汤罗圣，王云安，邓长青. 谷竹高速公路某滑坡成因机理及防治措施探讨[J]. 灾害学，2018，33(S1)：124 - 129，133.
[TANG Luosheng，WANG Yunan and DENG Changqing. Causes and Prevention Measures of a Landslide in Guzhu Expressway[J]. Journal of Catastrophology，2018，33(S1)：124 - 129，133. doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2018.Z1.023.]

谷竹高速公路某滑坡成因机理及防治措施探讨*

汤罗圣，王云安，邓长青

（湖北省交通规划设计院股份有限公司，湖北 武汉 430051）

摘　要：十堰地区因其地层岩性、地质构造等地质的复杂性及强降雨、人类工程活动等外部触发因素，目前发育的滑坡等地质灾害越来越多。本文将以谷竹高速公路某滑坡为例，通过现场调查、钻探、室内试验及物探等多种综合手段，对该滑坡的成因机理进行分析，并从经济、实用的角度提出有效的防治措施，以期为同类滑坡防治工程提供参考。

关键词：谷竹高速；滑坡；成因机理；防治措施

中图分类号：X43；U416；LT63；P642　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000 - 811X(2018)S1 - 0124 - 07

doi：10.3969/j.issn.1000 - 811X.2018.Z1.023

十堰地区因其复杂的地质构造导致岩体破碎，且广泛发育武当群绢云母石英片岩，在强降雨及边坡开挖等人类工程作用下，发育的滑坡等地质灾害越来越多。目前国内外研究片岩滑坡(边坡)的人较多，主要集中在片岩滑坡抗剪强度参数选取、滑坡稳定性分析及防治对策等方面。徐卫亚等通过锦屏一级水电站坝基绿片岩三轴流变试验，建立了绿片岩流变模型[1-2]；梅涛等以十堰某变电站边坡为例，采用饱和 - 非饱和渗流计算及极限平衡法对该边坡失稳的主要诱发因素进行了研究[3]；彭斌等通过对堰某变电站边坡的地质条件、变形特征及稳定性进行研究，总结出片岩边坡削坡工程中应注意的事项[4]；陈文玲等采用三轴蠕变试验对云母石英片岩弹性模量、黏滞系数等蠕变参数的变化规律、七元件线性黏弹塑性蠕变模型参数进行了研究[5-6]；刘胜利等采用原位直剪试验对强风化片岩结构特性、剪切面结构特征与抗剪强度的关系进行了研究[7]；刘建等通过谷竹高速片岩在天然状态和饱和状态下直剪试验对片岩抗剪强度的水敏性进行了研究[8]；杨帆等通过强风化片麻岩现场原位试验及经验公式研究了这两种抗剪强度参数选取方法的适用性[9]；张清照等通过对锦屏二级水电站的绿片岩进行单轴和三轴压缩流变试验，对绿片岩长期强度进行了研究[10]；王云安等以鄂西北某边坡失稳为例分析片岩边坡的成因机理及稳定性[11]；周革以合福铁路某云母石英片岩滑坡为例，从地形地貌、地质条件及降雨等角度对该类型滑坡的成因机理进行了研究[12]。本文将以谷竹高速公路某滑坡为例，通过现场调查、钻探、室内试验及物探等多种综合手段，对该滑坡的成因机理进行分析，并从经济、实用的角度提出有效的防治措施，以期为同类滑坡防治工程提供参考。

1　滑坡简介

1.1　滑坡规模

该滑坡位于襄阳市谷城县紫金镇孔溪沟村一组附近，滑坡体主要物质组成为第四系中 - 晚更新统残坡积含碎石粉质黏土、碎石土和部分全强风化片岩、变质辉绿岩组成，基岩片理顺坡向，产状 300° ~ 330° ∠30°。滑坡分布高程 375 m ~ 490 m，滑坡体宽约 200 m，纵长约 360 m，滑坡面积约 7.2 万 m^2，平均厚度 18 m，滑坡体积约 129.6 万 m^3，主滑方向 305°。具体滑坡全貌见图 1。

1.2　滑坡物质组成

滑体：主要为第四系残坡积含碎石粉质黏土、碎石土及元古界武当山群(Pt2twb)强风化绢云母石英片岩，其中含碎石粉质黏土为褐黄色，可塑，表层夹有少量植物根系，下部包含约 10% ~ 15% 的碎石，碎石直径一般 1 ~ 4 cm，多是棱角状，局

* 收稿日期：2018 - 04 - 06　　修回日期：2018 - 07 - 13

第一作者简介：汤罗圣(1984 -)，男，湖北石首人，博士研究生，高级工程师，主要从事地质灾害机理及预测预报等研究.
E-mail：homeandm@163.com

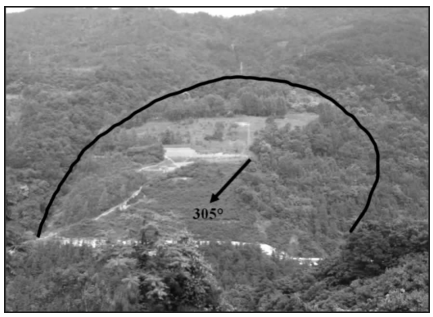


图 1　滑坡全貌图

部含有少量铁锰质结核，切面较光滑；碎石土为灰黄色－灰褐色，稍湿，松散－中密状，土石比4∶6～2∶8，碎石主要成分为强风化片岩、石英块等，碎石直径一般 2～10 cm，局部夹有块石，块石直径一般 20～40 cm，多呈次棱角状，少量棱角状，充填物为粘性土，稍湿，可塑；强风化绢云母石英片岩：褐色－灰白色，变晶结构，块状构造，主要矿物成分为石英、长石、云母等，裂隙发育，裂隙面可见大量铁锰质氧化物，局部可见条带状石英脉及溶蚀现象，岩芯多呈碎块状及块状，局部呈土状，少量呈短柱状，钻孔揭露岩芯绢云母含量很高。

滑带：为强风化绢云母石英片岩与中风化绢云母石英片岩的接触面，主要成分为粉质黏土夹碎石，粉质黏土呈软塑状，碎石主要为绢云母石英片岩碎块。

滑床：为元古界武当山群（Pt_2twb）中风化绢云母石英片岩，褐色－灰白色，变晶结构，块状构造，岩石断面新鲜，局部可见条带状石英脉，岩芯多呈短柱状、长柱状，钻孔揭露岩芯绢云母含量很高。

1.3　已有防治措施情况

该滑坡前缘目前已设置一高约 8 m，墙顶宽约 2 m 的挡土墙，挡土墙墙脚设置了钢轨桩，但目前挡土墙墙身变形较严重，局部墙脚已发生错动，最大错动约 20 cm，具体见图 2。



图 2　滑坡前缘公路中央隔离带及挡土墙变形

2　滑坡成因分析

2.1　滑坡变形破坏现状

该滑坡体上的变形裂缝及滑坡前缘挡土墙、公路变形等主要裂缝发育特征描述如下（见表 1 及图 3）。

表 1　滑坡裂缝发育特征调查一览表

裂缝编号	裂缝类型	发育部位	发育长度/m	延伸方向	最大张开度/cm	备注
L1	顶部为张裂缝，两侧为剪切裂缝	滑坡后缘平台	200	近南北向	60	与 L3、L4 交汇并一起向右侧延伸
L2	张裂缝	滑坡后缘平台	30	近南北向	10	与 L1 交汇并一起向左侧延伸
L3	张裂缝为主，侧边为剪切裂缝	滑坡后缘平台之下陡坡	70	近南北向	30	L3、L4 为一组交错裂缝，在两侧交汇在一起
L4	张裂缝为主，侧边为剪切裂缝	滑坡后缘平台之下陡坡	110	近南北向	70	
L5	剪切裂缝	滑坡后缘平台	35	近南西向	5	发育两组平行裂缝
L6	张剪裂缝，张裂缝为主	滑坡体中部	100	近北西向	20	
L7	张裂缝	滑坡前部平台	70	近北西向	5	局部下错，下错约 20 cm
L8	张裂缝	滑坡前部	40	近北西向	4	局部下错，下错约 5 cm
L9	张裂缝	滑坡前部	20	近北西向	5	由三条裂缝组成，延伸方向一致，均有下错，下错约 5 cm
L10	张裂缝	滑坡前缘挡土墙顶部	13	近南北向	5	
L11	鼓胀裂缝	滑坡前缘公路路面	22	近南西向	2	发育若干条平行裂缝
L12	剪切裂缝	滑坡前缘公路中央隔离带	35	近南北向	3	

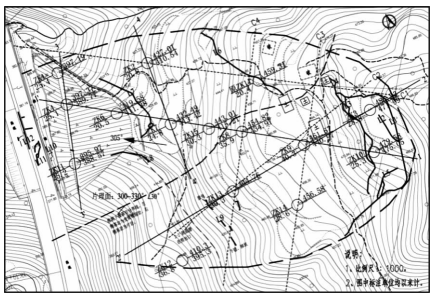


图 3 滑坡裂缝分布图

现场调查可知，滑坡前缘变形较明显，主要体现在前缘鼓包、局部发生下错、掉坎、挡土墙发生开裂、错台、路面反翘、开裂等，主要发育 L7、L8、L9、L10、L11、L12 共 5 条主要裂缝，在剪出口附近主要为剪切裂缝和鼓胀裂缝。从现场调查情况可知，滑坡前缘路面中央隔离带中发育有一条近南北向，延伸长度约 35 m 的剪切裂缝（L12 裂缝），公路路面出现若干平行的近南西向，延伸长度约 22 m 的鼓胀裂缝（L11 裂缝），且路面局部出现反翘。而滑坡前缘挡土墙基础底部已发生错动，错动距离最大约 20 cm，挡土墙墙顶开裂，发育一条近南北向，延伸长度约 13 m 的张裂缝（L10 裂缝），且挡土墙墙身也已出现剪切裂缝，同时墙体开裂渗水。根据调查，该滑坡前缘挡墙在降雨停止很长一段时间内（甚至在滑坡两侧冲沟无流水后）均有水流从挡土墙裂缝渗出，说明滑坡前缘剪出口在挡土墙附近。根据滑坡前缘路面裂缝、中央隔离带剪切裂缝、路面反翘以及挡土墙渗水等综合分析滑坡前缘局部剪出口已基本形成。

从滑坡前缘、后缘及中部变形现状可知，滑坡后缘裂缝基本已经贯通，滑坡前缘变形也很明显，局部剪出口基本已经形成，滑坡处于欠稳定状态，滑坡从公路中央隔离带剪出发生失稳破坏的可能性很大。

2.2 滑坡变形机理分析

据调查，该滑坡变形为工程开挖斜坡造成，滑坡范围受地形地貌、地层岩性、地质构造及水文地质条件控制。其形成具有明显的内在原因——地形地貌与地质条件，以及外在原因——路堑边坡开挖及长时间的持续降雨。

2.2.1 内在原因

滑坡形成的内在原因主要为滑坡所在斜坡区的地形地貌、地层岩性、地质构造及水文地质条件。

（1）地形地貌

滑坡所在的微地貌单元为坡向北偏西的斜坡，开挖前总体坡度 25°左右，属构造剥蚀侵蚀低山区。该斜坡坡脚是山间冲沟，高程约 350 m，地势相对较低，坡顶较高，高程约 490 m，相对高差约 140 m。

滑坡坡面起伏不平。后缘相对较缓，坡面中部平缓，为当地村民茶园，前缘相对较陡。后缘缓坡地形坡度 20°左右，中部地形坡度约为 10°。

滑坡体存在三级平台，平台部位地形较缓，特别是后缘平台缓坡地形为地表水汇集下渗及径流提供有利的条件，后缘汇集的地表水在坡面中部流速降低，有利雨水下渗进入坡体。

（2）地层岩性

据野外实地调查和钻孔揭露，滑坡区地层为双层结构，下部为元古界武当山群片岩、变质辉绿岩（Pt_2wb）、上部覆盖层为第四系中－晚更新统残坡积层，主要为含碎石粉质黏土、碎石土，土体松散，孔隙较大，有利于大气降水的入渗。

武当山群绢云母石英片岩（Pt_2wb）片理发育，且绢云母含量很高，其强风化层岩体破碎，且裂隙发育，并有泥质充填，且风化差异加大，局部呈土状，其在地下水长期浸泡后易形成软弱结构层，为滑坡提供了天然滑面。

武当山群变质辉绿岩（Pt_2wb）绢云母含量较高，其强风化层岩芯较破碎，受构造作用影响，局部岩芯呈土状，易在地下水浸泡、变质等作用下形成软弱结构面。

（3）地质构造

根据区域地质资料，该滑坡处于青峰断裂带附近，位于南秦岭构造带中的武当山复背斜次级构造单元，褶皱、揉皱发育，导致滑坡岩体节理裂隙发育，岩体破碎，一方面降低岩体抗剪强度，另一方面，裂隙发育为地下水渗入及流动提供通道，软化、润滑岩体，进一步降低抗剪强度，同时加快岩体风化速度，为滑动面的形成提供有利条件。

（4）水文地质条件

该滑坡分布三级平台，平台交接部位地形坡度较大，平台部位利于积水，有利于地下水的补给，平台交接陡坡为地下水径流提供有利条件。根据滑坡坡体结构，滑坡覆盖层为碎石土和含碎石粉质黏土，该层地下水为上层滞水，下覆基岩为片岩和变质辉绿岩，主要为基岩裂隙水。地下水接受降雨补给后总体由土层向基岩面、然后大部分顺基岩面向坡脚排泄，一般具有就地补给、就近排泄的特点。地下水顺基岩面的长期流动一方面软化滑动面，另一方面润滑滑动面，同时促进强风化片岩的进一步风化，进一步降低滑带的抗剪强度参数。

2.2.2 外在原因

（1）路堑边坡开挖

路堑边坡开挖是滑坡变形破坏的主要外在因素。滑坡前缘边坡开挖，一方面使坡体卸荷产生

卸荷裂隙，降雨沿裂隙渗入滑体中增加滑体自重，同时软化滑带并产生静水压力，增加滑坡下滑力并减小抗滑力；另一方面，滑坡前缘滑坡开挖，开挖坡度陡于斜坡自然坡度，为滑坡下滑提供临空面，且从地形地貌上分析，因片理面顺坡向，路堑边坡开挖部位属于滑坡“势能聚集”部位，属于滑坡的阻滑段，边坡一旦开挖，上部失去支撑，滑坡并将发生失稳破坏。

（2）降雨

考虑到滑坡发生重大变形破坏均发生在降雨过程中或降雨结束之后，故降雨是该滑坡发生持续变形破坏的主要诱发因素。降雨一方面沿坡体入渗，使坡体饱和，增加滑体自重，另一方面，降雨沿裂缝入渗，软化坡体物质及滑带，降低滑带抗剪强度参数，同时降雨入渗补给地下水，沿基岩面或裂隙面流动，在坡体中产生静水压力及动水压力，使滑坡发生变形破坏。

3　滑坡防治措施分析

3.1　滑坡稳定性分析

按《公路路基设计规范》（JTG D30－2015）、《滑坡防治工程设计与施工技术规范》（DZ/T0219－2006）、《滑坡防治工程勘查规范》（GB/T 32864－2016）等的相关规定，采用极限平衡法中简布法和传递系数法（剩余推力法）计算滑坡的稳定性系数和剩余下滑力。

（1）计算剖面选定

根据现场调查、滑坡体及防护结构变形、地质勘探等资料综合判断滑坡的主滑方向为305°，因此选取1－1′作为滑坡的计算剖面（图4）。但在现场调查过程中，滑坡左侧前缘存在2－2′剖面方向鼓包、下错、掉坎等变形，且2－2′剖面上ZK3、ZK9、ZK13三个钻孔资料均揭露地层岩性很差，且2－2′剖面方向存在很大的临空面，滑坡有往2－2′剖面方向滑动的可能性，一旦该方向发生滑动，将严重影响谷竹高速安全运营，为了安全考虑，同时为了彻底根治该滑坡危害，本次也将2－2′剖面作为计算剖面（图5）。

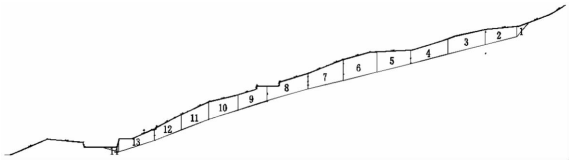


图4　1－1′计算剖面条分图

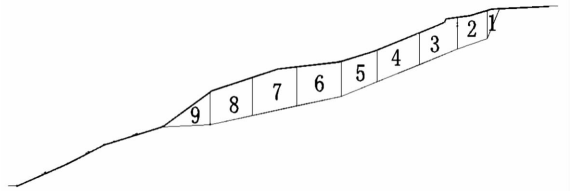


图5　2－2′计算剖面条分图

（2）计算工况选取

根据《公路路基设计规范 JTGD30－2015》中有关滑坡特殊路基设计要求，该滑坡拟考虑以下2种工况条件进行滑坡稳定计算（滑坡区为6度区，故不考虑地震工况）：①天然工况；②暴雨工况；

（3）计算参数确定

该滑坡各岩土层抗剪强度参数主要采用室内试验、工程地质类比及参数反演综合确定，其综合取值见表2。

（4）计算结果分析

采用上述计算模型和参数，结合极限平衡方法分别在天然工况和暴雨工况下计算该滑坡的稳定性系数，其计算结果如表3所示，其中天然工况安全系数取1.20～1.30，暴雨工况稳定安全系数取1.10～1.20。对于主滑方向1－1′剖面，滑坡前缘目前已有防治措施为钢轨桩＋挡土墙，从前述滑坡变形可知，滑坡剪出口在公路中央隔离带，基

表2　滑坡稳定性计算岩土体力学参数综合取值表

岩体类别		岩土物理力学参数					
		天然工况			暴雨工况		
		重度/（kN/m^3）	C/kPa	φ/（°）	重度/（kN/m^3）	C/kPa	φ/（°）
碎石土		21.8	5	23	24	3.5	16.55
含碎石粉质黏土		21.0	13	22	23.1	9.1	15.4
强风化片岩		24.5	34	25	27	23.8	17.5
强风化变质辉绿岩		25.5	40	28	28	28	19.6
滑带	1－1′	20.5	12	14	22.55	10.8	12.6
	2－2′	20.5	18	15	22.55	16.2	13.5
中风化片岩		26.5	120	29	28.5	108	26.1
中风化变质辉绿岩		27.5	200	40	29	180	36

备注：因两个剖面滑动方向不一样，滑带抗剪强度参数取值不一样，1－1′剖面主要沿岩层片理面滑动，而2－2′主要是切层滑动，故2－2′剖面比1－1′剖面滑带抗剪强度参数取值稍大。

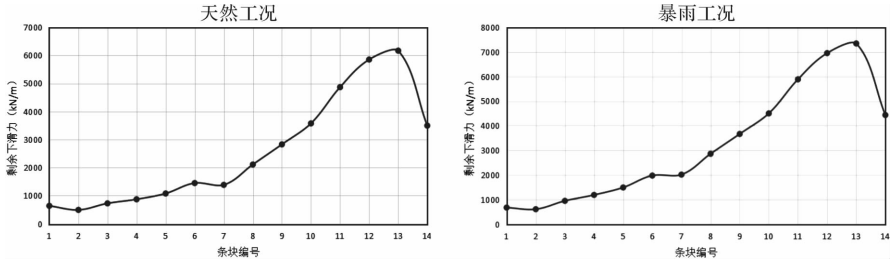


图 6 1－1′剖面天然工况、暴雨工况剩余下滑力计算结果

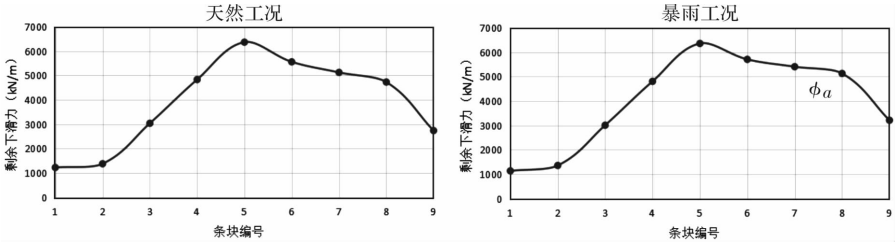


图 7 2－2′剖面天然工况、暴雨工况剩余下滑力计算结果

本在钢轨桩顶部剪出，故滑坡计算时未考虑其对滑坡的作用力，而挡土墙局部也已经发生变形，故仅考虑滑坡前缘挡土墙的部分支挡作用，即在滑坡前缘设置与滑坡主滑方向相反的分布荷载 50 kPa，分布宽度为挡土墙高度。

表 3 滑坡稳定性计算结果

计算工况	1－1′剖面	2－2′剖面
天然工况	1.052	1.041
暴雨工况	0.929	0.937

由表 3 可知，滑坡 1－1′剖面在天然状态下稳定性系数为 1.052，处于欠稳定状态；在暴雨或持续降雨状态下，滑坡稳定性系数为 0.928，处于不稳定状态；滑坡 2－2′剖面在天然状态下稳定性系数为 1.042，处于欠稳定状态；在暴雨或持续降雨状态下，滑坡稳定性系数为 0.937，处于不稳定状态。为了谷竹高速安全运营，该滑坡急需进行工程治理。

(5)剩余下滑力计算

该滑坡剩余下滑力计算天然工况条件下采用 1.25 的设计安全系数，暴雨工况下采用 1.15 的设计安全系数，各条块剩余下滑力计算结果如图 6 和图 7 所示。

(6)防治措施建议

针对该滑坡的诱发因素，结合现场实际情况，建议处治方案为：①削坡减载，考虑到防治措施的有效性及施工的可行性，建议在滑坡后缘进行削坡，减小滑坡后缘压力，即减小下滑力，从而达到增加滑坡稳定性的目的；②设置支挡工程，在合适的部位设置抗滑桩工程，增强滑坡体的稳定性；③坡面防护工程，减小雨水的下渗及对坡面的冲刷，增强滑坡的稳定性；④排水工程，在滑坡适当部位设置截排水沟，及时将降雨排走，防止雨水入渗降低滑坡的稳定性；⑤监测措施，在施工前、施工过程中和施工结束之后一段时间内对滑坡体和支挡结构的变形进行监测，包括在滑坡体上布置一定数量的地表位移监测墩，同时在支挡结构上布置一定数量的裂缝和位移监测点，及时了解滑坡的变形情况，可根据监测情况指导施工，如有异常情况，及时上报。下面将结合滑坡实际情况对设置的抗滑桩及削坡减载方案进行重点计算分析。

(1)抗滑桩

结合滑坡特征，考虑到防治工程的有效性及施工条件的便利性，对于 1－1′剖面滑动方向，根据计算结果可设置两排桩，分别设置在 8# 条块和 12# 条块的平台上；对于 2－2′剖面滑动方向，可在滑坡后缘进行卸载，前缘设置一定的支挡措施，可考虑在 9# 条块附近设置抗滑桩。两个剖面拟设置抗滑桩对应的下滑力如表 4 和表 5 所示。

表 4 1－1′剖面滑动方向拟设置抗滑桩位置条块剩余下滑力

计算工况	第 8 条块剩余下滑力/(kN/m)	第 12 条块剩余下滑力/(kN/m)	设计安全系数
天然工况	2109.9	5850.4	1.25
暴雨工况	2858.7	6951.7	1.15

表 5 2－2′剖面滑动方向拟设置抗滑桩位置条块剩余下滑力

计算工况	第 9 条块剩余下滑力/(kN/m)	设计安全系数
天然工况	2736.4	1.25
暴雨工况	3210.0	1.15

(2)削坡减载

考虑到支挡工程设计推力过大，且滑坡前后部坡体较破碎，易受雨水冲刷，稳定性较差，故在防治工程中将对滑坡前后部进行削坡。根据滑坡

表 7　1－1′剖面削坡前后对比分析

对比内容	稳定性系数		第 8 条块剩余下滑力/(kN/m)		第 12 条块剩余下滑力/(kN/m)	
	天然工况	暴雨工况	天然工况	暴雨工况	天然工况	暴雨工况
削坡前	1.052	0.929	2109.9	2858.7	5850.4	6951.7
削坡后	1.095	0.964	1234.4	1704.5	4899.5	5773.0

变形情况及滑坡地形情况，并考虑到滑坡抗滑桩的布置，对于 1－1′剖面和 2－2′剖面削坡减载位置及削坡后的地形如图 8 和图 9 所示。

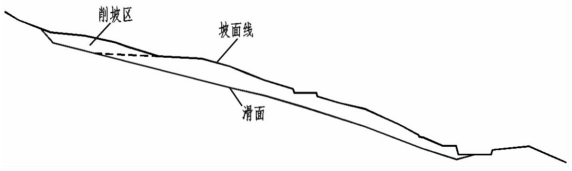


图 8　1－1′剖面削坡示意图

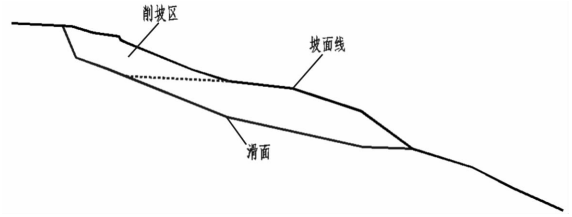


图 9　2－2′剖面削坡示意图

(3)综合分析

根据滑坡计算结果，对滑坡采取削坡减载之前和之后的滑坡稳定性和拟设置抗滑桩位置的剩余下滑力、稳定性系数进行对比分析，具体如表 7 和表 8 所示。

表 8　2－2′剖面削坡前后对比分析

对比内容	稳定性系数		第 9 条块剩余下滑力/(kN/m)	
	天然工况	暴雨工况	天然工况	暴雨工况
削坡前	1.041	0.937	2736.4	3210.0
削坡后	1.393	1.226	－1250.4	－616.8

从表 7 和表 8 可以看出，削坡减载之后，无论是对于 1－1′剖面还是 2－2′剖面，其稳定性系数均有所提高，而剩余下滑力均有所降低，说明削方减载增加滑坡的稳定性具有很大的作用，且能减少支挡措施工程数量；同时，从 2－2′剖面削坡前后对比分析可知，削坡后在天然状态下，该剖面稳定性系数为 1.393，已大于规范要求安全系数 1.25，在暴雨工况下，该剖面稳定性系数为 1.226，也已大于规范要求安全系数 1.15，说明削坡减载后，2－2′剖面已达到稳定性状态，该剖面方向滑动已不需要设置抗滑桩工程，这也从另外一个方面说明了削坡减载方案对该滑坡治理的有效性和必要性。

4　结论

(1)该滑坡体宽约 200 m，纵长约 360 m，滑坡面积约 7.2 万 m^2，平均厚度 18 m，滑坡体积约 129.6 万 m^3，主滑方向 305°。

(2)地层岩性、地形地貌、地质构造、水文地质是滑坡失稳的主要内在因素，路堑边坡开挖及降雨是滑坡失稳的主要外在因素。

(3)该滑坡在天然工况下处于欠稳定状态，在暴雨工况下处于不稳定状态，急需对该滑坡进行工程治理。

(4)该滑坡的防治措施为削坡减载＋抗滑桩＋坡面防护＋截排水＋监测。

参考文献：

[1] 徐卫亚，杨圣奇，杨松林，等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(I)：试验结果[J]. 岩土力学，2005，26(4)：531－537.

[2] 徐卫亚，杨圣奇，谢守益，等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究(II)：模型分析[J]. 岩土力学，2005，26(5)：693－698.

[3] 梅涛，王禹，彭斌，等. 鄂西北片岩边坡渗流计算与稳定性分析[J]. 土工基础，2010，24(4)：77－80.

[4] 彭斌，黄河，尚义敏，等. 鄂西北片岩质边坡变形破坏机制和对策[J]. 土工基础，2010，24(2)：49－52.

[5] 陈文玲，赵法锁. 云母石英片岩蠕变模型参数选择研究[J]. 地球科学与环境学报，2010，32(2)：200－204.

[6] 陈文玲，赵法锁，弓虎军. 三轴蠕变试验中云母石英片岩蠕变参数的研究[J]. 岩石力学与工程学报，2011，30(S1)：2810－2816.

[7] 刘胜利，余飞，罗红明，等. 鄂西北山区强风化片岩强度特性原位直剪试验研究[C]//第 8 次全国岩石力学与工程试验及测试技术学术交流会，2012.

[8] 刘建，李建朋. 谷竹高速公路原状片岩抗剪强度的水敏性研究[J]. 岩土力学，2012，33(6)：1719－1723.

[9] 杨帆，侯克鹏，谢永利. 强风化云母石英片岩力学参数确定方法[J]. 长安大学学报(自然科学版)，2012，32(2)：29－33.

[10] 张清照，沈明荣，丁文其. 锦屏绿片岩力学特性及长期强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2012，31(8)：1642－1649.

[11] 王云安，陈小明，王红明，等. 鄂西北山区高速公路滑坡灾害成因机制与稳定性分析[J]. 西南公路，2013(2)：150－153.

[12] 周革. 山前区云母石英片岩风化层滑坡分析与治理[J]. 铁道标准设计，2014，58(4)：14－17.

(下转第 133 页)