

文章编号:1671-8879(2009)01-0036-05

泥石流与公路路基相互作用的耦合数值仿真

杨三强¹, 黄 勇², 陈洪凯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. 新疆交通
科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘 要:泥石流是天山公路的主要地质灾害之一。基于泥石流损毁路段的调查, 结合泥石流对公路路基的冲蚀以及泥石流流体本身的运动特性, 建立了新疆天山公路泥石流路基耦合数学方程和物理模型, 通过数值仿真软件, 对泥石流与防治结构之间的耦合作用进行仿真分析。结果表明:耦合作用受到泥石流规模的制约;路基最易破坏位置为泥石流直接冲击位置。

关键词:道路工程; 天山公路; 泥石流路段; 路基; 耦合数值

中图分类号:U416.165

文献标志码:A

Numerical coupling simulation for interaction of mud-rock flow and highway subgrade

YANG San-qiang¹, HUANG Yong², CHEN Hong-kai³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Xinjiang Science Research Institute of Communications, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The mud-rock flow is the main geological disasters to the highway at Tianshan area. Through the investigation of damaged road segment by mud-rock flow, the characteristics of mud-rock flow and the interaction of mud-rock flow with highway subgrade are analyzed, the numerical coupling model of the interaction is developed, the coupling interaction of mud-rock flow and prevention structure is simulated by numerical simulating software. The results show that the coupling interaction is restricted by the scale of mud-rock flow, and the most likely location of the damaged subgrade is the section that is directly faced the mud-rock flow. 1 tab, 12 figs, 5 refs.

Key words: road engineering; Tianshan highway; road segment of debris flow; roadbed; connection match number

0 引 言

近年来,随着中国西部地区公路改扩建力度不

断加大,公路边坡滑塌、泥石流病害频繁发生,危及行车安全和路基稳定性。因此,开展公路泥石流路基耦合数值仿真研究,对于探讨泥石流对路基的影

收稿日期:2008-02-08

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2004 318 000 03)

作者简介:杨三强(1980-),男,陕西西安人,工学博士研究生,E-mail:ysq0999@163.com。

响有着重要的意义。中国学者将公路穿越泥石流沟的方式,归纳为直接横向穿越和间接横向穿越两类。间接横向穿越主要指公路沿着泥石流沟通行一定距离后,在适当位置横向穿越。在泥石流沟岸建造的公路也称沿溪公路^[1-2],在泥石流爆发期间极易被毁损。相关资料表明,国内外专家较少探讨间接横向穿对越路基损毁模式的影响。为此,本文选取新疆天山公路部分典型泥石流进行分析,研究间接横向穿越的路基毁损模式^[3-5]。

1 路基的泥石流冲蚀演绎机理

泥石流对路基的冲蚀主要体现在泥石流沟的弯道凹岸部位,可用地貌学方法分析路基冲蚀演绎机理。固-液二相泥石流流体对路基不仅有冲击作用,还伴随着冲刷破坏。泥石流流体中的固相物质对路基除了冲击作用外,还有明显的掏挖磨蚀作用。对于特定的泥石流沟,一定频率的泥石流所形成的冲蚀能量沿着泥石流沟是基本恒定的,则路基的冲蚀模式主要受控于路基自身抗蚀能力。

路基在泥石流作用下,呈现出冲蚀→坍塌→后退的宏观链式演绎过程。其中,冲蚀阶段和后退阶段具有渐变性,而坍塌阶段具有突变性。在路基的每次坍塌形成过程中,多数情况是一次或几次泥石流活动的直接结果,可称之为路基冲蚀的微观演绎过程。本文对路基泥石流冲蚀演绎机理的探讨,主要针对微观演绎过程,可分为以下4个阶段。

(1)冲蚀槽形成阶段(图1)。泥石流沟路基体中下部在泥石流停息时期,通常处于河流或溪流流水浸泡及冲刷过程中,岩土体强度通常较低,局部地方已形成向路基内部凹陷的空腔,称为初始冲蚀槽。

(2)泥石流顶托底部拉裂阶段(图2)。路基内初始冲蚀槽在泥石流活动期间逐渐扩大时,由于高速运动的泥石流流体强烈楔入初始冲蚀槽,泥石流流体继续冲刷冲蚀槽内壁,并使槽向路基内部逐渐增大;泥石流流体的竖向动力 P 膨胀,对槽上部逐渐突出的路基岩土体(成为悬岸)产生向上的顶托力。

(3)自重顶部拉裂变形阶段(图3)。当初始冲蚀槽发展到一定程度时,路基悬岸演绎到临界变形阶段。在自重作用下,悬岸岩土体顶部变形加剧,出现拉裂缝,尤其是公路位于悬岸顶部时,车辆及人畜等荷载加剧了悬岸拉裂变形进程。

(4)坍塌阶段(图4)。当悬岸顶部及底部拉裂缝逐渐扩展至一定程度时,悬岸体处于失稳阶段而突然发生坍塌。

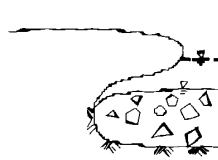


图1 冲蚀槽形成阶段

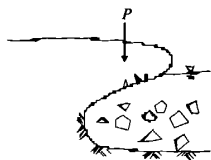


图2 泥石流顶托底部拉裂阶段

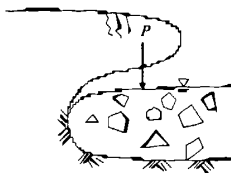


图3 自重顶部拉裂变形阶段

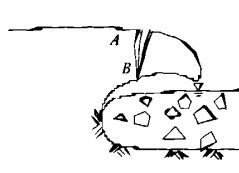


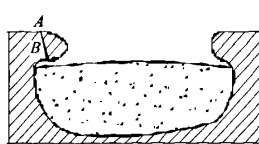
图4 坍塌阶段

路基演绎的4个阶段中,核心是悬岸的产生及失稳。对于路基坍塌阶段,需要经过泥石流顶托底部拉裂阶段和自重顶部拉裂变形阶段的多次重复,每次重复均导致悬岸的变形增大、强度衰减。

2 泥石流路段路基模型

2.1 泥石流物理模型

通过对天山公路K630处泥石流沟流通区的观察,悬岸坍塌失稳均在泥石流爆发期间。路基发生坍塌时,路基冲蚀槽多数均未被泥石流流体完全填满,坍塌主要是在泥石流强烈的动力作用下突然失稳。泥石流流体沿冲蚀槽内快速流动时,产生强烈冲击力和向下吸力,增加荷载效应,减小了悬岸岩土体的刚度,诱发悬岸体坍塌。路基冲蚀动力效应的物理模型见图5,其中A为临空上表面;B为临空下表面。



(a) 模型断面



(b) 模型效果

图5 K630处泥石流物理模型

2.2 泥石流路段路基力学模型

经过对泥石流物理模型的分析,将其简化为如图6(见下页)所示的力学模型。在力学模型中,路基下部受到泥石流浆体的连续冲击,可视为受到一个长期均布荷载 Q_2 ;路基受到泥石流浆体的掏挖,使得路基上部形成悬岸,其自重应力为 G ;泥石流浆体面下降对上部受力路基有卸荷作用力 P_1 ;在垂直于截面方向,泥石流流体冲刷中对路基存在拖曳力 T 。

根据泥石流流体力学模型,建立泥石流-路基耦合数学模型,并采用有限元法进行数值仿真,最终得到

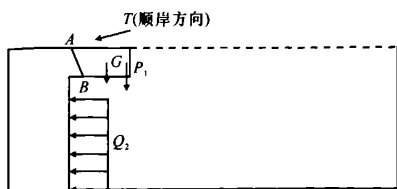


图6 泥石流力学模型

泥石流与路基耦合作用的结果。

2.3 泥石流路段路基耦合数学模型

2.3.1 简化为高雷诺数紊流

在雷诺平均方程中的不封闭量是雷诺应力,因此,必须建立足够的雷诺方程应力方程组,使得平均运动方程可解。雷诺平均方程为

$$\frac{\partial u_h}{\partial t} + (u_v) \frac{\partial u_h}{\partial x_v} + u_v \frac{\partial (u_h)}{\partial x_v} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_h} + v \frac{\partial^2 u_h}{\partial x_v \partial x_h} - \frac{\partial}{\partial x_v} [u_h u_v - (u_h)(u_v)] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (u_v) \frac{\partial \theta}{\partial x_v} = -u_v \frac{\partial (\theta)}{\partial x_v} + k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_v \partial x_h} - \frac{\partial (u_v)(\theta)}{\partial x_v} \quad (2)$$

式中: u_h 、 u_v 分别为水平与垂直流速场; (u_h) 、 (u_v) 分别为水平与垂直平均流速场; θ 为标量场; (θ) 为平均标量场; x_h 、 x_v 分别为水平与垂直运动位移; t 为运动时间; ρ 为流体密度; p 为压力梯度; v 为流体速度。

2.3.2 $k-\epsilon$ 模型

$k-\epsilon$ 模型是在涡粘基础上发展起来的,它与代数模式的主要区别是, $k-\epsilon$ 模型的涡粘系数包含部分历史效应。具体来说,其涡粘系数与紊流动能及紊动能耗散联系在一起。用量纲分析,涡粘系数 ν_t 为

$$\nu_t = C_p k^2 / \epsilon \quad (3)$$

式中: C_p 为量纲一的系数; ϵ 为紊流动能的系数; k 为耗散率。

在 $k-\epsilon$ 模型中,紊流动能运输方程为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (u_k) \frac{\partial k}{\partial x_k} = - (u'_h u'_k) \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\frac{p' u'_k}{\rho} + k' u'_k - v \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] - v \left(\frac{\partial u'_h}{\partial x_k} \frac{\partial u'_h}{\partial x_k} \right) \quad (4)$$

式中: u_k 为耗散率流速场; u'_k 为耗散率能涡特征速度; u'_h 为水平能涡特征速度; x_k 为耗散率下位移; p' 为能涡压力梯度; k' 为能涡耗散率; (u_k) 为耗散率平均流速场。

式(4)中,右端第一项为生成项,第二项为扩散项,第三项为紊动能耗散率。三项结合的 $k-\epsilon$ 封闭方程为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (u_k) \frac{\partial k}{\partial x_k} = 2\nu_t(S) \frac{\partial (u_h)}{\partial x_v} - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right] - \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + (u_k) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left[2\nu_t(S) \frac{\partial (u_h)}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(v + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right] - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: (S) 为紊流动能合成位移平均值; σ_k 为应力耗散率的耗散项; σ_ϵ 为应力紊流动能耗散项; $C_{\epsilon 1}$ 为紊流动能生成项耗散系数; $C_{\epsilon 2}$ 为紊流动能消耗项耗散系数。

3 泥石流路段路基耦合方程

3.1 运动学和动力学条件

固体、流体耦合问题最基本条件是运动学条件(位移协调条件)和动力学条件(牵引力方程),即有

$$d_s = d_f, \quad \tau_s = \tau_f \quad (7)$$

式中: d_s 、 d_f 分别为固体、流体的位移(m); τ_s 、 τ_f 分别为固体、流体的应力(Pa); n 为微小单元个数。

根据运动学条件,得出流体速度 v 为

$$v = d_s \quad (\text{非滑移条件}) \quad (8)$$

$$nv = nd_s \quad (\text{滑移条件}) \quad (9)$$

根据动力学条件,流体、固体接触面上流体张力与流体压力有密切联系,并且作用于结构节点,即

$$F(t) = \int h^d \tau_f ds \quad (10)$$

式中: $F(t)$ 为动力函数; h^d 为固体实际位移值(m)。

3.2 有限单元流-固耦合方程

假定耦合系统中计算矢量 $\mathbf{X} = (\mathbf{X}_f, \mathbf{X}_s)$, 其中 \mathbf{X}_f 、 \mathbf{X}_s 为流体、固体域节点相对应的计算矢量,有

$$d_s = d_s(\mathbf{X}_s), \quad \tau_f = \tau_f(\mathbf{X}_f) \quad (11)$$

则有限单元流-固耦合方程可表示为

$$F(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} F_f(\mathbf{X}_f, d_s(\mathbf{X}_s)) \\ F_s(\mathbf{X}_s, \tau_f(\mathbf{X}_f)) \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

式中: 函数 F_f 与 G_f 为对应的耦合方程; 函数 F_s 与 G_s 为对应的耦合方程; G_f 、 G_s 分别为流体和固体耦合方程。

独立的流体方程 $F_f(\mathbf{X}_s, 0)$ 和固体方程 $F_f(\mathbf{X}_f, 0)$ 为

$$F_f(\mathbf{X}_s, 0) = 0, \quad F_f(\mathbf{X}_f, 0) = 0 \quad (13)$$

由于流体方程总是非线性的, 因此, 式(13)也是描述非线性系统的。在不考虑固体模型是否线性的情况下, 在特定的时间段, 程序自动求出迭代解。无论是流体还是固体, 时间积分必须一致。尽管耦合

模型中固体域和流体域分别采用了不同的坐标系,但两个系统在耦合界面上都采用 Lagrangian 坐标系。因此,在耦合面上两系统存在一致性。

3.3 泥石流路段路基模型的假定

(1) 将泥石流视为单一流体模型。即将流体、固体两相视作单一混合物,且为有旋、粘性、连续、不可压缩为均质的流体。

(2) 假定泥石流流体与路基相互作用过程中,路基和泥石流均是各向同性。

(3) 将泥石流在一定边界条件下对路基的作用视为高密度、高雷诺紊流作用于路基。

(4) 将路基土体以莫尔-库仑模型、流体部分以 $k-\epsilon$ 湍流模型作为基础进行数值仿真。

3.4 边界条件简化

泥石流与防治结构流-固耦合系统中,其界面通常为流体界面(包括自由界面和流-固耦合界面)。

图 7 中,CD、DE、EF 线段为流-固耦合界面,FG 线段为流体的自由界面,定义 CD 线段为固定段。路基中的河道是承受泥石流冲击的关键部位。在数值仿真中,主要仿真路基与泥石流之间的耦合作用。取路基侧墙部分的某一断面进行分析,假定侧墙高为 2.0 m,底宽为 3.0 m,泥石流体设计泥深为 1.5 m。分别对断面和泥石流建模。

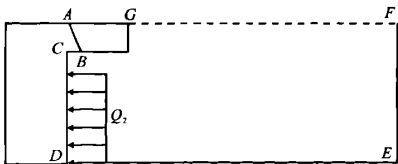


图 7 流-固耦合界面

由于泥石流分为稀性和粘性两种类型,因而在数值仿真中应分别对其进行仿真,并对两种泥石流与路基的耦合作用进行分类比较。

该模型中各项主控参数见表 1,计算中考虑到泥石流的爆发一般历时较短且具有突发性,泥石流流体(稀性)最大冲击速度为 8 m/s,粘度为 5 MPa/s。所以取路基受到泥石流冲击、掏挖后便可进行数值仿真。

表 1 数值仿真的参数取值

类 型	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘度/ ($\text{MPa} \cdot \text{s}$)	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	弹性模量/ GPa	泊松比
泥石流(稀性)	12	5.0	8		
泥石流(粘性)	22	12.0	3		
路基	20			2.85	0.163

3.4.1 网格划分

对流体域进行划分,并定义流体、固体接合面和流体域传递给固体域的荷载(图 8、图 9)。

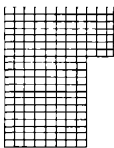


图 8 固体域网格划分

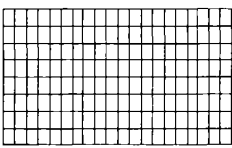


图 9 流体域网格划分

3.4.2 耦合计算

通过计算,在 130 个时间步内,流体域出现了 3 个高峰的矢量,在第 3 次冲击路基时达到最大,其过程见图 10。

3.4.3 数值仿真分析

以粘性和稀性泥石流作为仿真对象,与路基进行耦合,得到数值仿真图(图 11、图 12,见下页)。

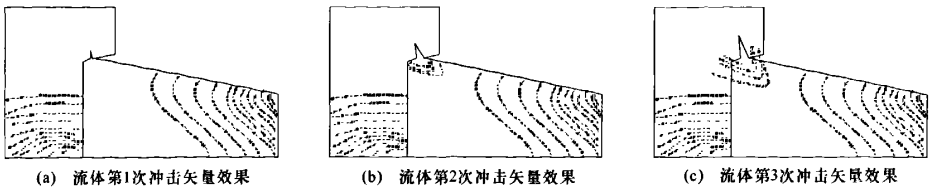


图 10 二维流-固耦合矢量

由图 11、图 12 可知:①路基与稀性泥石流和粘性泥石流耦合过程中,路基在 B、C 点受到的应力集中,C 点最为集中,因而在泥石流的持续冲击下,路基会出现裂纹并向上延伸,与 B 点延伸裂纹在路基顶部处贯通,最终导致路基崩塌,表明了路基在泥石流冲击下的冲蚀演绎机理;②水平最大正应力位于侧墙墙角 C 和 C' 处,最大负应力位于离墙底 B 和

B' 处(B'、C' 为同轴线 B、C 的对称点),在路基耦合的作用中,稀性泥石流相对粘性泥石流对路基的作用较小;③泥石流-路基耦合数值仿真中,流体的作用是根据时间逐渐递增,随着时间的递增,应力值随泥石流冲击作用的增强而增大,并且在泥石流流速达到最大时应力值最大,这与路基最易在泥石流冲击过程中毁损也是一致的。

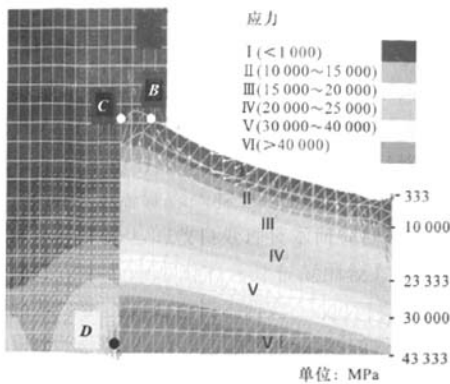


图 11 粘性泥石流与路基耦合作用的数值仿真

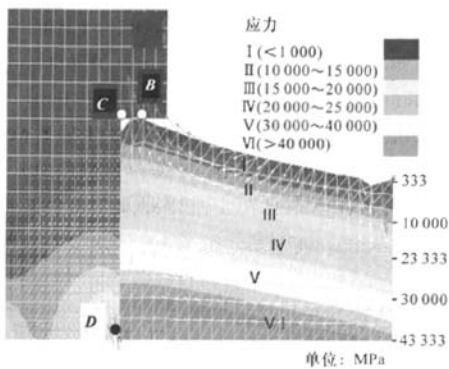


图 12 稀性泥石流与路基耦合作用的数值仿真

由以上分析可以看出,路基在泥石流的冲击下,其位移场和应力场的变化趋势基本一致,且发生最大水平位移时应力也达到最大。因此,在设置防治结构时,要特别注意结合实际情况及泥石流发生的规模,在泥石流正常泥深浮动范围内,提高防治结构的抗冲击能力或采取必要的消能措施。

4 结 语

(1)泥石流流体与防治结构之间的耦合作用受到泥石流规模的制约,这种耦合作用可从两者的动力学耦合关系、动力学耦合过程以及动力学耦合机制 3 个方面体现,而两者之间的耦合作用主要表现在动力作用上。

(2)仿真分析了泥石流流体与防治结构间的耦合作用,由得到的位移场和应力场可看出,悬岸在泥石

流的冲击、掏挖和磨蚀下,后部裂纹不断加深直至贯通过程与实际的悬岸崩塌相吻合。泥石流流体对路基的毁损主要发生在泥石流流体的正常泥深浮动范围内,即路基受泥石流直接冲击的部位最易损坏。

(3)根据数值仿真的结果可看出,泥石流沿河流爆发时,对路基顶面公路的威胁和影响巨大,天山公路 K630 爆发泥石流对公路损毁的实际情况也验证了这一点。因此,在防治结构上应相应的加强路基结构的强度,以确保在泥石流爆发的情况下公路损毁程度最少。

参考文献:

References:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,叶四桥.中国公路泥石流研究[J].中国地质灾害与防治学报,2008,19(1):1-5.
CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, YE Si-qiao. Study on debris flows along highways in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2008, 19(1): 1-5.
- [2] 陈洪凯,唐红梅,马永泰,等.公路泥石流研究及治理[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [3] 陈洪凯,唐红梅.泥石流两相冲击力及冲击时间计算方法[J].中国公路学报,2006,19(3):19-23.
CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei. Method to calculate impact force and impact time of two-phase debris flow[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 19-23.
- [4] 彭小云,叶万军,折学森,等.黄土沟壑区湿软路基沉降预测模型[J].交通运输工程学报,2007,7(2):70-75.
PENG Xiao-yun, YE Wan-jun, SHE Xue-sen, et al. Settlement prediction model of wettest-soft loess subgrade in ravine regions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 70-75.
- [5] 郑书彦,李占斌.公路滑坡侵蚀运动过程的仿真分析[J].长安大学学报:自然科学版,2007,27(2):21-25.
ZHENG Shu-yan, LI Zhan-bin. Simulation on moving process of landslide erosion in highway[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(2): 21-25.