地信网
WWW.35001.COM

第22卷 第4期 地质灾害与环境保护 Vol. 22, No. 4
2011年12月 Journal of Geological Hazards and Environment Preservation December 2011

文章编号：1006－4362(2011)04－0050－06

毕威高速公路病害边坡成因机制及稳定性分析

杨德龙[1]，张赓[2,3]，郑慧[2]，黄凡[1]

(1. 贵州省公路工程集团有限公司，贵阳 550002；2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室，成都 610059；3. 成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室，成都 610059)

摘要： 毕威高速K103＋240～580段路基开挖中边坡出现滑坡。从地形地貌、地层岩性、地质构造、气象水文和水文地质方面查明滑坡的区域环境。并勘查滑坡的边界条件、形态特征、结构特征和变形破坏特征。在此基础上，讨论边坡变形破坏的成因机制，对边坡稳定性进行定量与定性评价。并依据这些研究和地质条件提出边坡防治建议。

关键词： 毕威高速公路；滑坡；成因；稳定性；防治建议

中图分类号： U412.36⁺6；TU457 **文献标识码：** A

1 引言

贵州省毕节至威宁高速公路是《贵州省高速公路网规划》(678网)中“六横”的重要组成部分、贵州省西北部的重要快速通道。公路起自毕节城南龙滩边，经坝口、赫章，止于威宁县城北草海镇周家院子，接昭通至六盘水高速公路，全长约125.5 km。

由于高速公路沿线地质条件复杂，地质环境脆弱，在路基开挖过程中，赫章县境内K103＋240～580段线路右侧边坡出现坍方、滑坡等病害，严重影响工程正常施工作业。因此本文将根据边坡变形特征以及斜坡地貌情况，查明病害边坡的形态特征、结构特征及变形破坏特征，分析其变形破坏的成因机制并对其进行定量分析与定性分析，为边坡治理提供可靠的地质依据与治理建议。

2 滑坡发育的自然环境

2.1 地形地貌

勘察区位于贵州省中部，地处苗岭山脉北坡，地形起伏较小，高程1 760～1 830 m，相对高差达50～70 m，原始斜坡坡度一般为20°～25°。岩层中缓倾坡外，形成地势开阔的溶蚀缓丘地貌。坡体地表植被发育一般，以灌丛林为主，局部上边坡发育松、杉等高大乔木。

2.2 地层岩性

勘察区所在区域内主要出露地层为古生界的二叠系和新生界的第四系。从新到老简述如下：

第四系(Q)：褐色、褐黄色粘土，粉质粘土，砂砾；主要分布于缓坡及沟谷内。

二迭系上统(P_2)：峨眉山玄武岩组($P_2\beta$)，为暗绿、暗灰、灰黑色斑状玄武岩、拉斑玄武岩；主要分布于赫章、红专、哑巴山、三道水、妈姑一带，为勘察区主要出露基岩。

二迭系下统(P_1)：茅口组(P_1m)浅灰、灰色中厚层至块状石灰岩；分布于硝洞、黄井、陈家寨等地，为勘察区主要出露基岩。

2.3 地质构造与地震

勘察区域处于川滇南北构造带之东，南岭东西向构造带之北，新华夏构造体系最西边。

沿线区域一级褶皱构造带主要由罗州-赫章背斜，褶皱构造轴向约NE20°～40°，岩层倾向为NW或SE，倾角5°～38°。距勘察区较近的断层垭都断层为非活动断层，区域地质稳定性较好；勘察区内有F1断层，为正断层(推测)。F1影响宽度50 m。

根据国家地震局1999年发布的1/400万《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)，区内地震动

收稿日期：2011-06-09 改回日期：2011-11-09

万方数据

反应频谱特征周期：赫章以东为 0.35 s，地震动峰值加速度系数小于 0.05 g，相似地震烈度为Ⅵ度；赫章至威宁为 0.4～0.45 s，地震动峰值加速度系数为 0.05～0.1g，相似地震烈度大于Ⅵ度。

2.4　气象水文与水文地质条件

勘察区属暖温带季风湿润气候区，年均气温 14.0℃，极端最高气温 34.5℃，极端最低－8.6℃。降水量在 793.1～984.5 mm 之间，年均降水 851.6 mm，年平均日照时数 1 380.7 h，年无霜期平均 247 d，年平均相对湿度 79%。历年最大风速 28.0 m/s，平均风速 2.1 m/s。

地表水系属长江流域之乌江水系，勘察区内沿线地表水发育一般，仅出露个别小溪。

大气降水是地下水补给的主要来源，其补给受地质构造、地层岩性、地貌等因素的影响。勘察区基岩以玄武岩为主，裂隙十分发育，地下水类型主要为基岩裂隙水，局部为松散堆积层孔隙水。

地下水动态受大气降水影响明显，地下水天然露头的水化学类型简单。水质类型多为 HCO_3—Ca 型水及 HCO_3—Ca·Mg 型，含煤地层有少量 HCO_3·SO_4—Ca·Mg 型水。总硬度多为 0.98～25.10 德度，矿化度 0.09～0.56 g/l，pH 值 5.5～8.25，为弱酸至弱碱性水，为当地村民饮用和农田灌溉的重要水源。

2.5　不良地质现象与人类工程活动

根据前期地质勘察资料及本次野外调查，勘察区主要不良地质现象为滑坡，顺层高边坡局部坍塌。

由于高速公路正在施工，公路右侧边坡大量开挖，开挖垂直高度达 20～30 m；局部路基填方高度为 8～10 m，施工弃土多堆积于路基下边坡。总之，勘察区人类工程活动强烈，对地质环境改变较大。

3　滑坡发育特征

该段边坡位于 K103＋240～580 段右侧，由 K103＋240～480(1#边坡)和 K103＋480～580(2#边坡)两段组成，中间以自然冲沟为界，如图 1 所示。

3.1　滑坡的基本特征

(1) 1#滑坡发育基本特征

1#边坡沿公路方向长约 240 m，目前开挖高度约 35～40 m，原始边坡坡度 20°～25°，坡向 135°。该段边坡 K103＋370～450 段坍滑严重(HP1)，且主要发生于玄武岩残坡积层内，1#边坡如图 2 所示。

滑坡 HP1 平面上呈不规则宽条状，主滑方向为 S45°E，横向长约 55 m，坡脚顺公路方向宽约 80 m，

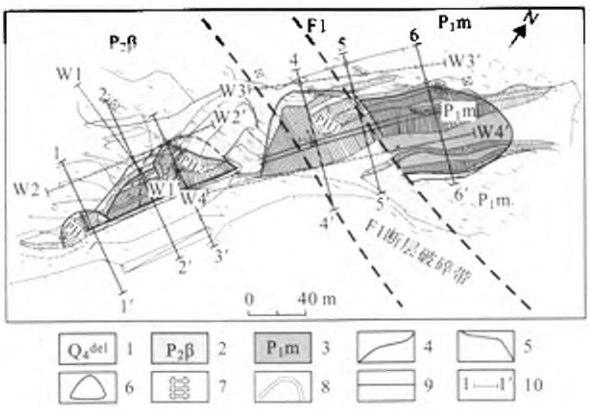


图 1　工程地质平面图

Fig. 1　Engineering geology plan

1. 第四系滑坡堆积层；2. 二叠系下统茅口组；3. 二叠系上统峨眉山玄武岩；4. 地层界限；5. 裂缝；6. 滑坡界线；7. 锚索框格梁；8. 坡顶截水沟；9. 线路里程；10. 剖面线

面积约 0.32×10^4 m²。后缘高程 1 833 m，前缘至目前开挖路基高程以上约 8 m，高程 1 807 m，相对高差 25～27 m，滑坡体厚约 10 m，体积 3.2×10^4 m³。

该段边坡分为灰岩区和断层破碎带及玄武岩区两段，中间由逆断层 F1(推测)隔断。

K103＋240～370 段为二叠系茅口组灰岩区，上覆厚 8～10 m 红褐色可塑-软塑状粘土，下伏中厚层状细晶灰岩，产状 135°～155°∠30°～40°，层面粗糙，覆 1～2 mm 厚方解石重结晶。灰岩溶蚀严重，发育多处溶槽，宽 5～8 m，深 15～20 m，填充红褐色软塑状粘性土夹玄武岩角砾。

K103＋370～480 段为断层破碎带及二叠系玄武岩区，由于受断层影响，该段边坡岩体十分破碎。上部灰黄色硬塑-可塑状粘土含强风化玄武岩角砾，厚度 10～15 m；下部为灰黄色、灰白色碎石角砾土，稍密-松散，碎石含量 60%～70%，粒径 5～20 cm，岩性主要为强风化玄武岩，其中间夹大块强风化灰岩，块径可达 50～80 cm，块碎石为次棱角状-圆状，表面较光滑，厚度大于 10 m。

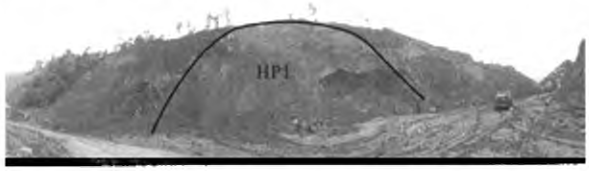


图 2　1#滑坡全景图

Fig. 2　Panorama of Landslide 1

(2) 2#滑坡基本特征

2#边坡长约 100 m，目前开挖高度约 30～35 m，原始坡向 128°，坡度 25°～35°。该段边坡主要发育一处滑坡 HP2 及一处小滑塌 HP2-1，2#边坡如

万方数据

图 3 所示。

滑坡 HP2 平面上呈典型圈椅状，主滑方向为 S55°E，横向长约 39 m，坡脚顺公路方向宽约 70 m，面积约 0.19×10^{4} m²。后缘高程 1 833 m，前缘至目前开挖路基，高程 1 798 m，相对高差 31～33 m，滑坡体厚约 5 m，体积 0.95×10^{4} m³。滑塌 HP1-1 平面上呈不规则长条状，主滑方向为 S55°E，横向长约 20 m，坡脚顺公路方向宽约 62 m，面积约 0.09×10^{4} m²。后缘高程 1 816 m，前缘剪出口至目前开挖路基以上约 1 m，高程 1 803 m，相对高差 10～12 m。滑坡体厚约 3 m，体积 0.27×10^{4} m³。

该段边坡上部为厚 3～5 m 残坡积粘土，黄褐色，灰黄色，含少量强风化玄武岩碎石角砾，硬塑-可塑状；中下部主要以斑状玄武岩及凝灰质玄武岩为主，全-强风化，灰黄色、紫红色、灰白色，呈土状，锤击即散。

从坡面调查分析，坡体主要发育 3 组结构面，一组为顺坡中陡倾结构面（L1），一组结构面为陡倾坡内（L2），一组走向与边坡近垂直（L3）。其中 L1、L2 表面可见明显错动形成的擦痕，分析认为 L1 应为玄武岩层间错动形成，L2 应为玄武岩层内错动形成的结构面。

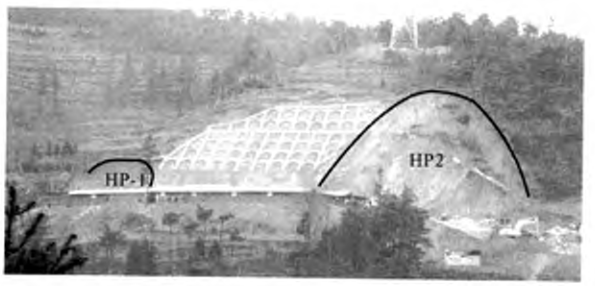


图 3 2# 滑坡全景图

Fig. 3 Panorama of Landslide 2

3.2 滑坡结构特征

（1）滑体特征

滑体上部以红褐色、黄褐色可塑-硬塑状粘土为主，干强度低，韧性差，呈散体结构；下部以灰黄色、灰绿色碎石夹粘土为主，碎石为强风化玄武岩，块径 5～15 cm，碎石含量最大可达 60%～70%，稍密，稍湿。

（2）滑带特征

滑坡 HP1 后缘出露滑面较粗糙，沿公路方向呈波浪起伏，滑面产状 140°～160°∠50°～60°，滑带土为黄褐色粘土，厚度 2～3 cm，可塑状；前缘剪出口高于路面 4～7 m，高程 1 804～1 807 m，由于坡表土体坍塌掩盖，仅局部出露，滑带土为灰黄色粘土，厚度 5～10 cm，软塑状，手搓呈长条状，含少量砂粒，有刺手感。

滑坡 HP2 后缘出露滑面较粗糙，滑面产状 130°～140°∠50°～55°，滑带土为黄褐色-灰白色粘土，软塑状，手搓有滑腻感。

HP2-1 滑带土为褐黄色软塑状粘土，厚约 2～3 cm，滑面产状 192°∠23°，擦痕方向 140°，出露高程约 1 803 m。

（3）滑床特征

滑坡 HP1 滑床以强风化玄武岩及灰岩碎块石夹土为主，呈稍密状，碎块石块径 5～50 cm，灰岩块径稍大，最大可达 80～100 cm，稍湿-湿。

滑坡 HP2 滑床为凝灰质玄武岩风化形成的黄褐色、灰白色、紫红色粘土夹碎石，碎石含量 10%～20%。

3.3 变形破坏特征

滑坡 HP1 后缘坡顶平台发育多条沿坡面的张拉裂缝，最大裂缝宽约 1 m，下挫 0.9 cm，可见深度 1.6 m，延伸长度 50～60 m，呈圆弧形。其余裂缝多为宽 2～3 cm，走向 N40°E，延伸长度 10～20 m，最远裂缝距坡口约 25 m。该段滑坡呈不连续坍滑，后缘下挫高度 5～15 m，前缘堆积于开挖路基之上，滑体呈三角锥型散开。

滑坡 HP2 后缘下挫 2～3 m，滑体表面坡度 40°，两侧受滑坡牵引变形影响，形成垂直或斜交与坡面的拉张裂缝，长度 20～30 m。

坍滑体 HP2-1 后缘裂缝从坡顶排水沟位置向南西方向延伸，延伸长度近 60 m，张开 2～5 cm，下挫 30～50 cm。在前缘剪出口位置，滑体向临空方向已经剪出 5～10 cm。

4 病害边坡成因机制分析

4.1 边坡弱面发育是形成滑坡的主要控制因素

1# 边坡 K103＋370～480 段受断层影响，坡体十分破碎，破碎层厚度大于 30 m，深入路基以下。上部主要为黄褐色粘土，下部主要为碎石类土，成分为强风化玄武岩夹灰岩大块石，粘土呈可塑-软塑状，自身力学强度较低，边坡易沿粘土底部碎石土层顶面发生滑动破坏。

2# 边坡上部为 3～5 m 厚的粘土，中下部主要为全-强风化玄武岩及凝灰质玄武岩，发育层内、层间错动带。该类结构面夹泥，力学性质较差，且层间错动带倾坡外，在边坡开挖临空和降雨的不利条件下，坡体容易沿该分界面产生蠕滑-拉裂和滑移-拉裂变形。

万方数据

4.2　水的软化作用是滑坡形成的诱发条件

勘察区基岩以玄武岩为主，裂隙十分发育，地下水类型主要为基岩裂隙水，局部为松散堆积层孔隙水。地表水的深入和地下水的使土体快速增重，软化了滑移构造破碎带，而地下水在滑动带上的渗流作用，使滑动面的抗滑力明显下降，从而诱发滑坡的产生。

4.3　开挖改变临空条件是滑坡形成的外在因素

由于路基开挖，形成高陡边坡，改变了原有坡体的平衡状态并形成了有效的临空面，为滑坡提供了滑动空间。治理工程没有紧紧跟上，使坡体内的裂隙在卸荷后松弛、张开，从而使地表水更易下渗，并改变了原有地下水的通道及流速、流向，地下水渗至坡体内软化滑带，进而降低其抗剪强度；同时由于路基挖方坡体解除支撑，暴露了滑动面，滑体中的软弱夹层在上覆岩体的重力作用下失稳。

5　病害边坡稳定性分析及发展趋势

5.1　稳定性计算

(1) 计算方法

滑面为折线形滑面，采用传递系数法。

(2) 计算公式

$$F_s=\frac{\sum_{i=1}^{n-1}(R_i\prod_{j=i}^{n-1}\psi j)+R_n}{\sum_{i=1}^{n-1}(T_i\prod_{j=i}^{n-1}\psi_j)+T_n}$$

$$\psi_j=\cos(\theta_i-\theta_{i+1})-\sin(\theta_i-\theta_{i+1})\tan\varphi_{i+1}$$

$$\prod_{j=i}^{n-1}\psi_j=\psi_j\times\psi_{j+1}\times\psi_{j+2}\times\cdots\times\psi_{n-1}$$

$$R_i=N_i\tan\varphi_i+c_iL_i$$

$$T_i=W_i\sin\theta_i$$

$$N_i=W_i\cos\theta_i$$

$$W_i=V_{iu}\gamma+V_{id}\gamma'+F_i$$

式中，F_s 为滑坡稳定性系数；ψ_j 为传递系数，第 i 条块的剩余下滑力传递至第 $i+1$ 块时的传递系数($j=i$)；R_i 为作用于第 i 块的抗滑力(kN/m)；T_i 为作用于第 i 条块滑动面上的下滑分力(kN/m)；N_i 为第 i 条块滑动面的法向分力(kN/m)；c_i 为第 i 条块的粘聚力(kPa)；φ_i 为第 i 条块的内摩擦角(°)；L_i 为第 i 条块滑动面的长度(m)；θ_i 为第 i 条块底面倾角(°)，反倾时取负值；W_i 为第 i 条块自重与建筑等地面荷载之和(kN/m)；γ 为岩土体的天然容重(kN/m^3)；γ_{sat} 为岩土体的饱和容重(kN/m^3)；F_i 为第 i 条块所受地面荷载(kN/m)。

5.2　计算剖面

选择 HP1 的 4-4′、6-6′剖面及 HP2 的 2-2′、3-3′剖面进行计算，如图 4 所示。

该段边坡已有设计变更，主要开挖方案为：第一级边坡按 1∶0.75，第二至第三级边坡按 1∶1.25～1∶1.5 削坡，按设计变更开挖边坡稳定性计算，计算剖面如图 4。

5.3　计算工况

根据《建筑抗震设计规范》(GB5011-2010)附录 A 规定，赫章地区抗震设防烈度为Ⅵ度，稳定性计算可不考虑地震影响。因此，稳定性计算考虑天然和暴雨状态。

工况一：天然

工况二：天然＋暴雨

5.4　参数选取

根据室内试验及反算分析，稳定性计算参数取值详见表 1。其中，灰岩结构面结合一般-较差，抗剪强度按《建筑边坡工程技术规范》(GB50330-2002)取值。

表 1　稳定性计算参数取值表

Table 1　Parameters for stability calculation

剖面编号	天然状态			饱水状态		
	γ /kN·m^{-3}	c/kPa	φ/°	γ /kN·m^{-3}	c/kPa	φ/°
2-2′		20	28		10	27
3-3′	19.0			19.5		
4-4′		30	12.5		25	11
6-6′	23	50	29	23.5	40	27

5.5　稳定性综合评价

按上述计算工况对该病害点稳定性进行了计算，计算结果如表 2。

表 2　边坡稳定性计算结果表

Table 2　Slope stability calculations

施工情况	剖面编号	稳定性系数 k			
		工况Ⅰ(天然)		工况Ⅱ(暴雨)	
当前	2-2′	1.079	基本稳定	0.869	不稳定
	3-3′	0.990	不稳定	0.811	不稳定
	4-4′	0.958	不稳定	0.815	不稳定
	6-6′	1.446	稳定	1.252	稳定
按设计变更后开挖	2-2′	1.126	基本稳定	0.972	不稳定
	3-3′	1.157	稳定	0.964	不稳定
	4-4′	1.105	基本稳定	0.935	不稳定
	6-6′	1.347	稳定	1.172	稳定

稳定性计算结果表明，目前 1# 边坡灰岩区稳定性较好，而玄武岩残坡积边坡区稳定性很差；2# 边坡处于基本稳定-不稳定状态；边坡按设计变更开挖完毕后，边坡稳定性均有所提高，天然状态下，边坡都处于基本稳定-稳定状态，但在不利工况条件下，除灰岩边坡稳定性较好外，其余边坡仍然不稳定。

万方数据

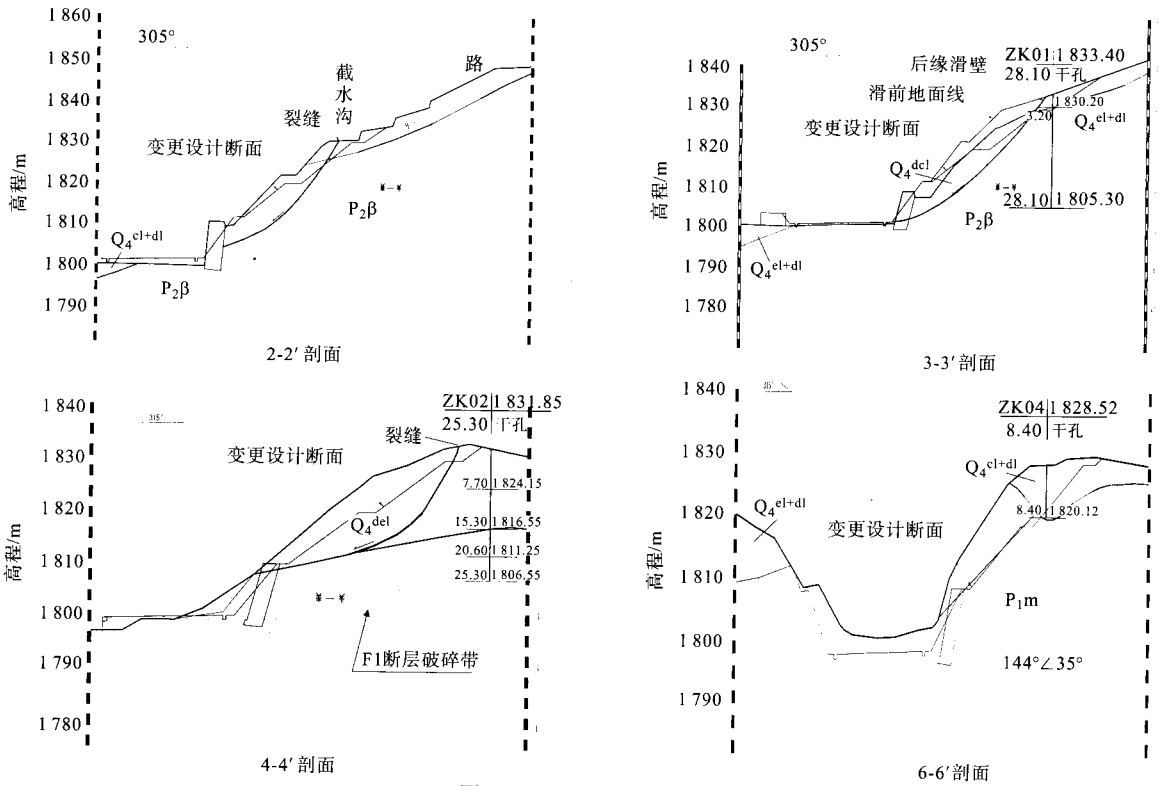


图 4 工程地质剖面图

Fig. 4 Engineering geology profile

5.6 发展趋势分析

根据边坡变形特征以及稳定性计算结果分析，当边坡继续开挖，虽然坡率增大，稳定性有所提高，但仍然不能满足安全要求。

公路运营后，边坡岩体卸荷松弛，蠕动变形，软弱结构面强度降低、贯通，坡体将逐渐产生局部严重变形、坍塌等病害，破坏边坡防护设施，危及公路的行车安全。

6 结论与建议

6.1 结论

(1) 勘察区共两段边坡，坡高 30～35 m，开挖坡率 1∶0.75～1∶1。1# 边坡的 K103＋240～370 段主要为中风化灰岩，顶部 8～9 m 为红褐色可塑状粘性土，灰岩呈中厚层状，裂隙发育程度一般，溶蚀现象严重，多发于溶槽，岩层产状与边坡坡向一致，倾角 30°～40°，属中缓倾坡外结构；K103＋240～370 段为断层破碎带及全-强风化玄武岩，坡体十分破碎，以黄褐色、灰黄色粘土及碎石类土为主。2# 边坡以全-强风化玄武岩为主，顶部覆盖残坡积粘土夹碎石。边坡属于土质/岩质混合型边坡。

(2) 边坡开挖后，1# 边坡由粘土夹碎石构成的破碎坡体无法自稳，沿开挖坡面及底部碎石土顶面发生滑坡；2# 边坡由于开挖造成岩体内倾坡外结构面临空，坡体沿结构面发生滑移-拉裂破坏，局部造成已有支护结构的破坏。

(3) 目前边坡稳定性较差，不时有小规模的坍滑发生；若按照设计变更开挖，稳定性有所提高，但在不利工况条件下，仍然局部不稳定，有可能造成支护结构的破坏。

(4) 在现有基础之上，对边坡开挖坡率进行适当调整，并增加坡面防护措施，可有效消除边坡剩余下滑力，保证边坡安全。

6.2 建议

(1) 由于边坡已经大部分开挖完毕，应在雨季到来之前，尽快对开挖边坡进行有效地支护。

(2) 上部坡体尚未支护之前，严禁在坡脚大范围开挖。

(3) 做好边坡后缘拉张裂缝的人工监测。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家标准.《岩土工程勘察规范》(GB50021-2001)[S]. 北京：地质出版社，1994.

[2] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 科学出版社，1998.

[3] 张宁，胡瑾. 贵州某机场的主要工程地质问题分析及其处理措施建议[J]. 地质灾害与环境保护，2003，14(2)：66-67.

万方数据

[4] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M]. 北京：中国水利水电出版社，2003.

[5] 黄润秋. 中国西部地区典型岩质滑坡机理研究[J]. 地球科学进展，2004，19(3)：443-450.

[6] 杨伟，林义华，杨建国. 四川广元 108 国道某边坡的稳定性分析和对策研究[J]. 地质灾害与环境保护，2005，16(3)：0295-0300.

[7] 杨晓松，王友成，张斌. 公路施工导致的古滑坡复活实例分析[J]. 地质灾害与环境保护，2002，13(3)：43-46.

FORMATION MECHANISM OF THE DISASTER SLOPES ON BI-WEI EXPRESSWAY AND THEIR STABILITY

Yang De-long[1], Zhang Geng[2,3], Zheng Hui[2], Huang Fan[1]

(1. Guizhou Highway Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard prevention & Geoenvironment protection, Chengdu 610059, China; 3. Key Lab of Earth Exploration & Information Techniques of Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Landslides occurred during the roadbed excavation of Segment K103 +240～580. The regional environment was identified in terms of topography, lithology, geological tectonics, meteorology, hydrology and hydrogeology. We also investigated the boundaries, morphology, structure, deformation and failure characteristics of the landslides. On this basis, we discuss the causes of the slopes' deformation and failure mechanism, evaluate its stability both quantitatively and qualitatively, and finally offer our control recommendations here.

Key words: Bi-Wei Expressway; landslide; cause; stability; control recommendation

作者简介：杨德龙(1966－　)，男，贵州省习水县人，高级工程师，主要从事地质工程工作。

万方数据