

红层地区运营期公路边坡长期稳定性在线评价系统

邬凯, 杨雪莲, 刘天翔

(四川省公路规划勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘要: 山区公路运营期边坡长期稳定性具有逐步劣化特征, 而传统边坡分级评价方法未形成长期稳定性动态评价体系。根据四川红层丘陵区公路边坡坡体结构和变形失稳特征, 建立了基于动态变形的边坡长期稳定性量化评价体系。针对公路边坡沿线点状分布, 数量较多的特点, 对红层区 398 个公路边坡开展了详细地质调查和评价, 基于互联网技术, 建立了公路边坡健康信息数据库和在线管理评价平台, 提高了公路边坡地质灾害防灾减灾信息化管理水平。经过系统在线动态评价结果, 及时对不稳定边坡进行处治, 有效保障了山区高速公路安全运营。

关键词: 红层地区; 运营期; 公路边坡; 坡体结构; 长期稳定性; 在线评价

1 引言

随着“一带一路”和交通强国战略的持续推进, 中国中西部逐步形成规模宏大的山区高速公路网。受复杂脆弱的地质环境条件和不利的气候条件影响, 公路边坡地质灾害防灾减灾技术问题越来越突出。以四川典型山区公路运营期边坡长期稳定性调查分析为例, 部分山区高速公路边坡在建成通车 10~15 年后仍会变形失稳, 例如 2000 年建成通车的成雅高速公路 K1 920 左侧边坡于 2011 年出现变形失稳, 2000 年建成通车的广邻高速公路 K1 666 左侧边坡于 2015 年出现变形。因此山区公路运营期边坡受降雨风化、地震震裂及滑带土软化等作用影响, 其长期稳定性具有逐步劣化特征。

传统公路边坡分级评价方法是针对公路建设期边坡, 采用公路边坡原始属性特征对边坡进行静态评价, 无法反映运营期公路边坡稳定性的动态劣化特征。近年来, 逐步有专家学者开始对运营期公路边坡风险评估提出了研究思路和框架方案, 但尚未形成有针对性和操作性的动态评估系统。鉴于山区运营期高速公路边坡数量多、长期稳定性劣化的特点, 需要建立公路边坡长期稳定性评价方法和系统, 通过科学有效和信息化的手段对边坡长期健康进行动态管理。

四川省目前已通车运营高速公路约 52 条, 其中红

层地区运营高速公路约 30 条, 占比约 60%, 因此以红层地区运营期公路边坡为例进行研究具有典型意义。红层是一种外观以红色为主色调的层状碎屑岩体, 广泛分布于中国四川盆地、滇中北地区等。四川盆地红层多为侏罗系、白垩系砂泥岩互层, 岩层倾角多小于 20°, 软硬相间, 岩体层面结合差, 软弱结构面发育, 属于易滑地层。

该文以四川红层山区高速公路为例, 深入分析红层边坡坡体结构特征和失稳破坏模式, 对红层区 398 个公路边坡开展详细地质调查和评价, 建立边坡长期稳定性动态评价体系。基于互联网技术, 建立公路边坡健康信息数据库和在线管理评价平台, 为公路运营期边坡地质灾害防灾减灾提供平台支持。

2 公路边坡特征因素选取

公路边坡地质体具有复杂性、多变性和不均质性的特点, 在这样一种条件下进行边坡的稳定性评价, 既需顾及不同边坡的个性, 也要找出带有规律性的共性。通过确定影响公路边坡稳定性的特征因素, 为边坡稳定性评价提供支撑。传统公路边坡稳定性评价影响因素主要包含 3 类: 边坡地形地貌、坡体结构特征、边坡环境条件。以上 3 类因素基本属于静态因素, 一般不随时间发生变化。由于公路边坡长期稳定性具有逐步劣化特征, 对于现场调查和日常养护管理, 最易于获取

的边坡动态信息即为边坡变形特征。因此可以将边坡动态变形特征作为长期稳定性评价的重要特征因素。

边坡地形地貌特征主要包括边坡高度、边坡角度(坡比)、坡面形态等因素。边坡坡体结构特征可按岩土二元结构边坡(土质边坡)、岩质边坡两大类进行分类表示。边坡环境条件主要包括人类工程活动影响、降雨量及地下水特征、地震烈度等。以上均属于边坡基本信息,也是公路边坡稳定性动态评价的基础健康信息,在首次收集资料和现场调查后即可相对固定。边坡动态变形特征主要是指当前阶段现场调查得到的边坡变形情况,可根据定期的边坡健康调查和养护巡查来更新。在现场获取公路边坡特征因素后,就可以建立边坡工程基础信息数据库,为边坡长期稳定性量化评价提供数据统计基础。

3 红层边坡坡体结构特征及变形失稳模式

3.1 红层边坡坡体结构特征

红层地区公路边坡坡体结构可分为岩土二元结构边坡(土质边坡)、岩质边坡两大类。岩土二元结构边坡坡体结构特征主要包括土体地质成因、土体厚度、岩土界面倾角。土体地质成因主要分为人工堆积、崩坡积、坡残积、冲积,其中人工堆积土体稳定性最差。土体越厚、岩土界面倾角越大,边坡越容易失稳。

岩质边坡主要考虑 3 个要素,即岩性组合、结构面和临空面。岩性组合主要是不同坚硬程度和风化程度岩石组合情况,可划分为单一岩性和组合岩性。红层地区岩性的组合包括泥岩为主、砂岩为主、泥岩夹砂岩、砂岩夹泥岩,其中砂岩夹泥岩的岩性组合最为不利。结构面发育程度以及结构面与临空面关系也是影响岩质边坡稳定性的重要因素。结构面与临空面的组合关系主要包括缓倾顺层或小角度顺层斜交、近水平(略倾坡外)、近水平(略倾坡内)、反倾或大角度相交。

3.2 红层边坡失稳破坏模式

岩土二元结构边坡一般为上覆土层、下为岩石的二元结构。这种边坡,岩土分界面常倾向高速公路,即潜在滑移方向与坡向一致,由于高速公路的修建,将上覆土层与下部基岩的岩土分界面切穿,造成了边坡前缘剪出口临空,破坏了以前堆积体的整体完整性和平衡状态,在连续强降雨等因素的影响下,土体重度增加,岩土分界面的黏土层或土体中的软弱层饱水软化,潜在滑带土抗剪强度降低,最终可能形成覆盖土层滑

坡,又常表现为土质牵引式滑坡。土体厚度较大时也可能产生沿土体内部的圆弧式滑动。广邻高速公路 K1 666 边坡变形即为该模式。

岩质边坡失稳破坏模式与不同力学性质的岩层组合密切相关,从边坡工程角度分析,红层地区岩质边坡主要失稳破坏模式见表 1。

3.2.1 泥岩为主的层状结构

岩质边坡岩体以泥质岩为主,如泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩等。岩性较为单一的软岩坡体边坡病害一般表现为以碎落为主,部分高陡边坡有发生“软弱基座式压致拉裂型”滑移变形破坏的可能。

3.2.2 砂泥岩互层结构

砂泥岩互层结构又分为厚层砂岩在上厚层泥岩在下的结构、厚层泥岩在上厚层硬岩在下的结构、中~薄层状砂泥岩互层的结构。

(1) 厚层砂岩在上厚层泥岩在下的结构

① 滑移破坏:厚层砂泥岩互层的结构在地质构造过程中容易产生层间错动,形成软弱夹层,厚层砂泥岩互层坡体中的砂岩张开构造节理发育(特别是两组陡倾裂隙),常成为地表水和地下水渗透的通道,地表水下渗至下伏泥岩等软岩,而泥岩为相对不透水层,且泥岩具有浸水软化的特征,地下水长期浸泡后形成软弱面,上覆砂岩在裂隙水压力的作用下,沿下伏软弱面常形成滑坡。

② 崩塌、楔形块体滑移变形破坏:砂泥岩互层的结构常因砂泥岩间的差异性风化,在下伏泥岩中形成深大凹腔,上覆砂岩受构造作用及边坡开挖卸荷、爆破等因素的影响,岩体节理裂隙较为发育(特别是陡倾裂隙发育),受外倾层面和两组陡倾裂隙的控制,形成不利结构面组合,并因下部泥岩内形成了凹腔,上覆砂岩失去支撑常发生崩塌掉块或楔形块体滑移变形破坏。

(2) 厚层泥岩在上厚层砂岩在下的结构

这种结构由于上部泥岩为相对不透水层,地表水和地下水不易往下渗透,下部砂岩的构造节理中不易充水,不会形成过大的裂隙水压力,故这种结构相对较为稳定,边坡病害以上部软岩风化碎落、下部硬岩表层小规模崩塌掉块为主。

(3) 中~薄层状砂泥岩互层的结构

这种结构的边坡病害主要以小规模崩塌、楔形体块体滑移破坏为主。

3.2.3 巨厚层砂岩为主的层状结构

边坡岩体以巨厚层砂岩为主,偶尔夹有薄层泥岩,但薄层泥岩的分布位置和力学性质对坡体失稳模式有

表1 岩质边坡岩体结构类型与变形破坏模式特征

岩体结构类型	亚类	岩体力学特性及主要变形破坏模式
	厚层砂岩为主的层状结构	受物理地质作用影响,一般来讲厚层砂岩在斜坡体上部,下部为泥岩或夹有泥岩。砂泥岩层水理性质的差异和风化性质的差异是构成边坡岩体变形破坏的主要因素。崩塌落石是最典型的破坏模式
近水平岩层边坡岩体(倾角 $<8^\circ$)	砂泥岩互层的层状结构	砂泥岩力学性质的差异是构成该类型边坡岩体变形破坏的主要因素。近水平的泥岩层面、软弱夹层和陡倾节理共同构成岩体变形破坏的界面。强度高的砂岩体内一般发育两组近正交的陡倾节理裂隙,成为地表水下渗的通道,泥岩强度低,外力作用下变形大,浸水后易软化,为相对不透水层。暴雨等因素的影响下,在地表水下渗软化泥岩层面,砂岩贯穿性节理充水后,在裂隙水压力综合作用下,易于产生顺层面座滑型滑坡或岩体拉裂变形。砂泥岩的差异风化容易产生砂岩崩塌落石和泥岩风化剥落
	泥岩为主的层状结构	岩性较为单一的泥岩边坡一般表现为碎落为主的病害特征。但部分边坡开挖为高陡边坡,边坡高度多在30 m以上,由于岩性为软岩,边坡开挖后坡体内应力开始调整释放,岩层沿近水平的结构面缓慢回弹滑移,岩层内锁固段或嵌固体附近因拉应力集中而产生自下而上扩展的拉裂隙。在大致平行坡面的重力作用下,拉裂隙端部被压致拉裂。随拉裂面的逐渐贯通,变形进入破坏阶段。陡倾的阶状裂面成为剪应力集中带,再加上经历长时间的工程运营期后,坡脚及边坡下部泥岩易软化,待陡倾裂面与平缓滑移面构成贯通性滑面时,边坡最终可能发生“软弱基座式压致拉裂型”滑移变形破坏
	顺坡层状边坡岩体结构	受构造影响层间错动、软岩层面发育,边坡岩体力学性质主要受泥岩层面、软弱夹层控制,岩体顺层滑移是最主要的破坏模式
缓倾岩层边坡岩体(倾角 $8^\circ \sim 15^\circ$)	反倾层状边坡岩体结构	该类型坡体稳定性主要受构造结构面(一般与层面近于垂直)影响,岩体中岩性及岩性组合特征不同,构造作用程度不同,相应结构面发育程度和贯穿性也不同。岩体变形破坏主要为构造结构面切割岩体的滑移破坏,主要以倾向临空面的构造结构面为剪切滑移面
	斜交层状边坡岩体结构	根据岩层倾向与边坡坡向关系的不同,可分为顺层斜交和反倾斜交两种。岩体的变形破坏主要受层面和构造节理面控制,顺层斜交岩体破坏多为层面和一组构造结构面为滑移面,反倾斜交多为两组构造结构面为滑移面,层面为后边界。块体的切割度和稳定性主要受产状岩层、不同岩性组合的影响
	正交层状的边坡岩体结构	岩体稳定性受构造结构面控制,主要为倾向开挖面构造结构面切割岩体的剪切滑移、崩塌破坏

重要的影响。砂岩体主要受构造作用及边坡开挖卸荷的影响,岩体节理裂隙较为发育,在不利的结构面组合下形成危岩体,且这种结构整体为相对透水层,在强降雨等条件下,在砂岩体内易形成较高水头的裂隙水压力,最终可能产生较大规模的崩塌灾害。

根据红层边坡失稳破坏特征,对边坡稳定性最为不利和公路运营安全危害最大的是顺层滑坡、平推式滑坡和“软弱基座式压致拉裂型”滑移变形破坏,其次是楔形体滑动和崩塌灾害,小规模掉块及风化碎裂不影响公路边坡整体稳定且危害最小。因此,缓倾顺层或小角度顺层斜交与厚层砂岩夹泥岩的组合为最为不利的坡体结构特征,反倾或大角度相交(正交)与厚层

泥岩夹砂岩的组合为最为有利的坡体结构特征。

4 红层边坡稳定性量化动态评价方法

4.1 边坡稳定性评价指标

在野外调查的基础上,针对岩土二元结构边坡,采用边坡坡高、坡比、坡面形态、变形特征、土体地质成因、土体厚度、岩土分界面倾角、人类工程活动、地下水特征、降雨量、地震烈度等特征因素作为量化评价基础指标,对边坡稳定状况进行量化评价。岩质边坡量化评价基础指标包括坡高、坡比、变形特征、岩性组合关系、岩层产状与路线关系、岩石风化程度、节理发育程

度、地下水特征、降雨量、地震烈度等因素。对每个基础指标分 4 个量级进行划分和打分,指标权重系数及分值根据红层边坡变形失稳调查结果和专家经验取

得。岩土二元结构边坡稳定状况量化评价体系见表 2,岩质边坡稳定状况量化评价体系见表 3。

表 2 岩土二元结构边坡稳定状况量化评价体系

分类指标	基础指标	权重	量级划分							
			特征	得分	特征	得分	特征	得分	特征	得分
地形地貌	坡高	0.09	>30 m	9	30~20 m	8	20~10 m	6	<10 m	1
	坡比	0.09	>1:0.5	9	1:1.0~1:0.5	8	1:2.0~1:1.0	6	<1:2.0	1
	坡面形态	0.04	凹形	4	直线	3	凸形	2	阶梯形	1
	目前变形特征	0.17	强烈变形	17	中等变形	14	微弱变形	10	无变形	1
土质边坡结构特征	土体地质成因	0.09	人工堆积	9	崩坡积	8	坡残积	6	冲积	1
	土体厚度	0.11	>20 m	11	20~10 m	10	10~5 m	7	<5 m	1
	岩土界面倾角	0.15	>40°	15	20°~40°	12	10°~20°	8	<10°	1
其他因素	人类工程活动	0.07	强烈	7	中等	5	微弱	4	无	1
	地下水特征	0.05	涌水	5	淋水	4	潮湿	3	干燥	1
	多年平均降雨量	0.09	>1 200 mm	9	1 000~1 200 mm	8	700~1 000 mm	6	<700 mm	1
	地震烈度	0.05	9	5	8	4	7	3	6	1

表 3 岩质边坡稳定状况量化评价体系

分类指标	基础指标	权重	量级划分							
			特征	得分	特征	得分	特征	得分	特征	得分
地形地貌	坡高	0.09	>45 m	9	30~45 m	7	15~30 m	5	<15 m	1
	坡比	0.07	>1:0.5	7	1:1.0~1:0.5	5	1:2.0~1:1.0	4	<1:2.0	1
	目前变形特征	0.25	强烈变形	25	中等变形	20	微弱变形	10	无变形	1
岩质边坡坡体结构特征	岩性组合关系	0.12	厚层砂岩夹泥岩	12	泥岩为主	9	砂岩为主	6	厚层泥岩夹砂岩	1
	岩层产状与路线关系	0.14	缓倾顺层 或小角度 顺层斜交	14	近水平 (略倾 坡外)	12	近水平 (略倾 坡内)	8	反倾或大 角度相 交、近正交	1
	风化程度	0.07	强烈风化	7	中等风化	5	弱风化	4	微风化	1
	节理发育程度	0.09	发育	9	较发育	7	发育差	5	不发育	1
	地下水特征	0.05	涌水	5	浸水	4	潮湿	3	干燥	1
其他因素	多年平均降雨量	0.07	>1 200 mm	7	1 000~1 200 mm	5	700~1 000 mm	4	<700 mm	1
	地震烈度	0.05	9	5	8	4	7	3	6	1

4.2 边坡稳定性量化评价及对策

在通过现场调查获取边坡特征信息后,即可根据表 2、3 对边坡稳定性进行量化评价,每项分类指标得分合计为该边坡的量化评价总分。量化评价总分等级标准:100~80 为不稳定,79~60 为欠稳定,59~40 为基本稳定,39~11 为稳定。如表 4 所示,针对边坡稳定性不同的量化评价等级,管理部门可采用相应措施进行分级管理。

5 工程实例

5.1 工程概况

四川红层地区某典型山区高速公路,路线全长约 214 km,主要穿越川中丘陵区。沿线出露的地层主要有中侏罗系上沙溪庙组、中统遂宁组、蓬莱镇组、遂宁组等红层地层以及第四系冰水堆积层、全新统河流堆

表4 边坡稳定性分级及管理对策

得分	稳定分级	危害程度	应对措施
39~11	稳定	基本无不良地质现象,仅以局部表层轻微碎落为主,病害产生所可能引起的损失小,不会影响边坡整体稳定,也不会影响高速公路行车安全	日常养护巡查
59~40	基本稳定	局部有小规模的不良地质现象,病害产生会造成一定的损失,对高速公路行车安全有中等影响	重点养护巡查
79~60	欠稳定	有较大规模的不良地质现象,且有继续发展的趋势,边坡一旦失稳将会造成较严重的生命财产损失,将对高速公路行车安全造成较大影响和潜在威胁	建议在建设资金允许的情况下采取工程加固处治措施,目前应加强监测,可委托专业监测单位进行专项监测
100~80	不稳定	有很大规模的不良地质现象,且有变形发展的趋势,边坡一旦失稳将会造成非常严重的生命财产损失,将对高速公路及行车安全造成很大的影响	建议应立即立专项处治工程对其进行抢险处治

积层、崩坡积层、残积层、滑坡堆积层等。地层岩性以砂泥岩为主,沿线边坡结构类型主要为岩土二元结构及岩质边坡结构。现场调查包含了全线10 m高度以上的所有边坡,累计398个边坡,对各边坡的起止里程桩号、边坡长度、边坡最大高度、边坡坡向、岩层与坡向的关系、地层、岩性、层面产状、主要节理裂隙产状、主要地质特征和变形情况等边坡特征要素进行了详细的调查。将边坡特征要素和照片等作为边坡基础信息录入系统数据库,采用互联网技术,基于三层B/S结构开发了边坡信息管理与决策支持系统可以对边坡基础信息进行查询、编辑管理,包括公路边坡基础特征信息及照片等。公路管理部门通过登录互联网即可在线查询、管理边坡工程信息。

5.2 分类统计结果

对全线边坡按照:边坡最大高度 ≤ 20 、 $20\sim 30$ 、 $30\sim 40$ 、 $40\sim 50$ 、 >50 m 5种类型进行统计,其中最大高度位于 $30\sim 40$ m间的边坡为110处,占比最大,全线边坡按照岩质边坡和岩土二元结构边坡分为两大类,全线边坡以岩质边坡为主,约为390处少量为岩土二元结构边坡。

根据岩层倾角将岩质边坡分为近水平地层边坡(倾角 $<8^\circ$)和倾斜地层(一般倾角 $8\sim 15^\circ$,极个别 $30\sim 45^\circ$)边坡两类分别进行统计,其中近水平地层边坡374处,仅少量为倾斜地层边坡。近水平地层边坡根据岩体结构进一步细分为以下3类进行统计:近水平厚层砂岩为主的层状结构边坡、近水平砂泥岩互层的层状结构边坡、近水平厚层泥岩为主的层状结构边坡。

倾斜地层边坡也根据岩体结构进一步细分为以下3类进行统计:倾斜地层厚层砂岩为主的层状结构、倾斜地层砂泥岩互层的层状结构、倾斜地层厚层泥岩为主的层状结构3类。其中以近水平地层边坡以泥岩(45%)和近水平砂泥岩互层边坡(45%)为主,倾斜岩层边坡以倾斜砂泥岩互层边坡为主(占87%)。

全线边坡按照边坡的潜在破坏模式,分别按潜在土质滑塌(坡)、潜在岩质滑塌(塌)、碎落、崩塌4种灾害类型进行统计,其中潜在破坏模式以碎落(195个)和崩塌(155个)为主,少量边坡存在滑坡和滑塌风险。

5.3 动态评价结果及对策

根据边坡量化评价体系,建立了边坡量化在线动态评价系统。如图1、2所示,在系统中输入边坡量化信息后可自动对边坡稳定性进行评价。在定期现场核查后,可对量化信息进行修正,以形成边坡稳定健康动态评价。根据目前现场调查的边坡特征信息,如图3

序号	公路名称	工程名称	最高/m	坡比	目前地质特征	土体组成	土体厚度/m	岩土工程类别	地下水特征	多年平均位移量/mm	稳定性等级	操作
1	成绵高速	K1807+212-K1807+930L	>30	1:1.0-1:1.5	散体杂类	人工堆砌	10~5	10°~20°	强烈	1000~1200	6	基本稳定
2	成绵高速	K1886+750-K1886+770L	30~20	1:2.0-1:1.0	强烈杂类	顺层顺层	20~10	20°~40°	强烈	1000~1200	6	欠稳定
3	成绵高速	K1913+918-K1913+965L	<10	1:1.5-1:2.0	中等杂类	人工堆砌	10~5	20°~40°	中等	1000~1200	6	基本稳定
4	成绵高速	K1940+810-K1941+000R	>30	<1:2.0	中等杂类	人工堆砌	20~10	10°~20°	强烈	1000~1200	7	欠稳定
5	成绵高速	K1941+075-K1941+110R	>30	1:1.0-1:1.5	强烈杂类	人工堆砌	10~5	10°~20°	中等	1000~1200	7	欠稳定
6	成绵高速	K1941+220-K1941+425R	>30	1:2.0-1:1.0	强烈杂类	人工堆砌	20~10	10°~20°	中等	1000~1200	7	欠稳定
7	成绵高速	K1941+480-	>30	1:1.5-								

图1 岩土二元结构边坡稳定性在线量化评价

所示,全线共 9 处岩土二元结构边坡,其中不稳定边坡为 4 处。如图 4 所示,全线岩质边坡稳定状况以基本稳定和稳定为主,其中不稳定边坡 11 处。

序号	公路名称	工点名称	坡高/m	坡比	填筑或土质特征	结构型式	稳定性评价	风化程度	岩体产状与结构关系	岩体强度	节理发育程度	地下水特征	多年平均降雨量/mm	地震烈度/度	稳定性评价	操作
1	成渝高速	K1769+680~K1769+775L	15~30	1:1.0~1:0.5	无变形	泥岩为主	中等	近水平(弱层内)	中等	发育	干燥	1000~1200	6	稳定	详细	
2	成渝高速	K1770+300~K1770+452L	15~30	1:2.0~1:1.0	无变形	泥岩为主	中等	近水平(弱层内)	中等	发育	干燥	1000~1200	6	稳定	详细	
3	成渝高速	K1770+425~K1770+450L	15~30	1:2.0~1:1.0	无变形	泥岩为主	中等	近水平(弱层内)	中等	发育	干燥	1000~1200	6	稳定	详细	
4	成渝高速	K1771+500~K1771+670L	15~30	1:1.0~1:0.5	无变形	泥岩为主	中等	近水平(弱层内)	中等	发育	干燥	1000~1200	6	稳定	详细	
5	成渝高速	K1772+100~K1772+350L	30~45	1:1.0~1:0.5	微错变形	泥岩为主	中等	近水平(弱层内)	中等	发育	干燥	1000~1200	6	基本稳定	详细	
6	成渝高速	K1772+350~K1772+600-	15~30	1:1.0~1:0.5	无变形	厚层状灰砂岩	中等	近水平(弱层内)	中等	发育	干燥	1000~1200	6	稳定	详细	

图 2 岩质边坡稳定性在线量化评价

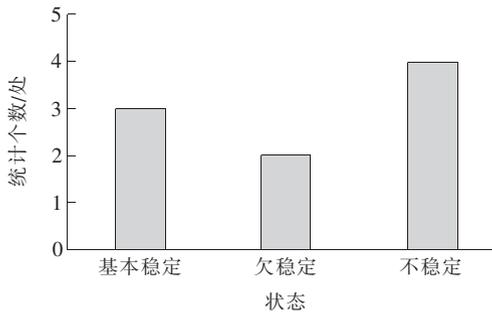


图 3 岩土二元结构边坡稳定性量化评价结果

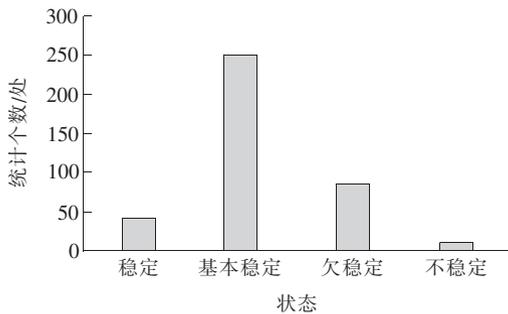


图 4 岩质边坡稳定性量化评价结果

根据边坡稳定性动态评价结果,有针对性地对边坡开展了日常巡查、常规监测和处治加固。以两处典型边坡处治实例进行说明。

(1) K1 845+275~K1 845+450 左侧边坡为近水平岩层结构边坡,边坡地层岩性以泥岩为主,边坡高 44 m,5 级边坡。原边坡采用挂网植草绿化防护,受长年降雨、风化等外部营力因素的影响,坡脚处强风化的泥岩层软化,抗剪强度急剧降低,再加上边坡高陡,岩层易发生“软弱基座式压致拉裂型”滑移变形破坏,边

坡脚处的边沟侧壁有往公路方向位移现象,经量化分级评价为不稳定边坡。根据持续观测结果,边沟盖板随后继续出现了反翘、拱起迹象,最大拱起高度为 3~5 cm。上部第 4 级平台也出现宽 5~20 cm 的裂缝。种种迹象表明边坡有发生整体滑动的可能,因此对该边坡采取了应急加固处治。

(2) K1 941+480~K1 942+000 右侧边坡为岩土二元结构边坡,高 41 m,土层厚度 10~15 m。根据现场调查,受降雨等因素的影响,边坡上的 2 级边坡有浅层滑动变形特征,量化评价为不稳定边坡。后经持续观测,2 级边坡上后缘持续下错 0.5~1.0 m,后缘裂缝宽 10~40 cm,受前缘变形牵引,3 级边坡后缘也下错 1.0~1.8 m,后缘裂缝宽 10~50 cm,且边坡变形已推挤至 2 级边坡平台上的边沟,并致使边沟开裂、变形,有形成整体滑坡的可能。因此也对该边坡采取了应急支挡加固措施。

6 结论

(1) 针对公路运营期边坡长期稳定性动态劣化的特征,在深入分析红层地区边坡坡体结构和失稳破坏模式的基础上,建立了基于时效变形特征的公路边坡长期稳定性量化评价体系。

(2) 针对公路边坡点状分布、数量较多的特点,基于互联网技术,建立了公路边坡基础信息数据库,开发了边坡稳定性在线量化评价系统,实现了公路边坡长期健康动态管理。

(3) 以某典型红层山区高速公路为例,详细调查了 398 处边坡特征信息,利用在线评估系统对边坡特征进行了分类统计和动态评价,根据动态评价结果,对边坡进行了及时处治和分类管理,提升了公路边坡防灾减灾信息化管理水平。

参考文献:

- [1] 刘新喜,侯勇,戴毅,等. 软弱夹层岩质边坡长期稳定性研究[J]. 中外公路,2017(4).
- [2] 张勇慧,李红旭,盛谦,等. 基于模糊综合评判的公路岩质边坡稳定性分级研究[J]. 岩土力学,2010(10).
- [3] 罗陵,刘层林. 公路边坡稳定性快速评价研究[J]. 公路,2012(12).
- [4] 王浩,林一夫,梁涛,等. 福建山区高速公路路堑高边坡风险分级方法研究[J]. 工程地质学报,2016(4).
- [5] 李志强,杨涛,王亚平,等. 边坡稳定性动态辨识及工程应用[J]. 中外公路,2018(5).

基于强度折减技术的加筋土二级边坡参数敏感性分析

李继兰¹, 陈耀章²

(1. 悉地(苏州)勘察设计院有限公司 湖南分公司, 湖南 长沙 410000; 2. 湖南省交通科学研究院有限公司)

摘要:针对加筋土加固的二级边坡,该文基于极限分析理论,提出了一种计算该类型边坡稳定性的方法。在已有研究成果的基础上,构建了二级边坡破坏模型,该破坏模型能够考虑不同台阶高度和平台宽度的计算问题。将筋材所提供的加固力引入到破坏模型中,并推导了分析二级边坡稳定性的功能平衡方程。借助强度折减思想,建立了计算安全系数的方法。通过与现有研究成果进行对比,验证了该文提出方法的有效性,并采用正交试验方法研究了不同参数的敏感性。分析结果表明:土体内摩擦角对安全系数的敏感性最大,而边坡高度系数最小;土体黏聚力、下边坡坡角和边坡高度对安全系数敏感性较大,而平均布筋强度及上边坡坡角较小。

关键词: 极限分析; 加筋土二级台阶边坡; 强度折减法; 正交试验

1 概述

岩土工程领域中,为了保证边坡的稳定性,通常会采取在土体中加入土工格栅的措施来提高边坡的稳定性。在土体中加入土工格栅可以提高边坡的整体性,控制边坡侧向位移,提高土体抗剪强度。近年来,国内外学者对加筋土边坡的稳定性进行了一系列卓有成效的研究。崔新壮等对边坡临界高度进行分析,考虑了均匀布筋、上疏下密布筋和上密下疏布筋模式,对工程应用给出了设计意见;王成皿等采用极限平衡法,对加筋土边坡的稳定性问题进行了研究;何叔航采用上限法,求解了破坏模式通过坡趾下方的二级加筋土边坡临界高度,结果可以指导边坡失稳分析;Michalowski

假定加筋层不同破坏模式,分析不同破坏模式下加筋土对稳定性系数的影响。

上述研究采用的分析指标为稳定性系数或临界高度,未能与工程上通用的安全系数指标形成统一,带来诸多不便。石挺丰等对此进行了研究,通过极限分析获得了加筋土边坡的安全系数上限解,研究结果对工程有指导性作用;冯学茂等采用强度折减法研究了加筋格栅的参数对安全系数的影响。然而,在实际工程中,由于受到施工条件的限制,常出现二级或者多级的高边坡,而采用极限分析计算此类边坡稳定性安全系数的研究较少。因此,该文基于极限分析对加筋土二级台阶边坡稳定性进行研究。通过构建加筋土二级边坡破坏模型,推导出筋材所提供功率的表达式,并引入到临界状态的极限方程。借助强度折减技术,计算得

[6] 张建伟,廖小平,魏土荣. 高速公路运营期高边坡安全风险评估体系研究[J]. 路基工程,2015(6).

[7] 王浩,豆红强,谢永宁,等. 路堑边坡全寿命周期风险评估及管理的技术框架[J]. 岩土力学,2017(12).

[8] 吴忠广,申瑞君,万福茂,等. 岩质高边坡运营安全风险源辨识方法[J]. 公路交通科技,2018(3).

[9] 胡厚田,赵晓彦. 中国红层边坡岩体结构类型的研究[J]. 岩土工程学报,2006(6).

[10] 程强. 红层软岩边坡岩体结构特征及边坡岩体稳定性分

析[C]. 第十一次全国岩石力学与工程学术大会论文集,2010.

[11] 李江,许强,王森,等. 川东红层地区降雨入渗模式与岩质滑坡成因机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016(S2).

[12] 成永刚,王明琪,李光白. 川东红层区巴南广高速公路滑坡高发成因分析[J]. 地质灾害与环境保护,2016(3).

[13] 冯文凯,石豫川,柴贺军,等. 缓倾角层状高边坡变形破坏机制物理模拟研究[J]. 中国公路学报,2004(2).