

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201910028

高位落石作用下不同缓冲层与钢筋混凝土板 组合结构动力响应

吴建利¹, 胡卸文^{1,2}, 梅雪峰¹, 许泽鹏¹

(1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 2008 年“5.12”汶川特大地震诱发了大量的震裂山体危岩崩塌灾害。这类危岩发育位置高、冲击能量大,存在主动加固措施难以实施且被动防护网防护能级不足的问题,为此在汶川、芦山、九寨沟地震灾区逐渐广泛使用桩板拦石墙结构用于防治高位崩塌落石,取得了非常好的效果,但同时也存在部分桩板拦石墙墙后因未设缓冲层或挂废旧轮胎而被落石直接撞击并损毁的现象。为避免落石直接与此类钢筋混凝土(RC)板碰撞造成刚性破坏,工程上常采用就地开挖的碎石土、砂土作为缓冲层以减缓落石冲击力,为研究冲击作用下不同类型缓冲层消能效果及 RC 板的动力响应特征,基于室外搭建的落石冲击试验平台,开展了不同缓冲层及其相互组合的系列落石冲击试验。结果表明,总厚度相同前提下,EPS 泡沫-砂土组合缓冲层的消能效果最优,其次为碎石土,砂最差。与其他两种缓冲层消能方式相比,落石锤与组合缓冲层碰撞过程中发生多次反弹且接触时长远大于其他两种;相同的冲击工况下,EPS 中心位置压溃并下陷,且产生大量辐射状宽大裂缝;组合缓冲层能够有效减小 RC 板的跨中位移,在 3,5,7 m 冲击高度下,比砂作为缓冲层时跨中位移减小了 37%~46%。在 R4 落石锤冲击下,RC 板跨中位移显著增加且产生明显塑性位移,随冲击能量增大跨中裂缝自下而上延伸,RC 板最终破坏时表现为典型的弯曲破坏特征。

关键词: 冲击试验;钢筋混凝土(RC)板;EPS 材料;组合缓冲层

中图分类号: P642.21;TU458^{+.4}

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0114-09

Dynamic response of RC plate with different cushion layers under the high-level rockfall impact

WU Jianli¹, HU Xiewen^{1,2}, MEI Xuefeng¹, XU Zepeng¹

(1. Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. Engineering Laboratory Combined with National and Local of Spatial Information Technology of High Speed Railway Operation Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Since the “5.12” Wenchuan Earthquake in 2008, extraordinarily serious collapse hazards have occurred in the shattering mountains. Due to the high position, high impact energy, high difficulty of the active measurement when implementing and the insufficient energy level of the passive protecting net. Thus pile-plate retaining wall structure has been widely used in Wenchuan, Lushan and Jiuzhaigou earthquake-stricken areas to prevent high-level collapse and rockfall, and very good results have been achieved. However, it is also found that there is no cushion or waste tires behind some of the pile-plate retaining wall, so that the

收稿日期: 2019-10-20; **修订日期:** 2019-11-16

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFC1505401);四川省自然资源厅“8.8”九寨沟地震灾区生态化地质灾害防治重大科技支撑研究课题项目(KJ-2018-20)

第一作者: 吴建利(1988-),男,博士研究生,主要从事工程地质灾害研究。E-mail: wujianli@my.swjtu.edu.cn

通讯作者: 胡卸文(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事工程地质、环境地质研究。E-mail: huxiewen@163.com

high-level rockfall directly impacts the pile-plate retaining wall and causes structural damage. Therefore, in order to avoid the direct impact of the rigid damage caused by the rockfall on the RC plate, the excavated gravel soil is often used as a cushion layer to decrease the impact force. Based on the rockfall block impact test platform, the energy dissipation effect of different types of cushion layer and the dynamic response of RC plate under impact is examined, and a series of rockfall impact tests with different cushion are carried out. The results show that under the same total thickness, the EPS-sand composite cushion has the best energy consumption effect, followed by gravel soil, and sand is the worst. Compared with the other two cushion layers, the impact of rockfall block on the composite cushion has multiple rebounds and the contact time is much longer than the others. Under the same impact condition, the center position of the EPS material collapses and sinks. A large number of radial wide cracks are generated. The composite cushion can effectively reduce the mid-span displacement of the RC plate. Under the falling height of 3 m, 5 m and 7 m, the mid-span displacement is reduced by 37% ~ 46% compared with the sand cushion. Under the impact of R4 block, the displacement of the RC plate is significantly increased, and the plastic displacement is obvious. With the increasing impact energy, the mid-crack extends from the bottom to the top, and the failure mode of the RC plate is bending.

Keywords: impact test; reinforced concrete plate (RC); expanded polystyrene material (EPS); composite cushion

高位崩塌落石灾害是山区三大地质灾害之一,是指岩石块体从母体脱离后以滚动、滑动、弹跳等多种运动方式沿坡面快速运动,最终堆积在坡脚平缓地带或遇障碍物阻挡而静止的动力演化过程。针对高位崩塌落石突发、高能的动力特性,大量的主动和被动防护措施被提出及使用^[1-3]。传统的混凝土棚洞结构和针对2013年“4.20”芦山震区提出的新型桩板拦石墙由于刚度大、抗冲击性能好被广泛应用^[4]。典型的棚洞结构及桩板拦石墙均属于刚性结构,如果落石与混凝土结构直接接触不仅会造成防护结构刚性破坏,还可能发生较大的反弹或破碎飞溅造成二次危害。为解决这一问题,通常在混凝土棚洞顶板处或桩板拦石墙靠内坡侧增加消能分配层,从而避免落石与刚性圬工结构发生直接接触。不同的缓冲层材料在受到冲击荷载时表现出不同的动力响应特征。砂土或碎石土作为一种多孔、松散、易压缩且廉价易获取的材料被广泛使用^[5-6]。杨爱武等^[7]研究了冲击荷载作用下结构性软黏土的力学特征。Boguslavskii^[8]描述了钢质弹体撞击砂土的现象。Kawahara^[9]通过小型模型试验研究了砂质土壤干密度和厚度对落石冲击响应的影响。Visco^[10]基于数值模拟,证实了散体内部单位面积上传递的动能随深度的增加而减小。Seamen^[11]采用落锤试验,研究了高岭土和黏土中应力波传播规律。于潇等^[12]认为,土颗粒级配决定了应力波衰减系数、峰值压力

等。Krauthammer^[13]研究表明,土颗粒越小峰值应力衰减越快,耗能效果越好。除此之外,郭江等^[14]基于ANSYS/LS-DYNA有限元软件研究了棚洞结构顶板倾角能在一定程度上减小落石冲击最大等效应力。Kishi^[15]、Mougin^[16]、Peng^[17]等开展了混凝土结构系列冲击试验,并分析了动荷载作用下混凝土结构的破坏形式,但这些研究仅涉及混凝土结构的单一性分析,不能综合考虑缓冲层与混凝土结构的协同工作性能,这势必带来实际应用局限性。此外,实际工程中,作为缓冲层的土体一般为现场挖方,对于工程量较大的防护措施,往往需要大体积土方,如果对内侧较陡边坡开挖取土易造成滑坡等次生灾害,因此有必要找到其他消能材料来代替部分土体,一方面可以减轻结构自重,另一方面也可避免因开挖过度造成次生灾害。

EPS泡沫材料(Expanded Polystyrene)具有自重小、缓冲性能好的特点,利用泡沫材料代替部分砂土形成组合垫层来提高刚性结构抗冲击能力,确保钢筋混凝土结构处于弹性工作状态,从而增加防护结构的耐久性。目前对于EPS泡沫和砂土组合垫层高能冲击作用下的缓冲性能试验研究较少,多数学者采用数值模拟对EPS的缓冲性能进行研究并取得了理想的缓冲效果^[18-20],但是数值模拟与实际应用存在较大差异,缺乏可靠的物理试验模型验证。基于上述问题,本文设计了落石冲击试验平台,进行了系列落石冲击试

验,对比了砂、碎石土及 EPS-砂组合缓冲层的缓冲性能,研究了不同缓冲材料的缓冲性能差异,对于工程结构设计具有重要的参考价值。

1 试验方案设计

设计了用于研究落石冲击上覆缓冲层的 RC 板试验平台(图 1)。基于典型钢筋混凝土棚洞、桩板拦石墙结构,制作强度等级为 C30 的钢筋混凝土板,设计 RC 板长 2.4 m、宽 1.6 m、厚 0.35 m。混凝土采用 42.5 级硅酸盐水泥,粗骨料采用粒径为 5~15 mm 连续级配的碎石,细骨料为天然河砂,配合比为水泥:水:砂:石 = 1:0.5:1.5:2.8,板内垂直正交上下铺设 2 层 $D=14\text{ mm}@200\text{ mm}$ 钢筋网,混凝土保护层厚 20 mm。落石锤由钢模浇注混凝土而成,包括 2 个球块,编号 R1、R3,半径分别为 0.15、0.20 m,质量分别为 32.4、70.7 kg;2 个立方体块,编号 R2、R4,边长为 0.35、0.50 m,质量分别为 107.3、290.0 kg。落锤内放置加速度传感器用于采集冲击过程中的加速度变化曲线,RC 板下表面及内部钢筋均粘贴应变片用于获取冲击过程应变响应特征,应变片的粘贴方式见图 2,其中编号 S6—S8 为下层钢筋应变片,S9—S11 为上层钢筋应变片。板下表面中心点放置位移传感器用于监测板位移变化。

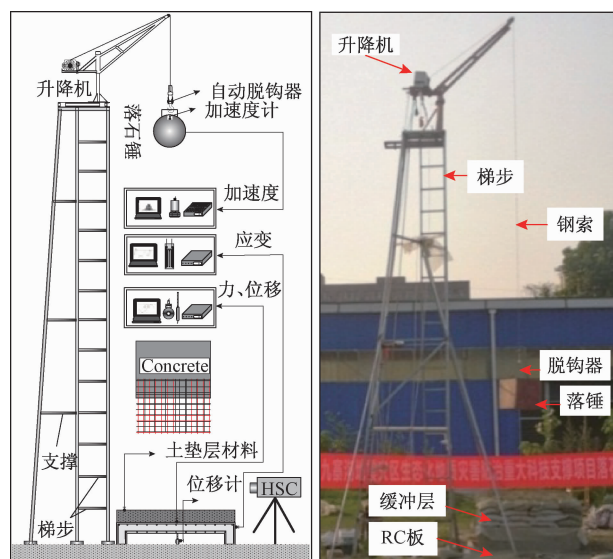


图 1 落石冲击试验台
Fig.1 Impact test set-up

本次实验设计 3 种缓冲层材料,分别是砂、碎石土、EPS-砂组合层,其中砂为颗粒均匀河砂,碎石土为现场挖方取土。对 2 种试样进行室内土工试验,其中

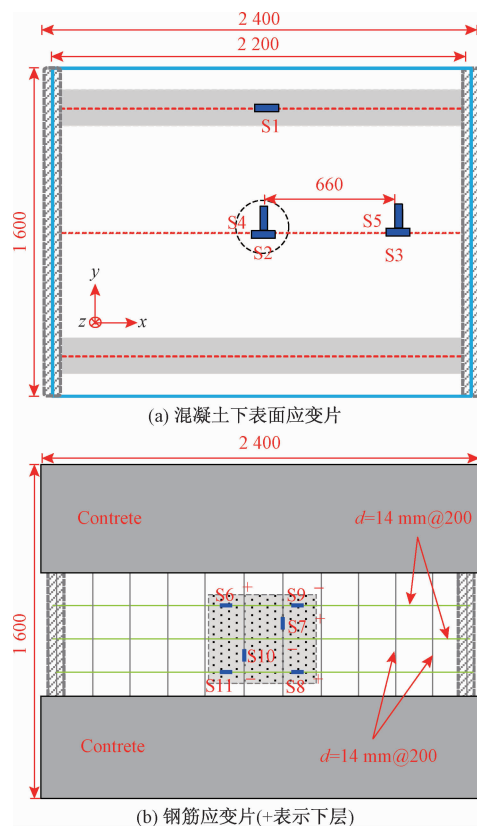


图 2 RC 板应变片布置(单位:mm)
Fig.2 Strain gauges (mm)

碎石土密度为 1.54 g/cm^3 ,含水率 5.39%,砂密度为 1.46 g/cm^3 ,含水率 2.5%。采用筛分法对碎石土及砂进行常规级配测试(图 3)。在进行碎石土缓冲层试验时,为保证试样的均匀性,适当剔除较大块石。铺设于 RC 板面的土体按每 20 cm 施加相同的压力击实 10 次,每次冲击试验完后,挖除比冲击影响范围更大的土体并按相同的压力及击实次数重新恢复。试验工况见表 1。

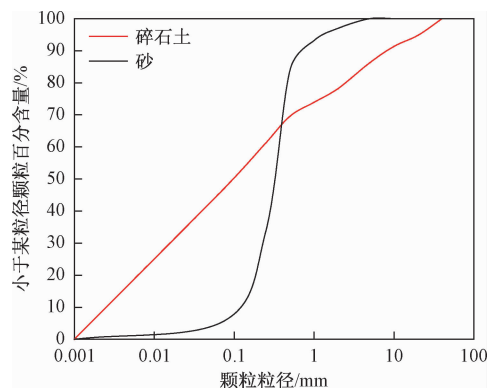


图 3 碎石土及砂颗粒级配
Fig.3 Particle size distribution of gravel soil and sand

表 1 试验工况

Table 1 Conditions for each experiment

编号	缓冲层 厚度/m	落石 编号	落石 高度/m	落石 质量/kg	落石 能量/kJ
碎石土-1	0.1	R4	3~7	290	8.5~19.9
碎石土-2	0.2	R4	3~7	290	8.5~19.9
碎石土-3	0.3	R2,R3	3~7	107,71	2.1~7.3
砂土	0.3	R1,R2,R3	1~7	32,107,71	0.3~7.3
EPS-砂	0.2+0.1	R1,R2,R3	1~7	32,107,71	0.3~7.3

2 试验结果与分析

2.1 加速度及冲击力分析

为方便分析,文中工况编号统一为:落石锤编号-缓冲层厚度-冲击高度,如 R1-0.2 m+0.1 m-6 m 代表 R1 落石锤-0.2 m 厚 EPS+0.1 m 厚砂-6 m 冲击高度。选取典型的冲击加速度时程曲线(图 4),结果表明,加速度时程曲线变化趋势一致,总体可分为上升

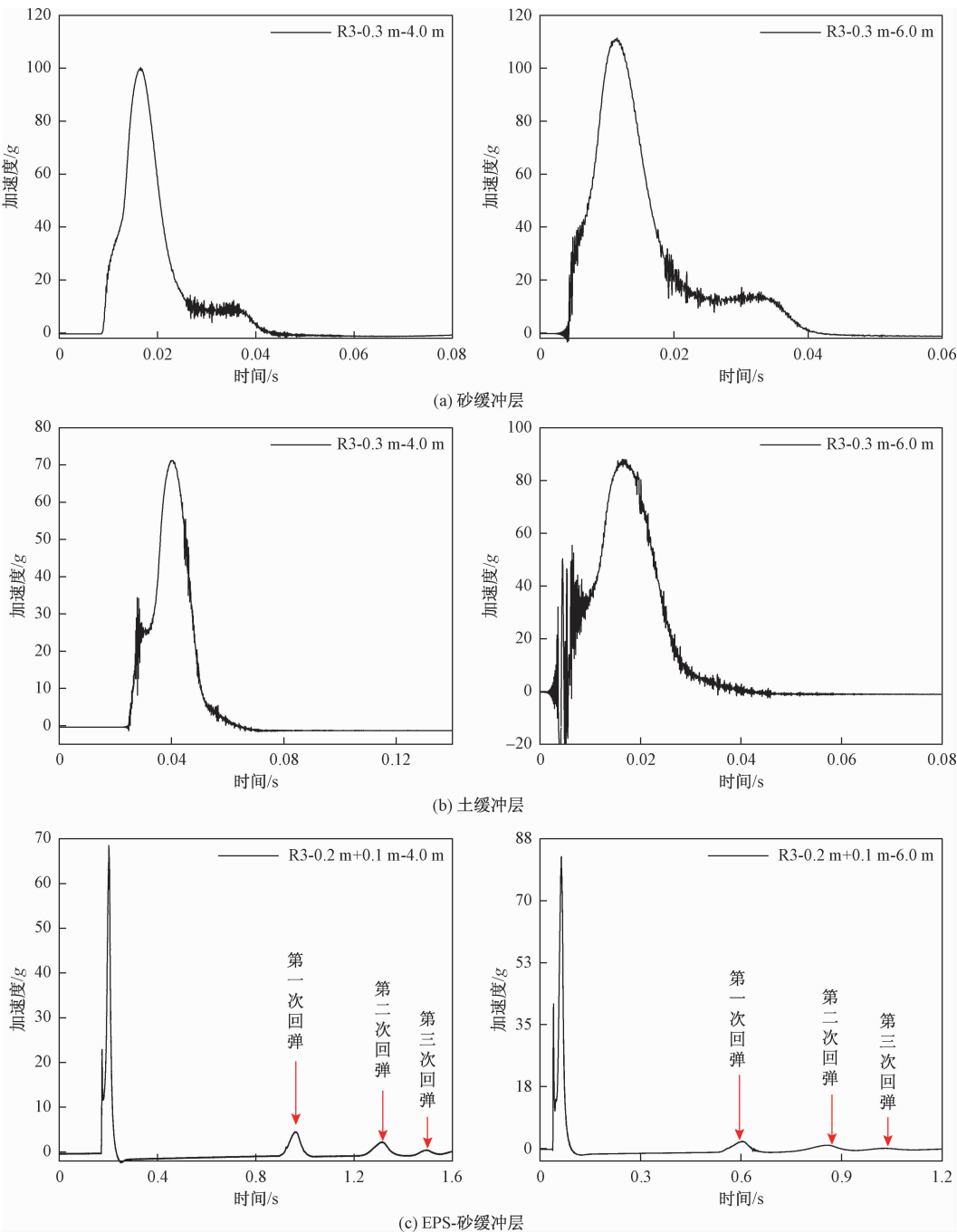


图 4 冲击加速度时程曲线

Fig. 4 Time history curve of impact acceleration

(压缩)和下降(回弹)两个阶段。当落石撞击缓冲层时,加速度迅速增大,随后因缓冲层结构的阻尼特性由最大值减小并最终趋于0。在 EPS-砂组合缓冲层的加速度曲线中观察到由于落石反弹造成多峰现象。分析 R3 落锤在 4 m 及 6 m 冲击高度、总厚度为 0.3 m 缓冲层试验结果表明,相同冲击高度工况下,3 种材料缓冲层表面最大加速度之间的大小关系为砂 > 土 > EPS-砂,表明 EPS-砂的缓冲效果最好。表 2 为其他冲击高度下的峰值加速度、冲击接触时长、最大冲击力结果。总体上,冲击接触时长随冲击高度的增加而减小,峰值加速度与接触时间负相关,其他条件相同时,缓冲效果最佳的 EPS-砂组合层峰值冲击力最小,接触时间最长,组合缓冲层能够延长落石碰撞时间,从而有效减小最大冲击力。以上结果表明,EPS-砂组合层缓冲消能效果最优,其次为碎石土,砂最差。

表 2 不同材料缓冲层最大冲击力及接触时间

Table 2 Peak acceleration, maximum impact force and contact time of different cushions

缓冲层	指标	冲击高度/m		
		3	5	7
R1-0.3 m(砂)	A/g	96.7	137.7	170.6
	T/ms	25.0	18.0	16.0
	F/kN	30.7	43.8	54.2
R2-0.3 m(砂)	A/g	96.7	137.6	201.7
	T/ms	33.0	27.0	22.0
	F/kN	101.8	144.8	212.3
R3-0.3 m(砂)	A/g	73.5	111.4	141.1
	T/ms	24.0	20.0	20.0
	F/kN	51.0	77.3	97.9
R2-0.3 m(土)	A/g	68.1	108.4	166.3
	T/ms	40.0	35.0	30.0
	F/kN	71.5	113.8	174.6
R3-0.3 m(土)	A/g	54.6	73.4	96.8
	T/ms	54.0	49.0	43.0
	F/kN	57.3	77.0	101.6
R1-0.2 m+0.1 m (EPS-砂)	A/g	36.3	61.2	70.2
	T/ms	74.0	69.0	63.0
	F/kN	11.5	19.5	22.3
R2-0.2 m+0.1 m (EPS-砂)	A/g	47.4	95.8	162.8
	T/ms	87.0	74.0	63.0
	F/kN	49.9	100.8	171.4
R3-0.2 m+0.1 m (EPS-砂)	A/g	44.9	68.7	-
	T/ms	85.0	74.0	-
	F/kN	31.1	47.6	-

注:A—峰值加速度;T—接触时长;F—峰值冲击力。

图 5 为 R1, R2, R3 落石锤在不同的冲击高度下砂、EPS-砂组合缓冲层冲击峰值加速度随高度变化曲线。结果表明,峰值加速度与冲击高度呈正相关,这一

结果与目前的研究结论一致^[21-22]。采用高速摄像机获取到 EPS-砂组合缓冲层冲击全过程(图 6),相对于砂、碎石土而言,组合缓冲层冲击接触时间最长且冲击过程发生多次大幅反弹,EPS 对上覆散体颗粒巨大的反作用力造成颗粒飞溅,这是组合缓冲层消能效果优于其他两种的原因之一。

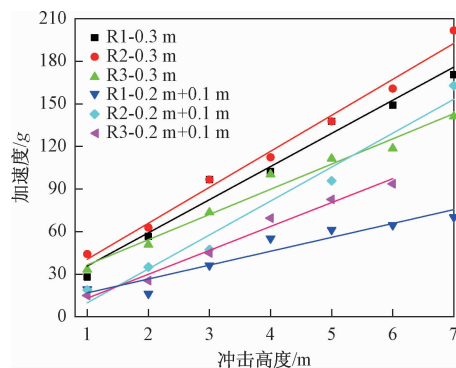


图 5 峰值加速度与冲击高度的关系

Fig. 5 Relationship between peak acceleration and falling height

2.2 EPS 变形破坏特征

图 7 为 EPS 最终破坏形态,2 层 EPS 均发生严重破坏,其中冲击中心破裂区全部下陷,上层形成 0.6 m × 0.4 m 的椭球状弹坑,下层 EPS 中心破裂区形成 0.4 m 近球状弹坑,下层完整性好于上层且下陷深度更小。上、下层 EPS 均沿弹坑边缘形成多条辐射状裂缝,且上层裂缝密集度与延伸长度均大于下层。以上分析表明,EPS-砂组合缓冲层具有更多的能量耗散形式,从而比其他两种材料缓冲效果更好。但 EPS 容易产生塑性破坏具有易损性,完全采用 EPS 单一材料作为缓冲层是不可取的,需上覆砂、土类材料以增加结构整体的耐久性。

2.3 RC 板应变及位移特征

通过板底及内部钢筋应变片获取冲击过程中的应变时程曲线。缓冲层总厚度为 0.3 m、R2 落石锤在 7 m 冲击高度下,砂缓冲层、EPS-砂组合缓冲层应变时程曲线见图 8。总体上钢筋应变大于混凝土应变,沿板长度方向(x 向)应变大于宽度方向(y 向)。以板中心点 x 方向为例,其他冲击条件相同时,中心点(S_2)应变值在砂缓冲层时为 92 $\mu\epsilon$,在组合缓冲层时为 33 $\mu\epsilon$,后者减小了 64%。对钢筋应变而言,下层钢筋 S_6 应变最大,其中砂缓冲层产生 900 $\mu\epsilon$ 的拉应变,组合缓冲层产生 550 $\mu\epsilon$,后者减小了 39%。钢筋及混凝土的应变特征表明,组合缓冲层比砂缓冲层更能有效

控制板的变形,消能效果更优。此外,对于砂缓冲层,钢筋及混凝土均产生较大的残余应变,而采用组合缓冲层时基本无残余应变。试验过程中为了防止混凝土板提前破坏,试验顺序按落石锤质量由小到大进行。图 9 为 RC 板在 3 种不同缓冲层冲击工况下混凝土板跨中位移特征。结果表明,板下表面中心点位移随冲击高度增加而增大,R2 落石锤在 3,5,7 m 冲击工况下,缓冲层为砂和 EPS-砂时 RC 板最大位移值分别为

0.9,2.2,3.8 mm 和 1.1,1.6,2.0 mm,总体上组合缓冲层能更好地抑制板的变形。在以上 6 种冲击工况下板仍处于弹性变形阶段,残余变形基本为 0。当使用质量更大的 R4 落石锤,缓冲层为 0.3 m 厚碎石土时,位移进一步增大且发生明显的塑性变形,此时板跨中产生宽度小于 1 mm 肉眼可见裂缝(图 10a、b)。随着冲击高度增大,裂缝由下向上扩展且宽度进一步增大,但是整体上板的变形破坏不明显。

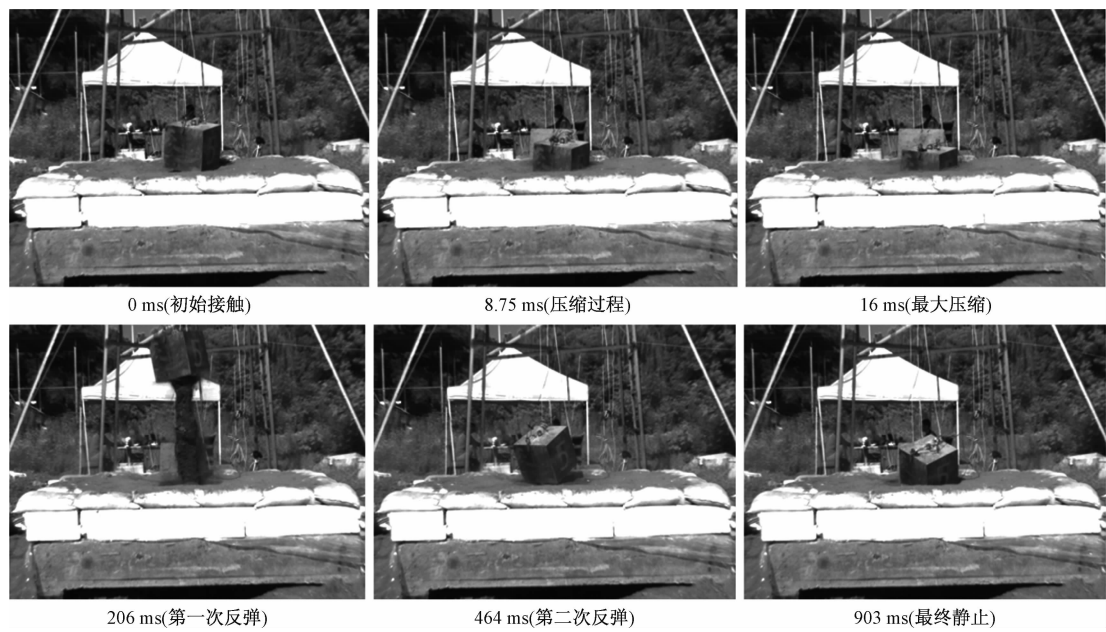


图 6 EPS-砂组合缓冲层变形破坏试验过程
Fig. 6 Test impact process of the EPS-sand composite cushion

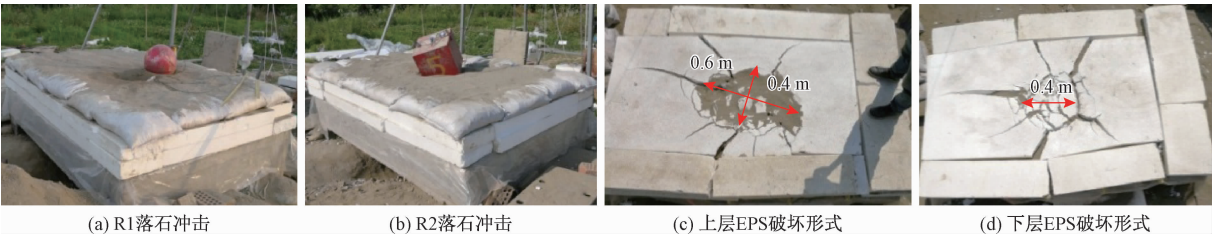


图 7 组合缓冲层下的 EPS 破坏特征
Fig. 7 EPS damage feature under the composite cushion

为进一步观察板的变形破坏模式,采用质量为 290 kg 的 R4 落石锤进行 3~7 m 冲击高度试验,跨中位移总量及塑性变形明显增大,在 0.3,0.2,0.1 m 缓冲层厚度下,板跨中位移分别为 21,24,29 mm。其中在 0.3 m 及 0.2 m 缓冲层厚度冲击下,板跨中裂缝已由板下表面扩展至上表面,裂缝宽度增加到 18 mm(图 10c)。进一步减小缓冲层厚度至 0.1 m,跨中裂缝宽度急剧增大到 50 mm(图 10d),最终在板上表面纵

向中轴线两侧对称范围内发生局部压溃及向下挠曲。表 3 统计了 R4 落石锤在 3~7 m、3 种不同缓冲层冲击工况下对应的冲击加速度、冲击力及不同冲击高度下的总位移及对应的残余变形,其中在 R4 落石锤冲击时,由于 RC 板下表面中点应变片处的混凝土发生崩落,因此仅统计了下层钢筋 S6 位置处应变。结果表明,应变随冲击能量的增大而增大,随缓冲层厚度减小而增大。钢筋始终处于受拉状态,这对于

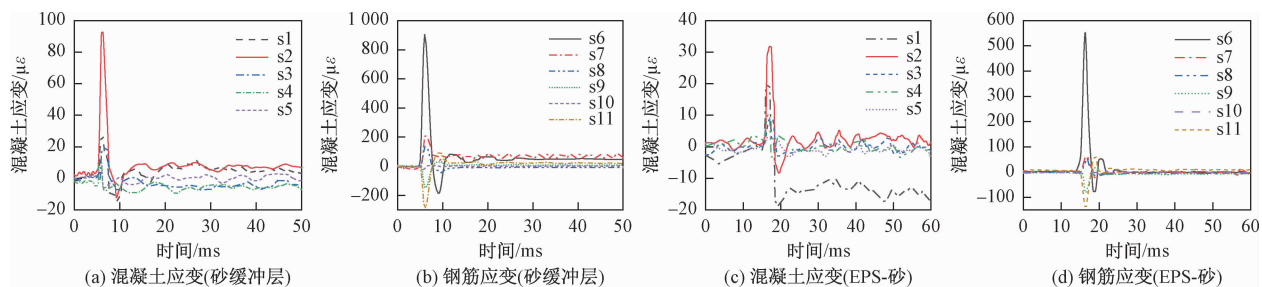


图 8 R2 落石锤 7 m 冲击高度下的应变特征

Fig. 8 Strain characteristics of R2 rockfall at the falling height of 7 m

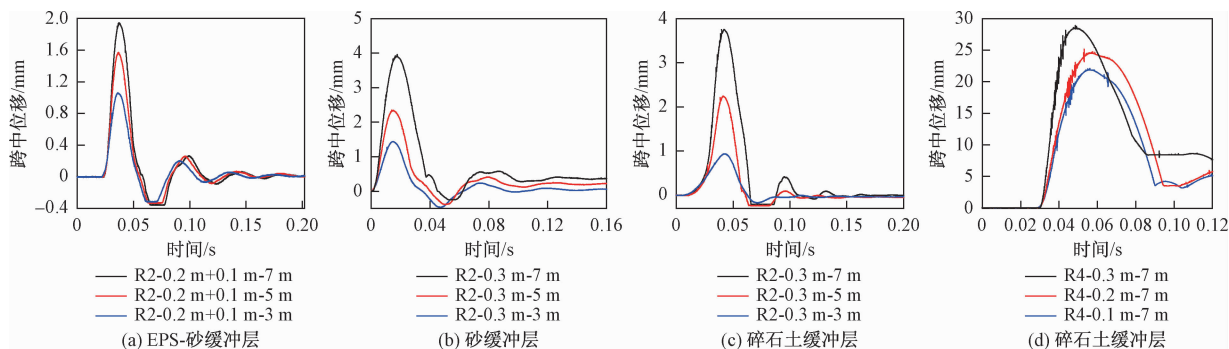


图 9 不同缓冲层下 RC 板跨中位移特征

Fig. 9 RC plate mid-displacement characteristics of different cushion layers

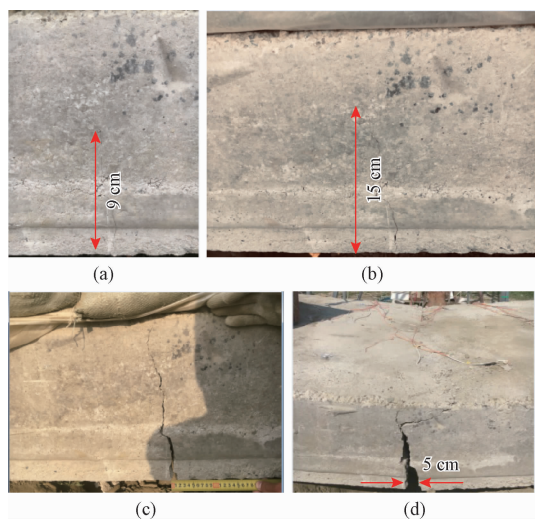


图 10 RC 板变形破坏特征

Fig. 10 RC plate deformation and failure characteristics

抑制板的变形是有利的。在缓冲层厚度为 0.1 m、冲击高度为 7 m 时,钢筋的最大应变为 $1\,972\ \mu\varepsilon$,其中塑性应变为 $1\,605\ \mu\varepsilon$,占总应变的 81.4%,表明钢筋已经超出了弹性范围,产生了较大的塑性变形。此外对 R4 落石锤加速度及冲击力分析表明,同一落锤在其他条件相同时,随缓冲层厚度减小,落石锤加速度(冲击

力)明显增大,因此缓冲层厚度对冲击力的影响是客观存在的,目前一些冲击力计算公式没有考虑缓冲层厚度的影响,可能会导致计算结果失败^[23,9],这可能是目前一些已建棚洞及拦石墙时有破坏的主要原因之一。

汇总 R4 落锤在碎石土缓冲层厚 0.3, 0.2, 0.1 m 冲击工况下残余变形量(图 11),可见 3 种厚度的缓冲层残余变形量分别为 12.6, 17.8, 23.2 mm, 合计 53.6 mm。板最终破坏模式属于弯曲变形破坏。

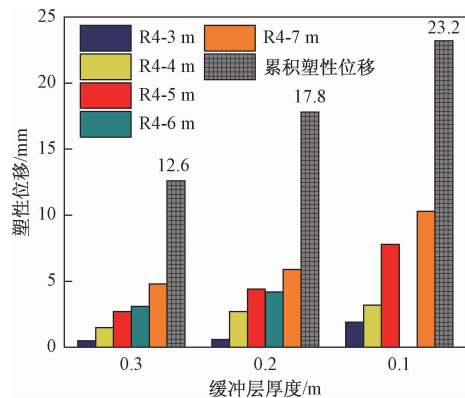


图 11 不同厚度土缓冲层 RC 板跨中累计残余变形

Fig. 11 Mid-span cumulative residual deformation characteristics of the RC plate of grave soil of different thicknesses

表 3 不同厚度碎石土缓冲层 R4 落锤冲击下的加速度、应变、位移

Table 3 Acceleration, strain and displacement of R4 rockfall under the impact of the gravel soil cushion layers of different thicknesses

落锤 冲击 高度/ m	碎石缓冲层厚度/m											
	0.3				0.2				0.1			
	A/g	F/kN	$\varepsilon_r(\Delta\varepsilon'_r)$	$s(\Delta s')$ /mm	A/g	F/kN	$\varepsilon_r(\Delta\varepsilon'_r)$	$s(\Delta s')$ /mm	A/g	F/kN	$\varepsilon_r(\Delta\varepsilon'_r)$	$s(\Delta s')$ /mm
3	67.9	193	740(8)	9.8(0.5)	112.2	319	719(39)	14.6(0.6)	158.4	450	813(15)	11.5(1.9)
4	93.1	264	770(16)	13.4(1.5)	136.9	389	784(91)	20.9(2.7)	232.9	662	877(18)	14.3(3.2)
5	106.1	301	813(22)	15.4(2.7)	170.8	485	860(34)	29.3(4.4)	252.4	718	953(20)	19.7(7.8)
6	123.6	351	843(33)	17.8(3.1)	180.2	512	849(29)	14.6(4.2)	—	—	—	—
7	141.0	401	917(46)	22.1(4.8)	214.7	610	1 033(50)	25.1(5.9)	281.6	801	1 972(1 605)	20.5(10.3)

注:A—峰值加速度;F—对应的最大冲击力; $\varepsilon_r(\Delta\varepsilon'_r)$ —钢筋总应变(塑性应变); $S(\Delta s')$ —跨中最大位移(塑性位移)

3 结论

(1)相同厚度及材料的缓冲层在相同落石锤冲击作用下,峰值加速度与冲击高度呈正相关,与砂缓冲层、碎石土缓冲层相比,EPS-砂组合缓冲层能够明显减小落石加速度(冲击力),3种材料的消能效果由好到差分别为 EPS-砂>碎石土>砂。

(2)与落石冲击碎石土缓冲层、砂缓冲层相比,冲击 EPS-砂组合缓冲层时接触时间更长、反弹次数更多、反弹高度更大,EPS 对上覆砂颗粒的反作用力使得砂粒大量被弹射飞溅,这是组合垫层消能效果优于其他两种的原因之一。

(3)较之砂缓冲层, EPS-砂组合缓冲层更能有效减小 RC 板的跨中位移,在 3,5,7 m 冲击高度下,跨中位移减小了 37%~46%。R4 落石锤冲击 0.3 m 厚碎石土缓冲层时,板跨中处开始产生明显可见的裂缝,进一步减小缓冲层厚度,跨中裂缝自下而上贯通,宽度急剧增大,混凝土板的破坏模式为弯曲变形破坏。

参考文献(References):

[1] 何思明,王东坡,吴永,等.崩塌滚石灾害的力学机理与防治技术[J].自然杂志,2014,36(5):336-345. [HE S M, WANG D P, WU Y, et al. Formation mechanism and key prevention technology of rockfalls[J]. Chinese Journal of Nature, 2014, 36(5): 336-345. (in Chinese)]

[2] 张路青,杨志法.公路沿线遭遇滚石的风险分析——案例研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3700-3708. [ZHANG L Q, YANG Z F. Risk analysis of encountering rockfalls on a highway—a case study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3700-3708. (in Chinese)]

[3] 刘丹,叶四桥,杨威.落石水平运动距离影响因素的模型试验研究[J].水文地质工程地质,2013,40(6):112-116. [LIU D, YE S Q, YANG W. Model test study of influence factors of horizontal movement of rockfalls [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(6): 112-116. (in Chinese)]

[4] 胡卸文,梅雪峰,杨瀛,等.落石冲击荷载作用下的桩板拦石墙结构动力响应[J].工程地质学报,2019,27(1):123-133. [HU X W, MEI X F, YANG Y, et al. Dynamic response of pile-plate rock retaining wall under impact of rockfall[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(1): 123-133. (in Chinese)]

[5] LUO H Y, COOPER W L, LU H B. Effects of particle size and moisture on the compressive behavior of dense Eglin sand under confinement at high strain rates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65: 40-55.

[6] LI J C, MA G W. Experimental study of stress wave propagation across a filled rock joint[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(3): 471-478.

[7] 杨爱武,陈子荷,王韬.冲击荷载作用下结构性软黏土力学特性试验研究[J].水文地质工程地质,2017,44(6):44-50. [YANG A W, CHEN Z H, WANG T. A study of the mechanical characteristics of structured soft clay under impact loading [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(6): 44-50. (in Chinese)]

[8] BOGUSLAVSKII Y, DRABKIN S, JURAN I, et al. Theory and practice of projectile's penetration in soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(10): 806-812.

[9] KAWAHARA S, MURO T. Effects of dry density and

- thickness of sandy soil on impact response due to rockfall[J]. *Journal of Terramechanics*, 2006, 43(3): 329 – 340.
- [10] VISCO D P, SWAMINATHAN S, KRISHNA MOHAN T R, et al. Impulse penetration into idealized granular beds: Behavior of cumulative surface kinetic energy [J]. *Physical Review E*, 2004, 70(5): 051306.
- [11] SEAMAN L. One-dimensional stress wave propagation in soils[R]. Defense Technical Information Center, 1966. DOI:10.21236/ad0632106.
- [12] 于潇, 陈力, 方秦. 珊瑚砂中应力波衰减规律的实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(6): 1520 – 1529. [YU X, CHEN L, FANG Q. Experimental study on the attenuation of stress wave in coral sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(6): 1520 – 1529. (in Chinese)]
- [13] KRAUTHAMMER T. *Modern Protective Structures* [M]. Second Edition. CRC Press, 2017.
- [14] 郭江, 王全才, 张群利, 等. 落石冲击荷载下框架门式棚洞结构优化探讨[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(6): 92 – 97. [GUO J, WANG Q C, ZHANG Q L, et al. Exploration of structural optimization for the frame-type shed-tunnel under the impact of load of rock-fall [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(6): 92 – 97. (in Chinese)]
- [15] KISHI N, KONNO H, IKEDA K, et al. Prototype impact tests on ultimate impact resistance of PC rock-sheds [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(9): 969 – 985.
- [16] MOUGIN J P, PERROTIN P, MOMMESSIN M, et al. Rock fall impact on reinforced concrete slab: an experimental approach [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(2): 169 – 183.
- [17] YAN P, ZHANG J H, FANG Q, et al. Numerical simulation of the effects of falling rock's shape and impact pose on impact force and response of RC slabs [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 160: 497 – 504.
- [18] OZTURK U E, ANLAS G. Energy absorption calculations in multiple compressive loading of polymeric foams[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(1): 15 – 22.
- [19] 王东坡, 何思明, 吴永, 等. 滚石防护棚洞 EPS 垫层结构缓冲作用研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(4): 199 – 203. [WANG D P, HE S M, WU Y, et al. Cushioning effect of rock sheds with EPS cushion on rock-falls action [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(4): 199 – 203. (in Chinese)]
- [20] 王东坡, 何思明, 李新坡, 等. 冲击荷载下 EPS 垫层棚洞耗能减震作用研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(6): 102 – 107. [WANG D P, HE S M, LI X P, et al. Study on the dissipating effects of shed with EPS cushion under impact load [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(6): 102 – 107. (in Chinese)]
- [21] 陈驰, 刘成清, 陈林雅, 等. 落石作用于钢筋混凝土棚洞的冲击力研究[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(1): 102 – 109. [CHEN C, LIU C Q, CHEN L Y, et al. Study on impact force of rock-fall onto rock shed tunnel [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(1): 102 – 109. (in Chinese)]
- [22] 韩文奇, 余宏明, 陈鹏宇. 滚石的运动速度与冲击力关系的试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(12): 42 – 45. [HAN W Q, YU H M, CHEN P Y. Experimental study on relation between rockfall velocity and impact force [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(12): 42 – 45. (in Chinese)]
- [23] LABIOUSE V, DESCOEUDRES F, MONTANI S. Experimental study of rock sheds impacted by rock blocks [J]. *Structural Engineering International*, 1996, 6(3): 171 – 176.

编辑:张明霞