

DOI: 10.11779/CJGE2018S1013

冲击荷载下钢管混凝土桩林动力性能试验研究

冉永红^{1, 2}, 王秀丽^{1, 2}, 王朋^{1, 2}, 张智江^{1, 2}

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为有效地抵抗泥石流大块石冲击, 提出了一种钢管混凝土桩林拦挡坝。为了研究该结构在冲击荷载作用下的动力性能, 对其进行了考虑多工况的冲击荷载作用的试验研究。通过分析结构的应变、位移和加速度, 总结了结构的响应模式, 并与数值模拟进行对比。结果表明, 结构的典型响应模式可以概括为以下几种: 构件轻微损伤、构件局部破坏、连接节点破坏; 随着冲击能量和冲击高度的增加, 结构的应变和位移均增大; 结构的加速度随冲击高度的增加而增大, 而随冲击物质量的增加而减小; 整个冲击过程从冲击区响应至整体结构响应耗时很短, 约为 0.6 ms; 桩管受冲击时结构能发挥良好的整体耗能作用, 而撑管受冲击时整体结构耗能作用不明显; 试验结果与数值模拟吻合较好; 钢管混凝土桩林具有良好的抗冲击性能。

关键词: 钢管混凝土桩林; 冲击荷载; 动力性能; 响应模式

中图分类号: TU312.1; X913.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S1-0081-06

作者简介: 冉永红(1988-), 男, 博士研究生, 主要从事泥石流防灾减灾工程技术等方面研究。E-mail: than023@qq.com。

Experimental study on dynamic performance of concrete filled steel tubular piles under impact loads

RAN Yong-hong^{1, 2}, WANG Xiu-li^{1, 2}, WANG Peng^{1, 2}, ZHANG Zhi-jiang^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou 730050, China)

Abstract: A kind of concrete filled steel tubular pile is proposed to resist the impact of boulders. In order to study the dynamic performance of the structure under impact loads, the tests considering impact loads of multi working conditions are carried out. The response modes of the structure are summarized and compared with the numerical simulations by analyzing the strain, displacement and acceleration of the structure. The results show that the typical response modes of the structure can be summarized as follows: slight damage, local damage and joint failure. The strain and displacement of structure increase with the enlarging impact energy and height. The acceleration of structure increases with the raising impact height, while decreases with the raising impact mass. The impact process from the response of impact zone to that of whole structure takes a very short time, about 0.6 ms. The whole structure plays a great role in energy dissipation when the pile tube is subjected to impact loads, and it is not obvious when the bracing tube subjected to impact loads. The experimental results are in good agreement with the numerical simulations. The concrete filled steel tubular pile is of good impact resistance.

Key words: concrete filled steel tubular pile; impact load; dynamic performance; response mode

0 引言

泥石流是一种广泛分布于世界各国山区的自然灾害^[1], 中国山区面积广大, 近年来泥石流灾害频繁发生, 给山区人民和国家造成了重大损失。为确保山区人民生命及财产的安全, 开展泥石流灾害治理工程十分迫切。目前有关泥石流防灾减灾已有研究, 主要包括泥石流机理、冲击力以及工程防治技术等^[2-5]。文献[2]提出了能够预测泥石流流速的理论模型, 并通过共计 350 个实验室和现场试验验证了该模型; 文献[3]在

总结国内关于泥石流起动机理研究现状的基础上给出了相关理论和试验研究的一些建议; 文献[4]在介绍国内泥石流监测预报研究成果的同时指出了其中存在的问题, 并提出了一种泥石流灾害监测预报系统的结构模型; 文献[5]通过研究泥石流冲击力, 总结出大石块的冲击是导致泥石流拦挡结构破坏的一个主要因素。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278236); 国家科技支撑计划项目(2011BAK12B07)

收稿日期: 2018-02-24

另外,为了治理泥石流灾害,国内修建了重力坝、格栅坝及柔性体系等拦挡结构^[6]。然而,这些拦挡坝大都是靠工程经验设计而成,缺乏对结构的系统性研究,尤其缺乏新型结构的研究。况且,早期的拦挡结构以浆砌片石坝居多,其抵抗冲击破坏的能力有限,尤其在大型泥石流冲击下容易发生严重的整体破坏(溃坝),这样不仅不能减轻泥石流灾害,反而会加重灾害^[7]。鉴于此,本文提出了一种新型泥石流拦挡结构—钢管混凝土桩林,以期有效地减轻泥石流灾害。

目前对于钢管混凝土在冲击荷载下的动力性能也有相关研究^[8-12],总结可知钢管混凝土具有很好的抗冲击性能。文献[8]提出了冲击荷载下圆钢管混凝土试件的简化模型;文献[9]研究了轴向力、端部约束和材料性能等参数对构件吸收侧向冲击能的影响;文献[10, 11]通过试验研究了在火灾及高温作用下钢管混凝土短柱的抗冲击性能;文献[12]通过数值模拟和模型试验研究了钢管混凝土梁在侧向冲击荷载作用下的动力响应。然而,这些研究都是针对建筑结构中的钢管混凝土单构件(梁或短柱)的冲击动力性能,缺乏整体结构抗冲击性能的研究。同时,利用钢管混凝土的高抗冲击性能将其应用于泥石流防治结构的研究尚未见报道。本文利用自主设计的固体冲击试验加载架,对所提出的钢管混凝土桩林进行抗冲击试验研究。对无侧向约束的试验模型在冲击荷载作用下的位移、加速度和应变进行分析,并与数值模拟进行对比,总结了结构在冲击荷载下的响应模式。

1 试验概况

1.1 试验模型

钢管混凝土桩林由桩管和撑管构成,桩管分前后两排,各排桩心距均为375 mm;前排为迎流面,共5根桩管;后排为背流面,共4根桩管;撑管沿桩管高度方向共分布5层,层间距为250 mm。

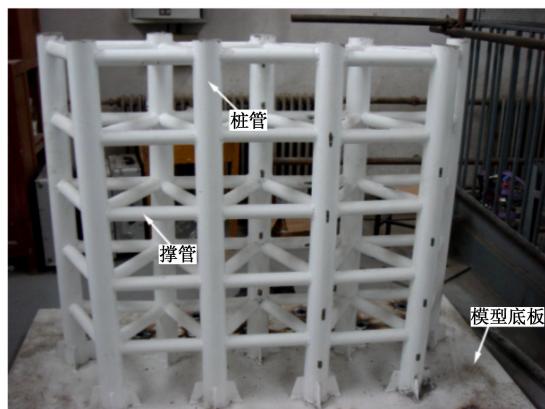


图1 钢管混凝土桩林试验模型

Fig. 1 Test model of concrete filled steel tubular pile

桩管与撑管之间采用相贯焊接连接,前后两排桩管通过撑管连接,平面呈等边三角形分布,从而构成整体格栅结构,撑管起加强结构整体性的作用。本次试验模型如图1所示,桩管截面尺寸为89 mm×3.5 mm,内部采用C20细石混凝土浇灌;支撑管为空心钢管,截面尺寸为42 mm×3 mm;桩管和撑管都采用Q235B钢。

1.2 试验设备

本次试验在自主设计的固体冲击试验加载架(图2)上完成,该加载架由上部平台和轨道组成。试验加载架总高度约为6.5 m,轨道长度为5.7 m,轨道坡度为42°,上部平台尺寸为3 m×3.3 m。冲击加载时,冲击物在平台与轨道顶端交接处无初速度释放,在重力作用下沿轨道自由滚动,从而对固定在轨道底端处的试验模型进行冲击。轨道底端的高度(冲击出口高度)可根据需要进行调节,以实现多种加载工况。冲击物采用直径分别为100 mm(4.1 kg)、200 mm(33 kg)和300 mm(110 kg)的3种钢球,冲击速度约为10 m/s。

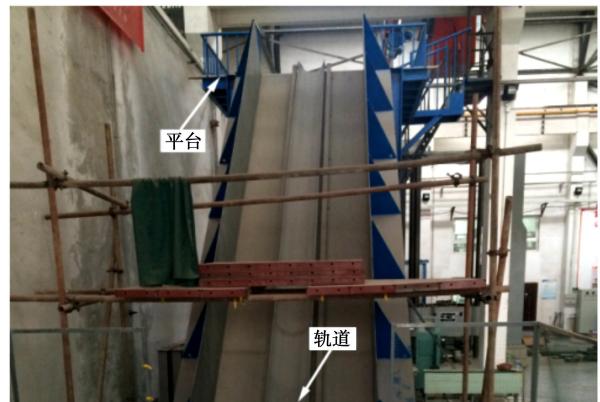


图2 试验现场

Fig. 2 Test site

试验中分别采用应变片(电阻值120Ω,灵敏系数2.12,栅长宽5 mm×3 mm,半桥接法)、CLMD2系列拉线式动态位移传感器(最大量程为1000 mm)和DH151压电式加速度传感器(最大量程为30000g)对桩林在冲击荷载下的动态应变、动态位移和加速度进行采集,其中动态应变数据采用北京东方所INV3060V测试系统采集,动态位移数据和加速度数据采用江苏东华DH5922测试系统采集。

1.3 测点布置

试验中冲击物对桩管和撑管分别进行冲击,考虑冲击能量和冲击点位置对钢管混凝土桩林动力响应的影响,设计如表1所示的试验加载工况。结构的应变、位移和加速度测点布置情况如图3所示,其中Y1—

Y36 为应变测点, D1—D6 为位移测点, A1—A3 为加速度测点。

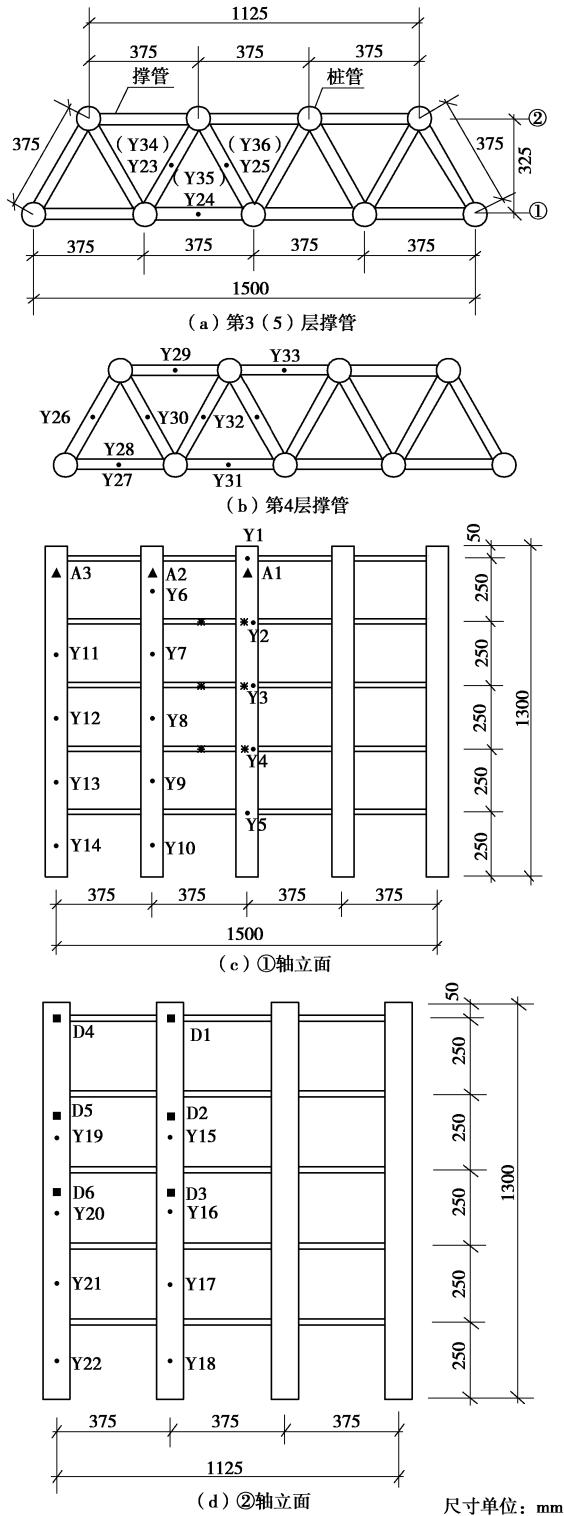


图 3 传感器布置图

Fig. 3 Layout of sensors

2 数值模拟

泥石流块石对拦挡结构的冲击是动力问题, 故采用显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对本试验进

表 1 试验加载工况

Table 1 Test loading cases

冲击物直径 /mm	工况编号		冲击高度 /mm
	冲击桩管	冲击撑管	
100	Z-1-1	C-1-1	500
	Z-1-2	C-1-2	750
	Z-1-3	C-1-3	1000
200	Z-2-1	C-2-1	500
	Z-2-2	C-2-2	750
	Z-2-3	C-2-3	1000
300	Z-3-1	C-3-1	500
	Z-3-2	C-3-2	750
	Z-3-3	C-3-3	1000

注：表中的冲击高度分别对应于图3(c)中桩管和撑管上五角星的高度，其中五角星分别标注了试验中冲击桩管和撑管的冲击点位置。

行数值模拟。数值模拟分析中采用与试验相同的结构模型和工况参数,冲击物采用 solid164 实体单元,不考虑其变形,材料模型采用刚体模型;混凝土采用 solid164 实体单元,材料模型采用理想弹塑性模型;钢管采用 shell163 薄壳单元,材料模型采用塑性随动模型,同时采用 Cowper-Symonds 模型来考虑动力荷载下材料的应变率效应。Cowper-Symonds 模型的屈服应力可用与应变率有关的因素表示为

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}}) \quad . \quad (1)$$

式中 σ_0 为初始屈服应力, 取 $\sigma_0=235$ MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; C 和 P 为应变率参数, 取 $C=40.0$, $P=5.0$; β 为硬化参数, 取 $\beta=0.2$; $\varepsilon_p^{\text{eff}}$ 为有效塑性应变, 取 $\varepsilon_p^{\text{eff}}=0.2$; E_p 为塑性硬化模量, $E_p=E_{\tan}E/(E-E_{\tan})$, 其中, E 为弹性模量, 取 $E=206$ GPa, E_{\tan} 为切线模量, 取 $E_{\tan}=660$ MPa。

3 试验结果及分析

3.1 试验现象

当直径 100 mm 的冲击物撞击桩管和撑管时, 由于冲击能量较小, 整体结构处于弹性工作阶段, 只在撞击点处出现轻微损伤。当 200 mm 和 300 mm 直径的冲击物撞击桩管和撑管时, 在桩管撞击点处出现较明显的凹陷变形; 但由于核心混凝土的支撑作用, 凹陷范围比较小, 桩管基本保持原有的承载能力。当 200 mm 的冲击物撞击撑管时, 在撞击点附近出现严重的塑性变形, 撑管产生局部弯曲破坏; 撑管与桩管节点连接处产生明显裂缝, 此时撑管还具有一定的承载能力。当 300 mm 的冲击物撞击撑管时, 撑管产生非常严重的塑性变形; 同时撑管与桩管的连接焊缝被撕裂, 节点发生破坏。综上所述, 在冲击荷载作用下, 钢管混凝土桩林会呈现以下 3 种典型的响应模式: ①撞击

点处轻微损伤，整体结构处于弹性工作状态；②撞击点附近出现严重塑性变形，构件产生局部弯曲破坏；③节点处连接焊缝被撕裂，节点发生破坏。由于试验条件限制及出于安全考虑，本次试验未设计桩管破坏的试验工况。试验结果与数值模拟吻合较好，见图 4。

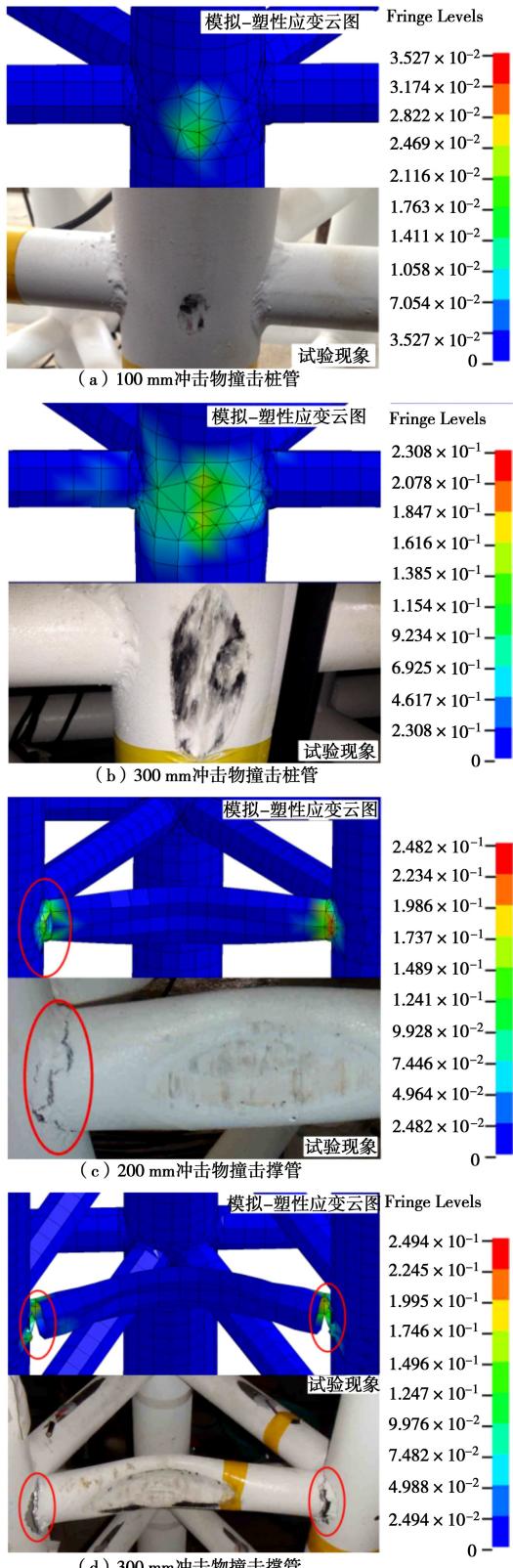


图 4 试验现象

Fig. 4 Experimental phenomena

3.2 动态应变

当直径 100 mm 的冲击物撞击桩管和撑管时，由于冲击能量较小，整体结构的应变响应也很小，故不做分析。以工况 Z-3-3 为例，其余工况下结构响应规律相同，各测点的峰值应变如表 2 所示。可以看出，应变由冲击点开始响应，在冲击瞬间，仅在冲击区（冲击点附近区域）产生明显应变，然后应力波迅速向非冲击区扩散并耗散冲击能量，从冲击区开始响应至整体结构开始响应耗时很短，约为 0.6 ms。受冲击桩管的应变是由冲击荷载直接引起的，其它桩管的应变是由撑管的传力作用引起的；而两排桩管根部（支座处）峰值应变均较大，说明撑管有效地将冲击能量传递至结构的各个部位，使结构产生了明显的整体响应。

表 2 测点峰值应变

Table 2 Peak strains at measurement points

测点	$\mu\epsilon$	T_m /ms	测点	$\mu\epsilon$	T_m /ms	测点	$\mu\epsilon$	T_m /ms
1	491	300.75	13	448	301.10	25	321	301.03
2	925	300.70	14	682	301.16	26	565	301.05
3	693	300.79	15	427	300.73	27	288	300.91
4	528	300.95	16	466	300.82	28	660	301.05
5	694	301.07	17	571	301.09	29	343	301.05
6	258	300.75	18	987	301.11	30	814	300.83
7	287	300.81	19	261	300.95	31	336	300.67
8	349	300.93	20	314	301.07	32	1467	300.69
9	224	301.05	21	568	301.09	33	431	300.95
10	632	301.08	22	896	301.13	34	307	301.11
11	312	300.95	23	316	301.15	35	281	301.06
12	365	301.07	24	274	301.04	36	311	301.09

注： T_m 为达到峰值应变的时刻。

另外，斜向撑管的峰值应变大于横向撑管，说明斜向撑管在整个冲击过程中起到了很好的传力作用。冲击撑管时，冲击区测点的峰值应变较大，而非冲击区测点的峰值应变很小。这是由于撑管是空心钢管，在较大冲击能量下发生了严重变形，其变形耗散了大部分的冲击能量，于是结构整体响应不明显。

3.3 动态位移

试验中不同工况下各测点的峰值位移如图 5 所示。可以看出，当冲击能量相同时，各测点的峰值位移随着冲击高度的增加而增大；同一工况下（冲击能量和冲击高度相同），各测点峰值位移随着测点高度的增加而增大。分析可知，钢管混凝土桩柱仅在结构底部有固定约束（悬臂结构），加载点离悬臂端越近（即冲击高度越高）则结构位移响应越大；同一工况下，离悬臂端越近的测点峰值位移也越大。当冲击高度相同时，各测点的峰值位移随冲击能量的增加而显著增

大, 表明冲击能量是影响结构位移的重要因素。另外, 同一工况下, 桩管受冲击时各测点的峰值位移均大于撑管受冲击时的峰值位移, 且位移差值随着冲击能量的增加而显著增大。

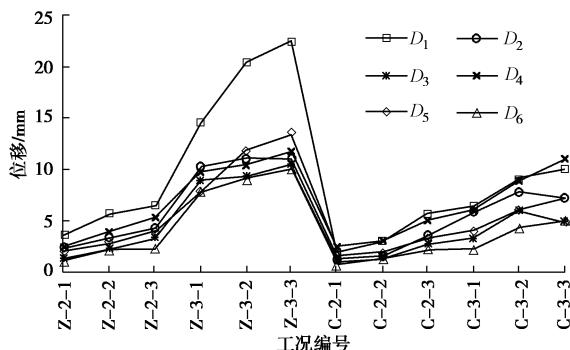
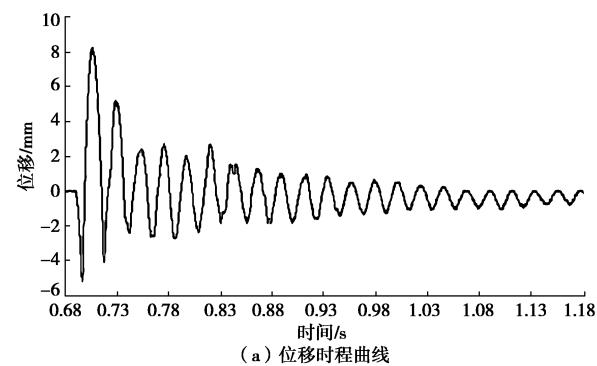


图 5 各测点峰值位移

Fig. 5 Peak displacement of measurement points

以位移最大测点 D_1 为例, 在工况 Z-2-3 下测点 D_1 的位移时程曲线如图 6 (a) 所示, 其余测点位移规律性与此相同, 不再逐一列举。可以看出, 测点位移在冲击的瞬间达到峰值, 初始位移沿冲击方向, 然后上下波动, 并逐渐衰减直至稳定。数值模拟和试验中测点 D_1 在不同工况下的峰值位移见图 6 (b), 测点位移的试验结果与模拟结果吻合较好。



(a) 位移时程曲线

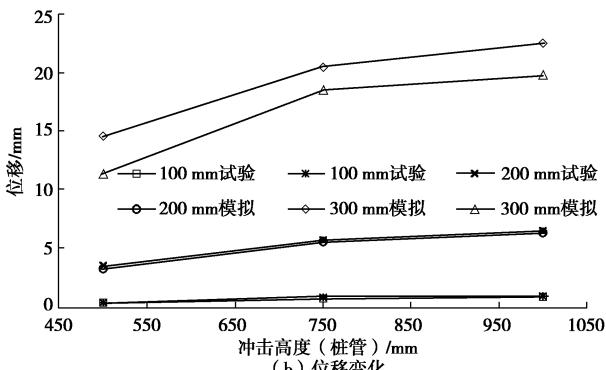


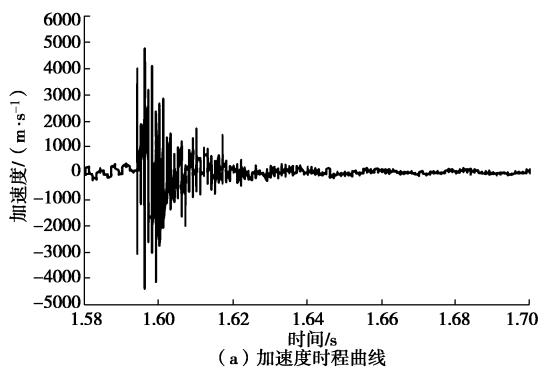
图 6 位移

Fig. 6 Displacements

3.4 加速度

测点 A_1 的加速度时程曲线见图 7 (a), 其余测点加速度规律性与此相同。可以看出, 测点加速度在冲

击的瞬间达到峰值, 然后上下波动, 并在结构自身阻尼的作用下逐渐衰减直至稳定, 整个过程历时很短。数值模拟和试验中测点 A_1 在不同工况下的峰值加速度见图 7 (b), 峰值加速度随着冲击高度增加而增大, 但是随着冲击物质量的增加反而减小。分析可知, 当冲击物质量较小时, 冲击物与结构撞击后立即被反弹, 接触时间极短, 结构变形很小, 整体协调振荡变形; 随着冲击能量的增大, 冲击物与结构的接触时间加长, 抑制结构的振动, 同时结构的局部变形扩大, 刚度分配不均匀, 因此整体结构振动较慢。



(a) 加速度时程曲线

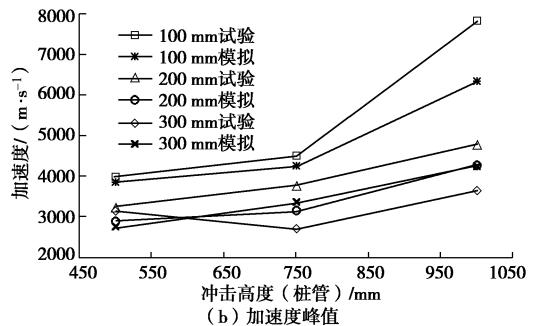


图 7 加速度

Fig. 7 Accelerations

4 结 论

本文提出了一种钢管混凝土桩林拦挡坝, 并对其进行了冲击荷载作用下的试验研究及数值模拟, 通过对分析不同的冲击能量、冲击高度下结构的动态应变、动态位移和加速度, 得到了以下结论:

(1) 在冲击荷载作用下, 钢管混凝土桩林会呈现 3 种典型的响应模式: ①撞击点处轻微损伤, 整体结构处于弹性工作状态; ②撞击点附近出现严重塑性变形, 构件产生局部弯曲破坏; ③节点处连接焊缝被撕裂, 节点发生破坏。试验结果与数值模拟吻合较好。

(2) 冲击瞬间, 应变由冲击区开始响应, 然后应力波向非冲击区迅速扩散并耗散能量, 从冲击区开始响应至整体结构开始响应耗时很短, 约为 0.6 ms。结构支座处峰值应变较大, 斜向撑管在整个冲击过程中起到了很好的传力作用。冲击撑管时, 冲击区测点

的峰值应变较大, 而非冲击区测点的峰值应变很小。

(3) 当冲击能量相同时, 测点位移随着冲击高度的增加而增大; 当冲击高度相同时, 各测点的峰值位移随冲击能量的增加而显著增大; 当冲击能量和冲击高度相同时, 测点位移随着测点高度的增加而增大。加速度峰值随着冲击高度的增加而增大, 但是随着冲击物质量的增加反而减小。

(4) 本试验中, 整个冲击过程中结构只出现了局部的破坏, 整体结构还能继续发挥作用, 体现出钢管混凝土桩具有良好的抗冲击性能。

参考文献:

- [1] 吴积善, 田连权. 论泥石流学[J]. 山地学报, 1996, **14**(2): 89 - 95. (WU Ji-shan, TIAN Lian-quan. On the debris flow science[J]. Mountain Research, 1996, **14**(2): 89 - 95. (in Chinese))
- [2] JULIEN P Y, PARIS A. Mean velocity of mudflows and debris flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **136**(9): 676 - 679.
- [3] 倪化勇, 唐川. 中国泥石流起动物理模拟试验研究进展[J]. 水科学进展, 2014, **25**(4): 606 - 613. (NI Hua-yong, TANG Chuan. Advances in the physical simulation experiment on debris flow initiation in China [J]. Advances in Water Science, 2014, **25**(4): 606 - 613. (in Chinese))
- [4] 崔鹏, 刘世建, 谭万沛. 中国泥石流监测预报研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2000, **9**(2): 10 - 15. (CUI Peng, LIU Shi-jian, TAN Wan-pe. Progress of debris flow forecast in China [J]. Journal of Natural Disasters, 2000, **9**(2): 10 - 15. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 康志成, 李焯芬, 马蔼乃, 等. 中国泥石流研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004. (KANG Zhi-cheng, LI Zhuo-fen, MA Ai-nai, et al. Research on debris flow in China[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese))
- [7] 陈晓清, 游勇, 崔鹏, 等. 汶川地震区特大泥石流工程防治新技术探索[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, **45**(1): 14 - 22. (CHEN Xiao-qing, YOU Yong, CUI Peng, et al. New control methods for large debris flows in Wenchuan earthquake area[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, **45**(1): 14 - 22. (in Chinese))
- [8] 瞿海雁, 李国强, 孙建运, 等. 侧向冲击作用下钢管混凝土构件的简化分析模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, **39**(1): 35 - 41. (QU Hai-yan, LI Guo-qiang, SUN Jian-yun, et al. Simplified analysis model of circular concrete-filled steel tube specimen under lateral impact[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, **39**(1): 35 - 41. (in Chinese))
- [9] BAMBACH M R. Design of hollow and concrete filled steel and stainless steel tubular columns for transverse impact loads[J]. Thin-Walled Structures, 2011, **49**(10): 1251 - 1260.
- [10] 霍静思, 任晓虎, 肖岩. 标准火灾作用下钢管混凝土短柱落锤动态冲击试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(4): 9 - 20. (HUO Jing-si, REN Xiao-hu, XIAO Yan. Impact behavior of concrete-filled steel tubular stub columns under ISO-834 standard fire[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(4): 9 - 20. (in Chinese))
- [11] 任晓虎, 霍静思, 陈柏生. 高温后钢管混凝土短柱落锤动态冲击试验研究[J]. 振动与冲击, 2011, **30**(11): 67 - 73. (REN Xiao-hu, HUO Jing-si, CHEN Bai-sheng. Dynamic behaviors of concrete-filled steel tubular stub columns after exposure to high temperature [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, **30**(11): 67 - 73. (in Chinese))
- [12] 王蕊, 李珠, 任够平, 等. 钢管混凝土梁在侧向冲击荷载作用下动力响应的试验研究和数值模拟[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(10): 34 - 40. (WANG Rui, LI Zhu, REN Gou-ping, et al. Experimental study and numerical simulation of the dynamic response of concrete filled steel tubes under lateral impact load[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(10): 34 - 40. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)