

DOI:10.11918/202209098

增幅冲击下钢筋混凝土板的抗冲击性能

叶宇霄¹, 胡少伟², 杨金辉³, 王洋³, 齐浩²

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430070)

摘要: 钢筋混凝土板在服役期间可能承受落物多角度连续撞击等多次冲击荷载作用, 钢筋混凝土板抵抗多次冲击的能力、多次冲击作用下钢筋混凝土板的性能演化和剩余性能评估等问题至关重要, 其中, 多次冲击的加载制度是研究钢筋混凝土板抗冲击性能的重点。为研究多次冲击下钢筋混凝土板的抗冲击性能, 利用落锤和摆锤试验研究钢筋混凝土板在增幅冲击下的抗冲击性能, 获得钢筋混凝土板在历次冲击过程中的冲击力时程曲线以及历次冲击后的整体变形和凹陷变形特征, 分析钢筋混凝土板的吸能特性和累计损伤演化规律, 研究钢筋混凝土板受冲击后的残余性能。结果表明: 冲击角度对钢筋混凝土板的变形有显著影响, 斜向冲击对钢筋混凝土板安全性能的影响更大; 增幅冲击降低钢筋混凝土板的吸能能力, 提高其破坏率, 钢筋混凝土板的冲击响应相对于恒重重复冲击更加稳定。

关键词: 钢筋混凝土楼板; 增幅冲击; 落锤和摆锤; 累计损伤; 抗冲击性能

中图分类号: TU318

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)02-0048-10

Impact resistance of reinforced concrete slabs under amplitude impacts

YE Yuxiao¹, HU Shaowei², YANG Jinhui³, WANG Yang³, QI Hao²

(1. College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Reinforced concrete slabs during the service period may suffer repeated impacts from falling objects with different impact angle. The capability of reinforced concrete slabs to resist multiple impacts, the performance evolution of reinforced concrete slabs under multiple impacts and the residual performance evaluation are vital to people's livelihood and safety. Notably, the multiple impact loading system is the key to investigate the impact resistance of reinforced concrete slabs. To study the impact resistance of reinforced concrete slabs under multiple impacts, drop hammer and pendulum impact test was carried out, and the impact performance of reinforced concrete (RC) slabs under amplitude impacts was scrutinized with the cumulative damage characteristics of the RC slabs analyzed, the impact force-time history curves of each impact and the global and the local deformations of the RC slabs after each impact examined. The energy-absorbed capacity and the residual performance of the impacted slab were explored. The experimental results show that the deformation of the RC slabs is affected by the impact angle with the oblique impact producing a greater influence on the safety performance of reinforced concrete slabs. Moreover, the energy-absorbed capacity of the RC slabs is reduced due to the amplitude impact force which causes more damage of the slab. The impact response of the slab under amplitude impacts proves to be more stable than that of the repeated-impact with a constant weight.

Keywords: reinforced concrete slab; amplitude impacts; drop hammer and pendulum; cumulative damage; impact performance

钢筋混凝土结构是中国目前使用最为广泛的结构形式。钢筋混凝土建筑在服役期间可能受车辆等载具的连续撞击、高空连续坠物和结构连续倒塌等多次冲击作用。其中, 钢筋混凝土楼板受高空连续

坠物等冲击影响较大, 后果更严重, 且防护工程中的顶板或外墙经常遭受多角度不同大小的冲击作用。通过正确评估受冲击楼板的损伤程度、提出有效的修补方案和合理的应对措施, 是确保结构安全有效

收稿日期: 2022-09-23; 录用日期: 2022-11-23; 网络首发日期: 2022-12-29

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//23.1235.T.20221227.1523.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51739008, 52130901); 郑州市协同创新重大专项(122/32211641); 重庆市自然科学基金创新群体科学基金(cstc2020jcyj-ctxtX0003)

作者简介: 叶宇霄(1992—), 男, 博士研究生; 胡少伟(1969—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 胡少伟, hushaowei@cqu.edu.cn

运维的重要举措。因此,研究冲击荷载下钢筋混凝土板(RC板)的损伤和抗冲击性能具有重要意义。

目前,国内外对板件抗冲击性能的研究主要以单次冲击和多次恒重冲击为主。寇佳亮等^[1]开展了 14 m 高度下不同纤维掺量混凝土板落锤冲击试验,研究高延性混凝土板的抗冲击性能。古松等^[2]进行了不同长厚比、混凝土强度和荷载的素混凝土板件垂直冲击试验。陆观等^[3]研究了垂直冲击荷载下变厚度复合材料板的抗冲击性能。黄振宇等^[4]研究了多次冲击荷载下夹芯组合板的残余抗冲击性能。代祥俊等^[5]研究了蜂窝夹芯板多次低速冲击性能及剩余强度。胡卸文等^[6]开展了钢筋混凝土板落石冲击试验,揭示了 RC 板在不同冲击工况下的损伤累积与动态破坏模式。万志敏等^[7]研究了复合材料层板在多次冲击下的剩余刚度。Hajiloo 等^[8]研究了多冲击荷载下锈蚀钢筋混凝土板加固后的抗冲击性能。Mouwainea 等^[9]研究了高质量低速重复冲击荷载下钢筋混凝土板的抗冲击性能。Batarlar 等^[10]研究了重复冲击荷载下碳纺织品增强钢筋混凝土板的抗冲击性能。

综上,现有的混凝土板冲击方法以单次垂直冲击、多次恒重冲击为主,具有以下不足:难以模拟真实的板件冲击工况;多次恒重冲击试验的冲击体质量、冲击高度等缺乏实际意义;多次恒重冲击后期混凝土板的动力响应规律性较差、耗时较长;破坏模式多变,给试验的实施和后期分析带来困难。而增幅冲击具有可操作性强、可充分发掘混凝土板抗冲击性能、试验步骤简易等诸多优势,适合用于混凝土板抗冲击性能的试验研究。

本文对钢筋混凝土板在增幅冲击下的抗冲击性能进行研究,开展了 4 组不同冲击角度的钢筋混凝土板落锤冲击试验,并对不同冲击角度和冲击能量的冲击力作用下的板进行了变形、冲击力时程和吸能分析,通过计算板的吸能系数、标准化强度、冲击力能比系数等关键指标,研究带损伤钢筋混凝土板的残余抗冲击性能,为评估受冲击后板件的安全性提供了参考。

1 试 验

1.1 试验试件

根据钢筋混凝土楼板设计规范,制作了 3 块尺寸为 2 000 mm×7 500 mm×80 mm 的钢筋混凝土板(RC板)。混凝土采用 42.5 级硅酸盐水泥,粗骨料采用粒径为 5.0~31.5 mm 连续级配的碎石,细骨料为天然河砂,配合比为 $m(\text{水泥}):m(\text{砂}):m(\text{骨$

料): $m(\text{水})=1:1.2:1.92:0.4$,混凝土标准立方体 28 d 抗压强度为 65 MPa。RC 板底部设置单层 5 Φ 16×12 Φ 10 钢筋网,钢筋型号为 HRB335,钢筋外表面与混凝土表面距离 20 mm。

RC 板架在钢梁上,以螺栓锚固的方式装配在组合框架上。每块板由钢梁划分为 3 块区域,以螺栓为界,如图 1 所示。螺栓为 8.8 级 M20 高强螺栓,其最小抗拉力为 188.41 kN,可避免多次冲击造成的板件移动。板件浇筑前,在模具的端部用 PVC 管预留螺栓孔,每排 8 个螺栓孔,共 6 排。板件在浇筑并养护 28 d 后,由吊机吊装至框架结构的相应位置进行装配。

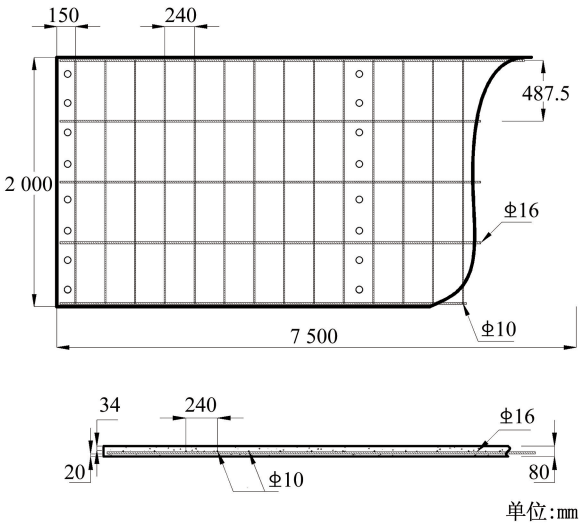


图 1 RC 板尺寸和布筋
Fig. 1 Details of the slab

1.2 试验装置

如图 2 所示,冲击系统分为落锤冲击和摆锤冲击试验系统,由地面刚性基座、钢架和锤头组成。钢架高 7 m,锤头质量为 122.6 kg。冲击试验中,通过龙门吊将锤头提升至预定冲击高度后释放。落锤冲击试验中,钢架两侧的导轨可以限制重锤两侧滑轮的运动轨迹,经预实验确定每次冲击时锤头撞击点不变;垂直冲击和斜向冲击试验均在板件表面的跨中位置安装固定承台,分别如图 2(c)、(d)所示,以确保摆锤施加给板件的冲击力作用点不受冲击装置运行和板件局部破损的影响。根据预先数值模拟的结果,边长 10 cm 的承台接受冲击时,混凝土板的应力分布和损伤分布不受边界条件影响,因此,设置图 2(c)、(d)的承台边长均为 10 cm。锤头材质为高强钢,锤头端部安装轮辐式力传感器,用来记录冲击力数据。本试验在板件侧面布置高速摄像机,以观察板-锤相对运动。



(a) 冲击系统与框架总览

(b) 冲击试验展示

(c) 斜冲击承台

(d) 垂直冲击承台

图 2 冲击系统

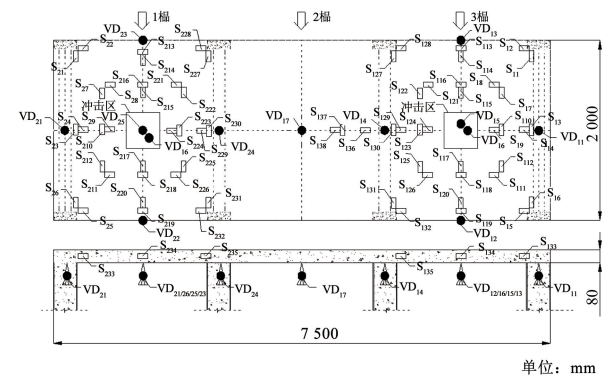
Fig. 2 Impact test setup

1.3 传感器设置与试验方案

由于低速冲击下的 RC 板将同时发生局部变形和整体变形,本试验在 RC 板的表面设置了两部分应变片,即冲击点周围和 RC 板的边缘,每一个测点均有两个正交布置的应变片。沿板件对称线布置了多个位移计,用于监测板件底部位移,如图 3 所示。

相同冲击总能量下,不同冲击方案造成的 RC 板累积损伤不同^[5]。试验安排如表 1 所示,其中,1#板先进行垂直冲击,后进行斜向冲击。竖向冲击和斜向冲击试验采用相同的加载制度,如表 2 所示。为规范试验流程,且考虑多次冲击位于同一点时为最危险状况,试验设置的冲击点固定为板件中心。恒重冲击下混凝土的累积损伤随着冲击次数的增加趋于稳定^[11],且冲击能主要由混凝土的损伤开裂而

吸收^[4]。为了使每次冲击后混凝土的累计损伤加深,实现对不同初始损伤的 RC 板残余抗冲击能力的研究,采用冲击能量逐级递增的方案进行加载。其中,1st~5th 为预冲击阶段,可将混凝土内部微裂纹或孔隙压实^[11],避免 RC 板制作工艺对试验的影响。每次冲击后,均等待板件完全静止后才进行下一级加载,试验实况如图 4 所示。图 4(b)中板表面与锤体的夹角为所述的冲击角度。冲击直到 RC 板破坏为止,即 RC 板冲击区下表面出现大块混凝土脱落且裸露钢筋。



单位: mm

S_{11} 为斜向冲击的1号应变片, S_{21} 为垂直冲击的1号应变片, VD同理。

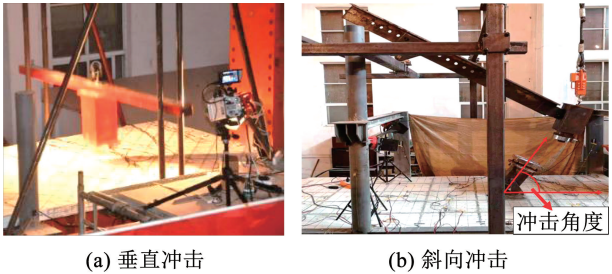
图 3 应变片与位移计布置

Fig. 3 Layout of strain gauge and LVDT

表 1 试验安排

Tab. 1 Layout of the test

编号	冲击对象	冲击角度/(°)
1	1#板-3 槌	90
2	1#板-1 槌	60
3	2#板-1 槌	45
4	3#板-1 槌	30



(a) 垂直冲击

(b) 斜向冲击

图 4 试验实况

Fig. 4 Test in progress

2 试验结果与讨论

RC 板件连续冲击试验结果如表 2 所示。第 1 列的序号表示该试件所承受的是第几次冲击。其中,锤头接触 RC 板表面的冲击速度 v 由高速相机测定,冲击能量 E_i 由动能定理求出。 w_g 为试件的跨中位移,即试件下表面的变形,在各次冲击后测量。

表2 垂直冲击试验结果(1#板)

Tab.2 Results of thevertical impact test

冲击 次序	$h/$ cm	$v/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$E_i/$ J	$w_{1g}/$ mm	$w_{2g}/$ mm	$w_{3g}/$ mm	$w_{4g}/$ mm
1	1	0.44	11.9	0.11	0.17	0.06	0.07
2	2	0.63	24.3	0.77	0.24	0.14	0.16
3	3	0.77	36.3	1.33	0.32	0.31	0.17
4	4	0.89	48.6	1.79	1.88	0.66	0.21
5	5	0.99	60.1	1.83	1.93	1.42	1.13
6	10	1.41	121.9	2.75	2.44	2.13	0.92
7	15	1.71	179.3	3.93	3.17	2.16	0.91
8	20	1.98	240.4	5.11	4.41	2.56	1.43
9	25	2.21	299.4	6.63	5.64	2.91	2.01
10	30	2.42	358.9	8.31	6.23	3.41	1.83
11	35	2.62	420.8	9.51	7.88	3.93	1.99
12	40	2.81	484.1	10.65	8.41	4.64	2.98
13	50	3.13	600.5	11.99	9.67	5.32	2.77
14	60	3.43	721.2	13.17	10.73	6.68	3.37
15	70	3.71	843.7	14.49	11.33	7.79	4.65
16	80	3.96	961.3	15.94	12.67	8.96	6.11
17	90	4.21	1 086.5	16.83	13.42	9.45	6.34
18	100	4.43	1 203.1	—	—	—	—

注:1)18th时拆卸了位移计,防止板件破坏时损毁位移计。
2)垂直冲击的锤头速度 $v=(2gh)^{0.5}$,由于斜向冲击存在两个方向的速度分量,相同冲击高度下其速度的矢量大于垂直冲击。将相同冲击高度下不同冲击角度的混凝土板动力响应进行对比分析。

2.1 变形与破坏

在多次的冲击下,RC板件发生了严重的整体弯曲变形和凹陷变形。相比之下,受到垂直冲击的RC板件整体弯曲变形和凹陷变形都明显大于受斜向冲击的板件,而受斜向冲击板件的损伤区域明显更大,裂缝穿过螺栓并传递至未直接受冲击的板件。不同冲击角度的冲击力造成的板件凹陷变形均集中发生在被冲击位置。随着冲击次数的增加,RC板的整体弯曲变形和凹陷变形也在增大,冲击次数的增加加剧了RC板件的裂纹发展,如图5。图中圆圈为受冲击部位。粗线是斜向冲击造成的裂缝,细线是垂直冲击造成的裂缝。

RC板形成从加载点至边缘的径向裂纹,证明竖向冲击和斜向冲击均引起RC板的弯曲响应,符合屈服线理论的主要特征。随后,裂纹集中出现在试件的孔洞等薄弱区,破坏程度随冲击次数的增加而加剧,裂缝逐渐从边缘向中部扩展,最后导致试件贯通开裂^[12]。在斜向冲击的作用下,冲击速度的提高将导致板抗冲击荷载变高,但RC板的破坏模式也

发生了变化,更倾向于发生整体破坏,文献[13]的试验也出现了类似现象。在18th冲击时,斜向冲击的板件均观察到小块混凝土脱落,且框架有严重的横向摆动,因此停止试验。

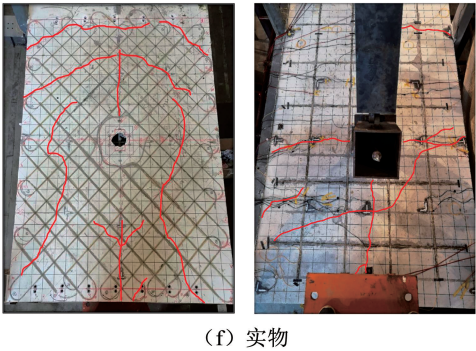
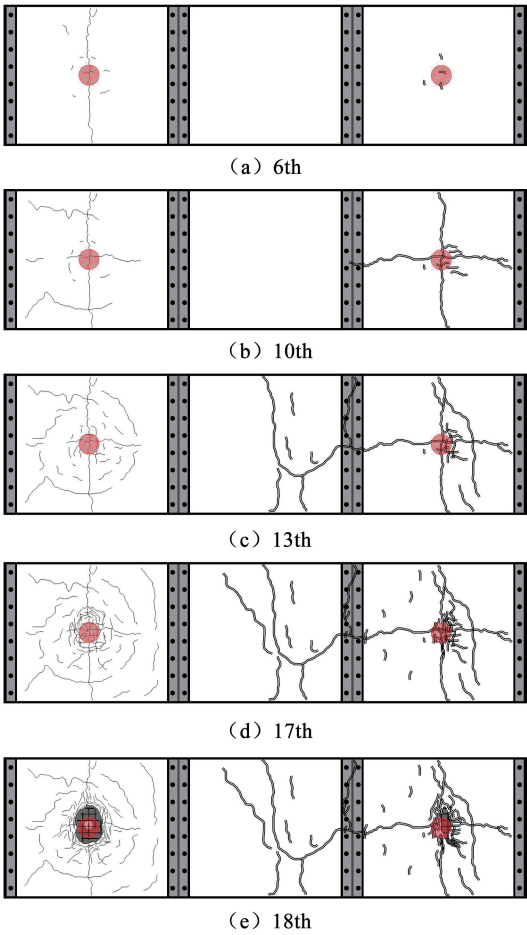


图5 RC板的损伤分布(1#板)
Fig.5 Damage distribution of RC slabs

RC板件在竖向冲击和斜向冲击荷载作用下的变形机制如图6所示。当冲击能量相等时,斜向冲击的部分能量沿横向传递,导致受斜向冲击的板件发生较小的局部变形。然而,斜向冲击导致应力波传递至板件右部的混凝土,并在中跨板件上产生垂直于能量传递方向的横向裂缝,进而证明了斜向冲击的破坏范围更大,难以通过减小跨度和增加螺栓的方法来预防。

受竖向冲击的板件呈现典型的环型冲击区屈服线裂缝,并最终发生冲切破坏;而受斜向冲击的板件呈现径向交叉裂缝和冲击力传递路径上的横向裂缝,并最终因混凝土碎裂和较大横向位移而退出工作状态。

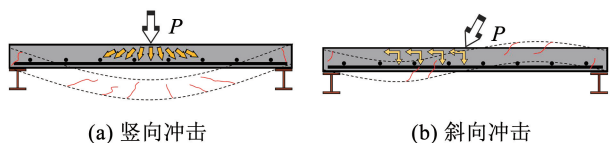


图 6 不同角度冲击力作用下 RC 板的变形特征

Fig. 6 Deformation of the RC slab under impact force from different angles

如图 7 所示,冲击角度越小的 RC 板跨中位移越小,跨中位移越大 RC 板的损伤越大。跨中位移特指冲击点位置的板底竖向位移。冲击角度越小,越多的冲击能量传递至 RC 板平面方向。由于本试验是多跨连续板,横向约束较强,横向冲击分力造成的 RC 板损伤没有体现在竖向位移的变化上。

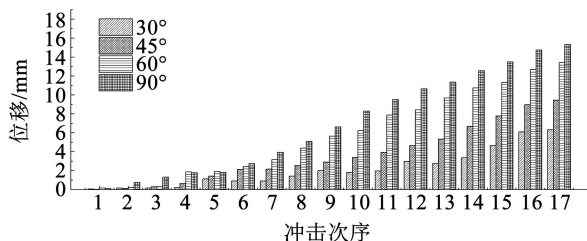


图 7 不同角度冲击力作用下 RC 板的跨中位移

Fig. 7 The displacement on the middle of the RC slab under impact force from different angles

2.2 冲击力时程曲线

根据现有研究可知,冲击力时程曲线不受配筋率影响^[9],其特征具有普遍性。混凝土板受低速竖向冲击的冲击力时程曲线一般可分为两个阶段,即板-锤的向下运动阶段和板-锤的向上运动阶段,如图 8(a)所示。其中,板与锤接触后在短时间冲击力达到峰值,板件加速向下变形,直至板-锤速度相等,板-锤接触力为 0,这一过程反映板件传递冲击能量的效率,一般而言,脆性越高的板件该过程越短(本文为 4 ms,与文献[14]一致;文献[2,15]为 10 ms,文献[4]为 20 ms)。随后, $P-t$ 曲线展示了第 2 个波段,板-锤的速度减小,当板-锤的速度为 0 且达到向下最大位移时,冲击力达到第 2 个峰值,板与锤随即反弹直至分离,这一过程反映 RC 板吸收冲击能量的能力。一般而言,板件吸收冲击能量的效率随着吸收能量的累计而逐渐降低。RC 板的能量吸收过程越长,锤头与板件间转移能量就越多,能量耗散率越低的 RC 板的能量吸收过程也越长。

古松等定义 $P-t$ 曲线(其原文的 $F-T$ 曲线)的

首个波段时长为碰撞持时,并认为素混凝土板受冲击能量越大该时长越长,板件的损伤更严重。结合图 8(b)~(e)发现本试验 RC 板件的碰撞持时恒为 4 ms。由此可知,RC 板的内置钢筋起到了良好的传递冲击能量的能力,但第 2 个波段的时长从 5 ms 增加至 15 ms,可知 RC 板的初始损伤影响板件的吸能能力。根据图 8(f)中冲击力峰值随冲击次数的增加而降低,结合文献[9,14]的类似结论,认为冲击力峰值和速度呈非线性关系,冲击次数越多,RC 板的损伤越大,冲击力越低,吸能的能力越差。

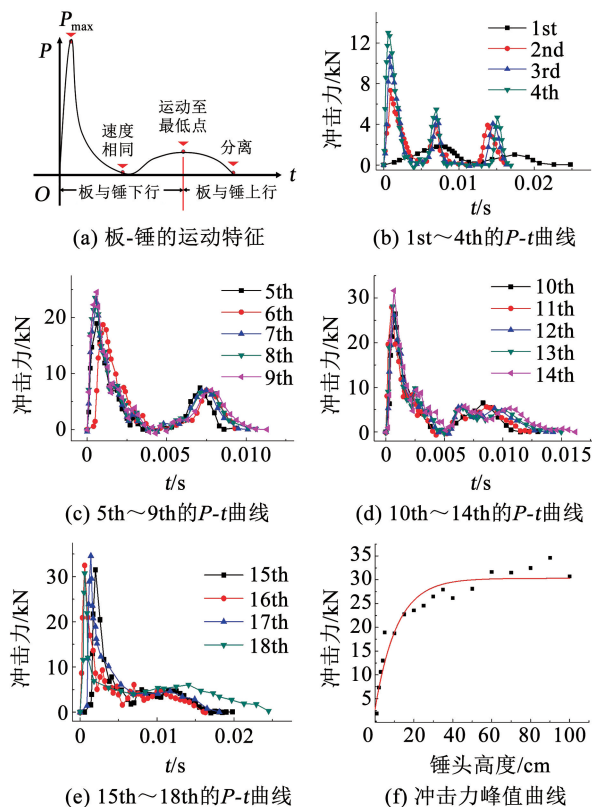


图 8 垂直冲击力特征分析

Fig. 8 Analysis of vertical impact force

当第 1 个波段的下降段不明显或与第 2 个波段难以区分时,也可以通过 $P_{\max}$ 发生的时间来判断混凝土板传递冲击能量的能力^[15],与古松的方法类似,且结论一致。由于本试验采用平面锤头(垂直冲击)和固定台座(斜向冲击),板-锤接触面混凝土碎裂较少,冲击力时程曲线初始阶段没有出现常见的波动段^[14,16],利于确定冲击力峰值。15th~18th,由于 RC 板冲击面的破坏,力-时程曲线出现了较小的波动,文献[5]也报道了相似的情况。

上述垂直冲击的试验分析证明了本文试验设计的合理性。接下来通过与垂直冲击的对比来分析斜向冲击的板-锤相对运动。

如图 9(a)所示,斜向冲击的板-锤运动特征与

竖向冲击类似,波动更大,这是因为斜向冲击下板-锤存在两个方向的运动。由图 9(b) ~ (e) 的 $P-t$ 曲线可知,摆锤作用于板的时长比落锤作用于板的时长多 10 倍。板-锤接触时间越长,RC 板的吸能效率越低,这是因为冲击能量沿平面传递需要更长时间。而斜向冲击与竖向冲击中,板与锤的相对运动特征大体相近。这也说明了,相对于图 8(a),图 9(a) 中板锤刚接触时曲线就发生的“振荡”与板横向变形有关,可能是板件在横向发生拉伸与压缩的证明。

由图 9(f) ~ (h) 可知,在试件的破坏阶段(13th ~ 18th),斜向冲击的峰值荷载大于竖向冲击,这是因为斜向冲击的锤头和钢制承台撞击,避免了冲击区混凝土碎裂对冲击力测量的影响。进一步证明了约 12th 冲击时,冲击区的混凝土发生碎裂,混凝土不再抵抗冲击力。不同角度的斜向冲击对板件造成冲击力一致。由此可知,斜向冲击对 RC 板的冲击影响更复杂。

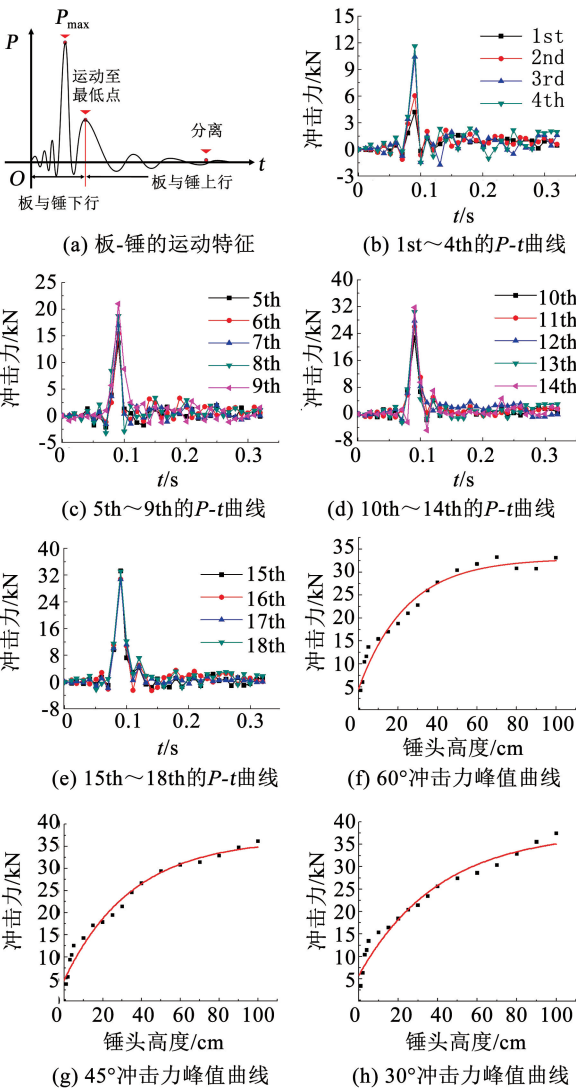


图 9 斜向冲击力特征分析

Fig. 9 Analysis of oblique impact force

2.3 吸能分析

根据文献[8]提及的冲击延性指数 μ 可知,4 项冲击试验中 RC 板的 μ 均为 3,证明本文所有 RC 板的初始吸能能力相近。冲击能量主要以钢筋的屈服和混凝土的开裂等形式被吸收、耗散^[17],而高强螺栓的吸能及落锤反弹损失极少(不足 5%)^[4]。在落锤冲击混凝土板的过程中,RC 板有明显的弯曲变形特征,整体响应明显。多次冲击后,局部变形占主导,能量主要由局部变形来吸收。王宇等^[14]提出了吸能系数(E_{AC})的概念,定义为

$$E_{AC} = \frac{E_a}{Gw_l} \tag{1}$$

式中 E_a 为结构吸收的冲击能量,此处不能认为冲击能量全部被板件吸收,部分冲击能量被板件的运动释放。假设落锤先向板件传递冲击能量,进而位移达到最大值,这一阶段由惯性作用造成^[17],冲击能量储存为弹性能^[18];然后,RC 板吸收能量并产生裂缝和残余位移。本文认为冲击过程中位移最大值与冲击总能量相关,残余位移 w_l 与吸收总能量相关,因此,板件冲击能量的吸收率 R 和 w_l/w_{max} 相关。

图 10 展示了各 RC 板的 w_l/w_{max} 趋势,其中除 30° 冲击外,各板均在 6th 冲击时开始发生更大比例的残余位移,这与上文所述 6th 冲击后混凝土产生损伤的结论一致。由图 10 可知,RC 板的吸能率在 45° 和 60° 时达到最大,由此认为板件弯曲吸能和板平面方向吸能均为主要的吸能途径。

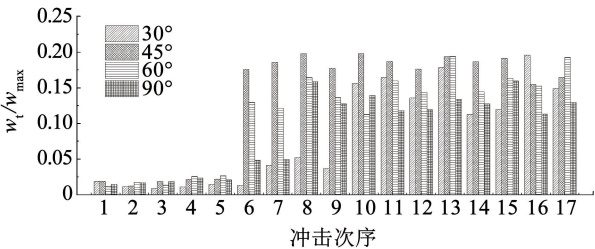


图 10 不同角度冲击力作用下 RC 板的 w_l/w_{max}

Fig. 10 Ratio of w_l/w_{max} of the RC slab under impact force from different angles

进一步认为可以用 w_l/w_{max} 和冲击能量 E_i 来计算 E_a ,有

$$E_a = \frac{w_l}{w_{max}} E_i \tag{2}$$

进而有

$$E_{AC} = \frac{E_i}{Gw_{max}} \tag{3}$$

式中板的总质量 G 为 3 061 kg,但式(3)选用的 G 必须按受冲击响应区的 RC 板质量计算。按产生裂纹最远的位置为界来计算板质量,其中,90° 冲击由于裂缝仅存在于 1 樁内,应计算 1/3 板的质量;

45°和 60°时裂缝均扩展至 2 槓,应取 2/3 板的质量,30°时裂缝扩展至 3 槓,应取整板质量计算。计算结果如图 11 所示,其中,90°与 60°冲击的吸能能力差距不大,但 45°和 30°冲击的板件吸能系数更高,改进后的吸能系数能够合理地体现增幅多次冲击作用下 RC 板的吸能能力。

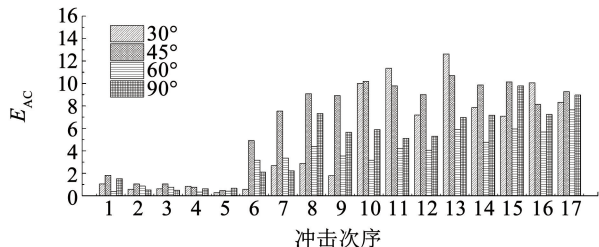


图 11 不同角度冲击力作用下 RC 板的 E_{AC}

Fig. 11 E_{AC} of the RC slab under impact force from different angles

3 RC 板残余抗冲击性能评估

随着冲击次数的增加,RC 板的损伤不断累积,主要表现为峰值冲击力明显降低,挠度和应变不断增加^[19]。前 5 次冲击中,RC 板表现出明显的强化效应,这是因为 RC 板在低速反复冲击的作用下被压实,该阶段板件不产生损伤;6th ~ 12th 冲击造成了 RC 板的损伤,并在 12th 冲击时达到混凝土吸能的最大值,混凝土损伤程度接近极限;13th ~ 18th 冲击是钢筋的屈服阶段,随着冲击次数的增加,受冲击部位钢筋的塑性变形变大,受冲击区混凝土损伤严重且与板件分离,无法提供抗冲击承载力,最后混凝土与钢筋完全剥离并发生冲切破坏,具有明显的软化效应^[20]。文献[17]也报道了钢-混组合板在受冲击后,板内的钢组件通过塑性变形来耗能的事实。

根据上述分析得出结论:应评估混凝土完全丧失抗冲击承载力前的混凝土损伤(6th ~ 12th);而 RC 板进入钢筋屈服阶段(指完全由钢筋来抵抗冲击力的阶段)后,混凝土已经失去了抗冲击能力,此时的 RC 板已经被破坏。

3.1 残余强度分析

影响残余强度的因素有结构损伤、板厚和冲击能量。每次冲击损伤的计算在前一次冲击后的有效承载能力上进行^[16]。每次冲击时,可将板件视为带损伤的新板件,并在冲击后计算其抗冲击能力,即为当前带损伤板件的残余强度。参考赖建中等^[21]提出的“标准化强度”概念,有

$$\lambda_F = \frac{P_e - P_a}{P_e} \quad (4)$$

$$\lambda_D = \frac{D_e - D_a}{D_e} \quad (5)$$

式中: D_e 和 P_e 分别为最后一次冲击的峰值冲击力和中部位移, D_a 和 P_a 分别为第 a 次冲击的峰值冲击力和中部位移。本节对 3 块 RC 板的标准化强度退化进行分析,如图 12 所示。可以看出,随着冲击次数的增加,RC 板的强度快速退化,基于冲击力的 RC 板标准化强度 λ_F 更能反映板件强度快速下降的特征。

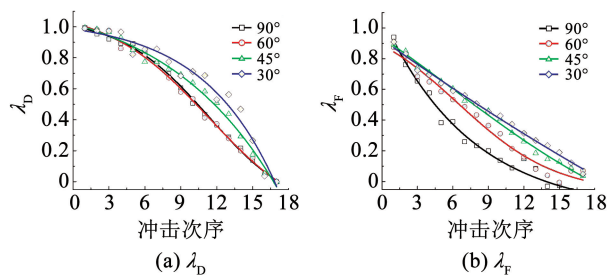


图 12 多次冲击作用下 RC 板的残余强度

Fig. 12 Residual strength of the RC slab under multi-angle impacts

3.2 残余吸能能力分析

冲击力能比系数 λ 是用于评估板件单次冲击下吸能能力的无量纲系数^[1,22],表示为

$$\lambda = \frac{P_{\max} d}{E} \quad (6)$$

式中: $P_{\max}$ 为落锤的最大冲击力,kN; d 为混凝土板厚,m; E 为落锤下落的冲击能量,kJ。6th ~ 18th 的冲击力能比系数如图 13 所示,所有板件均展示了相同的结论,即随着冲击次数的增加,板件吸能能力大幅下降,增加冲击能量不能改变板的残余吸能能力,混凝土退出工作后,板件靠钢筋的塑性变形吸能的能力非常有限。

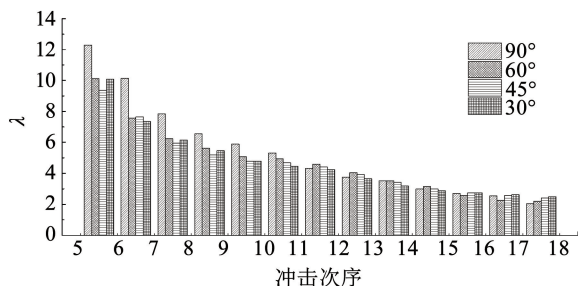


图 13 不同角度冲击力作用下 RC 板的 λ

Fig. 13 λ of the RC slab under multi-angle impact

3.3 带损伤的 RC 板抗冲击性能分析

RC 板的残余抗冲击强度是衡量多次冲击下板件残余性能的重要指标。多次冲击后导致 RC 板件破坏的冲击荷载不能作为正常板件的单次最大冲击荷载。根据现有板件抗冲切破坏承载力计算理论,对初始 RC 板的最大抗冲切承载力进行计算,结果

如表 3 所示,其中,关键计算参数为:RC 板弯矩 $m_{lu}=12\text{ kN}\cdot\text{mm}$;RC 板有效抗冲切厚度 $h_1=68.19\text{ mm}$;柱扩展截面周长 $b_0=690.8\text{ mm}$;受拉区最小宽度 $b_w=2\,000\text{ mm}$;承载力折减系数 $k_c=0.57$;弯矩折减系数 $k_f=0.525$ 。

由此可见,除个别失真结果外,理论计算的 RC 板最大抗冲切承载力为 90~100 kN,可取其平均值 96.8 kN 为板件最大抗冲切承载力理论值。

表 3 初始 RC 板最大抗冲切承载力计算结果

Tab. 3 Maximum punching shear capacity of the initial RC slab without being impacted

文献	[23-24]	[25-26]	[27-28]	[29]	[30]	[31]
最大抗冲切承载力/kN	93.06	100.31	101	35	92.8	992

然而,每一次冲击下 RC 板的损伤都会对其抗冲切承载力造成影响。本文认为,对于同一种 RC 板,无论冲击次数为多少,低速冲击下 RC 板破坏时吸收的总能量是相近的,该假设有助于估算残余抗冲击强度。根据式(2)计算 4 个冲击试验板总共吸收的冲击能量,结果如表 4 所示。可以看出,RC 板的总吸收能量在 45° 和 60° 冲击时达到最大,与 2.3 节分析结果一致。每次冲击后,RC 板吸收的冲击能量约为总冲击能量的 10%,其余主要被 RC 板的弹性变形释放。

表 4 RC 板总吸收能量

Tab. 4 Sum of energy absorbed by RC slab

编号	冲击对象	总吸收能量/J
1	1#板-3 樁	942.9
2	1#板-1 樁	1 183.4
3	2#板-1 樁	1 330.2
4	3#板-1 樁	1 002.1

上述证明了 RC 板的吸收能和损伤之间的相关性,又因为 2.3 节中论述的吸收能和残余位移间的相关性,拟将多次冲击下 RC 板的残余抗冲击力问题转换为带损伤的 RC 板抗冲击力问题。冲击次数的增加会导致 RC 板的损伤加深^[32],可采用每次冲击后的残余位移 w_g 与最后一次残余位移 w_{gmax} 的比值来衡量 RC 板的受破坏程度,如图 14 所示。

需要注意的是,该比值有别于混凝土损伤率,是衡量 RC 板被破坏的无量纲,可称为破坏率。提出该概念的理由是:由于钢筋作用、构件类型、约束条件等诸多因素的影响,混凝土材料的损伤程度指标过于单一,用于衡量钢筋混凝土板的性能退化略显片面。然而,从性能退化的角度建立钢筋混凝土板

在冲击荷载作用下的破坏率是切实可行的,可以绕开纷杂的影响因素及其间的耦合效应。

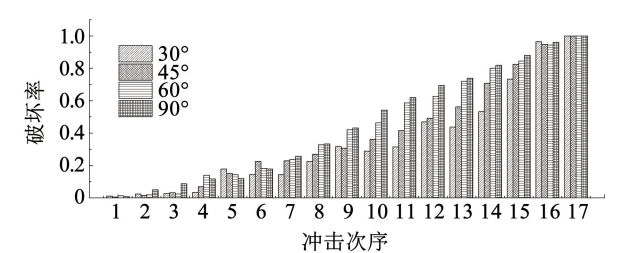


图 14 不同角度冲击力作用下 RC 板的破坏率

Fig. 14 Damage rate of the RC slab under multi-angle impact

可见 RC 板破坏率与冲击次数和冲击能量成正比,冲击角度越小破坏率变化越稳定,进而尝试讨论破坏率与冲击力的关系。如图 15(a) 所示,随冲击力的上升,RC 板的破坏率呈指数上升,增长趋势稳定;如图 15(b) 所示,文献[9]采用等重量的重复冲击,虽然数据整体呈现为破坏率随冲击力的降低而降低的趋势,但数据离散性极大。

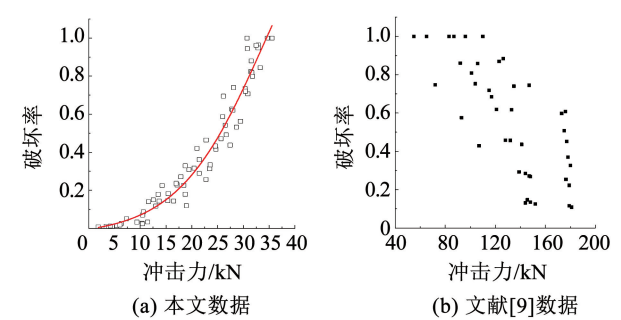


图 15 冲击力与 RC 板破坏率的关系

Fig. 15 Relation of impact force and damage rate of the RC slab

以上分析可以看出,随着冲击次数增大,每次对应的冲击速度也在增大,冲击力必然增大;由于累积的损伤越来越多,破坏也越来越严重。由于冲击力增加跟速度提高有关,目前的研究表明冲击力跟冲击次数的关联不大,而冲击次数的增多会使得损伤增加。因此,专家认为输入的能量越大,破坏越严重,但若得出“冲击力越大,破坏越严重”这样的结论,还需要进行更深入的研究。

上述充分说明,在破坏程度较大的 RC 板上进行较小能量的冲击,板件的变形过于依赖现有损伤分布,其结果规律性较差。综上,采用能量递增的多次冲击方法,更有利于板件冲击性能的研究。

在研究冲击承载力计算方法时,存在两个难点:所建立的理论必须考虑到板件不一定发生冲切破坏,尤其是斜向冲击,其冲切破坏的特征并不明显;必须考虑破坏率对板件冲击承载力的影响,且破坏率的广泛适用性有待进一步验证。

4 RC 板多次冲击研究方法初步讨论

4.1 冲击制度讨论

目前,关于 RC 板多次冲击的加载制度还没形成统一标准。现有恒重恒高冲击更像是疲劳试验,研究混凝土板长期处于短周期外荷载作用下的动力响应和性能演化。本文提出的增幅冲击更接近于混凝土结构试验中的分级加载制度,可以有效获取混凝土板的最终性能。因此,参考 GB/T 50152—2012《混凝土结构试验方法标准》提出增幅冲击试验方法。

首先,应明确混凝土板冲击试验多为探索性试验,宜分级进行冲击。其次,增幅冲击试验开始前应进行预冲击,以确认支座是否平稳,仪表及加载设备是否正常,预加载应控制试件在弹性范围内受力,不应产生裂缝。分级制度可参考 GB/T 50152—2012,接近开裂荷载前,每级冲击值不宜大于 0.05 倍的极限冲击值,开裂后可取 0.1 倍的极限冲击值。最后,当冲击点发生冲切破坏,并形成凿离体后,结束加载。此外,对于以整体破坏为主的钢筋混凝土板,当力传感器测得冲击力无法随冲击高度增大而增大时,认为板件发生破坏。

该冲击方法最重要的是明确冲击值的概念。建议先确认落锤质量和接触面面积,然后将落锤高度定为冲击值。极限冲击高度可以通过首个试验进行确定,也可以通过理论计算与数值模拟的方式进行确定。本文采用前者,通过前期试验发现 122.6 kg 的铁锤在 10 cm × 10 cm 的面积上极限冲击高度约为 100 cm,因此,制定了后续试验的冲击制度。

值得一提的是,部分学者拟采用恒等重量多次冲击的方式解决上述问题,而黄振宇等^[4]认为不同质量比(构件/落锤)下构件吸收的总能量不一致。因此,当采用恒等重量多次冲击的方案时,冲击质量的选择对冲击结果影响较大。尤其是在板件临近破坏的阶段,冲击区混凝土将持续散落,RC 板变形过于依赖其当前的损伤分布,影响试验效果,不利于判断 RC 板件的临界抗冲击性能。若冲击能量过小,则难以对 RC 板产生实质的损伤。进一步的,组政等^[5]发现单次冲击造成的板件位移差约为多次冲击的 2 倍,王世鸣^[33]建议将“临界破坏状态”对应入射能的 50% ~ 75% 作为多次冲击的依据。

本文建议的加载制度仍存在一些不足:没有提出基于理论计算的极限冲击值计算方法,仍需要采取前期试验的方法确认分级冲击制度;没有进一步提出除了冲击高度之外的冲击值以供选择。本文认为,冲击能量和最大接触力有作为冲击制度标准的可能性,但仍需深入研究。

4.2 吸能指标讨论

本文在 2.3 节中采用吸能系数作为吸能能力指标,在 3.2 节中采用冲击力能比系数。选取合适的吸能指标的标准为:计算参数均容易得到且真实有效;参数种类对于研究混凝土板吸能问题较为全面。

吸能系数 E_{AC} 适用于研究混凝土板多次冲击下性能的演化, E_{AC} 计算中考虑了每次冲击后混凝土板的残余位移,其规律与残余位移的变化规律相似。因此,当板件在多次冲击作用下整体塑性变形明显且冲切破坏较晚出现时,使用 E_{AC} 进行混凝土板吸能性能的评估较好。

冲击力能比系数与接触力相关,混凝土板宏观变形不明显或规律不强时,可以用于评估混凝土板的吸能能力。但当冲击区混凝土刚度退化或混凝土破碎后,接触力规律性变差,板厚的等效值也发生变化,此时冲击力能比系数不再适用。

5 结 论

1) 增幅冲击作用下,随着冲击能量的增大,RC 板更容易发生局部凹陷变形,进而发生冲切破坏。相对于竖向冲击,斜向冲击造成的 RC 板局部变形较小,但损害面积更大,冲击响应更加复杂,RC 板受冲击的破坏模式更难以预测。

2) 改进的吸能系数(E_{AC})能够量化评价 RC 板在增幅冲击作用下的吸能能力。标准化强度(λ_F)和冲击力能比系数(λ)可以用于量化评价 RC 板在增幅冲击作用下的残余抗冲击强度。随着冲击能量的增加,RC 板吸收能量增加,但吸能能力下降。RC 板吸收能量约为总冲击能量的 10%。冲击角度越大,RC 板吸收的冲击能量越多,但不影响板件的吸能能力。

3) 低速冲击作用下,相同 RC 板的总吸收能量相近。RC 板吸收能、破坏程度和残余位移间具有较强相关性,RC 板的破坏率与冲击能量成正比。增幅冲击试验方法相较恒重重复冲击试验方法,具有更高的可靠性。

4) 课题组后期将开展有限元模拟,通过对比试验的应变和位移数据,进一步研究落锤重量、板尺寸、配筋、混凝土强度等变量对本文结论的影响。工作包括利用本文试验结果和后期模拟结果,建立 RC 板在多次冲击下的残余强度模型,并对 RC 板进行寿命预测,研究增强 RC 板抵抗斜向连续冲击性能的方法。

参考文献

- [1] 寇佳亮,王华丞.高延性混凝土板抗落石冲击性能试验研究[J].振动与冲击,2020,39(11):239
KOU Jialiang, WANG Huacheng. Experimental study on rockfall

impact resistance of high ductile concrete slabs [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39 (11): 239. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.11.032

[2] 古松, 彭丰, 余志祥, 等. 低速冲击作用下混凝土板破坏效应试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(24): 107
GU Song, PENG Feng, YU Zhixiang, et al. An experimental study on the damage effects of the concrete slabs under low-velocity impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(24): 107. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.24.015

[3] 陆观, 梁大开, 徐一鸣, 等. 变厚度复合材料板低速冲击能量监测[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(10): 247
LU Guan, LIANG Dakai, XU Yiming, et al. Low velocity impact energy monitoring for varying cross-section composite laminates [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(10): 247. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.10.035

[4] 黄振宇, 张维, 李任. 双层钢-超轻质高韧性橡胶集料混凝土夹芯组合板抗多次冲击性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(7): 81
HUANG Zhenyu, ZHANG Wei, LI Ren, et al. Impact resistance of double-layer steel-RULHDC sandwich panels subjected to repeated impact loads [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(7): 81. DOI: 10.14006/j.jjgxb.2021.0755

[5] 姐政, 原天宇, 汤双双, 等. 蜂窝夹芯板多次低速冲击及冲击后剩余强度[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(28): 101
ZU Zheng, YUAN Tianyu, TANG Shuangshuang, et al. Repeated low velocity impacts on honeycomb sandwich panels and residual strength after impacts [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(28): 101

[6] 吴建利, 胡卸文, 梅雪峰, 等. 落石冲击混凝土板与缓冲层组合结构的动力响应[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(1): 78
WU Jianli, HU Xiewen, MEI Xuefeng, et al. Dynamic response of RC slab with cushion layer composed of sandy soil to rockfall impact [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(1): 78. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202004029

[7] 万志敏, 李海涛, 钱红锋, 等. 复合材料层板在多次冲击下的剩余刚度衰退模型[J]. *宇航材料工艺*, 1994(3): 23
WAN Zhimin, LI Haitao, QIAN Hongfeng, et al. Residual stiffness decay model of composite laminates under multiple impacts [J]. *Aerospace Materials and Technology*, 1994(3): 23

[8] DANESHVAR K, MORADI M J, AHMADI K, et al. Strengthening of corroded reinforced concrete slabs under multi-impact loading: experimental results and numerical analysis [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 284: 122. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122650

[9] SAID A I, EMM B. Experimental investigation on reinforced concrete slabs under high-mass low velocity repeated impact loads [J]. *Structures*, 2022, 35: 314. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.11.016

[10] BATARLAR B, HERING M, BRACKLOW F, et al. Experimental investigation on reinforced concrete slabs strengthened with carbon textiles under repeated impact loads [J]. *Structural Concrete*, 2020, 1(1): 1. DOI: 10.1002/suco.201900319

[11] 谢磊, 李庆华, 徐世焱. 超高韧性水泥基复合材料多次冲击压缩性能及本构关系[J]. *工程力学*, 2021, 38(12): 158
XIE Lei, LI Qinghua, XU Shilang. Multiple impact compressive properties and constitutive model of ultra-high toughness cementitious composites [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(12): 158

[12] 戎志丹, 王亚利, 孟亚奎. 超高性能水泥基复合材料抗多次冲击性能[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(2): 320
RONG Zhidan, WANG Yali, MENG Yakui. Multiple impact resistance of ultra-high performance cement-based composites [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(2): 320

[13] YM A, NI B. Behavior of thin reinforced concrete slabs and effect of reinforcement bars subjected low-velocity impact [J]. *Structures*, 2022, 38: 832. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.02.036

[14] 王宇, 钱旭东. 多次侧向冲击下双层钢管混凝土结构的响应分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(2): 1
WANG Yu, QIAN Xudong. Behaviour of concrete-filled double skin steel tubes under multiple transverse impacts [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(2): 1. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.02.001

[15] CHEN Y, MAY I M. Reinforced concrete members under drop-weight impacts [J]. *Structures & Buildings*, 2009, 162(Sup. 1): 45. DOI: 10.1680/stbu.2009.162.1.45

[16] 李夕兵, 王世鸣, 宫凤强, 等. 不同龄期混凝土多次冲击损伤特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(12): 2465
LI Xibing, WANG Shiming, GONG Fengqiang, et al. Experimental study of damage properties of different ages concrete under multiple impact loads [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(12): 2465

[17] LU Jingyi, WANG Yonghui, ZHAI Ximei. Response of flat steel-concrete-corrugated steel sandwich panel under drop-weight impact load by a hemi-spherical head [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021(9): 102890. DOI: 10.1016/j.job.2021.102890

[18] DANESHVAR K, MORADI M J, AMOOIE M, et al. Response of low-percentage FRC slabs under impact loading: experimental, numerical, and soft computing methods [J]. *Structures*, 2020, 2: 975. DOI: 10.1016/j.istruc.2020.06.005

[19] 戎志丹, 王亚利, 焦茂鹏, 等. 超高性能混凝土的冲击压缩性能及损伤演变规律[J]. *硅酸盐学报*, 2021, 49(11): 2322
RONG Zhidan, WANG Yali, JIAO Maopeng, et al. Impact compressive performance and damage evolution of ultra-high performance concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 49(11): 2322. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20210311

[20] 杜瑞锋, 裴向军, 贾俊, 等. 多次冲击下砂岩粘弹性损伤本构关系[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2021, 51(2): 638
DU Ruifeng, PEI Xiangjun, JIA Jun, et al. Viscoelastic damage constitutive relation of sandstone under multiple impact load [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(2): 638. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxgxb20191171

[21] 赖建中, 孙伟, 戎志丹. 活性粉末混凝土在多次冲击荷载下的力学行为[J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(6): 532
LAI Jianzhong, SUN Wei, RONG Zhidan. Dynamic mechanical behaviour of reactive powder concrete subjected to repeated impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(6): 532

[22] 张山, 张俊发, 陶磊, 等. S形钢龙骨-夹芯板防护层的落石冲击缓冲性能试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(24): 148
ZHANG Shan, ZHANG Junfa, TAO Lei, et al. Tests for cushion performance of a protective layer with S-shaped steel joist and sandwich slab under rockfall impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(24): 148. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2017.24.023

[23] 魏巍巍. 基于修正压力场理论的钢筋混凝土结构受剪承载力及变形研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011
WEI Weiwei. Study on shear capacity and deformation for reinforced concrete structure based on modified compression field theory [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011

[24] JIANG Dahua, SHEN Jinghua. Strength of concrete slabs in punching shear [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1986, 112(12): 2578. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:12(2578)

[25] GOSWAMI A, DAS A S, LI B. Predicting the punching shear failure of concrete slabs under low velocity impact loading [J]. *Engineering Structures*, 2019, 184: 37. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.01.081

[26] MUTTONI A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement [J]. *ACI Structural Journal*, 2009, 106(3): 381. DOI: 10.1002/eqe.813

[27] SUSANTO T, KHATTANAN C, DARREN T, et al. Punching shear strength of slabs and influence of low reinforcement ratio [J]. *ACI Structural Journal*, 2018(1): 139. DOI: 10.14359/51701089

[28] KUERES D, SIBURG C, HERBRAND M, et al. Uniform design method for punching shear in flat slabs and column bases [J]. *Engineering Structures*, 2017, 136: 149. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.12.064

[29] MENÉTREY P. Synthesis of punching failure in reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2002, 24(6): 497. DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00066-X

[30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010

[31] 英国标准化协会. Eurocode 2: 混凝土结构设计—第1-1部分—一般规定和房屋建筑规定[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019

[32] YAR A, YT A, OB A, et al. Experimental investigation on the effect of impact loading on behavior of post-tensioned concrete slabs [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 31: 101207. DOI: 10.1016/j.job.2020.101207

[33] 王世鸣. 冲击荷载下早龄期混凝土力学和损伤特性的试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014
WANG Shiming. Experimental study on the mechanical properties and damage performance of early age concrete under dynamic loading [D]. Changsha: Central South University, 2014