

# 金沙江中游凝灰岩强度参数综合识别研究

方健<sup>1</sup> 尹小涛<sup>2</sup> 周磊<sup>2</sup> 严飞<sup>1</sup>

(1 云南省交通规划设计研究院 650041 昆明; 2 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点试验室 430071 武汉)

**摘要:**凝灰岩是一种典型的分布不规则、易崩解、难取样火山碎屑岩,其强度参数难以准确评估。本文依托华丽高速公路金沙江特大桥工程,判定丽江岸为反倾坡,为陡倾结构面或卸荷裂隙带剪入、缓倾结构面剪出组合滑移模式,破坏规模有限;华坪岸为顺层坡,为陡倾结构面或卸荷裂隙带剪入、凝灰岩层主滑、缓倾结构面剪出组合滑移模式,破坏规模较大。T3和T2凝灰岩软弱层为关键层,其强度参数对岸坡稳定性影响很大。针对此种情况提出了经验、试验、数值反分析相结合综合识别凝灰岩强度参数的方法。利用这种方法,在工程岩体分级标准GBT50218-2014、水利水电岩石力学参数手册、室内外试验、数值反分析的基础上,综合确定了凝灰岩带泥化参数为内摩擦角 $24^\circ$ 、粘聚力50kPa、泥化率60%;凝灰岩层内摩擦角 $29^\circ$ 、粘聚力90kPa,在工程经验取值的范围之内;玄武岩内摩擦角 $36^\circ$ 、粘聚力600kPa,在水利水电工程岩石力学手册推荐值范围之内;IV陡倾结构面强度参数内摩擦角 $35^\circ$ 、粘聚力150kPa,符合一般结构面试验经验值。经计算复核,埋深浅、局部分布的T3凝灰岩主滑模式下安全系数为1.65~2.15;埋深大、分布连续的T2凝灰岩主滑的安全系数为1.32~1.67,T2主控下的安全系数要比局部分布T3情况小约0.33~0.48,平均降低约21%。虽然T2主控下的最不利工况安全系数也大于1.30,但是在实际施工和运行过程中仍需关注T2凝灰岩层可能形成的深大滑移问题。类似和临近工程可参考该凝灰岩强度参数或强度参数综合识别方法。

**关键词:**桥址岸坡;凝灰岩;强度参数;稳定性

**中图分类号:**TU 457 **文献标识码:**A **DOI:** 10.11776/cjam.34.03.B060

## 1 前言

地质体稳定状态的准确评估,依赖于恰当地估计不同地层岩土体的物理力学参数。室内、外试验是获取岩土力学参数的直接手段,其局限性在于试验数量的有限性和小尺寸岩块测试结果如何推广至岩体参数的问题。局部、静态、有限尺寸、有限数

量的岩体力学试验评估参数与实际岩体力学参数目前来看仍然存在较大的差异,进而导致在一定程度上,按照这些参数进行稳定性评价与实际历史稳定状态存在较大的差异。

在过去几十甚至几百几千年的工程实践中,对于同一类岩体积累了比较丰富的力学数据(即所谓的“经验”参数),这些资料或经验在抗剪强度参数的研究中具有不可替代的作用。因此,把“历史经

基金项目: 云南省交通科技项目(云交科 2011(LH)12-a; 云交科 2014(A)01); NSFC-云南联合基金重点支持项目(01402231); 陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室开放基金(NELBP201501) 收稿日期: 2016-07-14 修回日期: 2016-11-18

第一作者简介: 方健,男,1964年生,云南省交通规划设计研究院,高级工程师;研究方向——山区高速公路工程勘察与设计。

E-mail: fangjian1964@126.com

验”和“当前试验”结合起来研究岩体抗剪强度参数的方法具有一定的现实意义。

凝灰岩是一种典型的火山碎屑岩，具有遇水易崩解的特性<sup>[1-3]</sup>，分布也不均匀，取样、制样难度大。这些问题制约了通过室内试验获取凝灰岩参数统计特征值的可能性。现场平硐勘察，能否揭露该层位，也制约了通过现场试验获取凝灰岩参数。而凝灰岩的沉积规律和历史旋回，通常决定了其软弱夹层特征和历史错动泥化的特点<sup>[4-11]</sup>，这些对于边坡和洞室的稳定性经常起着控制作用<sup>[12-13]</sup>。

鉴于此，本文根据多年的工作经验，总结归纳出一种综合确定岩土体力学参数的方法。通过对具体工程岩石(体)物理力学试验的综合分析，可以得到岩石(体)抗剪强度参数的统计值(或平均值)，对比同类型岩石(体)在其它工程中的取值，经过一定折减，进而获得工程稳定分析需要的计算参数值。这一方法为“经验”和“试验”的结合提供了“接口”和“桥梁”，再通过研究在研究对象区域开展反分析研究，由此确定的计算参数值可靠性更高。

## 2 桥址区岸坡稳定问题及关键层识别

### 2.1 工程概况

华丽高速公路金沙江大桥位于金安桥水电站上游库区，桥位具体位置见图 1，主要地层由上到下依次为：松散覆盖层、强风化玄武岩、中微风化玄武岩、凝灰岩、多个玄武岩、凝灰岩旋回。华坪岸为顺层坡，丽江岸为反倾坡。



图1 桥位示意图  
Fig.1 Exhibition of bridge site

工程区主要发育两组 IV 级结构面：①近 EW, N 或 S $\angle$ 75°~90°，延伸长，张开 1mm~3mm，面平直，多无充填物，间距 0.2m~0.7m，较发育；②近 SN, W $\angle$ 10°~30°，流层节理，一般延伸较长，面平直，局部起伏，多充填钙、铁质，间距 0.5m~1.5m。调查情况见图 2。

### 2.2 华坪岸破坏模式及控制要素

华坪岸岸坡总体走向近南北，与玄武岩体流层

面一致。由于为顺向坡，流层面缓向倾坡外，倾角为 12°~30°，对岸坡稳定极为不利。华坪岸岸坡出露 T2、T3、T4a 等凝灰岩夹层，且均存在崩积及局部泥化特征。华坪岸岸坡卸荷强烈、卸荷深度大。卸荷带岩体的强度和变形参数均较低，部分卸荷裂隙延伸长，且充填次生泥，其抗剪强度低，对岸坡稳定影响较大。

华坪岸桥址岸坡的稳定性主要受 T2 凝灰岩软弱夹层、卸荷裂隙带、陡倾结构面控制，破坏模式为上述不利因素组合的顺层滑移模式，关键层位为凝灰岩层。



(a) 陡倾结构面 (steep structural planes) (b) 缓倾结构面 (even structural planes)

图2 工程区结构面调查统计图  
Fig.2 Investigative and statistical figure of structural planes at engineering sites

### 2.3 丽江岸破坏模式及控制要素

丽江岸为逆向坡，全风化、强风化深度较浅，对工程影响不大；中风化带以上岩体相对破碎，多呈碎裂状结构，稳定性差；中微风化带以下岩体强度高，有利于岸坡稳定。

丽江岸桥址岸坡的稳定性主要受后缘陡倾结构面、卸荷裂隙带、前缓倾结构面控制，破坏规模有限，对工程影响范围内岩体进行加固即可。

### 2.4 关键层凝灰岩层强度参数识别

工程区凝灰岩具有极强的崩解特性，存在取样、保存、试件加工难度大等特点，这些均制约了岩块试验的样本数量；平硐深度有限，没有揭穿有效的凝灰岩层，所以也没有原位试验的条件。因此，在调研区域资料的基础上，针对凝灰岩层的强度参数提出了如下识别方案。

参数识别不仅仅是从试验测试获得统计特征值，这个值还要符合地质体存留地域、时间、空间

特征, 即符合历史稳定状态。试验是当下进行的; 经验和类比是经历过时间考验的; 同时需要对其进行参数反分析, 使其符合地质体一定时间序列的稳定演化规律。经过上述综合识别, 所获取的参数无疑更接近真实值。

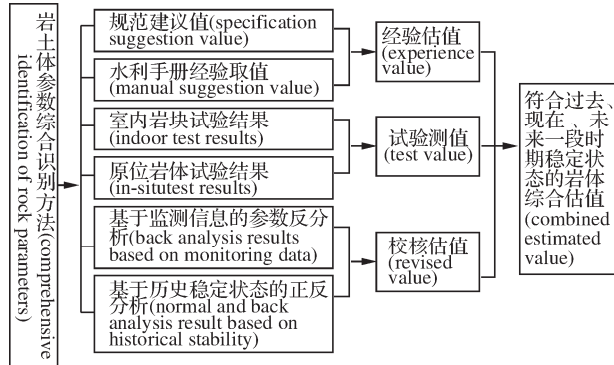


图 3 岩土体参数识别技术路线  
Fig.3 Technology plan for soil or rock mass parameters identification

### 3 勘察确定的凝灰岩工程地质特性

凝灰岩层是分布于工程区一定范围的软弱夹层, 在后期构造变动过程中经历多次顺层挤压错动, 有软化泥化现象, 其分布与建(构)筑物的空间关系对工程稳定性影响较大。

#### 3.1 凝灰岩层的岩性特征及分布规律

凝灰岩由火山喷发形成的碎屑物质构成, 一般为凝灰结构或凝灰角砾结构。勘察发现, 凝灰岩层

与下伏的火山角砾熔岩或杏仁状玄武岩常呈渐变过渡, 无明显的分层界面; 与上覆的玄武岩常有明显的分界面。根据岩块试验, 新鲜凝灰岩一般属硬质岩, 饱水状态下强度较高, 但存在失水崩解现象。

根据地质测绘和勘探揭露, 凝灰岩层的空间展布略呈舒缓波状, 其产状为走向近 SN, 缓倾 W, 倾角 12°~30°。现已查明在工程区分布有 T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8、T9、T10 等十多层凝灰岩, 其中对工程存在影响的主要是普遍分布的 T2 凝灰岩层, 为控制层位。

#### 3.2 凝灰岩层泥化特征及其物理力学特性

T2 凝灰岩呈灰紫、紫红色, 厚 0.3m~3.0m。该层凝灰岩在地表多被剥蚀或被第四系崩、坡积层覆盖, 仅见零星露头。在钻孔岩芯中部分除风化原因外未见挤压泥化现象。根据地表面及平硐观察, 该层凝灰岩具有崩解特性, 硐内完整岩块在暴露地表后, 经日晒雨淋, 逐渐开裂崩解成碎块, 最终变成碎屑, 但崩解速度较缓慢。完整新鲜岩块强度较高, 单轴湿抗压强度为 76.4MPa。泥化夹层抗剪强度极低, 且具有各向异性, 沿走向方向, 摩擦系数 0.402、粘聚力 0.026MPa; 沿倾向方向, 摩擦系数 0.217、粘聚力 0.060MPa。T2 凝灰岩泥化夹层抗剪试验试点分别位于丽江岸 PD8 和 PD218 中。凝灰岩中泥化夹层的小三轴试验结果如表 1 所示。

表 1 凝灰岩中泥化夹层三轴试验统计表  
Tab.1 Triaxial test results of siltized intercalation in tuff

同围压 $\sigma_3$ 下破坏时 $P$ 、 $\tau$ ( $P=\sigma_1 f+\sigma_3/2$ ; $\tau=\sigma_1 f-\sigma_3/2$ ) (the $P$ and $\tau$ of damage under different surrounding pressure $\sigma_3$ )								内摩擦角 (inner friction angle)/(°)	粘聚力(cohesion) /kPa
$P_1$	$\tau_1$	$P_2$	$\tau_2$	$P_3$	$\tau_3$	$P_4$	$\tau_4$		
319.1	219.1	458.2	258.2	591.1	291.1	722.4	322.4	14.8	141.0
432.4	332.4	547.4	347.4	677.1	377.1	802.2	402.2	11.1	250.6

根据勘探揭露各层凝灰岩的工程地质特征, 综合室内、外试验成果, 工程区凝灰岩夹层的抗剪指标建议值如表 2 所示。

表 2 凝灰岩强度指标建议值  
Tab.2 Proposed strength value of the tuff

编号 (number)	特征 (feature)	摩擦系数 (friction coefficient) $f$	粘聚力 (cohesion) /MPa	备注 (note)
T2	玄武质凝灰岩, 有连续泥化夹层, 局部崩解特性, 厚度 0.3m~3.0m	0.20~0.35	0.01~0.03	丽江岸 (Lijiang side)
	(basaltic tuff with continuous clay interlayer, local slaking)	0.45~0.55	0.03~0.15	华坪岸 (Huaping side)

### 4 基于历史稳定状态的参数反分析

#### 4.1 主控地层、结构面、计算模型

根据金安桥水电站已有勘察资料和桥址区现有钻探资料, 华坪岸 T3 凝灰岩向下游渐变为火山角砾熔岩, 呈尖灭状分布。Z3 桥轴有 CZK24、CZK25、ZKH13、ZKH14 四个钻孔, 加上勘察平硐, 共计 5 个断面, 只有 CZK25 钻孔揭示了凝灰岩的分布, 据此估算 T3 凝灰岩带中凝灰岩占比约为 20%, 其余均为玄武岩。T2 凝灰岩全局分布。因此, 数值反分析的目的是确定 T2 凝灰岩层、中风化玄武岩、

IV级结构面的强度参数。综合考虑桥址附近的金安桥水电站岩石力学试验结果、相关规范、工程类比,确定T2凝灰岩及中风化玄武岩强度参数。

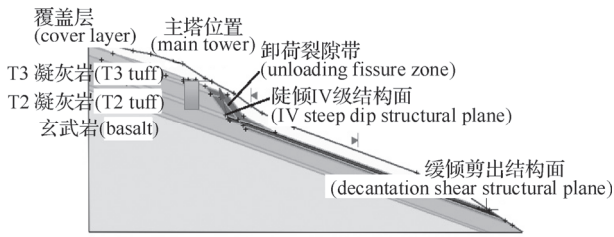


图4 华坪岸计算模型  
Fig.4 Numerical model on slope of Huaping side

4.1.1 反分析的依据

根据地面调查及工程经验,本文认为:华坪岸边坡历经强降雨等自然条件下可认定其边坡稳定;地震条件下可认为其处于欠稳定状态;松散层边坡在最不利条件下可认为其处于临界状态。反分析依据的历史稳定状态及标准统计列于表3。

表3 华坪岸历史稳定状态反分析安全系数标准  
Tab.3 Safety factor of Huaping side slope historical stability for back analysis

破坏模式 (fail mode)	自然状态 (natural state)	自然+地震状态 (natural & seismic state)
组合滑移 (combined slip)	-	1.05~1.15
覆盖层内滑移 (slip in cover layer)	-	1.00~1.05
备注(note)	稳定性好(stable)	临界状态(limit state)

4.1.2 反分析的参数取值范围

根据搜集得到的临近工程主要地层、结构面的物理力学参数,结合桥址区勘察试验结果、桥址岸坡稳定性试算,确定了初始参数范围,见表4。

表4 反分析参数的范围  
Tab.4 Strength parameter range of inverse analysis results

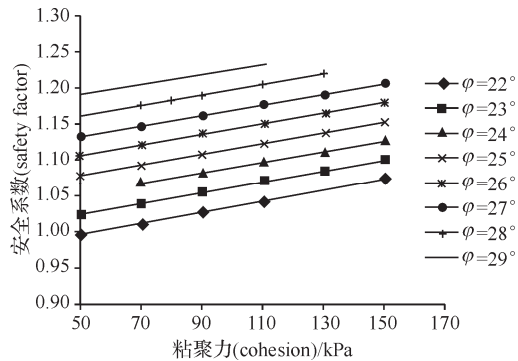
地层(strata)	内摩擦角 (inner friction angle)/(°)			粘聚力 (cohesion)/kPa		
	范围 (scope)	均值 (average)	初值 (initial)	范围 (scope)	均值 (average)	初值 (initial)
T2凝灰岩带 (T2 tuff)	21.8~30.9	26.0	28.0	30~200	100	80
泥化T2凝灰岩 (T2 tuff clayed)	11.3~28.8	25.0	23.0	10~150	80	50
IV级陡倾结构面 (IV steep dip structural plane)	19.2~35.0	27.0	35.0	20~200	100	150

4.2 参数反分析

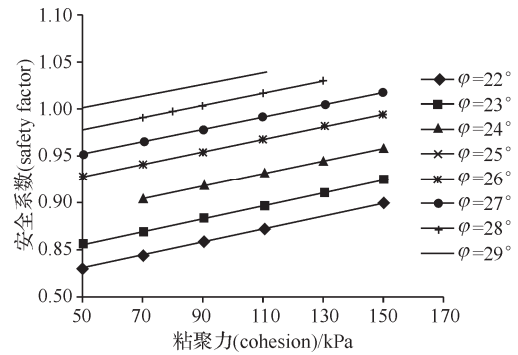
4.2.1 T2凝灰岩强度参数反分析结果

剪入口角度设定为陡倾结构面倾角平均值75°,

主要滑动面设定在T2凝灰岩及卸荷带范围内,剪出口在松散层底部缓倾结构面。固定其它值,采用自动搜索滑动面的方式寻找最危险滑动面,反分析T2凝灰岩层参数结果如图5所示(其中φ为内摩擦角)。



(a) 自然条件(natural condition)



(b) 地震条件(seismic condition)

图5 不同工况下T2凝灰岩敏感性分析曲线

Fig.5 Curve of sensitivity on T2 tuff under different conditions

由图5可以看出,当T2凝灰岩带参数取内摩擦角29°、粘聚力90kPa时,前缘坡体的稳定性大体上符合历史稳定状态要求。

4.2.2 T2凝灰岩泥化带参数反分析结果

限于泥化深度和范围难以准确测定,T2凝灰岩泥化带参数主要依据工程经验和现场调查条件综合判定。在4.2.1节确定的T2凝灰岩参数的基础上,设定T2凝灰岩泥化带抗剪强度内摩擦角23°、粘聚力30kPa(根据勘察报告的低值和4.2.1节综合确定),假设不同泥化率,采用自动搜索滑动面的方式寻找最危险滑动面,反分析T2凝灰岩泥化率,结果如表5所示。

表5 桥位T2凝灰岩带泥化参数敏感性分析统计表  
Tab.5 Sensitivity analysis of T2 tuff silted intercalation at the bridge site

内摩擦角 (inner friction angle)/(°)	粘聚力 (cohesion)/kPa	泥化率 (clay ratio)/(%)	安全系数(safety factor)	
			自然 (nature)	地震 (seismic)
26	70	20	1.452	1.168
25	60	40	1.399	1.125
24	50	60	1.308	1.049
23	40	80	1.234	0.988

由表 5 可以看出, 当 T2 凝灰岩带泥化参数取内摩擦角 24°、粘聚力 50kPa、泥化率 60%时, 坡体的稳定性基本符合历史稳定状态要求。

#### 4.2.3 玄武岩强度参数建议值

根据金安桥水电站在其枢纽区和本次桥址区进行的岩体变形、岩体及弱面抗剪等多种岩体野外原位测试工作可知, 中风化玄武岩块的峰值内摩擦角介于 52.7°~64.0° 之间, 均值为 58.6°; 峰值粘聚力介于 9.2MPa~13.2MPa 之间, 均值为 10.0MPa。中风化玄武岩块的残余内摩擦角介于 41.0°~43.0° 之间, 均值为 39.8°; 峰值粘聚力介于 2.7MPa~3.1MPa 之间, 均值为 3.3MPa。

结构面和裂隙的存在导致岩体强度一般远小于岩块强度。《建筑边坡工程技术规范 GB50330-2002》中规定岩体内摩擦角标准值可由岩体裂隙发育程度依据岩块参数折减得到, 对于碎裂结构的岩体, 其折减系数为 0.75~0.80。根据现场调查结果, 工程区中风化玄武岩体裂隙较发育, 按表 6 中给出的折减系数, 玄武岩体的内摩擦角为 49.8°~52.7°。

表 6 边坡岩体内摩擦角折减系数  
Tab.6 Reduction factor of internal friction angle for slope rock mass

内摩擦角折减系数 (reduction coefficient of inner friction coefficient)	边坡岩体特性(rock feature)			
	裂隙不发育 (fissure poorly developed)	裂隙较发育 (fissure relatively developed)	裂隙发育 (fissure developed)	碎裂结构 (cataclastic texture)
0.90~0.95	0.85~0.90	0.80~0.85	0.75~0.80	

工程区中风化玄武岩的岩体分类为 III 类, 根据《工程岩体分级标准 GBT50218-2014》规定, 参数见表 7。III 类岩体的峰值抗剪强度为内摩擦角 39°~50°, 粘聚力 0.7MPa~1.5MPa。

表 7 岩体物理力学参数表

岩体基本质量级别 (quality grade of rock mass)	抗剪断峰值强度(peak strength of shearing resist)				
	重度 (gravity)/kN·m <sup>-3</sup>	内摩擦角 (inner friction angle)/(°)	粘聚力 (cohesion)/MPa	变形模量 (deformation modulus)/GPa	泊松比 (Passion's ratio)v
I	>26.5	>60	>2.1	>33	<0.2
II	>26.5	60~50	2.1~1.5	33~20	0.2~0.25
III	26.5~24.5	50~39	1.5~0.7	20~6	0.25~0.3
IV	24.5~22.5	39~27	0.7~0.2	6~1.3	0.3~0.35
V	<22.5	<27	<0.2	<1.3	>0.35

参考类似工程的玄武岩, 如表 8 所示。虽然岩体结构、风化程度不同, 玄武岩体的抗剪强度差异

较大, 但可以得出玄武岩体强度特性的一个大致范围。其中二滩水电站枢纽区的细粒杏仁状玄武岩的抗剪强度参数为: 内摩擦角 53°、粘聚力 600kPa; 微粒、隐晶玄武岩的抗剪强度参数为: 内摩擦角 54°~60°, 粘聚力 2MPa。本工程区玄武岩风化程度较二滩水电站枢纽区玄武岩体更强, 其抗剪强度应略低。

表 8 水电工程的玄武岩抗剪强度试验结果  
Tab.8 Shear strength test results of basalt in water resources and hydropower engineering

岩体 (rock mass)	抗剪强度(strength)		工程及试验方法 (engineer site and its test method)
	摩擦系数 (friction coefficient)	粘聚力 (cohesion)/MPa	
细粒杏仁状玄武岩 (amygdaloidal basalt)	1.33	600	二滩水电站, 现场 (Ertan hydropower station)
致密玄武岩 (pycno-basalt)	0.55	-	以礼河一级电站, 室内 (Yili river first grade power station, indoor)
微粒、隐晶玄武岩 (cryptocrystalline basalt)	1.38~1.73	2000	二滩水电站, 现场 (Ertan hydropower station field test)
浅变质微风化玄武岩 (weak weathering basalt)	1.66	1600	三轴试验 (triaxial test)
坚硬玄武岩 (hard basalt)	0.72	20	盐水沟, 试验 (Yanshui groove field test)
蚀变玄武岩 (alteration basalt)	0.65	30	二滩 (Ertan)
凝灰质玄武岩 (tuffaceous basalt)	0.75	273	铜街子 (Tongjiezi)
凝灰质玄武岩 (tuffaceous basalt)	1.23	460	铜街子, 试验 (Tongjiezi field test)

综合岩体强度折减方法、岩体质量分级、类似工程岩体建议值, 考虑工程区玄武岩的结构和风化程度, 基于偏安全的原则, 选取这些参数的相对低值, 即玄武岩体的抗剪强度参数为: 内摩擦角 36°、粘聚力 600kPa。

#### 4.2.4 IV 级结构面参数反分析结果

在上述参数确定后, 仅调整结构面参数即可确定 IV 陡倾结构面的参数, 根据目标稳定状态, 最终分析得到 IV 陡倾结构面抗剪强度参数为: 内摩擦角 35°、粘聚力 150kPa。

#### 4.3 桥址岸坡岩土体强度参数综合建议值

根据邻近工程调研、桥址勘察、规范取值、水利水电工程岩石力学参数手册、工程类比、数值反分析, 综合确定华坪岸主控地层强度参数推荐值如表 9 所示。

在推荐参数的情况下, 岸坡在自然和地震条件下的稳定状态符合地质调查对坡体历史稳定状态的

判断，同时所取参数也符合类似工程的参数建议范围，是经验与试验认知相结合的典型。

表9 华坪岸边坡岩土体强度参数建议值  
Tab.9 Proposed strength parameters of soil or rock mass for Huaping side slope

地层(strta)	内摩擦角 (inner friction angle)/(°)	粘聚力 (cohesion)/MPa
T2 凝灰岩泥化夹层 (T2 tuff clayed) 卸荷裂隙带 (unloading fissure zone)	24	50
T2 凝灰岩 (T2 tuff)	29	90
IV 级陡倾结构面 (IV steep dip structural plane)	35	150

### 5 华坪岸边坡稳定性评价

依据第4章所确定参数，利用 Slide 软件，采用滑动面自动搜索方法，计算了自然条件、地震条件下自然坡和考虑工程荷载坡的稳定性，限于篇幅仅给出自然坡的情况，自然条件和地震条件下最危险滑动面变化不大，如图6所示，结果统计列于表10。

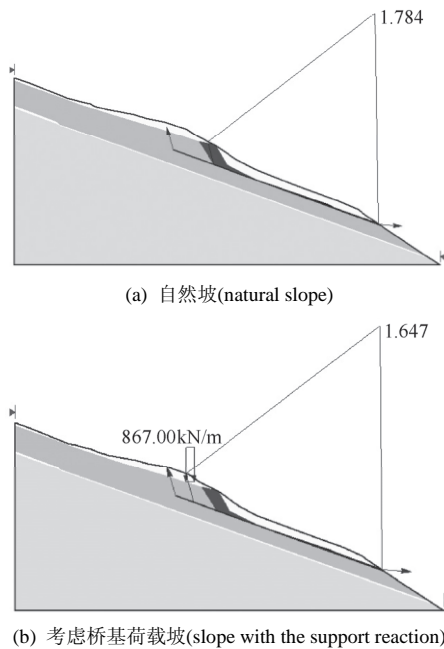


图6 桥址岸坡最危险滑面  
Fig.6 Critical failure surface of bank slope on bridge site

表10 桥位各工况最小安全系数汇总表  
Tab.10 Minimum safety factor of different working condition on bridge site

主滑面 (main skip surface)	天然坡 (natural slope)		考虑桥基荷载坡(slope bridge base load considered)	
	自然 (nature)	地震 (seismic)	自然 (nature)	地震 (seismic)
T2 凝灰岩层 (T2 tuff)	1.670	1.342	1.603	1.315

由表10可以看出，桥位轴线剖面在各种工况下的安全系数均较高，基本满足工程稳定性要求。

### 6 结论

经过对华丽高速公路金沙江大桥岸坡主控因素的分析，确定凝灰岩层为关键层，利用规范取值、水利水电工程岩体手册、附近工程资料调研、室内外试验、数值反分析，综合确定了该层的岩体参数，并利用其评价了华坪岸顺层边坡的稳定性，所得主要结论如下。

- 1) 岩体强度参数需要历史经验、工程试验、数值反分析相结合综合确定，同时需要满足地质体历史稳定状态。
- 2) 关键层凝灰岩层强度参数为内摩擦角 29°、粘聚力 90kPa，在工程经验取值的范围之内；前缘凝灰岩带泥化参数为内摩擦角 24°、粘聚力 50kPa、泥化率 60%；玄武岩强度参数内摩擦角 36°、粘聚力 600kPa，在水利水电工程岩体手册推荐值范围之内；IV 陡倾结构面强度参数内摩擦角 35°、粘聚力 150kPa，也符合一般结构面试验经验值。类似和临近工程可参考取值。
- 3) 华坪岸顺层坡，为后缘陡倾结构面(或卸荷裂隙带)、缓倾凝灰岩夹层和前缘缓倾结构面剪出组合滑移模式，T2 凝灰岩层控制的深大滑移需要引起重视。

### 参 考 文 献 (References)

- [1] 蒋志明, 田保同, 马洪杰, 等. 膨胀性凝灰岩浸水崩解特性试验研究[J]. 路基工程, 2013(1): 97-100. (JIANG Zhiming, TIAN Baotong, MA Hongjie, et al. Experimental study on water-disintegration of expansive tuff[J]. Subgrade engineering, 2013(1): 97-100(in Chinese)).
- [2] 郑明雄. 澜沧铅矿凝灰岩的膨胀机制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012. (ZHENG Mingxiang. Expansion mechanism of Lancang lead mines tuff[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012(in Chinese)).
- [3] 郑明雄, 李峰. 饱和盐水钻井液对高膨胀凝灰岩的防塌机理分析[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(1): 51-56. (ZHENG Mingxiang, LI Feng. Anti-caving mechanism analysis of saturated saltwater drilling fluid for high expansion tuff[J]. Oil drilling & production technology, 2014, 36(1): 51-56(in Chinese)).
- [4] 高秀君, 大久保诚介, 福井胜则. 气干与湿润状态下多孔隙岩石的粘弹性特性与力学模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7):

- 1325-1332. (GAO Xiujun, OKUBO Seisuke, FUKUI Katsunori. Visco-elastic properties and a mechanical model for porous rocks under air-dried and water-saturated conditions[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2007, 26(7): 1325-1332(in Chinese)).
- [5] ERARSLAN N, ALEHOSSEIN H, WILLIAMS D J. Tensile fracture strength of brisbane tuff by static and cyclic loading tests[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2014, 47(4): 1135-1151.
- [6] YAN Fei, FENG Xiating, CHEN Rong. Dynamic tensile failure of the rock interface between tuff and basalt[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2012, 45(3): 341-348.
- [7] BOZZANO F, BRETSCHNEIDER A, MARTINO S. Stress-strain history from the geological evolution of the Orvieto and Radicofani cliff slopes (Italy)[J]. Landslides, 2008, 5(5): 351-366.
- [8] MA L, DAEMEN J J K. Strain rate dependent strength and stress-strain characteristics of a welded tuff[J]. Bull engineering geology environment, 2006, 65(3): 221-230.
- [9] 李习平, 阳军生, 王立川, 等. 三联隧道凝灰岩流变试验及其本构模型研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(1): 137-144. (LI Xiping, YANG Junsheng, WANG Lichuan, et al. Research on rheological tests and constitutive models of tuff in trigeminy tunnels[J]. Journal of railway science and engineering, 2015, 12(1): 137-144(in Chinese)).
- [10] 刘洪磊, 杨天鸿, 于庆磊, 等. 凝灰岩破坏全过程渗流演化规律的实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(7): 1330-1333. (LIU Honglei, YANG Tianhong, YU Qinglei, et al. Experimental study on fluid permeation evolution in whole failure process of tuff[J]. Journal of northeastern university(natural science), 2009, 30(7): 1330-1333(in Chinese)).
- [11] GRANDE E, ROMANO A. Experimental investigation and numerical analysis of tuff-brick listed masonry panels[J]. Materials and structures, 2013, 46(1): 63-75.
- [12] 苗青, 张昆生. 对大朝山水电站斜向坡失稳特征的探讨[J]. 云南水力发电, 1998, 14(1): 50-52. (MIAO Qing, ZHANG Kunsheng. Discussion on instability characteristics of insequent slopes for the Dachaoshan hydropower project[J]. Yunnan water power, 1998, 14(1): 50-52(in Chinese)).
- [13] 杨英. 大丽铁路碎裂玄武岩夹凝灰岩型隧道特征及施工对策[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(12): 64-68. (YANG Ying. Characteristics of fractured tuff in basalt tunnel of Dali-Lijiang and its construction counter measures[J]. Journal of railway engineering society, 2007, 24(12): 64-68(in Chinese)).

## Analysis of flutter characteristics of composite wing with store system

Xiao Yanping<sup>1,2</sup> Yang Yiren<sup>2</sup>

(1 Civil Aviation Flight University of China, 618307, Guanghan, China;

2 School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract:** The aeroelastic equations of composite wing with store system under unsteady aerodynamic forces are established by applying the Hamilton's principle. The material coupling and geometrical coupling are considered. The system dynamics is numerically simulated by use of differential quadrature method (DQM). Results show that it is feasible to use DQM for solving the flutter characteristics of composite wing. On the other hand, it is shown that the critical flutter speed presents two peak values with the increase of material coupling rigidity. However, for the composite wing with store system, the critical flutter speed presents complex variation which relates to the setting of store parameters.

**Keywords:** composite, wing, store, flutter.

## Comprehensive study on strength parameters of the tuff at Jinshajiang grand bridge site on Huali freeway

Fang Jian<sup>1</sup> Yin Xiaotao<sup>2</sup> Zhou Lei<sup>2</sup> Yan Fei<sup>1</sup>

(1 National Engineering Laboratory for Surface Transportation Weather Impacts Prevention, Broadvision Engineering Consultants, 650041, Kunming, China;

2 State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, 430071, Wuhan, China)

**Abstract:** Tuff is a typical kind of pyroclastic rock, whose distribution is often localized, with disintegration when wet, and there exists difficulty in sampling and sample preparation. So it is hard to accurately estimate its strength in practice. The study in the paper relies on the project of Jinshajiang grand bridge in Huali highway. According to field investigation and survey, Lijiang bank slope is an intilted one, whose failure mode is a combined one in which the steep dip structural plane or unloading fissure zone entered and decantation structural plane cut out, its scale is limit. Huali bank slope is a bedding one, whose fail mode is controlled by trailing edge steep dip structural plane or entering of unloading fissure zone, tuff is the main sliding surface and leading edge decantation structural plane cut out, its scale is large. T2 and T2 tuff are the controlled and key strata, whose strength has a great effect on the slopes' stability. Aiming to these, a comprehensive identification method combined experience, test and numerical back analysis of rock mass strength is built. Using it and based on specification, parameters manual of rock mechanics, indoor & outdoor test and numerical back analysis, the internal friction angle of siltized intercalation tuff is determined to be 24°, cohesion 50kPa and sliming ratio 60% within empirical value; the internal friction angle of tuff is 29° and cohesion 90kPa meeting to practical engineering experience; the internal friction angle of basalt is 36° and cohesion 600kPa within scope of value suggested by manual; the internal friction angle of IV steep dip structural plane is 35° and cohesion 150kPa conforming to empirical value of general structural plane. After computing and checking stability of Huaping bank slope, it is concluded that the safety factor of T2 tuff with deep depth and continuous distribution is lower than that led by T3 tuff with shallow depth and localized distribution. Safety factor under T2 tuff condition is lessened about 0.33~0.48, with magnitude being 21%. Although safety factor under worst case condition is large than 1.30, it needs to pay attention to the potential sliding in T2 tuff in practice.

**Keywords:** bank slope on bridge site, tuff, strength, stability.