

降雨作用下浅埋隧道松散围岩塌方机制

王迎超^{1,2}, 尚岳全², 严细水², 徐兴华²

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 力学与建筑工程学院, 221008 江苏 徐州, wych12345678@126.com; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 310058 杭州)

摘要: 为揭示降雨作用下浅埋隧道松散围岩塌方机制, 基于突变理论, 建立浅埋隧道塌方的尖点突变模型. 考虑不同本构关系的隧道围岩组合, 分别推导双层应变软化介质、单层应变硬化介质及应变软化介质组合的围岩失稳力学判据, 分析诱发塌方的主要影响因素, 揭示雨水入渗作用下浅埋隧道塌方机理. 以马鞍山隧道为工程案例, 运用地表沉降监测数据进行浅埋隧道塌方突变预测. 研究表明, 浅埋隧道塌方力学判据可有效用于塌方机制分析, 用地表沉降数据预测浅埋隧道松散围岩塌方更为合理和符合实际.

关键词: 隧道工程; 降雨; 塌方; 尖点突变模型; 失稳判据; 地表沉降

中图分类号: U45 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)02-0142-07

Study on collapse mechanism in loose wall rock of shallow tunnel under rainfall

WANG Ying-chao^{1,2}, SHANG Yue-quan², YAN Xi-shui², XU Xing-hua²

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, 221008 Xuzhou, Jiangsu, China, wych12345678@126.com;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 310058 Hangzhou, China)

Abstract: In order to reveal collapse mechanism in loose wall rock of shallow tunnel under rainfall, the cusp-catastrophic model is established based on catastrophe theory. Considering the case that surrounding rock of shallow tunnel is combined with different rock and soil mass, the instability criterions are derived when surrounding rock is combined with double strain-softening mediums or with single strain-hardening layer and strain-softening layer. The main influence factors and mechanism of collapse are analyzed. Then, the viewpoint is put forward that collapse of shallow tunnel can be predicted by data of ground settlement based on the catastrophe theory. It's feasibility and reasonability is tested by the collapse that occurs in construction of Maanshan tunnel. The results show that the derived instability criterions can analyze the collapse mechanism effectively. It is more feasible and tally with the actual that the data of ground settlement is used to predict the collapse in loose wall rock of shallow tunnel.

Key words: tunneling engineering; rainfall; collapse; cusp-catastrophic model; instability criterion; ground settlement

丘陵、山地地区为满足高速公路线形设计要

求, 常常需要在斜坡地段修建浅埋公路隧道. 由于浅埋公路隧道跨度大, 围岩松散, 在施工过程中容易发生塌方事故. 降雨是引起浅埋隧道塌方的一个重要因素, 开展降雨作用下的塌方机制分析和判据研究具有现实意义.

塌方是常见的围岩失稳破坏模式之一, 具有复杂的非线性和突发性特征. 突变理论是研究塌

收稿日期: 2010-07-08.

基金项目: 江苏省博士后科研资助计划项目(1101017B); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室博士后基金项目(PD1105); 中国博士后科学基金项目(20110491475); 中国矿业大学力建学院青年科技基金项目(lj2010qnj03); 中国矿业大学人才引进资助项目.

作者简介: 王迎超(1982—), 男, 博士.

方的有效工具. 目前, 突变理论已广泛应用于滑坡^[1-5]、岩爆^[6-8]、深埋隧道围岩失稳破坏^[9-14]、地震^[15-18]等灾害分析. 但对于降雨作用下浅埋隧道塌方机制分析和判据研究未见报道. 本文基于突变理论, 建立雨水入渗作用下浅埋隧道松散围岩塌方的尖点突变模型, 分别推导不同围岩组合下失稳破坏力学判据, 为分析围岩失稳机理提供科学依据. 基于浙江省诸永高速公路马鞍山隧道实际工程案例, 运用突变理论并结合地表沉降监测数据对该隧道塌方进行有效预测, 取得了合理的研究成果.

1 突变理论基本原理

1.1 突变理论简介

突变理论^[19]是1972年由法国巴黎高级科学院 R. Thom 教授创立, 以奇点理论和拓扑学为主要数学工具, 主要有7种突变类型. 目前, 应用最广泛的是尖点突变模型, 如图1所示.

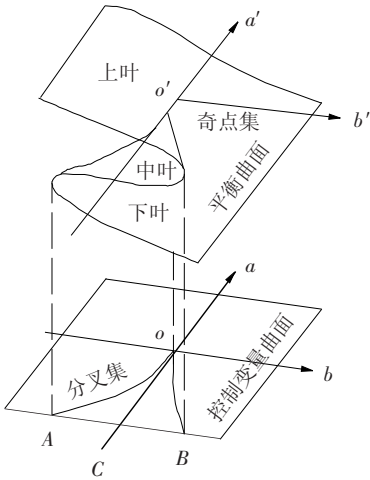


图1 尖点突变模型示意图^[13]

1.2 尖点突变性质和分析步骤

尖点型突变具有突跳性、滞后性、双模态、发散性和不可达性5条典型性质^[19]. 在采用尖点突变进行分析时, 一般按如下步骤^[10]:

- 1) 通过简化工程地质模型, 得到力学计算模型.
- 2) 构造势函数表达式, 进行泰勒展开, 并通过变量代换, 将势函数转化为尖点突变的标准形式 $V(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ux^2 + vx$ (x 为状态变量, u, v 为控制变量).
- 3) 通过求导计算, 得到平衡曲面方程式 $V'(x) = x^3 + ux + v = 0$ 和分叉集方程 $4u^3 + 27v^2 = 0$.
- 4) 以跨越分叉集为判别条件, 得到系统发生突跳的必要条件为 $u \leq 0$.

5) 当控制变量 u, v 满足分叉集方程时, 系统处于突跳前的临界状态, 由此得出系统突跳的临界条件.

浅埋隧道塌方是围岩变形积累到一定程度而发生的突发失稳破坏现象, 是岩土体状态的跳跃, 具有突变的性质. 尖点突变理论是研究系统随控制参数变化而变化的特性, 特别是当参数在一定条件下改变系统性能发生突变的情况, 因此, 可以通过建立尖点突变模型来阐述浅埋隧道塌方的发生机制.

2 浅埋隧道塌方尖点突变模型^[20]

浅埋隧道的围岩风化较严重, 一般呈现松散破碎特征, 隧道开挖后无法在拱顶形成压力拱, 容易出现冒顶坍塌灾害. 为分析不同岩土层组合对围岩稳定性的影响, 通过简化地质模型, 建立尖点突变模型, 推导塌方发生判据, 揭示围岩失稳破坏机制.

雨水入渗对浅埋隧道围岩稳定性影响显著, 主要体现在: ① 使含水量和岩土体孔隙水压力升高, 围岩抗剪强度和有效应力减小, 大大降低拱顶围岩的成拱能力; ② 随着雨水不断下渗, 围岩重度逐步增大, 围岩压力升高, 出现失稳破坏的可能性增大.

上述两方面降雨作用在计算分析过程中定量较困难, 雨水下渗将使围岩产生水致弱化效应, 因此, 引入一个假设的水致弱化函数^[1]:

$$f(\omega) = (1 - R)(1 - \omega)^2 + R.$$

式中: ω 为含水量. $f(\omega)$ 是单调下降函数, 干燥时, $\omega = 0, f(0) = 1$; 饱和时, $\omega = 1, f(1) = R < 1$. R 为饱和状态下的强度系数. Vutukuri 等^[18]通过室内实验的方法, 获得了石英质页岩的强度与含水量的关系曲线, 具体见图2.

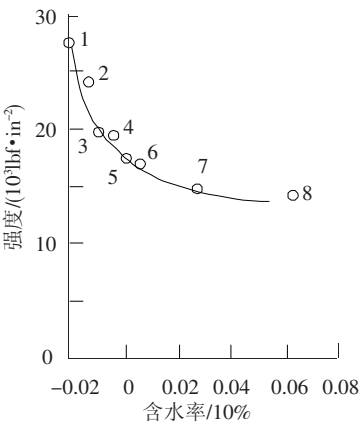


图2 石英质页岩强度随含水率变化曲线^[18]

2.1 双层应变软化介质塌方判据

图 3 为某浅埋隧道简化工程地质力学模型,假设隧道上方有两层岩土体,均具有一定的应变软化特征.应变软化是指随着岩土体剪切位移不断增大,剪切阻力先增大后减小,最终趋于稳定的特性,其关系曲线见图 4.浅埋隧道开挖后,在洞室两侧出现滑移面,假设与铅垂线间的夹角为 θ .

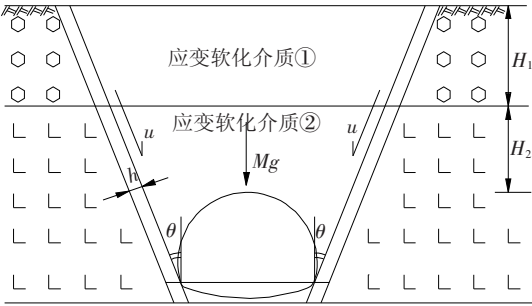


图 3 双层应变软化介质下浅埋隧道塌方的简化力学模型

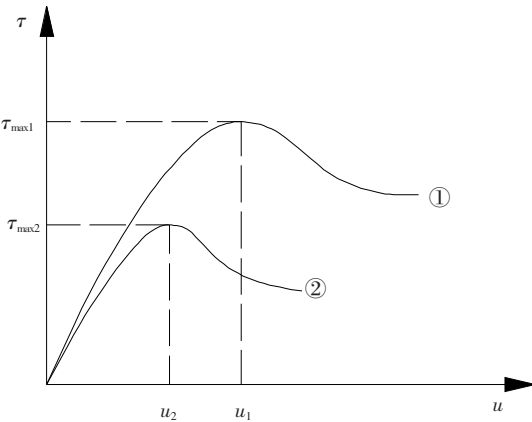


图 4 应变软化介质本构关系曲线^[21]

对于应变软化介质,其本构关系为^[21]

$$\begin{cases} \tau_1 = G_1 \frac{u}{h} e^{-u/u_1}, \\ \tau_2 = G_2 \frac{u}{h} e^{-u/u_2}. \end{cases}$$

式中: τ_1, τ_2 分别为岩土层 ①、② 在滑移面上的剪应力; G_1, G_2 和 u_1, u_2 分别为相应的剪切模量和剪应力峰值所对应的剪切位移; u 为滑动面上的位移, h 为剪切带厚度.

浅埋隧道松散围岩系统总势能为

$$V = \int_0^u G_1 \frac{u}{h} \frac{H_1}{\cos \theta} f_1(\omega) e^{-u/u_1} du + \int_0^u G_2 \frac{u}{h} \cdot \frac{H_2}{\cos \theta} f_2(\omega) e^{-u/u_2} du - Mgu \cdot \cos \theta.$$

由 $\frac{\partial V}{\partial u} = 0$, 可求出浅埋隧道围岩稳定性分析的平衡曲面为

$$V' = G_1 \frac{u}{h} \frac{H_1}{\cos \theta} f_1(\omega) e^{-u/u_1} + G_2 \frac{u}{h} \frac{H_2}{\cos \theta} f_2(\omega) e^{-u/u_2} - Mg \cdot \cos \theta.$$

令刚度比 $k = \frac{G_1 H_1}{G_2 H_2}$, 水致弱化系数 $f = \frac{f_1(\omega)}{f_2(\omega)}, \beta = \frac{u_2}{u_1}$, 则

$$\begin{aligned} V' &= G_1 \frac{u}{h} \frac{H_1}{\cos \theta} f_1(\omega) e^{-u/u_1} + G_2 \frac{u}{h} \frac{H_2}{\cos \theta} f_2(\omega) e^{-u/u_2} - \\ Mg \cdot \cos \theta &= \frac{k G_2 H_2 u}{h \cos \theta} f \cdot f_2(\omega) e^{-\beta u/u_2} + \frac{G_2 H_2 u}{h \cos \theta} f_2(\omega) e^{-u/u_2} - \\ Mg \cos \theta &= \frac{G_2 H_2 f_2(\omega) u}{h \cos \theta} e^{-u/u_2} \left(k f e^{\frac{u}{u_2}(1-\beta)} + 1 \right) - Mg \cos \theta. \end{aligned} \tag{1}$$

由 $V''' = 0$, 求得平衡曲面尖点处的剪切位移 u^* 所满足的方程为

$$\begin{aligned} V''' &= \frac{G_1 H_1 u f_1(\omega)}{h u_1^2 \cos \theta} e^{-u^*/u_1} - \frac{2 G_1 H_1 f_1(\omega)}{h u_1 \cos \theta} e^{-u^*/u_1} + \\ \frac{G_2 H_2 u f_2(\omega)}{h u_2^2 \cos \theta} e^{-u^*/u_2} &- \frac{2 G_2 H_2 f_2(\omega)}{h u_2 \cos \theta} e^{-u^*/u_2} = 0. \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned} V''' &= \frac{G_2 H_2}{h \cos \theta} f_2(\omega) \frac{e^{-\beta u}}{u_2} [k f e^{\beta u(1-\beta)} \beta (-2 + \beta \beta_u) + \\ &(-2 + \beta_u)] = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

式中 $\beta_u = u^*/u_2$.

式(2) 可简化为

$$V''' = k f e^{\beta_u(1-\beta)} \beta (-2 + \beta \beta_u) + (-2 + \beta_u) = 0.$$

把平衡曲面方程式(1) 相对于尖点处的位移 u^* 展开为 Taylor 级数, 并截取至 3 次项, 得

$$\begin{aligned} \frac{G_2 H_2 f_2(\omega) \beta_u^2}{h \cos \theta (u^*)^2} e^{-\beta_u} [k f \beta^2 e^{\beta_u(1-\beta)} (3 - \beta \beta_u) + (3 - \beta_u)] \cdot \\ (u - u^*)^3 + \frac{G_2 H_2 f_2(\omega)}{h \cos \theta} e^{-\beta_u} [k f e^{\beta_u(1-\beta)} (1 - \beta \beta_u) + \\ (1 - \beta_u)] (u - u^*) + \frac{G_2 H_2 f_2(\omega) u^*}{h \cos \theta} e^{-\beta_u} (k f e^{\beta_u(1-\beta)} + \\ 1) - Mg \cos \theta = 0. \end{aligned} \tag{3}$$

对式(3) 化简, 可得方程

$$ax^3 + bx + c = 0. \tag{4}$$

式中: $x = \frac{u - u^*}{u^*}; a = \beta_u^2 [k f \beta^2 e^{\beta_u(1-\beta)} (3 - \beta \beta_u) + (3 - \beta_u)]; b = k f e^{\beta_u(1-\beta)} (1 - \beta \beta_u) + (1 - \beta_u);$

$$c = k f e^{\beta_u(1-\beta)} + 1 - \frac{Mgh \cos^2 \theta}{G_2 H_2 f_2(\omega) u^* e^{-\beta_u}}.$$

令 $p = b/a, q = c/a$, 可将方程式(4) 转换为平衡曲面方程式的标准形式, 即

$$x^3 + px + q = 0.$$

根据突变理论, 发生塌方的充要条件是分叉

集方程,即

$$4p^3 + 27q^2 = 0. \tag{5}$$

从式(5) 看出,当各参数发生变化,跨越分叉集时,状态变量 x 将发生突变,最终导致塌方灾害的发生,这是发生塌方的充要条件. 只有 $p \leq 0$,围岩系统才可能突跳至非平衡状态,因此,塌方灾害发生的必要条件为 $p \leq 0$,即

$$\frac{kfe^{\beta_u(1-\beta)}(1-\beta\beta_u) + (1-\beta_u)}{\beta_u^2[kf\beta^2e^{\beta_u(1-\beta)}(3-\beta\beta_u) + (3-\beta_u)]} \leq 0.$$

进一步化简,得

$$\frac{kfe^{\beta_u(1-\beta)}(1-\beta\beta_u) + (1-\beta_u)}{kf\beta^2e^{\beta_u(1-\beta)}(3-\beta\beta_u) + (3-\beta_u)} \leq 0. \tag{6}$$

从式(6) 可知,隧道塌方与雨水入渗和岩土层特征密切相关. 对于某具体的浅埋山岭隧道, k 、 β 、 β_u 为常量,故塌方主要取决于水致弱化系数 f . 隧道开挖后,随着雨水不断下渗,水致弱化系数 f 发生变化,当满足式(6) 时,围岩系统将由平衡状态跳跃至非平衡状态,致使围岩发生突发失稳破坏. 因此,当在雨季进行隧道施工,应做好防排水措施,尽量减小雨水对岩土体的影响,以保持隧道围岩的稳定性. 也可以通过地表预注浆等措施,改变隧道上方两层岩土层的刚度比 k ,使围岩系统远离分叉集,防止塌方灾害的发生.

2.2 单层应变软化介质和应变硬化介质组合塌方判据

为了进一步揭示隧道上方不同介质组合对隧道围岩稳定性的影响,基于尖点突变理论,进一步推导应变软化介质和应变硬化介质组合时,雨水入渗条件下浅埋隧道松散围岩塌方判据. 图5 为简化的工程地质力学模型,应变软化介质的本构关系见 2.1 节介绍. 应变硬化是指岩土体的弹塑性特征,即岩土体经历过屈服滑移后,重新呈现出抵抗继续变形的能力,其本构关系曲线见图6.

对于应变硬化介质,其本构关系^[22] 为

$$\tau = \begin{cases} \frac{G_2u}{h}, & 0 \leq u \leq u_h; \\ \tau_h + \frac{G'_2(u - u_h)}{h}, & u > u_h. \end{cases}$$

$$V' = \begin{cases} \frac{G_1u}{h} \frac{H_1}{\cos \theta} f_1(\omega) e^{-\frac{u}{u_1}} + \frac{G_2u}{h} \frac{H_2}{\cos \theta} f_2(\omega) - Mg \cdot \cos \theta, & 0 \leq u \leq u_h; \\ \frac{G_1u}{h} \frac{H_1}{\cos \theta} f_1(\omega) e^{-\frac{u}{u_1}} + \left[\tau_h + \frac{G'_2(u - u_h)}{h} \right] \cdot \frac{H_2}{\cos \theta} f_2(\omega) - Mg \cdot \cos \theta, & u > u_h. \end{cases} \tag{7}$$

式(7) 为力的平衡条件. 由平衡曲面的光滑性质可求出尖点,在尖点处有 $V''' = 0$, 即

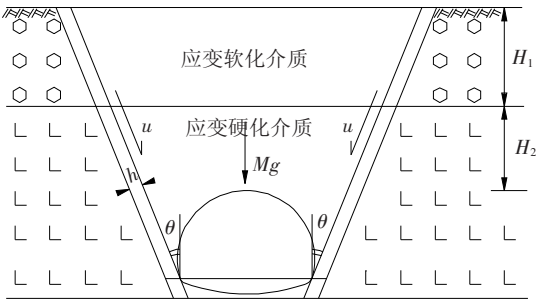


图5 单层应变软化介质与应变硬化介质组合下浅埋隧道塌方的简化力学模型

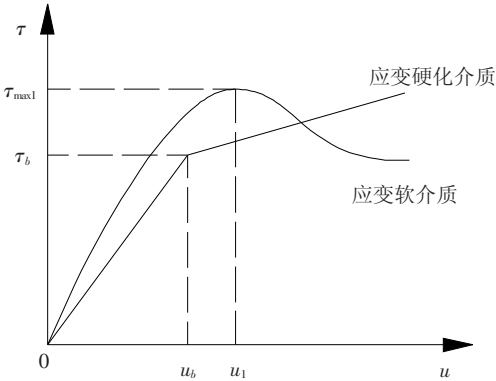


图6 应变硬化介质和应变软化介质本构曲线^[22]

式中: h 为剪切带厚度; u_h 为应变硬化开始点位移; τ_h 为 u_h 对应的抗剪应力; G_2 和 G'_2 分别为应变硬化介质对应 $0 \leq u \leq u_h$ 和 $u > u_h$ 的剪切模量.

浅埋隧道松散围岩系统的总势能可表示为

当 $0 \leq u \leq u_h$ 时

$$V = \int_0^u \frac{G_1u}{h} \frac{H_1}{\cos \theta} f_1(\omega) e^{-\frac{u}{u_1}} du + \int_0^u \frac{G_2u}{h} \cdot \frac{H_2}{\cos \theta} f_2(\omega) du - Mgu \cdot \cos \theta.$$

当 $u > u_h$ 时

$$V = \int_0^u \frac{G_1u}{h} \frac{H_1}{\cos \theta} f_1(\omega) e^{-\frac{u}{u_1}} du + \int_0^{u_h} \frac{G_2u}{h} \cdot \frac{H_2}{\cos \theta} f_2(\omega) du + \int_{u_h}^u \left[\tau_h + \frac{G'_2(u - u_h)}{h} \right] \cdot \frac{H_2}{\cos \theta} f_2(\omega) du - Mgu \cdot \cos \theta.$$

令 $\frac{\partial V}{\partial u} = 0$, 可得浅埋隧道围岩稳定性分析平衡曲面方程为

$$V''' = - \frac{G_1H_1f_1(\omega)}{hu_1\cos \theta} e^{-\frac{u}{u_1}} \left(-2 + \frac{u}{u_1} \right) = 0. \tag{8}$$

通过对式(8) 进行求解,可得到尖点处的位移为 $u^* = 2u_1$,尖点处位移为剪切面应变软化介质本构曲线拐点处位移值的 2 倍.

将式(7) 对尖点处状态变量 u^* 作 Taylor 展开,截取至 3 次项,可得

当 $0 \leq u \leq u_h$ 时

$$\frac{G_2H_2f_2(\omega)u^*}{h\cos\theta}\left[4kfe^{-2}\left(\frac{u-u^*}{u^*}\right)^3 + (-kfe^{-2} + 1)\left(\frac{u-u^*}{u^*}\right) + kfe^{-2} + 1 - \frac{Mgh\cos^2\theta}{G_2H_2f_2(\omega)u^*}\right] = 0. \tag{9}$$

式中:刚度比 $k = \frac{G_1H_1}{G_2H_2}$;水致弱化系数 $f = \frac{f_1(\omega)}{f_2(\omega)}$.

当 $u > u_h$ 时

$$\frac{G_2H_2f_2(\omega)u^*}{h\cos\theta}\left[4kfe^{-2}\left(\frac{u-u^*}{u^*}\right)^3 + (-kfe^{-2} + k')\left(\frac{u-u^*}{u^*}\right) + kfe^{-2} + \frac{\tau_h h}{G_2u^*} + \frac{kk'(u^* - u_h)}{u^*} - \frac{Mgh\cos^2\theta}{G_2H_2f_2(\omega)u^*}\right] = 0. \tag{10}$$

式中 $k' = \frac{G'_2}{G_2}$.

将式(9)、(10) 化简,得尖点突变模型平衡曲面标准形式为

$$ax^3 + bx + c = 0. \tag{11}$$

式中: $x = \frac{u-u^*}{u^*}$, $a = 4kfe^{-2}$,

$$b = \begin{cases} -kfe^{-2} + 1, & 0 \leq u \leq u_h; \\ -kfe^{-2} + k', & u > u_h. \end{cases}$$

$$c = \begin{cases} kfe^{-2} + 1 - \frac{Mgh\cos^2\theta}{G_2H_2f_2(\omega)u^*}, & 0 \leq u \leq u_h; \\ kfe^{-2} + \frac{\tau_h h}{G_2u^*} + \frac{kk'(u^* - u_h)}{u^*} - \frac{Mgh\cos^2\theta}{G_2H_2f_2(\omega)u^*}, & u > u_h. \end{cases}$$

令 $p = b/a$, $q = c/a$,则方程(11) 化为

$$x^3 + px + q = 0.$$

由突变理论特征可知,塌方发生的充要条件为分叉集方程,即

$$4p^3 + 27q^2 = 0. \tag{12}$$

从式(12) 容易看出,只有 $p \leq 0$,隧道松散围岩系统才可能突跳至不平衡状态,所以, $p \leq 0$ 为塌方发生的必要条件,即

$$\begin{cases} \frac{-kfe^{-2} + 1}{4kfe^{-2}} \leq 0, & 0 \leq u \leq u_h; \\ \frac{-kfe^{-2} + k'}{4kfe^{-2}} \leq 0, & u > u_h. \end{cases} \tag{13}$$

式(13)可简化为

$$\begin{cases} f \geq \frac{e^2}{k}, & u \leq u_h; \\ f \geq \frac{k'e^2}{k}, & u > u_h. \end{cases} \tag{14}$$

从式(14) 可以看出,浅埋隧道塌方取决于水致弱化系数 f 和刚度比 k 的关系. 降雨对岩土体具有水致弱化效应,降雨作用下 f 是不断变化的,当水致弱化系数 f 与岩土层刚度比 k 满足式(14) 时,即预示着塌方发生. 由此可知,降雨是浅埋隧道松散围岩塌方的诱发因素,大气降雨通过松散围岩孔隙不断入渗,下渗过程中与隧道围岩发生复杂的物理化学作用,致使岩土体强度减小,力学性能变差,最终使隧道上方围岩沿滑动面面临空方向滑动,发生冒顶塌方灾害. 综上所述,降雨作用下,水致弱化系数 f 和刚度比 k 的改变将对围岩稳定系统产生影响. 雨季施工隧道浅埋段,及时做好防排水工作对于防止围岩失稳破坏将起到事半功倍的作用.

3 浅埋隧道塌方预测分析

3.1 地表沉降与拱顶下沉相关性分析

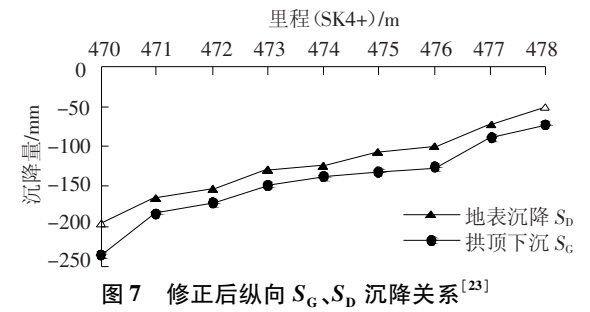
雨季施工浅埋隧道,因围岩自稳能力差,隧道开挖出现临空面后,掌子面附近极易发生塌方. 该类塌方往往具有突发性,影响范围一般会延伸至地表,使地层发生变形. 目前,反映地层变形情况的关键指标是地表沉降值和拱顶下沉值,拱顶下沉是隧道拱顶内壁的绝对下沉量,地表沉降是地层变形从拱顶向上传递至地表的結果.

当前深埋隧道的围岩稳定性预测是基于拱顶下沉监测数据,其能较好地反映围岩变形特点,但其获取是在初支完成后实现的,可见对浅埋隧道塌方预测,以拱顶下沉监测数据进行突变分析具有很大的缺点. 因为浅埋隧道塌方往往具有突发性,历时较短,塌方影响范围内的监测点下沉数据不易获得,而地表沉降数据获取不受隧道开挖的影响,可以得到塌方前的大量数据,通过其发展变化趋势可以客观反映开挖后围岩的变形动态. 黄俊等^[22]发现,地表沉降数据和拱顶下沉数据具有良好的相关性,图 7 是某浅埋隧道修正后的地表沉降和地表下沉关系曲线. 对于浅埋隧道,塌方往往会影响到地表,故而基于地表沉降数据进行塌方突变分析是可行的.

3.2 工程概况^[20]

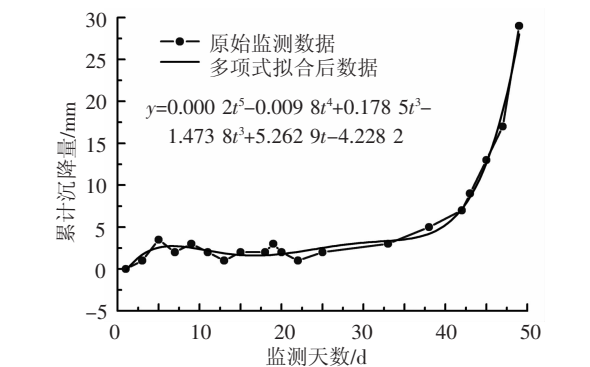
马鞍山隧道位于诸(暨)永(嘉)高速公路金华段(东阳)第 S107 合同段,属于分离式隧道. 该

隧道位于浙中中低山丘陵区,中间高,东西两端低,山顶海拔 367.08 m,地形自然坡度 30°~35°,植被发育.隧道设计为单向行车双车道分离式隧道,施工图设计桩号为 K97+412~K97+594,长 182 m.隧道所在坡体上覆盖约 10 m 厚的第 4 系松散覆盖层和全风化凝灰岩,风化裂隙极发育,岩体破碎,呈角碎石状,结构松散,围岩稳定性差.



2006 年 4 月 19 日,马鞍山隧道右洞由进口(诸暨端)向出口(永嘉端)方向开挖至 K97+585 处发生塌方事故.塌方处洞顶埋深约 8 m,随着时间的推移,塌方不断发展,向外延伸至 K97+587(永嘉端),向内延伸至 K97+582(诸暨端),最终地表出现了一个表面直径约为 6 m 的漏斗状塌陷坑.

在马鞍山隧道右洞 K97+583 设置地表沉降监测断面,洞室正上方监测点地表沉降曲线如图 8 所示.



可以看出,3 月初布设测点,地表沉降呈微小波动变化,总体呈缓慢增大趋势;4 月份沉降速率增大,其中 4 月 12~16 日连续降雨,各监测点沉降量迅速增加,增幅约 2 mm/d.降雨作用下,隧道覆盖坡体表面首先出现微小裂缝,雨水沿裂缝不断下渗,一方面使岩土体强度降低,另一方面使裂缝加宽并逐步延伸至坡体内部.由此,隧道围岩重度增大、强度降低,逐渐向临空方向侧移,并造成地表沉陷加速,则降雨结束后 1~2 d 内沉降速率最大,增幅约 7 mm/d.

3.3 浅埋隧道塌方预测

运用突变理论,基于地表沉降数据,对降雨作用下马鞍山隧道右洞塌方进行突变预测,验证其合理性和有效性.

首先对地表沉降原始监测数据进行多项式拟合分析,可得回归方程式为

y = f(t) = 0.000 2t^5 - 0.009 8t^4 + 0.178 5t^3 - 1.473 8t^2 + 5.262 9t - 4.228 2. (15)

式中: y 为隧道围岩累计地表沉降量(mm); t 为累计监测天数(d); R 为相关系数, R^2 = 0.987.

对式(15)进行求导,得

y' = 0.001 t^4 - 0.039 2t^3 + 0.535 5t^2 - 2.947 6t + 5.262 9.

令 T = t - 9.8, 则上式转化为

y' = 0.001 T^4 - 0.576 2T^2 + 0.018 7T + 0.134 8. (16)

令 Y' = y' / (4 × 0.001), 将式(16) 变换为尖点突变的 标准形式为

Y' = 1/4 T^4 - 1/2 × 288.1 T^2 + 4.675 T + 33.7. (17)

尖点突变模型判断系统失稳或突变的依据为分叉集方程,即突变特征值 Δ = 4u^3 + 27v^2. 突变判别法则为 Δ ≤ 0, 围岩失稳; Δ > 0, 围岩稳定.

将式(17) 与尖点突变模型标准形式对照,得到状态变量 u = -288.1, v = 4.657, 因此,可得围岩系统突变特征值为

Δ = 4 × (-288.1)^3 + 27 × 4.675^2 = -95 650 465.262 < 0.

由此可见,马鞍山隧道右洞会发生塌方,与实际情况相吻合.说明基于地表沉降监测数据进行多项式拟合,运用突变理论预测浅埋隧道松散围岩塌方是合理的、符合实际的.

4 结 语

基于突变理论,建立了降雨条件下浅埋隧道围岩为不同岩土介质组合时塌方的尖点突变模型,分别推导出双层应变软化介质和单层应变软化与应变硬化介质组合的塌方判据,分析围岩失稳破坏机理,提出合理的工程预防措施.并针对浅埋隧道塌方特点,进行地表沉降与拱顶下沉的相关性分析,提出基于地表沉降监测数据,运用尖点突变理论进行塌方预测的思路,经马鞍山隧道塌方具体工程案例证明其合理性和有效性.建立的塌方判据和预测方法可为浅埋隧道松散围岩塌方

的预防和预测提供参考依据。

参考文献:

- [1] 刘清芳. 膨胀土堑坡雨季失稳的突变模型[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2009, 28(2): 255 - 258.
- [2] QIN Si-qing, WANG Si-jing. A cusp catastrophe model of instability of slip-buckling slope [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(2): 119 - 134.
- [3] 许建聪, 尚岳全, 郑束宁, 等. 强降雨作用下浅层滑坡尖点突变模型研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(11): 1676 - 1679.
- [4] MIAO T D. Landslide analysis and prediction by catastrophe theory[J]. Proc 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 1988, 26(3/4): 731 - 733.
- [5] QIN Siqing, JIAO J J, WANG Sijing, *et al.* A nonlinear catastrophe model of instability of planar-slip slope and chaotic dynamical mechanisms of its evolutionary process [J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(44/45): 8093 - 8109.
- [6] 费鸿禄, 徐小荷, 唐春安. 地下硐室岩爆的突变理论研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 29 - 33.
- [7] PAN Yue, LI Aiwu, QI Yunsong. Fold catastrophe model of dynamic pillar failure in asymmetric mining [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(1): 49 - 57.
- [8] ZHANG Tianjun, REN Shuxin, LI Shugang, *et al.* Application of the catastrophe progression method in predicting coal and gas outburst [J]. Mining Science and Technology, 2009, 19(4): 430 - 434.
- [9] 闫长斌, 徐国元. 基于突变理论深埋硬岩隧道的失稳分析[J]. 工程地质学报, 2006, 14(4): 508 - 512.
- [10] 刘春, 易俊, 姜德义, 等. 深埋隧道围岩突变失稳风险预测[J]. 中国矿业, 2008, 17(3): 93 - 95.
- [11] 王心飞, 王文广, 刘新荣, 等. 隧道围岩失稳的突变理论分析[J]. 地下空间与工程学报, 2008, 4(3): 425 - 430.
- [12] YAN Changbin, XU Guoyuan, ZUO Yujun. Destabilization analysis of overlapping underground chambers induced by blasting vibration with catastrophe theory[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(3): 735 - 740.
- [13] 许建聪. 隧道围岩 - 初支系统灰色突变失稳预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1181 - 1187.
- [14] 刘贵应, 刘新喜, 魏新颜. 隧道塌方的尖点突变模型及应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(2): 14 - 16, 26.
- [15] ALESSO H P. Elementary catastrophe theory modeling of duffing's equation for seismic excitation of nuclear power facilities[J]. Nuclear Engineering and Design, 1979, 52(1): 145 - 155.
- [16] LIU Dingwen, WANG Jingyao, WANG Yongjuan. Application of catastrophe theory in earthquake hazard assessment and earthquake prediction research [J]. Tectonophysics, 1989, 167(2): 179 - 186.
- [17] 徐曾和, 徐小荷. 考虑围岩流变特性的地震尖点型突变模型[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 24 - 27.
- [18] YIN Youquan, DU Jing. A swallow-tail type catastrophic model of earthquake process [J]. Acta Seismologica Sinica, 1994, 7(4): 521 - 528.
- [19] 何平, 赵子都. 突变理论及其应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989.
- [20] 王迎超. 山岭隧道塌方机制及防灾方法[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2010.
- [21] 傅鹤林, 彭思甜, 韩汝才, 等. 岩土工程数值分析新方法[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2006.
- [22] 秦四清, 王思敬, 孙强, 等. 非线性岩土力学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- [23] 黄俊, 张顶立. 软土隧道拱顶与地表沉降关系研究[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(1): 36 - 40.

(编辑 刘 彤)