

双波纹钢-混凝土组合板抗冲击性能分析

曹蓓蕾 赵国庆

沈阳建筑大学 土木工程学院

DOI:10.12238/jssse.v1i1.6237

[摘要] 为了提高双钢板混凝土组合(SCS)板的抗冲击性能,本研究提出了一种新型双波纹钢-混凝土组合(CS-C-CS)板结构。利用ABAQUS软件进行SCS与CS-C-CS组合板的落锤冲击数值模拟,在通过对二者动力响应基础上,重点分析了材料属性、波纹钢板厚度、核心混凝土厚度及连接件间距等参数对CS-C-CS组合板抗冲击性能的影响。研究表明,双波纹钢板对核心混凝土的约束支撑优于双平钢板。在本研究中,CS-C-CS组合板抗冲击性能受到核心混凝土厚度的影响最大,其次依次是连接件间距、波纹钢板厚度和钢材屈服强度。

[关键词] 双层波纹钢混凝土; 组合结构; 动力响应; 有限元

中图分类号: TU398.9 **文献标识码:** A

Impact Resistance Performance of Double Corrugated Steel-Concrete Composite Panels

Beilei Cao Guoqing Zhao

School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University

[Abstract] In order to enhance the impact resistance performance of Double Steel-Concrete Composite (SCS) panels, this study proposes a novel Double Corrugated Steel-Concrete Composite (CS-C-CS) panel structure. ABAQUS software is used to perform numerical simulations of drop hammer impact on both SCS and CS-C-CS composite panels. Based on the comparative analysis of their dynamic responses, the study focuses on investigating the influence of material properties, corrugated steel plate thickness, core concrete thickness, and spacing of connectors on the impact resistance performance of the CS-C-CS composite panel. The results indicate that the double corrugated steel plates provide better support and protection for the core concrete compared to double flat steel plates. Among the parameters studied in this research, the impact resistance performance of the CS-C-CS composite panel is most significantly affected by the core concrete thickness, followed by the spacing of connectors, steel plate thickness, and the yield strength of the steel material.

[Key words] double corrugated steel-concrete; composite structure; dynamic response; finite element method

引言

双钢板混凝土组合(SCS)结构主要由内外侧钢板、核心混凝土和连接件组成,该类结构具备自重轻、承载力高、刚度大、封闭性好及施工便捷等特性,目前已被广泛应用于核电工程、近海工程及海洋平台等领域^[1-2]。除了承受静荷载作用,SCS结构还可能面对冲击爆炸等极端荷载作用,现有研究表明,SCS结构的抗冲击与抗爆性能均优于钢筋混凝土结构^[3]。安国青等^[4]通过数值模拟研究了SCS板的抗撞性能,并基于板壳理论给出了结构最大冲击挠度计算公式; Bruhl等^[5]通过实验研究了双钢板混凝土剪力墙的抗爆性能,表明钢板能够有效防止混凝土溅射破坏。

针对SCS结构的创新,黄振宇等^[6]研发了一种新型核心混凝土材料—超轻质高韧性橡胶集料混凝土,并针对采用新材料的

SCS结构展开了落锤冲击试验,结果表明,新型材料缓冲吸能效果明显优于普通混凝土材料,并起到了抗冲击开裂作用; LUJY等^[7]提出一种平钢板-核心混凝土-梯形波纹板(FS-C-CS)组合板结构,并采用试验与数值模拟研究了结构抗冲击机制,指出与SCS板相比,FS-C-CS组合板抗冲击性能得到极大改善,其冲击变形更小。

为进一步提高SCS板抗冲击性能,本文提出双波纹钢-混凝土组合(CS-C-CS)板结构(如图1所示)。在混凝土用量不变的前提下,通过引入上下波纹钢板,增大截面抗弯能力,从而提高组合板抗冲击性能。本文建立SCS板与CS-C-CS组合板抗冲击数值模型,在比较研究两者动力响应基础上,以材料属性(钢材屈服强度和混凝土抗压强度)、波纹钢板厚度、核心混凝土厚度及连接件间距为变化参数,研究CS-C-CS板抗冲击性能影响规律。

1 数值模型设计与建立

1.1 模型设计

如图1所示, SCS与CS-C-CS组合板分别由上钢板(上波纹钢板)、核心混凝土、连接件及下钢板(下波纹钢板)组成, CS-C-CS组合板连接件均布置在波纹钢板波谷处, 为了更好地对比SCS与CS-C-CS组合板力学性能, 两类组合板连接件空间位置相同。表1列出了设计的13个CS-C-CS组合板构件和1个SCS组合板构件, 构件长度均为1800mm×1200mm(长×宽)。

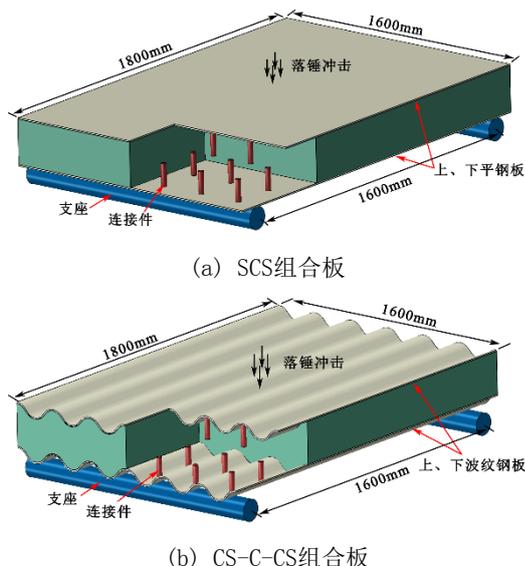


图1 SCS与CS-C-CS组合板
表1 有限元模型分析参数

构件编号	t/mm	t/mm	f_c /MPa	f_y /MPa	h_c /mm	S/mm	F_p /kN	F_m /kN	f_{max} /mm	f_{res} /mm
SCS-1	/	6	26.8	345	200	200	520.13	252.71	26.58	23.44
CS-C-CS-1	6	6	26.8	345	200	200	692.30	382.20	18.28	9.65
CS-C-CS-2	4	6	26.8	345	200	200	576.07	338.17	19.81	11.5
CS-C-CS-3	8	6	26.8	345	200	200	709.60	406.95	18.22	9.17
CS-C-CS-4	6	4	26.8	345	200	200	686.43	339.59	21.20	13.7
CS-C-CS-5	6	8	26.8	345	200	200	708.51	439.80	16.12	6.24
CS-C-CS-6	6	6	20.1	345	200	200	681.73	365.44	18.82	9.72
CS-C-CS-7	6	6	32.4	345	200	200	695.91	383.60	18.13	9.32
CS-C-CS-8	6	6	26.8	235	200	200	674.30	338.24	19.93	13.99
CS-C-CS-9	6	6	26.8	390	200	200	749.48	386.10	17.98	8.24
CS-C-CS-10	6	6	26.8	345	150	200	538.35	310.20	25.59	14.71
CS-C-CS-11	6	6	26.8	345	250	200	889.93	404.90	13.31	6.43
CS-C-CS-12	6	6	26.8	345	200	100	715.50	416.51	16.82	8.40
CS-C-CS-13	6	6	26.8	345	200	300	651.04	300.17	23.29	10.81

注: UCSP、BCSP为上、下波纹钢板型号, 表示为波形×板厚; f_c 代表混凝土轴心抗压强度标准值; f_y 代表波纹钢板屈服强度; h_c 代表核心混凝土厚度; S代表栓钉间距; F_p 代表惯性峰值冲击力; F_m 代表膜拉伸峰值冲击力; f_{max} 代表峰值位移; f_{res} 代表残余位移。

1.2 材料属性

材料属性基本参数如表2所示, 其中 ρ 为密度、E为弹性模量、 f_y 为屈服强度、 f_c 为抗压强度, μ 为泊松比。选用钢材牌号为Q235~Q345, 本构模型采用五段式弹塑性本构模型^[8], 且引入Cowper-Symonds模型考虑应变率效应。混凝土采用ABAQUS-CDP本构模型, 并通过计算DIF增强系数表示应变率效应。

表2 材料特性参数

材料	ρ /(kg·m ⁻³)	E/MPa	f_y /MPa	f_c /MPa	μ
波纹钢	7850	206000	235/345/390		0.3
混凝土	2450	32500		23.4/26.8/29.6	0.2

1.3 建模过程

如图2所示, 以CS-C-CS组合板1/4模型为例, 波纹钢板、核心混凝土、落锤及支座分别采用四节点减缩壳单元(S4R)、八节点减缩积分实体单元(C3D8R)及刚体单元(R3D4)。波纹钢板-核心混凝土、落锤-波纹钢板及波纹钢板-支座间界面行为通过法向硬接触和切向库伦摩擦来模拟, 摩擦系数取0.5^[9]; 通过局部Tie模拟波纹钢板-混凝土间栓钉连接行为, 波纹钢板、核心混凝土、落锤及支座网格尺寸为10mm×10mm, 共计130422个单元。模型边界设定为固定约束, 并通过给落锤施加初速度以实现动力冲击效果。

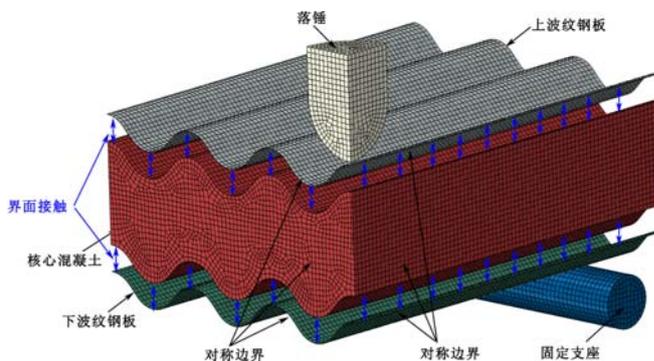


图2 CS-C-CS组合板数值模型

2 数值结果分析

2.1 冲击响应过程

图3为SCS和CS-C-CS组合板冲击力与中心位移时程曲线, 可以观察到冲击力与中心位移时程曲线趋势大致相同。整个冲击过程可根据两个峰值冲击力划分为三个阶段: (1) 惯性响应阶段: 当落锤与构件发生接触时, 构件受冲击区被迫与落锤同方向同速度运动, 冲击力迅速上升至达到第一个峰值, 该峰值是由惯性效应引起, 对应惯性峰值冲击力(F_p); (2) 冲击屈服阶段: 随着构件变形不断增大, 第二个峰值出现在该阶段, 是由钢板的大变形膜拉伸效应引起的^[10], 对应膜拉伸峰值冲击力(F_m)。值得注意的是, SCS组合板在冲击屈服阶段冲击力值均小于CS-C-CS组合板, 这也证明了平钢板的膜拉伸变形能力小于波纹钢板; (3) 卸载阶段: 落锤反弹逐渐与冲击接触面分离, 冲击力开始下降, 图3中冲击力下降点对应中心位移最大值(f_{max})点, 当冲击力下

降至零时, 对应位移值为构件残余位移 (f_{res})。相较于SCS组合板, 在不增加混凝土用量条件下, CS-C-CS组合板的 f_{max} 与 f_{res} 分别降低了45.6%和126.3%。

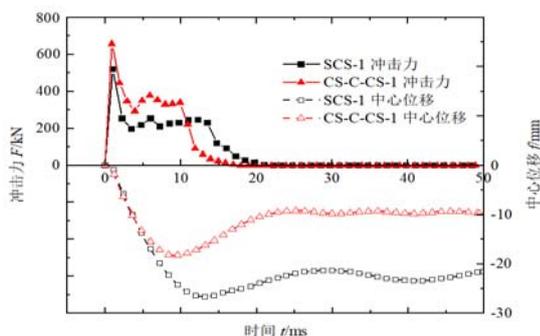
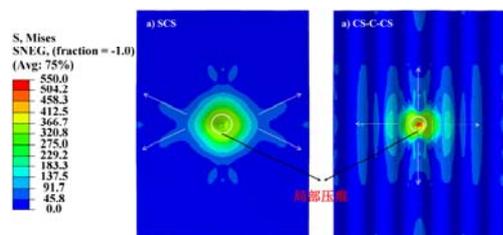


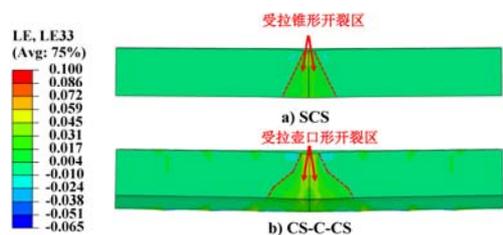
图3 冲击力与中心位移时程曲线

2.2 破坏模式分析

图4为组合板在冲击作用下的破坏模式, 图4a展示了组合板上钢板冲击Mise应力分布, 可以看出, SCS与CS-C-CS组合板均在冲击区域出现局部压痕。SCS组合板应力波扩散较为均匀, 路径呈现“X”型, 而CS-C-CS组合板应力波则出现明显发散性, 且顺波纹方向传播范围大于垂直方向。同时, CS-C-CS组合板应力范围明显小于SCS组合板, 这主要是因为波纹钢板的波形构造改变了应力波传递路径。图4b中可以看出, 组合板在跨中均出现塑性铰, 呈现整体弯曲破坏, 两者组合板的区别在于SCS组合板形成了锥形开裂区, 而CS-C-CS组合板形成了壶口形开裂区。



(a) 上钢板Mises应力云图



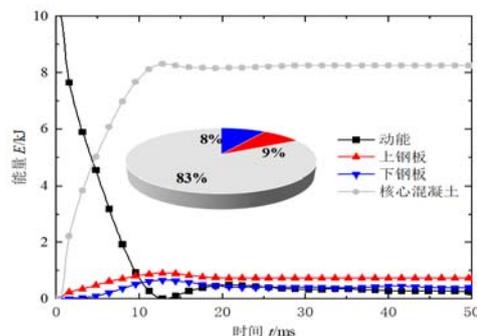
(b) 纵向应变云图

图4 破坏模式

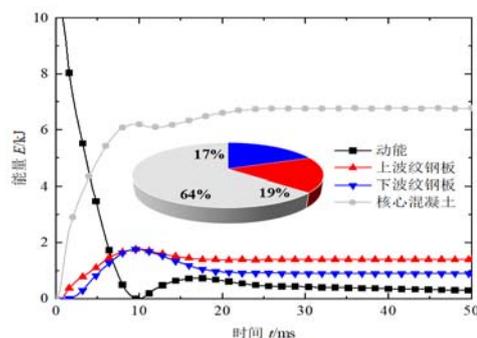
2.3 能量响应分析

图5为SCS与CS-C-CS组合板受冲击过程中各部件内能与落锤动能时程曲线, 可以看出, 两种组合板能量时程曲线趋势一致。在冲击过程中, 落锤损耗动能转化为各部件内能, 造成动能下降内能上升。当构件变形达到 f_{max} 时, 动能均下降至0; 随后,

落锤受结构回弹影响, 部分内能再次转为落锤动能, 直至能量趋于平稳。两种组合板能量响应不同之处在于, 相比于SCS组合板, CS-C-CS组合板中核心混凝土耗能降低了19%, 而上下波纹钢板耗能比例增加了19%, 这说明了由于波纹钢板膜拉伸能力强于平钢板, 使得波纹钢板耗能高于平钢板, 从而降低了核心混凝土的耗能。



(a) SCS组合板



(b) CS-C-CS组合板

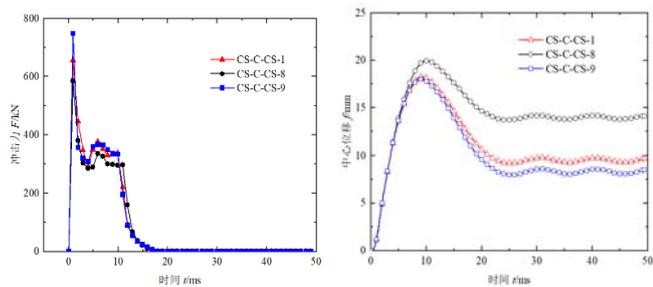
图5 耗能关系时程曲线

3 参数分析

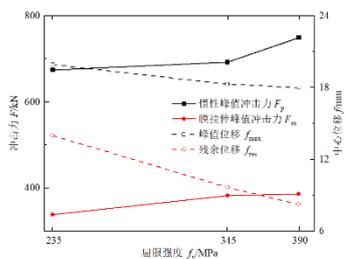
3.1 材料属性

图6给出了钢材屈服强度 f_y 对CS-C-CS组合板冲击力时程与中心位移时程曲线的影响。随着 f_y 增大, 惯性峰值冲击力 F_p 与膜拉伸峰值冲击力 F_m 均有所增大, 这主要是由于 f_y 的增加导致冲击面接触刚度提高。同时, 构件中心位移最大值 f_{max} 与残余位移 f_{res} 均减小, 但减小幅度随 f_y 增大逐渐变小, 当 f_y 由235MPa逐级增加到390MPa, f_{max} 相较于上一级依次减小了9.1%和1.6%, f_{res} 依次减小了44.4%和16.4%, 可以看出, f_{res} 变化幅度明显高于 f_{max} , 主要因为提高 f_y 能有效改善构件弹性变形能力。

图7给出了混凝土强度 f_c 对CS-C-CS组合板冲击力时程与中心位移时程曲线的影响, 可以看出, 采用不同强度混凝土的构件的冲击力与中心位移曲线趋势大致相同, F_p 、 F_m 、 f_{max} 及 f_{res} 相差均不大, 这表明在该参数范围内, 混凝土强度对CS-C-CS组合板抗冲击性能影响很小, 主要是因为落锤冲击受压区范围较小, 而受拉区混凝土一旦开裂便退出工作, 无法充分发挥截面抗弯刚度。

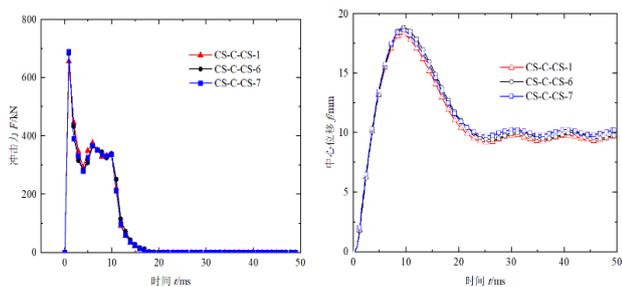


(a) 冲击力时程曲线 (b) 中心位移时程曲线

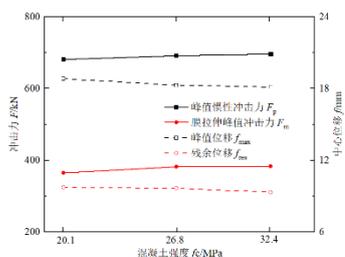


(c) F_p 、 F_m 、 f_{max} 与 f_{res}

图6 钢材屈服强度 f_y 影响



(a) 冲击力时程曲线 (b) 中心位移时程曲线



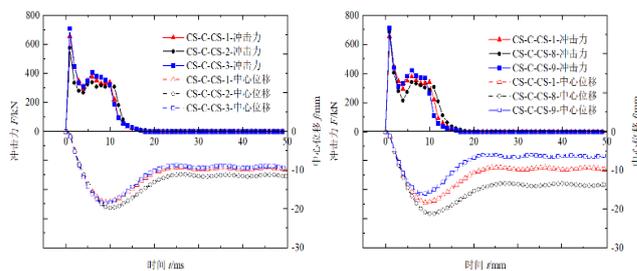
(c) F_p 、 F_m 、 f_{max} 与 f_{res}

图7 混凝土强度 f_c 影响

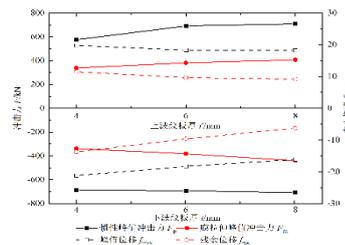
3.2 波纹钢板厚

图8给出了波纹钢板厚对CS-C-CS组合板冲击力时程与中心位移时程曲线的影响,可以看出,增大波纹钢板厚度能够有效减小 f_{max} 与 f_{res} ,且由于增大板厚提高了结构刚度,使得组合板 F_p 与 F_m 均有所增加。同时,下波纹钢板厚度对CS-C-CS组合板抗冲击影响大于上波纹板厚度,当上(下)波纹钢板厚由4mm以极差2mm增加到8mm时, F_p 相较于上一级依次增加了20.2%(0.8%)和2.5%(2.3%), F_m 增加了13.1%(13.4%)和6.5%(15.1%), f_{max} 相较于上一级依次减小了8.4%(15.9%)和0.3%(13.4), f_{res} 减小了

19.2%(41.9%)和5.2%(54.6)。



(a) 上波纹板厚 t' 影响 (b) 下波纹板厚 t 影响

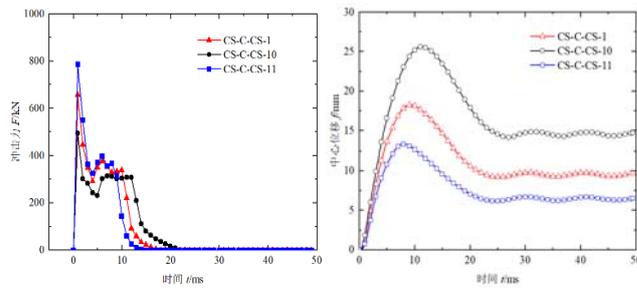


(c) F_p 、 F_m 、 f_{max} 与 f_{res}

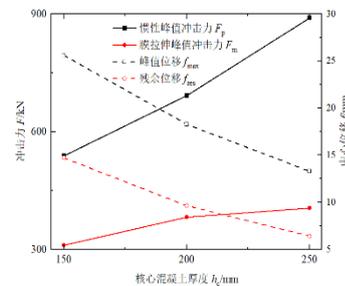
图8 波纹钢板厚影响

3.3 混凝土厚度

图9给出了核心混凝土厚度 h_c 对CS-C-CS组合板冲击力时程与中心位移时程曲线的影响,可以看出, h_c 越大, F_p 和 F_m 随之增大,而 f_{max} 和 f_{res} 随之减小,这主要是由于提高 h_c 导致结构截面刚度增大,且更厚的核心混凝土对波纹钢板提供了更强的支撑作用。当 h_c 由150mm以极差50mm增加至250mm时, F_p 相较于上一级依次增加了28.6%和28.5%, F_m 增加了23.2%和5.9%, f_{max} 相较于上一级依次减小了39.9%和37.34%, f_{res} 减小了52.4%和50.1%。



(a) 冲击力时程曲线 (b) 中心位移时程曲线

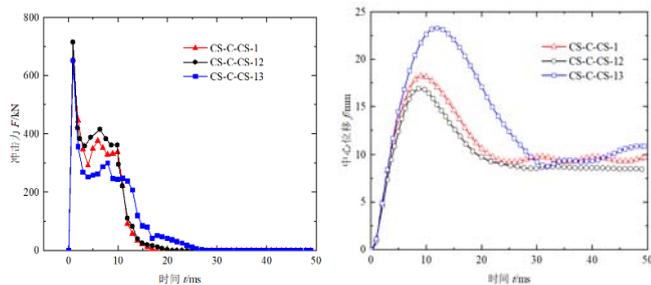


(c) F_p 、 F_m 、 f_{max} 与 f_{res}

图9 混凝土厚度 h_c 影响

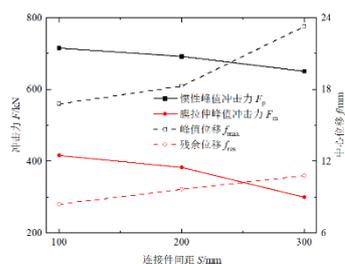
3.4 连接件间距

图10给出了连接件间距 S 对CS-C-CS组合板冲击力时程与中心位移时程曲线的影响,图10a可以看出, S 越小, F_p 和 F_m 均随之增大,且 F_m 增大幅度高于 F_p ,这主要是由于减小 S 加强了波纹钢板与核心混凝土的复合作用。在冲击过程中,随着 S 减小,波纹钢板-混凝土间的冲击脱空面积越少,核心混凝土提供支撑作用越强。图10b可以看出, S 越小, f_{max} 和 f_{res} 均有所减小,但减小幅度逐渐减弱。当 S 由100mm以极差100mm增加至300mm时, F_p 相较于上一级依次减小了3.4%和6.3%, F_m 减小了8.9%和27.3%; f_{max} 相较于上一级依次增加了8.8%和27.4%, f_{res} 减小了14.9%和11.9%。



(a) 冲击力时程曲线

(b) 中心位移时程曲线

(c) F_p 、 F_m 、 f_{max} 与 f_{res} 图10连接件间距 S 影响

4 结论

(1)SCS和CS-C-CS组合板在冲击作用下,均呈现整体弯曲破坏,但两者应力波传递路径与开裂区形式差别较大,可将二者冲击阶段划分为惯性响应阶段、冲击屈服阶段和卸载阶段。(2)在不增加混凝土用量情况下,波纹钢板膜拉伸能力优于平钢板,这有效降低核心混凝土耗能,使得整体结构变形能力更强。(3)钢材屈服强度、波纹钢板厚度、核心混凝土厚度及连接间距对

CS-C-CS组合板冲击力与中心位移影响较大,其中核心混凝土厚度影响最为显著,其次依次是连接件间距、波纹钢板厚度和钢材屈服强度。

[参考文献]

[1]樊健生,丁然,聂鑫,等.高性能双钢板混凝土结构研究与应用[J].建筑结构学报,2022,43(9):55-72.

[2]LIEW J Y R,YAN J B,HUANG ZY. Steel-concrete-steel sandwich composite structures-recent innovation[J].Journal of Constructional Steel Research,2017,130:202-221.

[3]赵春风,何凯城,卢欣,等.双钢板混凝土组合板抗爆性能分析[J].爆炸与冲击,2021,41(9):116-131.

[4]安国青,王蕊,赵晖,等.双钢板混凝土组合板在撞击荷载下的动力响应[J].东北大学学报(自然科学版),2022,43(8):1192-1200.

[5]BRUHL J C,VARMA A H. Experimental evaluation of steel-plate composite walls subject to blast loads [J].Journal of Structural Engineering,2018,144(9):4018155.

[6]黄振宇,张维,李任.双层钢-超轻质高韧性橡胶集料混凝土夹心组合板抗多次冲击性能研究[J/OL].建筑结构学报,2021,(07):55.

[7]LU JY,WANG YH,ZHAI XM. Response of flat steel-concrete-corrugated steel sandwich panel under drop-weight impact load by a hemi-spherical head[J]. Journal of Building Engineering,2021,44:102890.

[8]韩林海.钢管混凝土结构:理论与实践[M].3版.北京:科学出版社,2016:5-26.

[9]Yan JB, Liew JYR, Zhang MH. Ultimate strength behavior of steel-concrete-steel sandwich beams with ultra-lightweight cement composite, Part 2: finite element analysis[J]. Steel Compos Struct Int J 2015,18(4):1001-21.

[10]ZHAO WY, GUO QQ, DOU XQ, et al. Impact response of steel-concrete composite panels: experiments and FE analyses [J].Steel and Composite Structures,2018,26(3):255-263.