

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82723

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18927

研究課題名（和文）爆破テロに対する超薄型・軽量緩衝システムの開発と耐爆構造設計への適用

研究課題名（英文）Development of an ultra-thin and -light mitigation system against terrorist bombings and its application to blast-resistant design of structures

研究代表者

別府 万寿博（Beppu, Masuhiro）

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・教授

研究者番号：90532797

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、爆破テロのように構造物に対して比較的近い位置で爆発する現象（近接爆発）を対象として、超薄型かつ軽量の緩衝材の開発および構造物の耐爆設計法を提案したものである。爆発荷重の緩衝材としてアルミハニカムパネルに着目し、Composition C-4爆薬を用いた近接実験を行った。実験では、アルミハニカムパネルの有無が鋼板の変形に及ぼす影響を調べた。実験の結果、アルミハニカムパネルは極めて高い緩衝効果を有することがわかった。近接爆発荷重に対する緩衝効果を考慮可能な耐爆設計法について検討を行った。緩衝効果を考慮した爆発荷重を算定し、構造物を1質点系モデルでモデル化する方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、爆破テロのように構造物に対して比較的近い位置で爆発する現象（近接爆発）を対象として、超薄型かつ軽量の緩衝材の開発および構造物の耐爆設計法を提案したものである。これまでに、近接爆発を対象とした構造物の設計法に関する検討や緩衝材の開発は非常に限られており、本研究成果は近年世界的に増加傾向にある爆破テロに対する主要構造物の耐爆設計法の基礎を構築した点において学術的および社会的に高い意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study proposed an ultra-thin and -light blast mitigation panel and a blast resistant design of structures against the close-in explosion in which an explosion occur at relatively close distance to a structure. An aluminum honeycomb panel was selected as a mitigation system, and a series of close-in explosion tests were conducted by using Composition C-4 high explosive. In the explosive tests, the effects of the aluminum honeycomb on the response of a steel plates behind the aluminum honeycomb panel was investigated. The test results revealed that the aluminum honeycomb panel exhibited high blast mitigation effects. A single degree of freedom model considering the mitigation effect was proposed.

研究分野：構造工学

キーワード：爆破テロ 近接爆発 耐爆設計 緩衝材 アルミハニカム

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2001年の米国同時多発テロ事件以降、不特定多数の人が出入りするソフトターゲットに対するテロ事件が世界中で頻発している。テロの手段は爆発物が最も多く、テロの半数以上を占めている。構造物に対する爆発作用は、2015年に公表されたISO2394第4版 **General principles on reliability for structures** でも代表的なハザードとして取り上げられていた。しかし、この中では構造物に対して比較的遠い位置で爆発が発生した場合（遠距離爆発）の荷重状態を対象としており、構造物には等分布荷重が作用することを仮定している。一方で、爆破テロのように構造物に近い位置で爆発する場合（近接爆発）は、局所的に極めて複雑な圧力状態となるため、爆風圧の評価は非常に困難であることが報告されている。また、爆発作用に対して構造物が全く損傷しないように設計すると、通常の外力（地震・風等）に対しては構造物の寸法や鉄筋量が不必要に過大となる問題も指摘されている。このため、衝撃外力を緩和する技術を開発することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究課題は、近接爆発実験を行って爆発荷重に対する超薄型・軽量の緩衝システムを開発する。また、緩衝効果を考慮した合理的な耐爆構造設計法を提案することを試みるものである。爆発荷重の緩衝材としてアルミハニカム複合パネル（ハニカムパネル）に着目し、**Composition C-4 (C-4)** 爆薬を用いた近接実験を行う。実験では、ハニカムパネルの有無が鋼板の変形に及ぼす影響を調べる。また、近接爆発荷重に対する緩衝効果を考慮可能な耐爆設計法について検討を行う。すなわち、緩衝効果を考慮した爆発荷重を算定し、構造物を1質点系モデルでモデル化する方法を提案する。

3. 研究の方法

(1) 近接爆発荷重に対する緩衝システムとして、図1に示すようなハニカムパネルを作製した。ハニカムパネルは上部シート、ハニカムコアおよび下部シートで構成されている。下部シートはパネルを作製するための補助部材であり、緩衝効果に関するパラメータは上部シートの種類およびハニカムコアのサイズや箔厚とした。ハニカムパネルの緩衝効果を調べるため、図1(a)に示す板厚4.5mmのSS400鋼板上にハニカムパネルを設置した。さらに、ハニカムパネルの中央部上方にC-4爆薬を設置して近接爆発実験を行った（図2）。C-4爆薬は球形に成形し、質量は110gである。C-4爆薬とSS400鋼板あるいはハニカムパネルの離隔距離は51mm~206mmとした。電気雷管をC-4爆薬に挿入し、C-4爆薬の中心部で起爆を行った。緩衝効果を確認するために、SS400鋼板のたわみおよびひずみを計測した。

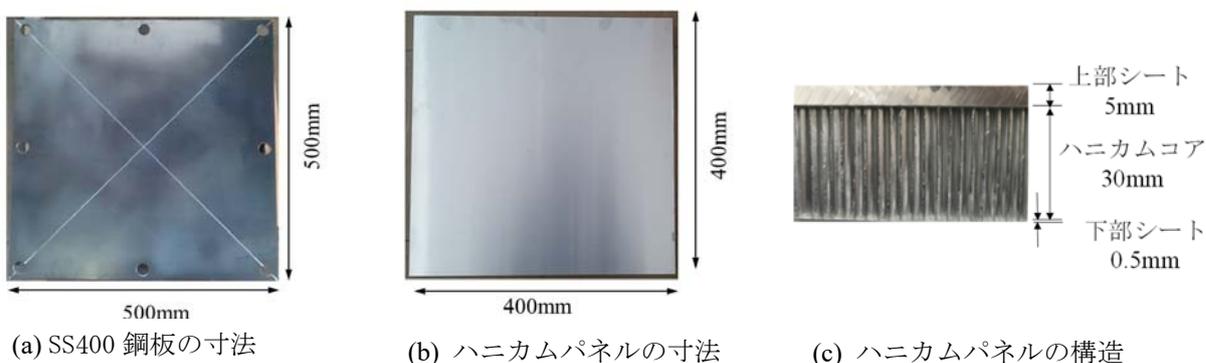


図1 ハニカム複合パネルの寸法

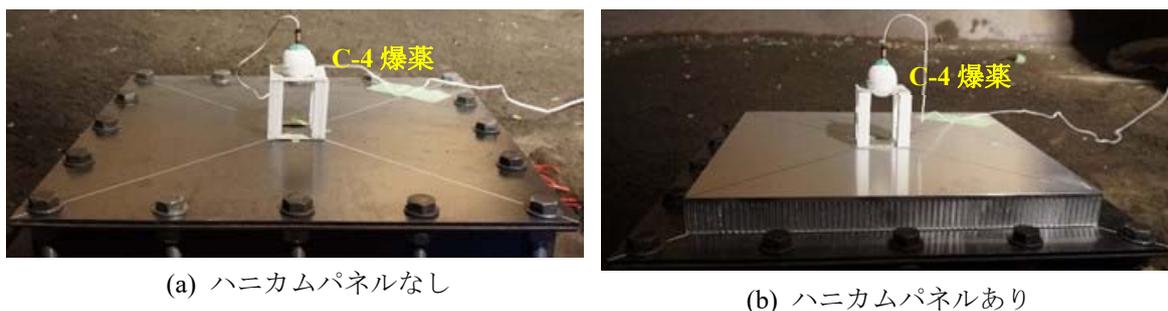


図2 近接爆発実験の外観

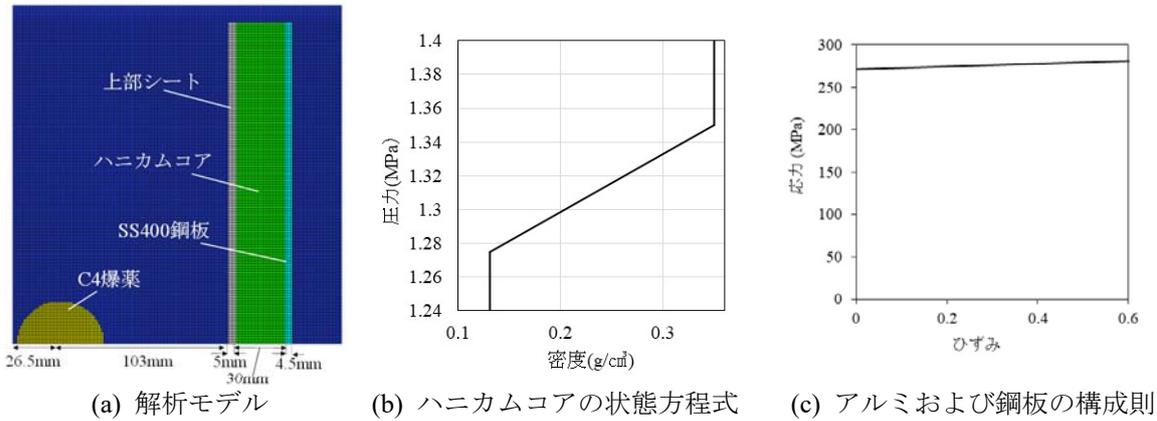


図3 数値シミュレーションの概要

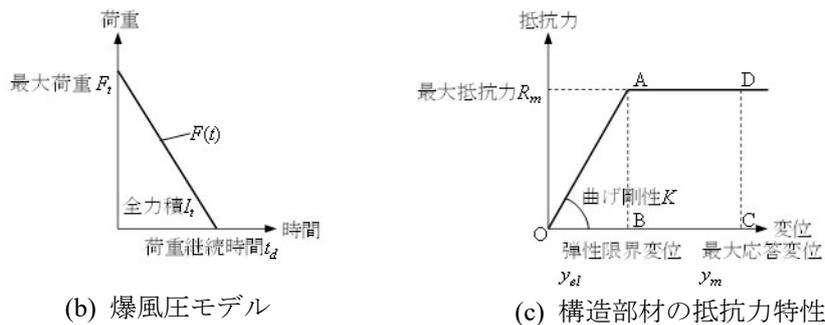
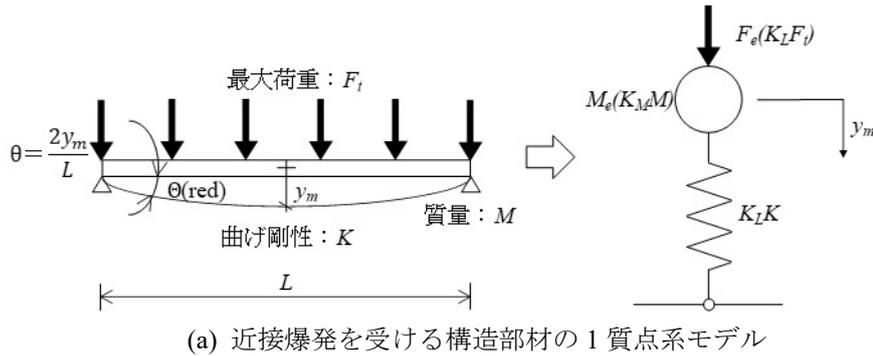


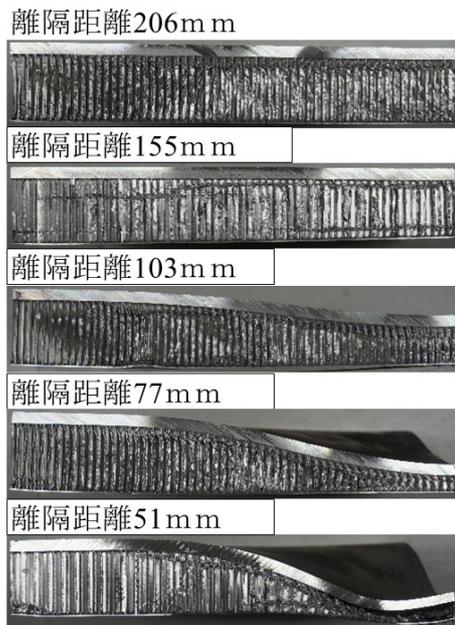
図4 構造応答の簡易評価モデル

(2) 近接爆発荷重を受ける構造部材の衝撃応答を評価するために、実験の数値シミュレーションおよび1質点系モデルによるSS400鋼板の変位応答評価法の提案を行った。数値シミュレーションでは、図3(a)に示すような2次元軸対称系で実験をモデル化した。爆薬および空気はオイラー座標系でモデル化し、ハニカムパネルおよびSS400鋼板はラグランジュ座標系でモデル化を行った。境界条件として鋼板の端部節点の変位を固定し、C-4爆薬の中心部で起爆させた。材料モデルについては、C-4爆薬および空気にはそれぞれJWLおよび理想気体の状態方程式を適用した。ハニカムコアについては、ハニカムコアの一軸圧縮試験による荷重～座屈変形関係を再現できるように、図3(b)、(c)に示す状態方程式と構成則を設定した。アルミニウムのおよびSS400鋼板については、Johnson-Cookの構成則を適用し、ひずみ速度効果を考慮した。

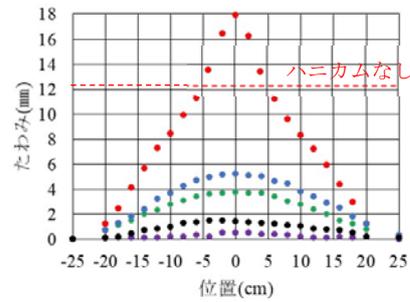
近接爆発を受ける構造部材の応答評価および緩衝効果の評価法について、図4に示すような1質点系モデルを提案した。図4(a)に示すように、構造部材を1質点系にモデル化する。ただし、近接爆発では等分布荷重ではなく非均一な荷重分布となるため、非均一荷重分布に対応する1質点系モデルの荷重質量係数を誘導した。1質点系モデルに入力する爆風圧については、ハニカムパネルがない場合には、図4(b)に示す三角形パルス荷重を入力した。ハニカムパネルがある場合には、ハニカムの座屈荷重を入力した。構造部材の抵抗力については、図4(c)に示すようにバイリニアの抵抗力特性を設定した。

4. 研究成果

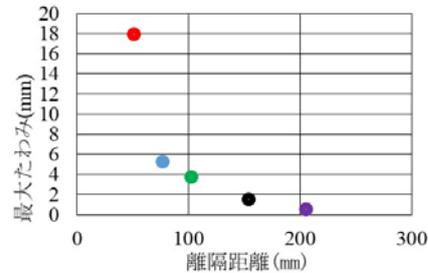
(1) 上部シートの材料について、FRPとアルミニウムを比較した実験を行ったところ、アルミニウムを用いた上部シートの耐衝撃性が最も高いことがわかった。以降では、アルミニウムの上部シートと既存のハニカムの中で座屈強度が比較的高いハニカムコアを用いたハニカムパネル



(a) ハニカムの座屈状況



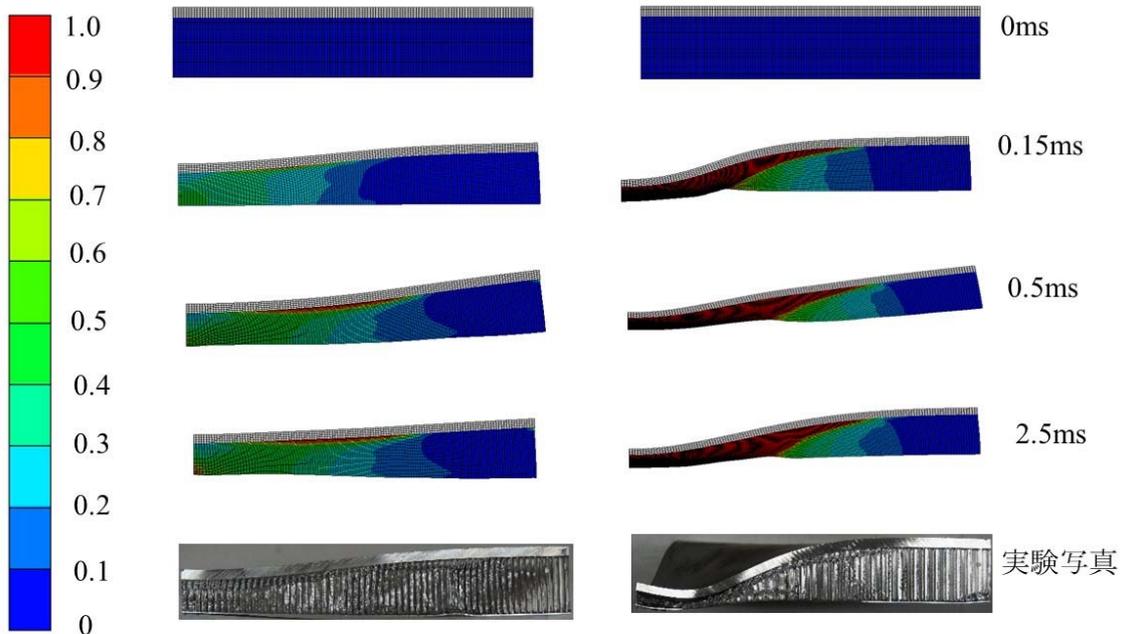
(b) SS400 鋼板のたわみ分布



(c) SS400 鋼板の最大たわみ～離隔距離関係

図 5 実験結果

相当塑性ひずみ



(a) 離隔距離 103mm

(b) 離隔距離 51mm

図 6 数値シミュレーション結果 (相当塑性ひずみ分布)

の緩衝効果について説明する。近接爆発実験で得られたハニカムパネルの座屈状況を図 5(a)に示す。実験では質量 110g の C-4 爆薬の離隔距離を 51mm～206mm に変化させている。図から、離隔距離が 51mm と小さい場合には、ハニカムコアが潰れて、上部シートと下部シートが接触するような破壊を示した。離隔距離を徐々に大きくすると、ハニカムコアの座屈領域や上部シートの変形領域が小さくなり、離隔距離 206mm では上部シートの変形は非常に小さくなった。図 5(b)および(c)は、それぞれ SS400 鋼板のたわみ分布および最大たわみ～離隔距離関係を示している。なお、ハニカムがない場合の SS400 鋼板の最大たわみは約 12mm である。図から、離隔距離 51mm のようにハニカムコアが過大に圧壊する場合には緩衝効果が消失し、ハニカムパネルがない場合よりも SS400 鋼板のたわみが大きくなることがわかる。離隔距離が大きくなると最大たわみは小さくなり、離隔距離 206mm のケースでは最大たわみが飛躍的に小さくなることがわかった。

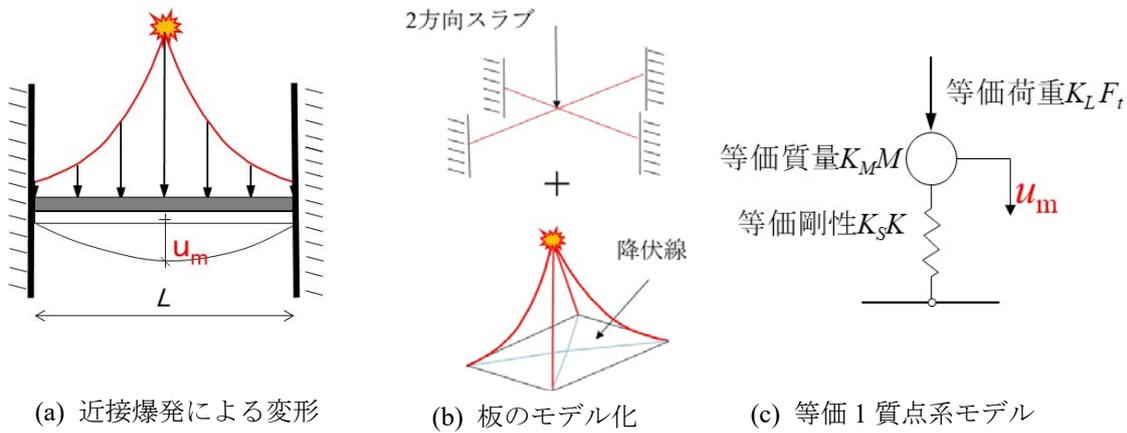


図7 近接爆発を受ける構造部材の等価1質点系モデル

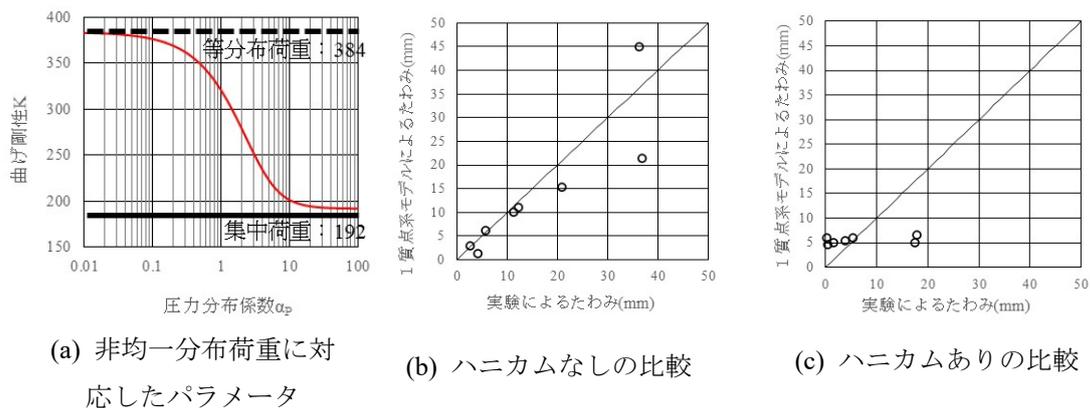


図8 等価1質点系モデルによるたわみの比較

(2) 図6に数値シミュレーションで得られたハニカムパネルの変形状況および相当塑性ひずみ分布を示す。なお、図の結果は、離隔距離が103mmおよび51mmのケースである。いずれも、ハニカムパネルの変形は実験をおおむね再現した。図から、離隔距離が小さい場合には、ハニカムパネルの中央部に爆風圧が集中するため、上部シートが急激に変形し、その下部のSS400鋼板も中央部から変形を開始して、変形が端部へ伝播している。離隔距離が103mmへと大きくなると、爆風圧が作用する領域が広がるとともに高い相当塑性ひずみ領域が低減される。本解析は2次元軸対称モデルであるが、近接爆発荷重を受けるハニカムパネルやSS400鋼板の変形についてはおおむね再現できた。解析の結果から、近接爆発荷重の空間的分布や大きさによって、緩衝効果が変わることがわかった。

(3) 近接爆発荷重を受ける構造部材の応答に関する簡易評価モデルについては、図7に示すように、直交する二つのはりを用いて板状の構造部材をモデル化した。塑性応答については、板の対角線に降伏線が生じるものとしてモデル化を行った。また、近接爆発による非均一な荷重分布を考慮することにより、図8(a)に示すようなパラメータを誘導した。これらの1質点系モデルによって得られたSS400鋼板中心部のたわみと実験結果の比較を図8(b)および(c)に示す。図から、ハニカムがない場合の応答については、ある程度再現することができた。ハニカムがある場合のたわみについては、提案した評価法ではハニカムの全面積が座屈したものと仮定したため評価値は実験値よりも大きくなる傾向を示すが、ハニカムコアが完全に圧壊したケースを除けば全体的に保守的な評価となった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 別府万寿博, 相澤武揚, 市野宏嘉	4. 巻 66A
2. 論文標題 近接爆発を受けるアルミニウム複合パネルの緩衝効果に関する実験的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 1036 ~ 1046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 相澤武揚, 別府万寿博, 市野宏嘉
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第12回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三浦賢卓, 瀧田匠李, 別府万寿博, 市野宏嘉, 相澤武揚
2. 発表標題 ハニカム複合パネルの耐爆緩衝効果に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 第47回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 相澤武揚, 別府万寿博, 市野宏嘉
2. 発表標題 近接爆発を受けるハニカム複合パネルの緩衝効果に関する研究
3. 学会等名 2019年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺澤拓真, 瀧田匠季, 別府万寿博, 市野宏嘉, 相澤武揚
2. 発表標題 八二カム複合構造の耐爆緩衝効果に関する研究
3. 学会等名 第46回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 相澤武揚, 別府万寿博, 市野宏嘉
2. 発表標題 近接爆発を受ける八二カム複合構造の緩衝性能に関する実験的研究
3. 学会等名 平成30年度衝撃波シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	甲賀 誠 (Kohga Makoto) (30545976)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・応用科学群・教授 (82723)	
研究分担者	市野 宏嘉 (Ichino Hiroyoshi) (70760982)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・准教授 (82723)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------