

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04962

研究課題名(和文) 爆破テロによる爆発災害に対する橋梁部材の耐爆補強法の開発

研究課題名(英文) Development of blast resistant reinforcement of bridge members in an explosive disaster caused by a terrorist bombing

研究代表者

市野 宏嘉 (Ichino, Hiroyoshi)

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

研究者番号：70760982

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、橋梁の主要な材料であるコンクリートと鋼について、接触・近接爆発による部材の局所的な破壊について実験的に調べ、その補強の方法について検討した。コンクリートに対しては、既存構造物への適用が可能な樹脂吹付による補強法を採用した。爆発実験の結果から、想定外力となる爆薬量に対し、爆発の反対側への破片の飛散防止を防ぎ得るコンクリート部材厚と樹脂補強厚を評価する方法を提示した。鋼材に対しては、接触・近接爆発による鋼材の損傷の特徴を調べるとともに、鋼材を被覆することによって損傷が顕著に低減される効果を確認し、今後の耐爆補強法の確立に向けての資を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は二つある。一つはコンクリートに対する樹脂吹付による耐爆補強の効果が定量的に示されたことであり、今後、接触・近接爆発による作用を考慮したコンクリート部材に対して樹脂吹付による補強設計を行う際の指標が提案されたことである。もう一つは接触・近接爆発を受ける鋼材の破壊の過程が実験的に検討され、破壊のメカニズムに応じた補強方法の確立に向けての足掛かりが築かれたことである。本研究の社会的意義は、爆破テロによる橋梁等の構造物の破壊への対策の一案について提示できたことである。

研究成果の概要(英文)：In this study, the local failure of concrete and steel members, which are the main materials of bridges, owing to contact and close-in explosion and their reinforcement methods were experimentally investigated. From the test results, the formula was proposed to evaluate the thickness of concrete and reinforcement resin required to prevent fragments from scattering when the members were subjected to contact and close-in explosion. For steel members, macroscopic and microscopic characteristics of fracture surfaces, the breakage of the flat steel specimens under contact and close-in explosion was examined. Coating the steel specimens significantly reduced the local damage, and that could be used as a reference for establishing blast resistant reinforcement methods.

研究分野：衝撃工学

キーワード：爆破テロ 接触爆発 近接爆発 鋼 コンクリート ポリウレア樹脂

1. 研究開始当初の背景

今日、橋梁に代表される交通・運輸の基盤をなす構造物が爆破テロや爆発事故などの爆発災害に遭い、人命の喪失、交通網の寸断などの重大な被害が生じている。わが国では、2019年のG20大阪サミット首脳会議、2020年の東京オリンピック競技大会などの大規模な国際的行事を控え、橋梁に対する爆破テロを想定した訓練も警視庁により行われている。このような背景から、交通量が多い橋梁などの重要な構造物には、爆発災害への対策が必要との機運が高まっている。

爆発荷重は通常的设计荷重と比較して極めて大きい。爆破テロを想定した場合、橋梁部材に爆薬が接触、あるいはごく近接した状態で爆発(接触・近接爆発)するため、局所化された極めて大きな爆発荷重が部材のごく限定された部分に作用する点が、橋梁に対する通常的设计で考慮される地震荷重などによる作用と異なる。すなわち、爆破テロによる爆発に対しては部材単位で対策を施す必要がある。構造物の耐爆設計に際しては、構造物の自重の増大を抑制する等の理由から、部材の断面の増大を伴わない補強法によることが有利である。ただし、橋梁部材が局所化された爆発荷重を受けた際の破壊挙動は、部材の材料、種類、初期応力、爆薬量、爆発の位置等によって複雑に変化することが予想されるが、その詳細は明らかではなく、橋梁部材の有効な耐爆補強法は考案されていない現状にある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、橋梁部材が接触・近接爆発を受けた際の橋梁部材の破壊性状およびそれに影響を及ぼす要因を調べ、橋梁部材の耐爆補強法を提案することである。

3. 研究の方法

橋梁の主要な材料である鋼およびコンクリートの模擬部材に対して、爆薬を接触あるいは近接させた状態で爆発させ、その際に生じる局所的な破壊の性状を把握した。また、模擬部材に樹脂の塗布など補強を施した場合についても同様に破壊の性状を把握した。これらの結果から、爆発による部材の破断、あるいは破片の飛散を防ぎ得る部材の断面、補強材料の量を評価した。

(1) 鋼においては、接触・近接爆発に対する破壊性状に関する知見が極めて限定されていることから、当初は補強を施さない試験体に対する爆発実験を行い、損傷状態の巨視的・微視的観察によって試験体の破壊性状と破壊に至る過程を調べた。その結果を踏まえて、同様の試験体に対して補強材料を添付するなどの処置を施して爆発実験を行い、補強の効果に関する検討を行った。

(2) コンクリートにおいては、既往の研究で接触・近接爆発に対する局所的な破壊の性状とその機構について報告がなされていることから、本研究では補強法の効果の検証とその評価を主として検討を行った。当初から補強を行った部材に対する爆発実験を行い、補強の効果とその限界について調べるとともに、補強の効果を評価した。補強の方法は、既設構造物にも適用可能な、樹脂吹付による方法とし、樹脂の種類はポリウレアを選択し、力学的特性が異なる2種類の樹脂を採用した。また、橋梁の基礎などに適用されることもあるプレパックド工法によるコンクリートに対して、接触爆発時に生じる局所的な破壊の状態について調べ、一般的な製法によるコンクリートとの比較も行った。

4. 研究成果

(1) 補強を施さない鋼材に対する接触爆発実験で得られた爆発後の鋼材の破面に対する巨視的・微視的観察、鋼材内部の状態の観察から、接触爆発時にはスポールによる脆性的な破壊に引き続き、せん断や引き裂きによる延・脆性的な破壊で鋼材が破断に至ったことが明らかとなった。また、爆薬の設置方法がこのような損傷の状態に及ぼす影響は限定的であり、試験体の損傷、とりわけ破断が生じるか否かは鋼材の断面の形状、および爆薬量に依存することがわかった。以上より、接触爆発による鋼材の破断限界となる断面積、板厚および爆薬量の条件を評価した。このような鋼材の爆発による局所的な破壊の分析と評価は国内外を通じて類例に乏しい。これらの成果は、今後の鋼構造物に対する耐爆設計において部材の諸元の決定に資するとともに、部材の耐爆補強の方法を検討するにあたり重要な示唆を与えるものである。

(2) 鋼材を軽い多孔質の材料で被覆して同様の接触爆発実験を行ったところ、爆発による鋼材の局部損傷が顕著に低減された。一方で、コンクリートの耐爆補強で効果が認められている連続繊維シートの貼付は、接触爆発による局部損傷に対しては目立った効果は認められなかった。これは、補強材料の選定を進めるにあたっての基礎となる知見であり、今後の耐爆補強法の確立に向けての足掛かりとなる。

(3) ポリウレア樹脂を爆発面と反対側に塗布して補強を施した試験体に対する接触爆発実験を行った。その結果、ポリウレア樹脂の塗布により、無塗布の場合に貫通孔が生じる、あるいは裏面にコンクリートの破片が飛散するような板厚および爆薬量に対しても、樹脂塗膜が破断しなければ破片の飛散を防ぐことができた。本研究では、樹脂塗布コンクリート板は、樹脂の剥離ではなく、樹脂の破断により終局状態に至った。また、破片の飛散を防ぐ効果は、樹脂の力学的特

性にも強く依存することがわかった。以上の結果から、補強の効果をより向上させるには、塗膜を厚くするか、あるいは樹脂の引張に対する力学的特性を改善することが有効であることが示唆された。

(4) 接触爆発を受けるポリウレア樹脂塗布コンクリートにおいて、樹脂が破断しないために必要なポリウレア樹脂の厚さを評価した。爆発作用に対して、樹脂塗布によってコンクリート部材を補強することは、局部破壊による破片の飛散を防止することへの有効性が国内外で認められてはいるが、その効果の定量的な評価には至っていなかった。この成果は、今後のコンクリート構造物に対する耐爆補強の設計における、ポリウレア樹脂補強厚の決定に役立つものである。また、この方法は、適切な補正を施すことにより、ポリウレア樹脂以外の樹脂にも適用できる可能性がある。

(5) 近接爆発を受けるポリウレア樹脂塗布コンクリートにおいても、実験を行って樹脂による破片の飛散を防ぐ効果を確認するとともに、樹脂が破断しないために必要なポリウレア樹脂の厚さを評価した。

(6) プレパックド工法によるコンクリートに対する接触爆発実験を行った。その結果、一般的なコンクリートと比較して、試験体の断面と爆薬量が同一の条件下で爆発面側の破壊の深さはほぼ同等、爆発面の反対側の破壊の深さは一般的なコンクリートよりも10%程度大きくなる結果を得た。プレパックド工法によるコンクリートのスポールの発生限界は一般的なコンクリートとほぼ同等であった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Ichino Hiroyoshi, Kayamori Yoichi, Beppu Masuhiro, Williamson Eric B, Yoshii Ken-ichi | 4. 巻 175 |
| 2. 論文標題 Fracture characteristics and damage prediction in flat steel beams under contact explosions | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 International Journal of Impact Engineering | 6. 最初と最後の頁 104540 ~ 104540 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijimpeng.2023.104540 | 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 該当する |
| 1. 著者名 山内稔也, 市野宏嘉, 別府万寿博, 福井秀平 | 4. 巻 Vol.44, No.2 |
| 2. 論文標題 ポリウレタ樹脂により裏面補強したコンクリート板に対する接触爆発実験 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集 | 6. 最初と最後の頁 895-900 |
| 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 - |
| 1. 著者名 市野宏嘉, 別府万寿博, 萱森陽一, 吉井健一 | 4. 巻 67A |
| 2. 論文標題 接触爆発による鋼材の損傷性状と損傷評価法に関する基礎的研究 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 構造工学論文集 | 6. 最初と最後の頁 878-889 |
| 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 オープンアクセスとしている(また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Ichino Hiroyoshi, Beppu Masuhiro, Williamson Eric B. | 4. 巻 259 |
| 2. 論文標題 Blast-resistant performance of a two-stage concrete plate subjected to contact explosions | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Construction and Building Materials | 6. 最初と最後の頁 119766 ~ 119766 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2020.119766 | 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 該当する |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 山内稔也, 山口翔大, 市野宏嘉, 別府万寿博, 福井秀平 |
| 2. 発表標題 近接爆発を受けるポリウレア樹脂塗布コンクリート板の損傷に及ぼす塗膜厚の影響 |
| 3. 学会等名 第50回土木学会関東支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山口翔大, 山内稔也, 市野宏嘉, 別府万寿博, 福井秀平 |
| 2. 発表標題 離隔距離が異なる近接爆発によるポリウレア樹脂塗布コンクリート板の損傷 |
| 3. 学会等名 第50回土木学会関東支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 飯田和満, 山内稔也, 市野宏嘉, 別府万寿博, 福井秀平 |
| 2. 発表標題 厚さが異なるポリウレア樹脂を用いた裏面補強コンクリート板の接触爆発実験 |
| 3. 学会等名 第49回土木学会関東支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山内稔也, 市野宏嘉, 別府万寿博, 福井秀平 |
| 2. 発表標題 接着状態が異なるポリウレア樹脂で裏面を補強したコンクリート板の接触爆発実験 |
| 3. 学会等名 第49回土木学会関東支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 アビシット・イェンサイ, 山内稔也, 市野宏嘉, 別府万寿博, 福井秀平 |
| 2. 発表標題 異なる種類のポリウレア樹脂を用いた裏面補強コンクリート板の接触爆発実験 |
| 3. 学会等名 第49回土木学会関東支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山内稔也, 市野宏嘉, 別府万寿博, 福井秀平 |
| 2. 発表標題 ポリウレア樹脂による裏面補強を施したコンクリート板の接触爆発実験 |
| 3. 学会等名 第13回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 ベン・ダラボポール, 市野宏嘉, 別府万寿博 |
| 2. 発表標題 爆発による構造用鋼材の局部損傷の評価と損傷低減法の提案 |
| 3. 学会等名 第48回土木学会関東支部技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 森山 源太、市野 宏嘉、別府 万寿博 |
| 2. 発表標題 接触爆発による鋼材の損傷に関する基礎的検討 |
| 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 |

〔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 | 藤掛 一典 (Fujikake Kazunori) (10532799) | 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 (82723) | |
| 研究分担者 | 山口 信 (Yamaguchi Makoto) (80570746) | 熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授 (17401) | |
| 研究分担者 | 別府 万寿博 (Beppu Masuhiro) (90532797) | 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 (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 |
|---------|---------|
|---------|---------|