

# 三峡库区奉节县新城区 $T_2b^3$ 泥质灰岩斜坡变形破坏模式的现象学研究

罗元华<sup>1</sup>, 伍法权<sup>2</sup>, 常中华<sup>2</sup>

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 三峡库区奉节县新城区边坡, 由于其变形破坏的成因机制和破坏堆积体的特殊性质, 成为三峡库区地质灾害防治和边坡防护工程的重中之重, 其主要地层“巴东组”第3段泥质灰岩也成为学术界和工程界多年来争论的焦点问题之一。通过现象学的研究方法, 对泥质灰岩边坡变形破坏成因机制得到如下认识: (1) “巴东组”第3段泥质灰岩岩性脆且易碎, “渗入性”风化导致了大范围岩体强度降低并形成“酥松”结构; (2) 边坡岩层通过切层压裂和沿陡倾和中倾节理的重力滑移剪切破坏, 形成岩层的结构松动和逐级错动的重力弯曲现象, 使边坡岩体的结构强度显著降低; (3) “巴东组”第3段泥质灰岩边坡破坏所形成的堆积物成分均一、完全无规则排列、无滑坡滑动面(带), 不是滑坡和崩塌堆积物, 而是边坡一定范围结构崩溃解体的产物; (4) “巴东组”第3段泥质灰岩边坡的变形破坏过程是由于风化引起岩石力学性质弱化和重力变形导致岩体结构松动, 直至整体结构崩溃的复合过程。

**关键词:** 边坡工程; 泥质灰岩; 边坡; 重力弯曲; 结构崩溃

**中图分类号:** TU 457

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2005)12-2029-06

## PHENOMENOLOGY RESEARCH ON DEFORMATION AND FAILURE MODES OF SLOPES COMPOSED OF ARGILLACEOUS LIMESTONE OF THE THIRD NUMBER OF BADONG GROUP ( $T_2b^3$ ) IN NEW SITE OF FENGJIE COUNTY OF THREE GORGES RESERVOIR AREA

LUO Yuan-hua<sup>1</sup>, WU Fa-quan<sup>2</sup>, CHANG Zhong-hua<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Slopes in the new site of Fengjie County, Three Gorges Reservoir area, are the most concerned problems among prevention of geological hazards and protection of slopes, because of their occurrence mechanism of deformation and failure and special property of their deposits. The stratum of the argillaceous limestone of the third number of Badong Group ( $T_2b^3$ ), is one of the argumentative focuses among scientific and engineering domain. The following viewpoints on the occurrence mechanism of deformation and failure of argillaceous limestone are obtained with phenomenology research: (1) Property of argillaceous limestone is fragile and rock mass strength decreases and crisp structure are formed by infiltrative weathering; (2) Slope rock mass, by compression cracking and sliding along the steep and moderate steep plane, produces the gravitational bend phenomena of loose structure, one by one cascade, resulting in remarkable decrease of rock structural strength; (3) The deposit composed of argillaceous limestone is almost homogeneous, irregular arrangement, without uniform sliding belt. It is not deposit of landslide or rock mass falling, but the product of slope structural

**收稿日期:** 2004-06-29; **修回日期:** 2004-09-28

**作者简介:** 罗元华(1962-), 男, 博士, 1982年毕业于武汉地质学院水文地质专业, 现为博士后、研究员, 主要从事边坡工程方面的研究工作。

E-mail: luoyh@public3.bta.net.cn.

decomposition in certain range ; (4) Deformation and failure process of argillaceous limestone are resulted from weakness of rock mechanical property caused by weathering and from loose structure caused by gravitational bend ; and finally , the whole structure of rock mass is entirely collapsed.

**Key words :** slope engineering ; argillaceous limestone ; slope ; gravitational bend ; structural collapse

# 1 引言

众所周知，与长江三峡水库工程相关的移民工程是一项举世瞩目的巨大工程，全库区需要搬迁总人口达到 120 万人，迁建县城(城市)12 座，集镇 116 座，搬迁城(集)镇中多数因地制宜而建成为“山城”。

奉节县是三峡库区移民的重点县之一，新县城移民总人数达 13 万人，规划建设用地面积 6.76 km<sup>2</sup>，沿长江左岸分布长度达 13 km，分为 8 个相对集中建设区，号称“8 个中心，1 个基本点”<sup>[1]</sup>。图 1 为奉节县新城三马山主城区。



图 1 奉节县新城三马山主城区  
Fig.1 Sanmashan urban area of New Fengjie County

奉节新城区内褶皱宽缓，大部分地区岩层走向近东西向，与长江流向近于平行，缓倾坡内，倾角 5°~30°。岩层中切层节理较为发育，切层节理受岩层厚度的制约，延伸长度一般不大，而间距较小。4 组优势节理的几何数据见表 1，赤平投影见图 2。薄至中厚层的“巴东组”第 3 段(以下简称“巴 3”)泥质灰岩被密集的切层节理切割，为该区边坡岩体结构的重要特征。

表 1 主要节理几何数据表  
Table 1 Geometrical parameters of main joints

组次	优势倾向 / (°)	优势倾向 / (°)	平均间距 /m	平均长度 /m
J1	50	64	1~2	0.5~1.0
J2	150	62	0.2~0.8	1~2
J3	200	54	0.5~1.0	1~3
J4	280	45	0.3~1.0	2~3

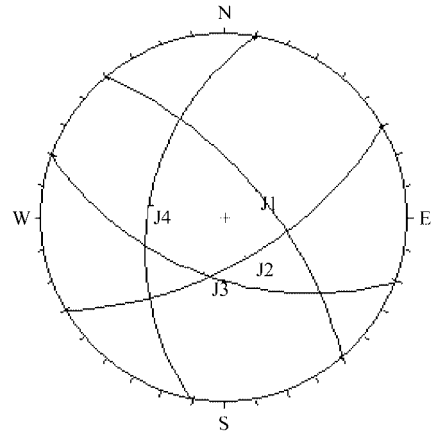


图 2 主要节理赤平投影图  
Fig.2 Stereographic projection of main joints

# 2 “巴 3”泥质灰岩边坡风化与松动变形的剖面特征

“巴 3”泥质灰岩的总体特征是：单层厚度不大，受节理切割严重；岩性呈脆性，容易破碎；由于岩体裂隙发育，加剧了岩体与外界的水分和空气交换，风化呈“渗入性”特征，即岩体在较大范围内以相互接近的程度同时受到风化，表层的风化壳对内部岩体屏蔽能力差。

图 3 所示为“巴 3”泥质灰岩边坡岩体的风化与松动变形的代表性剖面。一般在坡表存在 3~5 m 厚的全风化带，岩石变成土状。其下为 30~50 m 乃至上百米的强风化-松动变形带，岩体一方面因风化降低强度而变得相对容易破碎；另一方面也因卸荷等原因而在较大范围内发生强烈的松动变形，形成一个厚度巨大的“酥”而“松”的带。这部分岩体的岩石强度和结构强度均显著降低，极易发生“整体崩溃”，而道路与建筑边坡常常就开挖在这部分岩体之中。再往内部为弱风化带岩体，这部分岩体呈中等风化，岩石强度有一定降低，但岩体结构的松动较弱。

表 2 列出了该区巴东组第 2, 3 段地层在不同风化程度下的湿单轴抗压强度试验值，可见风化将使泥质灰岩的强度明显降低，导致岩体极易被压碎。



图 3 鱼复加油站泥灰岩边坡岩体风化与松动变形特征

Fig.3 Unloading deformation and weathering features of argillaceous limestone in the slope of Yufu petro-station

表 2 “巴 2”、“巴 3” 岩石抗压强度试验参数

Table 2 Axial compressive strengths of the second and the third number of Badong Group

地层段	试样编号	湿单轴抗压强度/MPa	试样性状描述
“巴 2”	Rb2 - 801 ~ Rb2 - 1003	12.60 ~ 22.40	紫红色粘土质粉砂岩, 强风化
	Rb2 - 1102 ~ Rb2 - 1203	51.90 ~ 57.60	紫红色粘土质粉砂岩, 强 ~ 弱风化
“巴 3”	Rb3 - 301 ~ Rb3 - 403	16.15 ~ 24.80	灰色泥灰岩为主, 强风化
	Rb2 - 801 ~ Rb2 - 1003	10.69 ~ 49.27	灰色泥灰岩, 强 ~ 弱风化

### 3 “巴 3” 泥质灰岩边坡变形的细观模式

从边坡岩体的局部变形现象看,“巴 3” 泥质灰岩边坡变形的细观模式包括下列 3 种情形:

#### (1) 压裂

沿层面法线方向的挤压作用使岩层沿切层节理发生劈裂张开, 如果存在层间软弱层带的顺层塑性流动变形, 则为泥质灰岩的这种劈裂张开提供了更为有利的条件。劈裂张开裂隙的宽度随着水平埋深的增加而减小, 坡表最大张开宽度可达十几厘米(图 4)。这种破坏模式导致了泥质灰岩层在较大范围内结构变松散, 为整体的结构崩溃准备了条件。

#### (2) 重力滑移

在泥质灰岩中存在中等倾角倾向坡外的节理时, 岩层可能沿节理面发生重力滑移破坏(图 5), 同时由于滑动牵引, 使密集的切层节理拉开, 造成岩体结构松动。

#### (3) 逐级下错



图 4 泥质灰岩压裂张开破坏

Fig.4 Tensile cracking of argillaceous limestone



图 5 泥质灰岩沿节理的重力滑动破坏

Fig.5 Sliding failure along joints

在泥质灰岩中发育大量陡倾角倾向坡外的节理，且上下层位岩体较弱时，岩层可能发生自坡内向外的逐级下坐错动变形，每一级错动几厘米到“巴 3”数十厘米，并不存在集中的连续滑移破坏面(图 6)。但岩体结构因此而变得较为松散，容易被误判为滑坡体结构。



图 6 泥质灰岩岩层逐级下错破坏

Fig.6 Sliding one by one cascade of argillaceous limestone

#### 4 “巴 3”泥质灰岩边坡变形的宏观模式

“巴 3”泥质灰岩边坡变形在宏观上表现为上述 3 种细观模式的组合形式，即岩层一方面发生切层压裂，另一方面则发生沿陡倾和中倾节理的重力滑移剪切破坏，总体效果则是岩层的结构松动和逐级错动，导致岩层“似断非断”的重力弯曲(图 7)。崔政权将这种现象叫做“重力背斜”<sup>[3]</sup>。事实上，这种现象在奉节县新城区较为常见，其结构扰动范围一般可达到数十米乃至上百米。



图 7 大河沟重力背斜剖面

Fig.7 Gravitational anticline of Dahegou section

分析认为，导致这种重力弯曲的原因为：

- (1) 边坡应力场临近坡表处最大主应力集中、差应力增大，加剧了岩层法向的压缩变形和顺层拉伸松弛变形。

- (2) 向坡表方向，岩层风化加剧，岩层的弹性模量显著降低，压缩变形增大。表 3 列出了“巴 2”、“巴 3”地层现场变形试验结果，表现出风化对岩体模量的显著影响。

表 3 巴东组第 2, 3 段岩体现场变形试验参数<sup>[4]</sup>

Table 3 Experimental deformation parameters in-situ of the second number and the third number of Badong Group<sup>[4]</sup>

地层段	试点编号	平均弹性模量 $E/\text{MPa}$	简要地质描述
“巴 2”	$E_{YL-201} \sim E_{YL-203}$	310.0	紫红色粘土质粉砂岩，强风化
	$E_{YL-101} \sim E_{YL-103}$	227.1	紫红色粘土质粉砂岩，强~弱风化，岩体大多崩解
“巴 3”	$E_{CJ-101} \sim E_{CJ-103}$	1 201.2	灰色中厚层泥质灰岩，强风化
	$E_{CJ-201} \sim E_{CJ-203}$	3 222.0	灰色中厚层夹薄层泥质灰岩，强~弱风化

- (3) “巴 3”下部的“巴 2”为泥岩和粘土质粉砂岩，其变形模量显著低于“巴 3”地层，特别是在接近坡表的部位压缩变形加剧，给上覆“巴 3”地层的重力下坐提供了条件。

#### 5 “巴 3”泥质灰岩松动变形边坡的破坏模式

在奉节县新城区普遍出现如图 8 所示的边坡破坏堆积体。由于这种堆积体不仅结构特殊，而且在移民迁建工程中发现其作为地基和建筑高边坡具有不良的特殊性质，由此引起了对这种堆积体成因的长期争论<sup>[5]</sup>。不同学者曾经提出“坠覆体”、滑坡体、崩塌体、崩滑体、“土石混合体”、岩溶塌陷堆积体等多种概念来描述其成因和特性，因此，目前尚未得到统一认识。

“巴 3”泥质灰岩边坡破坏所形成的堆积物具有如下特征：(1) 成分均一，基本为泥质灰岩碎块石混杂堆积，堆积体厚度十几到几十米不等；(2) 堆积体表部相当大一个厚度物质呈完全无规则排列，堆积体中很少见到大型滑坡中局部残存的原岩结构；(3) 一般难以找到典型的滑坡滑动面(带)，而只是出现从松动层状结构到混杂堆积的结构过渡带，说明破坏过程中并不是沿某一个面或带发生大规模整体滑动。上述堆积物特征表明“巴 3”泥质灰岩边坡破坏的宏观模式为一种大范围结构解体或者崩溃，破坏部分是经前期变形而结构严重松动、强度显著降低的部分。

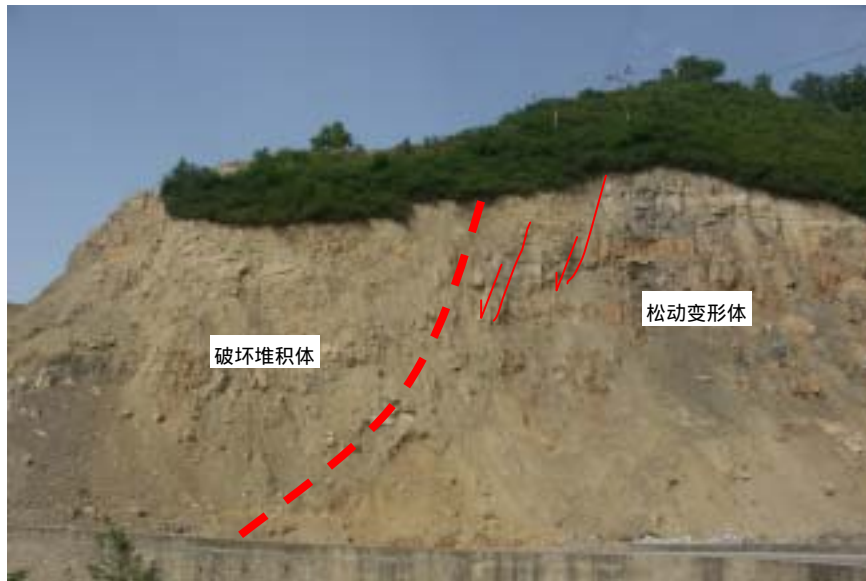


图8 汪家包边坡变形与破坏的大致界线

Fig.8 Failure and deformation of Wangjiabao slope

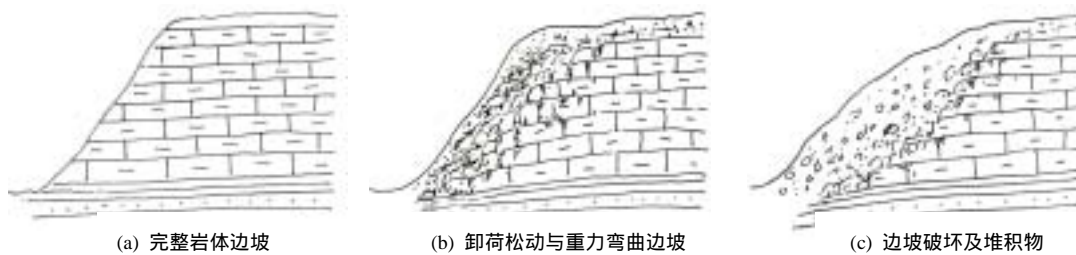


图9 奉节县新城区泥质灰岩边坡变形破坏过程示意图

Fig.9 Deformation and failure process of argillaceous limestone slope in Fengjie County

同时,这种堆积体在地貌形态上多不存在“滑坡后壁”、“双沟同源”及“滑坡台阶”等现象,不具备滑坡地貌特征;堆积物后缘也不存在高陡斜坡,不具备发生崩塌的地形条件。

上述堆积物的结构和地貌特征表明此类堆积体与滑坡和崩塌体的显著差别。

综合上述分析,可将奉节县新城区“巴3”泥质灰岩斜坡变形破坏过程图示如图9。图9(a)为完整岩体边坡剖面。随着边坡岩体的风化和雨水淋滤作用,岩层强度降低,加之卸荷作用和坡表附近下伏软弱岩层的压缩,泥质灰岩发生强烈的结构松动,逐步形成“重力背斜”构造(图9(b))。随着边坡的切割,结构松动部分的泥质灰岩发生结构崩溃和解体,迅速下坐形成混杂堆积体(图9(c))。

## 6 结论

从上述现象学研究可得如下基本认识:

(1) “巴3”泥质灰岩是一种特殊的介质,具有脆性易碎特点,“渗入性”风化可导致大范围岩体强度显著降低,形成“酥松”结构;

(2) 边坡岩层通过切层压裂和沿陡倾和中倾理的重力滑移剪切破坏,形成岩层的结构松动和逐级错动的重力弯曲现象,使边坡岩体的结构强度显著降低;

(3) “巴3”泥质灰岩边坡破坏所形成的堆积物成分均一、完全无规则排列、无滑坡滑动面(带),堆积物区也不存在滑坡地貌和崩塌地形,说明堆积物不是滑坡和崩塌成因,而是边坡一定范围结构崩溃解体的产物;

(4) “巴3”泥质灰岩边坡的变形破坏过程是由于风化引起岩石力学性质弱化和重力变形导致岩体结构松动,直至整体结构崩溃的复合过程。

## 参考文献(References):

- [1] 重庆市奉节县移民局. 三峡工程重庆库区奉节县城迁建及专业项

目复建规划实施方案[R]. 奉节:重庆市奉节县移民局,2000.(Fengjie Emigrant Bureau, Chongqing. Plan of reconstruction of Fengjie County of Three Gorges Project[R]. Fengjie: Fengjie Emigrant Bureau, Chongqing, 2000.(in Chinese))

[2] 常中华, 伍法权, 张二勇, 等. 三峡库区奉节县典型岩质斜坡变形破坏模式及成因机制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(4): 20-24.(Chang Zhonghua, Wu Faquan, Zhang Eryong, et al. Deformation and failure modes and occurrence mechanisms of typical rocky slopes in Fengjie County, Three Gorges Reservoir region[J]. Chinese Journal of Geological Disaster and Prevention 2004, 15(4): 20-24.(in Chinese))

[3] 长江水利委员会综合勘测局. 长江三峡工程库区地质问题的启示暨思维方式[R]. 武汉:长江水利委员会综合勘测局,1999.(General Investigation Bureau of Water Conservation Committee of Yangtze River. Thoughts methods of geological problems in Changjiang Three Gorges Reservoir area[R]. Wuhan: General Investigation Bureau of Water Conservation Committee of Changjiang River, 1999.(in Chinese))

[4] 长江水利委员会三峡勘测研究院. 长江三峡工程库区奉节县新城区护岸工程地质勘察报告(可行性研究阶段)[R]. 武汉:长江水利委员会三峡勘测研究院, 1999.(Three Gorges Investigation Institute of Water Conservation Committee of Yangtze River. Feasible study report of engineering geological investigation of bank protection of new site of Fengjie County of Three Gorges Reservoir[R]. Wuhan: Three Gorges Investigation Institute of Water Conservation Committee of Yangtze River, 1999.(in Chinese))

[5] 张年学, 盛祝平, 孙广忠, 等. 长江三峡工程库区顺倾岸坡研究[M]. 北京:地震出版社, 1993.(Zhang Nianxue, Sheng Zhuping, Sun Guangzhong, et al. Research on Consequent Slopes in Three Gorges Reservoir Area[M]. Beijing: Earthquake Press, 1993.(in Chinese))

## 《岩石力学与工程学报》2005 年第 7 期被 EI 收录论文(31 篇)题录

No.	论 文 题 目	作 者 名	页 码
1	一种新的岩体力学数值计算方法——叠单元法	汪卫明 陈胜宏	1 093-1 098
2	弹塑性矩阵 $D_{ep}$ 的特性和有限元边坡稳定性分析中的极限状态标准	郑 宏 刘德富	1 099-1 105
3	三参数双 $\tau^2$ 强度理论及其在岩石材料中的应用	陈四利 宁宝宽 鲍文博等	1 106-1 109
4	隧道纵向剪切传递效应及其一维解析	廖少明 侯学渊 彭芳乐	1 110-1 116
5	多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析	凌同华 李夕兵	1 117-1 122
6	用数字图像相关技术进行红砂岩细观裂纹损伤特性研究	朱珍德 张 勇 李术才等	1 123-1 128
7	考虑层间作用的多层滑坡分析方法	杨 涛 周德培 罗阳明	1 129-1 133
8	锚杆临界锚固长度解析计算	张 洁 尚岳全 叶 彬	1 134-1 138
9	饱和破碎岩石压实变形特性的试验研究	马占国 郭广礼 陈荣华等	1 139-1 144
10	采样方案对反演岩体渗透参数的影响	盛永清 周创兵 李俊平	1 145-1 149
11	质疑岩石巴西圆盘拉伸强度试验	喻 勇	1 150-1 157
12	岩体结构面法向循环加载本构关系研究	尹显俊 王光纶	1 158-1 163
13	综放巷内充填原位沿空留巷技术	张东升 马立强 冯光明等	1 164-1 168
14	桶形基础极限承载力特性研究	张金来 鲁晓兵 王淑云等	1 169-1 172
15	软土地基上道路桥头跳车缓解工法的设计与工程实践	沈水龙 石名磊 杜守继等	1 173-1 177
16	列车荷载在地基中引起的应力响应分析	王常晶 陈云敏	1 178-1 186
17	裂纹扩展分析的无网格流形方法	李树忱 程玉民	1 187-1 195
18	三维水-土耦合模型在深基坑降水计算中的应用	冯晓腊 熊文林 胡 涛等	1 196-1 201
19	开挖沉陷地表变形可视化计算分析系统研究	谢飞鸿 王锦山 尹伯悦	1 202-1 206
20	冲击压实技术处理高速公路湿陷性地基的应用研究	娄国充	1 207-1 210
21	爆破模型垂直振幅动态测量的实验研究	龚 敏 王德胜 黎剑华	1 211-1 215
22	基于力平衡求解安全系数的一般条分法	杨明成	1 216-1 221
23	黄土湿陷过程中的压力与湿陷速率关系的数学模型及分析	张向东 兰常玉 李永靖	1 222-1 225
24	高水头作用下水工压力隧洞的水力劈裂分析	盛金昌 赵 坚 速宝玉	1 226-1 230
25	高填方路堤粘弹性参数反演与工后沉降预测分析	吕 庆 尚岳全 陈允法等	1 231-1 235
26	压实膨胀土的膨胀变形规律与计算模式	张爱军 哈岸英 骆亚生	1 236-1 241
27	采用粘土固化浆液进行岩溶路基注浆加固试验研究	倪宏革 孙峰华 杨秀竹等	1 242-1 247
28	加筋土挡土墙水平位移研究	杨广庆 周敏娟 张俭俭	1 248-1 252
29	巨厚冲积层钢筋钢纤维高强混凝土井壁试验研究	姚直书	1 253-1 258
30	复合土钉支护面层设计分析方法研究	杨 茜 张明聚 孙铁成	1 259-1 266
31	用滑动测微计实测桩的荷载传递函数	陈尚桥	1 267-1 271