

文章编号: 1008-2786-(2015)3-311-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000039

苏坡店沟“7·10”泥石流破坏都汶公路 毛家湾大桥机理

蒋先刚^{1,2} 葛永刚¹ 雷雨^{1,2} 郭朝旭^{1,2}

(1. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室/中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 2013-07-10 四川省汶川县岷江干流沿线群发性泥石流(简称“7·10”泥石流)对都(江堰)汶(川)公路(G213 线)和都汶高速桥梁、路基、隧道造成重大破坏,G213 线和都汶高速共 16 处中断,尤以 G213 线破坏严重。苏坡店沟毛家湾大桥是“7·10”泥石流冲毁桥梁、造成交通中断的典型模式。在野外调查、采样和数据分析的基础上,确定苏坡店“7·10”泥石流的重度 18.5 kN/m^2 、流速 9.3 m/s 、峰值流量 $232.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、剪应力 13.3 kPa 。高速、大流量泥石流沿陡峻的主沟排泄过程中,强烈侵蚀和起动沟床,左侧桥基基础强烈淘蚀悬空,形成 1.65 m 宽的临空面;在泥石流的作用下,桥基沿主沟发生 5 m 位移变形,导致桥梁垮塌,交通中断。经计算,桥墩下部土体支撑面积为 42.8 m^2 ,基底最大压力达 545 kPa ,大于规范规定允许承载力,并且从抗倾覆角度计算也超出了规范要求,处于失稳状态。针对跨越高陡泥石流沟的桥梁,建议加强泥石流沟排导、预设足够的桥下净空高度、增加桥梁防护等措施来减少桥梁的破坏。

关键词: 泥石流;冲刷;桥墩;机理

中图分类号: P642.23,U416.1

文献标志码: A

2013-07-10 左右,四川省汶川县普降暴雨,引发了大量的泥石流(简称“7·10”泥石流)，“5·12”汶川地震后重建的房屋、高速公路、工厂和基础设施在泥石流冲刷和淤埋作用下发生严重破坏。都(江堰)汶(川)公路 G213 线和都汶高速遭受严重损失,造成 16 处破坏,其中 5 处桥梁发生垮塌,3 处桥梁被淹没,3 处隧道口被堵塞,1 处路基被冲毁,7 处路基被淤埋,造成的破坏比汶川地震还要严重^[1]。G213 线的毛家湾大桥受泥石流冲刷而破坏,在泥石流引起的破坏模式中较典型。

毛家湾大桥位于毛家湾隧道南口,横跨苏坡店沟,是毛家湾隧道和都汶公路的连结工程。该桥梁

为重力式桥墩,自重高,体积大,对地基承载力要求高。汶川地震后,该地每年都有山洪和小型泥石流冲出,但无大型泥石流发生。沟口处的桥墩并未受到影响,震后桥梁一直保持正常通车。但“7·10”泥石流暴发后,桥墩受冲刷发生失稳破坏,桥墩向下游方向倾斜,使得桥面移位、变形、断裂、垮塌。

王裕宜^[2]、游勇^[3]、朱兴华^[4]和赵彦波^[5]对泥石流冲刷规律进行了研究,利用野外观测数据或根据室内水槽试验,分析了泥石流的冲刷特征,建立了相应的冲刷深度计算公式。但大都仅限于泥石流纵向冲刷规律的探究,只是分析了纵向冲刷深度的计算方法。到目前为止,对泥石流横向冲刷的研究很

收稿日期(Received date): 2014-06-10; 修回日期(Accepted): 2014-09-05。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金重点项目(41030742); 国家科技支撑计划课题(2012BAK10B04); 灾害风险综合研究计划中国委员会(IRDR-CHINA)资助项目(IRDR2012-Y01)。[Supposed by the National Natural Science Foundation of China(41030742) and National Key Technology R&D Program(2012BAK10B04); Project (Grant No. IRDR2012-Y01) supported by Chinese National Committee for Integrated Research on Disaster Risk (IRDR-CHINA).]

作者简介(Biography): 蒋先刚(1987-),男,博士研究生。从事岩土工程相关研究。[Jiang Xiangang(1987-),Candidate Ph.D.,Specialized in mountain hazards and geotechnical engineering.] Email: jxgjim@163.com

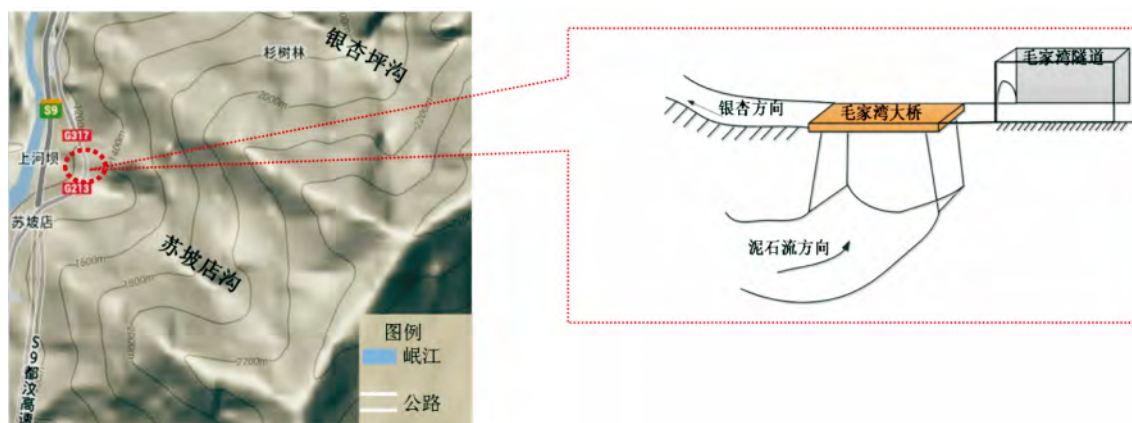


图1 苏坡店沟区域和毛家湾大桥示意图(底图据 Google earth)

Fig. 1 Drainage basins of Supodian Gully and Maojiawan Bridge's site(According Google earth basemap)

少,由于泥石流横向冲刷而导致桥墩失稳的研究更少。文章通过现场调查、样品采集和试验,掌握了当地的地形条件和土体物理特性,分析了高陡坡降泥石流对桥梁破坏模式,对桥墩的失稳原因进行了研究,以期为今后类似跨沟桥梁设计与泥石流防治提供技术支撑。

1 研究区简介

苏坡店沟是岷江左岸的一条泥石流沟,位于银杏乡以北 3.3 km,下游与岷江交汇,沟长 3.29 km,流域面积为 2.84 km²,相对高度 1 633 m,平均沟床比降约为 400‰^[6]。由于地处青藏高原和四川盆地的过渡地段,流域内山势陡峻。被泥石流冲毁的毛家湾大桥长 25 m,宽 8.5 m(图 1)。

苏坡店处于亚热带湿润季风气候区,降雨丰沛,但无气象观测站,给分析苏坡店沟泥石流暴发与降雨关系带来了很大难度。据调查,泥石流大约发生于 7 月 10 日 0 时左右,参考银杏乡站(距苏坡店沟 3.3 km)降雨资料,绘制了降雨曲线(图 2)。7 月 7 日至 9 日持续降雨,到 7 月 9 日 04:00 时小时降雨量最大,约为 22 mm。至 7 月 9 日 23:00 累计降雨量达到 180 mm,日均降雨量约为 80 mm。

2 泥石流特征参数

2.1 泥石流重度

本次泥石流为强降雨激发,堆积扇上颗粒有明显的分选,这与泥石流运动中,细颗粒碰撞前方的粗颗粒,发生动量交换而运动停止或减速有关。表层

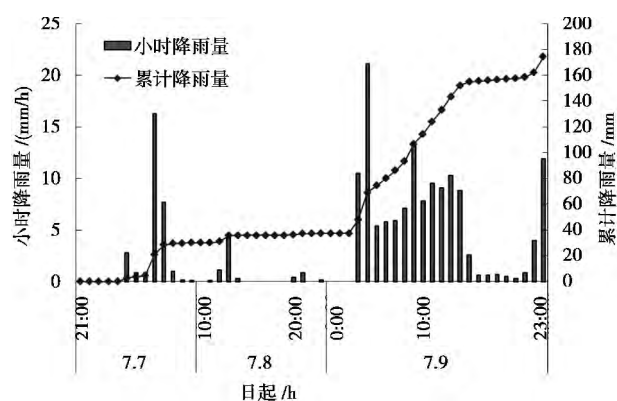


图2 2013-07-07—09 降雨资料

Fig. 2 Rainfall data of meteorological station on July 7 to July 9, 2013

的粗颗粒下有许多细颗粒,按照现有的泥石流分类方法^[7-10],该处泥石流为过渡性泥石流。调查时,在苏坡店沟泥石流堆积扇上取样,由颗粒分布曲线(图 3)根据下列公式(1)^[11]可以计算泥石流重度

$$\gamma_D = \gamma_0 + P_2 P_{05}^{0.35} \gamma_V \quad (1)$$

其中 γ_D 为泥石流重度,单位为 kN/m³; γ_V 为黏性泥石流的最小重度; γ_0 为黏性泥石流的最小重度; P_2 为粒径大于 2 mm 的粗颗粒百分含量; P_{05} 为小于 0.05 mm 的细颗粒百分含量。余斌根据现有的泥石流分类,统计了文献[7-10]中各类型泥石流的重度,发现上述公式中的 γ_V 一般取 19.7 kN/m³, γ_0 一般取 14.8 kN/m³。

经计算,该沟口处泥石流重度 $\gamma_D = 18.5$ kN/m³,根据文献[12]提供的泥石流类型判别方法可判断为过渡性泥石流(表 1)。

2.2 泥石流流速和峰值流量

泥石流的流速还没有成熟的算法,一般采用统

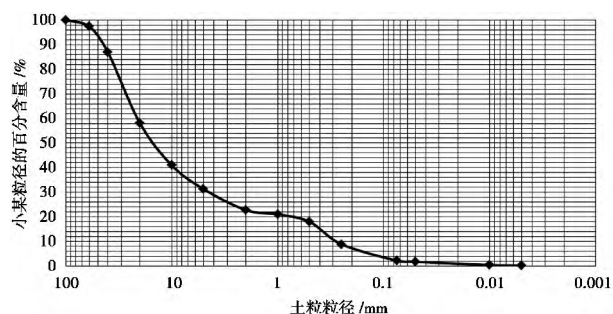


图3 颗粒累计曲线

Fig. 3 Particle analysis curve

表1 泥石流重度计算

Table 1 Calculation of densities of debris flow

$P_2 / \%$	$P_{05} / \%$	γ_0	$\gamma_V / (\text{kN/m}^3)$	$\gamma_D / (\text{kN/m}^3)$
78.2	1.82	14.8	19.7	18.5

计的方法,对某一条沟道根据历次泥石流的观测,利用回归原理,得出适用于泥石流沟的流速计算公式。陈光曦^[13]提出的公式(2),适用于黏性泥石流和过渡性泥石流流速的计算,所以采用该公式计算本次泥石流的流速。

$$U_c = KH_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{5}} \quad (2)$$

式中 U_c 为泥石流流速, m/s ; K 为泥石流的流速系数,因本次泥石流流深小于 2.5 m,故此取 $K=10$; H_c 为泥石流流深,此处取平均值,据现场调查取为 1 m; I_c 为该处泥石流沟床坡度(该沟道段是经人工改造后的沟道,与天然沟道比降不同,有较大差异)。将计算参数带入上式,可得泥石流流速为 9.3 m/s (表 2)。

表2 泥石流流速计算

Table 2 The velocity of debris flow calculation

H_c / m	I_c	$U_c / (\text{m/s})$
1.0	0.707	9.3

经过桥墩处沟道的泥石流历时约为 1 800 s,经过桥墩断面处的泥痕高度起伏较大,最大值约为 2 m,则过桥墩处泥石流峰值流量为流速与泥石流断面面积的乘积,即 $\frac{1}{2} \times 9.3 \times 25 \times 2 = 232.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.3 泥石流的切应力

泥石流切应力是反映泥石流冲刷侵蚀的一个重要参数,根据 Simon 等人的建议^[14],泥石流剪应力根据下式计算

$$\tau = \gamma_D H J \quad (3)$$

式中 τ 为泥石流的切应力, kPa ; γ_D 为泥石流重度, kN/m^3 ; H 为泥石流体的厚度, m ; J 为泥石流的坡降。将泥石流重度和各参数带入式(3),可得剪应力 $\tau = 13.3 \text{ kPa}$ 。泥石流具有如此大的剪应力,使沟道侧岸很容易被冲刷侵蚀,这也是毛家湾大桥失稳的重要原因。

计算参数如表 3 所示。

表3 泥石流剪应力计算

Table 3 The shear stress of debris flow calculation

$\gamma_D / (\text{kN/m}^3)$	H / m	J	$\tau / (\text{kPa})$
18.5	1	0.707	13.3

3 大桥破坏的过程与模式

该处桥梁桥墩间距有 25 m,桥墩为混凝土浇筑,高度 7 m,长 7 m,宽 8.5 m,为重力式桥墩。泥石流发生后,桥墩下沉 1.8 m,沿主沟方向发生 5 m 位移变形,如图 4 所示。以往苏坡店沟虽有泥石流发生,但方量小,持续时间短,并未发生破坏桥梁事故。此次发生的泥石流流速大,重度相对较高,为过渡性泥石流,且作用时间长,高速运动的泥石流具有强烈的冲刷力^[11]。毛家湾隧道口泥石流对沟道的作用主要是纵向冲刷和横向冲刷。桥墩下土体处于泥石流沟口处,无混凝土面板护坡,土体直接暴露,易于泥石流冲刷。泥石流发生后,沟道两岸的土体受到长时间的冲刷,岸坡会横向退缩。但桥墩是混凝土,不易冲刷,桥墩下的土体受到冲刷侵蚀而被泥石流挟带流失后,必然会引起支撑桥墩的地基面积减少。随着桥墩下大量土体被带走,桥墩靠近沟道的下底面无土体支撑,成为临空面。随着临空面的扩展,较大重量的桥墩在自身荷重和桥面荷载作用下,使支撑桥墩的土体处于偏心荷载作用的环境。因此,基底的最大的偏心荷载在此种情况下很大,当最大基底压力大于地基的容许承载力时,桥墩下土体发生破坏,引起桥墩失稳。

4 大桥破坏的力学机理

结合泥石流的冲刷计算和地基承载力理论,对泥石流沟岸的侧向展宽进行了计算,进一步分析了桥墩失稳原因。



图4 泥石流作用下桥梁破坏

Fig. 4 Bridge destroyed after the debris flow

4.1 桥墩下土体冲刷计算

桥墩下为砂砾垫层,是细颗粒土、砂和块石的混合土体,既有一定的粘结性,在水作用下又易分散。在未遇水前,土的强度较高,能够支撑上部较大荷载,然而一遇到水的作用,强度降低幅度较大。下雨后沟道就会产生水流,渗入到沟道侧岸的土体,使侧岸土体水分增多,土体颗粒之间的粘结力减小,土颗粒更易被泥石流携带走。

由于地形的原因,此次泥石流并未对右岸桥墩造成较大危害,所以,以左桥墩为分析对象,研究其失稳原因。毛家湾隧道口桥梁如图5、6所示。

沟岸侧向冲刷长度,按照 Graf^[15] 提出的土壤侵蚀率的计算公式来计算

$$E = k_d (\tau - \tau_c) \quad (4)$$

$$\Delta B = E \cdot t \quad (5)$$

式中 E 为单位时间内沟岸因泥石流横向冲刷而后退的距离, m/s ; k_d 为侵蚀系数, $\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{s})$; τ 为泥石流作用在沟岸上的切应力, kPa ; τ_c 沟岸土体的起动切应力, kPa ; ΔB 为侧向展宽, m ; t 为泥石流作用时间, s 。

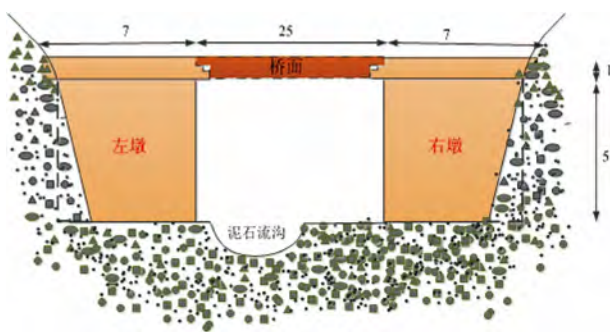


图5 毛家湾隧道口桥梁简图

Fig. 5 Sketch of Mao ji wan bridge

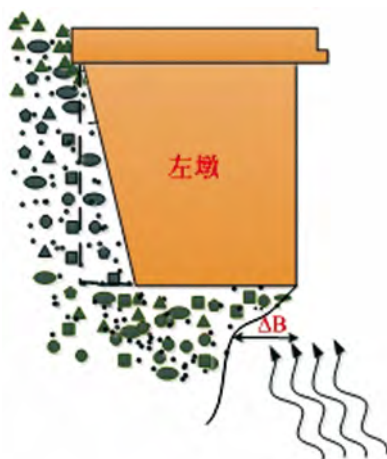


图6 左岸受泥石流冲刷后横向展宽

Fig. 6 Sketch of left channel lateral widening

τ 的计算根据式(3)来确定,关于粗、细颗粒临界起动切应力的计算。唐存本^[16]根据颗粒的受力状态和国内外的试验资料得出了适用于粗、细颗粒的切应力公式,但公式是以河床底部的土颗粒为研究对象,泥石流沟道两岸土颗粒的起动切应力却不尽相同。王新宏^[17]通过调整试验参数,得到了适用于侧岸土颗粒起动的临界切应力计算公式

$$\tau_c = \frac{1}{77.5} [31.36 (\gamma'_s - \gamma) \frac{d}{g} + \frac{k_b}{d}] \quad (6)$$

式中 τ_c 为临界切应力, g/cm^2 ; γ'_s 、 γ_D 分别为侧岸土体的重度和泥石流重度, $\gamma'_s = 19.80 \text{ kN/m}^3$; d 是颗粒粒径,对于该处粗细颗粒都有,取该处土体中值粒径 0.8 cm 为代表粒径; k_b 是常数,根据大量试验统计,一般取 $k_b = 2.84 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$ 。

根据 Chang^[18] 开展的大量包含粗细颗粒的混合土体的试验,得出中值粒径在 0.8 cm 附近时 $k_d = 70 \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{s})$ 。

将以上参数带入式(4)、(5)、(6),可计算得到侧岸被泥石流冲刷而产生的侧向宽度为 1.65 m 。

4.2 桥墩基底承载力和抗倾覆计算

桥墩下土体既受到桥墩自身重量荷载,还受到桥面传递的重量荷载,且该荷载作用线不经过桥墩重心。由于桥墩底面下的承载土体被冲刷,使得桥墩一部分成为临空面,支撑桥墩的地基面积减小。值得关注的是存在临空面情况下桥墩下的基底压力的计算。本文把桥墩分为两部分:直接作用在地基上的1部分和悬空的2部分,如图7所示。根据《混凝土结构设计规范》^[19]和《公路桥涵设计通用规范》^[20]关于混凝土和沥青材料的物理参数,计算得

到桥墩重量约为 9 500 kN,桥面重量约为 2 950 kN。

《公路桥涵地基与基础设计规范》^[21] (JTGD63-2007) 关于桥墩偏心荷载下基底压力的算法

$$\left. \begin{array}{l} p_{\max} \\ p_{\min} \end{array} \right\} = \frac{G_1 + G_2 + F}{A} \pm \frac{F \cdot L_1 + G_2 \cdot L_2}{W} \quad (7)$$

式中 G_1 、 G_2 为桥墩 1、2 部分的重力; F 为桥面对桥墩的作用力。 A 为桥墩下土体受冲刷后,桥墩地面与土体的接触面积,即桥墩 1 部分的底面积, $A = 8.0 \times 5.35 = 42.8 \text{ m}^2$; L_1 、 L_2 分别为 F 、 G_2 到桥墩 1 部分重心的水平距离; W 为桥墩 1 部分底面的抵抗矩。

根据式(7) 求出最大基底压力 $p_{\max} = 546 \text{ kPa}$, 这一基底压力远大于文献[20]中关于该种垫层土的地基承载力允许值 $f_{cu} = 300 \text{ kPa}$ 。

从抗倾覆的角度分析桥墩的稳定性如下: 所有外力的合力在验算截面作用点对基底重心轴的偏心距 e_0 为

$$e_0 = \frac{\sum P_i e_i + \sum H_i h_i}{\sum P_i} = \frac{G e_1 + F e_2 + E_a h}{G + F} \quad (8)$$

式中 E_a 为主动土压力 h 为主动土压力离墙底的距离,其余同上。

$$E_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (9)$$

式中 γ 为土重度 φ 为土内摩擦角,通过三轴试验获得 $\varphi = 23.34^\circ$ 。将 $G = 9500 \text{ kN}$, $F = 2950 \text{ kN}$, $e_1 = 1.85 \text{ m}$, $e_2 = 1.65 \text{ m}$, $H = 7 \text{ m}$ 代入上式得 $e_0 = 1.82 \text{ m}$

那么桥墩的抗倾覆安全系数为

$$k_0 = \frac{s}{e_0} = \frac{1.85}{1.82} = 1.02 \quad (10)$$

式中 s 为截面重心与合力的延长线上,重心至倾覆轴的距离。

由文献[20]可知 $k_0 = 1.02 < 1.3$, 不符合规范要求,说明桥墩处于不稳定状态或已经倾覆。

并且,下雨后沟道产生水流,当泥石流冲刷侧岸时,沟道中的水分会与侧岸土体发生水分交换,使侧岸的土含水量变大,强度降低,进一步消减了地基的承载能力,引起承载力不足,地基破坏。由于桥墩右侧底面一部分土体已被掏蚀,而流经的泥石流流变性极强,承载能力极弱,这就使的桥墩发生一定的倾斜,引起失稳,从而造成桥梁破坏。

5 结论及建议

5.1 结论

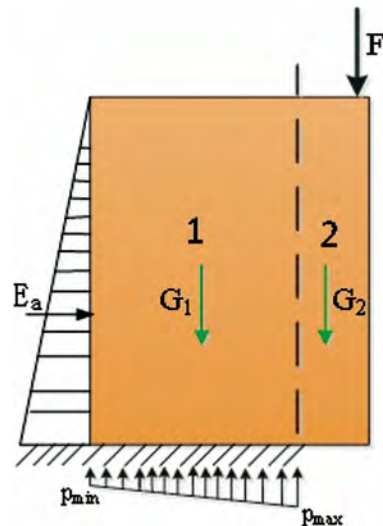


图7 桥墩受力图示

Fig. 7 Pier force analysis

1. 强降雨引发的“7·10”苏坡店沟泥石流,具有重度相对较高(18.5 kN/m^3)、流速快(9.3 m/s)、泥石流剪应力高(13.3 kPa)和流量大(峰值流量 $232.5 \text{ m}^3/\text{s}$)的特点,使泥石流的冲刷破坏力极强,沟道横向展宽较快。

2. 高速、大流量泥石流沿陡峭的主沟排泄过程中,强烈侵蚀沟床,泥石流的作用下,桥墩下沉、倾斜,并沿主沟方向发生 5 m 位移变形,导致桥面移位、桥梁垮塌,交通中断。

3. 泥石流和桥墩下土体发生水分交换,使得土体强度降低,桥墩下的土体被泥石流强烈淘刷,使桥墩 1.65 m 长度方向无土体支撑,成为临空面,桥墩下地基处于偏心荷载下。通过计算,得到桥墩最大基地压力 546 kPa ,超过规范允许的地基承载力,地基发生破坏。

5.2 建议

1. 针对高陡沟谷,修建防治措施时,应以排导为主,避免大量松散物质堆积,减少大型泥石流引发的灾害。

2. 设计跨越泥石流沟的桥梁时,应充分考虑到泥石流规模,设计足够的桥下净空高度,使泥石流能顺利通过沟谷而不破坏桥面。

3. 桥墩应有一定的埋置深度,尤其是处于泥石流沟口的桥墩,埋置深度除应满足规范的要求外,还应铺设混凝土板来保护地基,防治地基土体被泥石流冲刷。

参考文献(References)

- [1] Ge Y G, Zou Q, Zhang J Q, et al. Hazards on Dujiangyan - Wenchuan Highways Induced by Catastrophic Debris Flows on July 10 2013 and Prevention [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 501: 2463 - 2472
- [2] Wang Yuyi, Hu Kaiheng, Wei Fangqiang, et al. Relationship between rheology/erosion deposit properties of debris flow and its hazard degree [J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(1): 17 - 22 [王裕宜, 胡凯衡, 韦方强, 等. 泥石流流体的流变和冲淤特征及其与危险度的关系 [J]. 自然灾害学报, 2007, 16(1): 17 - 22]
- [3] You Yong, Cheng Zunlan. The influence of discontinuous motion of viscous debris flow on erosion and deposition of gully bed —— Study of the case at Jiangjia gully in Dongchuan, Yunnan [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 25(2): 146 - 151 [游勇, 程尊兰. 粘性泥石流阵性运动对沟床冲淤演变的影响——以云南东川蒋家沟为例 [J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 25(2): 146 - 151]
- [4] Zhu Xinghua, Cui Peng, Zhou Gongdan, et al. Experimental study on the erosion law of diluted debris flow [J]. Shui li Xue bao (Journal of Hydraulic Engineering), 2012, 2: 85 - 91 [朱兴华, 崔鹏, 周公旦, 等. 稀性泥石流冲刷规律的试验研究 [J]. 水利学报, 2012, 2: 85 - 91]
- [5] Zhao Yanbo, You Yong, Liu Jinfeng, et al. Experimental study on gully bed erosion depth of viscous debris flow [J]. Shui li Xue bao (Journal of Hydraulic Engineering), 2012, 2: 92 - 97 [赵彦波, 游勇, 柳金峰, 等. 粘性泥石流沟床冲刷深度试验研究 [J]. 水利学报, 2012, 2: 92 - 97]
- [6] Liu Jinfeng, You Yong, Chen Xingchang. Potential damages and identification of debris flow barrier lakes in the upper Min River Drainage [J]. Scientiagraphica Sinica, 2012, 32(7): 885 - 891 [柳金峰, 游勇, 陈兴长. 岷江上游潜在性泥石流堰塞湖危害及判别 [J]. 地理科学, 2012, 32(7): 885 - 891]
- [7] Du Rongheng, Kang Zicheng, Chen Xunqian, et al. Debris flow research in the Xiaojiang River basin: a review and perspective [M]. Chongqing: Science and Technique Press at Chongqing division, 1987: 94 - 113 [杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究 [M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987: 94 - 113]
- [8] Fei Xiangjun, Su Anping. Movement mechanism and disaster control for debris flow [M]. Beijing: Press of University Tsinghua, 2003: 12 - 15 [费翔俊, 舒安平. 泥石流运动机理与灾害防治 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 12 - 15]
- [9] Zhang Xinbao, Liu Jiang. Debris flows in the basin of Dayinjiang, Yunnan, China [M]. Chengdu: Map Press of Chengdu, 1989: 35 - 64 [张信保, 刘江. 云南大盈江流域泥石流 [M]. 成都: 成都地图出版社, 1989: 35 - 64]
- [10] Institution of Mountain Disaster and Environment, CAS. Research and prevention of debris flow [M]. Chengdu: Science and Technique Press of Sichuan, 1989: 1 - 2, 95 - 96, 165 - 167 [中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989: 1 - 2, 95 - 96, 165 - 167]
- [11] Bin Yu. Research on the calculating density by the deposit of debris flows [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 789 - 796 [余斌. 泥石流沉积物计算泥石流容重的方法研究 [J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 789 - 796]
- [12] Ma Yu, Yu Bin, Wu Yu - fu, et al. Research on the disaster of debris flow of Bayi Gully, Longch, Dujiangyan, Sichuan on August 13, 2010 [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition 2011, 43(Suppl. 1): 92 - 98 [马煜, 余斌, 吴雨夫, 等. 四川都江堰龙池“8·13”八一沟大型泥石流灾害研究 [J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(增1): 92 - 98]
- [13] Chen Guangxi, Wang Jikang, Wang Linhai. The prevention of debris flow [M]. Beijing: China Railway Press, 1983: 71 [陈光曦, 王继康, 王林海. 泥石流防治 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983: 71]
- [14] Simon A, Wolfe W J, Molinas A. Mass wasting algorithms in an alluvial channel model [G] // 5th Federal Interagency Sedimentation Conference, Subcommand on Sedimentation, Las Vegas, Nev. 1991: 22 - 29
- [15] Graf W H. Hydraulics of sediment transport [M]. Water Resources Publication, 1984: 513
- [16] Tang Cunben. Laws of sediment incipient motion [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963, 1: 1 - 12 [唐存本. 泥沙起动规律 [J]. 水利学报, 1963, 1: 1 - 12]
- [17] Wang Xinhong. Development and application of A numerical model for bank erosion and sediment transport in alluvial rivers [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2000: 48 - 49 [王新宏. 冲积河道纵向冲淤和横向变形数值模拟研究及应用 [D]. 西安: 西安理工大学, 2000: 48 - 49]
- [18] Chang D S, Zhang L M, Xu Y, et al. Field testing of erodibility of two landslide dams triggered by the 12 May Wenchuan earthquake [J]. Landslides, 2011, 8(3): 321 - 332
- [19] The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50010 - 2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010: 19 - 20 [中华人民共和国国家标准编写组. GB 50010 - 2010 混凝土结构设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 19 - 20]
- [20] The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG D60 - 2004 General code for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communication Press, 2004: 20 [中华人民共和国国家标准编写组. JTG D60 - 2004 公路桥涵设计通用规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 20]
- [21] The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTG D63 - 2007 Specifications for Design of Ground Base and Foundation of Highway Bridges and Culverts [S]. Beijing: China Communication Press, 2007: 26 - 27 [中华人民共和国国家标准编写组. JTG D63 - 2007 公路桥涵地基及基础设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 26 - 27]

The Failure Mechanism of Maojiawan Bridge by “7·10” Debris Flows

JING Xiangang^{1 2}, GE Yonggang¹, LEI Yu^{1 2}, GUO Chaoxu^{1 2}

(1. Key Lab. of Mountain Hazards and Earth Surface Progress/Insti. of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The catastrophic debris flows on July 10, 2013 resulted in huge destruction to Dujiangyan – Wenchuan highway (G213) in Sichuan Province of China. The highways were seriously destructed and blocked in 16 sites, which were induced by 7 collapsed bridges and base, 2 of 7 destructed were scoured by debris flow. Based on field investigation and analysis, the parameters were calculated, which were the density of 1.88 g/cm^3 , the velocity of 9.3 m/s , the peak flow of $232.5 \text{ m}^3/\text{s}$, and yield stress of debris flows of 13.3 kPa . The debris flows scoured the foundation of the bridge down the steep gully seriously, the pier lost its stability and the bridge collapsed. The calculation indicates that: the soil below the pier is scoured away by the debris flow leading to the pier overhanging, and the lateral length reaches 1.65 m ; on the other hand, the water in debris flows should run into the foundation soil, which reduces the soil's strength. The pier failed when the maximum pressure (545 kPa) of the foundation exceeding the allowable bearing capacity, then the bridge destroyed. By the analysis of the failure model and mechanism of Maojiawan Bridge, it suggests that debris flow drainage channel; clearance under the bridge and special protective projects should be carried out for highway protection and traffic security.

Key words: debris flows; scour; pier; mechanism