

陕南公路斜坡灾害分布规律及失稳模式研究*

于德海¹, 彭建兵²

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054)

摘 要: 秦巴山区是我国著名的山地灾害多发区。通过对陕南 G316 国道斜坡灾害的实地调查, 总结了斜坡灾害点的基本情况, 指出研究区的地形地貌、地质构造、气象水文等地质环境条件有利于斜坡灾害的孕育。在此基础上, 进一步研究了坡度、坡高、坡向及坡形等基础因子对斜坡稳定性的影响, 并提出了各影响因子的优势度。同时, 归纳了该路段斜坡灾害的变形破坏特征, 总结出顺层滑动、弯曲- 倾倒、楔形体滑动、溃曲破坏以及滑移- 拉裂 5 种典型的失稳模式, 并对每种模式进行了具体的实例分析, 从而为边坡成灾预警和选择经济有效的治理对策奠定基础。

关键词: 秦巴山区; 斜坡灾害; 发育规律; 失稳模式

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1005 3409(2008)06-0092-05

Research on Development Law and Instability Pattern of Slope Hazard in Qinling-Daba Mountain

YU De hai¹, PENG Jian bing²

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China;

2. Faculty of Geology Engineering and Geodesics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Qinling Daba Mountain is the famous area frequently suffered from geological disasters in China. According to the geological survey on No. 316 national road in the southern shaanxi province, basic situation of slope hazard is concluded to ascertain geological environment characteristics. It is shown that geological environment characteristics, including topography, geological structure, meteorology and hydrology, are beneficial to the preparation of slope hazard. Based on the statistical data, four impact factors of slope hazard are studied in further and their dominance is obtained. At the same time, five deformation and failure patterns of the slope are concluded and analyzed in detail, for effective forecast and economical treatment of slope hazard.

Key words: Qinling Daba Mountain; slope hazard; development law; instability pattern

陕西省山区和丘陵沟壑区面积占全省总面积的 4/5 以上,加之河流众多,地貌类型复杂,降雨时空分布不均,所以斜坡灾害历来十分严重;尤其是位于秦岭腹地的陕南地区,更是我国著名的山地自然灾害多发区和重灾区。仅据 1950-1990 年 41 a 的统计^[1-4],累计受灾面积达 1 033.94 万 hm^2 ,受灾人口 7 078.5 万人,直接经济损失约 64.84 亿元。进入 20 世纪 90 年代以后,随着高等级公路向秦岭山区的快速推进,山地灾害进一步加剧,不可避免地遇到由于斜坡的失稳破坏而造成路面沉降、房屋开裂、挡墙破坏及交通堵塞等一系列工程灾害。因此,对这一地区斜坡灾害的研究已迫在眉睫。

陕西秦岭山区地处秦岭造山带,经历了多次构造运动和变质作用,形成了复杂的地质构造、陡峻的地形地貌以及特殊的软弱变质岩系。由于这类岩石成因复杂,矿物成分多样,岩性较为软弱,容易形成稳定性较差的斜坡,故已引起学者们的关注并进行了针对性的研究^[5-12]。然而,以往的成果

对该区域斜坡灾害发育规律及失稳模式的研究较少。因此,本文在斜坡灾害实地调查的基础上,开展斜坡灾害发育规律、影响因素及失稳模式的研究,这对斜坡成灾机理的深入认识以及斜坡灾害的防治都有着重要意义。

1 地质环境条件

1.1 地理位置

研究区位于陕西省南部,介于东经 $109^{\circ}00' - 109^{\circ}43'$,北纬 $32^{\circ}40' - 32^{\circ}58'$,隶属于安康市旬阳县。旬阳县城北距西安 302 km,有省级公路相通,各乡亦有简易公路可通。国道 316 横贯东西,其北连商洛市,西靠紫阳县,东、南与湖北省接壤,是通往西北、西南、华中诸省的重要通道。

1.2 地形地貌

研究区北依秦岭南麓,南踞大巴山脉,之间为汉江谷地。地势总体为由南、北向汉江倾斜,北高南低,西高东低。

* 收稿日期: 2008-03-12

基金项目: 陕西省交通厅科技项目(编号: 03-04k)

作者简介: 于德海(1977-),男,辽宁朝阳人,博士,讲师,主要从事工程地质和岩土工程的科研工作。E-mail: ydhdhy1977@163.com

公路沿汉江成线状展布, 整体处在南秦岭中山区与低山丘陵区这两大地貌单元之中。汉江水流湍急, 下切侧蚀强烈, 河道弯曲, 河床宽阔。研究路段位于汉江左岸, 地形起伏较大, 切割强烈, 沟谷发育且较狭窄, 多呈“V”型。由于公路建设, 沿线地形受人类工程活动改造较大, 基岩裸露, 形成大量的高陡边坡, 危岩陡壁发育。

1.3 地质构造及岩性

研究区构造格局基本位于南秦岭印支褶皱带与北大山褶皱造山带的衔接部位, 均经历了强烈的多期构造变形变质叠加和置换作用。由于这种构造格局的影响, 区内次一级褶皱、断层发育, 岩体在多期的构造变形变质作用下, 受水平应力的挤压, 扭曲变形严重, 致使公路沿线边坡节理裂隙发育, 而被其切割的岩石块体将追踪裂隙面发生滑移或沿密集的节理裂隙形成滑动带, 研究区域内的这种构造背景为孕育斜坡灾害提供了有利的地质条件。此外, 新构造运动造成了间歇性的差异升降运动, 在区内表现为强烈的抬升, 从而形成了台阶状地形及河谷阶地。由于山地的上升, 加剧了河谷的下切作用, 从而为斜坡灾害的发生提供了有利的地形条件。

研究区地层区划属扬子地层区南秦岭分区, 出露地层主要为下志留统, 还有泥盆系、奥陶系、寒武系—奥陶系等, 主要岩性为灰色、浅灰色云母石英片岩、板岩以及千枚岩等软弱变质岩。

1.4 气候条件

研究区段属于北亚热带湿润季风型气候, 四季分明, 雨量充沛, 气候温和。年平均气温 12.0~15.7℃, 极端最高气温达 42.6℃, 极端最低气温 -15℃; 年平均降水量 758.2 mm, 最大降水量 1 085.2 mm(1979 年), 最小降水量 467.3 mm(1997 年)。其中, 降雨量 7—9 月最多, 约占全年的 70%, 暴雨及长期连阴雨是诱发斜坡灾害的主要因素。

2 斜坡灾害发育规律

2.1 斜坡灾害规模及分布

根据实地调查, 研究路段共发现 26 处斜坡灾害点, 如表 1。可以看出, 体积大于 $1.0 \times 10^7 \text{ m}^3$ 的巨型滑坡 4 处, 占斜坡灾害总数的 15.4%, 虽然数量较少, 但危害巨大; 体积在 $100 \sim 1\,000 \text{ 万 m}^3$ 的大型滑坡 5 处, 占斜坡灾害总数的 19.2%; 小型斜坡灾害所占比例最大, 发育个数为 12 个, 占斜坡灾害总数的 46.2%; 而中型斜坡灾害所占比例也较小, 发育 5 处, 占斜坡灾害总数的 19.2%。

从地域分布数量来看, 公路沿线斜坡灾害最多的乡(镇)为关口镇和庙岭乡, 斜坡灾害各占 4 处, 并且巨型、大型滑坡点也位居前列, 共有 4 个, 几乎占巨、大型滑坡总数的一半; 其次为蜀河镇、蒿塔乡、构园乡和段家河乡, 斜坡灾害发育个数分别为 3 个; 再次为长沙乡和旬阳县城, 虽然斜坡灾害数量不多, 各有 2 个, 但其中大型滑坡就发育 2 处, 危害较大; 而早阳乡和皂树乡斜坡灾害最少, 各仅有 1 处, 如图 1 所示。

2.2 斜坡灾害影响因素的分析

影响斜坡灾害的因素很多, 其中坡度、坡高、坡向与坡形作为斜坡的基础性因子, 对其灾害的发生、发展起着十分重要的作用。

表 1 研究路段斜坡灾害的规模分布

分类依据	斜坡规模	数量/个	占总数比例/%
$> 1\,000 \text{ 万 m}^3$	巨型	4	15.4
$100 \sim 1\,000 \text{ 万 m}^3$	大型	5	19.2
$10 \sim 100 \text{ 万 m}^3$	中型	5	19.2
$< 10 \text{ 万 m}^3$	小型	12	46.2
	合计	26	100

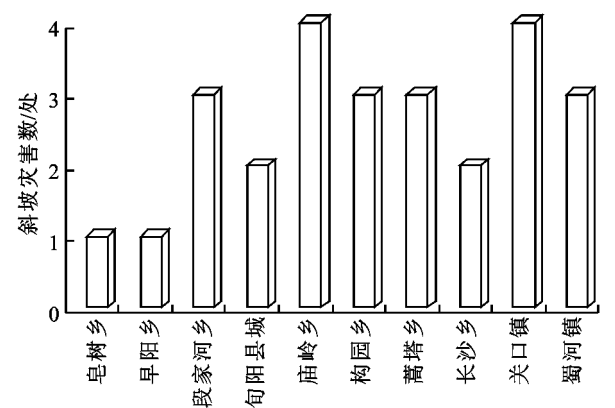


图 1 斜坡灾害地域分布直方图

(1) 坡度因子。坡度是斜坡稳定性的重要影响因子, 它不仅影响斜坡内的应力分布, 而且对斜坡表面地表水径流、斜坡体内地下水的补给与排泄、斜坡上松散物质的堆积厚度、植被覆盖率等起着相当程度的控制作用。鉴于此, 本次调查根据研究路段斜坡坡度特征和灾害发育情况, 将坡度分为 $0 \sim 15^\circ$, $15 \sim 25^\circ$, $25 \sim 35^\circ$, $35 \sim 45^\circ$, $45 \sim 60^\circ$, $60 \sim 90^\circ$ 六个区间, 并统计了各区间段内斜坡灾害的发育情况, 如图 2 所示。统计结果显示, 研究路段斜坡灾害主要集中在 $35 \sim 45^\circ$ 和 $25 \sim 35^\circ$ 这两个坡度区间, 分别占统计斜坡灾害的 42.4% 和 26.9%, 然后依次为 $40 \sim 60^\circ$, $60 \sim 90^\circ$, $15 \sim 25^\circ$, 而在 $0 \sim 15^\circ$ 坡度区间几乎没有斜坡灾害发生。并且由图 2 可知, 研究路段滑坡灾害大多发育在坡度 $25 \sim 45^\circ$ 之间的范围, 其中坡度 $35 \sim 45^\circ$ 的范围内滑坡灾害的比例最大。因此, $25 \sim 45^\circ$ 坡度区间可称为研究路段斜坡灾害的优势坡角。

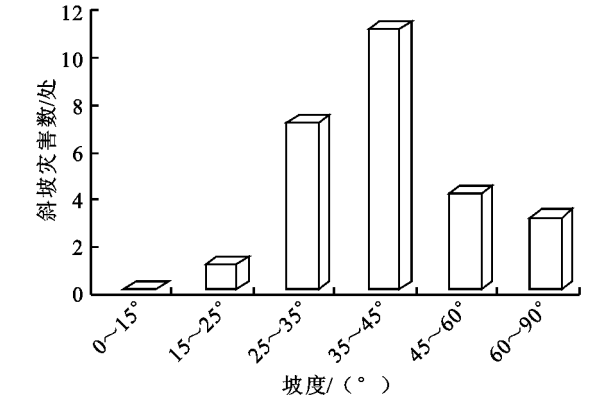


图 2 斜坡灾害坡度分布直方图

(2) 坡高因子。坡高与斜坡变形破坏具有一定的相关关系。根据研究路段不同坡高斜坡灾害的发育情况, 将坡高分为 $0 \sim 50 \text{ m}$, $50 \sim 100 \text{ m}$, $100 \sim 200 \text{ m}$, $200 \sim 300 \text{ m}$, > 300

m 五个区间,并统计了各区间段内斜坡灾害的发育情况,如图4所示。从不同坡高斜坡灾害的发育分布情况来看,对斜坡灾害发育数量有利的坡高范围依次是 0~50 m, 100~200 m, 50~100 m, 200~300 m, >300 m。值得注意的是,坡高小于100 m时,斜坡灾害虽然数目较多,约占统计斜坡灾害的70%,但仅发育中、小型斜坡灾害,故危害程度相对较小;而当坡高大于100 m时,尽管斜坡灾害发育数量不多,但巨、大型滑坡全都集中在此坡高范围内,危害性巨大,且随坡高的增加,发生的几率也越大,从而证明坡高对斜坡灾害发育规模和发生率有明显的影响。

(3) 坡向因子。斜坡坡向与岩层倾向的空间状况及组合形式,在很大程度上决定了斜坡变形的方式和程度,并且两者组合而成的斜坡结构对斜坡灾害的分布有着重要的影响。根据斜坡坡向与岩层倾向的交角 θ ,可将研究路段斜坡分为3种类型:①顺向坡($\theta \leq 30^\circ$);②斜向坡($150^\circ < \theta < 30^\circ$);③反向坡($\theta \geq 150^\circ$)。不同斜坡类型区斜坡灾害的分布

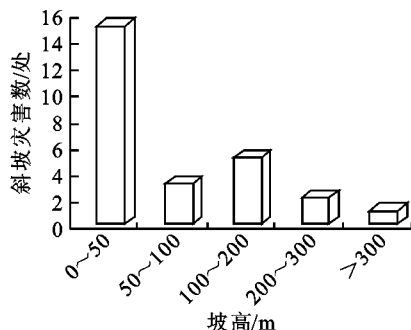


图3 斜坡灾害坡高分布直方图

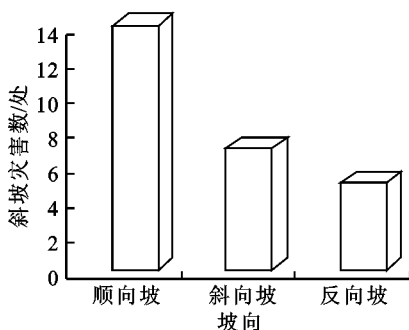


图4 斜坡灾害坡向分布直方图

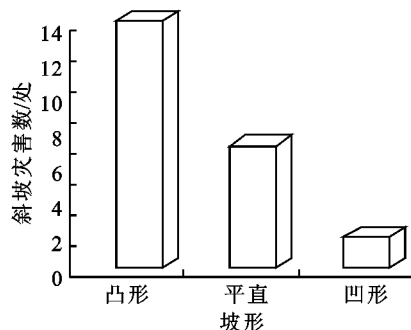


图5 斜坡灾害坡形分布直方图

3 斜坡灾害失稳模式

3.1 顺层滑动变形破坏模式

(1) 形成条件与演变过程。该变形破坏模式主要发生在层状顺倾岩质边坡中。其破坏机理是斜坡上岩体的层面或片理面提供的抗滑力不足以抵抗斜坡的下滑力,一旦开挖造成结构面凌空,岩体随即发生顺层滑移破坏;或者坡体中存在软弱夹层,由于软弱夹层的抗剪强度较小且遇水容易弱化,因此岩体在重力作用下,极易沿着软弱层理面向凌空方向发生滑移破坏。

(2) 实例分析。由于研究路段主要发育的片岩、千枚岩,都是片理极发育的软弱岩体,且顺层斜坡较为普遍,故该变形破坏模式广泛存在。如长沙乡东斜坡,坡高20 m,长30 m,宽50 m,斜坡体下伏基岩为片岩,产状为 $20^\circ \angle 40^\circ$,节理裂隙较发育,坡体前缘下滑,岩体拉张松动,沿着片理面产生滑移破坏,如图6所示,是典型的顺层滑动模式。

3.2 弯曲-倾倒变形破坏模式

(1) 形成条件与演变过程。该变形破坏模式主要发生在陡立或反倾的薄层状岩体组成的斜坡中。陡倾的层状岩体在自重弯矩作用下,于前缘开始向凌空方向作悬臂梁式的弯曲,并逐渐向坡内发展。弯曲的板梁之间互相错动并伴有拉裂,弯曲体后缘出现拉裂缝,并且向凌空一侧倾倒,形成平行于走向的反坡台阶和槽沟。这种变形持续发展下去,会导致变形范围内的岩体松动,并在弯曲体的根部发生折断、压

存在着较大的差异,斜坡灾害点数量从多到少的顺序依次是:顺向坡、斜向坡、反向坡,分布比例分别为54%, 27%, 19%,如图4所示。同时,顺向坡易形成大型滑坡,研究路段约有56%的巨型、大型滑坡发生在顺向坡,其中有构扒湾滑坡、长沙乡滑坡、关口乡滑坡等。可见,顺向坡是发育斜坡灾害的“温床”。

(4) 坡形因子。斜坡坡形直接反映了在内外营力的作用下,坡体演变的历史过程。据此,可把斜坡的形态分为直线坡、凸形坡和凹形坡3种坡形。通过对研究路段斜坡坡形特征和灾害发育情况的调查,结果表明凸形坡稳定性最差,发育的斜坡灾害最多,约占全区斜坡灾害的61%;凹形坡稳定性最好,灾害数量最少,仅占全区斜坡灾害的8%;直线坡介于两者之间,如图5所示。造成这一结果的原因,可能是由于凸形坡形使得坡体的水平应力减弱,甚至出现拉应力,不利于斜坡的稳定,而凹形坡使沿坡面走向的水平应力增强,有利于斜坡的稳定。

碎,形成潜在松动变形体与下部完整基岩的分界面,最后在外界条件诱发下,坡体逐渐错动下滑形成倾倒滑塌体。

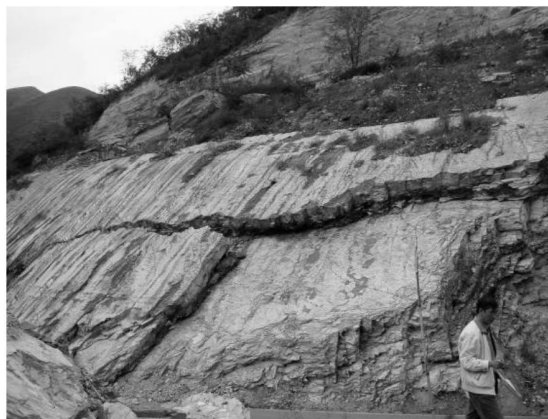


图6 顺层滑动变形破坏模式

(2) 实例分析。旬阳县段家河附近斜坡变形体,主要岩性为薄层状千枚岩,产状约 $25^\circ \angle 70^\circ$,斜坡为陡倾反向坡,表层风化严重,片理极度发育,由于公路开挖切坡,原来陡倾或者反向的斜坡在自重弯矩作用下,向凌空方向发生弯曲,形成类似“点头哈腰”形态的现象,是典型的弯曲-倾倒变形破坏模式,如继续发展可能会发生滑塌甚至剪断破坏,也可能向深部发展成为滑坡,是较为危险的斜坡变形模式,如图7所示。

3.3 楔形体滑动变形破坏模式

(1) 形成条件与演变过程。楔形体滑动破坏主要受两

组相向倾斜的结构面控制, 滑移沿着两个结构面的组合交线方向, 且该交线的倾角小于坡角, 并在坡面出露。由于滑体同时沿两个结构面滑动, 其力学机制比较复杂。在边坡开挖过程中, 边坡表面由于卸载作用, 岩体松弛, 强度降低, 加之坡面不平整, 小块岩体极易具备临空条件, 所以经常会发生岩体以楔形体形式破坏的剥落现象, 但规模较小, 其体积由几立方米至几百立方米不等。



图 7 弯曲- 倾倒变形破坏模式

(2) 实例分析。研究路段蒿塔乡附近公路边坡, 坡高约 30 m, 坡度 45~ 60°, 基岩裸露, 主要岩性为片岩, 较坚硬。坡体受两组结构面控制, 其中一组为片理面, 其产状分别为 125° ∠ 48° 和 283° ∠ 60°, 在此情况下, 两组结构面将岩石块体切割成楔形体而存在于边坡之上, 受人工开挖或爆破的影响, 被切割的岩体在自重应力及外荷载的作用下, 随着结构面的逐渐贯通, 沿以上两组结构面的交线向公路临空方向发生滑塌破坏, 如图 8 所示。



图 8 楔形体滑动变形破坏模式

3.4 溃曲变形破坏模式

(1) 形成条件与演变过程。此变形破坏模式主要发育在中- 陡倾外层状斜坡中, 尤以薄层状岩体中为多见。这类斜坡的滑移控制面倾角大于该面的峰值摩擦角, 使得上覆岩体具备沿滑移面下滑条件。但由于滑移面未临空, 使下滑受阻, 造成坡脚附近顺层岩层承受纵向压应力, 在一定条件下可使之发生弯曲变形。如弯曲强烈, 会出现 X 型错动, 其中一组逐渐发展为滑移切出面, 这样弯曲部位的岩体强烈扩容, 地面显著隆起, 岩体松动加剧, 往往出现局部的崩塌或滑落。

(2) 实例分析。构园乡某路段边坡, 坡高 50 m, 坡角 40° 左右, 岩层产状为 116° ∠ 42°, 形成顺层岩质边坡。组成岩体为云母石英片岩, 层间错动发育, 风化极其严重, 在久雨充水的条件下, 使得具有板裂结构岩体间的结合力变小, 而顺坡向剪应力增大, 这样上部坡体沿某一软弱层面滑动, 由于岩层的倾角与坡角大致相同, 且下部未临空, 从而造成上部坡体的滑移受阻, 边坡岩层逐层向上鼓起, 在鼓起变形的同时产生层面拉裂、脱层等现象, 岩体松动加剧, 如图 9 所示。



图 9 溃曲变形破坏模式

3.5 滑移- 拉裂变形破坏模式

(1) 形成条件与演变过程。此变形破坏模式主要发生在节理裂隙发育的缓至中等坡度的斜坡中。该类斜坡岩体通常在重力作用下沿层理面或下伏软弱面向坡前临空方向发生变形, 甚至出现层间错动, 使得变形体后缘产生拉裂缝, 随着坡面的逐渐下沉, 拉裂面向深部扩展, 往往达到潜在的剪切面, 造成剪切面上应力集中。当发生降雨时, 雨水将沿着拉裂缝向下渗入, 这样造成拉裂缝不断扩容增宽, 潜在剪切滑移面进一步软化, 坡体变形加剧, 最后被剪断而导致滑坡。

这类变形的进程主要取决于滑移面的产状与特性。当滑移面向临空方向的倾角足以使上覆岩体的下滑力超过该面的实际抗剪阻力时, 则在成坡过程中如该面被揭露临空, 后缘拉裂面一经出现便发生滑移, 过程较为短暂; 反之, 则坡体缓慢滑动, 后缘拉裂缝不断拉张扩展, 并出现多条次一级裂缝, 从而发展为由坡前向顶缘逐步解体的块状滑坡。

(2) 实例分析。研究路段中的旬阳南滑坡是这种变形破坏模式的典型实例。该滑坡位于旬阳县城关镇, 滑体长约 600 m, 宽约 220 m, 厚约 30 m, 主要岩性为片岩, 滑坡的西南侧有一深切沟, 后部可见早期崩滑的陡坎。斜坡体层理面大致倾向公路方向, 产状为 155° ∠ 41°。斜坡变形体受层理面控制, 在坡体自身重力作用下缓慢向临空方向滑移, 主滑方向为 140°。由于变形体的滑移, 致使坡体后缘连续产生多条深而大的拉裂缝, 宽度甚至达到 2 m, 并产生错动, 随着变形加剧, 出现多条次一级拉裂缝。在暴雨的影响下, 雨水下渗进入拉裂缝, 浸泡软化岩体, 软弱滑面逐渐贯通; 随着坡体抗滑能力的减低, 坡体前缘滑动, 并牵引后部坡体, 造成公路挡墙受挤压产生多条裂缝, 局部变形失效, 路基出现多条裂纹, 并呈放射状展布, 行将破坏, 如图 10 所示。

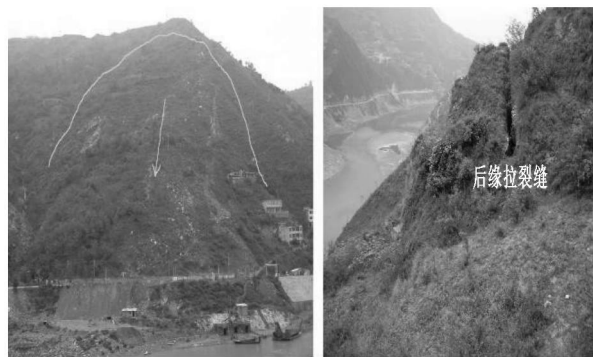


图 10 旬阳南滑坡全貌

4 结论

(1) 通过收集、整理陕西秦巴山区 G316 国道的有关资料, 总结归纳了该路段地理位置、气象条件、地形地貌、地质构造及地层岩性等地质环境条件, 从而为斜坡灾害的研究工作提供了相关背景。

(2) 根据现场调查, 对研究路段斜坡灾害的基本情况进行了归纳统计, 得到了斜坡灾害的分布规律。并在此基础上, 进一步研究了坡度、坡高、坡向及坡形等基础因子对斜坡稳定性的影响, 并提出了各影响因子的优势度。

(3) 根据该路段斜坡灾害的变形破坏特征, 总结出顺层滑动、弯曲- 倾倒、楔形体滑动、溃曲破坏以及滑移- 拉裂 5 种典型的失稳模式, 从而为斜坡成灾预警和选择经济有效的治理对策奠定基础。

(上接第 91 页)

参考文献:

- [1] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化[J]. 山地学报, 2003, 21(2): 149-156.
- [2] Ottman M J, Tickes B R, Roth R L. Alfalfa yields and stand response to termination in an arid environment [J]. Agron, 1996, 88: 44-48.
- [3] 杨玉海, 蒋平安. 不同种植年限苜蓿地土壤理化特性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 110-113.
- [4] 侯刚, 顾明德, 王汉全, 等. 十二个苜蓿品种第一茬草土壤水分状况研究[J]. 塔里木大学学报, 2005, 17(2): 15-17.
- [5] 万素梅, 胡守林, 王龙昌, 等. 不同苜蓿品种土壤水分动态变化研究[J]. 水土保持学报, 2003, 7(4): 56-63.
- [6] 曾庆飞, 孙兆敏, 贾志宽, 等. 不同播期对苜蓿生长性状及越冬性的影响研究[J]. 西北植物学报, 2005, 25(5): 1007-1011.
- [7] 蒋志平. 宁夏海原减灾自救项目的实践与思考[M]//中国减灾. 北京: 科学出版社, 2001: 38-41.
- [8] 胡建宏, 蒋骏, 贾志宽. 西部开发中南宁旱区畜牧业的发展战略[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 70-73.

参考文献:

- [1] 段永侯. 中国地质灾害[M]. 北京: 北京建筑工业出版社, 1993.
- [2] 惠振德, 孙虎, 郭彩玲. 陕西秦巴山区水土流失灾害及防治对策[J]. 陕西师范大学学报, 1994, 22(3): 74-78.
- [3] 聂树人. 陕西自然地理[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1981.
- [4] 彭建兵, 马润勇, 席先武, 等. 区域稳定动力学的应用实践研究[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- [5] 郭利勇, 韦忠, 郭海. 陇南陕南片滑坡、泥石流群测群防试点县成果探析[J]. 水土保持通报, 2002, 22(2): 38-41.
- [6] 范红科, 胡西顺, 张蓉, 等. 陕西商南县的地质灾害及其成因[J]. 灾害学, 2003, 18(1): 53-57.
- [7] 崔海峰. 陕南柞水石瓮子上泥盆统滑塌沉积及其地质意义[J]. 高校地质学报, 2003, 9(1): 63-71.
- [8] 张桂荣, 殷坤龙, 刘传正, 等. 基于 GIS 的陕西省旬阳地区滑坡灾害危险性区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 39-43.
- [9] 孙果梅, 况明生, 曲华. 陕西秦巴山区地质灾害及防治对策[J]. 陕西地质, 2004, 22(2): 78-83.
- [10] 谢星, 赵法锁. 316 国道旬阳段滑坡灾害的特征及其稳定性分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(9): 15-18.
- [11] 孙果梅, 况明生, 曲华. 陕西秦巴山区地质灾害研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 240-243.
- [12] 王雁林. 陕南地区滑坡灾害气象预报预警及其防范对策探析[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(4): 345-349.
- [9] 杨启国, 张旭东, 杨兴国. 甘肃中部半干旱区紫花苜蓿耗水规律及土壤水分变化特征研究[J]. 中国农业气象, 2003, 24(4): 37-40.
- [10] 刘沛松, 李军, 贾志宽, 等. 宁南旱区苜蓿草地土壤水分消耗规律及粮草轮作土壤水分恢复效应研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(5): 270-275.
- [11] 张春霞, 郝明德, 魏孝荣, 等. 黄土高原沟壑区苜蓿地土壤水分剖面特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(6): 604-607.
- [12] 程积民, 万惠娥, 王静, 等. 黄土丘陵区苜蓿生长与土壤水分变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 435-438.
- [13] Carter P R, Sheaffer C C. Alfalfa response to soil water deficits I. Growth, forage quality, yield, water use and water use efficiency[J]. Crop Sci., 1983, 23: 669-675.
- [14] 杜世平, 王留芳, 龙明秀. 宁南山区旱地紫花苜蓿土壤水分及产量动态研究[J]. 草业科学, 1999, 16(1): 11-15.
- [15] 王龙昌, 谢小玉, 王立祥, 等. 宁南旱区农田作物生产潜力综合评价及其开发对策[J]. 农业系统科学与综合研究, 2004, 20(2): 85-88.
- [16] 马红彬, 王宁, 高继飞, 等. 宁南山区苜蓿草产业化发展的可行性初探[J]. 宁夏农学院学报, 2000, 21(4): 25-29.