

# 泥石流淤埋桥梁后的毁损机制分析

钟 盈, 陈洪凯

(重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074)

**摘要:** 穿越泥石流沟的公路桥梁、路基路面及相应防护结构极易被泥石流冲击及淤埋毁损。基于泥石流两相流模型, 以被泥石流淤埋的桥梁为研究对象, 分析了新近泥石流沉积物流变固结的机理, 并且推导了泥石流沉积物流变固结的力学公式, 最后结合数值模拟软件进行现场实例分析, 进一步验证了泥石流淤埋毁损桥梁的力学机制, 为公路工程人员防治泥石流灾害提供了重要依据。

**关键词:** 泥石流沉积物; 流变固结; 力学机理; 淤埋毁损

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)05-667-03

## Destroyed Mechanism Analysis of Bridge Buried by Debris Flow

ZHONG Ying, CHEN Hong-kai

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract** Highway bridges, pavements and corresponding protective structures, which are crossing debris flow ditches, are very easy to be buried and destroyed by debris flow. Taking the bridge buried by debris flow as the research object, the mechanism of debris flow's rheological consolidation which deposits recently is analyzed on the basis of debris flow two-phase flow model. And then the mechanical formula of debris flow rheological consolidation is deduced. Finally, numerical simulation software is used to make an on-site case analysis, which further validates the mechanical mechanism that debris flow buries and destroys bridges. The results provide important references for engineers to control debris flow hazards.

**Key words** debris flow deposit; rheological consolidation; mechanical mechanism; burying and destroying

对于山区公路而言, 穿越泥石流沟的公路桥梁、路基路面及相应防护结构极易被泥石流冲击及淤埋毁损。陈洪凯<sup>[1-4]</sup>基于多年的现场科学考察研究发现, 许多公路桥梁不是被突然暴发的泥石流所冲击毁坏, 而是在被泥石流淤埋一年以后发生毁损破坏, 他认为此种现象发生的根本原因是覆盖在桥梁上的新近泥石流沉积物随着时间的推移发生流变固结, 产生显著的附加应力, 进而使桥梁结构发生渐进性破坏。因此, 不同于以往的国内外学者如王裕宜<sup>[5-7]</sup>、Major<sup>[8-9]</sup>、Ghilardi<sup>[10]</sup>、Donald<sup>[11]</sup>等以运动的泥石流流体, 尤其是浆体的流变性质为研究对象, 着重探讨固相颗粒级配与黏粒含量对浆体流变性质的影响, 笔者主要研究静止的黏性泥石流沉积物的流变性质, 特别是研究泥石流沉积物在流变固结过程中的力学效应, 并推导出相应的流变固结方程, 这对进一步完善泥石流流变学理论和实际的泥石流灾害防治工程应用具有重要的参考价值。

## 1 沉积物流变固结机理分析

将泥石流流体作为两相流体来考虑, 即认为泥石流流体是由均质浆体 (水和细颗粒泥沙掺混而成的) 和固体 (泥石流流体中较粗的泥沙颗粒) 两部分组成。泥石流流体停积后, 从外观上看, 其堆积物的形成主要是失水和干涸过程。实际上, 泥石流沉积物固结开始时, 泥石流沉积物的浆体是饱和的。随着水分的蒸发和风化作用, 泥石流沉积物表层由饱和变为非饱和, 并且由液相浆体变为黏土体, 逐渐在表面形成一层硬壳。而沉积物内部仍然是饱和的, 它们之间有一个明显的分界面; 并且, 非饱和区中由于失水收缩, 在沉积物表面将产生追踪裂隙, 而且沉积物的体积有所减小, 这个减小的体积可以近似认为是浆体失水的体积。随着时间的继续, 沉积物的饱和浆体不断转变为非饱和土体, 并最终使泥石流沉积物的浆体全部由饱和状态变为非饱和状态, 完全干涸收缩为土体, 固结过程结束<sup>[12-16]</sup>。

收稿日期: 2010-04-06 修订日期: 2010-06-02

基金项目: 中国博士后科学基金特别资助项目 (20090228 20080430095)

作者简介: 钟 盈 (1985-), 女, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事公路泥石流灾害研究。E-mail: 608457@163.com

## 2 沉积物流变固结方程

### 2.1 基本假定

1) 在固结过程中, 固相颗粒等效为粒径大小相同的球体, 其相对位置不变而绝对位置要变。仅考虑一维的情况, 即在竖直方向, 固相的颗粒的个数是不变的。

2) 固结过程中, 沉积物减少的体积即为均质浆体失水的体积, 浆体由饱和状态到非饱和状态, 浆体的黏滞系数逐渐增大。

3) 方程推导过程中仅考虑一维的情况, 即只考虑在竖直方向上的变化。

4) 随着孔隙水的消散, 泥石流浆体的颗粒质量没有损失。

### 2.2 方程的推导

取单位面积的泥石流沉积物为研究对象, 其固结沉降模型如图 1。

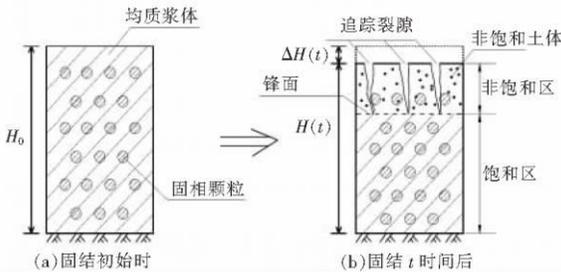


图 1 泥石流沉积物固结沉降

Fig 1 Debris flow sediment and consolidation diagram

对于大面积泥石流沉积物堆场而言, 其水平方向的长度与垂直深度相比是很大的, 可视为一维固结。也就是说, 单位面积沉积体的体积变化与其高度变化相等, 即单元体减小的高度  $\Delta H(t)$  为:

$$\Delta H(t) = H_0 - H(t) \tag{1}$$

则泥石流沉积物浆体单位长度沉降量:

$$\eta = \frac{\Delta H(t)}{H_0} = \rho \frac{W_1 - W_2}{1 + W_1} \tag{2}$$

式中:  $\rho$  为均质浆体初始时刻的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $W_1$  为均质浆体初始时刻的含水量;  $W_2$  为均质浆体固结某一时刻的含水量。

当泥石流沉积物固结进行到某一时刻时, 仍取单位面积的泥石流沉积体进行受力分析。研究体受到固相颗粒和液相浆体的重力作用, 而研究体的饱和与非饱和界面上作用着基质吸力  $S$ , 单元体的受力示意如图 2。

1) 泥石流沉积物固相颗粒的重力  $G_{固}$  根据假定, 可以推出:

$$G_{固} = H_0 \alpha \gamma_{固} \tag{3}$$

式中:  $\gamma_{固}$  为固相颗粒的重度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $\alpha$  为泥石流沉积物固结初始时刻, 泥石流固相颗粒的固相比。

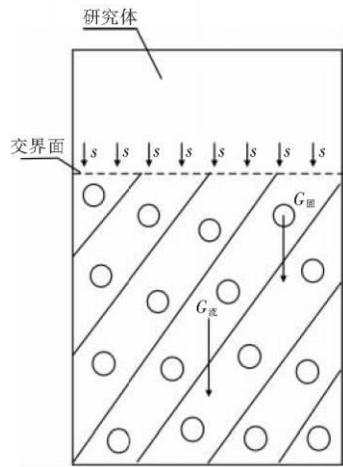


图 2 固结某一时刻研究体受力

Fig 2 Force diagram of research body at some time in consolidation

2) 泥石流沉积物单元体液相浆体的重力  $G_{液}$  如式 (4):

$$G_{液} = G_0 - \Delta H(t) \gamma_w = H_0 (1 - \alpha) \gamma_w - \rho \frac{(W_1 - W_2) H_0}{1 + W_1} \gamma_w \tag{4}$$

式中:  $G_0$  为固结初始时刻均质浆体的初始重力,  $\text{kN}$ ;  $\gamma_w$  为固结初始时刻均质浆体的初始重度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $\gamma_w$  为水的重度, 取其值为  $10 \text{ kN/m}^3$ 。

### 3) 基质吸力 $S$

泥石流沉积物在流变固结过程中, 随着沉积物固结的延续, 沉积体表面将产生追踪裂隙, 空气进入沉积体, 孔隙内形成气水界面, 随着固结的发展, 气水界面也随着发展, 形成弯液面, 导致产生毛细现象, 其基质吸力也越来越大。如果把孔隙中的弯液面看做圆管中的弯液面, 则基质吸力为作用于弯液面周边上的表面张力的合力与周边在垂直于合力的表面上的投影曲线所围成的面积之商<sup>[17]</sup>:

$$S = u_a - u_w = \frac{\beta \pi D}{\pi D^3} = \frac{4\beta}{D} \tag{5}$$

式中:  $u_a$  为孔隙气压力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $u_w$  为孔隙水压力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $\beta$  为水的表面张力系数,  $\beta = 0.073 \text{ N/m}$ ;  $D$  为孔隙的平均直径,  $\text{m}$ 。

### 4) 固结力学平衡方程

在单位面积的研究体中, 仅考虑竖向一维的情况, 则固结初所产生的压力:

$$F_0 = G_{固} + G_0 \tag{6}$$

固结时刻为  $t$  时所产生的压力:

$$F(t) = G_{固} + G_{液} + S \tag{7}$$

固结过程中产生的压力增量, 即固结力:

$$f = G_{液} + S - G_0 = \frac{4\beta}{D} - H_0 \frac{\rho (W_1 - W_2)}{1 + W_1} \gamma_w \tag{8}$$

### 3 模型试验分析

取西部地区一小型简支梁桥为研究对象, 并按照 1: 20 的比例进行缩小, 得到桥梁模型为: 桥跨径 0.8 m, 桥宽 0.1 m, 简支梁板桥厚 0.04 m, 整个桥模由 C20 混凝土预制, 桥梁淤埋模型如图 3。采用数值模拟和理论公式计算 2 种方法相结合的手段对桥梁受力进行分析。

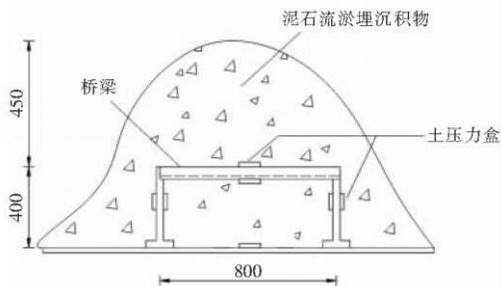
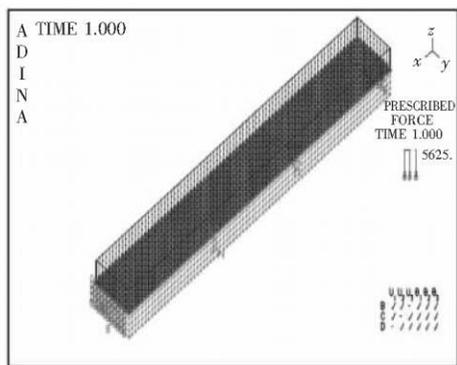


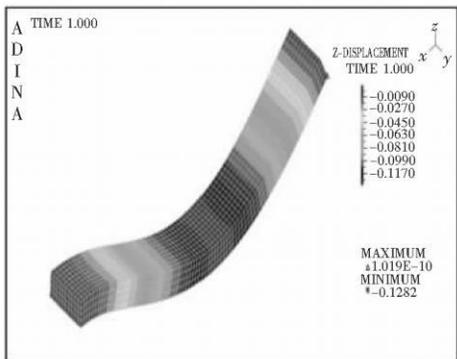
图 3 桥梁淤埋模型 (单位: mm)

Fig 3 Silt-buried bridge model

在无外荷载作用下, 泥石流沉积物在自身重力作用下产生流变固结。取固结 120 h 后的泥石流体为研究对象, 用式 (6)、式 (7) 分别计算得: 固结开始前, 泥石流流体对桥梁的压力为 5.625 kN; 固结 120 h 后, 泥石流流体对桥梁的压力为 7.791 kN, 通过数值模拟对比见图 4。



(a) 泥石流淤埋桥面模型



(b) 固结 120 h 后桥面形变

图 4 泥石流淤埋桥梁后桥面形变

Fig 4 Deck deformation diagram after bridge buried

by debris flow

由分析可知, 被泥石流淤埋的桥梁随着其上部泥石流沉积物流变固结产生的附加应力, 逐渐发生形变。随着固结时间的延长, 泥石流沉积体的含水量在变化, 但其变化率越来越小; 而基质吸力是逐渐增大的, 也就是固结力越来越大, 那么被淤埋的桥梁所承受向下的压力也会不断增大。同时位于桥梁下部的泥石流沉积物也会对桥体产生向上的顶托力, 但是这部分泥石流流体由于自身重力作用会向下滑动而趋于稳定, 对梁下部的顶托作用也就逐渐消失了; 反观位于桥面上部的泥石流浆体稳定后又在后部浆体的作用下继续缓慢沉降, 不断对梁施以向下的压力, 使其形变也相应的不断增强, 当这种变形超过桥梁材料的应变极限时, 桥梁就会发生开裂破坏。

### 4 结 论

在泥石流沉积物流变固结过程中, 确实存在着一个很大的内部附加应力。随着沉积物流变固结的发展, 这个力不断的增大, 最终随着固结的结束而停止变化。当泥石流沉积物固结开始时, 泥石流沉积物的浆体是饱和的, 随着固结的发展, 泥石流沉积物表层由饱和变为非饱和, 而沉积物内部仍然是饱和的, 它们之间有一个交界面。沉积物减小的体积是浆体失水的体积。随着时间的推移, 沉积物中的饱和和浆体不断转变为非饱和黏土体, 当泥石流沉积物的浆体全部由饱和状态变为非饱和状态时, 固结过程结束。

笔者基于单位面积的研究体, 推导了泥石流流变固结过程中的固结力公式。通过公式可以看出, 随着固结时间的发展, 泥石流沉积体的含水量在变化, 而且它的变化率越来越小, 公式后一项数值的增量就较小; 基质吸力是逐渐增大的, 公式前一项数值的增量就较大, 所以固结力是随着固结的发展逐渐增大的。而被泥石流淤埋的桥梁在 1 a 以后发生毁损破坏, 其根本原因是覆盖在桥梁上的新近泥石流沉积物随着时间的推移发生流变固结, 产生显著的附加应力, 进而使桥梁结构发生渐进性形变而最终被破坏。

#### 参考文献:

- [1] 陈洪凯, 唐红梅, 陈野鹰. 公路泥石流流力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 95- 124.
- [2] 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
- [3] 陈洪凯, 唐红梅, 鲜学福. 美姑河流域牛牛坝公路泥石流灾害防治 [J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(3): 18- 22
- [4] 陈洪凯, 舒小红. 泥石流固相在浆体中沉降规律研究 [J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4): 99- 103.

(下转第 673 页)

分别与 ANSYS 解及有限段法<sup>[8]</sup>进行了比较。算例结果表明,本文提出的传递矩阵法计算结果与 ANSYS 解较为接近,可见本文的传递矩阵法是一种稳定、高效率的计算方法。

表 2 应力计算结果比较

Tab 2 Comparison table of stress results /MPa

计算点	跨中截面		中间支座截面	
	本文方法	ANSYS解	本文方法	ANSYS解
1	-0.02434	-0.02191	0.02439	0.02122
2	-0.02551	-0.02500	0.03298	0.03364
3	-0.02979	-0.02955	0.08287	0.08204
4	-0.02649	-0.02622	0.07369	0.07185
5	-0.02387	-0.02434	0.03088	0.03582
6	-0.02348	-0.02372	0.02356	0.02945
7	0.04844	0.04553	-0.13296	-0.10238
8	0.04284	0.04070	-0.05532	-0.05200
9	0.04205	0.03911	-0.04397	-0.04353

表 3 最大应力值计算结果比较

Tab 3 Comparison table of maximum stress results /MPa

截面位置	本文方法	ANSYS解	有限段法
	均布荷载		
跨中截面	-0.02979	-0.02955	-0.02997
中间支座	0.08287	0.08204	0.08551

## 5 结 论

1)笔者运用能量泛函变分法分析曲线梁桥,得到了控制微分方程及边界条件。利用本文推导的初参数方程,可以方便地得到不同支承条件、荷载作用下曲线箱梁剪力滞效应的计算公式。

2)从理论上证明了当曲率中心角趋于 0(或曲

率半径趋于无穷大)时,曲线箱梁剪力滞效应的计算公式将退化为直线箱梁的计算公式;当忽略剪力滞时,退化为初等曲梁的理论解。因此,本文推导的剪力滞效应计算公式具有一般性。

3)算例结果表明,本文方法与 ANSYS 计算结果吻合较好,具有良好的计算效率及稳定性,为求解多跨连续曲线薄壁箱梁剪力滞问题提供了强有力的计算手段。

### 参考文献:

[1] 张士铎,丁芸.变截面悬臂箱梁负剪力滞差分解[J].重庆交通学院学报,1984 3(4): 34- 47

[2] Luo Q Z, Wu Y M, Tang J. Experimental studies on shear lag of box girders [J]. Engineering Structures 2002 (24): 469- 477

[3] 黄剑源,杨元忠.钱塘江二桥变截面箱型连续梁桥剪力滞效应的有限元分析[J].桥梁建设,1994(1): 70- 76

[4] 韦成龙,李斌,曾庆元.变截面连续箱梁桥剪力滞及剪切变形双重效应分析的传递矩阵法[J].工程力学,2008, 25(9): 111- 117.

[5] 李斌,韦成龙,张健,等.双索面槽型宽翼主梁斜拉桥剪力滞效益分析的传递矩阵法[J].湖南理工学院学报,2009, 22(2): 73- 77.

[6] 蔡松柏,程翔云,邵旭东.门型梁剪力滞效益的解析解[J].工程力学,2003 20(5): 82- 86

[7] 罗旗帜.曲线箱梁桥剪力滞效应分析[J].佛山大学学报,1992, 10(2): 46- 55

[8] 罗旗帜.变截面多跨箱梁桥剪力滞效应分析[J].中国公路学报,1998, 11(1): 63- 70

(上接第 669 页)

[5] 王裕宜,费祥俊.自然界泥石流流变模型的探讨[J].科学通报,1999 11(44): 1211- 1215

[6] 王裕宜,詹钱登,邹仁元,等.泥石流浆体屈服应力综合表达式的研究[J].自然灾害学报,1999 8(3): 103- 110.

[7] 王裕宜,费祥俊.黏性泥石流颗粒悬浮机理研究[J].中国科学: E辑,1999 29(4): 372- 377

[8] Major J J. Depositional processes in large-scale debris flow experiments [J]. The Journal of Geology, 1997, 105: 345- 366.

[9] Major J J, Pierson T C. Debris flow rheology: Experimental analysis of fine grained slurries [J]. Water Resources Research, 1992, 28: 841- 857.

[10] Ghilardi P, Natale L, Savi F. Modeling debris flow propagation and deposition [J]. Phys Chem Earth C, 2001, 26(9): 651- 656

[11] Bok C K, Donald R L. Depositional processes of the gravelly debris

flow deposits South Dolomite alluvial fan, Owens Valley, California [J]. Geosciences Journal 2004 2(8): 153- 170

[12] 关明芳.泥石流沉积物流变固结研究[D].重庆:重庆交通大学,2006.

[13] 金德泽,王成雄,严永涛.泥石流危害与防治[J].东北水利水电,2009 27(1): 33- 34.

[14] Richard M I. The physics of debris flows [J]. Reviews of Geophysics 1997, 4(3): 245- 296.

[15] 陈宁生,崔鹏,姚令侃,等.山区道路泥石流工程防治原则与模式[J].中国地质灾害与防治学报,2009, 20(1): 1- 5.

[16] Chen J, He Y P, Wei F Q. Debris flow erosion and deposition in Jiangjia Gully, Yunnan, China [J]. Environmental Geology 2005, 48(6): 771- 777.

[17] 唐大雄,刘佑荣,张文殊,等.工程岩土学[M].北京:地质出版社,1999: 73- 75