

文章编号: 1008 - 2786 - (2017) 2 - 187 - 08

DOI: 10. 16089/j. cnki. 1008 - 2786. 000211

泥石流冲击力简化计算方法 ——以舟曲县三眼峪泥石流为例

周明慧¹ 熊海贝^{1*} 赵书平² 曹纪兴¹

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 甘肃省陇南市地质灾害应急中心, 甘肃 陇南 746000)

摘 要: 基于舟曲县三眼峪泥石流灾害的实地考察和资料分析, 对该地区常见的夯土木构、砖木结构、砖混结构和框架结构 4 类典型受损的结构形式进行了分析, 确定建筑物的破坏模式主要为淤埋破坏和倒塌破坏。对现有的泥石流冲击作用计算公式进行了分类整理, 以三眼峪泥石流实测数据为例对比分析整体冲击力和大石块冲击力的不同计算理论和计算结果。为便于工程技术人员进行房屋抗泥石流设计, 提出了基于泥石流深度并考虑泥石流动力效应的设计计算方法, 给出了以三眼峪泥石流为例的动力影响系数设计值和设计泥石流深度取值范围; 并对当地典型夯土木构房屋进行了泥石流安全性分析。此简化计算方法物理意义清晰, 计算快捷有效, 可用于泥石流多发地带的设计荷载计算, 其关键参数泥石流深度可根据当地常年记录以统计值采用, 动力放大值可根据沟床纵比降和沟床糙率系数确定。

关键词: 泥石流; 破坏模式; 冲击力; 流体模型; 简化计算

中图分类号: P642. 23

文献标志码: A

1 三眼峪泥石流情况

三眼峪沟流域位于甘肃省甘南藏族自治州舟曲县城北侧, 面积 24. 1 km², 整个流域被两条北西走向的区域性断裂带的断块所包围, 岩层破碎, 褶曲强烈^[1]。三眼峪沟由支沟大眼峪、小眼峪呈“Y”形构成, 沟谷属高山峡谷地形, 北高南低, 海拔最高点 3 828 m, 最低点入江处 1 340 m, 主沟长 6. 8 km, 平均比降达 24. 1%。流域内沟谷总数 59 条, 超过 1 km 的支沟有 13 条^[2]。

2010 年 8 月 7 日 22 时左右, 舟曲县城东北部短时间强降雨, 引起三眼峪沟和罗家峪沟同时暴发

特大泥石流(图 1; 图 2)。泥石流冲毁拦挡坝, 排泄入白龙江, 堵塞江道, 形成长约 550 m, 宽约 70 m 堰塞坝, 回水长 3 km, 淹没白龙江上 1 座公路桥及半个县城, 受灾严重的月圆村几乎被全部掩埋^[3]。据统计^[4], 水毁房屋 5 508 间, 进水房屋 20 945 间, 冲毁掩埋耕地 1 400 余亩, 2 万余人受灾。截止 2010 年 9 月 7 日, 共有 1 481 人遇难, 1 824 人受伤, 284 人失踪。人员伤亡和财产损失主要来自泥石流对房屋损毁。

泥石流高速运动所蕴含的巨大冲蚀能量对沿途的建筑物造成严重的破坏。确定泥石流冲击力对于泥石流多发地区的建筑物抗泥石流灾害设计具有重要意义。2015 年 4 月和 2016 年 4 月, 作者两次实地

收稿日期(Received date): 2016 - 05 - 23; 改回日期(Accepted date): 2016 - 08 - 06。

基金项目(Foundation item): 国家科技支撑计划项目(2014BAL05B01) [National Science and Technology Support Program(2014BAL05B01)]

作者简介(Biography): 周明慧(1990 -), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 从事泥石流下结构安全性研究。[Zhou Minghui(1990 -), male, born in Hunan, M. Sc. candidate, research on structural safety under debris flow] E-mail: zmh092764@qq.com

* 通信作者(Corresponding author): 熊海贝(1964 -), 女, 上海人, 教授, 主要从事结构抗震、结构工程监测与检测、木结构工程等。[Xiong Hai-bei(1964 -), female, born in Shanghai, professor, undertaking research on seismic performance of building structures, structural health monitoring and assessment, timber engineering, etc.] E-mail: xionghaiBei@tongji.edu.cn



图 1 被冲毁的小眼峪一号坝(摄于 2015 年 4 月)

Fig. 1 Destroyed 1# dam at Xiaoyan Valley



图 2 舟曲特大泥石流三眼峪(赵书平 2010 年 8 月 8 日)

Fig. 2 View of Sanyan Valley in debris flow

考察泥石流高发区域之一的白龙江流域,现场评估与分析泥石流对建筑物的冲击破坏模式,提出简便的泥石流冲击力计算方法,为山区房屋抗泥石流设计提供科学依据。

2 建筑物破坏模式及分析

泥石流对建筑物的破坏类型和方式多样。有学者认为^[5] 砖混结构在泥石流作用下存在墙体横向断裂、墙面出现孔洞、底部支撑构件被破坏而垮塌三种破坏模式。胡凯衡等^[4,6] 通过现场调查,将泥石流破坏建筑物的模式归纳为冲击、淤埋和摩擦。

作者通过对三眼峪沟周边的建筑物的损毁情况进行实地评估与分析,存在 4 类典型结构的受损方式。①夯土木构或者砖木结构房屋整体坍塌破坏(图 3)。此类房屋材料强度低,整体性差,泥石流冲击下连续性局部坍塌引发整体坍塌破坏;②砖混结构整体倾斜或移位(图 4)。砖混结构遭受泥石流冲击作用后,基础稳定性较差,基础产生移位致使整栋房屋倾斜或者移位。③砖混结构局部坍塌(图 5)。砖混结构底层在泥石流的冲击荷载下破坏严重,无法支撑上部结构而引起局部垮塌。④砖混或者混

土框架结构底层被淤埋(图 6)。



图 3 整体坍塌破坏(赵书平 2010 年 8 月 8 日)

Fig. 3 Complete collapse of building
(Courtesy of Zhao Shuping 2010. 8. 8)



图 4 整体倾斜破坏(赵书平 2010 年 8 月 8 日)

Fig. 4 Tilted building due to debris flow strike
(Courtesy of Zhao Shuping 2010. 8. 8)



图 5 局部坍塌破坏(赵书平 2010 年 8 月 8 日)

Fig. 5 Partial collapse of building
(Courtesy of Zhao Shuping 2010. 8. 8)

从结构失效和破坏模式上区分,上述四种结构形式(夯土木构、砖木结构、砖混结构和混凝土框架结构)的破坏模式可总结为淤埋破坏和倒塌破坏两种。

2.1 淤埋破坏

淤埋破坏(图 6)是指建筑结构基本完好,但因泥石流淤积室内,已无法正常使用。

2.2 倒塌破坏

倒塌模式可分为倾覆性倒塌和竖向坍塌。结构的抗侧刚度不够,重力二阶效应导致过大变形,造成



图6 底层被掩埋(赵书平 2010年8月8日)
Fig. 6 The ground floor of a building to be buried
(Courtesy of Zhao Shuping 2010. 8. 8)

倾覆性倒塌(图4)。如果结构承重构件受到破坏而无法承受自重而产生竖向坍塌(图5)。实际上,泥石流造成的建筑物倒塌大多数是兼有上述两种模式。

3 泥石流冲击力的简化分析

泥石流冲击力的数值计算与泥石流体的力学模型直接关系。早期的泥石流体模型以单一流体模型为主。例如,约翰逊(Johnson)等提出^[7],泥石流体可简化为宾汉体。这类模型考虑泥石流中浆体的作用,不考虑粗颗粒的影响,细颗粒在流体中的作用只是体现在宾汉极限剪应力和塑性粘度变化上,较适用于颗粒物质较均匀的泥石流体;拜格诺^[8](Bagnold)把泥石流体视为膨胀体,认为颗粒之间剪切运动产生的离散力在高速时与颗粒的速度梯度平方成比例。高桥(Takahashi)以拜格诺的膨胀体模型为基础,提出了泥石流拜格诺膨胀流模型^[9],适用于以大量粗颗粒为主要组成的水石流。由于以上两种模型存在明显的局限性,有学者提出了同时考虑细颗粒与水组成的浆体(视为液相)和粗颗粒间相互作用(视为固相)的泥石流模型。例如,美国地质调查局陈^[10](Chen)曾经建议一个通用的泥石流黏塑流模型。由于泥石流是泥沙和石块的两相流体^[11],存在复杂的颗粒之间的相互作用,各模型并不能完全解释实际观察到的泥石流现象。

最直接而有效确定泥石流冲击作用的方法是野外实时测量。2004年,中国云南东川泥石流观测站成功完成了蒋家沟泥石流冲击力测量,通过不同类型的传感器以及数据采集系统,测得不同流深位置、长历时、波形完整的泥石流冲击力信号^[12,13]。泥石流冲击作用包括泥石流整体冲击力(液相)和泥石流大石块冲击力(固相)两部分。许多专家学者从不同的学

科角度推导出多种泥石流冲击作用的计算方法。

3.1 泥石流整体冲击力计算方法分析

20世纪70年代,泥石流学者利希滕汉(Lichtenhahn)等将泥石流简化为一维均匀牛顿流体,最早提出了泥石流一维静力流体模型^[14,15]。后来,大多学者基于流体力学原理,假定泥石流为连续体,利用泥石流的流速和密度来推算泥石流体动压力。

本文将泥石流整体冲击力计算公式归纳成4类(表1)。表内所列公式的主要差异在于,赫利赫乌利泽考虑静水压力增加了泥石流泥深^[16]。张宇^[17]等考虑粘性泥石流的主要流动形式实际上为阵流,引入泥石流体微元概念,基于动量守恒原理,推导出泥石流冲击力计算公式。陈光曦^[18]等考虑泥石流与建筑物冲压方向和建筑物的形状分别增加了建筑物的受力面与泥石流的冲压方向的夹角和建筑物的体形系数。另外,针对泥石流浆体运动与冲击特性也有相关试验研究,如何晓英等进行了泥石流浆体冲击特性模型实验,采用小波方法揭示泥石流浆体冲击特性^[19]。

为了比较4类计算公式的异同,本文以文献[20]中的数据(大三号坝下100m地势平坦的截面13,泥石流容重为 19.89 kN/m^3 ,平均流速为 8.02 m/s ,泥深为 4.0 m)为例,分别采用上述4种计算方法进行计算分析,结果见表1。利希滕汉的计算公式中 k 为经验系数,斯科顿(Scotton)等^[21]通过相关试验研究得出 k 的取值范围为 $2.5 \sim 7.5$,表1按最小值 $k=2.5$ 计算。4种方法计算结果平均值为 166 kN/m^2 ,利希滕汉的计算公式所得结果最大,比平均值高出 33 kN/m^2 ,与平均值相差约 19.9% 。

3.2 泥石流大石块冲击力计算方法分析

泥石流体在运动中,夹杂着大量粒径不等的大石块。依据不同的理论,学者们提出了泥石流大石块冲击力的计算公式。

部分学者将建筑体和大石块视为完全弹性体,基于弹性撞击理论提出一些计算公式。例如,康志成^[23]等利用了撞击物的弹性波传递速度的相关理论。陈光曦^[18]等考虑泥石流的冲击方向与被撞击物体的长轴方向的夹角并增加了动能折减系数。吴积善^[24]等在公式推导中考虑时间效应采用了冲量-动量模型。章书成^[25]从材料力学角度出发将巨石与支挡物之间的碰撞简化成巨石对悬臂梁的作用,并考虑大块石的运动方向与构件受力面有夹角。

表 1 泥石流整体冲击力计算公式

Tab. 1 Formulas of debris flow impact pressure calculation

公式	参数定义	作者	公式依据	算例 计算结果(kN/m ²)
整体冲击力(kN/m ²) $p_{max} = k\rho gh$	p_{max} 表示泥石流最大冲击压强, kN/m ² ; k 为经验系数; ρ 为泥石流密度, t/m ³ ; g 为重力加速度, m/s ² ; h 为泥石流深度, m。	利希滕汉 ^[15]	静力流体模型	199
$p_{总} = p_{静} + p_{动}$ $= 0.1\gamma_c(5h + v^2)$	$p_{总}$ 为拦挡坝承受的动水压强和静水压强之总值, kN/m ² ; γ_c 为泥石流体的平均容重, kN/m ³ ; v 为泥石流的流速, m/s; 其余同上。	赫尔赫乌利泽 ^[16]	流体力学 压力计算	168
$p_{动} = \frac{\int_0^T m f(t) dt}{AT}$ $= \rho v^2 = \frac{\gamma_c v^2}{g}$	$p_{动}$ 为泥石流冲击动压强, kN/m ² ; $f(t)$ 为冲击力曲线函数; T 为冲击力作用时间, s; A 为冲击力作用面积, m ² ; 其余同上。	张宇 ^[17]	冲量 - 动量模型	128
$p_{动} = \lambda \frac{\gamma_c v^2}{g} \sin\alpha$	α 为建筑物受力面与泥石流冲压方向的夹角, 度; λ 为建筑物形状系数, 圆形建筑物取 1.0, 矩形建筑物为取 1.33, 方形建筑物取 1.47; 其余同上。	行业规范 ^[22]	冲量 - 动量模型 并考虑建筑物 形状和方向	128(圆形) 170(矩形) 188(方形)

注: 为方便比较, 本文对所有公式符号和单位进行了统一。

何思明^[26]等以弹塑性理论为基础, 考虑到防护工程物的弹塑性特性, 结合试验引入假设, 推导了泥石流大石块对常见几类泥石流防治结构的冲击力计算公式。另外, 水山高久^[27]等以流体动压理论为基础, 以大石块粒径、运动速度为参数, 在试验基础上对理论公式进行修正得到计算公式。

本文对前述学者提出的大石块冲击力计算公式进行归纳和整理, 主要为三种, 见表 2。并以文献[20]中的数据(截面 13, 泥石流容重为 19.89 kN/m³, 平均流速为 8.02 m/s, 泥深为 4.0 m)为例进行计算对比。假定某石块为泥质灰岩, 长宽高均为 0.1 m, 泥质灰岩密度约为 2 300 kg/m³, 弹性波速约为 4 600 m/s。三种方法计算结果如表 2 所

示, 相差很大, 第一种方法以弹性碰撞理论为依据, 计算结果远远大于其余两种方法的计算结果。

3.3 基于泥石流深度的整体冲击力设计计算方法

为便于泥石流防治工程或民用建筑物的防灾设计, 泥石流的荷载计算公式不仅要具备明确清晰的物理意义, 还要应简明实用。泥石流荷载是流体运动作用在建筑结构上, 是动荷载, 应采用基于泥石流流速的计算公式。泥石流流速实测较难, 难以直接给出区域泥石流设计速度标准值。泥石流泥深值较容易在灾后测量。本文提出基于泥石流泥深的冲击力简化计算方法。

以利希滕汉的计算公式为基础, 采用一维静力流体模型, 用静水压强的形式考虑动水压强的影响,

表 2 泥石流大石块冲击力计算公式

Tab. 2 Formulas of impact force induced by moving boulders in debris flow

公式	参数定义	作者	公式依据	计算结果(kN)
$P = \rho_d C_1 v A_d$	P 为石块的冲击力, kN; ρ_d 为石块的密度, t/m ³ ; C_1 为撞击物的弹性波传递速度, m/s; v 为大块石的冲击速度, m/s; A_d 为石块与被撞物体接触面积, 按石块中、短径所在平面面积 10% 计算, m ² 。	康志成 ^[23]	弹性碰撞 理论, 考虑 弹性波速	84.9
$P = c \left[\frac{mv^2(n+1)}{2c} \right]^{\frac{n}{n+1}}$	c , n 为大石块的材料特性参数, 可取 $c = 1.5 \times 10^5$, $n = 1.5$ ^[26] ; m 为大石块的质量, kg; 其余同上。	何思明 ^[26]	基于 Hertz 接触 理论的弹塑性碰撞	4.09
$P = 24.1 v^{1.2} R^2$	R 是石块半径, m; P 为石块的冲击力, kN; v 为泥石流流速, m/s。	省国土厅 ^[28]	实地调查, 缩尺 模型, 拟合修正	1.13

泥石流整体冲击压强的简化计算公式可以表达为:

$$q_z = \rho g \beta (h - z) \quad (1)$$

式中, q_z 为泥石流流向的整体冲击压强, kN/m^2 ; ρ 为泥石流密度, t/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为泥石流深度, m ; z 为计算点至地面的高度 ($0 \leq z \leq h$) m ; β 为动力影响系数, 其值与泥石流的流速有直接关系, 而流速又与沟谷特性等相关。

泥石流整体冲击力的计算简图如图 7 所示。

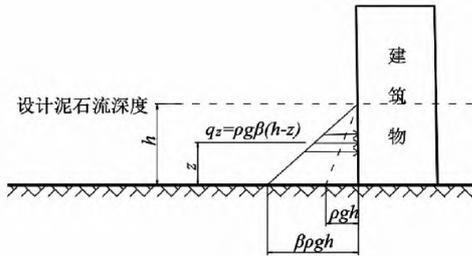


图 7 泥石流整体冲击力计算简图
Fig. 7 Sketch of debris flow impact press

对冲击压力沿建筑物高度进行积分即可得到泥石流的整体冲击力, 公式如式(2)所示。

$$Q_z = \rho g B \int_0^z \beta (h - z) dz \quad (2)$$

式中 Q_z 为泥石流的整体冲击力, kN ; B 为泥石流冲击面建筑物宽度, m ; z 为计算点至地面的高度 m 。

这里, 动力影响系数 β 是简化计算公式的关键, 它与泥石流流速存在一定的关系, 若假定简化计算方法结果与考虑动水压力的计算方法结果一致, 如式(3)所示, 则可计算得到动力影响系数 β 的表达式:

$$Q_h = \rho g B \int_0^h \beta (h - z) dz = \lambda \frac{\gamma_c}{g} v^2 \sin \alpha \cdot B h \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2 \lambda v^2 \sin \alpha}{g h} \quad (4)$$

由此可见, 当泥石流深度 h 一定时, 动力影响系数 β 与泥石流流速的平方成正比。泥石流流速与平均泥石流深度及泥石流沟的沟谷特性密切相关, 对于粘性泥石流, 康志成^[29]等建议采用式(5)的计算公式。

$$v_c = \frac{1}{n_c} \cdot h^{2/3} \cdot I_c^{1/2} \quad (5)$$

式中 v_c 为泥石流平均流速, m/s ; h 为计算断面的平均泥深, m ; I_c 为泥石流的沟床纵比降; n_c 为泥

石流沟床糙率系数。

将式(5)代入式(4)中, 可得动力影响系数 β 的表达式如式(6)所示。

$$\beta = \frac{2 I_c \lambda \sin \alpha}{g n_c^2} h^{1/3} \quad (6)$$

对于三眼峪泥石流, 以文献[20]中的数据(截面 13, 泥石流容重为 19.89 kN/m^3 , 平均流速为 8.02 m/s , 泥深为 4.0 m , 沟床纵比降为 0.1 , 泥石流沟床糙率系数 n_c 为 $1/7$)为参考数据, 考虑建筑物为矩形 ($\lambda = 1.33$), 泥石流冲击方向与建筑物冲压面成 90° , 代入公式(6), 可计算出三眼峪泥石流沟的动力影响系数 $\beta = 2.11$ 。

根据实际调查, 三眼峪沟特大泥石流淤积区面积 0.41 km^2 , 堆积厚度一般在 $1 \sim 5 \text{ m}$ 之间^[30], 以泥石流深度和动力影响系数为变量, 采用三眼峪泥石流沟沟谷特性的相关参数, 可作出如图 8 所示的曲线。可以看出, 当三眼峪泥石流深度在 $1 \sim 5 \text{ m}$ 之间变化时, 相应的动力影响系数为 $1.33 \sim 2.27$, 即使泥石流深度达到 10 m , 动力影响系数也在 3.0 以内。

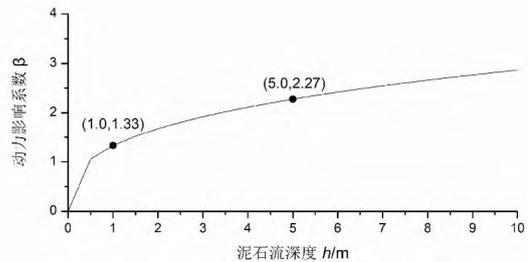


图 8 泥石流深度与动力影响系数的关系
Fig. 8 Relationship between depth of debris flow and dynamic influence coefficient

为此, 基于三眼峪泥石流案例, 本文提出该地区的泥石流整体冲击力的设计计算公式中, 动力放大系数取 $1.5 \sim 3.0$ 。泥石流设计深度可根据地质构成、常年泥石流记录, 给出不小于 2 m 不大于 10 m 的建议。

本文提出的泥石流冲击作用简化计算公式仅包含泥石流深度 h 和动力影响系数 β 两个参数, 工程设计中 h 为泥石流深度设计值, β 为与建筑物所在场地相对应的动力影响系数设计值, 可通过该区域泥石流的沟谷特性提前给出其取值范围表。因此, 设计人员或工程技术人员可以根据该区域的场地特征, 查表得出 β 和 h 的设计值, 采用式(1)和式(2)得到作用在建筑物上的水平冲击力。值得注意的

是,该公式仅考虑了粘性泥石流的整体冲击作用,大石块的直接冲击力的影响需要进行进一步的分析,目前尚未找到有效合理的表达方式。

3.4 算例分析

实地考察发现,舟曲当地的夯土木构房屋以三合院形式为主,正房三间并列,平屋顶。应用本文建议的计算公式,以夯土木构房屋的正房为例进行房屋抵抗泥石流作用的性能分析。假定房屋层数分别为一层、二层和三层,房屋层高为 4.0 m,单间房屋平面尺寸为 3.6 m × 4.0 m,总平面尺寸为 10.8 m × 4.0 m,泥石流冲击方向为房屋纵向,木柱 $\Phi 0.25$ m,夯土墙厚 0.4 m,墙体开洞率为 25%,夯土重度为 17.64 kN/m³,屋面恒载 6.09 kN/m²,楼面恒载 1.0 kN/m²,木柱与基础摩擦系数为 0.4,以连续性局部坍塌引发整体坍塌破坏模式考虑,其抗侧力由近泥石流一侧两根木柱摩擦提供。假定泥石流动力影响系数 β 分别为 2 和 3,泥石流重度为 20.5 kN/m³,通过上述简化计算公式计算可得到图 9 所示的计算结果。

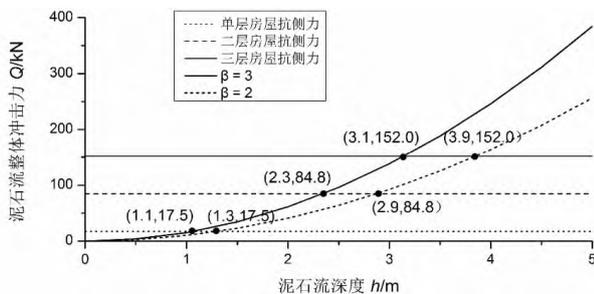


图 9 泥石流冲击力与夯土木构房屋底层抗侧力的关系

Fig. 9 Relationship between lateral resistance of house and debris flow impact force

从图 9 中可以看出,当泥石流泥深超过 3.90 m 时,不论这个夯土木构房屋的层数为 1 层、2 层或 3 层,房屋都无法抵挡泥石流的冲击作用。当动力影响系数 β 取 3 时,对于单层房屋抵抗泥石流的临界深度为 1.10 m,对于二层房屋抵抗泥石流的临界深度为 2.30 m,对于三层房屋抵抗泥石流的临界深度为 3.10 m。当动力影响系数 β 取 2 时同样可以得到相应的各临界深度。

4 结论

本文基于野外考察,对建筑物在泥石流作用下的破坏模式进行分析,整理并讨论了泥石流冲击作

用的计算方法,提出了基于泥深的泥石流整体冲击力的简化计算方法,主要结论如下:

(1) 舟曲三眼峪泥石流灾害下受损建筑物的结构形式有夯土木构、砖木结构、砖混结构和框架结构等,其典型的破坏方式可总结为淤埋破坏和倒塌破坏两种破坏模式。

(2) 泥石流冲击作用计算可分为整体冲击力和大石块冲击力。整体冲击力的计算方法基于流体力学的相关理论,以三眼峪泥石流基本数据为依据,计算结果表明相差在 19.9% 的范围内;大石块的冲击力计算方法依据不同的碰撞理论,采取不同的研究方法,得到的经验计算公式差别很大,以三眼峪泥石流数据计算为例,得到的结果相差甚远。

(3) 本文提出基于泥石流泥深,提出简化计算公式: $q_z = \rho g \beta (h - z)$,其中泥石流动力影响系数 β 对于三眼峪泥石流可取 1.5 ~ 3.0,深度可根据地质构成、常年泥石流记录,建议在 2 m ~ 10 m 区间。

(4) 本方法可用于其他泥石流多发地带的设计荷载的取值,泥石流深度可根据当地常年记录采用统计值采用,动力放大值可根据沟谷的纵坡比降和沟床糙率确定。工程技术人员可以根据该区域的场地特征,查表得出 β 和 h 的设计值,有效快捷地计算作用在建筑物或工程设施上的整体冲击力。

参考文献(Reference)

- [1] 胡向德,毕远宏,魏新平,等.舟曲县三眼峪沟泥石流灾害治理工程分析[J].水土保持通报,2012,32(3):267-270 [HU xiande, BI yuanyong, WEI xinping, et al. An Analysis of Treatment Project of Debris Flow Disaster in Sanyanyu Gully of Zhouqu County [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 267-270]
- [2] 马东涛,祁龙.三眼峪沟泥石流灾害及其综合治理[J].水土保持通报,1997,17(4):26-31 [MA Dongtao, QI Long. Study on comprehensive controlling of debris flow hazards in Sanvanu Gully [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1997, 17(4): 26-31]
- [3] 余斌,杨永红,苏永超,等.甘肃省舟曲 8.7 特大泥石流调查研究[J].工程地质学报,2010,18(4):437-444 [YU Bin, YANG Yonghong, SU Yongchao, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7 [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(4): 437-444]
- [4] 胡凯衡,崔鹏,葛永刚.舟曲“8.8”特大泥石流对建筑物的破坏方式[J].山地学报,2012,30(4):484-490 [HU Kaiheng, CUI Peng, GE Yonggang. Building destruction patterns by August 8, 2010 debris flow in Zhouqu Western China [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30(4): 484-490]
- [5] 张宇,韦方强,崔鹏.砖混建筑在泥石流冲击作用下的破坏形态

- 模拟[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(5): 61-67 [ZHANG Yu, WEI Fangqiang, CUI Peng. Destruction mode simulation of reinforced masonry structure under impact of debris flow[J]. Journal of Natural Disasters, 2005, 14(5): 61-67]
- [6] HU Kaiheng, CUI Peng, ZHANG Jianqiang. Characteristics of damage to buildings by debris flows on 7 August 2010 in Zhouqu, Western China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012, 12(7): 2209-2217
- [7] 姚德基, 商向朝. 七十年代的国外泥石流研究[C]//中国科学院成都地理研究所. 泥石流论文集(1). 重庆: 科学出版社重庆分社, 1981: 132-141 [YAO Deji, SHANG Xiangchao. Overseas studies on debris flow in 1970s[C]// Chengdu Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Debris flow conference proceedings(1). Chongqing: Science Press, Chongqing Branch, 1981: 132-141]
- [8] BAGNOLD R A. Experiments on gravity-free dispersion of large solid sphere in a Newtonian fluid under shear[J]. Proceedings of the Royal Society of London: A, 1954(225): 49-63
- [9] TAKAHASHI T. Debris flow on prismatic open channel[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1980, 106(HY3): 381-396
- [10] CHEN C L. General solution for viscoplastic of debris flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(3): 259-282
- [11] 谢涛, 谢湘平, 韦方强, 等. 鱼脊型泥石流水石分离结构适用性的模型试验研究[J]. 水利学报, 2015, 45(12): 1472-1480 [XIE Tao, XIE Xiangping, WEI Fangqiang, et al. Applicability experiment of herringbone water-sediment separation structure for debris flow prevention[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 45(12): 1472-1480]
- [12] 胡凯衡, 韦方强, 洪勇, 等. 泥石流冲击力的野外测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(z1): 2813-2819 [HU Kaiheng, WEI Fangqiang, HONG Yong, et al. Field measurement of impact force of debris flow[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(z1): 2813-2819]
- [13] 唐金波, 胡凯衡, 周公旦, 等. 基于小波分析的泥石流冲击力信号处理[J]. 四川大学学报工程科学版, 2013, 45(1): 8-13 [TANG Jinbo, HU Kaiheng, ZHOU Gongdan, et al. Debris Flow Impact Pressure Signal Processing by the Wavelet Analysis[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(1): 8-13]
- [14] 李培振, 高宇, 郭沫君. 泥石流冲击力的研究现状[J]. 结构工程师, 2015, 31(1): 200-206 [LI Peizhen, GAO Yu, GUO Mojun. Research status and development trend of debris flow impact force[J]. Structural Engineers, 2015, 31(1): 200-206]
- [15] LICHTENHAHN C. Die Berechnung von Sperren in Beton und Eisenbeton. Kolloquium über Wildbach-sperren [J]. Mitteilungen der Forstlichen Bundesanstalt Wien, 1973, 102: 91-127
- [16] [苏]C. M. 弗莱施曼. 泥石流[M]. 姚德基, 译. 北京: 科学出版社, 1986: 164-241 [C. M. FLEISHMAN. Debris Flows[M], YAO Deji(translated). Beijing: Science Press, 1986: 164-241]
- [17] 张宇, 韦方强, 王青. 基于动量守恒的粘性泥石流冲击力计算[J]. 泥沙研究, 2006, (3): 23-26 [ZHANG Yu, WEI Fangqiang, WANG Qing. Impact force calculation of viscous debris flow based on momentum conservation[J]. Journal of Sediment Research, 2006, (3): 23-26]
- [18] 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: 71-80 [CHEN Guangxi, WANG Jikang, WANG Linhai. Debris flow control[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983: 71-80]
- [19] 何晓英, 唐红梅, 朱绣竹, 等. 泥石流浆体冲击特性实验研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(24): 127-134 [HE Xiaoying, TANG Hongmei, ZHU Xiuzhu, et al. Tests for impacting characteristics of debris flows slurry[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(24): 127-134]
- [20] 杨敏. 舟曲三眼峪沟特大泥石流灾害的形成条件[D]. 成都: 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2014: 53-54 [YANG Min. Formation conditions of the disastrous debris flow of Sanyanyu Gully in Zhouqu County, Gansu Province[D]. Chengdu: Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, 2014: 53-54]
- [21] SCOTTON P, DEGANUTTI A. Phreatic line and dynamic impact in laboratory debris flow experiments[J]. American Society of Civil Engineers, 1997: 777-786
- [22] 中国地质调查局. DZ/T0239-2004 泥石流灾害防治工程设计规范[S]. 北京: 地质出版社, 2004: 7-10 [China Geological Survey. DZ/T0239-2004 Debris flow disaster prevention engineering design specifications[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 7-10]
- [23] 康志成, 李悼芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 159-221 [KANG Zhicheng, LI Zhuofen, MA Ainai. Debris-flow Research in China[M]. Beijing: Science Press, 2004: 159-221]
- [24] 吴积善, 康志成, 田连权. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 16-141 [WU Jishan, KANG Zhicheng, TIAN Lianquan. Observation of debris flow in Jiangjia Valley, Yunnan Province[M]. Beijing: Science Press, 1990: 16-141]
- [25] 杜榕桓. 泥石流观测与研究[M]//章书成, Oldrich HUNGR, Olav SLAYMAKER. 泥石流中巨石冲击力计算. 北京: 科学出版社, 1996: 67-72 [Du Ronghuan. Debris Flow Observation and Research[M]//ZHANG Shucheng, Oldrich HUNGR, Olav SLAYMAKER. The calculation of impact force of boulders in debris flow. Beijing: Science Press, 1996: 67-72]
- [26] 何思明, 吴永, 沈均. 泥石流大块石冲击力的简化计算[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 51-56 [HE Si-ming, WU Yong, SHEN Jun. Simplified calculation of impact force of massive stone in debris-flow[J]. Journal of Natural Disasters, 2009, 18(5): 51-56]
- [27] T. Mizuyama. Computational method and some considerations on impulsive force of debris flow acting on Sabo dams[J]. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 1979, 11(2): 40-43
- [28] 甘肃省国土资源厅. 甘肃省地质灾害防治工程勘查设计技术要求[M]. 甘肃: 兰州大学出版社, 2003: 1-81 [Gansu Provincial Department of Land and Resources. Technical requirements for the exploration and design of geological disaster prevention and

- control in Gansu Province [M]. Gansu: Lanzhou University press, 2003: 1-81]
- [29] 康志成. 我国泥石流流速研究与计算方法 [J]. 山地学报, 1987, 4(04): 247-259 [KANG Zhicheng. A velocity research of debris flow and its calculating method in China [J]. Mountain Research, 1987, 5(4): 247-259]
- [30] 李军, 胡向德, 黎志恒, 等. 舟曲三眼峪沟特大泥石流形成及径流特征分析 [J]. 甘肃地质, 2013, 22(3): 58-63 [LI Jun, HU Xiangde, LI Zhiheng, et al. Analysis on development of debris flow in Sanyanyu Gully [J]. Gansu Geology, 2013, 22(3): 58-63]

Simplified Calculation of Impact Force of Debris Flow Based on the Case Study of Sanyan Valley Debris Flow

ZHOU Minghui¹, XIONG Haibei^{1*}, ZHAO Shuping², CAO Jixing¹

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Geological Disaster Emergency Center of Longnan City, Gansu Province, Longnan 746000, China)

Abstract: Based on field surveys on Sanyanyu debris flow gully in Zhouqu County and analysis of associated data, in this study it conducted a technical evaluation on performances of local building structures against debris flow. According to damage patterns, four types of house structures were sorted out for demonstration, which were rammed earth-wooden structure, brick-wood structure, brick-concrete structure and frame structure, typically subjected to two principal types of loading modes, either burying by silts or collapsing due to colliding. Comparison was made to examine calculation differences between some of available equations, when actual measurement data collected from the Sanyanyu debris flow were used for calculation of debris flow impact incurred by both debris flow fluid and big boulders floating in debris flow body. Then it analyzed the derivations of these equations and interpreted the corresponding calculation results. For facilitating engineering and technical personnel to design structures with sufficient resistance to debris flow, a proposed equation then was introduced by integrating the depth of debris flow with dynamic effect of debris flow. The suggested expression was readily to set a proper value range for coefficients of dynamic effect and depth of debris flow in practice, and it had been verified by a case study for examining the design of a typical local rammed earth-wooden structure against debris flow in the Sanyanyu.

The optimized simplification gave this method good advantages in a better understanding of its physical significance and its higher efficiency in determination of design load in engineered control of debris flow-prone regions. Moreover, it is quite technically feasible for engineers to gain some key prerequisite parameters to use the equation. For example, the value of debris flow depth could be substituted by an average value according to local historic observations. And the values of dynamic effect could be determined by combination of the value of vertical slope of gully bed and the roughness coefficient.

Key words: debris flow; failure mode; impact; fluid model; simplified calculation