

泥石流冲击作用下框架结构的破坏机理

狄生奎 李 健 张得强

(兰州理工大学土木工程学院 兰州 甘肃 730050)

摘 要: 推导了泥石流冲击力作用下结构的最大位移,可以看出最大位移与泥石流的密度、速度、结构的周期、刚度有关。通过对泥石流冲击力的简化,利用有限元软件模拟二层框架结构在泥石流冲击作用下的响应,得到了底层框架柱的位移时程曲线,并对底层柱破坏形态进行了分析。把结构理论最大位移与模拟最大位移进行比较,得到了结构最大位移限值,为建筑物抵抗泥石流冲击设计提供了参考。

关键词: 泥石流; 结构; 冲击力; 位移; 应力

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

泥石流是西部山区一种突发性自然灾害,具有发生突然、历时短暂、来势凶猛、大冲大淤、破坏力极强的特点^[1]。它严重危害乡镇房屋、交通、农田、工矿和水利工程等,是制约西部山区经济发展的主要因素之一。研究中国西部泥石流的活动和危害特点,探讨减灾对策,成为西部大开发中资源环境研究的重要课题,对于保障西部大开发的顺利实施具有现实意义。建筑结构作为抵御泥石流的一道防线,对保证人们的生命财产起到了重大的作用,因此准确地了解在泥石流冲击力作用下结构的破坏形态,探求加强结构抵抗泥石流冲击的有效措施具有重要意义。目前许多学者都在进行泥石流冲击力的研究,但相关文献比较少。国内魏鸿、沈寿长、刘雷激、魏华、王兆印等利用水槽实验模拟泥石流龙头形成机制,研究龙头的冲击力^[2-3];中国科学院东川泥石流观测研究站对云南蒋家沟进行了多年的观测,记录了大量的泥石流冲击力的实际资料^[4];张宇、韦方强等对在泥石流冲击作用下的砖混结构进行了破坏形态模拟,并做了动态响应实验^[5];在国外,日本的石川芳治对分离泥石流隔栅材料进行了冲击荷载实验,主要目的是为防砂坝设计提供依据。但数据

得到的都比较复杂,结果难以实现,很难用于工程实际中。本文对泥石流冲击力进行了简化,通过理论推导得到了结构的最大位移,利用有限元软件对框架柱进行了动态分析,为工程设计提供了参考。

1 泥石流冲击力

1.1 泥石流冲击荷载的脉冲形式

泥石流冲击力对结构产生极大影响,是研究结构响应的重要参数。因此泥石流作用下对结构的冲击破坏研究最关键因素是量化泥石流冲击力,根据以往学者实验研究^[6-7],认为泥石流冲击力由泥石流浆体的动压力和块石的撞击力两部分组成,泥石流的冲击荷载可概化为三类脉冲形式。

1.1.1 锯齿形脉冲(图 1)

该脉冲是由很多连续的大大小小的三角形脉冲组成,呈锯齿状分布,起伏很大,该锯齿波形可以认为流体均匀的动压力和不均匀的动压力及大小石块相互叠加的结果,如果在此脉冲上叠加个别孤立的极大值,则可认为是由于个别大石块作用的结果。此类脉冲为粘性泥石流的标准脉冲形式,作用时间

收稿日期(Received date): 2011 - 09 - 22; 改回日期(Accepted): 2012 - 01 - 20。

基金项目(Foundation item): 甘肃省科技支撑项目(No. 0708GKCA002); 甘肃省自然科学基金暨中青年科技基金项目(No. 3ZS062 - B25 - 031)。[Gansu Scientific and Technological Support Project(No. 0708GKCA002); Gansu Natural Science Foundation & Technology Fund Project for Young and Middle - aged People(No. 3ZS062 - B25 - 031)。]

作者简介(Biography): 狄生奎(1971 -) 男, 博士生导师, 教授, 主要从事结构健康监测方面的研究。[Di Shengkui (1971 -) , male , doctor tutor , professor , mainly engaged in structural health monitoring study.] E - mail: disk@lut.cn

长,对工程建筑物的影响要考虑其数值大小和作用时间。

1.1.2 矩形脉冲(图2)

该脉冲可以认为为一个矩形脉冲,很少有奇峰异起现象,在泥石流流体中,组分相对比较均匀,石块数量少,尺寸小,与浆体混合后不能突出其作用。

1.1.3 尖峰型脉冲(图3)

该脉冲作用时间短暂,全过程仅零点几秒到几秒,波形好,一般都叠加于锯齿形脉冲之上,这类脉冲大多为单个石块作用的结果,数值随石块大小定,此类脉冲常作用于一点,时间短暂,叠加在锯齿形波形上,对建筑结构极具破坏性。

1.2 泥石流冲击力

泥石流对结构的作用可以看作由两部分组成,一部分为泥石流流体的静力作用,此时认为泥石流处于非运动状态;另一部分为泥石流的冲击动力作用。其中泥石流平均静力作用可通过式(1)确定

$$F_{st} = p_{st}A = \frac{\rho g b h^2}{2} \quad (1)$$

式中 F_{st} : 泥石流作用在结构上的静力; p_{st} : 泥石流平均静压力; A : 泥石流在结构上的作用面积; ρ : 泥石流密度; g : 重力加速度; b : 泥石流在结构上的作用宽度; h : 泥石流泥深。泥石流冲击动力作用可通过式(2)确定

$$F_{dy} = p_{dy}A = \lambda \rho V_c^2 A \sin \alpha \quad (2)$$

式中 F_{dy} : 泥石流作用在结构上的冲击动力; V_c : 泥石流流速; p_{dy} : 泥石流冲击压力; λ : 建筑物形状系数,圆形建筑物为 1.0,矩形建筑物为 1.33; ρ : 泥石流密度; α : 建筑物受力面与泥石流冲压力方向的夹角。

1.3 结构最大位移

泥石流作用下结构的最大位移 u_{max} 由泥石流对

结构的静压力产生的位移 u_{st} 和冲击力作用下最大动位移 $u_{dy,max}$ 两部分组成,如式(3)

$$u_{max} = u_{st} + u_{dy,max} \quad (3)$$

其中结构在泥石流静力作用下的位移 u_{st} 由流体的静力 F_{st} 和结构的刚度 k 决定

$$u_{st} = \frac{F_{st}}{k} = \frac{p_{st}A}{k} = \frac{\rho g b h^2}{2k} \quad (4)$$

结构的最大动力幅值 $u_{dy,max}$ 与泥石流的冲击力 F_{dy} 、结构的自振周期 T_n 和结构的刚度 k 有关。泥石流冲击动力的作用,可认为是冲击荷载对结构的作用。根据结构动力学知识,提出了三种脉冲力: 矩形脉冲、半周正弦脉冲和三角形脉冲。引入最大反应比 R_{max} 结构在三种脉冲荷载作用下的位移 - 反映谱如图4所示

$$R_{max} = \frac{u_{dy,max}}{u_{st,dy}} = \frac{u_{dy,max}}{F_{dy,max}/k} \quad (5)$$

式中 $u_{dy,max}$ 和 $u_{st,dy}$ 分别为冲击力幅值 $F_{dy,max}$ 引起的动位移幅值和静位移。

由于泥石流对结构冲击时间一般大于 $T_n/2$, 认为泥石流冲击作用为矩形脉冲,如下式

$$p(t) = \begin{cases} P_0 & t \leq \tau \\ 0 & t \geq \tau \end{cases} \quad (6)$$

在泥石流冲击阶段 $F_{dy,max} = P_0$ 。结构的刚度为 $k = \frac{4\pi^2 m}{T^2}$, 其中 m 为结构的质量。可得到结构最大动位移

$$u_{dy,max} = R_{max} \frac{P_{dy,max}}{k} \quad (7)$$

由上式得结构的最大位移为

$$u_{max} = \frac{\rho g b h^2}{2k} + \frac{\lambda \rho V_c^2 A \sin \alpha}{2\pi^2 m} T_n \quad (8)$$

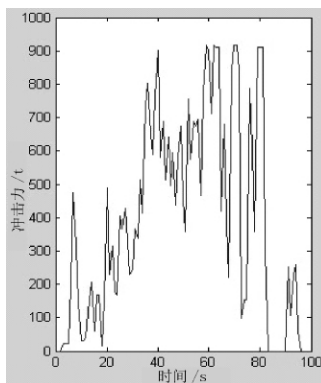


图1 锯齿形脉冲

Fig. 1 The zigzag pulsation

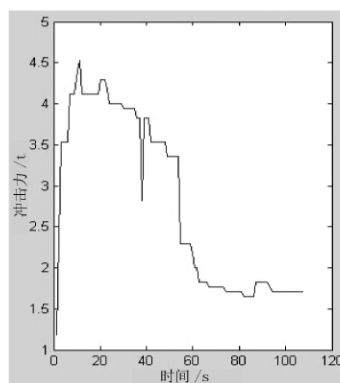


图2 矩形脉冲

Fig. 2 The rectangular pulsation

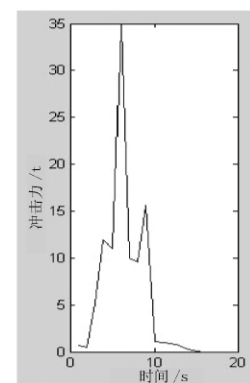


图3 尖峰型脉冲

Fig. 3 The peak pulsation

由(8)式可以看出:结构的最大位移与泥石流的密度、速度、结构的周期、刚度有关。

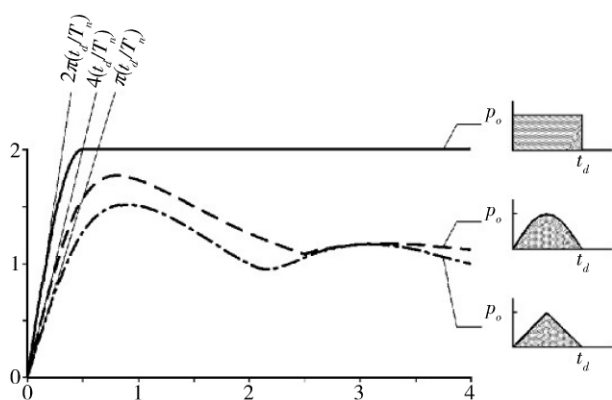


图4 三种脉冲荷载的位移-反应谱

Fig.4 Shock spectrum for three force pulses of equal amplitude

2 数值模拟

2.1 建立模型

为了研究泥石流对结构的冲击作用,采用了一个二层的框架结构,柱截面面积为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,层高 3.6 m ,板厚 100 mm ,采用 C35 混凝土,弹性模量 E 为 $3.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 。模型如图 5 所示,网格划分如图 6 所示。取定泥石流密度为 $2.13 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$,流速为 8 m/s ,泥石流与结构作用处深度为 2.7 m 。泥石流整体冲击力为 181.3 kPa ,石块冲击力为 597.6 kPa 。把整体冲击力简化为矩形荷载,把石块的冲击力简化为三角形荷载,通过叠加得到理想的时间与力的冲击关系曲线,通过四种工况施加于底层框架柱上,工况具体布置如下:

工况一:框架柱只受泥石流的整体冲击力作用(图 7a)。

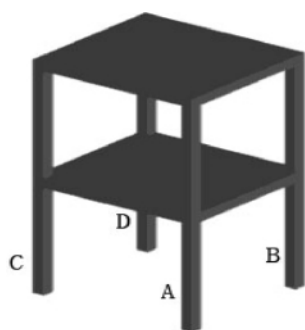


图5 模型图

Fig.5 Schematic of model

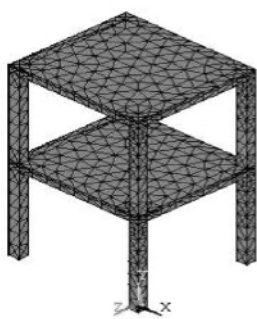


图6 网格化分

Fig.6 meshing model

工况二:框架柱受泥石流整体冲击力作用的同时,在 $1 \sim 2 \text{ s}$ 对框架柱施加了大石块的冲击力(图 7b)。

工况三:框架柱受泥石流整体冲击力作用的同时,分别在 $1 \sim 2 \text{ s}$ 和 $3 \sim 4 \text{ s}$ 对框架柱施加石块冲击力(图 7c)。

工况四:框架柱受泥石流整体冲击力作用的同时,每隔 1 s 对框架柱施加一次大石块的冲击力(图 7d)。

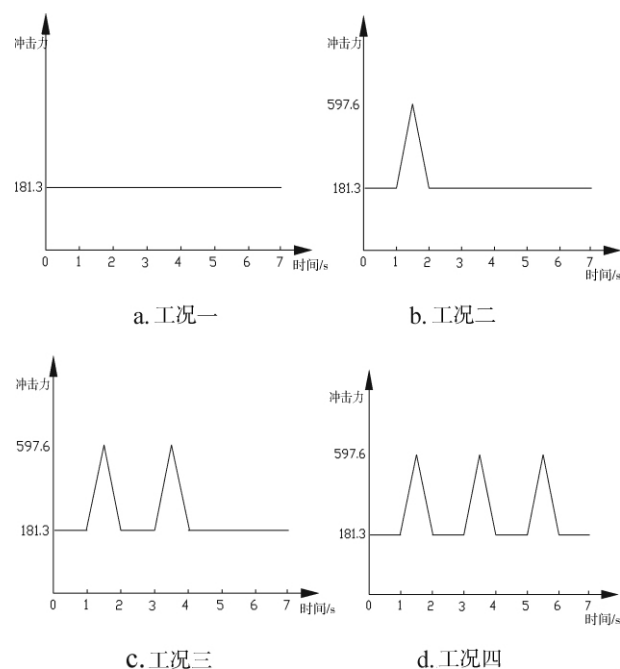


图7 四种工况

Fig.7 Four conditions

2.2 结果分析

本文分别提取了在四种工况作用下,在底层框架 A 柱柱底、柱顶及石块作用处的位移,并列于图 8 中进行了比较分析。

工况一(图 8a)。无大石块作用下,泥石流受整体的冲击作用,柱顶、柱底及石块作用处位移在一定时间内呈增加趋势,过后位移几乎不再发生变化,柱底、石块作用处及柱顶位移在相同时间内依次增加,其中柱底由于受到底部固端约束的作用,位移应为零,但由于所选节点离柱底 50 mm ,因此出现较小的位移变化。

工况二(图 8b)。第一次石块冲击作用使柱顶和石块作用处先出现位移增大后降低,出现凸起现象,在相同的时间内柱顶位移大于柱底位移,但到一

定时间后出现平缓下降,最终几乎不变,最大位移出现在柱顶。但柱底位移仍然接近工况一位移变化曲线,石块对柱底影响不大。

工况三(图 8c)。第一次石块冲击位移与工况二接近,但施加第二次石块冲击以后,柱顶和石块作用处位移又出现增大,增大位移明显大于第一次,且石块作用处的位移大于柱顶位移,此时刻柱子的最大位移出现在石块作用处,柱底位移几乎接近工况一,但在最大位移时刻有突起现象。

工况四(图 8d)。每隔 1 s 施加一次大石块冲击作用,进行三次大石块冲击,在柱顶和石块作用处每次都出现凸起现象,第一次冲击作用下柱顶位移大于石块作用处,后两次石块作用处位移增大,大于柱顶位移,同时第二次冲击位移最大。

在四种工况荷载作用下,虽然荷载只作用于柱 A,但其周围的柱也受到了影响,本文对在四种工况作用下柱 A 及其相邻柱 B、C、D 在石块作用处进行了对比分析,得到了其位移随时间变化曲线,如图 9 所示。

可以看出:由于荷载作用于柱 A,因此其位移变化较大,柱 B 和柱 C 为邻柱,位移变化几乎相同。柱 D 为对角柱,与邻柱相比,位移变化值略低于邻柱。本文提取了在工况一和工况三下柱子在 x 向和 z 向产生的最大位移、应力(表 1、2),最大位移出现在石块作用处和柱底之间,在工况一作用下最大应力出现在柱底,施加石块冲击后,最大应力出现在石块作用处,且应力增大,有石块冲击与无石块冲击相比应力增加 2~3 倍。同时在 y 方向位移和应力也发生了变化,同样也出现增加趋势。

为了比较理论计算与数值模拟结果(工况三),利用上述模型数据,得到结构的理论计算最大位移为 23.6 mm,几乎与数值模拟结果相接近。由于泥石流最大位移与速度有关,本文对不同流速下结构的理论最大位移与模拟最大位移进行了比较(图 10),可以看出二者基本接近。因此可以作为工程设计中的判断依据。在设计中要求结构位移 u 小于式(9)所得的最大位移。

3 结论

通过理论推导和有限元软件模拟,对一简单二层框架结构模型进行了分析比较,得到了以下几点结论:

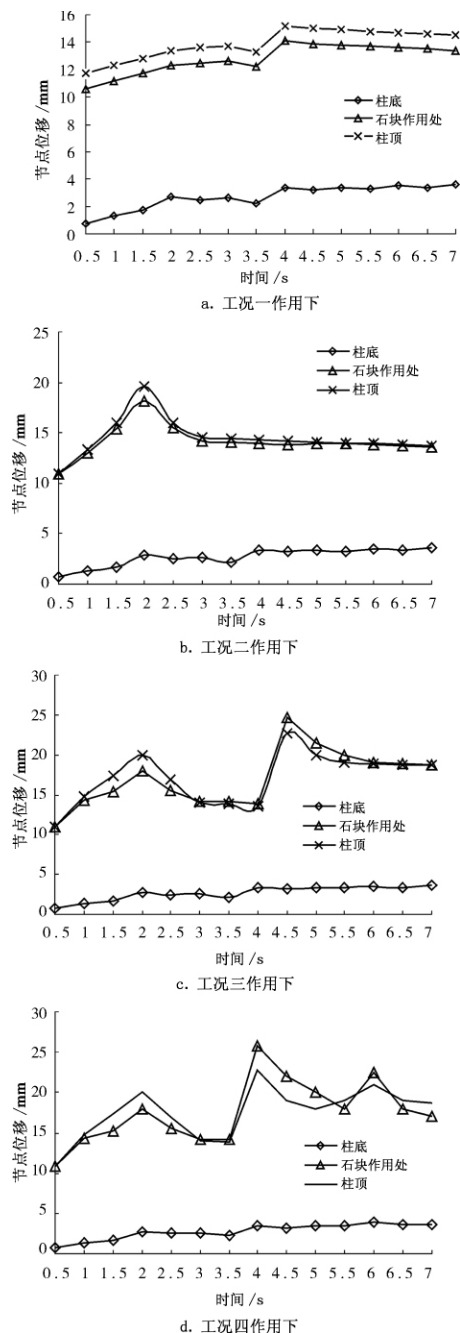
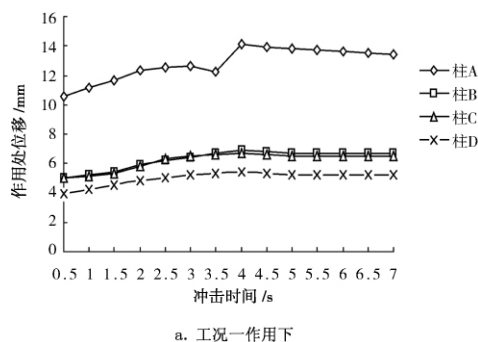


图 8 柱 A 的时间 - 位移曲线

Fig. 8 The Time-displacement curves of column A



a. 工况一作用下

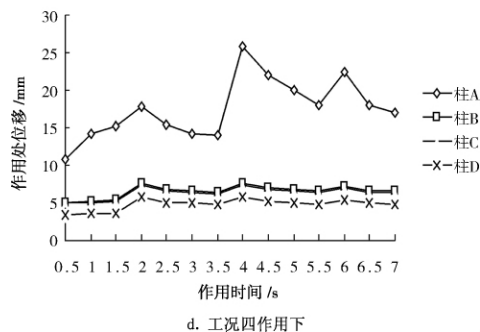
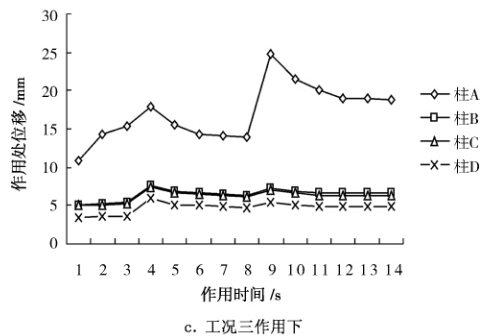
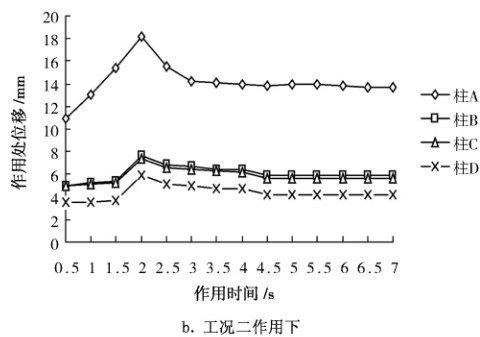


图 9 底层各柱的时间位移曲线
Fig. 9 Time - Displacement Curves of column A ,B ,C and D at the bottom of structure

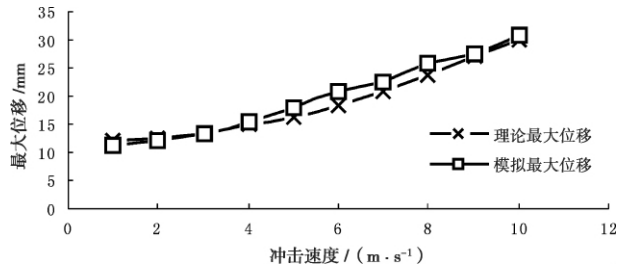


图 10 不同速度下理论与模拟最大位移比较
Fig. 10 Comparing maximal displacement of theory and simulation under different speeds

1. 柱子的位移主要由泥石流整体冲击力产生,当遇到大石块的冲击时,位移会进一步增加。无大石块作用时,柱底应力最大,泥石流冲击破坏最可能发生在柱底。当受大石块冲击时,柱可能受冲剪作用,在石块作用处可能发生冲剪破坏。大石块的冲击不仅使被冲击柱受到了影响,而且其邻柱和对角柱也受到了影响,其中对邻柱的影响程度要大于对角柱。

2. 结构的最大位移与泥石流的密度、速度、结构的周期、刚度有关。当同一结构在泥石流冲击作用下,随着流速增大,结构的最大位移就会增大。因此在工程设计中,可以取用当地泥石流发生的平均流速,得到结构的最大位移。当位移 $u > u_{dy,max}$ 说明结构能抵抗泥石流的冲击。

当位移 $u < u_{dy,max}$ 说明满足泥石流冲击条件。

3. 泥石流中大石块是导致建筑物破坏最关键的因素,是工程建设中必须考虑的问题,可以通过减小构件的刚度来减小冲击力。因此可以调节构件截面积和构件长度,或在泥石流多发区通过在构件前堆土或设置一些废旧橡皮轮胎来达到减小刚度的目的。

表 1 工况一作用下各柱的最大应力(kPa)和位移(mm)

Table 1 The maximum stress(kPa) and displacement(mm) of every column under condition 1

荷载	最大值	柱 A	位置	柱 B	位置	柱 C	位置	柱 D	位置
作用于 x 向	x 向应力	473.0	柱底	398.0	柱底	387.0	柱底	320.0	柱底
	z 向应力	69.1	柱底	58.2	柱底	62.0	柱底	47.0	柱底
	x 向位移	13.9	柱顶	6.9	柱顶	6.7	柱顶	5.4	柱顶
	z 向位移	2.0	柱顶	1.3	柱顶	1.1	柱顶	1.1	柱顶
作用于 z 向	x 向应力	62.6	柱底	52.0	柱底	59.0	柱底	43.0	柱底
	z 向应力	498.0	柱底	376.0	柱底	365.0	柱底	309.0	柱底
	x 向位移	1.9	柱顶	1.2	柱顶	1.1	柱顶	1.3	柱顶
	z 向位移	14.2	柱顶	7.1	柱顶	6.9	柱顶	5.3	柱顶

表 2 工况三作用下各柱的最大应力(kPa) 和位移(mm)

Table 2 the maximum stress (kPa) and displacement(mm) of every column under condition 3

荷载	最大值	柱 A	位置	柱 B	位置	柱 C	位置	柱 D	位置
作用于 x 向	x 向应力	721.0	冲击处	496.0	柱底	487.0	柱底	412.0	柱底
	z 向应力	89.1	柱底	67.0	柱底	64.0	柱底	56.0	柱底
	x 向位移	24.7	冲击处	8.2	柱顶	8.0	柱顶	6.5	之间
	z 向位移	4.1	柱顶	1.9	柱顶	1.6	柱顶	1.4	柱顶
作用于 z 向	x 向应力	79.3	柱底	65.0	柱底	62.0	柱底	51.0	柱底
	z 向应力	734.0	冲击处	483.0	柱底	485.0	柱底	410.0	柱底
	x 向位移	3.9	柱顶	1.8	柱顶	1.7	柱顶	1.7	柱顶
	z 向位移	25.0	冲击处	8.4	柱顶	8.1	柱顶	6.6	之间

参考文献(References)

[1] Institute of Mountain Hazards & Environment Chinese Academy of Sciences. Debris flows in China [M]. Beijing: The Commercial Press 2000: 10 – 13 [中国科学院 – 水利部成都山地灾害与环境研究所. 中国泥石流[M]. 北京: 商务印书馆 2000: 10 – 13]

[2] Wei Hong. Experiment research of impact of debris flow head on dam[J]. China Railway Science ,1996 ,17(3) : 50 – 62[魏鸿. 泥石流龙头对坝体冲击力的试验研究[J]. 中国铁道科学 ,1996 ,17 (3) : 50 – 62]

[3] Liu Leiji , Wei Hong. Study of impact of debris flow [J]. Journal of Sichuan Union University ,1997 ,1(2) : 99 – 102 [刘雷激,魏华. 泥石流冲击力研究. 四川联合大学学报 ,1997 ,1(2) : 99 – 102]

[4] Wu Jishan ,Kang Zhicheng ,Tian Lianquan ,et al. Debris flow observation and research in Jiangjia Ravine[M]. Beijing: Science Press , 1990: 63 – 155 [吴积善,康志成,田连权,等. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学出版社. 1990: 63 – 155]

[5] Zhang Yu ,Wei Fangqiang ,Jia Songwei ,et al. Experimental research of unreinforced masonry wall under dynamic impact of debris flow [J]. Journal of Mountain Science 2006 24(3) : 340 – 345 [张宇,韦方强,贾松伟,等. 砖砌体建筑在泥石流冲击作用下动态响应试验[J]. 山地学报 2006 ,24(3) : 340 – 345]

[6] Liu Hongkai ,Tang Hongmei ,Chen Yeying ,et al. Highway debris flow mechanics [M]. Beijing: Science Press 2007 24 – 39 [陈洪凯,唐红梅,陈野鹰,等. 公路泥石流流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 24 – 39]

[7] Zhang Yu ,Wei Fangqiang ,Wang Qing. Experimental research of reinforced concrete buildings struck by debris flow in mountain areas of western China [J]. Wuhan University of Natural Sciences 2007 ,12 (4) : 645 – 650 [张宇,韦方强,王青. 我国西部山区泥石流冲击作用下混凝土结构的实验研究[J]. 武汉大学自然科学学报, 2007 ,12(4) : 645 – 650]

Damege Mechanism of Frame Structures Impacted by Debris Flow

DI Shengkui ,LI Jian ,ZHANG Deqiang

(School of Civil Engineering ,Lanzhou University of Technology ,Lanzhou 730050 ,China)

Abstract: This paper deduces structure’s maximal displacement impacted by the debris flow. We can see that the maximum displacement is relevant to the density and velocity of debris flow ,the cycle and stiffness of structure. By simplified the impact force of debris flow ,using the finite element software to simulate the action of the two-story frame structure impacted by debris flow. The displacement process curve of the bottom of the frame column was obtained and analyze the ground floor column failure form. By compared between structure’s theory maximal displacement and simulation maximal displacement ,the limitation of the maximum displacement is obtained. It can provide a design reference for building impacted by debris flow.

Key words: debris flow; structure; impact force; displacement; stress