

文章编号: 1008-2786-(2018)3-401-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000336

电力构筑物缓冲垫层的落石冲击试验 及结构的冲击响应

高 亮, 刘维维, 陶 磊, 张俊发

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 西安 710048)

摘 要: 针对水电站落石灾害问题, 通过将土垫层及 S 型钢、彩钢板作为防护结构进行落石冲击试验, 探讨其缓冲耗能规律, 并提出冲击荷载模型, 通过有限元模拟冲击作用力并加载至某出线楼顶层, 研究结构屋顶和设备层典型位置的动态响应。结果显示: 加速度和冲击力随时间变化曲线基本呈三角形脉冲; 土垫层的缓冲性能随着垫层厚度的增加而增加, 冲击作用持续时间接近 0.03 s; S 型钢具有良好的缓冲性能, 可用于构筑物侧墙的防护; 提出 S 型钢 + 彩钢板缓冲防护体系, 其冲击持续时间约为 0.04 s; 随垫层厚度的增加, 结构动力响应的幅值明显下降; 并对不同落石高度及土垫层厚度条件下该出线楼内电气设备振动情况进行了评价。研究结论可为后期工程结构落石灾害的防护设计提供参考。

关键词: 落石冲击作用; 动态冲击试验; 缓冲垫层; 冲击荷载模型; 动力响应

中图分类号: X43; TV32

文献标志码: A

落石灾害是山地区域常见的一种地质灾害, 具有突发性强, 破坏后果严重等特点, 对生命线工程危害极大。针对工程结构的落石冲击防护, 学者们主要从落石冲击力、缓冲防护、落石冲击下结构的动力响应三个方面进行了研究。国内外研究学者基于 Hertz 完全弹性接触理论, 研究落石对防护结构的冲击过程, 通过理论推导^[1-4]、落石试验^[5-7]、数值模拟手段^[8-11], 针对落石冲击力的理论计算方法和冲击力影响因素的参数分析方法, 重点从落石及冲击对象两方面, 推导了落石冲击力的经验公式。随着新型材料的出现及各种工程防护装置的灵活应用, 工程技术人员开发了多种新型落石冲击防护体系, 并就相关的技术难题进行了探讨^[12-13]。目前在实际工程中, 通常在构筑物外表面水平面上覆盖一定厚度的缓冲垫层材料来防止落石冲击灾害, 例如应用最广的砂砾石或黏土材料, 但存在垫层过厚和冲

击力算法不统一的问题。另外, 对于建(构)筑物外墙鲜有专门的落石防护措施。

近年来, 结构受冲击荷载作用的动力响应研究逐渐增多, 涉及爆炸冲击、连续倒塌、落石冲击等各个方面。落石冲击作用下结构的动力响应研究主要集中在构件层面, 且多集中在梁、混凝土板、挡土墙等构件的动力响应方面^[14], 整体结构的动力响应研究较少^[15], 目前处于探索阶段。

本文基于对落石灾害多发地区电力构筑物的防护, 从电力构筑物屋面和外墙两个方面考虑防护方法, 通过落石冲击试验探讨适合于屋顶和外墙防护的垫层材料和结构及其缓冲性能; 并利用冲击试验提出的冲击荷载模型, 以黄河上游某水电站户外出线楼为研究对象, 通过有限元模拟对落石冲击作用下电力构筑物的动力响应进行评价。以期为工程结构的落石冲击防护设计及优化提供参考。

收稿日期(Received date): 2017-2-21; 改回日期(Accepted date): 2017-2-24

基金项目(Foundation item): 陕西省自然科学基金项目(2018JQ5081); 陕西省教育厅科学研究计划专项项目(17JK0567); 国家自然科学基金项目(51279162)。[National Natural Science Foundation of Shaanxi Province(2018JQ5081); Science Research Program of Education Department of Shaanxi Province(17JK0567); National Natural Science Foundation of China(51279162)]

第一作者(Biography)及通讯作者(Corresponding author): 高亮(1984-), 女, 陕西榆林人, 工学博士, 讲师, 主要研究方向: 工程结构抗风及制振、落石冲击研究。[GAO Liang(1984-), female, Ph. D., lecturer, specialized in structural wind engineering and rockfall impactation] E-mail: 156820773@qq.com

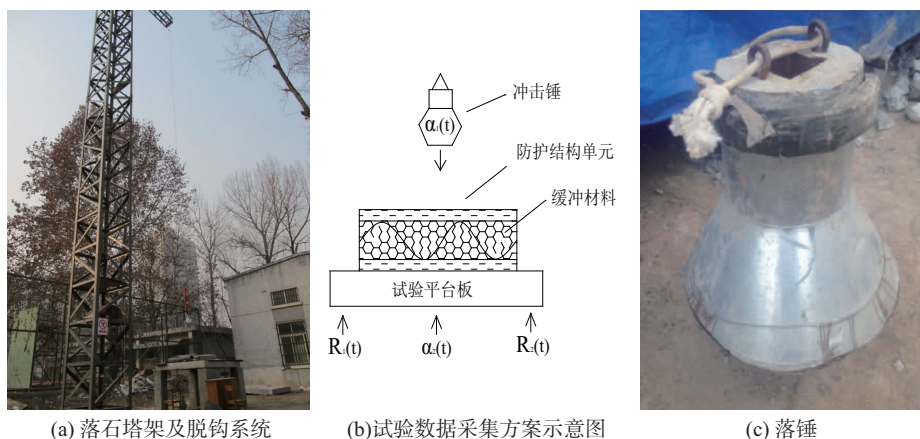


图1 落石冲击实验平台

Fig. 1 (a) The tower used in rockfall impact; (b) Test data acquisition scheme; (c) Drop Hammer

1 落石冲击下土垫层及 S 型钢组合垫层缓冲性能的试验研究

屋盖缓冲材料选取易得且低成本的土体, 建(构)筑物外墙面的落石防护拟采用 S 型钢与彩钢板的组合, 故需研究落石冲击下设有土垫层钢筋混凝土板及 S 型冷弯薄壁型钢的缓冲性能。利用西安理工大学大型落石冲击试验平台, 落石塔架及脱钩系统如图 1(a) 所示, 其中试验数据采集方案如图 1(b) 所示, 以自制质量为 46.5 kg 的外包白铁皮的钢筋混凝土块体作为落锤来模拟落石(如图 1(c) 所示), 开展冲击试验研究。

1.1 缓冲材料

(1) 土垫层: 粉质黏土。经试验测试可知所选土体的具体参数为: 天然密度 $\rho = 1.53 \text{ g/cm}^3$; 含水率 $\omega = 24.34\%$; 干密度 $\rho' = 1.23 \text{ g/cm}^3$; 液限 $\omega_l = 34.1\%$, 塑限 $\omega_p = 18.6\%$, 塑性指数 $I_p = \omega_l - \omega_p = 15.5$ 。

(2) S 型冷弯薄壁型钢: 彩钢板和彩钢板 + 自设计截面的 S 型钢的组合体两种缓冲防护方案。方案一: 彩钢板。彩钢板的尺寸为 $1600 \times 900 \times 100 \text{ mm}$, 其中芯材为密度 16 kg/m^3 的阻燃聚乙烯。方案二: 彩钢板与 S 型钢的组合体, 以下简称组合体。每块彩钢板下放置四根 S 型钢, 四根 S 型钢等间距且对称放置, 彩钢板与 S 型钢通过自攻螺钉固定, 见图 2。S 型钢为自设计截面冷弯薄壁型钢, Q235 钢制作, 其横截面形状及尺寸见图 2a, S 型钢的厚度为 2.5 mm, 单根长度为 1600 mm, 横截面面积为 749.63 mm^2 , 单位长度重量为 5.885 kg/m 。

1.2 试验工况

试验落石垂直冲击铺设有垫层的钢筋混凝土

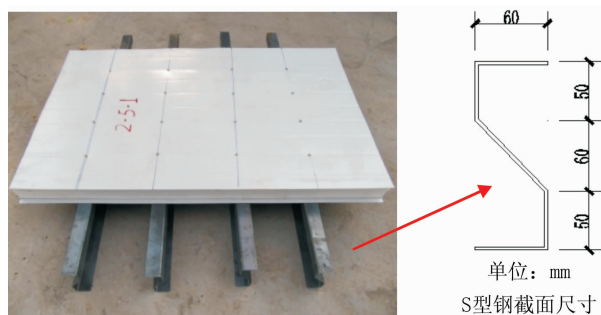


图2 彩钢板与 S 型钢的组合垫层装置

Fig. 2 The combination of color plate and S steel

土板。

工况编号形式为: a(缓冲垫层厚度代号或垫层类型) - b(落石自由下落高度/m) - c(试验次序)。土垫层试验中缓冲垫层厚度代号分别为: 30 cm、40 cm、50 cm; 落石自由下落高度分别为: 5 m 和 10 m; 试验次序分别为 1、2、3, 同一缓冲垫层厚度、落石同一自由下落高度情况下, 进行三次重复试验, 以减小试验误差。例如, 试验工况 40 - 5 - 1 表示土垫层厚度为 40 cm, 落石 5 m 高度自由下落的第一次试验。对于 30 cm 厚度土垫层, 以免落石 10 m 下落高度情况下钢筋混凝土板被破坏, 影响后续试验的顺利进行, 对于 30 cm 厚度垫层未进行 10 m 高度的冲击试验。总计 5 组 15 次动态冲击试验。

组合垫层试验中垫层类型分为彩钢板和 S 型钢 + 彩钢板这两种, 用代号 C 代表彩钢板, 代号 SC 代表 S 型钢 + 彩钢板这一组合。以工况 SC - 10 - 3 为例进行说明, SC - 10 - 3 表示以 S 型钢 + 彩钢板作为缓冲防护方案, 落石从 10 m 高度自由下落的第 3 次试验。对于彩钢板, 落石从 10 m 高度下落可能

砸穿混凝土板,影响后续试验的进行,只进行5 m高度的试验;对于组合体,分别进行落石5 m、10 m高度下落的试验。总计3组9次试验。

1.3 土垫层试验分析

落石冲击设有土垫层钢筋混凝土板的过程中,落石没有出现回弹现象,落石下落后砸入土中,土体局部受到扰动,落石进入到土体中的深度在11~16 cm之间。落石冲击土体的声音比较沉闷,冲击作用过程比较平缓。

试验过程中采集了各工况的加速度、冲击力随时间变化曲线。采样频率为20 000 Hz,并经过2000 Hz低通滤波处理,得到15次试验的加速度和冲击力随时间变化曲线,工况40-5-2的加速度和冲击力波形图如图3所示。

图3的四条冲击力曲线的形状基本一致,四条

冲击力曲线均出现波动,但最大峰值只出现了一次,说明冲击振动是以波的形式传播的,是一个振动逐渐衰减的过程。落石冲击过程中混凝土板传给四个角柱顶部总的冲击力峰值为58 896 N。由图3e可知,工况40-5-2加速度曲线比较光滑,整个冲击过程只出现了一次峰值,说明冲击过程中落石没有出现回弹,加速度峰值为606 m/s²。

对试验过程中采集到的落石加速度数值、冲击力数值进行整理,选取峰值区段作图,如图4所示。可见,加速度曲线基本呈三角形脉冲状。为了方便研究和计算,将落石冲击荷载简化为三角形脉冲荷载来计算,见图5。其中, t_1 为冲击作用时间, P_a 为冲击荷载峰值。

各工况对应落石的加速度、钢筋混凝土板传给四个角柱顶部总的冲击力见表1前4列。由试验可

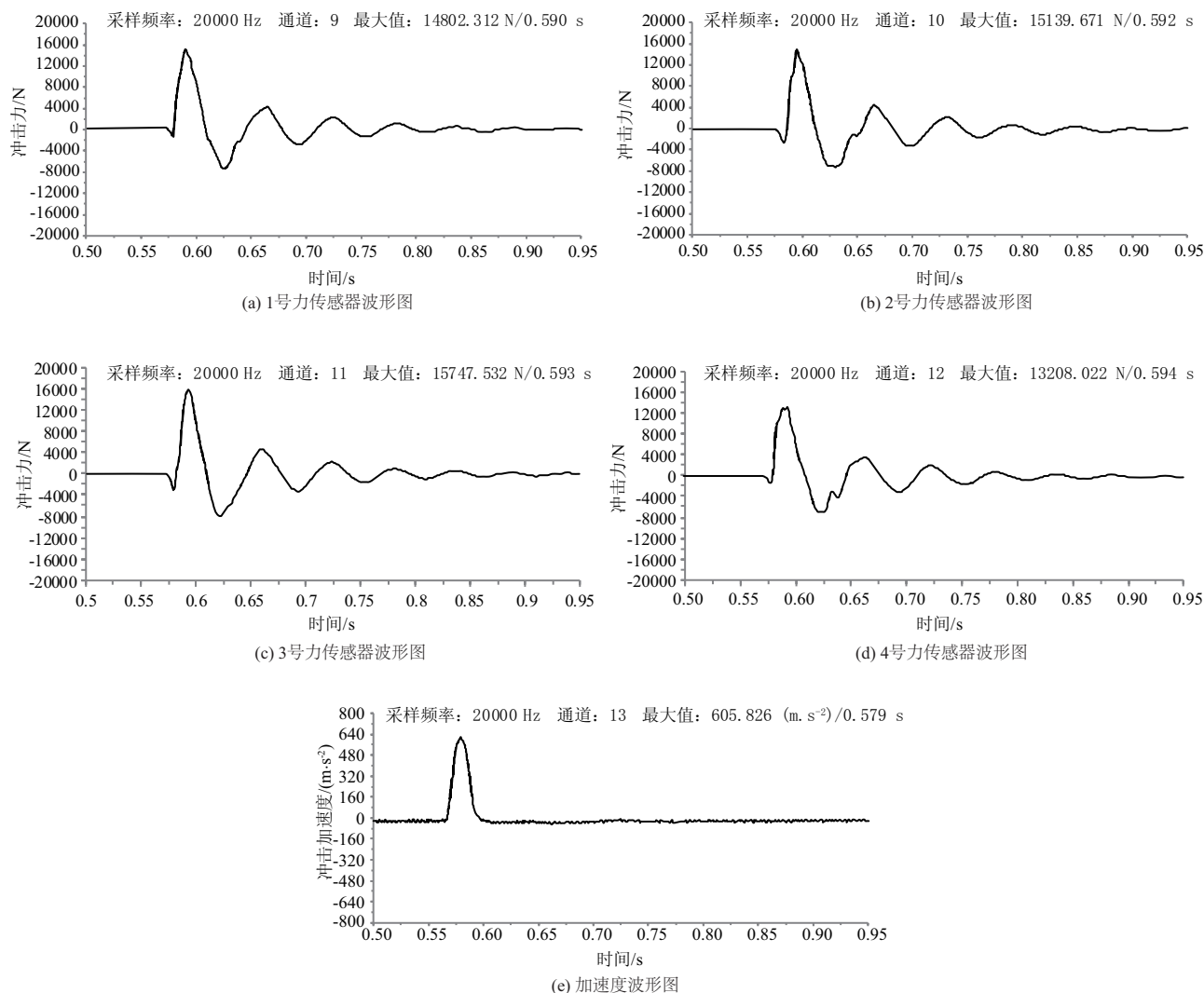


图3 冲击力和加速度波形图(工况40-5-2)

Fig.3 Waveform of impact force and acceleration

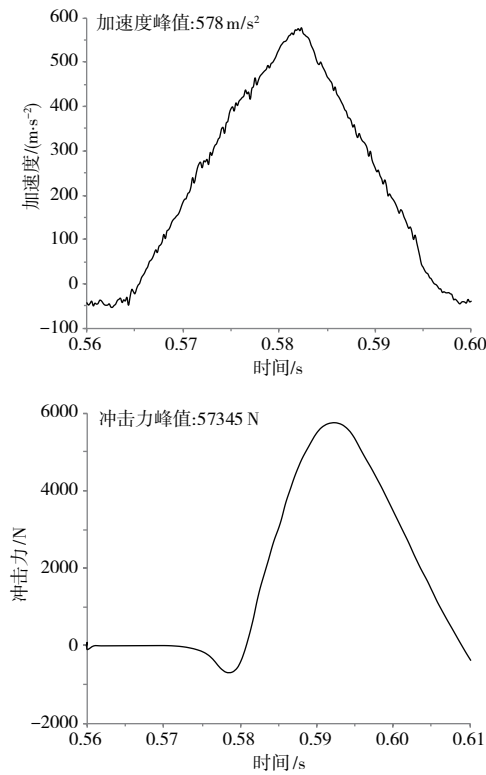


图4 加速度和冲击力曲线(工况40-5)

Fig.4 Time history curves of acceleration and impact force

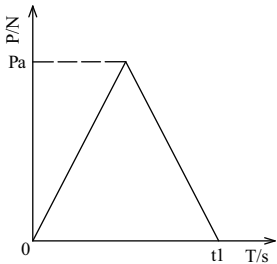


图5 落石冲击荷载简化模型

Fig.5 A simplified model of rockfall impact load

得落石对设有土垫层钢筋混凝土板的冲击持续时间,继而通过落石冲击土体得到的冲击力对冲击持续时间进行积分可得落石下落冲量。计算后得到的冲击力数值、各工况下冲击持续时间、冲量等数值的汇总见表1后两列。

由表1前4列可见:①落石下落高度为5 m,土垫层厚度在30~50 cm时,落石加速度峰值在659~482 m/s^2 之间,钢筋混凝土板受到的冲击力峰值在59 178 N~45 569 N之间。当土垫层厚度从30 cm增加到40 cm时,落石加速度峰值减小了76 m/s^2 ;当土垫层厚度从40 cm增加到50 cm时,落石加

表1 冲击持续时间、冲量汇总表

Tab.1 Summary of impact duration and impulse

工况	加速度峰值 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	冲击力峰值 $/\text{N}$	加速度峰值 平均值 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	角柱顶部冲击力 峰值平均值/N	冲击持续时间 $/\text{s}$	冲量 $/(\text{N} \cdot \text{s})$
30-5-1	637	29 621			0.02745	813
30-5-2	697	32 411	659	59 178	0.02715	880
30-5-3	643	29 900			0.02765	827
40-5-1	501	23 297			0.02865	667
40-5-2	578	26 877	583	57 141	0.02940	790
40-5-3	670	31 155			0.02915	908
50-5-1	529	24 599			0.03175	781
50-5-2	472	21 948	482	45 569	0.03090	678
50-5-3	446	20 739			0.03195	663
40-10-1	951	44 222			0.02705	1196
40-10-2	956	44 454	939	87 172	0.02795	1242
40-10-3	910	42 315			0.02750	1164
50-10-1	716	33 294			0.03190	1062
50-10-2	797	37 061	805	76 999	0.02985	1106
50-10-3	902	41 943			0.02915	1223

速度峰值减小了 101 m/s^2 ; ②落石下落高度为 10 m , 土垫层厚度分别为 40 cm 、 50 cm 时, 落石的加速度峰值分别为 939 m/s^2 、 805 m/s^2 , 钢筋混凝土板受到的冲击力峰值分别为 $87\,172 \text{ N}$ 、 $76\,999 \text{ N}$; ③对于 40 cm 厚土垫层, 落石从 5 m 和 10 m 高度下落, 落石加速度峰值分别为 583 m/s^2 和 939 m/s^2 , 下落高度增加了一倍, 加速度峰值增加了 356 m/s^2 ; 对于 50 cm 厚土垫层, 落石从 5 m 和 10 m 高度下落, 落石加速度峰值分别为 482 m/s^2 和 805 m/s^2 , 下落高度增加了一倍, 加速度峰值增加了 323 m/s^2 。

从表 1 后两列可知: ①落石同一下落高度情况下, 随着土垫层厚度的增加, 冲击持续时间也在增加, 说明冲击持续时间延长了, 即说明缓冲效果提高了。②落石冲击过程持续时间均接近于 0.03 s 。

1.4 组合垫层试验分析

落石冲击设有彩钢板垫层的钢筋混凝土板的过

程中, 落石发生回弹, 回弹高度在 1 m 左右, 然后落石在重力作用下再次冲击彩钢板垫层, 几次轻微振动后, 落石最终停留在彩钢板上。冲击结束后, 彩钢板位置稍有移动, 落石砸中彩钢板的地方出现一个深度约为 5 mm 的浅坑, 板的四周略有翘起, 表面不再规则平整。

落石冲击设有 S 型钢和彩钢板的组合体的钢筋混凝土板的过程中时, 有强烈的冲击振动声音, 落石有回弹, 回弹高度 1 m 左右, 几次反复振动后, 落石最终停在垫层上。落石从 10 m 高度下落回弹高度超过落石 5 m 高度下落状况下回弹的高度。彩钢板被砸中部位及周边严重下陷, 中部 S 型钢严重屈服变形, 整个组合体移动较大。

试验过程中采集了 $0 \sim 4 \text{ s}$ 内落石的冲击加速度和设有缓冲防护体系钢筋混凝土板传给四个角柱顶部的冲击力数值。工况 SC-5-1 的波形见图 6。

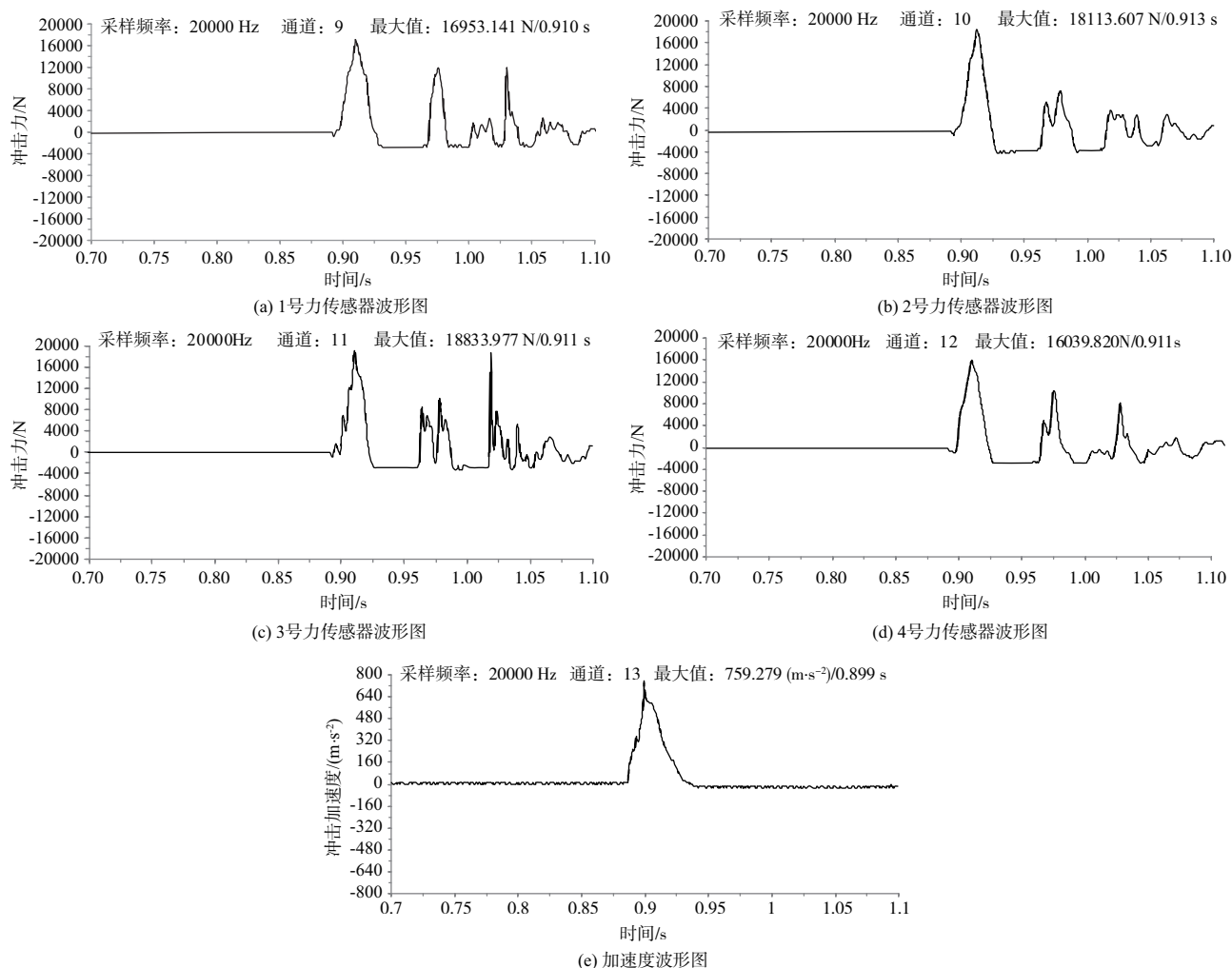


图6 冲击力和加速度波形图(工况 SC-5-1)

Fig.6 Waveform of impact force and acceleration

其中,加速度的单位为 m/s^2 ,冲击力的单位为 N 。

从图 6 可知,1~4 号传感器采集到的冲击力波形图均在出现最大峰值之后出现了一段水平段,接着又出现了两个相对较大的峰值,最后进入振动逐渐衰减阶段。出现两个相对较大的峰值是由于落石在冲击过程中出现回弹后再次冲击设有 S 型钢和彩钢板垫层的钢筋混凝土板引起的,当落石不再回弹,冲击波逐渐衰减。

对试验过程中采集到的落石加速度数值、设有缓冲防护体系钢筋混凝土板传给四个角柱顶部的冲击力数值进行整理,选取其中主要区段作图,得到落石的加速度曲线和设有缓冲防护体系钢筋混凝土板传给四个角柱顶部的冲击力合力的曲线,如图 7 所示。可见:落石冲击荷载亦近似于三角形脉冲荷载。

各工况下的落石加速度峰值、设有缓冲防护体系钢筋混凝土板所受冲击力、冲击持续时间、落石冲击设有缓冲防护体系钢筋混凝土板的冲量,整理汇总见表 2。

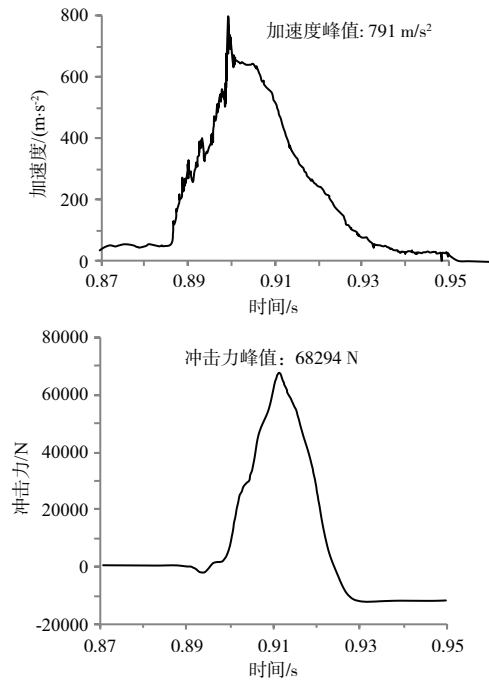


图 7 加速度和冲击力曲线(工况 SC-5-1)

Fig. 7 The acceleration and The impact force curve

表 2 冲击力、冲击持续时间、冲量汇总表

Tab. 2 Summary table of impact force, duration and impulse

下落高度 /m	缓冲材料	试验编号	加速度峰值 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	防护体系受到 冲击力峰值/N	冲击持续时间 /s	冲量 / $(\text{N} \cdot \text{s})$
5	彩钢板	C-5-1	1448	67 332	0.0313	2107
		C-5-2	2870	133 455	0.0308	4104
		C-5-3	2319	107 834	0.0314	3381
5	彩钢板+S型钢	SC-5-1	791	36 782	0.0424	1560
		SC-5-2	819	38 084	0.0414	1575
		SC-5-3	707	32 876	0.0435	1430
10	彩钢板+S型钢	SC-10-1	1056	49 104	0.0426	2092
		SC-10-2	902	41 943	0.0439	1841
		SC-10-3	—	—	—	—

试验过程中落石 10 m 下落高度情况下测得的落石加速度数值和混凝土板受到的冲击力数值出现大量负值,故落石 10 m 高度下落情况下的第三次试验得到的数据按作废处理。由表 2 可知,①落石同一下落高度时,冲击彩钢板缓冲防护体系得到的加速度和冲击力数值都比冲击组合体得到的数据大。落石冲击彩钢板时得到的数据的离散性较大,冲击 S 型钢+彩钢板时得到的数据比较稳定。②对于彩钢板防护体系,落石冲击持续时间约为 0.03 s;对于 S 型钢+彩钢板防护体系,落石冲击持续时间约为

0.04 s。③同等落石冲量条件下,对比彩钢板,落石冲击 S 型钢+彩钢板对应加速度峰值、冲击力峰值减小到 1/4~1/3,冲击持续时间增加约 1/3。

2 落石冲击作用下某出线楼的动力响应分析及评价

以黄河上游某水电站出线楼作为研究对象。该水电站出线楼建在悬崖峭壁上,背靠高山,遭遇山上落石冲击的可能性和频率都较大,山上落石随时会

对出线楼和工作人员构成威胁。此出线楼为全长 61.8 m、宽 26 m、高 48.1 m 的钢筋混凝土框架结构,梁柱截面尺寸见表 3,共两层,第一层为电气层、第二层为出线设备层。出线楼梁、楼板、柱等采用的混凝土强度等级为 C30;混凝土挡渣墙为 C25;护坡混凝土为 C20。出线楼设备层板厚 300 mm,顶层板厚 400 mm;混凝土挡渣墙厚 600 mm。垫层土体材料采用 Drucker-Prager 材料模型,所选用的土体材料参数如下:弹性模量为 2.5×10^8 Pa,泊松比为 0.45,密度为 $1\,530\text{ kg/m}^3$,粘聚力 c 为 1.9×10^4 Pa,摩擦角为 32° ,膨胀角为 30° 。

表 3 出线楼梁、柱截面尺寸
Tab. 3 Beam and column section size of outlet building

截面类型	截面尺寸/(mm×mm)			
柱	2000×2000			
梁	600×1000	900×1500	600×1200	1200×800
	1500×2400	1500×2100	1200×2400	1200×2100

2.1 结构建模

利用 ANSYS 软件进行模拟计算,出线楼的梁、柱选用 BEAM188 单元,现浇板、边坡的护坡混凝土体及后侧的挡渣墙选用 SHELL63 单元模拟。考虑土垫层作用后,顶层屋面板和土垫层拟采用 SHELL181 分层壳单元来实现。出线楼的背面从层高 2460 m 到 2487 m 与边坡的护坡混凝土体相连,如图 8 所示,若二者间设有足够锚筋,则可将此处连接处理为滑动支座,以考虑护坡混凝土体相对于边坡产生的变形。

电站户外出线楼的有限元模型见图 9(a),共包含 7603 个节点,10 089 个单元。冲击荷载作用位置

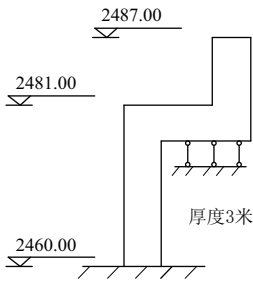


图 8 出线楼护坡混凝土的模拟(用壳单元划分)
Fig. 8 The concrete slope protection about outlet building (meshed by shell elements)

节点:8350。结构动力响应关注节点:8350、8020、2536、2580。其中,节点 8350、8020 位于出现楼屋面,节点 2536、2580 位于出线楼设备层(电气设备所在部位),各节点具体位置见图 9(b)。

2.2 冲击荷载下出线楼的动力响应

运用落石冲击试验所得冲击力模型,以出线楼模型为研究对象,进行小块落石冲击作用下,出线楼结构在弹性阶段的动力响应分析。落石作用下结构的振动,属于微振,故阻尼比取 2%。通过模态分析的结果,可以获得结构的自振频率,进而采用瑞利(Rayleigh)阻尼模型可求出阻尼系数 α 和 β ,简化计算公式见式(1)。

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j\xi}{\omega_i + \omega_j}, \beta = \frac{2\xi}{\omega_i + \omega_j} \tag{1}$$

其中: ω_i 和 ω_j 分别为结构的第 i 阶和第 j 阶固有频率, ξ 为结构模态阻尼比。

为使计算接近真实情况, ω_i 按结构的第一阶自振频率来考虑,计算得 $f_1 = 0.9404\text{ Hz}$,由公式 $\omega = 2\pi f$ 可得, $\omega_1 = 5.9087\text{ rad/s}$;为了能取得结构振动的高频成份,在结构固有频率中取其对应自振周期

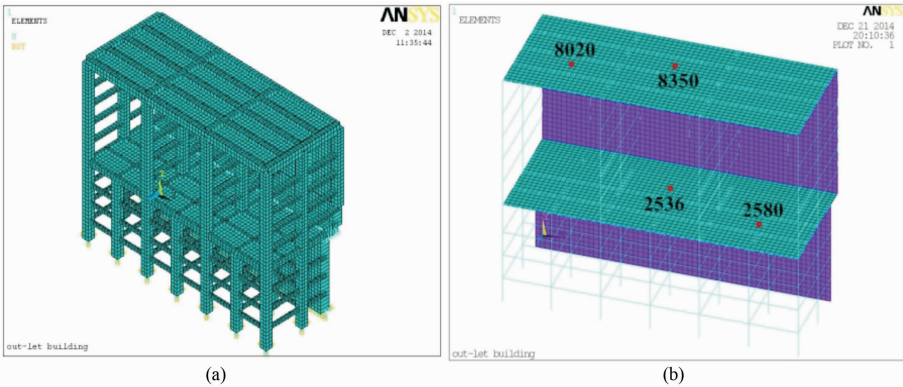


图 9 (a) 出线楼有限元模型;(b) 相关节点位置图

Fig. 9 (a) Finite element model of outlet building and (b) the positions of related nodes

接近 2 倍冲击持续时间的固有频率,记为 ω_j ,考虑土垫层作用,落石冲击过程持续时间接近 0.03 s,则 $T_2 = 0.06$ s,经计算可取 $\omega_2 = 104.7198$ rad/s。将 ω_1 和 ω_2 代入式(1)可得,考虑垫层作用下结构的阻尼系数为: $\alpha = 0.2237$ s⁻¹, $\beta = 0.0036$ s。

以节点 8350 为落石冲击荷载作用点,建立 3 种出线楼结构模型,屋顶土垫层厚度分别为 30 cm、40 cm、50 cm,将试验所得各工况冲击荷载对应加到节点 8350。由于落石冲击作用时间很短,故计算时间取前 3s,由于篇幅所限,仅将计算得到关键节点处的最大位移、最大速度、最大加速度及出现时刻,汇总于表 4。表中出现的位移、速度、加速度数值均取绝对值。

由表 4 知:①不同厚度垫层下,各个节点的最大位移值、最大速度值、最大加速度值出现时刻分别是一致的。②随着土垫层厚度的增加,各节点的响应均有所下降。最大位移值减小幅度在 10% ~ 33% 之间;最大速度值减小幅度在 6% ~ 28% 之间;最大

加速度值减小幅度在 10% ~ 23% 之间。可见,垫层厚度的变化对结构动力响应的影响是比较明显的。③同一条件下,四个节点中,冲击荷载作用节点的响应最大。④落石 10 m 高度下落时,各节点的响应比落石 5 m 下落高度情况下得到的相应数值大很多。

2.3 冲击振动评价

电力构筑物内部的电气设备对环境振动有较高的要求,如果振动过大,会导致跳闸,使电力无法输出,水电机组会因突然甩负荷引起事故,同时也会对电网稳定造成冲击。故需对电力构筑物的动力响应作以评价。

《多层厂房楼盖抗微振设计规范》(GB 50190 - 1993)中规定:室内仪器和设备的振动限值主要是以位移和速度作为控制指标。对于仪器和设备,振动位移允许值为:4.8 μm,即为 0.0048 mm;振动速度允许值为:0.3 mm/s。

结合表 4 可知,①对于位于设备层的节点 2536、2580 在各种工况下的位移和速度均满足振动

表 4 落石 5 m、10 m 高度下落各节点动力响应汇总表
Tab.4 The dynamic response of each node of the rockfall falling from 5 m and 10 m

土垫层厚度 /mm	落石 5 m 高度下落						落石 10 m 高度下落			
	30		40		50		40		50	
节点编号	最大位移 /mm	出现时刻 /s	最大位移 /mm	出现时刻 /s	最大位移 /mm	出现时刻 /s	最大位移 /mm	出现时刻 /s	最大位移 /mm	出现时刻 /s
8350	0.0609	0.0170	0.0541	0.0175	0.0445	0.0169	0.0872	0.0175	0.0743	0.0171
8020	0.0036	0.2630	0.0029	0.2511	0.0026	0.2630	0.0047	0.2511	0.0044	0.2630
2536	0.0004	0.2362	0.0004	0.2362	0.0003	0.2362	0.0007	0.2362	0.0005	0.2362
2580	0.0005	0.1678	0.0005	0.1678	0.0004	0.1678	0.0007	0.1678	0.0006	0.1678
节点编号	最大速度 /(mm · s ⁻¹)	出现时刻 /s	最大速度 /(mm · s ⁻¹)	出现时刻 /s	最大速度 /(mm · s ⁻¹)	出现时刻 /s	最大速度 /(mm · s ⁻¹)	出现时刻 /s	最大速度 /(mm · s ⁻¹)	出现时刻 /s
8350	8.2790	0.0250	7.1391	0.0250	6.0534	0.0250	11.4984	0.0250	10.1028	0.0250
8020	0.3854	0.0934	0.3101	0.0994	0.2824	0.0934	0.4995	0.0994	0.4713	0.0934
2536	0.0649	0.0726	0.0610	0.0756	0.0475	0.0726	0.0982	0.0756	0.0792	0.0726
2580	0.0515	0.3404	0.0459	0.3405	0.0376	0.3404	0.0739	0.3403	0.0628	0.3404
节点编号	最大加速度 /(m · s ⁻²)	出现时刻 /s	最大加速度 /(m · s ⁻²)	出现时刻 /s	最大加速度 /(m · s ⁻²)	出现时刻 /s	最大加速度 /(m · s ⁻²)	出现时刻 /s	最大加速度 /(m · s ⁻²)	出现时刻 /s
8350	1.7179	0.0174	1.4158	0.0180	1.2563	0.0174	2.2804	0.0180	2.0966	0.0174
8020	0.0713	0.1024	0.0579	0.1083	0.0523	0.1024	0.0927	0.1083	0.0872	0.1024
2536	0.0113	0.0667	0.0099	0.0696	0.0082	0.0667	0.0161	0.0696	0.0138	0.0667
2580	0.0078	0.1678	0.0068	0.1708	0.0057	0.1678	0.0109	0.1708	0.0090	0.1678

位移和振动速度的允许值;②对于位于屋面层的节点8020在各种工况下的位移均满足限值要求,但该节点速度只有在落石冲击下落高度是5 m,垫层厚度为50 cm时满足限值要求;③对于位于屋面层的落石冲击点8350,位移和速度均不满足振动位移和振动速度的允许值。由于仪器设备都放置在设备层,故各工况下设备层均能满足出线楼结构振动位移和振动速度限值要求。

3 结论

通过对不同厚度土垫层和S型钢进行落石冲击试验,研究其缓冲性能,并利用冲击试验得出的三角形冲击脉冲荷载模型,计算了冲击荷载下出线楼的动力响应,得到了以下主要结论:

(1) 试验测得的加速度曲线和冲击力曲线基本呈现三角形脉冲状,可将落石冲击荷载简化为三角形脉冲荷载来计算。

(2) 随着垫层厚度的增加,落石加速度减小得越快,落石加速度峰值、设有土垫层钢筋混凝土板受到的冲击力峰值逐渐减小,土垫层的缓冲效果随着垫层厚度的增加而增加。

(3) 对设有土垫层钢筋混凝土板,落石冲击过程持续时间均接近于0.03 s;S型钢+彩钢板防护体系的落石冲击持续时间约为0.04 s,其缓冲性能要优于彩钢板的缓冲性能。

(4) 不同厚度垫层下,出线楼结构同一部位的最大位移值、最大速度值、最大加速度值出现时刻分别是一致的;同一条件下,四个节点中,冲击荷载作用节点的响应最大;随着土垫层厚度的增加,各节点的冲击响应均明显下降。

(5) 按照《多层厂房楼盖抗微振设计规范》(GB 50190-93)中的规定对出线楼结构的动力响应做出评价:落石5 m高度下落,土垫层厚度为30、40、50 cm时和落石10 m高度下落,土垫层厚度为40、50 cm时,出线楼的振动均满足限值要求。

参考文献(References)

- [1] KAWAHARA S, MURO T. Effects of dry density and thickness of sandy soil on impact response due to rock fall [J]. Journal of Terra mechanics, 2006, 43(3): 329-340
- [2] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石冲击力计算方法的比较研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 59-64 [YE Siquao, CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Comparative research on impact

- force calculation method for rack falls [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(2): 59-64]
- [3] 郭绍平, 王全才, 吴清, 等. 一种改进的落石冲击力计算方法[J]. 山地学报, 2014, 32(3): 345-349 [GUO Shaoping, WANG Quancai, WU Qing, et al. An improved impact force calculation method for rockfall [J]. Mountain Research, 2014, 32(3): 345-349]
- [4] 候天兴, 杨兴国, 黄成, 等. 基于冲量定理的滚石对构筑物冲击力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S1): 3116-3122 [HOU Tianxing, YANG Xingguo, HUANG Cheng, et al. A calculation method based on impulse theorem to determine impact force of rockfall on structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3116-3122]
- [5] 杨其新, 关宝树. 落石冲击力计算方法的试验研究[J]. 铁道学报, 1996, 18(1): 101-106 [YANG Qixin, GUAN Baoshu. Test and research on calculating method of falling stone impulsive force [J]. Journal of the China Railway Society, 1996, 18(1): 101-106]
- [6] 汪敏, 石少卿, 阳友奎. 新型柔性棚洞在落石冲击作用下的试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 131-138 [WANG Min, SHI Shaoqing, YANG Youkui. Experimental study on a new type flexible rock-shed under the Impact of rockfall [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(9): 131-138]
- [7] 袁进科, 黄润秋, 裴向军. 滚石冲击力测试研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 48-54 [YUAN Jinke, HUANG Runqiu, PEI Xiangjun. Test research on rockfall impact force [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 48-54]
- [8] 汪敏, 石少卿, 阳友奎. 柔性棚洞在落石冲击作用下的数值分析[J]. 工程力学, 2014, 31(5): 151-157 [WANG Min, SHI Shaoqing, YANG Youkui. Numerical simulation of a flexible rock-shed under the Impact of a rockfall [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(5): 151-157]
- [9] 邓力源, 石少卿, 汪敏, 等. 废旧轮胎在新型柔性拦石墙结构中的应用与数值分析[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(1): 1-6 [DENG Liyuan, SHI Shaoqing, WANG Min, et al. Application of waste tire to new type flex block wall and its numerical analysis [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015, 31(1): 1-6]
- [10] 王东坡, 何思明, 李新坡, 等. 滚石冲击闭孔泡沫铝夹芯板缓冲机理研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(1): 43-49 [WANG Dongpo, HE Siming, LI Xinpo, et al. Study on the dissipating effects of aluminum foam sandwich slab under rockfall impact [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science), 2016, 48(1): 43-49]
- [11] 何思明, 沈均, 吴永. 滚石冲击荷载下棚洞结构动力响应[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 781-788 [HE Siming, SHEN Jun, WU Yong. Rock shed dynamic response to impact of rock-fall. [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 781-788]
- [12] 向波, 何思明, 欧阳朝军, 等. 都(江堰)—汶(川)高速沙坪大桥桥面柔性滚石防护技术研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(2): 8-13 [XIANG Bo, HE Siming, OUYANG

- Chaojun, et al. Study about the flexible protection technology against rockfall for the deck of shaping bridge on the Dujiangyan-Wenchuan Highway [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2014, **46**(2): 8–13]
- [13] 李欢欢, 张俊发, 陶磊, 等. 屋面防护落石冲击缓冲材料评述 [J]. 电网与清洁能源, 2013, **29**(5): 73–79 [LI Huanhuan, ZHANG Jun-fa, TAO Lei, et al. A Review of the roof protective buffer materials for rockfall impacts [J]. Power System and Clean Energy, 2013, **29**(5): 73–79]
- [14] 周泽平, 王明洋, 冯淑芳, 等. 钢筋混凝土梁在低速冲击下的变形与破坏研究 [J]. 振动与冲击, 2007, **2**(5): 99–103 + 157 [ZHOU Zeping, WANG Ming-yang, FENG Shu-fang, et al. Deformation and failure of a reinforced beam under low velocity impact [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, **2**(5): 99–103 + 157]
- [15] 刘锋, 吕西林. 冲击载荷作用下框架结构的非线性动力响应 [J]. 振动工程学报, 2008, **21**(2): 107–114 [LIU Feng, LV Xilin. Nonlinear dynamic response of impulsive loaded frame structure [J]. Journal of Vibration Engineering, 2008, **21**(2): 107–114]

Response of Power Structure Equipped with Buffer Cushion to Experimental Rockfall Impact

GAO Liang, LIU Weiwei, TAO Lei, ZHANG Junfa

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the issues of rockfall disasters occurring at hydropower stations, the rockfall impact tests were conducted for examination of rockfall barrier structures, such as soil cushions, S-shaped steel and color steel plate. The tests were designed to investigate the buffer energy dissipation law, and consequently proposed an effective impact load model of the barrier structures. In the finite element simulation, it applied the impact force to the top floor of a certain outlet-building to study the dynamic responses of the key positions, the structural roof and the equipment floor. Results showed that the acceleration and impact force changed with time, basically a shape of triangular pulse. The buffering capacity of the soil cushion increased with the increase of cushion thickness, and the impact duration was close to 0.03s. S-shaped steel had good buffering performance and it could be used for shielding side walls of structures from rockfalls. S-shaped steel worked well with color steel plate as a buffering protection system, exhibiting a favorable quality, with an impact duration of 0.04 s aboutd. As the thickness of a cushion increased, the amplitude of the structural dynamic response decreased significantly. The vibration of the electrical equipment in the outlet-building hit by rockfalls at different heights were evaluated in terms of varied soil cushion thicknesses. Research conclusions can provide reference for protection design of power structures threatened by rockfalls in the later stage.

Key words: rockfall impact; dynamic impact test; buffering cushion; impact loading model; dynamic response