面地形,区域边界相邻 3 点构建三角形地形,在 AutoCAD 中采用按高程变化设置的不同颜色的 3DFACE 图元来模拟三维曲面地形.滑石板滑坡处的三维可视化地形如图 4 所示.采用 AutoLisp 语言生成 3DFACE 图元的代码如下:

```
(entmake( list ( 0. " 3DFACE " ) ( 8. " 三维地形 " ) ( 62. " color ")( cons 10( list x1 y1 z1 ))( cons 11( list x2 y2 z2 ))( cons 12( list x3 y3 z3 ))( cons 13( list x4 y4 z4 ))))
```

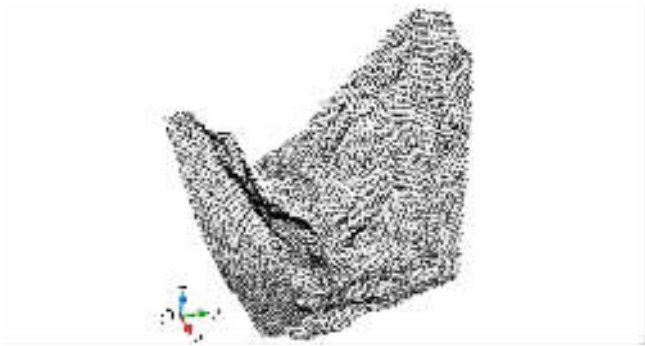


图 3 栅格化形成的 AutoCAD 点阵

Fig. 3 AutoCAD lattice diagram by use of grid technology

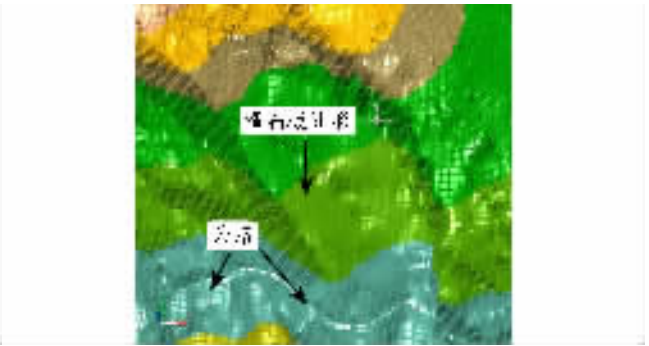


图 4 拟合的三维可视化 AutoCAD 地形

Fig. 4 Fitting 3D visualization AutoCAD topography

2 滑石板高边坡演化过程分析

滑石板高边坡位于虎跳峡峡谷出口处左岸滑石板附近,金沙江在此处流向 $N40^{\circ} \sim 45^{\circ}E$,河水面高程 1 600 m 左右,地形坡度约 40° ,坡顶高程 2 600 ~ 3 000 m,组成坡体岩性为石炭系中厚层状大理岩、结晶灰岩夹少量石英片岩及绢云母绿泥片岩.边坡岩体基本以 2 200 m 高程为界,呈上缓下陡趋势.受边坡岩体重力作用的影响,公路(1 875 m)高程以下岩面波状起伏且不平整,其产状略陡于公路高程以上的岩层,岩层内部层间错动面发育,沿层间错动面绢云母、绿泥石等片状矿物富集.

三维地形可视化模型(图 4)较好地模拟了滑石板右岸不同区域发育的多期滑坡面和陡坎.下面根据三维地形可视化模型,首先分析河谷下切的地质历史过程,然后用地质力学分析方法来揭示滑石板高边坡的演化、建造过程以及变形破坏机理.

滑石板高边坡的演化和建造过程是多期河流侵蚀下切的表生营造和地震引发滑坡的综合塑造过程.河流的强烈下切和高烈度区域的地震崩塌构成了滑石板高边坡陡坎遍立、滑面平斜的地形地貌特征.其中 1996 年 10 月 28 日 8 时左岸滑石板区发生的大型基岩滑塌,构成了近期滑石板陡峭的斜板状地貌.分析滑石

板边坡在地质历史时期的失稳成灾机理,可揭示未来可能的变形破坏演化模式,从而可为工程单位制定滑石板边坡变形破坏的加固措施提供依据。

黄润秋^[10-11]对中国西南高边坡的主要特征及其演化过程进行了分析,提出了自然河谷高边坡发育的表生改造、时效变形和失稳破坏3阶段理论。借鉴其思路,可以将滑石板高边坡的演化形成过程看成一个复杂动态的地质力学相互作用、自然改造和人类活动并存的过程,从现象上可以将此过程分为坡表营造、变形演化、地震触滑和工程变形4个阶段,并认为4个阶段分别对应4个宏观的力学作用过程。

2.1 坡表营造阶段

在滑石板边坡未形成前的地质历史上,即距今20万~50万a前,金沙江尚未形成,此时滑石板可视为统一的夷平面,其后产生了极强烈的河谷侵蚀下切作用,在金沙江两岸形成4级堆积(或基座)阶地,逐步形成高差达2000多m的V字形深切河谷,同时塑造出急剧起伏的高陡连续边坡地貌形态。由于在河流的分期下切中产生了侧向的卸荷作用,斜坡产生向临空面方向的卸荷回弹变形,坡内应力场随之出现调整,形成初始河谷地应力场,同时伴生出边坡表层的变形和破裂现象,工程地质上表现为浅层卸荷带和坡表卸荷结构面。这个阶段即为坡表营造阶段,其主要作用体现在如下2个方面:

a. 金沙江河谷应力场的形成。金沙江河谷地应力场是一个特殊的局部地应力场,呈现一个不均匀的驼峰应力分布。从坡表向坡内可分为浅表应力松弛区、应力增高区、应力过渡区及应力正常区。从两家人坝址金沙江河谷应力场伴生的地质现象上看,主要表现为坡表卸荷、河谷钻孔岩芯饼化、平洞局部岩体岩爆、洞室岩体片状剥落和片帮等。

b. 工程地质条件的劣化和滑坡体几何边界条件的塑造。金沙江河谷强烈侵蚀下切引起的卸荷作用,破坏了滑石板边坡岩体内部的应力状态,引起了岩体应力的二次重分布,在岸坡浅部形成平行于坡面的张性陡倾裂缝,演化出浅部卸荷松弛带,破坏了岸坡岩体结构,导致岩体和结构面强度的降低,形成岸坡继续变形的几何和力学边界条件等。从表生营造对滑石板边坡几何边界条件的塑造上看,滑石板区域南北两侧分布着近东西向的连续陡坎,构成了变形破坏的临空面;分布于东部靠江区域且高程低于公路高程(1875m)的岩体,其岩层产状陡于滑石板边坡,构成了剪切出口的临空面;滑石板顶部的卸荷松弛带,发育了陡直的卸荷裂隙,现场勘察表明其滑落后缘面分布一产状为 $N10^{\circ}W$ 组的拉张陡倾裂隙,在边坡自重作用以及暴雨地震条件下将继续扩展演化,形成顶部后缘拉裂面。

2.2 边坡变形演化阶段

金沙江河谷的侵蚀下切是一个长期的过程,边坡的表生营造也是一个连续的随时间不断变化的过程。长期的变形破坏塑造了如今陡坎遍立、滑面平斜的地貌。从图5可视化模型可以看出,金沙江深切河谷形成的滑石板高陡边坡具有阶梯状的相似性,其破坏过程表现为底部剥蚀带动中上部岩体滑动崩塌的倾倒破坏,但在工程运行期间,边坡的表面形态是稳定的。相对来说,河谷下切引起的边坡表生营造是缓慢而可以忽略不计的。现阶段边坡的应力状态调整已经完成,几何边界条件也较为稳定,边坡应力场逐渐变为以自重应力场为主,在自重作用下,边坡上切脚岩体逐渐松弛,层间错动面内聚力降低,同时地表水入渗浸润,将使层间错动面抗剪强度参数进一步降低,边坡在弱结构面的组合下局部岩体处于临界破坏状态,但没有强烈的外界作用仍不至于失稳。

2.3 地震触发及高速滑动阶段

滑石板高边坡的长期变形演化是一个缓慢的蠕滑过程,伴生一些坡表的卸荷和张拉裂隙,但不至于造成边坡失稳。外动力的突发因素才可能导致边坡从缓慢变形突变至快速滑动的阶段。自然营造作用(地震、暴雨等)都可能导致边坡局部不稳定岩体出现滑坡。分析近期以来的地质灾害现象,可以揭示滑坡失稳成灾机理,从而预测今后边坡的变形破坏演化规律。

相对于现场实际地形照片(图6),可视化模型(图5)模拟精度较高,同时可将遥感地形整体三维可视化和局部细化。1996年2月3日17时丽江发生的7.0级大地震,促使了滑石板边坡潜在滑面的形成。10月28日8时滑石板左岸区发生了大型基岩滑塌,形成了滑石板两侧陡坎遍立、滑面平斜的现貌。1996年地震滑坡后的滑石板区可分为3个小区:一区为已滑塌岩体区;二区为切脚岩体区;三区为滑塌堆积区。一区分布高程1610~2360m,相对高差约750m,滑塌区斜长约868m,斜面面积约 $15.4 \times 104 \text{ m}^2$,滑塌岩体平均厚度约15m,则已滑塌岩体体积约 $230 \times 104 \text{ m}^3$,滑塌岩体为石炭系中厚层至厚层大理岩、结晶灰岩,滑动面光滑,起伏不大,其层面上见绢云母、绿泥石等片状矿物富集;二区分布高程2070~3000m,是继承已滑塌区形成的新的切脚岩体区,为滑石板区新的

潜在滑塌区 ,1996 年滑石板基岩滑坡产生的滑塌堆积体顶面高程 1 660 m 现仍有部分残留堆积在河床对岸 ,形成堆积体 .比较周围的地形可知 ,滑石板同级高程内孕育了多处相似的先期滑落地形 .这表明滑石板边坡区域变形破坏的模式是河流强烈下切和高烈度区域的地震崩塌共同作用的结果 ,由此可推断今后边坡变形破坏的主导因素也是河流下切和地震崩塌 ,且今后潜在的滑落区分布于同级阶地的下游侧 .

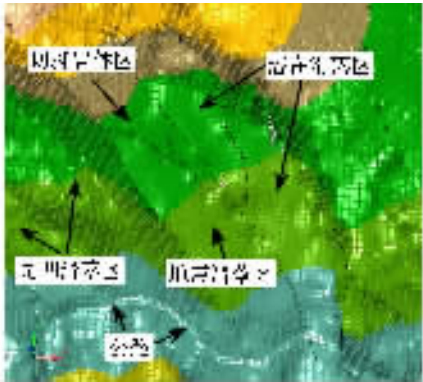


图 5 滑石板边坡可视化局部地形

Fig. 5 Local topography of 3D visualization model for Huashiban slope

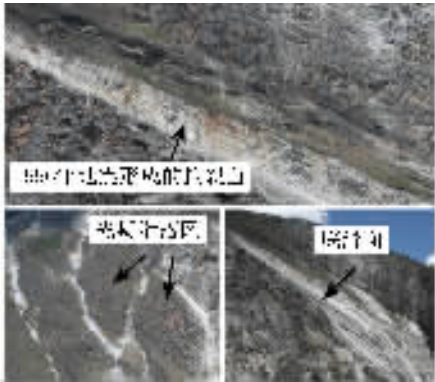


图 6 滑石板边坡地形照片

Fig. 6 Photo of topography of Huashiban slope

2.4 工程变形阶段

滑石板边坡尚处于稳定状态 ,若出现人类工程活动 (如边坡开挖和爆破、水工建筑物修筑、库水位快速回落等) ,边坡的应力应变状态则不能保持稳定 ,而将进入失稳破坏的突变状态 .如滑石板坡脚处的边坡开挖、滑石板坡内的地下洞室开挖 ,将形成坡脚处的应力集中区 ,当边坡开挖的几何形体及坡脚应力集中达到一定程度时 ,岩体会发生软化趋势的大变形 ,甚至引起破坏和滑移 .采用工程加固手段可以提高边坡稳定性 ,同时也可改善边坡开挖区域的应力集中现象 .

3 边坡滑坡地形还原的数值仿真

根据三维可视化模型可以分析滑石板边坡的破坏演化模式 ,也可以推测滑塌岩体体积和还原滑坡原地形 ,还原的滑坡地形对数值模拟滑坡破坏过程、反演滑动面力学参数、预测潜在滑坡的稳定性都具有重要的意义 .

在三维地形展示中 ,可视化模型可采用较密集的栅格插值点 ,但用数值模型来模拟滑坡破坏过程时 ,网格较多会导致刚体过多 ,从而影响计算效率 ,故以陡崖边界和滑石板边界为控制网格边界 ,采用非栅格网格进行地表插值并构建三维地形表面 .对岩体边界模拟来说 ,非栅格网格模型比栅格网格模型的精度更高 ,并且可控制网格数量 .从地貌学的连续性可以推断 ,在未滑塌前 ,滑塌体顶部地形与右侧未滑塌地形为一连续的整地形 ,因此可采用高次多项式来拟合未滑塌地形的地形曲面方程 ,滑塌体的平均厚度可根据滑塌岩体体积确定 .在已滑塌地形的插值点上 ,设置竖直的人造桩 ,求出人造桩与拟合的高次地形曲面方程的交点 ,就可得到原地形的高程值 ,从而可还原出滑塌岩体原地形 .还原后的 AutoCAD 三维地形如图 7 所示 .

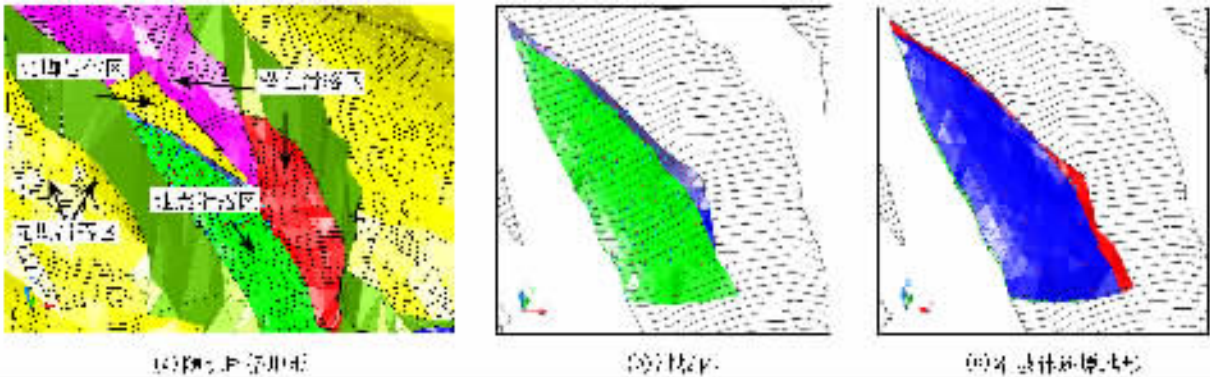


图 7 随机网格 AutoCAD 三维可视化滑坡模型

Fig. 7 3D AutoCAD visualization landslide model of random topography

4 结 语

本文以金沙江两家人滑石板高边坡为例,探讨了基于 AutoCAD 图元的三维栅格及非栅格可视化地形模型的构建方法.通过滑石板高边坡三维 AutoCAD 可视化模型,揭示了滑石板边坡的演化破坏过程,预测了潜在的滑落区,并还原了滑坡体原地形.仿真结果表明,三维 AutoCAD 可视化模型可为滑石板边坡的数值分析提供地质和力学模型,在水利水电工程的边坡工程中可取得较好的应用效果.

参考文献:

- [1] 李浩,张雅楠,杨彪,等.影像地质编录成果的三维可视化及查询分析方法[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):668-672.
- [2] 吴海波,沈祖谕.基于VC++技术面向对象的水电站仿真培训系统[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(2):148-151.
- [3] 吕秋灵,张俊霞.三维地形可视化及其实时显示方法[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(4):85-87.
- [4] 宋海良,王帅,刘杰,等.大型地下洞室群地质信息三维可视化分析与应用[J].水利水电科技进步,2007,27(6):80-84.
- [5] 徐文杰,胡瑞林,李厚恩,等.CAD软件在工程地质三维建模中的应用[J].工程地质学报,2007,15(2):279-283.
- [6] 许文达,程心恕.边坡稳定性分析及CAD图形处理技术[J].福州大学学报:自然科学版,2003,31(4):466-469.
- [7] WINSTON P H. LISP程序设计[M].黄昌宁,陆玉昌,译.北京:清华大学出版社,1983.
- [8] 马希文,宋柔. LISP语言[M].北京:高等教育出版社,1983.
- [9] 郑文棠,徐卫亚,童富果,等.复杂边坡三维地质可视化和数值模型构建[J].岩石力学与工程学报,2007,26(8):1633-1644.
- [10] 黄润秋.中国西南岩石高边坡的主要特征及其演化[J].地球科学进展,2005,20(3):292-297.
- [11] 黄润秋.地质灾害过程模拟和过程控制研究[M].北京:科学出版社,2002.

Evolution process of high slopes based on 3D visualization model

ZHENG Wen-tang¹, ZHANG Yong-ping², LI Ming-wei³, MA Zhi-qiang⁴

(1. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Sichuan Electric Power Design and Consulting Co., Ltd., Chengdu 610016, China;

3. Guiyang Hydropower Investigation Design and Research Institute, CHECC, Guiyang 550002, China;

4. BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The Huashiban slope on Jinsha River was taken as a case. The AutoCAD graphic elements of the topography were extracted by programs with language AutoLisp. The grid topography and arbitrary topography were both introduced to establish a 3D visualization model. Based on the visualization model, the evolution process of Huashiban slope was analyzed, and the original topography was simulated according to the amount of landslide rock and the characteristics of residue topography. The simulated results show that the 3D visualization topographic model can be employed to establish geological and mechanical models for numerical analysis, and it is applicable to the high slopes in hydraulic and hydropower engineering.

Key words: visualization model; slope evolution; landslide simulation