

# 国際ベンチマーク解析プロジェクト IRIS3 フェーズ A に係る 鉄筋コンクリート構造物の衝撃評価に関する基礎的研究

A Study on Impact Assessment of Reinforced Concrete Structures Related to International Benchmark Analysis  
Project IRIS3 Phase A

太田 良巳\*・松澤 遼\*\*・鈴木 哲夫\*\*\*・吉田 匡佑\*\*  
Yoshimi Ohta, Ryo Matsuzawa, Tetsuo Suzuki, Kyosuke Yoshida

\*博 (工), 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ (〒106-8450 東京都港区六本木 1-9-9)  
\*\*伊藤忠テクノソリューションズ (株) 科学システム本部 (〒141-8522 東京都品川区大崎 1-2-2)  
\*\*\*博 (工), 元原子力規制庁長官官房技術基盤グループ

*Key Words: impact test, soft missile, numerical simulation, stress wave propagation, impact load*  
(衝突実験, 柔飛翔体, 数値シミュレーション, 応力波伝播, 衝撃荷重)

## 1. はじめに

原子力分野においては、古くからトルネードミサイルやタービンミサイル等の飛翔体衝突に係る施設の構造評価に関する研究が行われてきた<sup>例え 1)</sup>。衝突に伴うコンクリート版の局部破壊(貫入・貫通・裏面剥離)については、多くの衝突実験が実施され実験結果から経験的な評価式が導かれ、原子力施設の構造評価にはその評価式<sup>例え 2)</sup>を用いた簡易評価が行われてきた。近年では、計算機の処理能力の向上及びシミュレーション技術の継続的な改善により、衝撃解析ソフトを用いた大規模なシミュレーション解析に係る研究が数多く見られる<sup>例え 3)</sup>。OECD(Organization for Economic Cooperation and Development: 経済協力開発機構)/NEA(Nuclear Energy Agency: 原子力機関)は、シミュレーション解析が、飛翔体の衝突影響評価を実施するための有効な手段としての必要性を認識し、2010年に飛翔体の衝突に対する施設の安全性評価技術の向上を目的とした国際衝撃解析ベンチマークプロジェクト IRIS(Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles)を立ち上げた。プロジェクトは、飛翔体衝突に伴う鉄筋コンクリート版の局部破壊の再現解析に係るシミュレーション技術の向上を目的としている。プロジェクトでは、2010年に鉄筋コンクリート版への飛翔体衝突実験及び実験結果を各国の参加者に伏せた条件下で同実験のシミュレーション解析が実施された(IRIS2010)。次いで、2012年に実験結果が参加者に公表された条件下で同実験のシミュレーション解析を実施し、衝突問題のシミュレーション解析手法について各国の研究者による議論がなされた(IRIS2012)。実験結果及び各

国の解析結果はレポートとしてまとめられ、一般に公開<sup>4, 5)</sup>されている。

このように衝突に伴う構造物の損傷に関する研究は数多く報告されている。一方、衝突に伴う構造物の衝撃挙動に関する研究はほとんど見られないのが現状である。衝撃荷重が作用し構造物に誘発される応力波は、構造物内を伝播する可能性があり、応力波の伝播は構造物及び構造物内に設置される構成機器の設計または評価の際に考慮する必要がある。

OECD/NEA は、2016年に新たな衝撃解析ベンチマークプロジェクト IRIS3(Improving Robustness Assessment of Structures Impacted by a large missile at medium velocity)を立ち上げた。IRIS3 は、これまで実施された IRIS2010 及び IIS2012 から得た知見を拡張し、飛翔体の衝突を受けた壁の挙動及び衝突を受けた壁から構造物全体に伝播する応力波に焦点を当てている。IRIS3 では、これまでのプロジェクトと同様に、参加者<sup>例え 6, 7)</sup>は、IRIS3 フェーズ A として実験条件情報のみが提示され実施する解析(ブラインド解析)、その後、IRIS3 フェーズ B として実験結果の再現解析(キャリブレーション解析)を実施する。それぞれの解析結果に対してワークショップを開催し参加者で議論する。

原子力規制庁は、IRIS3 発足時からプロジェクトに参画している。原子力規制庁では、IRIS3 の課題に対して市販衝撃解析コードである ANSYS® AUTODYN®及び LS-DYNA®を用いて検討している。

本論文では、ANSYS® AUTODYN®を用いて実施した解析結果について示す。衝撃荷重を受けた鉄筋コンクリート構造物の数値解析評価と、3次元非線形有限要素解析から得られた結果をここで論じる。この解析結果は、衝撃荷重が作用した際の構造物の

全体挙動の解明を目的としたモデル化及び解析技術を改善し、構造振動に影響を与える主なパラメータを導くために検討した。

## 2. IRIS3 について

IRIS3 の解析課題については、IRIS3 組織委員会より参加者に対して情報提供<sup>8)</sup>される。IRIS3 で実験及び解析を実施する対象モデルの概念図を図-1 に示す。対象モデルは鉄筋コンクリート造 2.5m 幅で、飛翔体の衝突を受ける衝突壁は高さ 2.0m、背面壁は高さ 3.0m であり、前後の壁を天端板及び床板でつないだ中空ボックス構造となっている。飛翔体の衝突による衝撃力は床板と天端板を介して伝達され、背面壁の振動が励起される構造になっている。衝突壁・背面壁及び天端板は 0.15m、床板は 0.4m の板厚となっている。中空ボックスは、鋼製円筒管の上下に鋼製プレートを取り付けた支持脚 4 本で支持されており、支持脚下部の鋼製プレートは 4.5m のアンカーロッドにより岩盤に支持されている。背面壁には先端に約 61kg の質量を有する梁状の振動機器が 2 箇所設置されており、背面壁の運動を受け振動する。表-1 に各部位の諸元を示す。次に飛翔体モデルの例を図-2 に示す。飛翔体は直径 0.254m の鋼製パイプである。先端には球面状のキャップが設置されており、尾部には調整のための付加質量が設置されている。衝突実験は飛翔体を衝突壁の中央に 3 回衝突させる。1 回目及び 2 回目の衝突実験に用いる飛翔体は同じ形状であり、長さが 1.611m である。3 回目の飛翔体は長さが 2.511m である。飛翔体の諸元を表-2 に示す。

## 3. 解析モデルの概要

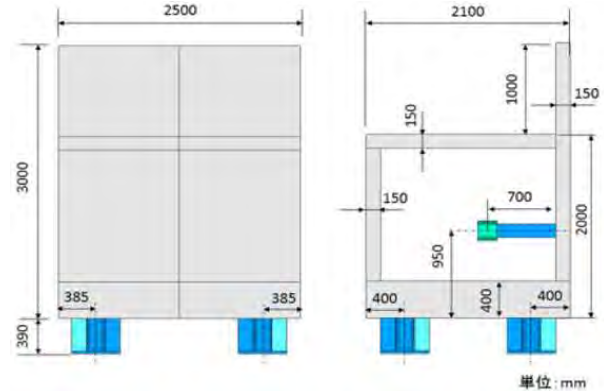
数値シミュレーションに用いた解析モデルについて示す。ANSYS<sup>®</sup> AUTODYN<sup>®</sup>を用いて三次元有限要素法解析を実施した。IRIS3 フェーズ A の様に、解析結果の解答となる実験結果が示されず、実験条件のみに基づき解析を実施する場合には、実験結果に大きな影響を与えると考えられるパラメータについて感度解析を実施して、その影響を確認した上で、解析モデル作成に反映しなければならない。本論文では、以降に示す検討を実施した。

### 3.1 要素サイズの検討

要素サイズは、鉄筋コンクリート壁(以下「RC 壁」)への衝突解析による感度解析を実施して決定した。本節では、要素サイズの解析結果への依存性について論じるため、壁厚 0.15m の RC 壁の中心に図-2 に示す飛翔体を速度 110m/s で衝突させる解析を実施した。感度解析として 3 つの要素サイズで検討した。図-3 に検討した RC 壁の解析モデル及びそれぞれのモデルの要素サイズを示す。検討 1-1 は壁厚方向を 10 分割する 1 要素サイズ 0.025m × 0.025m × 0.015m、検討 1-2 は壁厚方向に 20 分割する 1 要素サ

イズ 0.0125m × 0.0125m × 0.0075m、検討 1-3 は検討 1-2 の面内方向サイズを半分にした 1 要素サイズ 0.00625m × 0.00625m × 0.0075m とした。3 つの検討ケースにおける衝突に伴う RC 壁の裏面変形量を比較し、要素サイズを決定した。その際には、要素サイズ依存性だけでなく、解析時間にも着目した。コンクリートの材料モデルは CAPRAUS 構成則<sup>9)</sup>を用いた。材料強度は IRIS3 事務局から提供された圧縮強度 53.0MPa、引張強度 3.5MPa とした。RC 壁の固定条件は、壁の上端と下端を固定とした。

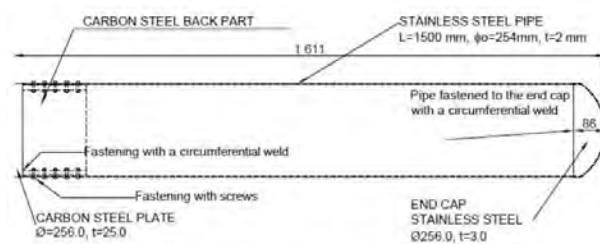
図-4 に衝突に伴う RC 壁裏面側中心の変位応答を示す。検討 1-1 の変位は検討 1-2 変位と比較すると約 1/3 であり、メッシュ依存性が顕著に表れた。検討 1-2 と検討 1-3 を比較した場合、最大変形量で数 mm の差異が生じた。ただし、100ms までの解析時間を比較すると検討 1-2 は 152.5 時間、検討 1-3 は 384.2 時間であり解析時間には大きな差異がみられた。図-1 に示す規模の実験モデルの解析を実施することから、解析モデルの 1 要素の寸法は検討 1-2 の 0.0125m × 0.0125m × 0.0075m とした。



a) 正面 b) 側面  
図-1 IRIS3 実験モデル概念図

表-1 IRIS3 実験モデルの諸元

部位	厚さ (m)	コンクリート	備考
衝突壁	0.15	圧縮強度 53.0MPa 引張強度 3.5MPa と設定	—
天端板	0.15		—
背面壁	0.15		● 振動機器が設置されている。 ● 床板と天端板に接続されている
床板	0.40		—



The missile as expected to be in tests 1 and 2  
図-2 飛翔体モデルの例 (全長 1.611m)<sup>8)</sup>

表-2 飛翔体諸元

衝突	直径(m)	長さ(m)	質量(kg)
1回目	0.254	1.611	50.1
2回目		1.611	50.1
3回目		2.511	50.3

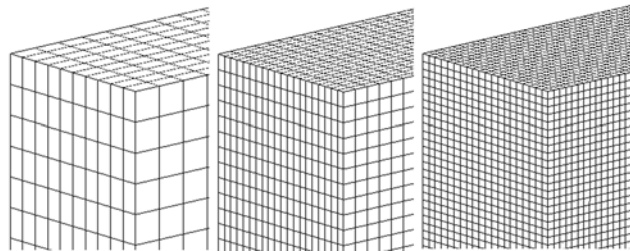


図-3 鉄筋コンクリート壁解析モデル(単位: m)

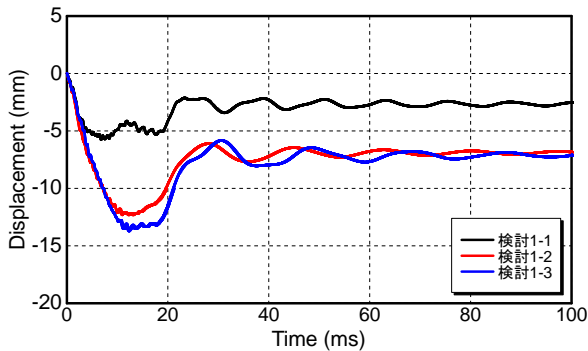


図-4 各メッシュサイズでの裏面変位応答の比較

### 3.2 基盤と支持脚間の境界条件の検討

中空ボックスは4つの鋼製支持脚により支持されている。さらに、鋼製支持脚は4.5mのアンカーロッドにより基盤(岩盤)に固定されている(図-5)。境界条件となる、アンカーロッドのモデル化について感度解析を実施し、床板の変位応答を確認した。解析は、図-1に示す全体モデルを用いて実施した。境界条件に係る解析ケースを表-3に示す。検討2-1は、4.5mのアンカーロッドをモデル化し、アンカーロッド先端は3方向固定、基盤内は水平方向固定とした。検討2-2は、アンカーロッドをモデル化せず鋼製支持脚を基盤に完全固着とした。検討2-3は、アンカーロッドを基盤内0.5mまでモデル化し、基盤内完全固定とした簡易モデルとした。図-6に各境界条件における床板中央部の鉛直変位応答を示す。検討2-1の境界条件ではアンカーロッドの伸びにより約2mmのバウンドするような鉛直変位が計算された。検討2-2の境界条件では完全固着のため上下方向・水平方向の変位応答が制限され、鉛直変位は小幅な応答となっている。一方、検討2-3の境界条件においては、検討2-1と検討2-2の中間に位置する応答が計算された。実験においては、衝突による中空ボックスの移動によりある程度のアンカーロッドの鉛直方向の伸びは想定されることから、解析モ

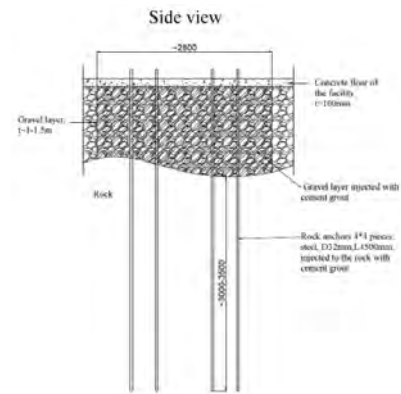


図-5 実験における支持脚の固定方法<sup>8)</sup>

表-3 基盤と支持脚間の境界条件に関する検討ケース

	検討2-1	検討2-2	検討2-3
アンカーロッドのモデル化	ビーム要素4.5mモデル化	なし	ビーム要素0.5mまでモデル化
基盤と支持脚底面の固定方法	アンカーロッド先端のみ3方向固定 基盤中は水平方向固定	完全固着	基盤内のみアンカーロッド3方向固定

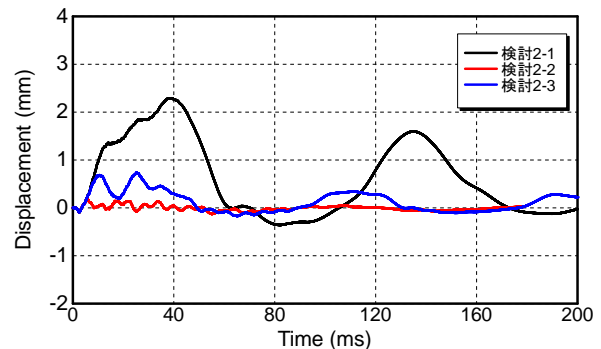


図-6 床板の鉛直変位応答の比較

デルの境界条件には検討2-3のモデルを採用した。

### 3.3 IRIS3 フェーズA解析における解析条件及び解析モデルの概要

数値シミュレーションは、IRIS3 実験モデル及び衝突する飛翔体をモデル化し衝突解析を実施する。

衝突実験では、同一試験体に対して飛翔体を3回衝突させる。衝突速度条件を表-4に示す。また、実際の試験においては衝突後に一定時間経過し試験体の運動が完全に停止した状態において、次の衝突実験を実施することから、本解析においては衝突後の静止状態を模擬するために、強制的なダンピング力による動的緩和解析を実施した。解析の手順を表-5に示す。なお、3回目の衝突後についてはこの操作を実施していない。各衝突解析は200msまで実施し、動的緩和解析は50ms間実施した。

解析モデルの作成には、3.1及び3.2の検討結果を反映した。実験モデルが左右対称であることから1/2モデルとして解析を実施した。図-7及び図-8に

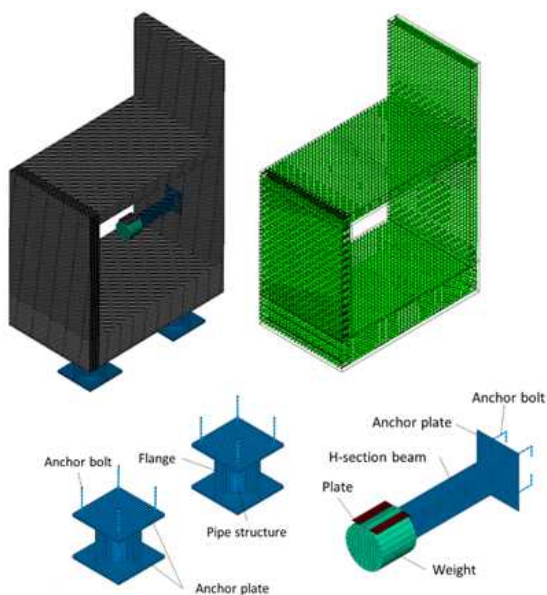
IRIS3 フェーズ A の解析モデル及び飛翔体モデルをそれぞれ示す。コンクリートはソリッド要素，鉄筋はビーム要素によりモデル化し，コンクリートと鉄筋は節点結合とした。鋼製支持脚はシェル要素とソリッド要素及びビーム要素によりモデル化を行なった。解析モデルは約 115 万要素，飛翔体モデルは全長 1611mm 飛翔体が約 4900 要素及び全長 2511mm 飛翔体が約 7300 要素で構成される。

表－4 衝突条件

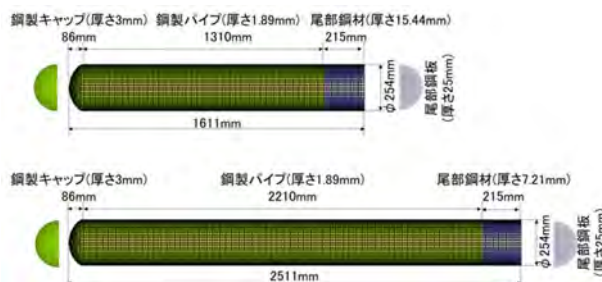
項目	値	
衝突速度	1 回目	90m/s
	2 回目	90m/s
	3 回目	170m/s
衝突位置	正面 RC 板中心	

表－5 衝突解析における手順

解析	時刻(ms)	手順
1 回目衝突	0 - 200	1 回目衝突解析実施 200ms 間計算
動的緩和 (ダンピング)	200 - 250	動的緩和解析の実施 強制的なダンピング力により衝突後の試験体の振動を収束させる ダンピング係数は部材の振動周期と時刻により算出され， 50ms 間計算
2 回目衝突	250 - 450	2 回目衝突解析実施 200ms 間計算
動的緩和 (ダンピング)	450 - 500	動的緩和解析を実施 手法は前述と同様
3 回目衝突	500 - 700	3 回目衝突解析実施 200ms 間計算



図－7 IRIS3 解析モデル



図－8 飛翔体解析モデル

(上図：1・2 回目衝突，下図：3 回目衝突)

#### 4. 解析結果

IRIS3 フェーズ A として実施したブラインド解析の結果を以下に示す。図－9 に変位応答の計算位置を示す。計算位置は，衝突箇所裏面変位 (D01)，背面壁天端の中央変位 (D07) 及び振動機器先端変位 (D10) である。なお，変位応答を図化する際には，各衝突の初期値をゼロとしている。

図－10 に飛翔体衝突による衝撃荷重及び飛翔体の損傷状況を示す。1 回目衝突と 2 回目衝突では，同じ衝突速度・飛翔体であることから，同程度の最大衝撃荷重が得られた。また，衝突による飛翔体の変形量も同程度で，全長 1611mm の飛翔体が 1 回目衝突では 766mm に，2 回目衝突では 790mm まで座屈変形した。得られた荷重曲線は，1 回目衝突により衝突壁が損傷を受けるため，2 回目衝突の荷重曲線は応答が若干鈍化した。一方，3 回目衝突においては，衝突速度が速くなるため大きな衝突荷重が計算された。また，飛翔体の全長が 1 回目及び 2 回目衝突より長いため，衝撃作用時間が長くなっている。3 回目衝突では，全長 2511mm の飛翔体が 616mm まで座屈変形した。

図－11 から図－13 に代表点における変位応答を示す。図－11 に衝突箇所裏面 (D01) における衝突方向の変位応答を示す。1 回目衝突において約 7mm の最大変位が，2 回目衝突において約 5mm の最大変位として計算された。1 回目衝突において衝突壁が損傷したため応答が鈍化したものと考えられる。3 回目衝突においては，衝突速度が速いことから衝突壁に作用する衝撃力が大きく，また飛翔体全長が長いことより衝撃作用時間が長くなり，衝突壁が大きく変位し約 28mm の最大変位が計算された。図－12 に背面壁中央 (D07) における衝突方向の変位応答を示す。1 回目及び 2 回目衝突では約 9mm の最大変位応答を示している。また，変位の周期については，1 回目衝突でモデルに損傷が生じることから，2 回目の変位周期はやや長周期化している。一方，3 回目衝突では大きな応答を示しており，最大変位として約 26mm の応答が計算された。図－13 に振動機器先端 (D10) における上下方向の変位応答を示す。飛翔体衝突による振動機器先端の応答は，1 回目衝突及び 2 回目衝突で約 3mm の最大変位となった。2 回目衝突では，1 回目衝突による損傷の影響で応答が若干

鈍化している。特に振動機器と背面壁の接合部に損傷が見られ、その影響が大きいと考えられる。3回目衝突では、約9mmの最大変位が計算された。

## 5. まとめ

本論文では、OECD/NEAのIRIS3プロジェクトにおいて、衝撃作用を受ける構造物の全体挙動の再現解析に係る解析技術の向上を目的として実施される

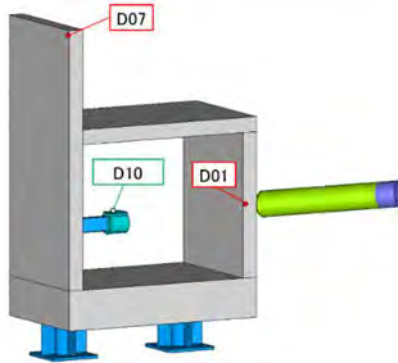


図-9 変位応答の計算位置

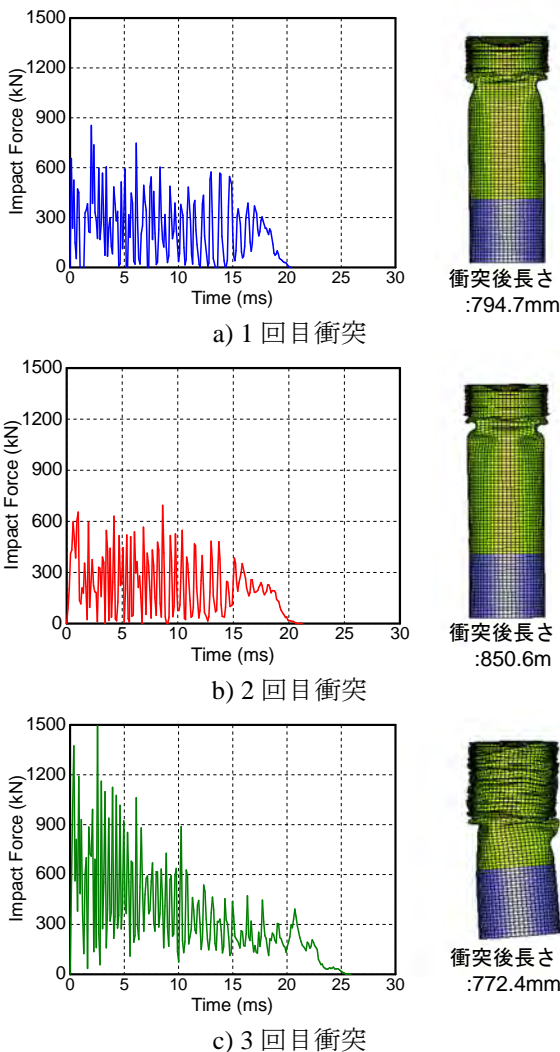


図-10 各衝突における荷重曲線及び飛翔体の損傷

衝突実験の事前解析を、ANSYS® AUTODYN®を用いて解析する際のモデル化方法に関して感度解析を通して検討した結果について論じた。

IRIS3 フェーズ A では、実験結果が示されていないことから、解析結果に大きな影響を与えると考えられる要素サイズ及び基盤と支持脚の境界条件について感度解析を実施して結果への影響について検討したうえで、フェーズ A における解析モデルを構築した。要素サイズについては、3つの要素サイズでモデル化した RC 壁への衝突解析を実施し、要素サイズの解析結果への依存性のない要素サイズを決定した。また、基盤と支持脚の境界条件については、3つのモデルによる感度解析から、床板の鉛直変位を想定して決定した。

今後は、IRIS3 フェーズ B として公開される実験結果を基に再現解析を実施し、本論文で検討した項目が妥当であったかを確認し衝撃挙動を再現する際の課題を解決していく。

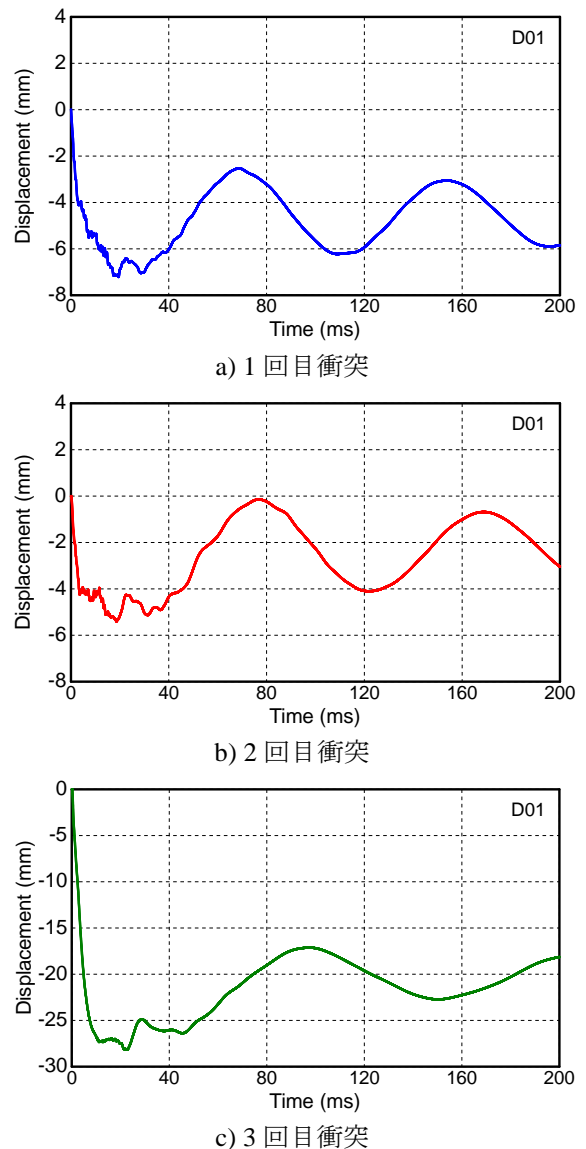
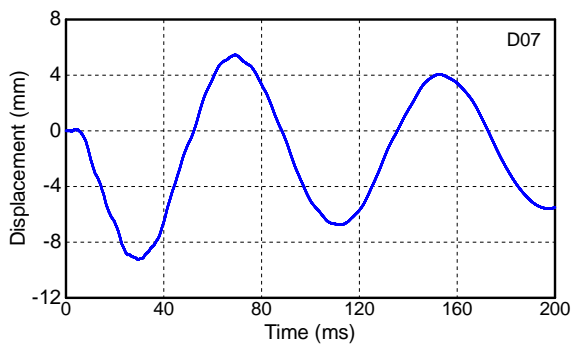
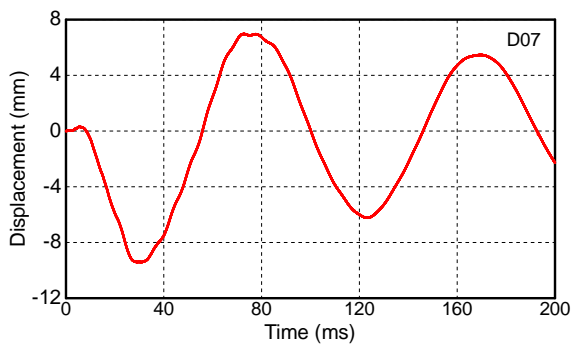


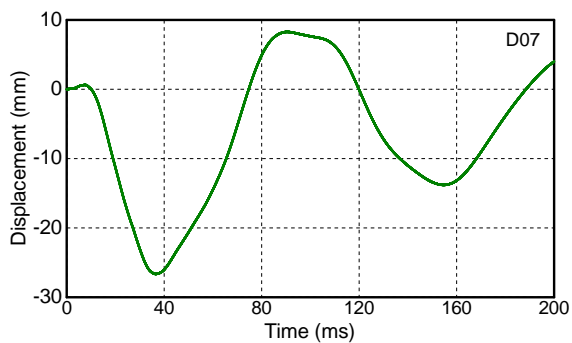
図-11 衝突箇所裏面側(D01)の衝突方向変位応答



a) 1回目衝突

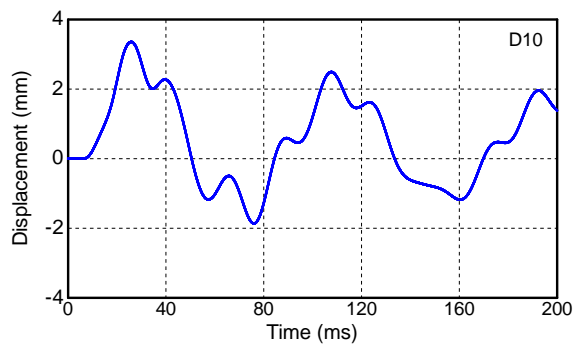


b) 2回目衝突



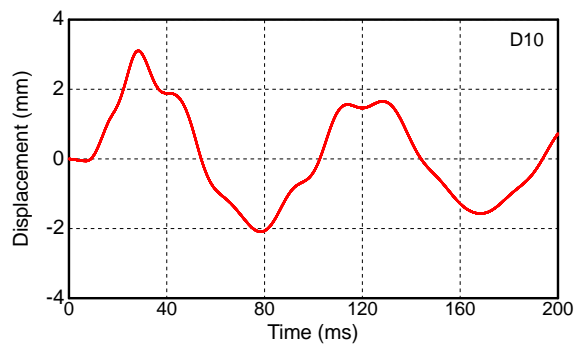
c) 3回目衝突

図-12 背面壁天端(D07)の衝突方向変位応答

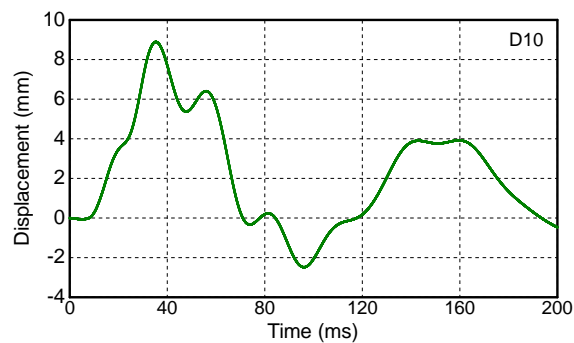


6)

a) 1回目衝突



b) 2回目衝突



c) 3回目衝突

図-13 振動機器先端(D10)の鉛直方向変位応答

### 参考文献

- 1) Kennedy R.P.: A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects, Nuclear Engineering and Design, No.37, pp.183-203, 1976.
- 2) Li, Q. M., Reid, S. R., Wen, H. M. and Telford, A. R. : Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets, International Journal of Impact Engineering, No.32, pp. 224-284, Dec. 2005.
- 3) Henkel, F. O. and Kostov, M.: Risk Protec CI "Risk Assessment and Development of Protection Capacity for Critical Infrastructures due to Aircraft Attack" Results of a European R&D-Project, SOFIA, 2014.
- 4) OECD/NEA/CSNI : Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles (IRIS\_2010) Final Report, JT03314597, 2012.
- 5) OECD/NEA/CSNI : Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles (IRIS\_2012) Final Report, JT03359989, 2014.
- 6) Ezeberry, J. et al.: Impact Assessment Methodology for Reinforced Concrete Structures – 3RD Phase of the OCDE-IRIS Benchmark, SMiRT24, Division V, Aug. 2017.
- 7) Borgerhoff, M. et al.: Induced Vibrations of a Reinforced Concrete Structure Tested in IRIS Phase3 Project Subjected to Impact by a Deformable Missile, SMiRT24, Division V, Aug. 2017.
- 8) OECD Nuclear Energy Agency (NEA) : "Improving Robustness Assessment of Structures Impacted by a large missile at medium velocity, IRIS phase 3", 2016
- 9) Itoh, M., Beppu, M. and Matsuzawa, R.: Numerical simulations of RC slabs subjected to impact loadings by using the improved CAPROUS constitutive model, Proceedings of 10th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, Nov. 2013.

(2019年10月11日受付)