

物体衝突に対する構造物の埋込効果の影響に関する実験的研究

An Experimental Study on the Effect of Embedded Structures on Object Impacts

太田良巳*, 二階堂雄司**, 澤田祥平***, 相馬一貴**, 野澤貴**, 山田和彦****
Ohta Yoshimi, Nikaido Yuji, Sawada Syohei, Soma Kazuki, Nozawa Takashi, Yamada Kazuhiko

*博 (工), 原子力規制庁技術基盤グループ (〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9)

** 修 (工), 鹿島建設株式会社原子力部 (〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)

*** Ph.D, 鹿島建設株式会社原子力部 (〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)

**** 博 (工), 山口大学大学院教授, 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

キーワード: 衝突実験, 柔飛翔体, 埋込地盤, 伝播, 衝撃荷重

Keywords: Impact test, Soft missile, Buried ground, Propagation, Impact load

1. はじめに

近年, 火山噴石の衝突や竜巻に伴う飛来物の衝突など様々な衝突物による被害が報告されている。また, 平成 27 年 12 月に内閣府 (防災担当) から「活火山における退避壕等の充実に向けた手引き」¹⁾が公開されるなど, 衝突に係る問題の重要性が高まっている。原子力分野では, 古くからタービンミサイルや航空機衝突など多くの衝突問題が議論されてきた。日本では, 原子力規制委員会が平成 25 年 6 月に制定した「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」²⁾等において, 物体衝突に対する原子力施設への影響評価の考え方が示されるなど, 原子力施設への衝突影響評価を要求しており, 一般土木構造物と同様に, 構造物に対する衝突問題の重要性は高まっている。

物体の衝突による構造物の局部損傷評価については, その破壊様式 (貫入量, 裏面剥離, 貫通) に応じて数多くの評価式³⁾が提案されている。一方, 物体の衝突に伴い構造物内を伝播する衝撃波に関する研究はほとんど見られないのが現状である。筆者らは, これまで高速衝突を受ける構造物の衝撃挙動について実験的研究を実施し, 剛基礎上に設置した構造物への衝突実験より, 構造物内の応力波伝播について検討してきた⁴⁻¹⁰⁾。一方, 原子力施設の多くは地盤への埋込を有する複雑な設置状況にあり, 地盤への埋込が構造物内の応力波伝播に与える影響を検討する必要があると考えられる。そこで, 本研究^{11),12)}では, これらの知見を得ることを目的に, 埋込条件を変化させた模型構造物に対する物体の衝突実験を実施し, 模型構造物及び地盤内の加速度応答等を計測した。その計測結果から衝突に伴い模型構造物及び地

盤に発生する応力波の伝播状況を確認するとともに埋込の影響について考察した。当該実験は, 原子力規制庁から鹿島建設株式会社に委託して実施した。

2. 衝突実験の概要

2.1 模型構造物及び埋込地盤

衝突を受ける模型構造物の概要を図-1 に示す。模型構造物は, 平面 1.0m×1.0m, 高さ 1.0m, 質量約 1.0t の鉄筋コンクリート製である。模型構造物は平面の半分だけを床とする中間階を有する 3 階建構造であり, 部材厚さは基礎で 0.1m, 壁で 0.08m, 床で 0.04m である。埋込地盤は, 平面 3.0m×3.0m, 高さ 2.3m の鋼製型枠に地盤材料として 6 号珪砂を転圧敷設し施工した。埋込地盤の密度は約 1.6t/m³, 中間床の 1 次固振動波数は設計値で約 240Hz である。

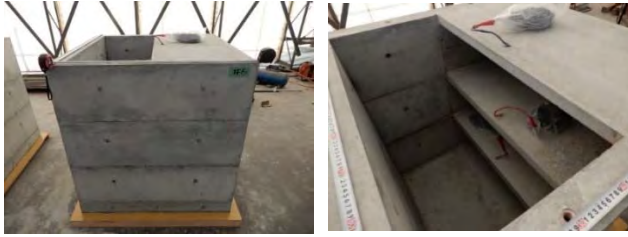
2.2 柔飛翔体

図-2 に柔飛翔体の概念図を示す。柔飛翔体は, 直径 0.12m, 質量 3.12kg とした。柔飛翔体はアルミパイプの先端に円柱型の低反発ウレタンを取り付ける構造としており, 低反発ウレタンが変形することにより衝撃荷重の作用時間を伸ばしている。柔飛翔体の衝突で模型構造物が損傷しない設計とした。

2.3 実験方法

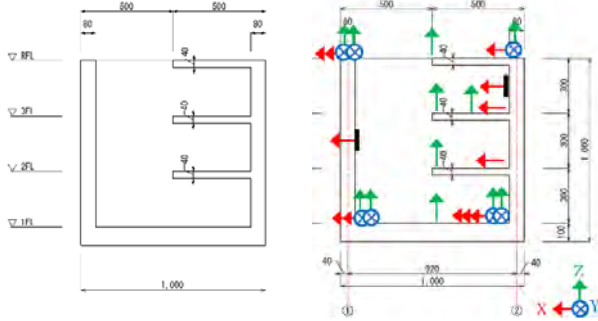
柔飛翔体を所定の高さ (約 10m) からワイヤーロープに沿って自走で滑走させることで, 重力によって柔飛翔体が加速し, 模型構造物に衝突する機構とした。衝突実験の概念図を図-3 に示す。飛翔体衝突実験の前後に,

飛翔体衝突位置を打撃点としたハンマーテストを実施した。



a) 外観

b) 内観



c) 概略断面図

d) 計測点位置

図-1 模型構造物の概要 (単位: mm)

2.4 実験ケース及び計測

表-1 に実験ケース及び衝突速度を図-4 に各実験ケースの埋込状況の概念図をそれぞれ示す。TEST-A は模型構造物を珪砂地盤上に設置し埋込がないケース、TEST-B は模型構造物の1階部分(高さ1/3)だけ珪砂地盤の土槽に埋込んだケース、TEST-C は模型構造物の2階部分(高さ2/3)までを土槽に埋め込んだケースとした。これらの設置条件に対して柔飛翔体を約10mの高さから衝突させた。衝突位置は、模型構造物の3階外壁中央とした。高速度カメラでの記録から評価した衝突速度を表-1 にあわせて示す。本実験は屋外で実施した実験であり、風等の外乱影響を受けたことにより衝突速度は11.3~11.9m/sであった。表-2 に計測項目の一覧を示す。本研究は地盤への埋込状況が構造物の応力波伝播に与える影響について知見を得ることを目的としており、模型構造物の各床及び外壁に加速度計を設置した。さらに、埋込地盤内にも加速度計を設置した。また、柔飛翔体に加速度計を設置し、その加速度応答に柔飛翔体の質量を乗じて衝突荷重時刻歴を算出した。柔飛翔体の衝突に伴う損傷状況等は高速度カメラで記録した。図-5及び図-6にTEST-Bの地盤内加速度計及び土圧計の配置状況を示す。模型構造物の加速度計設置位置は図-1(d)に示す。



図-2 柔飛翔体の概念図

表-1 各ケースの衝突速度

	埋込タイプ	衝突速度 (実測: m/s)
TEST-A	埋込なし	11.9
TEST-B	1/3埋込	11.4
TEST-C	2/3埋込	11.3

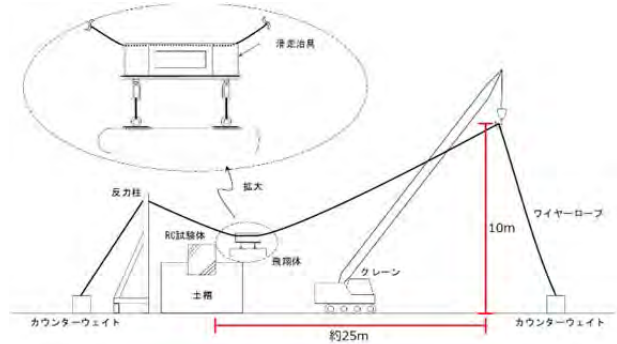


図-3 衝突実験の概念図

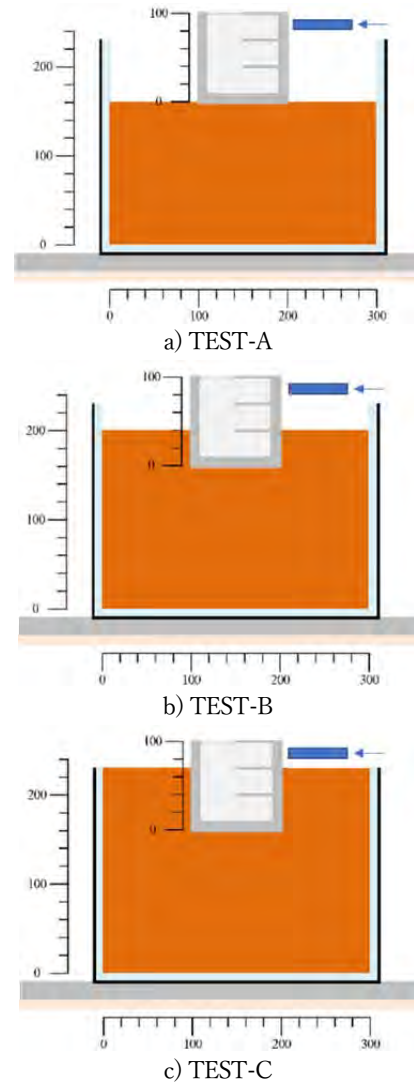


図-4 各実験ケースの概念図 (単位: cm)

表-2 計測項目

対象	計測項目
模型構造物	外壁、床の加速度
	外壁の鉄筋ひずみ
埋込地盤	模型構造物周辺土圧
模型飛翔体	衝突速度
	加速度

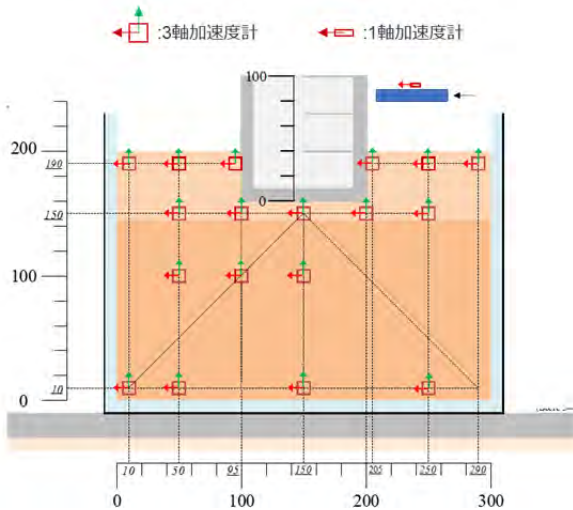


図-5 TEST-Bにおける埋込地盤内加速度配置
(単位: cm)

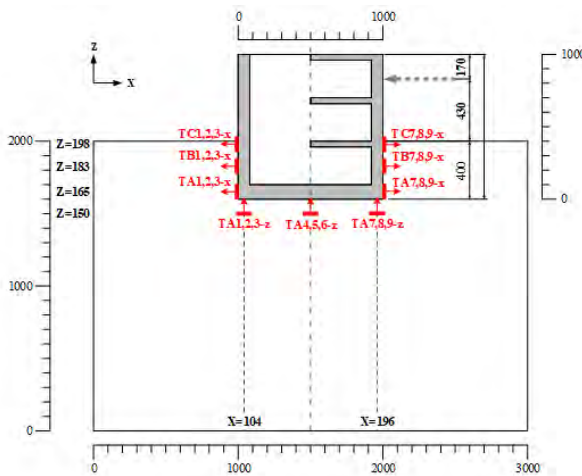


図-6 TEST-Bにおける土圧計配置
(単位: mm)

3. 実験結果及び考察

本章では、飛翔体の加速度、模型構造物及び地盤内の加速度、模型構造物のひずみ、側面及び底面の土圧を計測し、埋込効果による模型構造物内を伝播する応力波への影響について考察した。本章で示す各計測点の位置を図-7に示す。

3.1 ハンマー試験による振動特性評価

飛翔体衝突実験の前後に、飛翔体衝突位置を打撃点としたハンマーテストを実施した。図-8にハンマー試験に基づく3階壁に対する模型構造物頂部の伝達関数を示す。模型構造物の地盤埋込状況が無い場合、1/3(1階)埋込、2/3(2階)埋込の場合、それぞれの水平方向の地盤-構造物系の1次固有振動数は23Hz、32Hz、38Hz付近であり、埋込条件に応じた変化が顕れている。

3.2 衝撃荷重時刻歴の評価

実験においては、柔飛翔体の高速度カメラ撮影による衝突姿勢の確認及び衝突速度の算出を実施した。衝突時の柔飛翔体の挙動の一例として、TEST-Aにおける柔飛翔体の衝突の瞬間の状況を図-9に示す。

模型構造物に与えられる衝撃荷重については、柔飛翔体に加速度計を設置し、衝突中に得られた加速度応答に対してノイズ部を除去した後、飛翔体の質量を乗じることで算出した。評価された衝撃荷重時刻歴を図-10に示す。柔飛翔体の先端の衝突で荷重が立ち上がり、ウレタン部が押し込まれることによりなだらかな荷重曲線を描いている。落下高さはほぼ一律であるものの、屋外試験における風等の影響によって衝突速度に多少のばらつきを有していることから、最大荷重値に差異がみられる。

3.3 鉄筋ひずみの計測

図-11に、各実験での衝突裏面壁の鉄筋ひずみの計測結果を示す。TEST-Aの計測結果は、TEST-B及びTEST-Cより比較的大きくなっているものの、最大でも 11×10^6 程度であり全体としてごく小さい値であった。

3.4 土圧の計測

土圧の計測の例として、構造物底面において、衝突面からみて後方側中央の土圧時刻歴を図-12に示す。土圧は、埋込が大きくなるに従って模型構造物の拘束が増し、小さくなる傾向が読み取れ、埋込状況の違いによる効果が確認できた。

3.5 地中加速度の計測

地中加速度の計測の例として、躯体構造物直下及び土槽底面に近い計測点での、鉛直方向の加速度計測結果を図-13に示す。躯体構造物直下ではTEST-Bと比較し、TEST-Cが小さいことから埋込が深いほど地中加速度応答は抑えられる傾向が見られた。一方でTEST-Aについては、埋込による固定がないため土圧の計測結果と同様に、ロッキングの様な方振れの応答となった。但し、土槽底部では実験ケースに顕著な違いは確認できなかった。

3.6 加速度の計測

構造物の加速度の計測の例として、図-14 に3階床計測点での床面外方向の加速度計測結果を示す。図-14 に示す衝突位置に近い本計測点においては、最大加速度応答レベルに関して埋込の条件による大きな差異は確認出来なかった。

図-15 に示す衝突位置に正対する壁の2階中央部の加速度応答スペクトルを示す。当該位置は、TEST-C では地盤内になるためその影響が若干見られた。

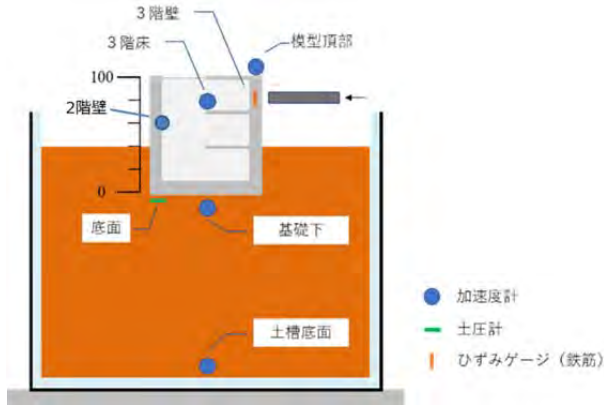
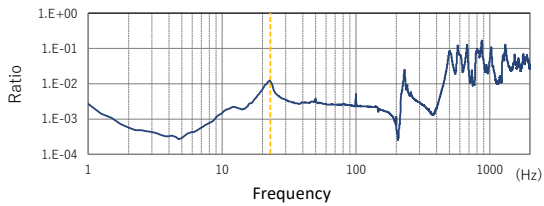
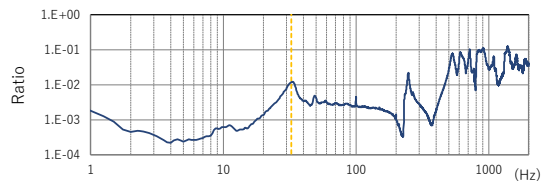


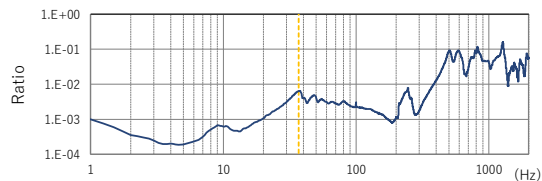
図-7 計測点位置 (単位: cm)



(TEST-A : 埋込なし 1次ピーク 23Hz)



(TEST-B : 1/3 埋込 1次ピーク 32Hz)



(TEST-C : 2/3 埋込 1次ピーク 38Hz)

図-8 ハンマー試験, 衝突方向伝達関数 (模型頂部/3F 壁打撃信号)

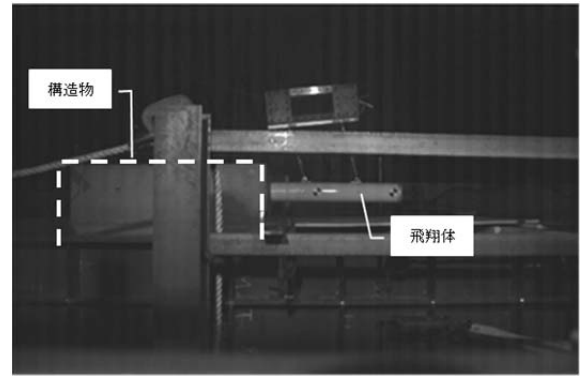


図-9 衝突時の高速度カメラ記録

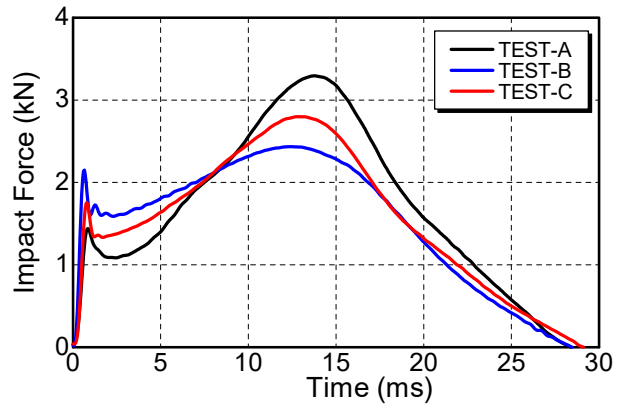


図-10 衝撃荷重時刻歴

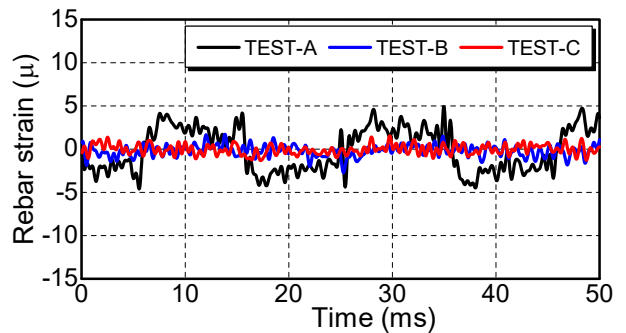


図-11 衝突裏面鉄筋ひずみ

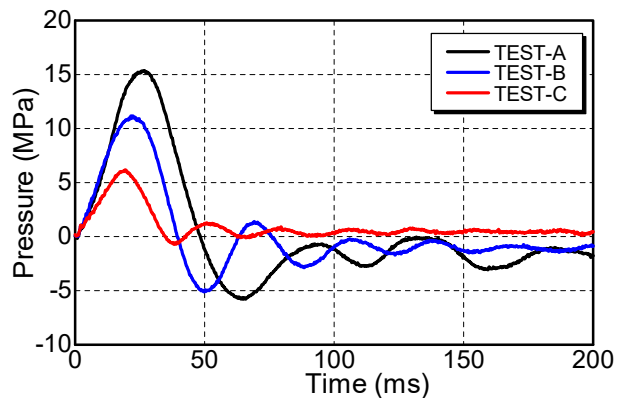


図-12 底面土圧

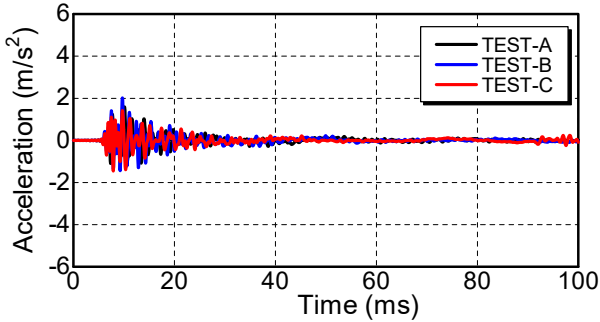
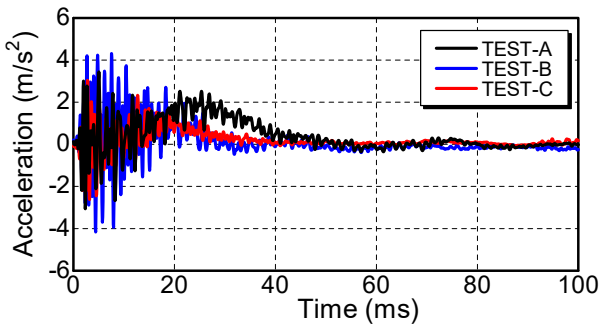


図-13 地中鉛直応答加速度 (上: 基礎下, 下: 土槽底面)

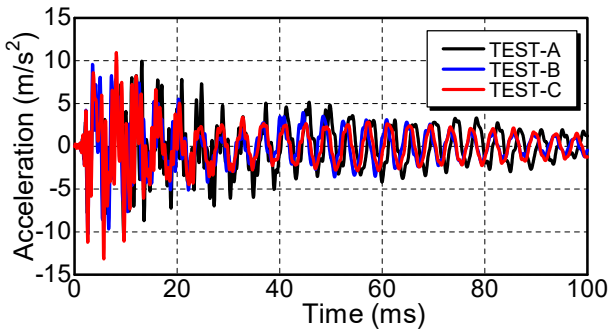


図-14 構造物の鉛直応答加速度 (3階床)

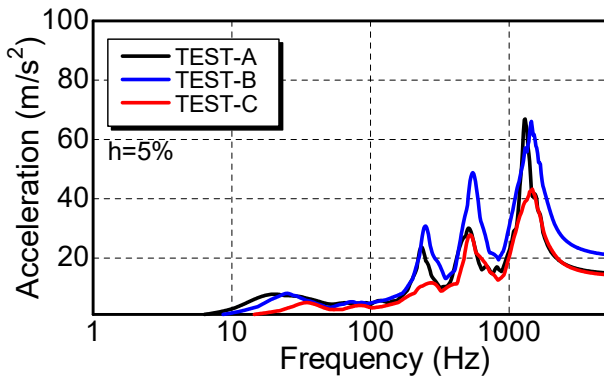


図-15 構造物の加速度応答スペクトル (2階壁)

4. まとめ

埋込条件を変えた模型構造物の3階壁面中央への飛翔体衝突実験 TEST A~C の結果について報告した。構造物の埋込条件が衝撃振動伝播に与える影響の分析に資するデータを得ることができた。

底面土圧や、地中加速度について埋込条件に応じた違いがみられたものの、建屋の衝突を受ける近傍では、埋

込条件による床面外応答加速度への影響は小さかった。今後は埋込条件に応じた振動の収束等の観点から引き続き詳細な分析を行う。

参考文献

- 1) 内閣府 (防災担当) : 活火山における退避壕等の充実に向けた手引き, 2015.
- 2) 原子力規制委員会 : 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド, 2013.
- 3) Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M., Telford, A. R. : Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets, International Journal of Impact Engineering, Vol.12, No.32, pp. 224-284, 2005.
- 4) 太田良巳他: 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究(その1: 全体計画概要), 日本建築学会 2018 年度大会 (東北), 学術講演梗概集, pp.229-230 (20115), 2018.
- 5) 山田和彦他: 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究(その2: 柔飛翔体の製作・試射), 日本建築学会 2018 年度大会 (東北), 学術講演梗概集, pp.231-232 (20116), 2018.
- 6) 二階堂雄司他: 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究(その3: ステンレス製模型柔飛翔体の衝突実験), 日本建築学会 2019 年度大会 (北陸), 学術講演梗概集, pp.251-252 (20126), 2019.
- 7) 太田良巳他: 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究(その4: 樹脂製模型柔飛翔体と剛飛翔体の衝突実験), 日本建築学会 2019 年度大会 (北陸), 学術講演梗概集, pp.253-254 (20127), 2019.
- 8) 山田和彦他: 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究(その5: 壁中央への衝突実験結果の比較), 日本建築学会 2019 年度大会 (北陸), 学術講演梗概集, pp.255-256 (20128), 2019.
- 9) 二階堂雄司他: 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究(その6: 床レベルへの衝突実験結果の概要), 日本建築学会 2020 年度大会 (関東), 学術講演梗概集, pp.337-338 (20169), 2020.
- 10) 太田良巳他: 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究(その7: 床レベルへの衝突実験結果の比較), 日本建築学会 2020 年度大会 (関東), 学術講演梗概集, pp.339-340 (20170), 2020.
- 11) 太田良巳他: 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究(その8: 埋込効果影響実験の概要), 日本建築学会 2021 年度大会 (東海), 学術講演梗概集, pp.351-352 (20176), 2021.
- 12) 二階堂雄司他: 飛翔体衝突による構造物内の衝撃波伝播に関する基礎的研究 (その9: 埋込効果影響実験結果の概要), 日本建築学会 2021 年度大会 (東海), 学術講演梗概集, pp.353-354 (20177), 2021.