

# 江口至瓮安高速某滑坡稳定性分析与评价

汤晶, 王搏, 张中卫

中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉  
Email: 64753031@qq.com

收稿日期: 2020年11月28日; 录用日期: 2020年12月21日; 发布日期: 2020年12月29日

## 摘要

针对贵州江口至瓮安高速K5 + 300~K5 + 680段右侧边坡为一路堑边坡, 由于开挖以及降雨等原因, 边坡发生变形, 已采用抗滑桩进行治理, 然而在强降雨后, 部分抗滑桩严重变形, 边坡处于欠稳定状态, 随时会有滑动的可能, 影响高速公路的正常运营, 故对该滑坡进行稳定性分析及给出相应的防治措施显得十分重要。结合边坡的工程地质和水文地质情况, 对相差的断面和裂缝进行了实测, 根据目前的变形情况, 对滑坡变形特征、变形机制及稳定性进行了分析, 最后提出了相应的治理措施。

## 关键词

江口至瓮安高速公路, 滑坡, 抗滑桩, 稳定性分析, 治理措施

# Analysis and Stability Analysis of a Landslide on Jiangkou-Weng'an Expressway

Jing Tang, Bo Wang, Zhongwei Zhang

CCCC Second Highway consultants Co., Ltd., Wuhan Hubei  
Email: 64753031@qq.com

Received: Nov. 28<sup>th</sup>, 2020; accepted: Dec. 21<sup>st</sup>, 2020; published: Dec. 29<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

Since the right side slope of the K5 + 300~K5 + 680 section of Jiangkou-Weng'an Expressway in Guizhou is a cut slope, the slope has been deformed due to excavation and rainfall, and has been treated with anti-slide piles. However, it is under heavy rainfall. Afterwards, some anti-slide piles

were severely deformed, and the slope was in an unstable state. It may slip at any time and affect the normal operation of the expressway. Therefore, it is very important to analyze the stability of the landslide and give corresponding prevention measures. Combined with the engineering geology and hydrogeology of the slope, the differential sections and cracks were measured. According to the current deformation situation, the deformation characteristics, deformation mechanism and stability of the landslide were analyzed, and finally the corresponding control measures were proposed.

## Keywords

Jiangkou-Weng'an Expressway, Landslide, Anti-Slide Pile, Stability Analysis, Treatment Measures

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国西部高速公路发展迅速，高速公路的建成对当地的经济有着重要促进作用。然而伴随这高速公路的修建，公路沿线会出现一系列问题，公路旁的边坡稳定性也越来越受到人们关注，边坡的稳定与否将直接影响高速公路的正常运行，进而影响人们的正常生活。故对高速公路旁的不稳定滑坡进行稳定性分析以及提出相应的治理措施就显得十分重要。

近年来，国内许多专家学者对滑坡稳定性做了大量的研究。汪丁健、唐辉明等[1]在 GA 模型的基础上，考虑湿润锋以上饱和带渗流作用，推导了一种新的滑坡降雨入渗函数；龚文俊等[2]以甘肃省西和县西山 III 号滑坡为例，采用 GEOSTUDIO 软件分析地震与降雨耦合作用对滑坡稳定性的影响，结果表明该滑坡在降雨和地震条件下均处于不稳定状态；刘长春、殷坤龙等[3]针对巴东县文家滑坡，运用 Geo-slope 软件分析了不同水位条件下滑坡的地下水位线特征，利用 Monte-Carlo 模型模拟计算得到滑坡的破坏概率，以此评价滑坡在不同水位条件下的稳定性。李新平等[4]采用传递系数法和有限元法对溪沟口滑坡进行了稳定性评价，提出采用抗滑桩结合地表排水的治理方式；祝辉等[5]重庆—贵州高速公路向家坡滑坡，研究了其形成机制和稳定状态，并提出了相应的治理措施；孙书勤、黄润秋等[6]针对四川宣汉县天台乡滑坡，在阐明滑坡基本特征前提下，采取了 FLAC-3D 方法对滑坡体的变形状况进行三维数值模拟分析，得出在暴雨条件下边坡局部范围将极有可能发生坍塌进而发生牵引式滑坡；姚爱军等[7]针对杨家岭滑坡区研究了滑坡稳态对影响滑坡稳定性因素的敏感性，同时研究滑坡坡面加固力的大小、方位与稳定系数的关系，确立了滑坡整治方案的最佳加固角。

本文针对贵州江口至瓮安高速 K5 + 300~K5 + 680 段右侧滑坡，在查明其工程地质条件的基础上，采用不平衡推力传递系数法对其进行稳定性分析，并提出了相应的治理措施。

## 2. 滑坡概况

滑坡地处江口县闵孝镇沙坝河村老木树组，位于江口至瓮安高速 K5 + 300~K5 + 680 右侧，高速公路沿线位走向 216°，目前滑坡垂直线位向下发生变形，主滑方向 125°，大致与线位走向垂直，滑坡前缘高程约 586 m，后缘高程约 635 m，高差约 49 m，纵向长约 50~140 m，工程平面示意图见下图 1。

滑坡区地貌上属于构造剥蚀中低山地貌单元。两侧冲沟向下发育，沟内基岩出露，滑坡中部有一小

型冲沟。滑坡内构造较简单，滑坡区内未发现断层、褶皱等构造。区内岩层产状  $320^{\circ} \angle 32^{\circ}$ ，主要发育有一组裂隙： $52^{\circ} \angle 71^{\circ}$ ，裂面平直，微张，可见延伸 0.1~0.5 m。边坡滑坡区地层为：1) 第四系含碎石黏性土、碎石土：黄褐色，可塑，稍湿，以粘粒为主，含少量碎石，碎石母岩成分为砂质页岩。2) 第四系崩坡积碎石土灰岩：碎石母岩为灰岩，岩芯多呈碎块状，少量短柱状，夹有黏性土。3) 寒武系上统金顶山组页岩：灰黑色，泥质结构，中厚层状构造，节理裂隙较发育，裂隙面方解石充填，岩芯多呈柱状，少量碎块状。

滑坡区地下水主要是基岩裂隙水，受地形地貌条件、土层空隙率、岩体裂隙发育程度及季节变化影响，富水性不均，岩体深部基岩裂隙中，富水性、导水性相对较差，且较不均匀。主要存在于砂质页岩的风化裂隙中，为浅层地下水，其富水性受岩性及裂隙发育程度的控制。区内地表局部可见自然泉点出露，其地下水位一般与地表水联系密切，主要接受地表水及大气降水的入渗补给，向坡下势低洼处排泄。滑坡上地表水汇集后，沿裂隙面向坡下渗透，极易对岩体造成软化。

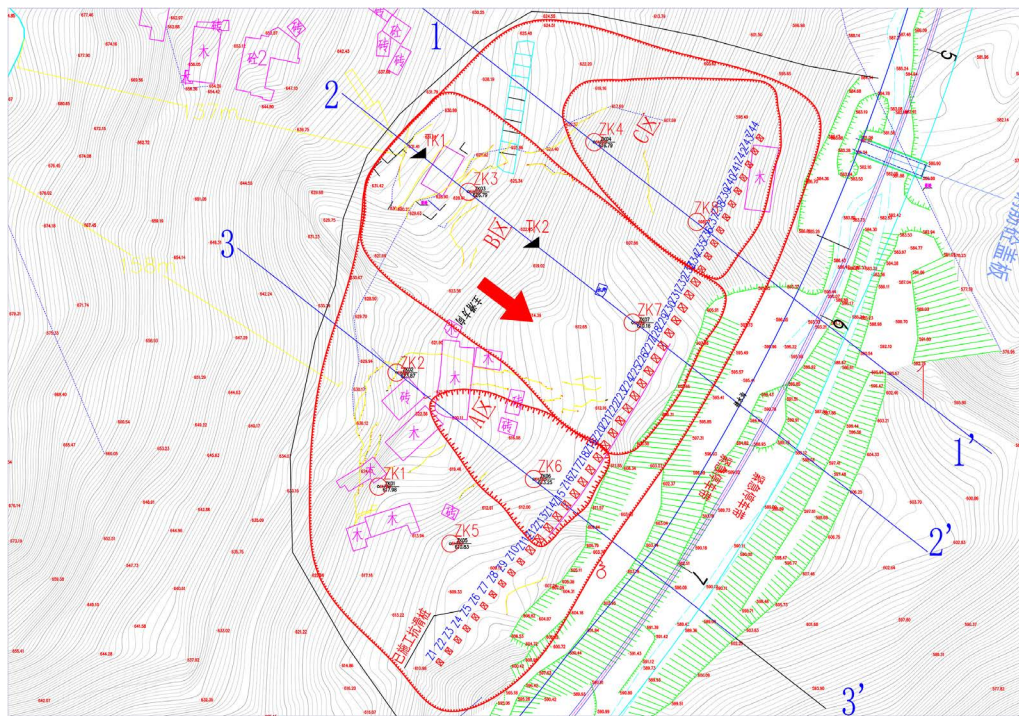


Figure 1. Sketch map of the project  
图 1. 工程平面示意图

### 3. 滑坡体特征

#### 3.1. 地形地貌特征

滑坡影响范围高速公路主线长约 280 m，根据滑坡范围以及画面深度将滑坡分为 A 区、B 区、C 区三个分区，其中 A 区面积约 2000 m<sup>2</sup>，滑面深度约 15.5 m，沿线位长约 40 m，失稳体积约  $7.8 \times 10^4$  m<sup>3</sup>，B 区面积约 9700 m<sup>2</sup>，滑面深约 17.5 m，沿线位长约 70 m，失稳体积约  $15 \times 10^4$  m<sup>3</sup>，C 区面积约 3800 m<sup>2</sup>，滑面深约 5 m，沿线位长约 65 m，失稳体积约  $3.4 \times 10^4$  m<sup>3</sup>。A 区抗滑桩(Z12~Z19)桩顶累计位移小于 100 mm，B 区抗滑桩(Z20~Z33)桩顶累计位移普遍大于 100 mm，部分抗滑桩已剪断，C 区抗滑桩(Z34~Z37)抗滑桩桩顶位移较小。

### 3.2. 滑面

滑面可根据滑坡后缘裂缝、剪出口位置、抗滑桩钻孔取芯以及地表监测孔变形情况等综合分析确定。根据监测数据,如图2累计位移曲线显示,A区滑面深度在15.5 m处,为中层滑坡;B区滑面深度在17.5 m,为中层滑坡;C区滑面5 m左右,为浅层滑坡。

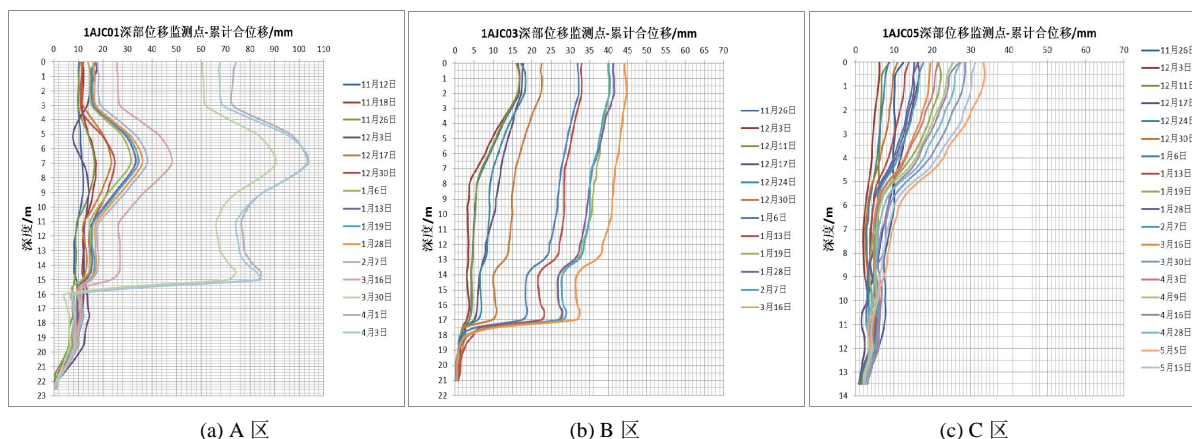


Figure 2. Displacement curve of pile  
图 2. 桩身位移曲线

### 3.3. 滑床特征

根据施工现场开挖情况、钻孔揭露、剖面图等综合分析,滑床物质为中等风化砂质页岩。

### 3.4. 滑坡变形破坏迹象

滑坡的变形主要表现为抗滑桩桩前土错动及抗滑桩剪断,且根据目前地表及深部位移监测,坡体在雨季仍有向下变形趋势,天然状态下处于稳定状态,未向下发生变形。

### 3.5. 影响因素

边坡变形的影响因素包括地形地貌、地层岩性、降雨、人类工程活动等,分析如下。

#### 1) 地形地貌

整个坡体被两条冲沟切割,坡体侧向约束较弱。滑坡中部有一条小型冲沟,整个滑坡坡面较缓,坡体呈 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。坡体下部开挖为边坡的变形破坏提供了良好的临空条件和重力条件。

#### 2) 地层岩性

边坡地层主要为第四系崩坡积碎石土,下部坡体开挖后导致上部坡体形成临空面,牵引上部坡体向下发生变形,滑体物质主要为滑坡上部覆盖的崩坡积粘性土和碎石土。

#### 3) 降雨

2014年3月至8月,连续降雨,月降雨量天数20天以上。2014年5、6月连续降雨,且降雨量大,可达130 mm,导致江口县城遭受洪涝灾害,连续丰富的降水沿开挖后的坡面下渗,使坡体长期处于湿润~半饱水状态,不仅加大边坡土体自重,同时软化边坡岩土体,也坡体内产生动静水压力,造成边坡稳定性降低。

原抗滑桩施工在2012年12月~2015年3月,施工过程中降雨较少,在施工完后,在连续暴雨作用下抗滑桩发生位移,逐步加大至抗滑桩剪断。

4) 人类工程活动

路基开挖形成高陡临空面，为边坡变形提供了变形空间条件。

4. 滑坡变形机制

边坡变形是边坡内因和外因在诱发原因的共同作用下打破原有的力学平衡而导致边坡向下发生滑移。其变形机制为：滑坡下部坡体开挖后导致坡体形成陡峭临空面，在暴雨以及施工扰动等因素影响下，使得边坡土体进一步松动，雨水顺着裂缝下渗，软化土体，抗剪强度下降，暴雨再次对坡体扰动时，使得坡体向下发生变形，同时桩前土发生错动后导致抗滑桩悬臂端增长，整体弯矩加大，从而导致桩发生破坏。

5. 滑坡稳定性分析

5.1. 稳定性计算

1) 计算剖面的确定

本次计算主要对剖面 1-1'， 2-2'， 3-3'进行计算，剖面图如图 3、图 4、图 5 所示。

根据边坡工程地质条件及变形破坏机制，采用不平衡推力传递系数法进行稳定性验算。

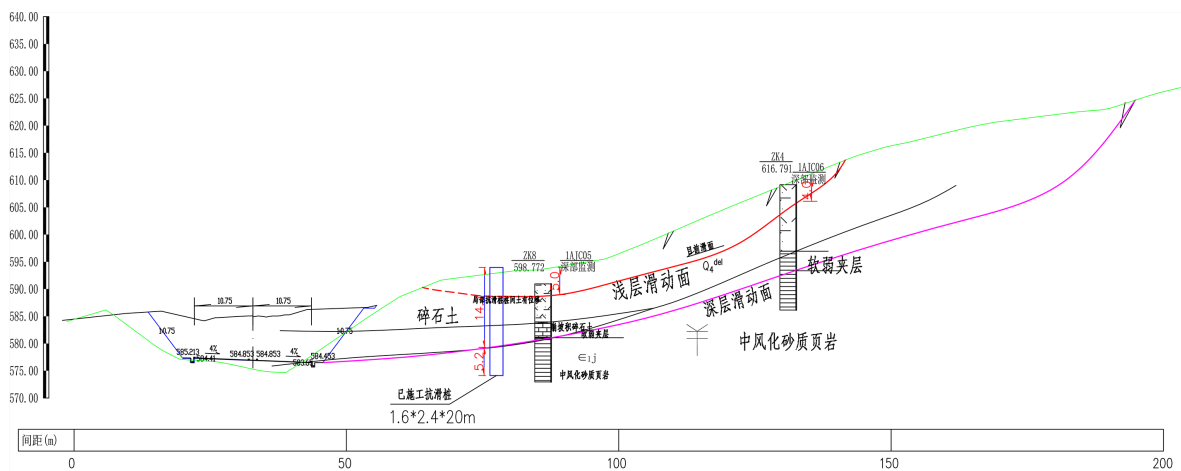


Figure 3. Section 1-1'

图 3. 剖面图 1-1'

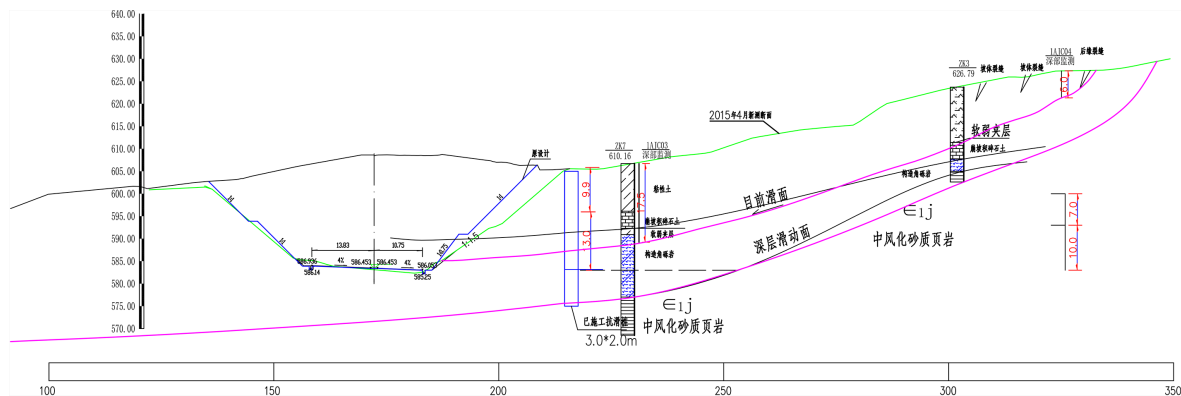


Figure 4. Section 2-2'

图 4. 剖面图 2-2'

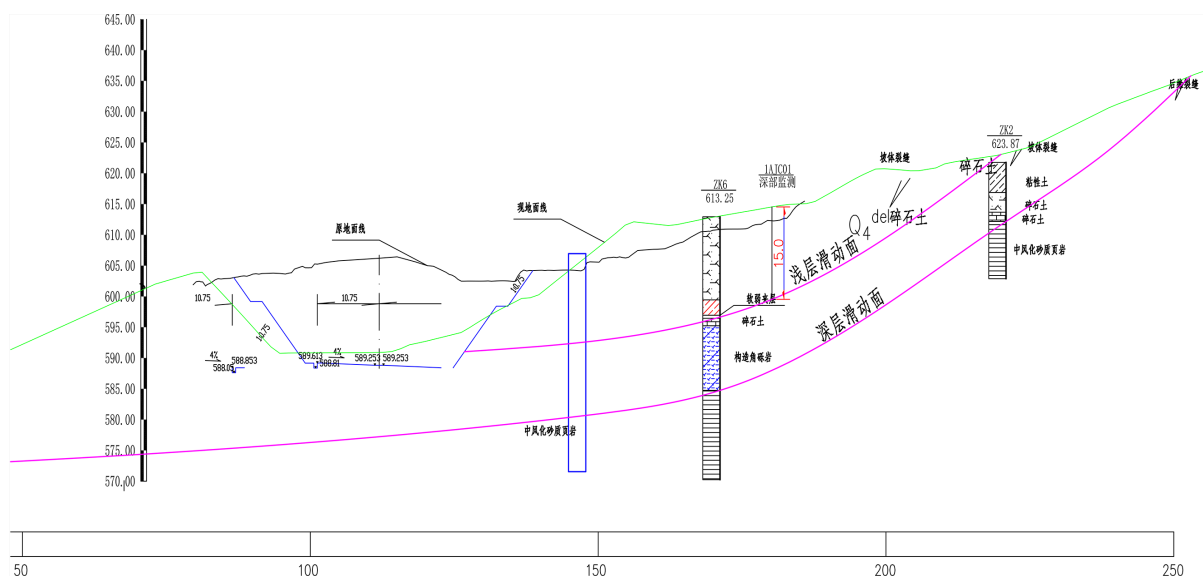


Figure 5. Section 3-3'

图 5. 剖面图 3-3'

2) 参数选取

本次边坡稳定性计算参数的选取主要有三种途径:

- ① 极限平衡反算法: 假定边坡处于极限稳定状态(稳定系数  $K = 0.98$ ), 反演结构面计算碎石土天然抗剪指标:  $c = 10.8 \text{ KPa}$ 、 $\varphi = 9.2^\circ$ , 饱和抗剪指标,  $c = 9.72 \text{ KPa}$ 、 $\varphi = 8.28^\circ$ ; 破碎带: 天然抗剪指标:  $c = 16.8 \text{ KPa}$ 、 $\varphi = 13.8^\circ$ , 饱和抗剪指标,  $c = 15.12 \text{ KPa}$ 、 $\varphi = 12.42^\circ$ ;
- ② 参考临近的边坡, 采用工程地质类比法取值  $c = 8\sim 15 \text{ KPa}$ 、 $\varphi = 6^\circ\sim 10^\circ$ ;
- ③ 经验值  $c = 5\sim 20 \text{ KPa}$ 、 $\varphi = 8^\circ\sim 12^\circ$ 。

结合上述几种方法经综合分析确定边坡稳定性分析的物理力学计算参数见表 1。

Table 1. Recommended values for major physical and mechanical indicators

表 1. 主要物理力学指标建议值

	岩性	状态	天然状态	饱和状态	
坡体	碎石土	重度( $\text{kN/m}^3$ )	19.1	19.8	
	构造破碎带	重度( $\text{kN/m}^3$ )	21.2	22	
滑带	沿土体软化层坍塌(浅层)	含碎石粉质粘土	内聚力 $c$ (kPa)	10.8	9.72
			内摩擦角 $\varphi$ ( $^\circ$ )	9.2	8.28
	沿层间软弱层滑动	强风化层面、结构面、软弱层	内聚力 $c$ (kPa)	16.8	15.12
			内摩擦角 $\varphi$ ( $^\circ$ )	13.8	12.42

3) 计算工况与安全系数

该边坡工程安全等级为一级, 综合考虑《公路路基设计规范》的第 3.7.4 条规定, 边坡安全系数最后按照以下方式确定: 天然状态下为 1.25, 饱和状态下为 1.15。

4) 稳定性计算

稳定性系数根据《建筑滑坡工程技术规范》(GB50330-2002)中传递系数法公式计算:

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left( R_i \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j \right) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} \left( T_i \prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j \right) + T_n} \tag{4-1}$$

其中：  $\Psi_j = \text{Cos}(\theta_i - \theta_{i+1}) - \text{Sin}(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \varphi_{i+1}$

$$\prod_{j=i}^{n-1} \Psi_j = \Psi_i \times \Psi_{i+1} \times \Psi_{i+2} \cdots \times \Psi_{n-1}$$

$$R_i = N_i \tan \varphi_i + c_i L_i; N_i = Q_i \text{Cos} \theta_i; T_i = Q_i \text{Sin} \theta_i$$

式中：  $F_s$ ——稳定系数；

$Q_i$ ——第  $i$  块段滑体所受的重力(KN/m)；

$R_i$ ——作用于第  $i$  块段的抗滑力(KN/m)；

$N_i$ ——第  $i$  块段滑动面的法向分力(KN/m)；

$\varphi_i$ ——第  $i$  块段土的内摩擦角(°)；

$c_i$ ——第  $i$  块段土的黏聚力(KPa)；

$L_i$ ——第  $i$  块段滑动面的长度(m)；

$T_i$ ——作用于第  $i$  块段滑动面上的滑动分力(KN/m)，出现与滑动方向相反的滑动分力时， $T_i$  应取负值；

$\Psi_j$ —— $i$  块段剩余下滑动力传递至  $i + 1$  块段时的传递系数( $j = i$ )。

### 5) 稳定性分析计算结果

根据上述原理，对各剖面的目前滑面以及潜在深层滑面稳定性分析计算结果和剩余下滑力计算结果见表 2。

**Table 2.** Stability coefficient and remaining slide power

**表 2.** 稳定系数和剩余下滑力

计算剖面	稳定性系数		剩余下滑力		建议支挡处 剩余下滑力(KN/m)
	工况一	工况二	工况一(KN/m)	工况二(KN/m)	
1-1 目前实际滑面	1.124	0.99	208.85	276.75	705.99
1-1 潜在滑面	1.108	1.072	1292.79	674.58	
2-2 目前实际滑面	1.114	0.996	1626.29	1933.40	1933.40
2-2 潜在滑面	1.204	1.088	1172.06	1673.50	
3-3 目前实际滑面	1.117	0.99	688.96	867.01	867.01
3-3 潜在滑面	1.175	1.065	1256.13	1509.78	

## 5.2. 稳定性评价

从稳定性计算结果来看，A 区滑坡目前在天然状态下稳定性系数 1.117 处于基本稳定状态，饱和工况下稳定性系数 0.99 处于不稳定状态，深层滑面在天然工况下稳定性系数 1.175 处于稳定状态，饱和工况下稳定性系数 1.065，处于基本稳定状态。

B 区滑坡目前在天然状态下稳定性系数 1.114 处于基本稳定状态，饱和工况下稳定性系数 0.996 处于不稳定状态，深层滑面在天然工况下稳定性系数 1.204 处于稳定状态，饱和工况下稳定性系数 1.088，处于基本稳定状态。

C 区滑坡目前在天然状态下稳定性系数 1.124 处于基本稳定状态，饱和工况下稳定性系数 0.99 处于

不稳定状态, 深层滑面在天然工况下稳定性系数 1.108 处于基本稳定状态, 饱和工况下稳定性系数 1.072, 处于基本稳定状态。

## 6. 工程治理措施与建议

针对该滑坡的形态特征、变形机制、及稳定性状况, 并结合工程的适宜性和经济性, 建议采用如下治理方案:

### 1) 封闭裂缝及回填反压

采用粘性土封闭滑坡上方裂缝, 以防止地表水下渗进一步降低岩土体抗剪强度; 对边坡下方开挖处回填反压, 增大下方土体抗滑力, 保证抗滑桩顺利进行。

### 2) 坡面防护

一级坡采用 1:1.5 实体护面墙, 坡高 10 m; 一级平台宽 5 m, 二级坡采用 1:1.5 放坡, 一坡到顶, A 区、B 区上采用片石堆砌。

### 3) 抗滑桩

考虑到不同分区, 滑坡剩余下滑力不一, 在 A 区、B 区、C 区一级平台上分别布设一排抗滑桩, 具体分布如下:

在 A 区、B 区下方一级平台分别布设一排悬臂式抗滑桩, 悬臂高度 3~5 m, 其中: A 区下方一级平台布设 7 根  $3.6 \times 2.4$  m 抗滑桩, 桩长 35 m, 桩间距 5 m, 与上部原抗滑桩呈梅花状布置; B 区下方布设 15 根  $4.0 \times 2.5$  m 抗滑桩, 桩长 30~35 m, 桩间距 5 m, 2 根  $3.0 \times 2.0$  m 抗滑桩, 桩长 35 m, 桩间距 5 m, C 区在原桩下部布设 3 根  $3.0 \times 2.0$  m 抗滑桩, 桩长 25 m, 桩间距 5 m。A 区、B 区桩间采用挡土板, 在桩与挡土板后侧二级坡采用片石堆砌, 坡率为 1:1.5。

### 4) 深层排水孔及坡面支撑渗沟

在一级边坡坡面上边坡上设置深层排水孔, 深层排水孔间距采用  $5 \times 4$  m, 呈梅花状布置, 具体位置可根据实际出水量进行调整。在坡体一级边坡上布设支撑渗沟, 以降低浅表地下水位, 坡面渗沟每 20 m 在边坡上设一道。

### 5) 监测边坡体

在边坡左侧路基下方布设一深层监测孔, 监测滑坡的位移情况, 同时建议增加边坡监测范围, 对滑坡上部省道坡体布设监控点, 以对省道安全加强监测。

## 7. 结语

本文通过对江口至瓮安高速公路某滑坡的成因及稳定性进行分析, 得出以下结论:

1) 滑坡形成的主要原因是下部坡体开挖后导致坡体形成陡峭临空面, 在暴雨以及施工扰动等因素影响下, 使得边坡土体进一步松动, 雨水顺着裂缝下渗, 软化土体, 抗剪强度下降, 使得坡体向下发生变形。

2) 本文采用不平衡推力传递系数法分别对 A、B、C 三个分区在天然状态和降雨状态写两种工况下进行稳定性计算, 结果表明在降雨时, 边坡处于不稳定状态。

3) 根据现场情况以及稳定性计算结果, 建议在一级坡采用悬臂式抗滑桩, 并设置深层排水孔, 对二级坡进行放坡处理, 并且在一级坡布设监测点, 对边坡变形进行监控。

## 参考文献

- [1] 汪丁建, 唐辉明, 李长冬, 等. 强降雨作用下堆积层滑坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 439-445.



- [2] 龚文俊, 李明永, 吴志坚. 降雨和地震耦合作用对滑坡稳定性的影响——以甘肃西和III号滑坡为例[J]. 西北地震学报, 2012, 34(2): 161-166.
- [3] 刘长春, 殷坤龙, 李远耀. 巴东县文家滑坡稳定性计算及其敏感性分析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(1): 113-117+123.
- [4] 李新平, 王涛, 谢全敏, 郭运华, 代翼飞. 高速公路滑坡稳定性分析及治理优化研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 981-985+990.
- [5] 祝辉, 唐红梅, 李明, 叶四桥, 石晋旭, 王昌贤. 重庆-贵州高速公路向家坡滑坡稳定性分析及防治对策研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 2687-2693.
- [6] 孙书勤, 黄润秋, 丁秀美. 天台乡滑坡特征及稳定性的FLAC~(3D)分析[J]. 水土保持研究, 2006(5): 30-32.
- [7] 姚爱军, 易武, 王尚庆. 杨家岭 1#滑坡稳定性影响因素及敏感性分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(4): 390-395.