

論文 鉄筋コンクリート版への衝突実験に係る数値シミュレーション解析 : IRIS ベンチマークプロジェクト

太田 良巳^{*1}・松澤 遼^{*2}・鈴木 哲夫^{*3}

要旨 : OECD/NEA/CSNI が主催した IRIS2010 及び IRIS2012 のベンチマークプロジェクトでは、飛翔体の鉄筋コンクリート版への衝突実験（曲げ破壊型及び貫通破壊型）が実施され、各国の研究者により衝突実験結果の再現解析を通して数値シミュレーション技術の向上を目的とした議論がなされた。本論文では、IRIS ベンチマークプロジェクトの曲げ破壊型実験の結果の再現解析を実施した結果について論ずる。再現解析においては、コンクリート強度のひずみ速度依存性に着目した解析を実施した。その結果、シミュレーション結果と実験結果は概ね一致した。

キーワード : 衝突実験, 柔飛翔体, 曲げ破壊, ひずみ速度依存性, 数値シミュレーション

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^{例え 1)}。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、既往の研究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^{例え 2)}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、汎用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中心となっている。OECD（Organization for Economic Cooperation and Development：経済協力開発機構）／NEA（Nuclear Energy Agency：原子力機関）／CSNI（Committee on the Safety of Nuclear Installations：原子力施設安全委員会）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であるとその必要性を認識し、2010 年より飛翔体の衝突に対する施設の安全性評価技術の改良を目的とした国際解析プロジェクト Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles、通称「IRIS プロジェクト」を実施した。IRIS プロジェクトでは、2010 年に鉄筋コンクリート版（以下「RC 版」という）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。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。その結果はレポート^{3, 4)}としてまとめられ、公開されている。IRIS プロジェクトでは、柔飛翔体の衝突による RC 版の曲げ破壊を想定した衝突実験及び剛飛翔体の衝突による RC 版の貫通破壊を想定した衝突実験が実施された。

本論文では、数値シミュレーション技術の向上を目的として曲げ破壊を想定した衝突実験の結果の再現解析を実施し、その結果について論じる。構造物の構成材料は、衝突の様な載荷速度の速い条件においては材料の強度にひずみ速度効果が影響することに着目し、再現解析においては、RC 版のコンクリートの圧縮強度及び引張強度のひずみ速度依存性係数をパラメータにした解析を実施し、RC 版の裏面の変形の再現を試みた。その結果、引張強度に係るひずみ速度依存性が RC 版の裏面の変形に与える影響が大きいことが分かった。

2. 曲げ破壊型衝突実験の概要

IRIS プロジェクトの衝突実験はフィンランド国立技術研究センター（VTT）で実施された。曲げ破壊型衝突実験は、衝突する飛翔体が変形し衝突エネルギーを吸収する構造の柔飛翔体を用い、RC 版に大きな損傷が生じず、版が曲げ変形するような実験条件で実施された。柔飛翔体は、外径 0.254m、全長 2.11m、質量 50.5kg の変形可能な薄肉ステンレス鋼管ミサイルである。鋼管の変形部の肉厚は 2mm で一定である。RC 版は、4 辺を支持された縦横 2.1×2.1m 角で厚さ 0.15m である。RC 版には縦横 55mm 間隔で直径 6mm の鉄筋が衝突面と裏面側に設置され、かぶり 0.015m、有効高さ 0.135m となっている。柔飛翔体の衝突速度は 110.2m/s である。計測項目は、RC 版の鉄筋ひずみ 18 カ所、裏面側の変位 5 カ所及び支持脚位置で反力を 4 カ所測定している。さらに飛翔体の速度、衝突後の飛翔体と RC 版の損傷が記録された。図 1 に IRIS プロジェクトで実施した衝突実験の RC 版の支持状況を示す。RC 版は鋼製の支持フレームで 4 辺が拘束されている。また、図 2 に RC 版の寸法及び裏面側の変位計測位置を図 3 に鉄筋ひずみの計測位置をそ

*1 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ 博士（工学）（正会員）

*2 伊藤忠テクノソリューションズ（株）科学システム本部 科学・工学技術部

*3 原子力規制庁長官官房技術基盤グループ 博士（工学）

れぞれ示す。

図-4 に曲げ破壊型衝突実験後の RC 版の損傷状況及び柔飛翔体の状況をそれぞれ示す。断面図については、衝突位置を中心に十字に切断した断面である。RC 版の裏面側には目視で確認できるクラックは見られないが、RC 版の断面には、衝突面から裏面にかけて顕著な 2 本のクラックが確認できる。これは負荷荷重の増大により生じたと考えられ曲げ破壊していることが分かる。一方、柔飛翔体は衝突速度 110.2m/s で衝突後、2.11m から約 1.14m まで座屈変形している。

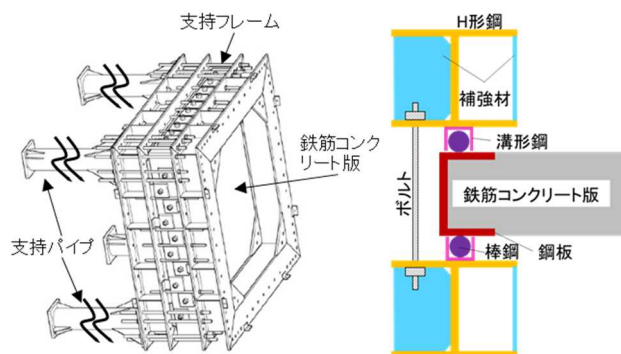


図-1 RC 版の支持の状況 ^{3), 4)}

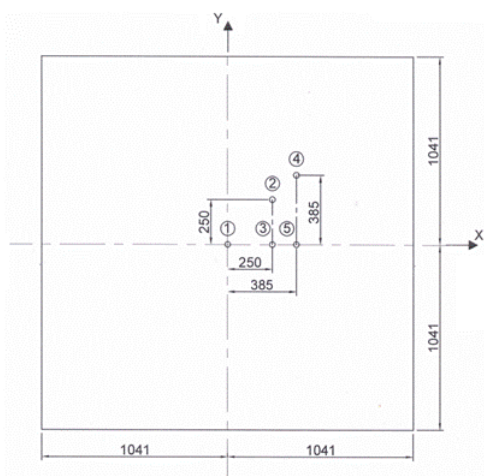


図-2 RC 版の寸法及び裏面変位計測の位置 ^{3), 4)}
(単位: mm)

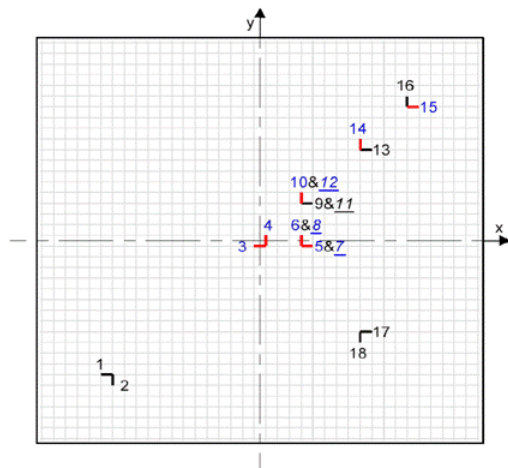
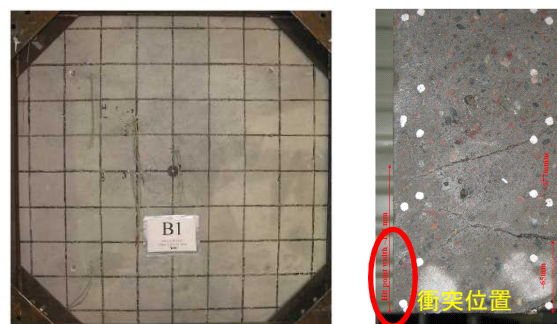


図-3 裏面側鉄筋ひずみ計測位置 ^{3), 4)}
(図中下線は RC 版衝突面のひずみ計測位置)



裏面 断面

a) RC 版の損傷状況 ^{3), 4), 5)}



b) 柔飛翔体の損傷状況 ^{3), 4)}

図-4 曲げ破壊型実験の結果

3. 解析モデルの概要

本論文においては、汎用衝撃解析コード ANSYS® AUTODYN®を用いて解析を実施した。解析には、コンクリート構成則として DYCAPS モデルを用いた。DYCAPS モデルは衝撃荷重を受けるコンクリートの挙動を表現する構成則として、その妥当性が確認されている(例えば 6), 7)。DYCAPS モデルは、降伏・破壊面にひずみ速度依存性を考慮し、塑性ひずみに基づく損傷関数を用いて硬化・軟化特性を表現できるモデルである。DYCAPS モデルの動的な降伏面及び破壊面の概要を図-5 に示す。

コンクリートの圧縮強度に係るひずみ速度増大係数 γ_c 及び引張強度に係るひずみ速度増大係数 γ_t は次式の山口ら ⁸⁾の強度増加率を用いた。ここで、 $\dot{\epsilon}$ は八面体せん断ひずみ速度を指す。

$$\gamma_c = 1.021 - 0.05076 \log_{10} \dot{\epsilon} + 0.02583 (\log_{10} \dot{\epsilon})^2 \quad (1a)$$

$$\gamma_t = 0.8267 + 0.02987 \log_{10} \dot{\epsilon} + 0.04379 (\log_{10} \dot{\epsilon})^2 \quad (1b)$$

次に、解析モデルについて説明する。解析モデルは実験の対称性を考慮して 1/4 モデルとした。図-6 に曲げ破壊型衝突実験の再現解析に用いた FEM モデルを示す。コンクリートはソリッド要素、鉄筋は梁要素、支持フレームはシェル及び梁要素でモデル化した。一方、柔飛翔体はシェル要素によりモデル化した。柔飛翔体のモデルを図-7 に示す。コンクリートの材料物性を表-1 に鉄筋及び柔飛翔体の材料物性を表-2 にそれぞれ示す。コンクリートの物性値は参考文献 3), 4)を参照し、鉄筋及び柔飛翔体の物性値は一般値を参照した。また、鉄筋の応力-ひずみ関係及び柔飛翔体の応力-ひずみ関係を図-8 及び図-9 にそれぞれ示す。

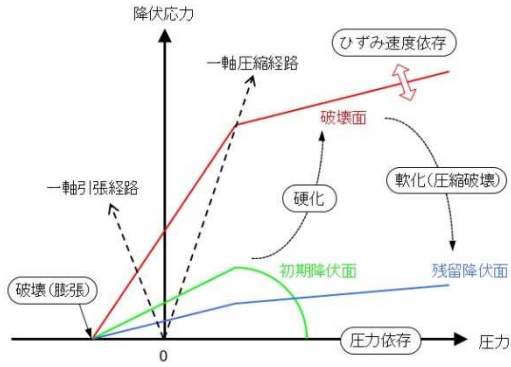


図-5 DYCAPS モデルの概念図

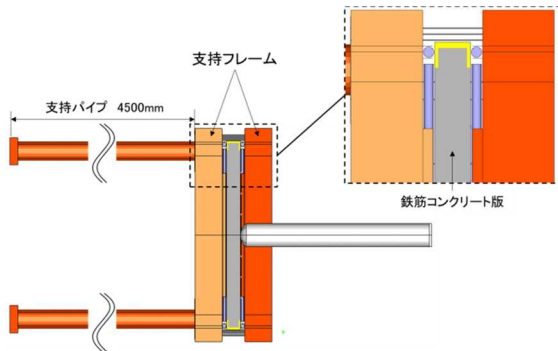


図-6 曲げ破壊型衝突実験の FEM モデル

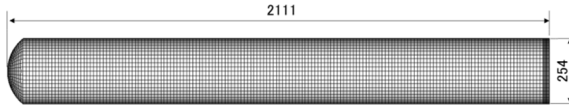


図-7 柔飛翔体の FEM モデル (単位: mm)

表-1 コンクリートの材料物性^{3), 4)}

圧縮強度(MPa)	55.2
引張強度(MPa)	3.71
質量密度(g/cm ³)	2.30
ヤング率(MPa)	26915
ポアソン比	0.2

表-2 鉄筋及び柔飛翔体の材料物性^{3), 4)}

質量密度(g/cm ³)	7.85
ヤング率(MPa)	210000
ポアソン比	0.3

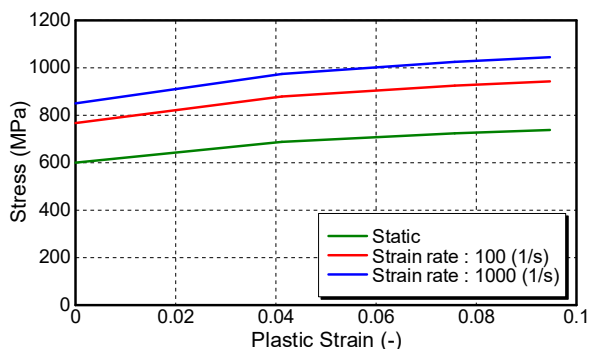


図-8 鉄筋の応力-ひずみ関係^{3), 4)}

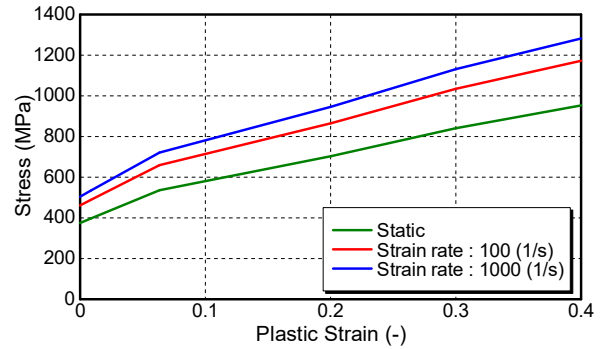


図-9 柔飛翔体の応力-ひずみ関係^{3), 4)}

4. 解析結果

4.1 解析条件

本論文では、コンクリートのひずみ速度依存性に着目した再現解析を実施した。具体的には式(1)の右辺第三項に係数を乗じた式(2)とし、この係数をパラメータに解析を実施した。

$$\gamma_c = 1.021 - 0.05076 \log_{10} \dot{\epsilon} + a_c 0.02583 (\log_{10} \dot{\epsilon})^2 \quad (2a)$$

$$\gamma_t = 0.8267 + 0.02987 \log_{10} \dot{\epsilon} + a_t 0.04379 (\log_{10} \dot{\epsilon})^2 \quad (2b)$$

ここで、新たに設定した係数 a_c を圧縮強度ひずみ速度依存性係数、 a_t を引張強度ひずみ速度依存性係数、とする。ひずみ速度依存性係数の設定には、既往の実験結果^{9), 10)}と比較して、実験のばらつきを網羅するように設定した。図-10に既往実験結果と式(2a)による各 a_c 値に対するひずみ速度増大係数を比較した図を、図-11に既往実験結果と式(2b)による各 a_t 値に対するひずみ速度増大係数を比較した図をそれぞれ示す。

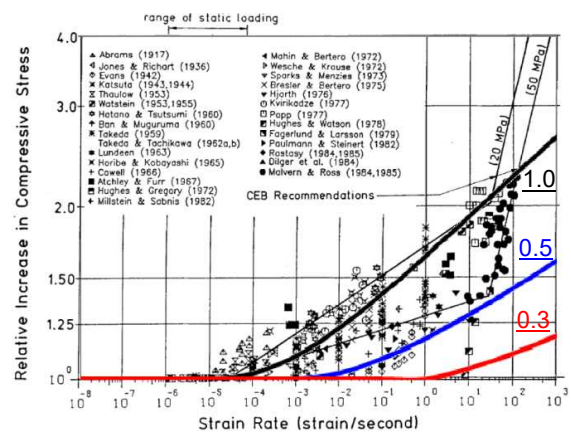


図-10 コンクリートの圧縮強度に係るひずみ速度増大係数と実験結果の比較 ($a_c = 1.0, 0.5, 0.3$) (参考文献 9) に加筆)

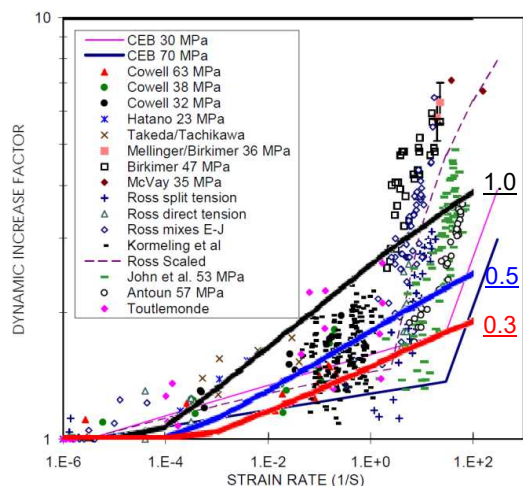


図-11 コンクリートの引張強度に係るひずみ速度増大係数と実験結果の比較 ($a_t = 1.0, 0.5, 0.3$) (参考文献 10) に加筆)

4.2 圧縮強度ひずみ速度依存性係数 a_c をパラメータにした解析結果

本節では、圧縮強度ひずみ速度依存性係数 $a_c = 1.0$ 及び引張強度ひずみ速度依存性係数 $a_t = 1.0$ のケースについて検討したのち、圧縮強度ひずみ速度依存性係数 a_c をパラメータにした解析結果について論じる。引張強度ひずみ速度依存性係数は $a_t = 1.0$ とし、圧縮強度ひずみ速度依存性係数 a_c を 1.0, 0.5, 0.3 と変化させる解析を実施し、圧縮強度に係るひずみ速度依存性係数の影響を検討する。

図-12 に柔飛翔体の最後尾の速度時刻歴を示す。柔飛翔体の速度時刻歴について、実験結果では衝突後約 18ms で RC 版と柔飛翔体が離れている。解析結果も、約 18ms で飛翔体が RC 版から離れ等速運動しており実験結果をよく再現できた。しかしながら、柔飛翔体の速度については、圧縮強度ひずみ速度依存性係数による影響は確認できなかった。次に図-2 位置① (衝突中心の裏面側) 及び位置④における実験結果と解析結果の変位応答の比較を図-13 及び図-14 にそれぞれ示す。変位応答については、実験の再現ができていない。解析より求められた最大変位量と実験結果の最大変位量を比較すると、解析結果は半分程度となっている。また、圧縮強度ひずみ速度依存性係数をパラメータに解析を実施したが、圧縮強度ひずみ速度依存性係数による影響は確認できなかった。図-15 に圧縮強度ひずみ速度依存性係数は $a_c = 1.0$ 、引張強度ひずみ速度依存性係数は $a_t = 1.0$ の場合の損傷状況を示す。損傷状況は解析上、「破壊」と判定された要素を亀裂として表示している。衝突面から裏面にかけて亀裂が進展している状況が確認できる。この損傷は、図-4 に見られる損傷と類似している。

以上のことより、DYCAPS モデルを用いた解析において、本実験条件に関しては圧縮強度ひずみ速度依存性係

数の影響は小さいことが分かった。これは、圧縮強度ひずみ速度依存性係数の低減により、衝突面の損傷範囲が大きくなり、衝突面の損傷により衝突エネルギーが吸収され、裏面側に変形の影響が及ぼさないためと考えられる。

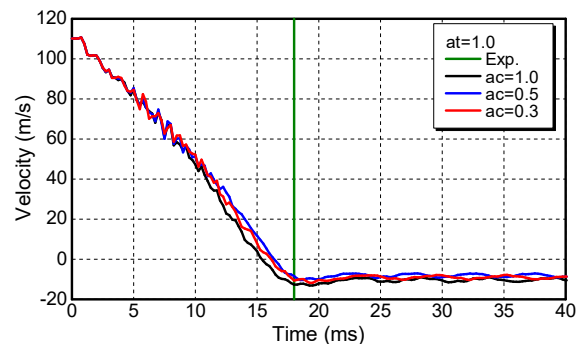


図-12 圧縮強度ひずみ速度依存性係数の変化による柔飛翔体の速度時刻歴

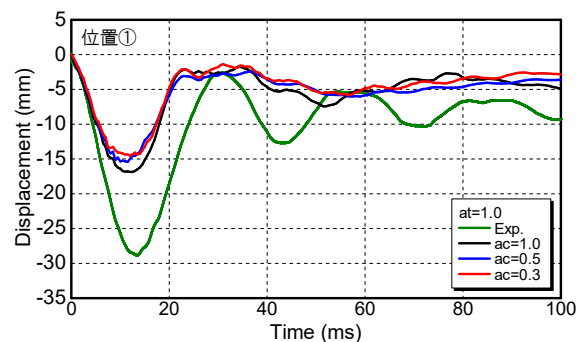


図-13 圧縮強度ひずみ速度依存性係数の変化による位置①の変位応答

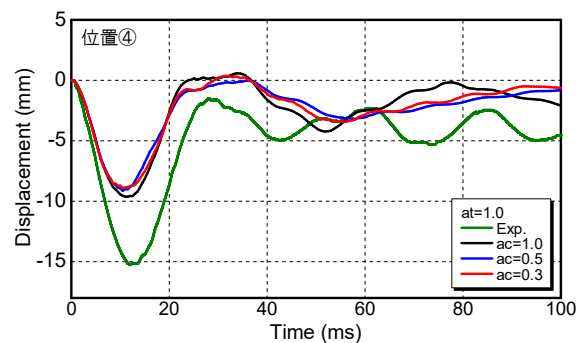


図-14 圧縮強度ひずみ速度依存性係数の変化による位置④の変位応答

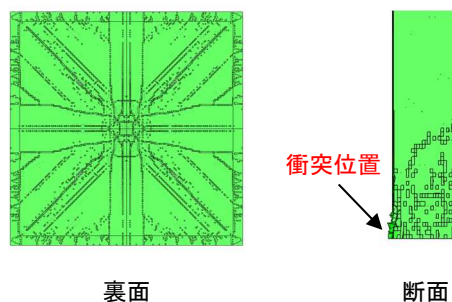


図-15 $a_c = 1.0$ 及び $a_t = 1.0$ の場合の RC 版の損傷状況 (衝突後 100ms)

4.3 引張強度ひずみ速度依存性係数 a_t をパラメータにした解析結果

本節では、引張強度ひずみ速度依存性係数 a_t をパラメータにした解析結果について論じる。前節 4.2 において圧縮強度ひずみ速度依存性係数の影響が小さいことが確認されたことより、圧縮強度ひずみ速度依存性係数は $a_c = 1.0$ とし、引張強度ひずみ速度依存性係数 a_t を 1.0, 0.5, 0.3 と変化させる解析を実施し、引張強度に係るひずみ速度依存性係数の影響を検討する。

図-16 に柔飛翔体の最後尾の速度時刻歴を示す。柔飛翔体の速度時刻歴に係る解析結果は、約 18ms で RC 版と柔飛翔体が離れており実験結果を良く再現できた。ただし、引張強度ひずみ速度依存性係数による柔飛翔体の速度時刻歴への影響は見られない。次に図-2 位置①及び位置④における実験結果と解析結果の変位応答を図-17 及び図-18 にそれぞれ示す。位置①及び位置④の再現解析の結果について、引張強度ひずみ速度依存性係数 $a_t = 0.3$ の場合の解析結果は実験結果の最大変位を良く再現できている。同様に図-2 位置②及び位置③の変位応答を図-19 及び図-20 にそれぞれ示す。位置②及び位置③においても引張強度ひずみ速度依存性係数 $a_t = 0.3$ の場合の解析結果は実験結果の最大変位を良く再現できている。図-21 に図-3 位置 6 の鉄筋ひずみの計測結果と解析結果を比較した一例を示す。位置 6 の鉄筋ひずみの再現解析結果では、引張強度ひずみ速度依存性係数 $a_t = 0.5$ 及び $a_t = 0.3$ の場合の解析結果は実験結果をおおむね再現できている。図-22 に引張強度ひずみ速度依存性係数を変化させた際の RC 版の損傷状況を示す。引張強度ひずみ速度依存性係数の影響により RC 版の損傷が進展している様子が分かる。

以上のことより、DYCAPS モデルを用いた解析において、引張強度ひずみ速度依存性係数の影響は大きいことが分かった。裏面の最大変位の再現において、RC 版が曲げ変形する際に裏面側に引張力が作用するためと考えられる。また、引張強度ひずみ速度依存性係数はせん断抵抗力にも寄与するため影響が顕著に表れたものと考えられる。

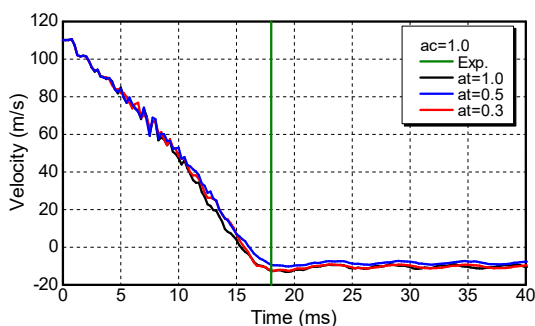


図-16 引張強度ひずみ速度依存性係数の変化による柔飛翔体の速度時刻歴

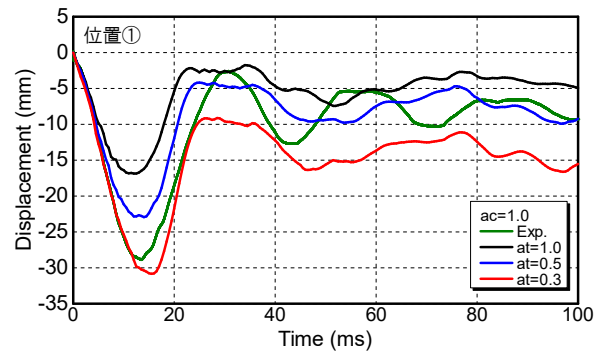


図-17 引張強度ひずみ速度依存性係数の変化による位置①の変位応答

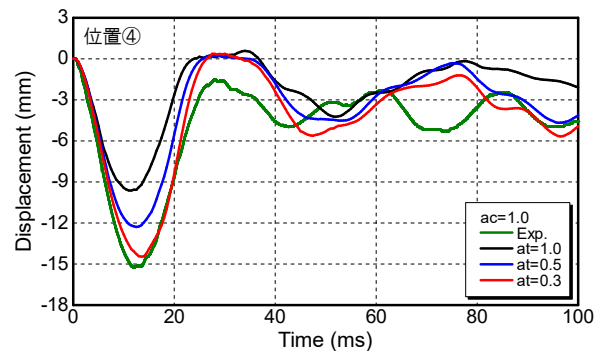


図-18 引張強度ひずみ速度依存性係数の変化による位置④の変位応答

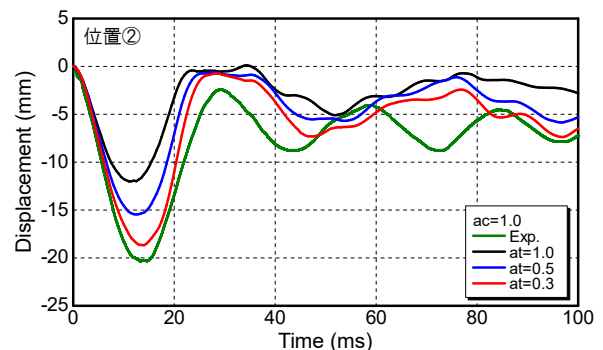


図-19 引張強度ひずみ速度依存性係数の変化による位置②の変位応答

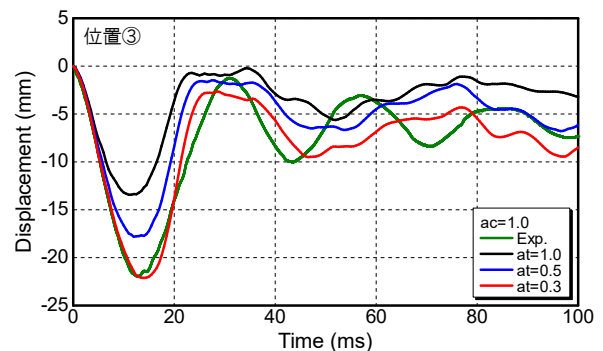


図-20 引張強度ひずみ速度依存性係数の変化による位置③の変位応答

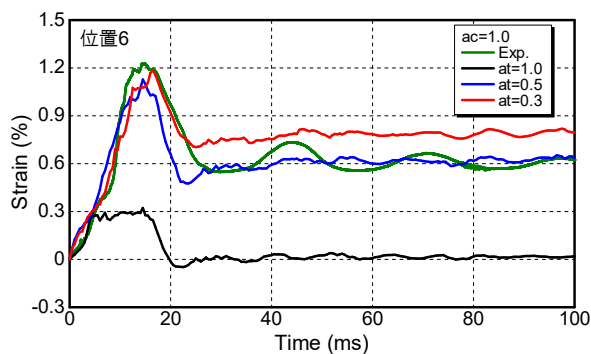


図-21 引張強度ひずみ速度依存性係数の変化による位置 6 の鉄筋ひずみ

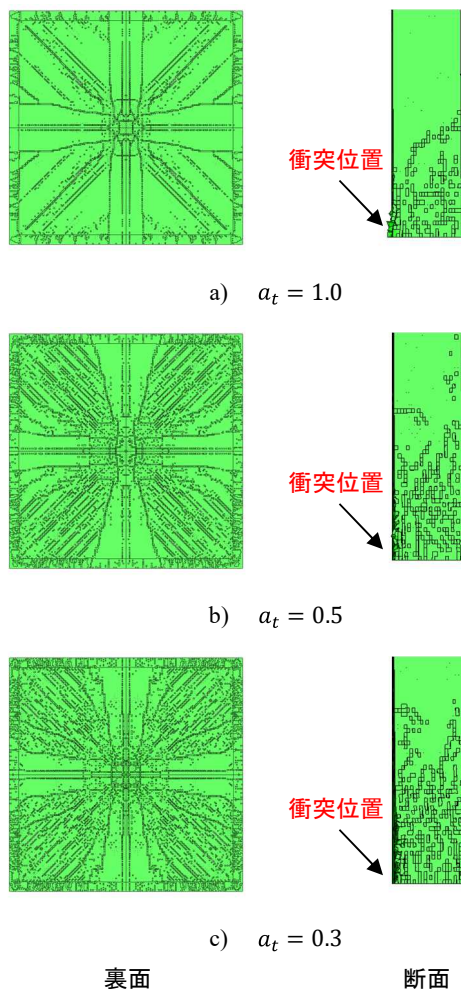


図-22 引張強度ひずみ速度依存性係数の変化による RC 版の損傷状況の違い(衝突後 100ms)

5. まとめ

本論文では、数値シミュレーション技術の向上を目的として、OECD/NEA/CSNI の IRIS プロジェクトで実施された曲げ破壊型衝突実験結果の再現解析を試みた。再現解析には汎用衝撃解析コード ANSYS®AUTODYN®にコ

ンクリート構成則 DYCAPS モデルを組み込み、ひずみ速度依存性に着目した再現解析を実施した。その結果、DYCAPS モデルを用いた解析を実施する場合、圧縮強度ひずみ速度依存性係数は衝突面の損傷範囲に影響を及ぼし、損傷範囲が大きくなることにより裏面側に変位が伝わりにくいことから、裏面の変位の再現性に大きな影響がないことが分かった。一方、引張強度ひずみ速度依存性係数は、引張力及びせん断抵抗に寄与するため解析結果に大きな影響があることが分かった。今後は、貫通破壊型衝突実験についてもその影響を確認していく。

謝辞

本論文の作成に当たっては、元伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 伊東雅晴博士にご助言いただきました。ここに記して謝意を申し上げます。

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., Telford A. R. : Local Impact Effects of Hard Missiles on Concrete Targets, International Journal of Impact Engineering, No.32, pp. 224-284, 2005.
- 3) OECD/NEA/CSNI : Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles (IRIS_2010) Final Report, JT03314597, 2012.
- 4) OECD/NEA/CSNI : Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles (IRIS_2012) Final Report, JT03359989, 2014.
- 5) John L. Bignell, Jonathan S. Rath, Syed A. Ali, and Richard F. Rivera-Lugo : Numerical Simulation of a Hard and Soft Missile Impact Into a Steel Reinforced Concrete Target : Overview of Work Performed by SNL for the US NRC in Support of the IRIS 2012 Exercise, 22th Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT22), August, 2013.
- 6) 日比野憲太, 伊藤博夫, 本橋章平, 蛭沢勝三: 衝撃荷重を受ける RC 構造物の解析的研究, 平成 17 年度土木学会関東支部大会, 2006.
- 7) 独立行政法人原子力安全基盤機構: 核燃料施設安全解析コード改良整備コンクリート構造物の衝撃破壊挙動解析に係るコード整備に関する報告書, JNES/SAE06-025, 2006.
- 8) 山口弘, 藤本一男, 野村設郎: 高圧 3 軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係 その 2 高速載荷, 日本建築学会論文報告集, 第 396 号 pp.50-59, 1989.12.
- 9) Schwer L. E. : Strain Rate Induced Enhancement in Concrete : Much ado about Nothing?, 7th European LS-DYNA conference, 2009.
- 10) Malvar L. J. and Crawford J. E. : Dynamic increase factors for concrete, Twenty-Eighth DDESB Seminar, Orlando, FL, August, 2008.