

降雨触发山区公路边坡失稳的气象判据研究

于德海^{1,2}, 彭建兵³

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026;

2. 沈阳建筑大学 岩土与道路工程重点实验室, 辽宁 沈阳 110168; 3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 应用突变理论, 针对山区公路边坡的地质特征, 以其力学模型为基础, 综合考虑作用于后缘张裂隙的水力效应, 构建边坡系统的尖点突变模型, 推导出边坡极限状态下后缘张裂隙临界充水高度, 并据此得到临界降雨强度的计算公式, 建立了边坡突变失稳的气象判据。同时以陕南秦岭山区 G316 国道某滑坡为例, 进行算例分析。分析结果表明, 模型计算结果与实际情况较为一致, 从而为山区公路滑坡预警预报的研究提供一个新思路。

关键词: 公路边坡; 突变理论; 临界充水高度; 降雨强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)04-0125-04

中图分类号: U421.64

Meteorological Criterion of Highway Slope Failure Induced by Rainfall in Mountainous Areas

YU De-hai^{1,2}, PENG Jian-bing³

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

2. Key laboratory of Soil and Road Engineering, Shenyang Architecture University, Shenyang, Liaoning 110168, China; 3. Faculty of Geology Engineering and Geodesics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Based on hydrogeologic conditions and geomechanics model of highway slope in mountainous areas, a new catastrophic model on slope stability is established in consideration of the static water pressure of top splay fracture. Equations for calculating the critical water highness in the splay fracture and the critical rainfall intensity are developed by adopting cusp-catastrophic theory. The meteorological criterion of highway slope failure is put forward. At the same time, it is illustrated using the landslide on the No 316 national road in the southern Shaanxi Province. The results calculated by above model agree well with the observed ones, providing a new approach for the prediction of highway landslide.

Keywords: highway slope; catastrophic theory; critical water highness; rainfall intensity

随着我国西部大开发的日益加强以及扩大内需、推动基础设施建设战略的实施, 国家对山区县乡级公路的投资力度越来越大。然而, 我国山岭地区大多山高谷深, 暴雨频率高、强度大, 不可避免地要遇到由于降雨触发山区公路边坡失稳而造成路面沉降、房屋开裂、支挡破坏及交通堵塞等一系列工程灾害^[1-5]。因此, 对降雨触发山区公路边坡失稳机制的研究已成为亟待解决的问题。

边坡失稳是一种渐变至突变的自然现象, 如何将传统的力学模型与现代的数学方法相结合, 从而达到对边坡失稳机制的定量研究, 一直是困扰岩土工程界多年的问题。20世纪70年代初期发展起来的突变

理论, 由于其建立的思想与边坡系统的真实特性很接近, 均强调系统的非线性、随机性及不可逆性, 并且特别适合内部作用尚属未知的黑箱系统。因此, 近年来一些学者对此进行了广泛的研究, 并获得了许多有价值的成果^[6-11]。但是有一个不容忽视的问题是在考虑降雨触发山区公路斜坡失稳的过程中, 均未注意后缘张裂隙临界充水高度的影响, 也很少有人关注后缘张裂隙充水高度与滑坡临界雨强的关系。鉴于此, 本研究将传统的边坡力学模型与现代的突变理论相结合, 建立一个新的考虑边坡后缘张裂隙临界充水高度的尖点突变模型, 并依据公路设计规范, 得到张裂隙临界充水高度与滑坡临界雨强的关系, 进而定量揭示

收稿日期: 2009-07-07

修回日期: 2010-03-18

资助项目: 国家自然科学基金项目“辽东湾海岸带海蚀致灾机理及动力稳定性研究”(40902075); 沈阳建筑大学岩土与道路工程省级重点实验室开放基金项目(YT-200905); 中共高校基本科研业务费专项基金(2009QN130)

作者简介: 于德海(1977—), 男(汉族), 辽宁省朝阳市人, 博士, 讲师, 从事工程地质和岩土工程的科研工作。E-mail: ydhdhy1977@163.com.

降雨对边坡失稳的触发作用和判据, 研究结果对深化边坡失稳机制的认识具有理论意义和应用价值。

1 模型的建立

1.1 力学模型

在边坡岩体变形过程中, 如果内部的水得不到及时扩散, 会产生很高的静水压力, 造成岩体的孔隙裂隙增加; 尤其是后缘张裂隙中水的充入, 使得在此处形成高压水流, 从而具有将岩体“楔裂”的趋势, 极大地危害着边坡的稳定性。因此, 本次建模主要考虑了作用于后缘张裂隙的水压, 从而建立如图 1 所示的力学模型。

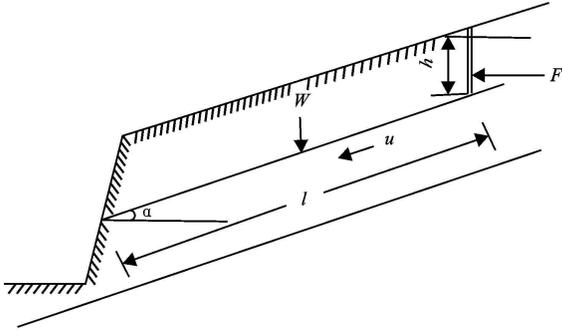


图 1 考虑水力效应的力学模型

注: W 为边坡岩体重力; F 为后缘张裂隙水压力。

由试验可知, 边坡表层岩体多属于应变软化介质, 并具有局部化剪切渐进破损的性质, 可用方程式 (1) 来描述它的本构关系^[13]。

$$\tau = \frac{Eu}{2t(1+\mu)} \exp\left(-\frac{u}{u_c}\right) \quad (1)$$

式中: E ——岩石的弹性模量; μ ——岩石的泊松比; t ——局部化剪切带的厚度; u ——带内的实际剪切位移; u_c ——剪切带的平均临界剪切位移。

1.2 突变模型

由突变理论可知, 要想建立系统的突变模型, 就必须知道该系统的总势能。对所研究的边坡系统来说, 总势能 V 为局部化剪切带的应变能 V_1 与滑动势能 (V_2+V_3) 之差。即

$$V = V_1 - V_2 - V_3 \quad (2)$$

其中, 局部化剪切带的应变能 V_1 为

$$V_1 = l \int_0^u \frac{Eu}{2t(1+\mu)} \exp\left(-\frac{u}{u_c}\right) du \quad (3)$$

沿局部化剪切带的重力势能 V_2 为

$$V_2 = Wu \sin\alpha = mg u \sin\alpha \quad (4)$$

沿局部化剪切带的水力势能 V_3 为

$$V_3 = F u \cos\alpha = \frac{1}{2} \gamma_w h^2 u \cos\alpha \quad (5)$$

结合公式 (2—5), 可得边坡系统的总势能为

$$V = l \int_0^u \frac{Eu}{2t(1+\mu)} \exp\left(-\frac{u}{u_c}\right) du - mg u \sin\alpha - \frac{1}{2} \gamma_w h^2 u \cos\alpha \quad (6)$$

式中: α ——局部化剪切带 (滑动带) 的倾角; l ——局部化剪切带 (滑动带) 的长度; γ_w ——水的重度; h ——后缘张裂隙充水高度。这样, 可按尖点突变理论的方法, 从系统总势能表达式出发, 选取 u 为状态变量进行分析。

首先, 根据 $V' = 0$, 可以得到平衡曲面 M 的方程为

$$V' = \frac{Elu}{2t(1+\mu)} \exp\left(-\frac{u}{u_c}\right) - mg \sin\alpha - \frac{1}{2} \gamma_w h^2 \cos\alpha = 0 \quad (7)$$

进一步根据平衡曲面的光滑性质, 可求得尖点。在尖点处有 $V'' = 0$, 即

$$V'' = \frac{El}{2t(1+\mu)} \left(\frac{u}{u_c} - 1\right) \exp\left(-\frac{u}{u_c}\right) = 0 \quad (8)$$

于是, 可得到在尖点处有

$$u = u_1 = u_c \quad (9)$$

然后, 将平衡曲面的方程式 (7), 相对于尖点处的状态变量 u_1 作 Taylor 展开, 截取至 3 次项, 并将式 (8—9) 代入化简, 可以得到

$$\frac{Elu_1 e^{-1}}{3t(1+\mu)} \left[\left(\frac{u-u_1}{u_1}\right)^3 - \frac{3}{2} \left(\frac{u-u_1}{u_1}\right) \right] + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{2mg \sin\alpha + \gamma_w h^2 \cos\alpha}{Elu_1} t(1+\mu)e\right) = 0 \quad (10)$$

将上式作变量代换, 可得到尖点突变理论标准形式的平衡方程为

$$x^3 + px + q = 0 \quad (11)$$

式中:

$$x = \frac{u-u_1}{u_1} \quad (12)$$

$$p = -\frac{3}{2} \quad (13)$$

$$q = \frac{3}{2} (1-\xi) \quad (14)$$

$$\xi = \frac{2mg \sin\alpha + \gamma_w h^2 \cos\alpha}{Elu_1} t(1+\mu)e \quad (15)$$

式中: x ——系统的状态变量; p, q ——系统的控制参数; 参数 ξ 与岩体重量 mg , 系统的几何尺寸 (l, h, t), 介质的力学参数 (E, μ) 等有关。由式 (14—15) 可知, 系统的控制变量 q 完全是由参数 ξ 所决定的, 并且 ξ 不是一成不变的, 会随着边坡孕育环境 (如后缘充水高度 h) 的改变而变化, 也就是说, 水力效应是通过改变参数 ξ 而对边坡系统产生影响的。

由尖点突变理论可知, 如果系统从 B 点出发, 随

着控制参数 p 和 q 的调整, 沿路径 BB' 演化到 B' , 状态变量 x 连续变化, 则系统发生渐变而不突变; 而从 A 点出发沿路径 AA' 演化, 当接近折叠翼边缘时, 只要控制参数有微小的变化, 状态变量就会从折叠翼的上叶直接跃迁到折叠翼的下叶而到达 A' , 则系统发生突变, 如图 2 所示。这说明系统只有在跨越分叉集时, 才能发生突变。

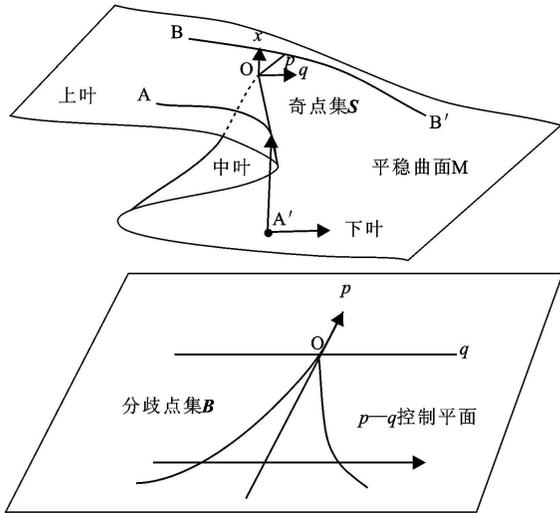


图 2 尖点突变模型的平衡曲面和控制平面

综上所述, 系统发生突变的边界条件为分歧点集 B 。而对于尖点突变模型, 要求系统满足其分叉集方程

$$4p^3 + 27q^2 = 0 \quad (16)$$

由式(16)可知, 仅当 $p \leq 0$ 时, 判别式才可能等于零, 故 $p \leq 0$ 是系统发生突变的必要条件; 又由式(13)可得, 边坡系统的控制变量 $p = -3/2$, 满足 $p \leq 0$ 的必要条件。因此, 式(16)为边坡突发失稳的充要力学条件。

将式(13-14)代入式(16)可得

$$9(1 - \xi)^2 - 2 = 0 \quad (17)$$

再将式(15)代入式(17)中, 就可求得后缘张裂隙临界充水高度 h_σ 的表达式

$$h_\sigma = \left[\frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{(3 - \sqrt{2})E l u_c}{3et(1 + \mu)\cos\alpha} - 2mg \tan\alpha \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

由达西定律可知, 水在渗流时的流量可表示为

$$Q = AkI = Ak \frac{h}{l} \quad (19)$$

式中: k ——渗透系数; I ——水力梯度; A ——面积。

可以看出, 渗流流量与后缘张裂隙充水高度成正比。当边坡处于临界稳定状态时, 其临界流量为

$$Q_\sigma = Ak \frac{h_\sigma}{l} \quad (20)$$

一旦后缘张裂隙的汇流量 Q_0 大于临界流量 Q_σ , 则张裂隙充水高度 h 大于其临界高度 h_σ , 边坡即发生滑移破坏。

边坡后缘张裂隙和滑动面形成一个完整的截排水体系, 按文献[13]中有关水文计算的规定, 张裂隙汇流量可按如下公式计算:

$$Q_0 = 16.67 \psi q A \quad (21)$$

式中: ψ ——径流系数; q ——降雨强度; A ——面积。

令

$$Q_0 = Q_\sigma \quad (22)$$

联立式(20-22), 可得出临界降雨强度 q_σ 与张裂隙临界充水高度 h_σ 的关系式:

$$q_\sigma = \frac{kh_\sigma}{16.67 \psi} \quad (23)$$

将式(18)代入式(23), 可得

$$q_\sigma = \frac{k \left[\frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{(3 - \sqrt{2})E l u_c}{3et(1 + \mu)\cos\alpha} - 2mg \tan\alpha \right) \right]^{\frac{1}{2}}}{16.67 \psi} \quad (24)$$

至此, 可以根据后缘张裂隙临界充水高度 h_σ 或临界降雨强度 q_σ 的关系提出边坡的失稳判据:

$$\left. \begin{aligned} h < h_\sigma \text{ 或 } q < q_\sigma & \text{ (边坡稳定)} \\ h = h_\sigma \text{ 或 } q = q_\sigma & \text{ (边坡临界极限)} \\ h > h_\sigma \text{ 或 } q > q_\sigma & \text{ (边坡滑移破坏)} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

2 算例分析

滑坡地点位于陕南地区 G316 国道 K1851+030 ~ 250 处, 为顺向岩质边坡, 基岩出露, 岩性为软弱变质片岩^[14], 如图 3 所示。斜坡体层理面大致倾向公路方向, 产状为 $155^\circ \angle 41^\circ$ 。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, 致使坡体后缘产生深而大的拉张裂缝, 近似陡立, 倾角 87° 。在暴雨的影响下, 雨水下渗进入拉裂缝, 浸泡软化岩体, 软弱滑移面逐渐贯通; 随着坡体抗滑能力的降低, 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, 路基也出现多条裂纹, 呈放射状展布, 行将破坏。

本研究对滑坡现场进行了多次勘测, 并做了大量的室内力学试验, 依据获得的结果, 得出计算参数如下, 岩石的弹性模量 $E = 2.45 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.28$, 比重 $\gamma = 23.59 \text{ kN/m}^3$, 临界剪切位移 u_c 为 3.2 mm ; 滑坡体积为 $5.00 \times 10^5 \text{ m}^3$, 滑动带长度 l 为 100 m , 滑动带倾角 α 为 40° , 滑动带平均厚度 t 为 0.25 m 。将上述参数代入到式(18)中, 可计算得出边坡后缘张裂隙临界充水高度 $h_\sigma = 5.5 \text{ m}$ 。另外, 由当地水文地

质资料可知, 滑坡体渗透系数为 9.8 m/d , 径流系数 $\psi=0.5$, 据此可根据公式 (24), 计算得到边坡失稳的临界降雨强度 $q_{cr}=65 \text{ mm/d}$, 这与陕南地区滑坡临

界雨强 70 mm/d 是较为接近的^[15]。可见, 当降雨强度大于 65 mm/d 或后缘张裂隙充水高度大于 5.5 m 时, 边坡即发生滑坡破坏。

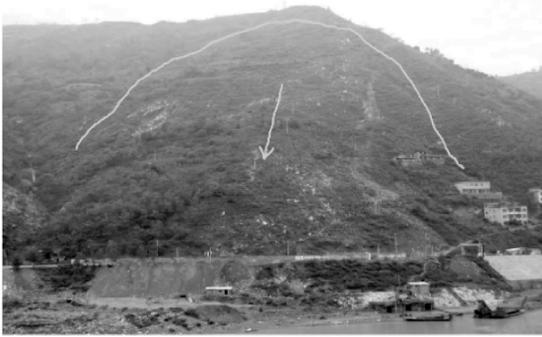


图 3 滑坡全貌及后缘拉裂缝

3 结论

(1) 将突变理论引入到山区公路边坡的失稳机理研究中, 建立一个新的考虑边坡后缘张裂隙临界充水高度的尖点突变模型, 并通过分析后缘张裂隙充水高度和降雨强度的关系, 提出以临界雨强作为边坡滑坡失稳的气象判据, 具有较好的理论价值。

(2) 以陕南地区 G316 国道某典型滑坡为例, 对所推导的公式进行实例运算, 计算得到该边坡失稳的临界降雨强度为 65 mm/d , 这与陕南地区滑坡临界雨强 70 mm/d 较为接近, 可见其计算结果与实际情况基本一致, 表明该方法具有一定的合理性和良好的应用前景, 也为该地区滑坡预警预报提供新的思路。

(3) 边坡失稳是一个复杂多样的变化过程, 其影响因素众多, 要得到准确的破坏判据解析解十分困难。目前, 突变理论一般仅用于简单地质模型的处理, 对于较复杂的情况, 尚有待于进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 张作辰. 滑坡地下水作用研究与防治工程实践[J]. 工程地质学报, 1996, 4(4): 80-85.
- [2] 刘才华, 徐健, 曹传林, 等. 岩质边坡水力驱动型顺层滑坡破坏机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3529-3533.
- [3] 何满潮, 姚爱军, 鹿粗. 边坡岩体水力学作用的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 662-666.
- [4] 贾致荣, 张玮. 公路边坡植被恢复质量评价指标及方法研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 115-118.
- [5] 贺可强, 白建业, 王思敬. 降雨诱发型堆积层滑坡的位移动力学特征分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(5): 705-709.
- [6] 秦四清. 斜坡失稳的突变模型与混沌机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 486-492.
- [7] 孙强, 刘天霸, 秦四清, 等. 斜坡失稳的燕尾突变模型[J]. 工程地质学报, 2006, 14(6): 852-855.
- [8] CHAU K T. Applications of catastrophe and bifurcation theories to slope failures[C] // Slope Engineering in Hong Kong, HKIE, Geotechnical Division Annual Seminar. Rotterdam: Balkema, 1998: 129-136.
- [9] 黄润秋, 许强. 斜坡失稳时间的协同预测模型[J]. 山地研究, 1997, 15(1): 7-12.
- [10] 刘军, 秦四清, 张俤元. 缓倾角层状岩体失稳的尖点突变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 42-44.
- [11] 秦四清. 斜坡失稳过程的非线性演化机制与物理预报[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1241-1248.
- [12] 于德海. 软弱变质岩力学性质及其边坡失稳机制的研究[D]. 西安: 长安大学, 2007: 59-62.
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. 公路排水设计规范(JTJ018-97)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [14] 于德海, 彭建兵. 陕南公路软弱变质岩边坡变形破坏特征的研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 559-563.
- [15] 柳源. 滑坡临界暴雨强度[J]. 水文地质工程地质, 1998, 22(3): 43-45.