

近接爆発を受けるハニカム複合パネルの耐爆緩衝性能に関する研究

Study on explosive mitigation performance of
Honeycomb Composite Panels subject to close-in explosion.

相澤武揚*, 別府万寿博**, 市野宏嘉***
Aizawa Takeaki, Beppu Masuhiro, Ichino Hiroyoshi

* 昭和飛行機工業株式会社 (〒196-8522 東京都昭島市田中町 600)

** 博 (工), 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

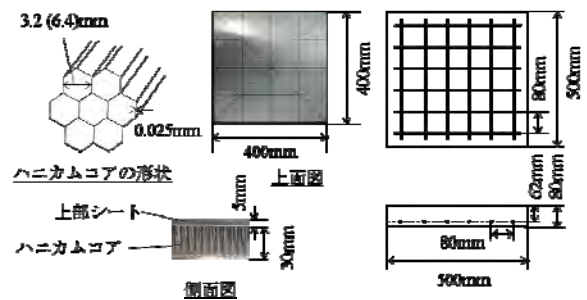
*** 博 (工), 防衛大学校准教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Key Words : Shock Wave, Honeycomb composite panel, Explosive mitigation performance,
Close-in explosion

キーワード : 衝撃波, ハニカム複合パネル, 耐爆緩衝性能, 近接爆発

1. 緒言

近年, 世界的に爆破テロや爆発事故が多発している. このような爆発作用によって重要な施設が被害を受けた場合, 社会へ与える影響は極めて大きいため, 爆発荷重に対する防護設計法を確立することは急務である. 本研究は, 鉄筋コンクリート(RC)部材および鋼材に対する緩衝材の一つとしてアルミハニカムに着目し, 近接爆発を受けるハニカム複合パネルの耐爆緩衝性能を調べたものである. RC版および鋼板にハニカム複合パネルを設置した場合の緩衝効果について検討を行った.



(a) ハニカム複合パネル (b) RC版

図-1 試験体の寸法

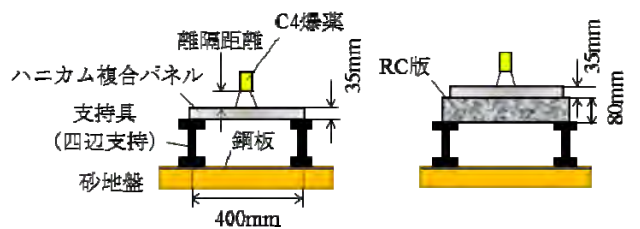
2. RC版の局部破壊に対する緩衝効果

2.1 実験の概要

図-1および表-1に, ハニカム複合パネルとRC版の寸法および構成材料の力学特性を示す. ハニカムコアの形状は六角形構造で, 密度は 37kg/m^3 および 72kg/m^3 の2種類を用いた. ハニカムコアの上面には, 爆風圧を分散してハニカムコアに伝達させるためにアルミニウム(AL)およびガラス繊維強化プラスチック(GFRP)のシートを貼付している. なお, GFRPについては, シートを 90° に交差して34枚重ねたUD材と, ガラス繊維を編み込んで(平織)19枚重ねたCL材を作製した. ハニカムコアとシート上部からなるハニカム複合パネルの寸法は, 縦400mm, 横400mmおよび高さ35mmであり, ハニカムの密度およびシートが異なる計6種類の試験体を作製した. RC版の寸法は, 縦500mm, 横500mmおよび厚さ80mmで, 引張鉄筋比は0.5%である. 図-2

表-1 ハニカム材料特性値

番号	密度 (kg/m ³)	圧縮強度 (MPa)	圧縮弾性率 (MPa)	セルサイズ (mm)	箔厚 (mm)
1	37	1.6	161	6.4	0.025
2	72	4.5	575	3.2	0.025



(a) ハニカム複合パネルのみ (b) ハニカム複合パネル + RC版

図-2 試験体の設置状況

および表-2 に、試験体の設置状況および実験ケースを示す。爆薬については、密度 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ の C4 爆薬を円柱状に成形した。C4 爆薬をそれぞれの試験体の中央に離隔距離を設けて設置し、6 号電気雷管により起爆した。実験ケースについては、図-2 (a)に示すハニカム複合パネルだけに爆発荷重を作用する実験では爆薬量を 29.5g、離隔距離を 32mm に設定した。一方、図-2 (b)に示す RC 版に対する緩衝効果を調べる実験では、爆薬量を 50g とし、離隔距離を 20mm から 40mm とした。また、試験体の衝撃応答を調べるため、図-3 に示すように、RC 版の裏面にひずみゲージを貼付してひずみ応答を計測した。

2.2 実験結果及び考察

図-4 に、ハニカム複合パネルだけに対する爆発実験での試験体の破壊の一例を示す。図-4 (a)に示すハニカム複合パネルの破壊性状をみると、AL 材および UD 材のケースでは表面の中心部が大きく変形し凹みを生じている。一方で、CL 材については中央部に貫通孔が生じており、AL 材および UD 材に比べて耐爆性能が小さいことがわかる。また、AL 材と UD 材の密度が大きいケースは、密度が小さいケースに比べて変形量が小さくなっているが、CL 材についてはやはり中心部に貫通孔が生じた。以上から、ハニカム複合パネルは AL 材および UD 材を設置することにより、効果的に爆発荷重に抵抗すると考えられる。

次に、図-4 (b)に示す RC 版の破壊性状をみると、離隔距離が 20mm でハニカム複合パネルを設置していない RC 版の裏面には裏面剥離が生じている。一方で、ハニカム複合パネルを設置した RC 版については、破壊が大幅に低減していることがわかる。なお、本ケースのハニカム複合パネルには全て貫通孔が生じていた。さらに、離隔距離を 40mm にしたケースではハニカム複合パネルを設置していない RC 版の裏面にはひび割れが生じているが、ハニカム複合パネルを設置したケースでは裏面のひび割れが生じていないことがわかる。なお、本ケースのハニカム複合パネルは、AL および UD の 2 種については貫通孔が生じなかった。

図-5 に、RC 版の裏面におけるひずみ～時間関係を示す。離隔距離が 20mm のケースにおいては、全てのケースで爆発後 0.1~0.2ms までに約 $1000\mu\text{m}$ ~ $2000\mu\text{m}$ の圧縮ひずみが生じた後、時刻 0.4ms からゼロあるいは引張ひずみに転じる傾向を示している。これは、過去に行われた同様の実験においても観察されており、圧縮応力波の伝播や RC 版に高次モードの変形が生じたためと考えられる。次に、離隔距離が 40mm のケースをみると、ハニカム複合パネルを設置していない RC 版では、離隔距離が 20mm のケースと同様に爆発直後に約 $800\mu\text{m}$ の圧縮ひずみが生じているが、ハニカム複合パネルを設置したケースでは、CL 材を除き爆発直後に引張ひずみが生じ

表-2 実験ケース

番号	種類	上部シート	コア密度 (kg/m^3)	爆薬量 (g)	離隔距離 (mm)
1	ハニカム複合パネル	AL材	37	29.5	32
2	ハニカム複合パネル	UD材	37	29.5	32
3	ハニカム複合パネル	CL材	37	29.5	32
4	ハニカム複合パネル	AL材	72	29.5	32
5	ハニカム複合パネル	UD材	72	29.5	32
6	ハニカム複合パネル	CL材	72	29.5	32
7	RC版	無し	無し	50	20
8	ハニカム複合パネル+RC版	AL材	72	50	20
9	ハニカム複合パネル+RC版	UD材	72	50	20
10	ハニカム複合パネル+RC版	CL材	72	50	20
11	RC版	無し	無し	50	40
12	ハニカム複合パネル+RC版	AL材	72	50	40
13	ハニカム複合パネル+RC版	UD材	72	50	40
14	ハニカム複合パネル+RC版	CL材	72	50	40

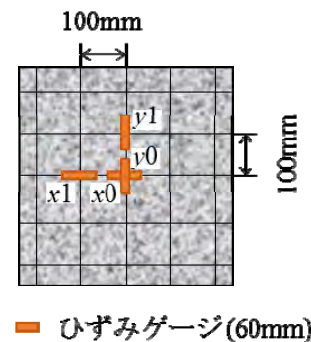
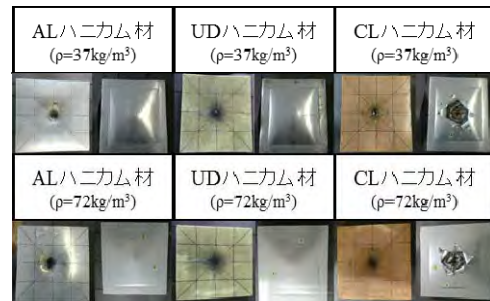
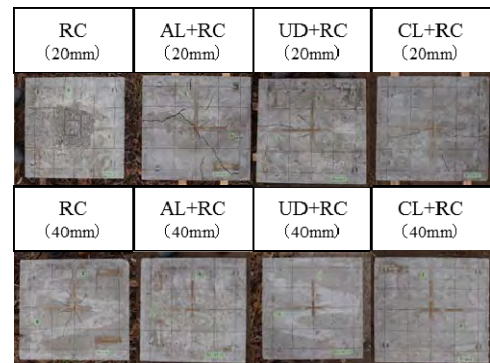


図-3 ひずみゲージ貼付け位置



(a) ハニカム複合パネル



(b) RC 版裏面の破壊 () 内は離隔距離

図-4 ハニカム複合パネルおよび RC 版の破壊

ている。これは、ハニカム複合パネルに貫通孔が生じていないケースと対応しており、ハニカム複合パネルの設置により RC 版に入射する荷重が分散したことや RC 版の変形が高次モードから 1 次モードの全体変形へと変化したことなどが考えられる。

以上より、AL 材、UD 材をハニカムコアの上面に用いることにより、RC 版の爆発による局部破壊を低減する効果が得られることがわかる。

3. 鋼板の変形に対する緩衝効果

3.1 実験の概要

ハニカム複合パネルの緩衝効果を調べるため、ハニカム複合パネルを鋼板上に設置して爆発実験を行った。図-6 に、ハニカム複合パネルと鋼板の寸法を示す。ハニカムコアと上部シートからなるハニカム複合パネルの寸法は、縦 400mm、横 400mm、厚さ 35mm であり、上部シートには、アルミニウムパネル (AL)、ガラス繊維強化プラスチック (GFRP)、アラミド繊維強化プラスチック (AFRP)、ポリビニルアルコール繊維強化プラスチック (VFRP) を用いた。鋼板の寸法については、縦 500mm、横 500mm および厚さ 4.5mm である。試験体の衝撃応答を調べるために、図に示すように、鋼板の裏面にゲージ長 5mm のひずみゲージを貼付してひずみ応答を計測した。ハニカムコアの上面には、爆風圧を受けるための上部シートが設置されている。表-3 にハニカム複合パネルを設置しない場合及び各上部パネルの実験ケースを示す。また、図-7 に、試験体の設置状況を示す。爆薬については、密度 1.4g/cm³ の球形 C4 爆薬 110g を用いた。C4 爆薬をそれぞれの試験体の中央に離隔距離 103mm を設けて設置し、6 号電気雷管により起爆した。

爆薬中心から試験体上面までの距離をスタンドオフとし、スタンドオフ R(m) と爆薬量 W(kg) より換算距離 $Z = \frac{R}{\sqrt{W}}$ を求めることが出来る。ホプキンソン・クラントの相似則から、同一種類で相似形の爆薬であれば換算距離が等しい爆薬は最大反射圧も等しく観測され、本実験ケースにおける最大反射圧は 74.9MPa と推定される。

3.2 実験結果及び考察

図-8 に、ハニカム複合パネルの変形の様子を示す。全ての実験ケースにおいて、上部シートは中央部が大きく変形し凹みが生じている。AL、AFRP の上部シートは凹みの範囲が小さいが、GFRP および VFRP は広い範囲で深く変形した。また、変形の深さは、GFRP が VFRP より小さい特徴を示した。これらのことから、GFRP および VFRP が最も爆発荷重を分散していると言える。また、AL では下面に変形が認められないが、それ以外のシートでは中央部に試験体下面がへこみ、中央から少し離れた所では膨らんでいた。すなわち AL が最も爆発荷重を緩衝していると言える。

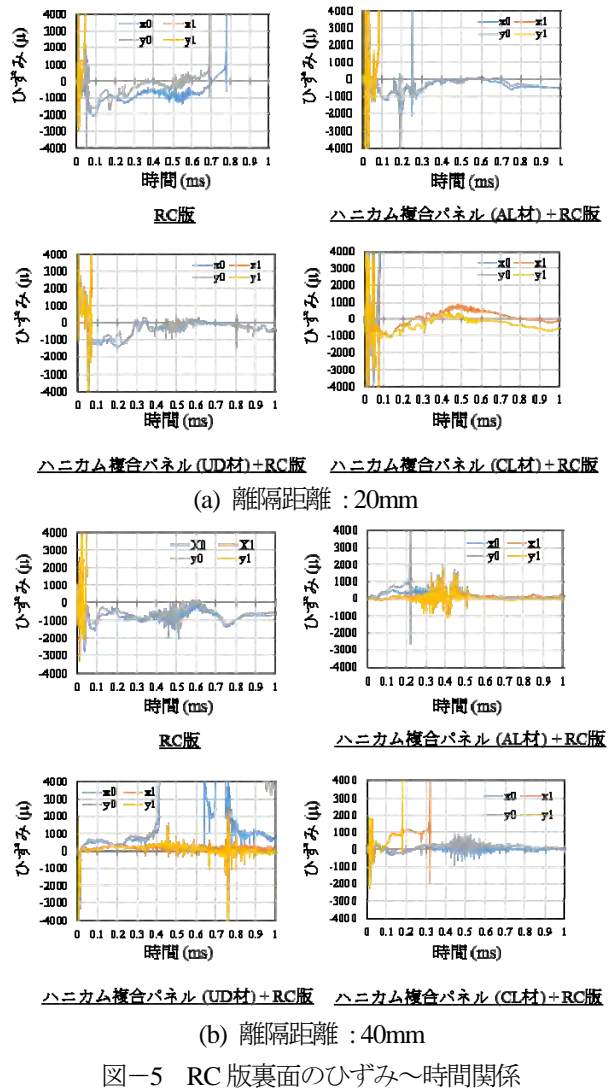


図-5 RC 版裏面のひずみ～時間関係

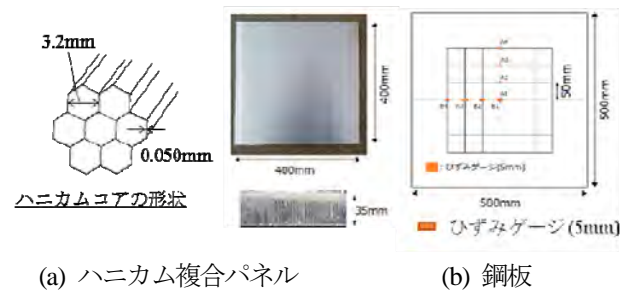


図-6 試験体の寸法

表-3 実験ケース

番号	上部シート	組織 (繊維重量)	コア密度 (kg/m ³)	爆薬量 (g)	離隔距離 (mm)	換算距離 (m/kg ^{1/3})
1	無し	無し	無し	110	93	0.19
2	AL材 (t5.0mm)	無し	130	110	92.8	0.19
3	GFRP (CL t5.4mm)	平織 (209g/m ²)	130	110	93.5	0.2
4	AFRP (CL t5.0mm)	平織 (229g/m ²)	130	110	93.3	0.19
5	VFRP (CL t5.0mm)	平織 (188g/m ²)	130	110	91.8	0.19

図-9 に、鋼板の裏面におけるひずみ～時間関係を示す。また、爆発後確認された最も大きいひずみを最大ひずみとし、その後、変形がある程度収束したひずみ波形の最大値を残留ひずみとした。ハニカム複合パネルを設置しなかった鋼板においては、1ms 程度の間に圧縮と引張りを繰り返し、その後 5ms 以内には残留ひずみが発生している。ハニカム複合パネルを設置した場合は、全てのケースにおいて引張りひずみのみが発生しており、またハニカム複合パネルを設置しなかったケースに比べて最大ひずみが生じる時刻が遅くなった。最大ひずみをみると、ハニカム複合パネルを設置しなかったケースの40%のひずみが発生している。また、図-10 に各実験ケースの最大ひずみ及び残留ひずみを示す。ハニカム複合パネルを設置しない場合の最大ひずみおよび残留ひずみはそれぞれ 21000 μ と 3440 μ であった。一方で、AL の最大ひずみおよび残留ひずみは、それぞれ 3660 μ と 880 μ であり、全てのケースで最も小さくなった。GFRP、AFRP および VFRP の最大ひずみと残留ひずみはほぼ同等であり、それぞれ 5300 μ および 1000 μ であった。

以上から、各ハニカム複合パネルによる緩衝効果はひずみを指標とすると 25~55%ほど小さくなることがわかる。また、ハニカム複合パネルの上部パネルとして用い、爆発荷重を分散させるのに適しているのは、AL であったと考える。

4. 結言

本研究は、近接爆発を受けるハニカム複合パネルの耐爆緩衝効果について検討を行ったものである。その結果、RC 版の局部破壊に対する緩衝効果としてはハニカム複合パネルの上部シート AL および UD 材が効果的な緩衝性能を発揮した。ハニカム複合パネルを設置した RC 版は、離隔距離 40mm の場合にはハニカム複合パネルの緩衝効果により、変形モードが全体変形へと変化する傾向が認められた。鋼板の変形に対する緩衝効果としては、AL および GFRP は鋼板の最大ひずみ、残留ひずみがともに小さいが、AL は GFRP より変形の範囲が小さく、AL を上部シートとして使用した場合に、ハニカム複合パネルが裏面に伝える荷重の大きさとその作用範囲が小さくなることがわかった。AFRP はシートの変形自体は小さいが、鋼板のひずみは他のハニカム複合パネルを設置したケースに比べ大きい。VFRP は鋼板の最大ひずみは今回の実験で最も小さいが残留ひずみは最も大きいという特徴を示した。最大ひずみは VFRP が最も小さいが、残留ひずみは GFRP が最も小さいことがわかった。

参考文献

- 1) 別府万寿博, 大野友則, 大久保一徳, 佐藤和幸: 接触・近接爆発に対する繊維シート補強コンクリート板の耐爆性能, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.700-716, 2010.

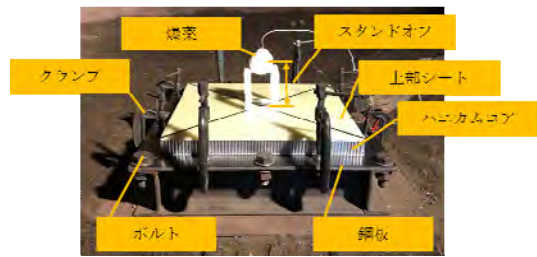


図-7 試験体の設置状況

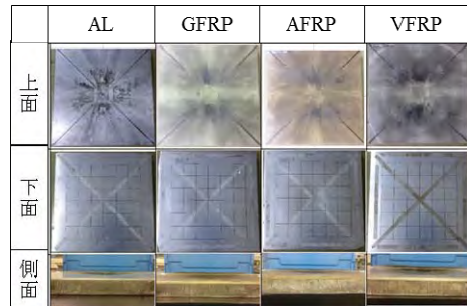


図-8 ハニカム複合パネルの変形の様子

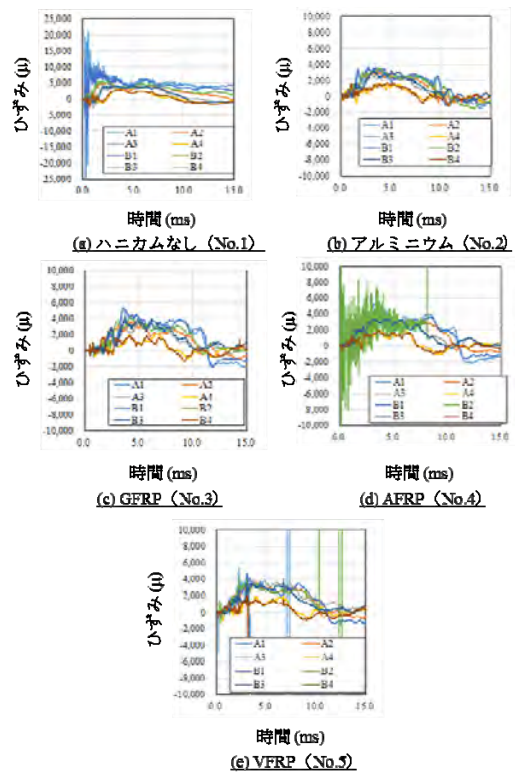


図-9 鋼板のひずみ～時間関係

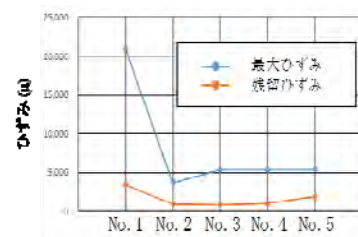


図-10 鋼板の最大ひずみおよび残留ひずみ