

公路滑坡灾害链式反应阶段性识别方法研究*

马保成¹, 王 亮², 牟 顺^{1,3}

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 山东东泰工程咨询有限公司, 山东 淄博 256410; 3. 淄博市公路管理局, 山东 淄博 255038)

摘 要: 为了对公路滑坡的发育阶段做出准确判别, 研究了公路滑坡灾害发育的链式反应机理, 将滑坡的发育阶段划分为 3 个阶段。采用广泛调研和专家咨询的技术手段, 从发育阶段的表现特征中选定了滑坡识别的相关因素集和评分, 在此基础上采用模糊数学的方法对公路滑坡灾害的发育阶段进行了识别, 并在陕南公路滑坡调查中初步应用。

关键词: 公路滑坡; 链式反应; 阶段划分; 识别因素; 模糊数学

中图分类号: U416.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)02-0054-05

0 引言

公路滑坡是指路基边坡土体或岩体在自然或人为的因素下沿一定的软弱面滑动的现象^[1]。目前国内外对滑坡阶段的划分主要依据滑坡地貌发育过程或者滑坡的受力和变形特征, 对滑坡灾害发育阶段具体识别方法的研究少有出现^[2-6]。自然灾害所表现出的不均匀性、多样性和突发性等特点, 使得应用综合系统的观点分析问题显得十分重要。肖盛燮等人通过长期众多地质灾害的调查研究, 形象地描述了灾害发生的规律, 提出了普遍适用于多种灾害的链式反应规律和形成机理以及对灾害信息的跟踪监测方法^[7-8]。

本文主要从系统的角度出发, 对滑坡形成的链式反应机理进行研究, 划分灾害发育的阶段, 并从滑坡演化过程中提取特征信息, 使用模糊数学的方法判别其所处的阶段, 为合理选择治理方案提供依据。

1 链式规律的含义

灾害构成因素复杂多样, 但总有一个逐渐演化的过程, 具有延续性。其演化过程总是以一定

的物质、能量等信息形式予以表征, 这种演化关系的表现形式可以用“链式关系”或“链式效应”予以概化。因此, 灾害的形成过程就可以用链式关系或效应进行描绘。不同灾害类型, 其链式效应的内涵不同, 因此灾害自身发展的链式形态与灾害类型就构成了一一对应的关系。根据灾害发育的阶段性特征, 对各个阶段灾害所表现出的信息进行筛选, 提取指标进行识别, 这是研究灾害形成机理和发育过程的理论基础。

路基工程地质结构包括路基结构、地质构造面及工程结构面、路基填料及基底、边坡岩土性质以及排水及支挡结构物形成的结构体系。路基工程地质结构决定了破坏方式、破坏规模, 也是灾害治理措施选择的主要依据。

根据灾害链式反应理论, 路基工程地质结构构成了路基灾害的内部因素, 地形地貌、气象气候、地下水特征以及人类活动影响等构成外部环境因素, 而灾害链式响应行为特征是指灾害在外部环境作用影响下灾害自身内部的链式响应过程和灾害对周围环境的反作用行为过程, 体现了灾害演化和破坏效应。公路滑坡灾害的演化系统如图 1 所示。

* 收稿日期: 2010-10-25

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200631800007)

作者简介: 马保成(1982-), 男, 汉族, 陕西榆林人, 博士研究生, 主要从事公路防灾减灾方面的研究。

E-mail: mbc_2002@163.com

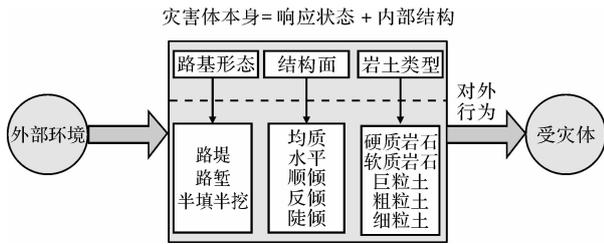


图1 公路滑坡灾害演化系统

2 滑坡链式反应阶段划分

2.1 阶段划分方法

链式阶段性是灾害发育过程的重要反映。本文就一次灾变过程而言,拟将灾变早、中、晚期的时间间隔、阶段性特性、构成破坏力的程度等作为划分阶段的重要依据,将公路滑坡灾害划分为早、中、晚阶段。其划分模式如表1所示。

阶段划分	阶段特性	破坏强度	载体信息	时间比率	技术措施
早期	孕育阶段	破坏力尚未形成	势能聚集	较长 70%以上	断链
中期	潜存阶段	形成潜在破坏力	势能储存	短暂 25%左右	防御
晚期	诱发阶段	破坏力强 烈爆发	动能迸发	瞬时 5%以下	治理

郑颖人等^[3]按照滑坡的受力和变形特征将其划分为蠕动阶段、挤压阶段、滑动阶段、剧滑阶

段和稳定压密阶段。本文结合灾害链式反应理论以及灾害阶段划分的统一和识别的需要,对滑坡的发育过程归纳总结,将蠕动阶段、挤压阶段按裂隙的形成和发育归并为滑坡灾害的早期阶段;将变形阶段和滑动阶段按滑动面的形成和发展情况归并为滑坡灾害的中期阶段;最后将剧滑阶段和稳定压密阶段划分为晚期阶段。这种划分方法既体现了滑坡不同阶段主要的识别和区分特征,又在形成持续的时间和能量上较好的符合了灾害链式理论。

2.2 滑坡链式阶段反应特征

灾害链式反应的核心是构成灾害的各要素在物质、能量、信息三方面的不断演化,在不同的演化阶段表现出不同的特征,因此对灾害链式发育规律实施信息跟踪是有效识别、防治灾害的关键环节。公路滑坡灾害的演化阶段特征如图2所示。

滑坡的链式反应阶段特征为:早期阶段原始地貌遭到人为或者由于地质构造等原因形成了潜在滑坡体,形成了裂缝等表现特征;中期阶段在早期的物质积累的基础上,在强降雨、冰雪融水等诱发因子的激发下滑坡体蠕动变形,表现出裂缝的进一步发育或贯通,滑动面出现等特征;晚期阶段内部岩土体强度发生劣化降低,达到了滑坡发生的临界值,进而在诱发因子的异变耦合作用下产生突发失稳,造成滑坡,这一阶段滑动面贯通,滑坡体瞬间变形陷落,表现特征明显^[9]。

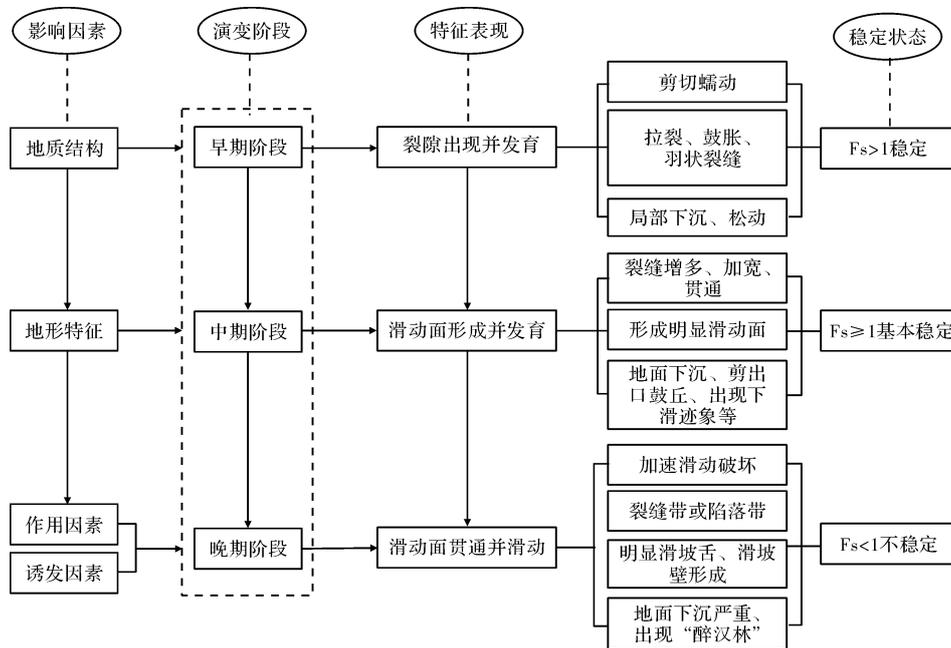


图2 公路滑坡阶段特征

3 滑坡灾害反应阶段判别

链式阶段性是灾害发育过程的重要反映。本文从灾变一般规律出发,将其演变过程划分为早、中、晚期的时间区段,对各影响灾变的形态特征进行层次细分,形成综合测评体系,即构成灾变阶段的影响因素,从不同形态特征的客观反映来辨识灾变发育阶段。

下面以陕南 G316 路基灾害整治工程中的庙岭滑坡发育演化过程来说明对滑坡反应阶段判别的方法和过程。

3.1 庙岭滑坡概况

庙岭滑坡位于一个巨大的古滑坡体中部两侧,属于坡残积物滑坡,公路从滑坡体中部地段通过,滑坡滑动导致公路路基发生沉降。

通过野外调查,此滑坡边坡坡度小于 30° ,滑体横向宽约 300 m,纵向长约 200 m,坡前缘和后缘地面相对高差约 85 m,规模比较大。滑体上部

为坡残积碎石土,滑体土质为千枚岩风化的坡残土,结构松软,厚度较大,下部为基岩,属上软下硬基座式坡体结构。调查中还发现,路面上“羽状”裂缝明显,坡体上能清楚地看到滑坡周界、滑坡舌、滑坡鼓丘、滑坡平台等特征。坡体上排水设施不完善,坡残积土层中地下水丰富,两侧滑体均有多处泉水出露,钻孔探测地下水属潜水类型,水质较好。

3.2 判别因素集的构成

影响灾变链式阶段的因素很多,且较为繁杂。本文以链式反应外因影响状态效果和内部指标变态作为选择依据,综合庙岭滑坡的实际情况,本着简单易于量化的原则,考虑了 4 种类型的 15 种影响因素集。其因素等级按早期、中期、晚期阶段进行划分,并根据实际调查情况、已发生灾害资料的统计结果以及相关专家经验的收集,最终经过评估给出了各因素等级归一化后的隶属度。各因素子集的因素等级见表 2。

表 2 因素子集的因素等级

阶段特征参数及权重			因素等级			
			孕育阶段	潜存阶段	诱发阶段	
地形地貌 (U_1)	0.2	圈椅状地形 (U_{11})	0.15	0.515	0.325	0.160
		双沟同源现象 (U_{12})	0.25	0.328	0.415	0.257
		鼻状凸丘及多级平台 (U_{13})	0.20	0.224	0.423	0.353
		羽状裂缝 (U_{14})	0.15	0.318	0.397	0.285
		房屋倾斜、开裂、沉降等 (U_{15})	0.25	0.105	0.428	0.467
岩土体结构 (U_2)	0.3	岩土体扰乱、松动、挤压揉皱、小型坍塌等现象 (U_{21})	0.35	0.124	0.517	0.359
		基岩或土层序倒置等现象 (U_{22})	0.25	0.100	0.419	0.481
		软弱地层滑动面变形 (U_{23})	0.40	0.149	0.493	0.358
水文地质 (U_3)	0.3	滑坡区内含水层原状破坏程度 (U_{31})	0.35	0.162	0.403	0.435
		滑动面前缘成排成群泉水溢出状况 (U_{32})	0.25	0.089	0.502	0.409
		滑体后缘断壁泉水出露或渗水现象及程度 (U_{33})	0.25	0.102	0.497	0.401
		滑坡体两侧或前缘特殊“泥球”呈现状况 (U_{34})	0.15	0.275	0.683	0.042
滑坡边界条件 (U_4)	0.2	滑坡后缘顺层擦痕数量 (U_{41})	0.15	0.293	0.317	0.390
		滑坡体前缘土体是否被挤出或呈舌状凸起 (U_{42})	0.35	0.219	0.403	0.378
		滑动岩土体两侧沟裂面及地物剪断现象 (U_{43})	0.40	0.109	0.317	0.574

3.3 测评集及其权重

根据各个因素的主从关系和灾变阶段时间百分比等分为 10 个区段作为测评对象,建立测评集,并给出了相应的测评权重。其权重按早期、

中期、晚期阶段设定,其相应测评指标为 1.0,则向左、右递减排列,即可得各阶段的测评集及其权重,如表 3 所示^[10-11]。

表 3 测评集及其权重

灾变阶段	权重									
	$V_1(10\%)$	$V_2(20\%)$	$V_3(30\%)$	$V_4(40\%)$	$V_5(50\%)$	$V_6(60\%)$	$V_7(70\%)$	$V_8(80\%)$	$V_9(90\%)$	$V_{10}(100\%)$
早期	0.6	0.8	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0
中期	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.8	0.6	0.4
晚期	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.8

测评集为 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_{10}\}$, 根据表 3 可得出等级测评矩阵。由于影响以上测评对象因素的趋势具有一致性, 故由表 3 得到的矩阵即为通用的。

3.4 综合测评

由上述各表给出的测评因素集因素等级及各因素权重, 各因素子集的因素等级评价结果构成矩阵 $A_1 \sim A_4$, 测评集权重矩阵为 M , 各因素二级权重矩阵为 $q_1 \sim q_4$, 一级权重矩阵为 Q , 可以得到如下的测评结果^[12-13]。

(1) 一级测评矩阵 $B_{1i} = A_i \cdot M$, 结果如下:

$$B_{11} = \begin{bmatrix} 0.309 & 0.197 & 0.134 & 0.191 & 0.063 \\ 0.445 & 0.304 & 0.222 & 0.294 & 0.127 \\ 0.580 & 0.411 & 0.309 & 0.397 & 0.191 \\ 0.558 & 0.454 & 0.384 & 0.442 & 0.302 \\ 0.536 & 0.497 & 0.459 & 0.486 & 0.413 \\ 0.530 & 0.566 & 0.569 & 0.559 & 0.571 \\ 0.524 & 0.635 & 0.680 & 0.632 & 0.729 \\ 0.440 & 0.570 & 0.643 & 0.577 & 0.727 \\ 0.355 & 0.506 & 0.607 & 0.523 & 0.724 \\ 0.258 & 0.372 & 0.452 & 0.387 & 0.545 \end{bmatrix}^T$$

$$B_{12} = \begin{bmatrix} 0.074 & 0.060 & 0.089 \\ 0.151 & 0.122 & 0.169 \\ 0.227 & 0.184 & 0.248 \\ 0.342 & 0.296 & 0.352 \\ 0.456 & 0.408 & 0.457 \\ 0.607 & 0.568 & 0.597 \\ 0.757 & 0.728 & 0.738 \\ 0.713 & 0.730 & 0.696 \\ 0.669 & 0.732 & 0.654 \\ 0.494 & 0.552 & 0.484 \end{bmatrix}^T$$

$$B_{13} = \begin{bmatrix} 0.097 & 0.053 & 0.061 & 0.165 \\ 0.170 & 0.121 & 0.131 & 0.288 \\ 0.243 & 0.189 & 0.201 & 0.412 \\ 0.334 & 0.313 & 0.321 & 0.497 \\ 0.426 & 0.436 & 0.440 & 0.583 \\ 0.561 & 0.601 & 0.599 & 0.673 \\ 0.696 & 0.765 & 0.758 & 0.763 \\ 0.687 & 0.738 & 0.729 & 0.608 \\ 0.677 & 0.710 & 0.699 & 0.452 \\ 0.509 & 0.528 & 0.520 & 0.307 \end{bmatrix}^T$$

$$B_{14} = \begin{bmatrix} 0.176 & 0.131 & 0.065 \\ 0.266 & 0.216 & 0.119 \\ 0.356 & 0.300 & 0.172 \\ 0.400 & 0.374 & 0.271 \\ 0.444 & 0.449 & 0.370 \\ 0.527 & 0.561 & 0.527 \\ 0.610 & 0.674 & 0.683 \\ 0.595 & 0.647 & 0.724 \\ 0.580 & 0.620 & 0.764 \\ 0.439 & 0.464 & 0.586 \end{bmatrix}^T$$

(2) 二级测评矩阵如下:

$$B_2 = \begin{bmatrix} q_1 \cdot B_{11} \\ \vdots \\ q_4 \cdot B_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.167 & 0.077 & 0.087 & 0.099 \\ 0.263 & 0.151 & 0.166 & 0.163 \\ 0.359 & 0.225 & 0.244 & 0.227 \\ 0.416 & 0.334 & 0.350 & 0.300 \\ 0.473 & 0.444 & 0.456 & 0.372 \\ 0.561 & 0.593 & 0.597 & 0.486 \\ 0.650 & 0.742 & 0.739 & 0.600 \\ 0.605 & 0.710 & 0.698 & 0.605 \\ 0.561 & 0.679 & 0.657 & 0.610 \\ 0.416 & 0.504 & 0.486 & 0.462 \end{bmatrix}^T$$

(3) 三级测评矩阵如下:

$$B = Q \cdot B_2 = [0.102 \ 0.180 \ 0.258 \ 0.348 \ 0.439 \ 0.567 \ 0.694 \ 0.665 \ 0.635 \ 0.473]$$

根据最大隶属度原则, 3 级测评结果的最大隶属度 0.694 与灾变测评集的 70% 相对应, 判定庙岭滑坡灾变处于链式阶段早期末到中期的临界过渡阶段, 这与实际的调查情况相符。

针对庙岭滑坡的灾变阶段特征, 采取了相应的早期断链及中期防御措施如下:

(1) 完善地表截排水系统, 即设计修筑截水沟、急流槽, 不同类型的排水沟、边沟等, 尽量将雨水快速排出滑体以外, 使雨水较少渗入滑体。

(2) 加强对公路通过处滑体内地下水的排疏, 即设计支撑渗沟, 纵向与横向盲沟, 使地下水能较快疏排, 增强治理滑体自身的抗滑能力。

(3) 设支挡构造物, 即在滑坡下部剪出口设抗滑挡墙, 在路基上边坡设抗滑挡土墙, 在局部路基设路肩墙, 提高抗滑力, 使滑坡处于稳定状态。

4 结论

(1) 滑坡灾害的发生可以看作是自身路基工程地质内部因素为主、外部诱发因素为辅的链发过程, 强调整体性。将滑坡灾害的发育划分为 3 个阶段, 每个阶段表现出不同的链式反应特征, 可以从中提取一系列特征参数作为阶段识别的影响因素集。

(2) 采用模糊数学的方法构建识别模型。本文给出的识别模型中的识别因素集可以根据具体的工程情况有所增减, 但方法是相同的。同时调查的灾害数据越多, 参与评价的专家的相关知识越丰富, 获得的因素等级和权重值就越准确, 识别结果就越符合实际情况。

参考文献:

- [1] 舒森, 李家春, 朱钰, 等. 陕西省公路灾害防治技术指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [2] 徐邦栋. 滑坡分析与防治 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.

- [3] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭先, 等. 边坡与滑坡工程治理 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [4] 黄润秋, 许强. 地质灾害系统演化特性的定量判定 [J]. 中国科学基金, 2000(5): 265 - 269.
- [5] 李志强. 公路路基地质灾害识别方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [6] 梁萧. 地质灾害链式演绎动态跟踪系统功能格构 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [7] 肖盛燮. 灾变链式理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] 范海军, 肖盛燮, 郝艳广, 等. 自然灾害链式效应结构关系及其复杂性规律研究 [J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(1): 2603 - 2610.
- [9] 牟顺. 公路路基地质灾害识别系统研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [10] 肖盛燮, 冯玉涛, 王肇慧, 等. 灾变链式阶段的演化形态特征 [J]. 岩土力学与工程学报, 2006, 25(1): 2629 - 2633.
- [11] 冯玉涛, 肖盛燮. 崩滑流地质灾害链式机理及其优化防治 [J]. 灾害学, 2009, 24(3): 22 - 26.
- [12] 肖盛燮, 王平义, 吕恩琳. 模糊数学在土木与水利工程中的应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [13] 袁素凤. 模糊综合评价高速公路建设工程地质灾害危险性 [J]. 灾害学, 2009, 24(2): 57 - 60.

Identification Method for Chain Reaction Stages of Highway Landslides

Ma Baocheng¹, Wang Liang² and Mou Shun^{2, 3}

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shandong Dongtai Engineering Consulting Co., Ltd, Zibo 255038, China; 3. Zibo Highway Management Bureau, Zibo 255038, China)

Abstract: Reaction mechanism of landslide chain is researched in order to identify the development stages for highway landslides accurately, which are divided into three stages then. Related recognition factor set and score of landslides are selected from performance characteristics of landslides development, based on which development stages of landslide are identified by method of fuzzy mathematics that is adopted firstly in the investigation of highway landslide in southern Shaanxi.

Key words: highway landslide; chain reaction; stage division; recognition factor; fuzzy mathematics