



新型泡沫混凝土复合墙板的抗冲击性能研究

王 晨^{1,2}, 孙洪军¹, 杨宇康¹, 赵 帅¹, 唐显喆³

(1. 中煤地环(西安)环境科技有限公司,陕西 西安 102417;2. 辽宁工业大学 土木建筑工程学院,辽宁 锦州 121001;3. 锦州水务(集团)有限公司,辽宁 锦州 121000)

摘要:为了对泡沫混凝土复合墙板(FCPW)抗冲击性能进行定量表征和破坏形式进行定性描述,分析其性能优劣,文章以中间设置的挤塑聚苯板、钢筋网和两侧掺有玻璃纤维的泡沫混凝土制成的 FCPW 为试验对象,通过落锤冲击试验,研究碳纤维布(CFS)一层、两层和未加固 FCPW 抗冲击性能,并通过有限元模拟进行验证。试验结果表明:试件均发生剪切破坏。采用单、双层 CFS 加固均能提高试件的延性和承载力,且 CFS 单层好于双层。此外,试验结果与模拟结果基本吻合,可为科研人员更新复合墙板提供参考。

关键词:复合墙板; CFS; 抗冲击性能; 落锤冲击试验

中图分类号:TU599

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)03-0001-09

doi:10.13402/j.gcjs.2026.03.024

Study on impact resistance of new foamed concrete composite wall panels

WANG Chen^{1,2}, SUN Hongjun¹, YANG Yukang¹, ZHAO Shuai¹, TANG Xianzhe³

(1. Zhongmei Geoenvironmental (Xi'an) Design Co., Ltd., Xi'an 102417, Shaanxi, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, Liaoning, China;

3. Jinzhou Water Affairs (Group) Co., Ltd., Jinzhou 121000, Liaoning, China)

Abstract: In order to quantitatively characterize that impact resistance and qualitatively describe the failure modes of foam concrete composite wall panel (FCPW), this paper studies the impact resistance of FCPW made of extruded polystyrene board, steel mesh and foam concrete with glass fiber on both sides by drop hammer impact test, and verifies the impact resistance of FCPW with carbon fiber sheet (CFS) one layer, two layers and unreinforced FCPW by finite element simulation. The ductility and bearing capacity of the specimens strengthened with single or double layer CFS are improved, and the results of single layer CFS are better than those of double layer CFS. The experimental results are generally consistent with the simulation results, providing a reference for researchers to update composite wall panels.

Key words: composite wall panel; CFS; impact resistance; drop impact test

泡沫混凝土作为一种建筑复合材料,因其具有轻质、高强、保温、隔热、隔音,在建筑领域被广泛地应用^[1];又因其在因其在减轻重量、提高建筑结构的抗震和承载能力方面表现出良好的

性能^[2],在复合墙板中被广泛应用。

近些年来,研究人员对泡沫混凝土复合墙板(FCPW)进行了大量的研究。HONG等^[3]对泡沫轻钢陶粒混凝土墙板的力学性能进行了试验和理论研

收稿日期:2025-08-20

基金项目:2023年辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(JYTMS20230865);2022年辽宁省研究生联合培养示范基地项目(YJD202204);锦州水务(集团)有限公司研究生联合培养基地(YJD202204)

作者简介:王 晨(1999—),男,硕士研究生,助理工程师,从事装配式轻质复合墙板方面的研究。

究。CAO 等^[4]对 PET 泡沫夹芯板进行三点弯曲试验。PRABHA 等^[5]对钢-泡沫混凝土复合材料面板抗震性能进行了研究。此外, FC 密度和强度受配合比影响最大^[6]。一般情况下 FC 强度比较低, 需要对其采用一定的加固措施。纤维增强聚合物 (FRP) 是一种加固和修复结构的复合材料, 具有强度高、重量轻、耐腐蚀、便于安装等优良性能^[7-8]。在各种类型的 FRP 中, 碳纤维增强聚合物 (CFRP) 具有非常高的抗拉强度和与传统钢材相当的弹性模量^[9]。CFRP 可以提高混凝土构件抗压、抗弯、抗震等方面的性能^[10-12]。此外在抗冲击性能上, 因它们沿纤维方向的具有较高的刚度和强度^[13], 所以 CFRP 在具体运用中有优越的抗冲击性, 在冲击力穿透结构之前吸收整个冲击损伤^[14]。SAINI 等^[9]对 CFRP 加固钢管混凝土 (CFST) 梁抗冲击性能研究, 结果表明: CFRP 加入后, 所开发的 CFST 梁模型的最大位移和吸收能量比得到了明显的降低。LIU 等^[15]研究冲击荷载作用下 CFRP-剪切加固对既有圆形 RC 柱的影响, 发现 CFRP 加固可以有效减轻混凝土的剪切损伤, 从而使试验柱子的破坏模式从脆性-剪切转变为韧性-弯曲。ZHOU 等^[16]研究了车辆侧向冲击荷载作用下 CFRP 对圆形 RC 桥墩抗震加固, 发现 CFRP 加固对圆形钢筋混凝土桥墩在横向冲击荷载作用下的易损性也有

一定的降低效果。ZHANG 等^[17]研究了 CFS 对钢筋混凝土梁的动力响应、破坏模式和剩余承载性能的增强作用。发现 CFS 加固梁的剩余抗力、剩余刚度和冲击后吸能能力均高于未加固梁。ZHANG 等^[18]对 3 根不同 CFRP 加固类型的预损伤 RC 梁进行了多次冲击试验。发现 CFRP 可以改善预损伤梁的性能, 降低损伤刚度损失, 增强耗能。总之, 目前研究较少涉及不同结构对新型 PCWP 抗冲击性能影响。

本文以结合 FRP 增强复合墙板为背景, 选择 CFS 加固。设计一种尺寸的新型 FCPW, 通过落锤冲击试验和模拟, 对单层和双层 CFS 加固以及未加固试件的冲击力、应变、位移-时间以及破坏模式进行对比和分析, 以反应 CFS 对墙板抗冲击性能的影响, 以期可为复合墙板更新迭代提供依据。

1 试验设计

1.1 材料特性

试验试件是由某公司生产的轻质复合墙板, 其中 FC 干密度等级为 A10, 具体配合比如表 1 所示。纤维采用直径为 14 μm 的耐碱玻璃纤维, 基本性能如表 2 所示。钢筋网采用 5 mm 带肋钢筋, 中间保温层采用 B1 级阻燃挤塑板。CFS 与碳纤维 (CF) 浸渍胶均由上海某公司生产。具体检测结果如表 3、4 所示。

表 1 FC 配合比

水泥/ kg	粉煤灰/ kg	矿粉/ kg	水/ kg	固体减 水剂/kg	发泡 剂/kg	稳泡 剂/kg	玻璃纤 维/kg	硅灰/ kg	早强剂	
									三乙醇胺/mL	硫酸钠/kg
400	70	100	210	0.8	2	2	6.6	18	80	1

表 2 玻璃纤维的基本性能

直径/ μm	抗拉强度/ ($\text{N}\cdot\text{tex}^{-1}$)	弹性模 量/GPa	ZrO_2 质量 分数/%	线密度/tex	纤维长 度/mm	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
14	0.3	65.3	16.2	78	12	2.68

表 3 CFS 检测结果

抗拉强度标 准值/MPa	受拉弹性 模量/MPa	弯曲强 度/MPa	层间剪切 强度/MPa	伸长 率/%	黏结强 度/MPa	单位面积质 量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)
3 468	2.3×10^5	1 031	47.2	1.74	4.8	299

表 4 CF 浸渍胶检测结果

抗拉强 度/MPa	受拉弹性 模量/MPa	抗弯强 度/MPa	抗压强 度/MPa	钢对钢拉伸 抗剪强度/MPa	钢对钢粘结抗 拉强度/MPa	钢对 C45 混凝土正 拉黏结强度/MPa	热变形 温度/ $^{\circ}\text{C}$	不挥发物 质量分数/%
48.8	3 110	93.8	97.2	24.2	50.5	5.2	75.2	99.3

1.2 试验设计

根据《建筑隔墙用保温条板》(GB / T 23450—2009)规定, 制作一种尺寸的试件, 并使用单层竖向和双层交织 CFS 对其进行加固, 编码为 FCPW - 1, FCPW - 2, FCPW - 3, 具体如表 5 所示。该墙体为复合结构设计, 两侧面板均选用轻骨料泡沫混凝土材质, 其中内侧混凝土层厚度设定为 80 mm, 外侧混凝土层厚度为 50 mm。墙体中间的保温构造由两部分组成: 1) 100 mm 厚的挤塑板, 作为核心保温层; 2) 包裹挤塑板的钢筋骨架, 骨架采用直径 5 mm 的带肋钢筋, 横向按 200 mm 间距排布, 纵向按 100 mm 间距设置。为保障墙体整体稳定性, 其四角位置通过钢制连接件进行加固处理。

表 5 试件尺寸

试件编号	试件尺寸/mm	钢筋直径/mm	加固方式
FCPW - 1	2 160 × 600 × 230	5	不加固
FCPW - 2	2 160 × 600 × 230	5	单层竖向加固
FCPW - 3	2 160 × 600 × 230	5	双层交织加固

1.3 样品浇筑

FCWP 制作流程: 绑扎钢筋骨架→制作模板→浇筑底层混凝土→放置钢筋骨架、挤塑板和针式连接件→浇筑上层混凝土→拆模及养护^[19]。具体制作过程如下。

第一阶段为准备阶段, 根据墙板尺寸焊接钢筋网、制作模板。第二阶段为施工阶段, 将搅拌好的混凝土倒入模板中, 使用振捣棒均匀摊开混凝土并保证其厚度达到 80 mm。将挤塑板放置于浇筑完成后的底层混凝土上并压紧。插入针式连接件, 针式连接件一端插入底层混凝土中, 另一端与上层混凝土浇筑在一起。紧接着将上层钢筋网放置于模板中。完成上述工作后, 浇筑上层混凝土, 利用振动棒来捣实混凝土并用抹子抹平。第三阶段为拆模和养护阶段, 等试件达到一定强度之后, 拆除模板, 并将其放置在室内进行养护。具体工艺流程图如图 3 所示。CFS 加固的黏贴工序参照《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2020)。CFS 单双层加固如图 2、3 所示。

1.4 加载方式

试验机的控制系统由提升装置和夹持装置组

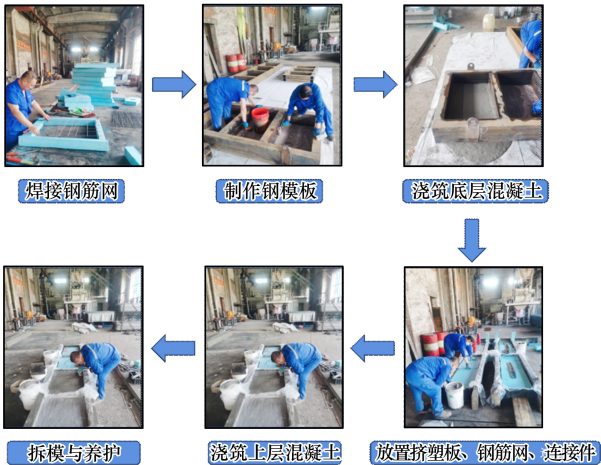


图 1 试件制作工艺

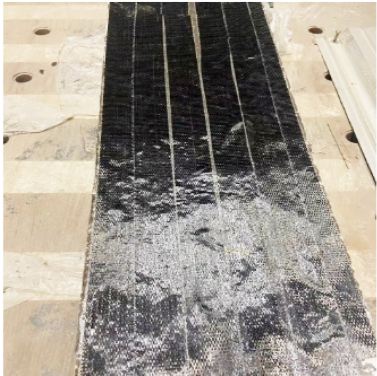


图 2 CFS 单层竖向加固



图 3 CFS 双层交织加固

成。试验开始前首先通过控制界面, 设置冲击高度 (试件 FCPW - 1 第一、二、三次冲击高度分别为 100、300、500 mm; 试件 FCPW - 2 第一、二、三次冲击高度分别为 300、500、700 mm; 试件 FCPW - 3 第一、二、三次冲击高度分别为 500、700、900 mm)。待冲击锤提升至指定高度, 进行冲击试验。释在冲击结束后, 将重锤提升到初始位置后, 循环往复设置新的冲击高度并进行试验, 待完成所有冲击试验后, 保存数据并关闭控制电源。

1.5 试验现象及失效模式分析

通过新型 FCPW 的抗冲击试验, 3 块墙板最终破坏如图 4 所示, 结论总结如下。

(1) 3 块试件均发生剪切破坏、完全破坏如图 4 所示。FCPW-1 在第一次冲击作用下墙体上表面中部出现锤坑, 并沿锤坑四周出现裂缝, 墙体下表面无明显变化。在第二次冲击作用下, 墙体中部锤坑较深, 其周围裂缝沿锤坑分布呈“X”型, 并且 FCPW 下表面相比于上表面裂缝大于上表面裂缝。在第三次冲击作用下, 墙体发生了严重的破坏, 并有大量碎块飞出。与固定支座接触的墙体发生了剪切破坏, 裂缝与墙体水平方向的夹角 10° 到 20° ; 墙体中部区域, 一部分压溃成为碎片, 大部砂浆由于黏结失效而脱离; 墙体上下两端及墙体两侧碎块较大, 数量相对较少, 这些碎块多是由于砂浆的黏结失效而导致的。

(2) FCPW-2 和 FCPW-3 在第一次冲击作用下第一次冲击作用下墙体上表面中部出现锤坑, 并沿锤坑四周出现裂缝, 墙体下表面无明显变化。FCPW-2 第二次冲击, 墙体上表面没有支撑的两侧有较少的裂缝产生, 墙体下表面 CFS 产生了较小的撕裂, 墙体中部小块碳纤维布的突起, 使墙体上少量的碎屑飞散出去。第三次冲击加载后, 墙体损伤形态进一步加剧: 墙体上表面中间区域出现明显的沉降位移; 在支撑端一侧, 砌体发生严重的剪切破坏, 而无支撑的另一侧砌体则被直接压溃; 与之对应, 墙体下部的碳纤维布已发生断裂, 且呈现出与墙体分离的倾向, 冲击过程中伴随有大量碎块向外飞溅。

(3) FCPW-3 第一次冲击墙体变形顺序: 边

界处的砌体剪切变形 且墙体中部微小的弯曲变形。碳纤维布出现了撕裂, 当在第三次的冲击作用下, 墙体的边界处和中部的裂缝持续发展, 墙体以较高的速度下沉(墙体与锤头脱离了), 引起了碳纤维的剪断或锚固失效。从破坏的现场图片看, 墙体一侧是完全的剪切破坏, 另一侧则是由墙体高速下沉引起了与框架的脱离, CFS 断裂为 3 个部分, 其中中间部分较大, 两侧较小, 有少部分碳纤维是因为断裂而破坏, 另一部分因锚固失效而脱落。

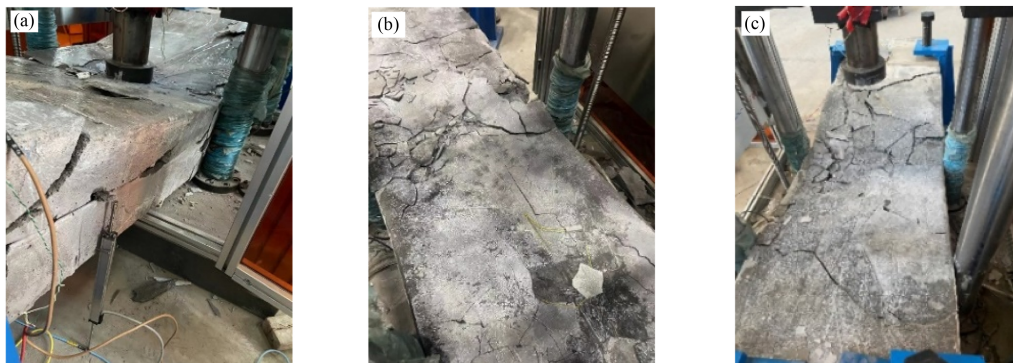
2 动态响应分析

试件 FCPW-1、FCPW-2、FCPW-3 的未破坏阶段、破坏阶段、完全破坏阶段冲击力及位移时程曲线如图 5 所示。

2.1 冲击力时程曲线分析

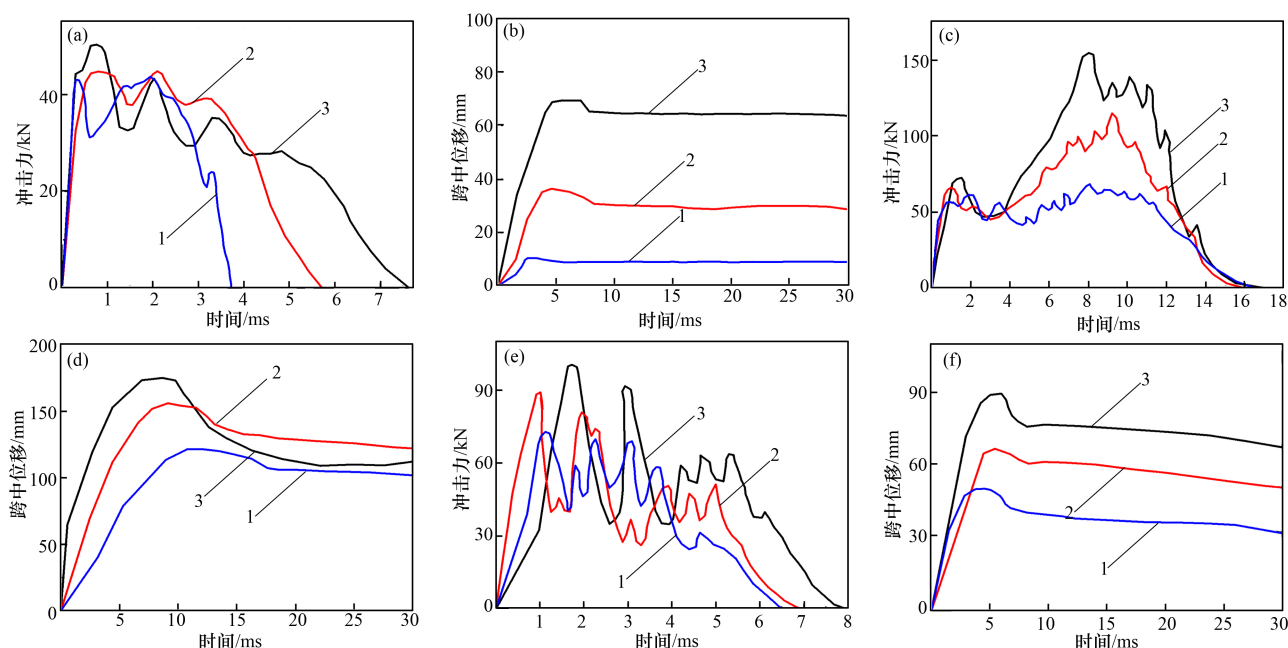
(1) 墙板冲击力-时间曲线都经历了 3 个阶段。第一阶段上升阶段: 冲击力迅速上升到冲击力峰值; 第二阶段为稳定阶段: 冲击力维持一个较平稳的状态, 冲击力值相对较低, 持续时间较长; 第三阶段为衰减阶段: 冲击力从稳定的状态逐渐减小至到零, 复合墙板冲击结束。

(2) 对比试件的冲击力时程曲线, 发现: 未破坏阶段 3 块墙板最大冲击力分别为 43.7、68.5、72.9 kN; 破坏阶段最大冲击力为 44.8、115、89.1 kN。完全破坏阶段最大冲击力为 50.4、154.7、100.4 kN。墙板第二、三次冲击相比于第一次冲击最大冲击值分别提升了 2.7% 和 15.3%、67.9% 和 125.8%、22.2% 和 37.7%。试验结果表明: 单层 CFS 对最大承载力提升要明显强于双层加固和未加固。



(a) FCPW-1; (b) FCPW-2; (c) FCPW-3

图 4 试件破坏示意



(a) 试件 FCPW-1 冲击力曲线; (b) 试件 FCPW-1 跨中位移曲线; (c) 试件 FCPW-2 冲击力曲线;
(d) 试件 FCPW-2 跨中位移曲线; (e) 试件 FCPW-3 冲击力曲线; (f) 试件 FCPW-3 跨中位移曲线
1—第一次冲击; 2—第二次冲击; 3—第三次冲击。

图 5 墙板冲击力和位移时程曲线

(3) 当试件的冲击高度增加时, 冲击力峰值随之提高; 复合墙板受到冲击能增大、需要吸收更多的能量, 因而稳定阶段所需耗散能量的时间增加, 冲击力持续时间延长。

2.2 位移时程曲线分析

(1) 试件位移时程曲线分为两个阶段。加载阶段: 墙板跨中位移从初始状态逐步增大至峰值, 在此过程中锤头位移同步达到最大值, 之后锤头便会与墙体发生分离。卸载阶段: 冲击点位移从最大值逐渐回落至残余位移。此阶段内, 试件向冲击的反方向产生变形, 前期储存的弹性势能随之释放; 待锤头与板身完全分离后, 墙板会出现一定程度的自由振动, 通过这一过程耗散部分冲击动能。

(2) 试件 FCPW-1 未破坏阶段、破坏阶段、完全破坏阶段峰值位移分别为 10.4、121.6、45.8 mm; 试件 FCPW-2 未破坏阶段、破坏阶段、完全破坏阶段峰值位移分别为 36.4、156.1、60.8 mm; 试件 FCPW-3 未破坏阶段、破坏阶段、完全破坏阶段峰值位移分别为 63.7、175.1、81.4 mm。单程加固墙板对延性的提升要好于双层及未加固的墙板。

(3) 位移时程曲线因为冲击区域出现裂纹, 应力波的传播速度随之减慢。所以墙板的位移响

应相比于冲击力响应均具有一定的滞后性。

2.3 挠度恢复速率分析

另外, CFS 加固 FCPW 冲击后的变形恢复能力也是分析其抗冲击能力的重要标准。在式(1)中引入挠度恢复速率 $Q^{[20]}$ 。 Q 值越大, 表明变形恢复能力越强。

$$Q = 1 - \frac{\Delta_r}{\Delta_{\max}} \quad (1)$$

式中: Δ_r 表示残余位移, mm; $\Delta_{\max}$ 表示峰值位移, mm。

表 6 为 3 块试件每次撞击完成后 Q 值结果。墙板未破坏阶段: FCPW-2、FCPW-3 的 Q 值分别为 16.1% 和 36.5% 均大于未加固试件, 说明 CFS 加固试件变形恢复能力均有所提高。墙板完全破坏阶段: 单、双层 CFS 加固试件比未加固 Q 值提升了 22.1% 和 16.5%, 并且 CFS 加固后的墙板仍具有较好的变形恢复能力。总之, CFS 加固试件降低了泡沫混凝土复合墙板的恢复能力的损失。

表 6 试件挠度恢复率

冲击次数编号	第 1 层	第 2 层	第 3 层
FCPW-1	13.5	21.2	8.2
FCPW-2	16.1	30.2	30.3
FCPW-3	36.5	23.8	24.7

3 有限元模拟

3.1 基本假定

(1) 假定复合墙体中的挤塑板与泡沫混凝土面板之间的连接是可靠的, 受到碰撞作用时不发生相互分离。

(2) 假定钢筋网片与混凝土面板之间通过连接牢固, 两者协同受力, 受到碰撞作用时两者之间不会产生相对滑移。

(3) 假定钢筋网、挤塑板和混凝土面板之间协同受力, 不会发生相对滑移。

根据以上假定建立如图 6 所示的冲击试验有限元模型。

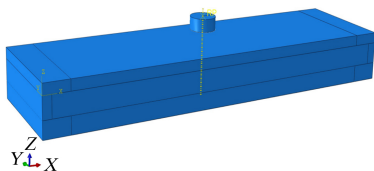


图 6 墙板抗冲击有限元模型

3.2 材料的本构

本研究所建立的 FCPW 模型是由钢筋、FC、XPS、CFS 这 4 种材料组成。鉴于本文研究属于低应变率问题, 因此钢筋的本构模型采用 Cowper-Symonds 模型^[21]进行计算, 对应计算方法如式(2)所示。

$$\frac{f_d}{f_s} = 1 + \left(\frac{\varepsilon}{D}\right)^{\frac{1}{p}} \quad (2)$$

式中: ε 为钢材的应变率; f_d 为钢材在应变率为 ε 时的强度, N/mm^2 ; f_s 为钢材静力强度 N/mm^2 ; D 、 p 为材料参数, 可通过材性试验拟合得到。在缺乏相关试验数据的情况下, 可采用经验值。其中对于低碳钢, 本文统一采用 $D=40.4s^{-1}$, $p=5$, 其中, s 为秒数。

钢筋所对应的应力-应变关系如图 7 所示。钢筋的参数如表 7 所示。泡沫混凝土本构模型采用混凝土损伤塑性模型计算, 其具有可单向、循环加载、具有较好的收敛性, 具体数据依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》附录 C 所给出的曲线和公式进行计算。FC 具体参数如表 8 所示。XPS 本构模型采用理想的弹塑性模型。其具体参数如表 9 所示。CFS 本构模型具体参数如

表 10 所示。

表 7 钢筋的材料参数

密度/($\text{t} \cdot \text{mm}^{-3}$)	杨氏模量/MPa	泊松比
7.85×10^{-9}	2×10^5	0.3

表 8 泡沫混凝土的材料参数

膨胀角	偏心率	f_{t0}/f_{c0}	K	黏性系数
30	0.1	1.16	0.666 7	0

表 9 XPS 的材料参数

密度/($\text{t} \cdot \text{mm}^{-3}$)	杨氏模量/MPa	泊松比
3×10^{-11}	10	0.35

表 10 CFS 的材料参数

密度/($\text{t} \cdot \text{mm}^{-3}$)	杨氏模量/MPa	泊松比
1.8×10^{-9}	2.1×10^5	0.307

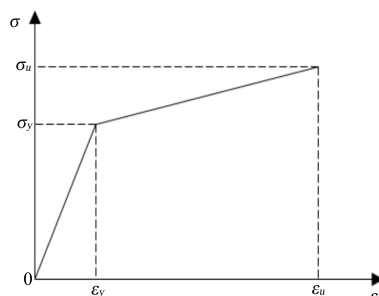


图 7 钢筋的应力和应变曲线

3.3 边界条件与荷载

(1) 模拟中, 钢筋网内嵌于混凝土内, XPS 位于墙板中间, 假定钢筋网与 XPS 和混凝土面板之间协同受力, 不会发生相对滑移。与具体试验加载方式相同, 在墙板两侧对其进行固定, 使 $U_x = U_y = U_z = 0$, $\theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$, 如图 8 所示。

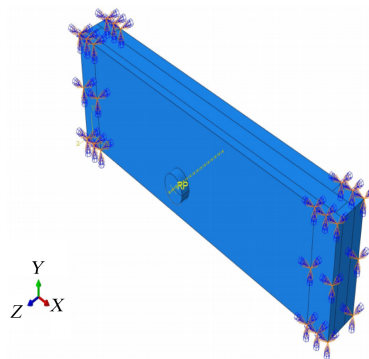


图 8 边界条件与荷载作用

(2) 为了提高荷载施加计算的效率, 在建立模型的过程中忽略落锤自由落体的运动过程, 初始状态落物置于试件的撞击点处, 并将其下表面

和试件上表面设置接触属性, 模拟时将落锤放置于试件中间上方 2 mm 处, 并赋予 580 kg 的质量以模拟冲击力。模拟落锤下降高度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9 m。即冲击速度相应为 1.40、2.42、3.13、3.70、4.20 m/s。荷载作用如图 8 所示。

3.4 网格划分

3.4.1 实体单元

模型中混凝土、XPS 和落锤均采用 8 节点六面体减缩积分实体单元 (C3D8R), 此类单元具有位移误差较小, 虽然其节点应力精度低于完全积分, 但计算量较小, 不容易发生剪切自锁, 有沙漏控制等优点^[22]。最终, 墙板和 XPS 种子间距为 15 mm、落锤种子间距为 8 mm, 划分结果如图 9 所示。

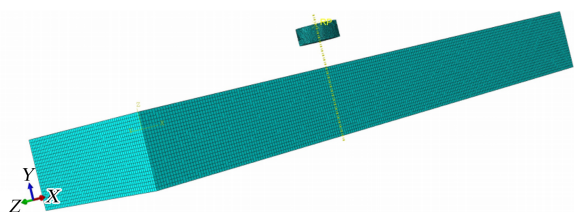


图 9 模型单元网格划分

3.4.2 桁架单元

墙板中的钢筋网采用两节点线性三维桁架单元 T3D2, 种子间距是 15 mm。

4 冲击荷载作用下装配式复合墙板动态响应

4.1 冲击力时程曲线分析

墙板冲击力时程曲线试验与模拟对比如图 10 所示。由图 10 可以看出, 试验与模拟虽然有一定误差。但从整体上来看有限元模拟的冲击力上升、稳定、衰减阶段与实际试验的吻合较好, 验证了模型的正确性。误差主要的原因是有限元模拟材料的假设与现实中的离散型存在差异。

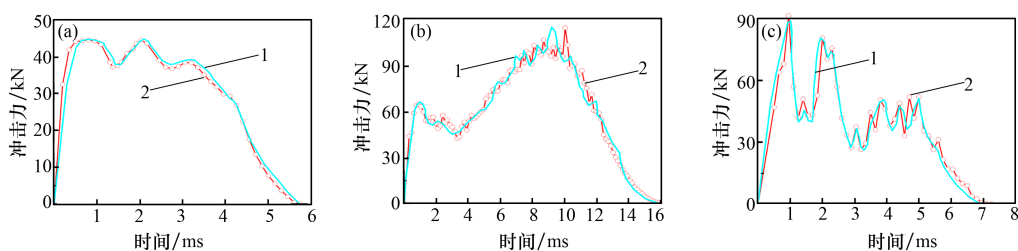
4.2 位移时程曲线分析

墙板的位移时程曲线试验与模拟对比如图 11 所示。由图 11 可以看出, 试验与模拟虽然有一定误差。但从整体上来看有限元模拟的位移加载、卸载阶段以及峰值和残余位移与实际试验的吻合度较好, 验证了模型的正确性。

试验结果与数值结果的峰值冲击力和跨中位移差值如表 11 所示。由表 11 可见, 第一、二、三次冲击作用下, F/F_{FX} 和 D/D_{FX} 比值平均值分别为 1.03 和 1.31、0.99 和 1.34、0.98 和 1.28。

4.3 失效模式的对比分析

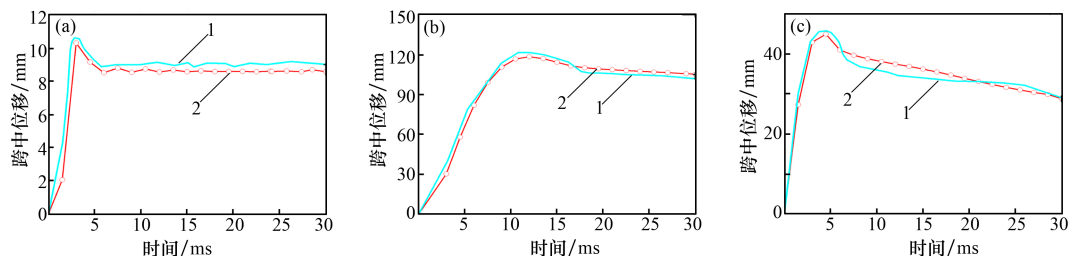
墙板的模拟破坏云图如图 12 所示, 主要破坏发生在落锤冲击点及周边位置, 与试验破坏形态



第二次冲击: (a) FCPW-1; (b) FCPW-2; (c) FCPW-3

1—试验数据; 2—模拟数据。

图 10 冲击力响应试验结果与模拟结果的比较



第二次冲击: (a) FCPW-1; (b) FCPW-2; (c) FCPW-3

1—试验数据; 2—模拟数据。

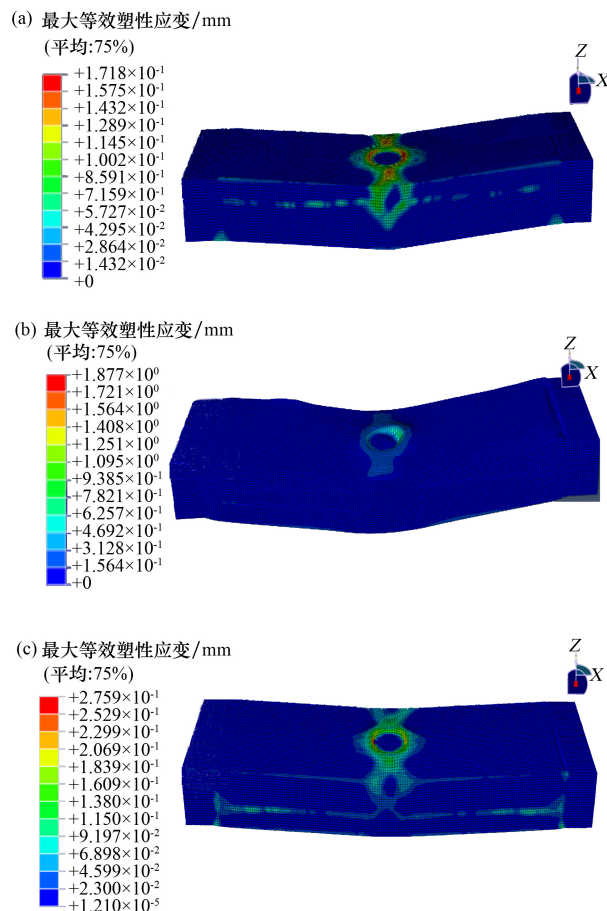
图 11 试验结果与模拟结果的位移比较

表 11 试验与模拟结果动态响应比较

编号	F/kN	F_{-FX}/kN	F/F_{-FX}	D/mm	D_{-FX}/mm	D/D_{-FX}
FCPW-1(第1次冲击)	43.7	43.3	1.01	10.4	9	1.16
FCPW-2(第1次冲击)	68.5	66	1.04	121.6	102	1.19
FCPW-3(第1次冲击)	72.9	69.7	1.05	45.8	29.1	1.57
平均值	—	—	1.03	—	—	1.31
FCPW-1(第2次冲击)	44.9	44.6	1.01	36.4	28.7	1.27
FCPW-2(第2次冲击)	115.0	114.6	1.00	156.1	109	1.43
FCPW-3(第2次冲击)	89.1	91.7	0.97	60.8	46.3	1.31
平均值	—	—	0.99	—	—	1.34
FCPW-1(第3次冲击)	50.4	52.0	0.97	69.4	63.7	1.09
FCPW-2(第3次冲击)	154.7	152.1	1.02	175.1	122.2	1.43
FCPW-3(第3次冲击)	100.4	104.2	0.96	81.4	61.3	1.33
平均值	—	—	0.98	—	—	1.28

注: F 为试验峰值力值; F_{-FX} 为 FX 峰值力值; D 为试验峰值位移值; D_{-FX} 为 FX 峰值位移值。

基本一致。未加固板破坏破坏最明显, CFS 加固均能有效的减少落锤冲击带来的破坏, 其中单层 CFS 加固效果最好。



(a) FCPW-1; (b) FCPW-2; (c) FCPW-3

图 12 墙板完全破坏云图

5 结 论

(1) 与未加固墙板相比, CFS 单、双层加固均能提高 FCPW 抗冲击性能, 加固后的墙板有更高的承载力、延性, 以及更好的变形恢复能力。完全破坏阶段: 单层 CFS、双层 CFS 加固相比未加固墙板最大承载力分别提高了 3.06 倍和 2 倍、延性分别提高了 1.17 倍和 2.52 倍、变形恢复能力分别提高了 1.31 和 1.22 倍。

(2) FCPW 在冲击荷载的作用下主要发生剪切破坏, 破坏位置主要位于落锤中心位置及其附近, 并且墙板受拉一侧的破坏要明显大于受压侧, 因此对墙板加固应重点集中在受拉侧。

(3) 使用有限元软件模拟冲击试验, 模拟结果的冲击力-时程曲线、位移-时程曲线与试验数据高度吻合, 证明了所建模型的准确性。

(4) 未来工作中需要考虑 CFS 加固的不同位置、面积对轻质墙板最经济、最有效的加固。

参考文献:

- [1] HAMADA, HUSSEIN M, et al. Recycling solid waste to produce eco-friendly foamed concrete: A comprehensive review of approaches[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11. (6): 111353.
- [2] YANG S, WANG X, HU Z, et al. Recent advances in sustainable lightweight foamed concrete incorporating

- recycled waste and byproducts: A review[J]. Construction & Building Materials, 2023(11):133083.
- [3] HONG C, LI J, LI X, et al. Mechanical performance of prefabricated lightweight steel-foamed ceramsite concrete wall panels: Experimental and theoretical investigations [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 19(12):e02645.
- [4] CAO Y, FANG H, SHI H C W. Experimental and numerical studies on shear behavior of lattice-web reinforced PET foam sandwich panels [J]. Engineering structures, 2023, 290(9):116316.1–116316.15.
- [5] PRABHA P, ANI Q S, AKSHMANANN, et al. Behaviour of steel-foam concrete composite panel under in-plane lateral load[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 139(12):437–448.
- [6] SHANKAR A N, CHOPADE S, SRINIVAS R, et al. Physical and mechanical properties of foamed concrete, a literature review[J]. Materials Today:Proceedings, 2023, 105(11).
- [7] ALI H T, AKRAMI R, FOTOUHI S, et al. Fiber reinforced polymer composites in bridge industry: A review[J]. Structures, 2020, 92(12):774–785.
- [8] NAVARATNAM S, SELVARANJAN K, JAYASOORIYA D, et al. Applications of natural and synthetic fiber reinforced polymer in infrastructure: A suitability assessment [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66(5):105835.
- [9] SAINI D, SHAFEI B. Investigation of concrete-filled steel tube beams strengthened with CFRP against impact loads [J]. Composite Structures, 2019, 208(1):744–757.
- [10] WANG Q, ZHU W, FU F, et al. Axial Compressive capacity of RC square columns strengthened by prestressed CFRP with RPC pads [J]. Composite Structures, 2020, 242(6):112153.
- [11] AL-SHAMAYLEH R, AL-SAOUD H, ALQAM M. Shear and flexural strengthening of reinforced concrete beams with variable compressive strength values using externally bonded carbon fiber plates [J]. Results in Engineering, 2022, 14(6):100427.
- [12] REDDY K H K, NERELLA R, MADDURU S R C. Different temperature effects on CFRP wrapped concrete [J]. Materials Today:Proceedings, 2020, 27(1):1127–1131.
- [13] PENG S, XIONG Z. Experimental study on the seismic behavior of CFRP-strengthened seismic-damaged recycled aggregate concrete-filled rectangular steel tube frame columns[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45(1):103422.
- [14] MERCEDES L, BERNAT-MASO E, GIL L. Protective layers for concrete elements against impact load [J]. Construction and Building Materials, 2023, 405(11):133356.
- [15] LIU Y, DONG A, ZHAO S, et al. The effect of CFRP-shear strengthening on existing circular RC columns under impact loads [J]. Construction and Building Materials, 2021, 302(10):124185.
- [16] ZHOU S C, DEMARTINO C, XU J J, et al. Effectiveness of CFRP seismic-retrofit of circular RC bridge piers under vehicular lateral impact loading[J]. Engineering Structures, 2021, 243(9):112602.
- [17] ZHANG J, WU J, DU W, et al. Residual load-carrying performance of CFRP strengthened RC beam after drop hammer impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 175(5):104547.
- [18] ZHANG Y, DUANG L, LIU H, et al. Experimental and numerical study on multi-impact performance of predamaged beams strengthened with CFRP[J]. Engineering Structures, 2023, 285(6):116034.
- [19] 孙洪军, 赵腾飞, 唐显喆, 等. 泡沫混凝土-挤塑板复合墙板的抗震性能研究 [J]. 塑料科技, 2024, 52(7):88–92.
- [20] QINGFENG HE, LEIYANG Y, JIAWEI M. An experimental study on dynamic performance of CFRP-repaired RC composite beams under impact [J]. J Vib Shock 2021; 40(4):171–8.
- [21] ZHAO DB, YI WJ, KUNNATH SK. Numerical simulation and shear resistance of reinforced concrete beams under impact [J]. Engineering Structures 2018, 166(7):387–401.
- [22] 王兵. 复合式夹芯外挂墙板抗冲击性能与温度效应的研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.