DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0092-07

桁架式钢筋混凝土叠合板式墙抗爆性能实验*

吴保桦,张尚根,康正炎
(解放军理工大学国防工程学院,江苏 南京 210007)

摘要: 为研究桁架式叠合板式墙的抗爆性能,进行了 2 块桁架式叠合板式墙和 2 块现浇板式墙在多次冲击荷载作用下的对比实验,分析了各试件的破坏过程、变形(刚度)、承载力、强度及裂缝分布形态。结果表明:桁架式叠合板式墙与现浇板式墙相比,爆炸破坏过程相似;爆炸荷载小时,试件处于弹性状态,两者刚度基本一致;开裂后,现浇板式墙比叠合板式墙刚度降低明显快,桁架钢筋能有效抑制裂缝扩展,且试件并未出现剪切破坏。说明桁架式叠合板式墙的整体性能较好,叠合板式墙的抗爆性能优于现浇板式墙。

关键词: 爆炸力学;抗爆性能;爆炸实验;桁架式叠合板式墙
中图分类号: O383.2; TU362 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

桁架式叠合板式墙作为一种新型叠合板结构,既具有与传统的叠合板一样的施工快速的优势,又具有整体刚度大、抗震性能好的优点。近年来,许多学者对它进行了大量的研究,主要包括:蒋庆等[1]、连星等[2]、张丽军[3]进行了叠合板式墙的抗震性能实验,研究表明叠合板式墙有较好的整体性,并对叠合板式剪力墙的刚度衰减过程进行分析,推导了静载下弹性刚度的短期计算公式,并提出叠合板式剪力墙的正截面抗弯承载力计算公式、斜截面抗剪计算公式、正截面开裂荷载计算公式和墙板水平接缝受剪承载力计算公式;汤磊等[4-5]对桁架式叠合双向板与现浇双向板进行了对比实验,表明叠合板抗裂性能及刚度略低于现浇双向板,但破坏形态及发展相似;刘轶[6]对自承式单跨简支单向钢筋桁架叠合板在施工阶段与使用阶段的受力性能以及极限承载能力进行了实验研究,探讨了钢筋桁架混凝土叠合板在正常使用阶段刚度、极限承载力的计算方法;刘云林等[7]进行了叠合板的数值模拟研究,表明格构式钢筋对于叠合板在正常使用状态下的承载力有明显提高且板的延性有所增加。

以上工作均以叠合板在静荷载作用下的实验和理论为主,对动荷载作用下桁架式叠合板的性能问题尚无成熟的研究成果。

本文中,通过对 2 块桁架式混凝土叠合板式墙和 2 块现浇板式墙进行爆炸冲击实验,研究该种新式叠合板式墙的抗爆性能,拟为它在人防结构的应用提供理论依据。

1 实 验

1.1 试件设计

共设计了 4 块试件,墙板尺寸为 $b\times h\times L=1\ 100\ \text{mm}\times 250\ \text{mm}\times 3\ 500\ \text{mm}$,其中叠合板式墙 2 块 B11、B12,现浇板式墙 2 块 B41、B142,试件墙板上、下保护层厚分别为 25、20 mm,上层纵向受力筋配筋情况为 7∅14 mmHRB400,下层纵向受力筋筋配筋情况为 7∅12 mmHRB400。叠合板式墙为经过 3 次浇筑的钢筋混凝土板状结构,其中外侧预制板厚 60 mm,内侧预制板厚 50mm,中间后浇叠合层厚 140 mm。墙体顶板支座厚 200 mm,底板支座厚 300 mm,支座高 800 mm,试件如图 1 所示。叠合板式墙上下预制层由三角桁架式钢筋连接,桁架钢筋由 3 根成等腰三角形的上下弦钢筋组成,上、下钢筋由斜向腹筋相连,采用点焊式连接。上弦钢筋直径 10 mm,下弦钢筋和斜向腹筋直径 6 mm。格构钢筋为

* **收稿日期**: 2015-05-29; **修回日期**: 2015-09-22
基金项目: 总参南京科技创新工作站科研项目(NJCX-RW-20110247)
第一作者: 吴保桦(1988—),男,硕士研究生; **通信作者**: 张尚根,genzs3@126.com。

CRB550，试件配筋见图 1。

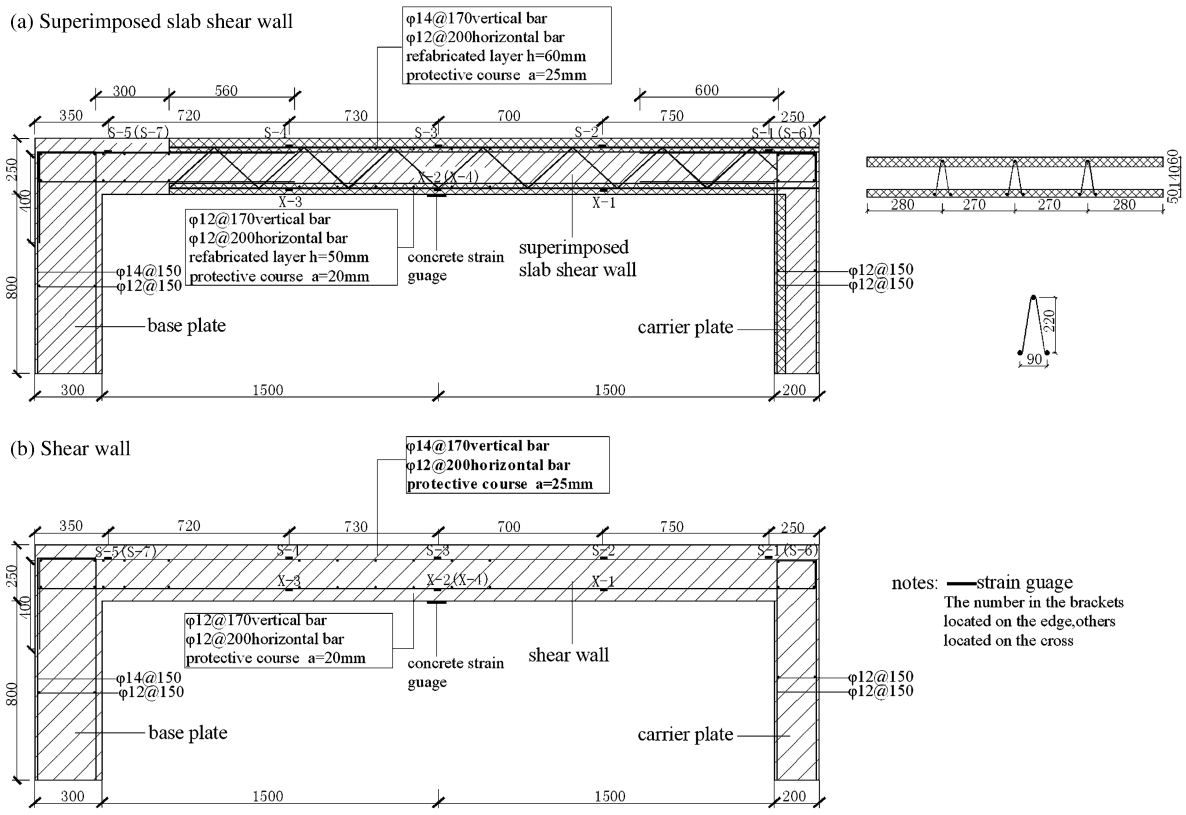

图 1　试件尺寸及配筋图

Fig. 1　Reinforcement details of specimens

1.2　试件加载及测点布置方案

实验在解放军理工大学抗爆实验室爆坑进行。采用电雷管引爆导爆索爆炸进行加载，允许最大超压 0.9 MPa，加载示意图及爆坑如图 2 所示。为了避免底部不稳固，保证试件在受力过程中不产生沉降或倾斜，在坑底铺放了 40 cm 厚的钢筋混凝土板。

爆炸加载过程主要获取钢筋应变、跨中受拉区混凝土应变、跨中挠度以及爆炸压力。试件配筋应变测点布置如图 1 所示。在覆土层表面沿试件长度方向对称布置 2 个压力传感器，以确定平均空爆超压。为了测量叠合板式墙在爆炸过程中跨中位移变化情况，在试件跨中布置了位移计。

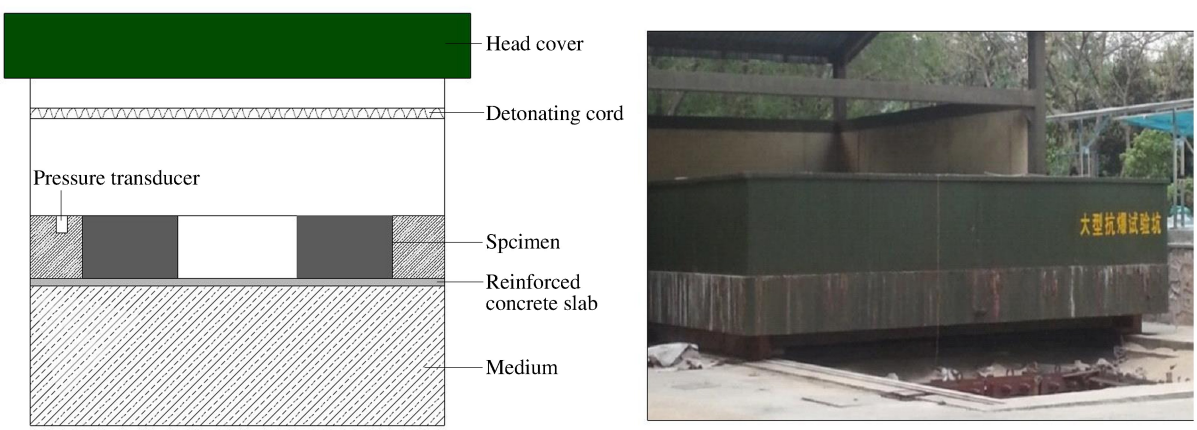

图 2　实验加载装置图

Fig. 2　Expeirmental set-up

2 结果与分析

2.1 结果

在爆炸荷载作用下,结构动态响应时间短,无法仔细观察试件裂缝开展及破坏过程,只能在加载后观察试件的开裂、破坏情况。实验共分 2 组进行,每组 2 个试件,每组进行连续 3 次非接触爆炸冲击加载。实验数据见表 1～2,试件破坏情况如 3～4、6 所示。

表 1 实验数据(一)

Table 1 Expeirmental data (Ⅰ)

组编	炮次	实测压力/MPa		跨中位移/mm		混凝土应变/10^{-6}	
		p_1	p_2	B11	B42	B11	B42
1	1	0.059	0.055	2.1	3.2	151.3	1 451.3
	2	0.069	0.065	2.8	3.9	220.5	2 738.4
	3	0.157	0.174	17.8	28.0	2 278.2	6 234.2
组次	炮次	实测压力/MPa		跨中位移/mm		混凝土应变/10^{-6}	
		p_1	p_2	B12	B41	B12	B41
2	1	0.061	0.055	3.3	4.5	89.1	93.2
	2	0.084	0.078	4.1	8.7	322.8	924.0
	3	0.178	0.177	11.8	40.0	1 985.2	2 055.0

表 2 实验数据(二)

Table 2 Expeirmental data (Ⅱ)

测点	B11 钢筋峰值应变/10^{-6}			B42 钢筋峰值应变/10^{-6}			B12 钢筋峰值应变/10^{-6}			B41 钢筋峰值应变/10^{-6}		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S-1	—	—	—	93.3	81.9	215.8	44.3	78.2	2718.7	40.5	50.1	767.7
S-2	74.7	70.8	215.4	72.2	81.5	167.2	—	—	—	43.6	89.8	1 000.0
S-3	177.1	485.9	833.7	278.1	339	2 100.2	306.4	336.4	2 306.1	325.4	241.9	3 355.6
S-4	71.1	217.5	767.7	37.1	74.5	116.7	40.1	84.2	1 579.8	182.4	143.3	1 565.0
S-5	—	—	—	902.5	1 507.2	3 862.1	141.6	397.6	1 035.8	928.6	1 723.1	10 000.0
S-6	98.6	122.6	10 000.0	1 057.3	1 021.8	5 000.0	33.1	40.8	1 978.5	626.8	641.4	2 406.4
S-7	238.5	583.9	2 116.2	706.2	846.7	2 940.3	208.3	262.8	4 180.4	93.3	542.1	1 867.2
X-1	114.2	116.0	10 000.0	98.4	61.8	738.1	143.1	167.4	2 903.4	115.3	230.8	2 055.3
X-2	162.9	117.5	1 118.4	340.1	812.9	2 317.5	530.3	1 192.6	3 450.5	—	—	—
X-3	262.8	435.8	2 577.5	130.4	407.7	651.8	188.6	198.6	2 425.4	—	—	—
X-4	119.0	141.1	708.8	471.6	369.2	2 098.7	272.7	877.6	2 942.4	470.8	1 089.1	1 744.8

2.1.1 第 1 组实验

第 1 炮压力峰值为 0.057 MPa。B11 未产生裂缝,跨中位移微小,各测点钢筋峰值应变在 100×10^{-6} 至 300×10^{-6} 范围内,试件处于弹性阶段;B42 跨中出现横向微小裂缝,跨中位移很小,跨中底面钢筋应变未达到动屈服应变,试件处于弹性阶段。

第 2 炮压力峰值为 0.067 MPa。B11 跨中位移峰值 2.8 mm,残余位移不足 1 mm,试件跨中底面受拉区混凝土和顶板支座处出现横向小裂缝,各测点钢筋峰值应变在 150×10^{-6} 至 600×10^{-6} 范围内,钢筋尚未屈服;B42 跨中位移峰值 3.9 mm,残余位移约为 1 mm,跨中底面及顶板支座处出现小裂缝。

第 3 炮峰值压力增大到 0.165 MPa。B11 跨中位移峰值 17.8 mm,部分钢筋测点超过屈服应变,裂缝宽度增大,裂缝高度沿厚度方向发展,跨中主裂缝高度达 205 mm,横向裂缝数目增多,顶板处虽然裂

缝条数较多，但裂缝宽度较小，最大宽约为 0.8 mm。B42 跨中位移峰值达 28 mm，部分钢筋测点超过钢筋屈服应变，试件横向裂缝宽度增大，裂缝数目增多，跨中主裂缝宽约为 2.8 mm，在顶板与侧墙连接处也出现一条宽约 3.5 mm 的裂缝，B42 破坏较严重。

2.1.2　第 2 组实验

第 1 炮压力峰值为 0.058 MPa。B12 未产生裂缝，跨中峰值位移约为 3.3 mm，各测点钢筋峰值应变在 50×10^{-6} 至 300×10^{-6} 范围内，试件处于弹性状态。B41 跨中位移峰值约为 4.5 mm ，钢筋应变均未达到 HRB400 级钢筋的动屈服应变。

第 2 炮压力峰值为 0.081 MPa。B12 跨中位移峰值为 4.1 mm，残余位移约为 1 mm，跨中底面受拉区和顶板支座处出现横向小裂缝，各钢筋应变测点应变峰值均较小，钢筋尚未屈服。B41 跨中位移峰值为 8.7 mm，残余位移约为 2 mm，顶板支座处裂缝变宽，沿顶板厚度方向扩展，跨中底面裂缝数目增加，各测点钢筋应变峰值增大，但均未达到钢筋动屈服应变。

第 3 炮峰值压力达到 0.178 MPa。B12 跨中位移峰值为 11.8 mm，残余位移约为 4 mm，板底跨中区域有 4 条拉裂缝，宽约为 1 mm，顶板支座处也有 2 条宽 0.4 mm 裂缝。B41 板跨中有 3 条小裂缝，中间主裂缝宽约为 3 mm，跨中区域有多条小裂缝，跨中出现塑性铰，出现明显的塑性变形；顶板支座处有 1 条宽 8 mm 裂缝；侧墙根部有一条裂缝，B41 在爆炸荷载下破坏严重。

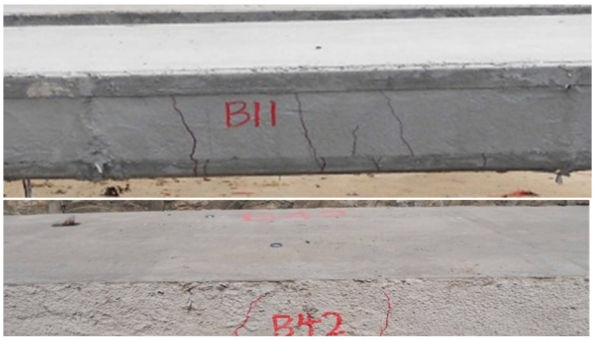

图 3　第 1 组试件跨中破坏形态

Fig. 3　Failure mode of Group No. 1



图 4　第 2 组试件跨中破坏形态

Fig. 4　Failure mode of Group No. 2

2.2　分析

衡量构件抗爆能力[8]有两个方面，变形状态和承载能力。同时由于构件为半预制半现浇，所以抗剪强度也是衡量构件抗爆性能的标准之一。

2.2.1　变形（刚度）

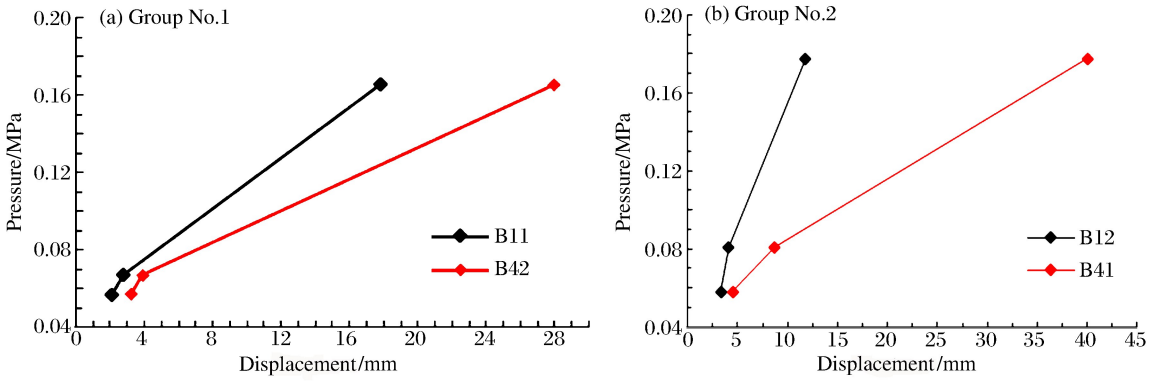

图 5　抗力-位移曲线

Fig. 5　Resistance-displacement curves

由抗力-位移曲线(见图 5)可得,在第 1 炮荷载作用下,试件处于弹性状态,两试件跨中位移相近,在第 2 炮荷载作用下,试件进入弹塑性状态,叠合板式墙与现浇板式墙跨中位移显示出一定差距,叠合板式墙挠度小于现浇板式墙挠度;在第 3 炮爆炸荷载作用下,试件跨中受拉钢筋屈服,裂缝沿厚度方向发展,致使跨中有效截面减小,试件抗弯刚度降低,跨中位移峰值快速增大,试件弯曲破坏。叠合板式墙的跨中位移峰值比相同条件下现浇板式墙的跨中位移峰值小,大约是现浇板式墙跨中位移峰值的 30%～50%。

由此表明,在爆炸冲击荷载作用下,随着爆炸荷载增大,试件出现裂缝,有效抗弯刚度降低,但叠合板式墙的刚度减小量比现浇板式墙刚度减小量小,说明试件开裂后,叠合板式墙中的三角桁架式格构钢筋对于提高叠合板式墙的刚度有重要作用。

2.2.2 承载力

实验结果表明,峰值压力为 0.05～0.06 MPa 时,各叠合板试件处于弹性状态,试件跨中部位均未发现裂缝或微裂缝很小。在第 2 炮爆炸冲击荷载作用下,钢筋应变测点峰值增大,少数钢筋应变测点超过其屈服强度,试件处于弹性极限状态并开始进入塑性状态。峰值压力增大到 0.150～0.170 MPa,试件已达到承载力极限状态,试件 B41、B42 均已破坏,试件 B11、B12 跨中裂缝超过最大限值而破坏,但就破坏程度而言,现浇板式墙比叠合板式墙破坏更严重。

2.2.3 强度

由于钢筋混凝土叠合板式侧墙为两侧预制中间层现浇,最终成形试件具有两个叠合面,因此,抗剪强度是保证预制层混凝土与后浇叠合层混凝土形成整体共同工作的关键。

由图 3～4、6,叠合板式墙与现浇板式墙裂缝开展情况及位置基本相同,均是在跨中及支座处受拉面产生横向拉裂缝,充分发挥了截面上的抗弯能力。整个爆炸加载过程中,全部叠合板试件均没有发生斜截面剪切破坏现象,现浇夹层与与预制层之间也未出现明显错动与分离,说明通过叠合面间黏结力及桁架式格构钢筋的约束作用,叠合面抗剪强度是可以保证的。

3 裂缝分析

在爆炸荷载作用下,试件裂缝主要集中在跨中底部和试件端部,叠合板式墙试件和现浇板式墙试件在爆炸冲击荷载作用下破坏形态相同,均为弯曲破坏。

试件裂缝破坏情况如图 6 所示。

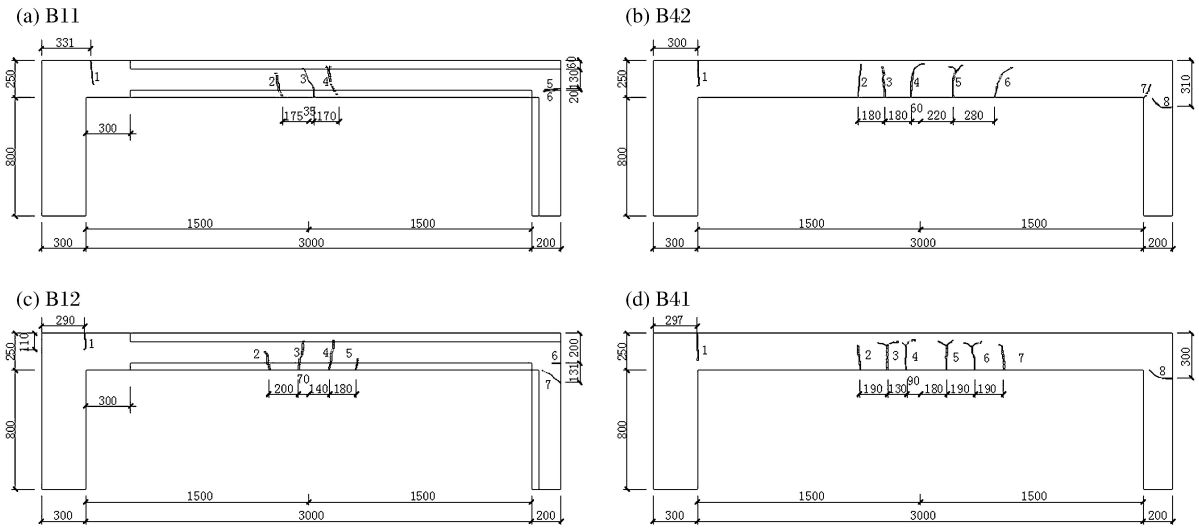

图 6 试件裂缝破坏

Fig. 6 Specimen fractures

由图 6 可知，在相同爆炸冲击荷载作用下，各试件裂缝间距相差不大。爆炸冲击荷载达到试件的开裂荷载时，试件将产生横向裂缝，横向裂缝一旦出现就会沿板厚上升到一定的高度，随着爆炸荷载增加，裂缝沿试件截面高度向上扩展。试件裂缝数据见表 3。

由表 3 可知，相同爆炸冲击荷载作用下，叠合板试件的裂缝宽度与高度均比现浇板试件的裂缝宽度与高度小。叠合板裂缝出现是由于爆炸荷载作用下，受拉边缘所受拉应力达到混凝土极限拉应力所致，裂缝开展是由于受拉区水平分布钢筋及桁架下弦钢筋外围混凝土的回缩，裂缝截面受拉钢筋不断伸长。由于桁架钢筋的的斜向腹筋也有阻裂作用，使得叠合板的裂缝宽度和高度较普通 RC 板的裂缝小。

表 3 试件裂缝

Table 3 Specimen fractures

试件	裂缝高度/mm							
	1	2	3	4	5	6	7	8
B11	170	189	205	180	130	130	—	—
B42	230	240	230	240	230	210	100	180
B12	110	100	208	210	80	40	150	—
B41	200	170	220	220	220	220	170	160
试件	裂缝最大宽度/mm							
	1	2	3	4	5	6	7	8
B11	1.5	0.3	2.0	1.5	0.2	0.5	—	—
B42	3.0	0.5	0.5	2.8	2.5	0.3	0.5	3.5
B12	0.3	0.1	1.0	1.0	0.1	0.3	0.4	—
B41	2.0	0.1	2.0	3.0	2.0	1.5	0.1	8.0

4　结　论

通过 2 组共 4 块试件的抗爆实验，分析了叠合板式墙的变形、承载力、抗剪强度及裂缝扩展情况，得出以下结论。

(1)爆炸荷载较小时，试件处于弹性状态，叠合板式墙与现浇板式墙跨中位移相似，二者抗弯刚度相似；爆炸荷载较大时，试件出现裂缝，此时由于叠合板式墙中桁架式钢筋的存在，现浇板式墙试件的抗弯刚度比叠合板式墙试件的抗弯刚度降低更明显。

(2)由试件破坏情况知，叠合板式墙的抗爆承载力高于现浇板式墙的承载力。

(3)在整个实验过程中，试件均未产生剪切破坏，说明预制板部分与现浇夹层部分的黏结可靠、桁架式钢筋连接措施合理有效，叠合板式墙整体工作性能良好。

(4)由于桁架式腹筋的存在，叠合板式墙的裂缝宽度及高度比现浇板式墙的裂缝宽度及高度要小。

参考文献：

[1] 蒋庆，叶献国，种迅. 叠合板式剪力墙的力学计算模型[J]. 土木工程学报，2012，45(1)：8-12.
Jiang Qing, Ye Xianguo, Chong Xun. Calculation model for superimposed slab shear walls[J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(1):8-12.

[2] 连星，叶献国，王德才，等. 叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析[J]. 合肥工业大学学报，2009，32(8)：1219-1223.
Lian Xing, Ye Xianguo, Wang Decai, et al. Experimental analysis of seismic behavior of superimposed slab shear walls[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2009,32(8):1219-1223.

[3] 张丽军. 叠合板式剪力墙抗震性能试验研究及非线性有限元分析[D]. 合肥：合肥工业大学，2009.

[4] 汤磊，郭正兴，丁桂平. 新型钢筋桁架混凝土叠合双向板结构性能试验研究[J]. 工业建筑，2013，43(11)：49-53.
Tang Lei, Guo Zhengxing, Ding Guiping. Structural performance test research on the new steel bar truss concrete

superimposed two-way slab[J]. Industrial Construction, 2013,43(11):49-53.

[5] 汤磊,郭正兴,丁桂平.新型钢筋桁架混凝土叠合双向板刚度和挠度计算方法研究[J].建筑结构,2013,43(19):30-32.
Tang Lei, Guo Zhengxing, Ding Guiping. Research on calculation method for stiffness and deflection of the new steel bar truss concrete superimposed two-way slab[J]. Building Structure, 2013,43(19):30-32.

[6] 刘轶.自承式钢筋桁架混凝土叠合板性能研究[D].杭州:浙江大学建筑工程学院,2006.

[7] 刘云林,叶献国,胡昊.带格构钢筋混凝土叠合板的数值模拟与格构钢筋作用分析[J].合肥工业大学学报,2014,37(9):1093-1096.
Liu Yunlin, Ye Xianguo, Hu Hao. Numerical simulation of superimposed slabs with lattice gird and analysis of the function of lattice gird[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2014,37(9):1093-1096.

[8] 陈万祥,严少华.CFRP 加固钢筋混凝土梁抗爆性能试验研究[J].土木工程学报,2010,43(5):1-9.
Chen Wanxiang, Yan Shaohua. Experimental study of RC beams strengthened with CFRP under blast loading[J]. China civil Engineering Journal, 2010,43(5):1-9.

Anti-blast properties of RC superimposed slab shear wall

Wu Baohua, Zhang Shanggen, Kang Zhengyan

(*Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*)

Abstract: In order to analyze the anti-blast properties of the RC superimposed slab's shear wall, comparative experimental studies of two RC superimposed slab shear walls and two in-situ cast shear walls under explosion were conducted. The structural failure feature, deformation capability, bearing capacity and crack distribution pattern were analyzed systematically. The result shows that the failure mode of the RC superimposed slab shear wall is similar to that of the in-situ cast shear wall. The stiffness of two kinds of specimen are basically identical within the elastic stage. But the post-cracking stiffness' descending speed of the in-situ cast shear wall is greater than that of the RC superimposed slab shear wall. The RC superimposed slab effectively restrained the crack extension and there were no shear failure throughout the loading procedure, which proves its high integrity. The blasting-resistance performance of the RC superimposed slab shear wall is superior to that of the in-situ cast shear wall.

Keywords: mechanics of explosion; anti-blast property; explosion experiment; RC superimposed slab shear wall

(责任编辑 丁 峰)