

論文 剛飛翔体衝突を受ける鉄筋コンクリート板の局部損傷評価に関する一考察

太田 良巳*1・松澤 遼*2・高橋 千明*3・蔡 飛*4

要旨：本論文では、剛飛翔体の衝突を受ける鉄筋コンクリート板の局部損傷について検討した。鉄筋コンクリート板に対して質量 330g の剛飛翔体を衝突速度約 40～200m/s で衝突させる実験から剛飛翔体の衝突速度や鉄筋コンクリート板の板厚の差異が損傷モードに及ぼす影響を検討した。実験の結果より、衝突速度及び板厚の差異による損傷モードへの影響が明確になった。実験では、高速度カメラによる撮影や飛翔体及び鉄筋コンクリート板の加速度応答を計測した。それらデータから鉄筋コンクリート板の局部損傷について、既往実験式、既往理論式による評価及び解析的評価を実施し、剛飛翔体の貫入進展について考察した。

キーワード：衝突実験、剛飛翔体、局部損傷、貫入、画像解析

1. はじめに

近年、衝突に伴う様々な被害が報告されている。例えば、火山活動による火山噴石の衝突や竜巻に伴う飛来物の衝突、さらには平成 30 年 9 月 4 日に上陸した台風 21 号や令和元年 9 月 9 日に上陸した台風 15 号の接近に際して強風により大型船舶が漂流し港湾施設等への衝突により甚大な被害が発生したことは記憶に新しいところである。構造物に生じる衝撃については、津波漂流物・斜面崩壊岩塊・竜巻飛来物等の自然現象の随伴事象としての衝突や船舶・車両・航空機等の人工物の衝突など様々な衝突物が存在する。このような衝撃的外力を受けた構造物の挙動については構造物内に振動を生じるなど、静的外力が作用する場合の挙動と異なる現象が見られる。また、衝突物の大きさや衝突速度に応じて構造物への影響は大きく異なってくる。

原子力分野においては、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¹⁾。近年では、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⁾や平成 26 年 9 月に制定した「実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド」³⁾などにおいて、物体の衝突による原子力施設への影響評価の考え方が示されている。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」⁴⁾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。

衝突による構造物の局部損傷評価については、構造物の損傷状況（貫入、裏面剥離、貫通）に応じて数多くの実験式が提案されている⁵⁾。既往の実験式は、一般的に剛飛翔体が構造物に垂直に衝突する事を前提としている。

また、力学モデルに基づき、衝突過程を単純なモデルに置き換えて評価する手法も提案されている^{6),7),8),9)}。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を用いた解析研究が数多く見られる^{例えば 10)}。

本論文では、鉄筋コンクリート板に対して質量 330g の剛飛翔体を衝突速度約 40～200m/s で衝突させる実験から剛飛翔体の衝突速度や鉄筋コンクリート板の板厚の差異が損傷モードに及ぼす影響を検討すると共に、実験結果から鉄筋コンクリート板の局部損傷について、既往の実験式による評価を実施すると共に、剛飛翔体の鉄筋コンクリート板への貫入進展について既往理論式による評価及び解析的評価した結果について論じる。

2. 衝突実験について

2.1 実験装置及び鉄筋コンクリート板

衝突実験は、高圧空気式発射装置を用いて実施した。**図-1**に実験に用いた鉄筋コンクリート板の概要及び裏面側に設置した加速度計の位置を示す。鉄筋コンクリート板の寸法は縦 550mm×横 550mm とし、板厚をパラメータにして 60, 80, 100mm の 3 種類とした。鉄筋は D6 (SD345) の異形鉄筋が約 60mm 間隔で表裏 2 層に配置され、かぶり厚さは 15mm である。コンクリート強度は平均約 20N/mm²、骨材最大寸法は 10mm である。衝突時に鉄筋コンクリート板により生じる反力を板の四隅に取り付けたロードセルにより計測した。鉄筋コンクリート板は、全体を衝突方向に対して極低摩擦で滑動するリニア・ベアリングで吊り、衝突方向の移動においてほとんど

*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（正会員）

*3 パシフィックコンサルタンツ（株）交通基盤事業本部 インフラマネジメント部 博士（工学）

*4 群馬大学大学院 理工学府 環境創成部門 准教授 博士（工学）

抵抗が無いような設計とし、ロードセルに重力方向の荷重が作用させない様な構造とした。図-2 に鉄筋コンクリート板と支持構造の関係を示す。

2.2 飛翔体及び実験ケース

図-3 に飛翔体の概要を示す。衝突実験においては、飛翔体の先端の形状が被衝突物の損傷状況に与える影響が非常に大きい⁵⁾。本実験で用いた飛翔体の先端形状は平坦型とした。剛飛翔体は、直径 30mm、質量 330g とし、衝突により飛翔体自体が変形しない構造である。飛翔体の製作には炭素鋼 S25C を用いた。

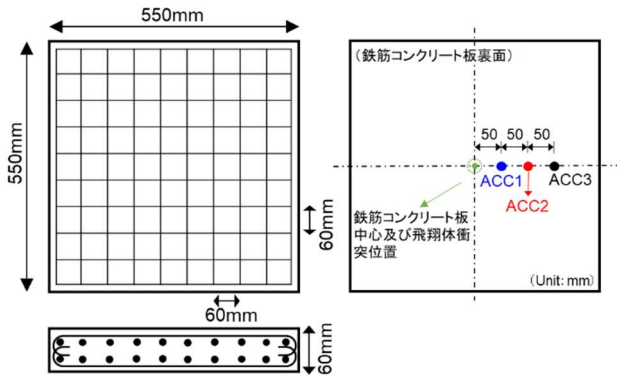


図-1 鉄筋コンクリート板（板厚 60mm）の概要
及び加速度計設置位置

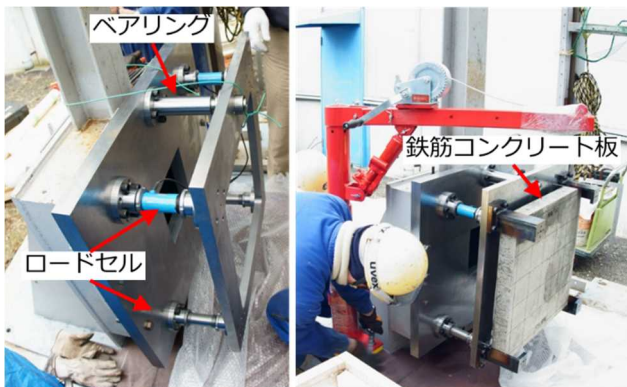


図-2 鉄筋コンクリート板及び支持構造

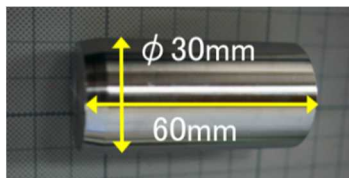


図-3 剛飛翔体の概要

3. 実験結果及び評価

3.1 鉄筋コンクリート板の損傷状況

表-1 に実験ケース及び実験結果を示す。実験パラメータは、飛翔体の衝突速度及び鉄筋コンクリート板の板厚である。衝突速度は、鉄筋コンクリート板の損傷状況として、衝突面の損傷、裏面の軽微損傷、裏面剥離、貫通の各損傷状況が観察できるように約 40~200m/s の範

囲とした。実験計測として、鉄筋コンクリート板の裏面側において、図-1 に示す通り衝突中心から 5・10・15cm の位置で加速度計測を実施した。No.4 のケースにおいては、飛翔体最後部に加速度計を設置し、衝突に伴う飛翔体の加速度計測を実施した。また、高速度カメラを用いた撮影により衝突時の状況を記録した。

実験後、鉄筋コンクリート板表面の損傷状況を観察した後、板を切断し損傷箇所の断面を観察した。

鉄筋コンクリート板の損傷モードは、損傷程度が軽微な方から、衝突面に貫入(penetration, spalling)は見られるが裏面側に損傷がないケースを「裏面損傷なし」、裏面側に軽微なクラック(cracking)が観察されたケースを「裏面損傷」、「裏面剥離」(scabbing)及び「貫通」(perforation)の 4 種類に整理した。また、貫入量は、鉄筋コンクリート板表面からクレーターの最深部までの深さとした。鉄筋コンクリート板の損傷状況は衝突速度が速くなるにつれ損傷は拡大し、板厚が厚くなると損傷状況は軽微になる。

図-4 に剛飛翔体の衝突による鉄筋コンクリート板の損傷状況の一例を示す。図より分かる様に、高速衝突を受けた鉄筋コンクリート板は、衝突面の損傷は軽微でも裏面側の剥離や内部に亀裂が見られた。

No.4 のケースにおける衝突実験の状況を図-5 に示す。衝突速度 43m/s においては、衝突後 0.3ms では、すでに飛翔体が反跳している。No.4 のケースで計測された加速度応答を図-6 に示す。飛翔体最後部では、約 65000G の加速度応答が計測された。裏面側加速度応答では、各計測位置における立ち上がり時刻から応力波の伝播の様子が見て取れる。この時の縦波伝播速度は 4400~4800m/s 程度であった。伝播時間は、衝突面の鉄筋コンクリート板中心から裏面側の各加速度計設置位置までの最短距離を図-6 に示す各加速度応答の立ち上がり時間で除して算出した。

表-1 実験ケース及び結果

No.	板厚 (mm)	飛翔体		鉄筋コンクリート板	
		衝突速度(m/s) 設定	実測	損傷モード	貫入量 (mm)
1	60	100	91	裏面剥離	10.1
2		100	107	貫通	—
3		150	148	貫通	—
4	80	50	43	裏面損傷なし	3.6
5		100	101	裏面剥離	13.2
6		150	147	貫通	—
7	100	100	108	裏面損傷	16.2
8		150	147	裏面損傷	24.5
9		200	181	裏面剥離	37.9

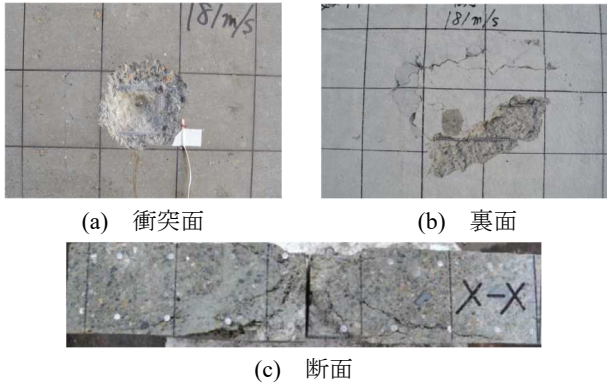


図-4 飛翔体の衝突に伴う鉄筋コンクリート板の損傷状況の一例 (No.9, 衝突速度 181m/s, 板厚 100mm)

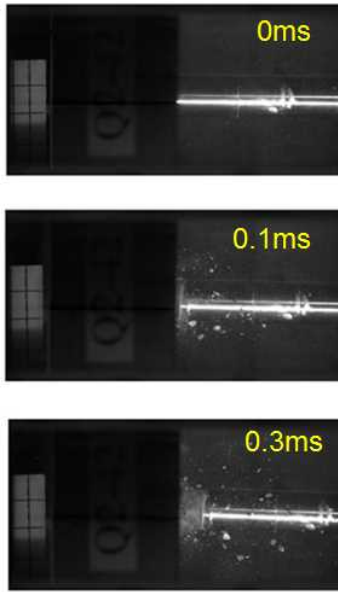
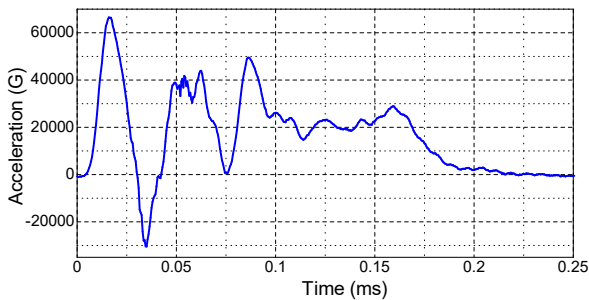
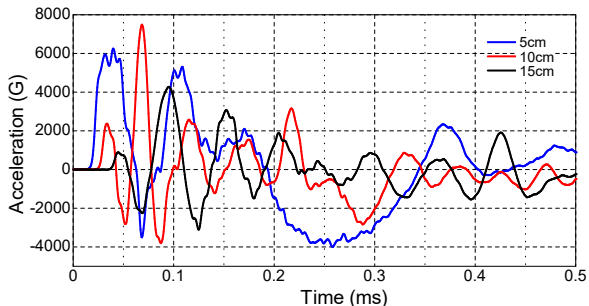


図-5 衝突の状況 (No. 4, 衝突速度 43m/s, 板厚 80mm)



(a) 飛翔体



(b) 鉄筋コンクリート板裏面

図-6 加速度応答

3.2 裏面剥離限界及び貫通限界に係る評価

飛翔体が衝突した場合の構造物の損傷状況の予測式は数多く提案されている。本節では、構造物の損傷評価に広く使われる実験式の一つである Chang 式¹¹⁾を用いた評価を実施し、表-1 に示す鉄筋コンクリート板の損傷状況と比較する。Chang 式は次式の通りである。

裏面剥離限界板厚 ; h_s

$$\frac{h_s}{d} = 1.84 \left(\frac{u}{V}\right)^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{1.2}(f_c')^{0.4}} \quad (1)$$

貫通限界板厚 ; e

$$\frac{e}{d} = \left(\frac{u}{V}\right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{d^3 f_c'}\right)^{0.5} \quad (2)$$

ここで、 d は飛翔体直径 (m)、 V は飛翔体の衝突速度 (m/s)、 M は飛翔体質量 (kg)、 f_c' はコンクリート圧縮強度 (N/mm^2)、 u は基準速度 (61m/s) である。

図-7 に剛飛翔体の衝突に対する実験結果と Chang 式を用いた評価結果の比較を示す。本実験に対して、Chang 式は保守的な評価となっていることが分かる。

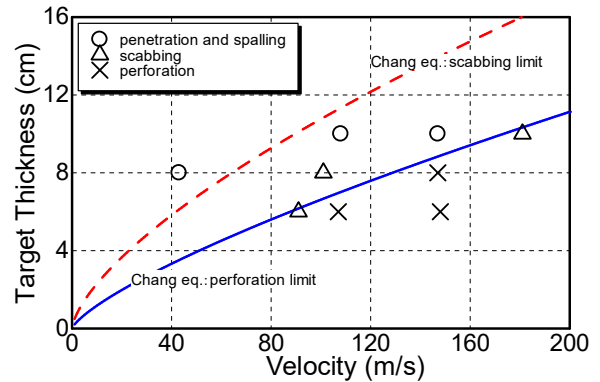


図-7 剛飛翔体衝突による鉄筋コンクリート板の損傷状況と Chang 式による評価結果の比較

3.3 飛翔体貫入に係る評価

本節では、剛飛翔体の鉄筋コンクリート板への貫入量について、表-1 に示す実験結果と既往評価結果を比較する。式(3)に既往実験式の一つである UKAEA 式⁹⁾を示す。UKAEA 式は、UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Authority) が独自の実験と文献調査から提案した実験式である。

$$G = 3.8 \times 10^{-5} \frac{NMV^{1.8}}{f_c'^{0.5} d^{2.8}}$$

このとき、

$$G = 0.55 \left(\frac{x}{d}\right) - \left(\frac{x}{d}\right)^2 \quad \left(\frac{x}{d} < 0.22\right) \quad (3)$$

$$G = \left(\frac{x}{2d}\right)^2 + 0.0605 \quad \left(0.22 \leq \frac{x}{d} < 2\right)$$

$$G = \frac{x}{d} - 0.9395 \quad \left(\frac{x}{d} > 2\right)$$

ここで、 G 、 x は貫入深さ(m)、 d は飛翔体直径、 V は飛翔体の衝突速度、 M は飛翔体質量、 f_c' はコンクリート圧縮

強度, N は飛翔体の先端形状係数(平坦:0.72, 半球:0.84, 鈍頭(blunt):1.00, 円錐:1.14)である。本評価における先端形状係数は0.72を用いた。

飛翔体の衝突エネルギーが鉄筋コンクリート板への貫入のみで消費されると仮定すると次式の関係が成り立つ。

$$\frac{1}{2}MV^2 = f'_c \cdot A \cdot G \quad (4)$$

ここで, A は飛翔体の断面積(m^2)であり, すなわち $f'_c \cdot A$ は衝突面における抵抗力をさす。

式(4)の関係について, 飛翔体の断面積 A を円形とし, 先端形状係数, コンクリートの速度依存性等を考慮したUMIST式¹²⁾が提案されている。UMIST式は下記のとおりである。

$$G = \left(\frac{2}{\pi}\right) \frac{NMV^2}{0.72\sigma_t d^2} \quad (5)$$

ここで, σ_t は速度依存性を考慮したコンクリートの圧縮強度(MPa)であり, 次式で定義される。

$$\sigma_t = 4.2f'_c + 135.0 + (0.014f'_c + 0.45)V \quad (6)$$

図-8に剛飛翔体衝突による鉄筋コンクリート板への貫入量について, 実験結果とUKAEA式とUMIST式の比較を示す。また, 同図に式(4)の関係式に係数 α を乗じて実験結果の近似曲線を合わせて図示する。近似曲線については, 式(4)を変形し, 次式とした。

$$G = \alpha \cdot \frac{MV^2}{2f'_c \cdot A} \quad (4')$$

UKAEA式は実験結果に対して全体的に保守的な評価となり, 実験結果と良い相関が見られた。

一方, UMIST式は実験結果に対して低い評価となった。UMIST式の評価結果は, 式(6)に示す速度依存性の影響が大きかったと推察される。式(6)を用いて計算すると, 例えば, 衝突速度50m/sのとき $\sigma_t = 255.5MPa$, 衝突速度100m/sのとき $\sigma_t = 292.0MPa$ となり, UMIST式では非常に大きな強度増加率を想定していることが分かる。

近似曲線については, 式(4')に係数 $\alpha = 0.1$ を乗じた。係数 $\alpha = 0.1$ には, 飛翔体の衝突によるクレーター形成によるエネルギー損失, 貫入時の摩擦によるエネルギー損失及び先端形状による影響, 鉄筋コンクリート板の速度依存及び拘束圧力による圧縮強度の増加等, 様々な要因が含まれている。ここで, 係数 $\alpha = 0.1$ を圧縮強度の増加率と考えると, 動的圧縮強度は静的圧縮強度の10倍程度と考えられる。藤掛が実施した高速3軸圧縮試験の結果¹³⁾では, 側圧47.1N/mm²の時に約5倍, 側圧94.1N/mm²の時に約7倍大きくなること報告されている。それと比較すると, 様々な要因を圧縮強度の強度増加と仮定しているため若干大きな値となっている。

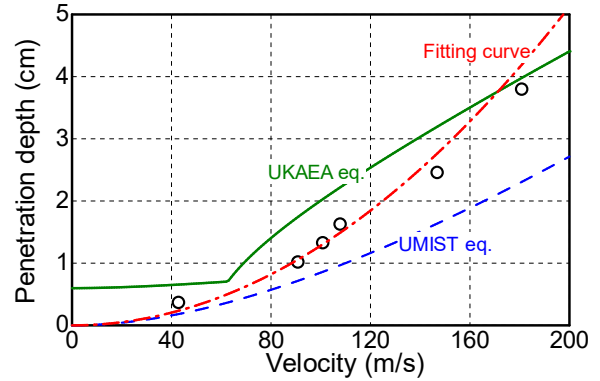


図-8 貫入量に係る実験結果と評価結果の比較

3.4 飛翔体の挙動評価

実験ケース No.4 について詳細な検討を実施する。No.4 については, 図-6 に示す様に飛翔体の加速度応答が計測されており, そのデータをもとに飛翔体の挙動について検討する。さらに, 高速度カメラによる画像分析, 数値シミュレーション, 既往の力学モデルに基づく理論的評価を用いた解析的評価を実施, その適用性について確認した。

飛翔体の挙動を実験結果から算出した。図-5 に示す高速度カメラ映像から飛翔体の速度を算出した。高速度カメラは1秒間に50,000コマで, 撮影間隔は20 μ sである。また, 図-6 に示す飛翔体の加速度応答を数値積分し速度及び変位を算出した。数値積分には, 線形加速度法(例えば¹⁴⁾)を用いた。加速度計の計測間隔は0.5 μ sである。

数値シミュレーションによる解析的評価として, 衝撃解析コードLS-DYNAを用いた解析を実施した。コンクリート構成則としてはRHT (Riedel-Hiermaier-Thoma) モデルを採用した。RHTモデルはRiedelら^{15),16),17)}によるモデルであり, 非線形状態方程式, 圧力依存の降伏応力, およびひずみ速度に応じた動的強度が考慮される。また, Lode角の効果が考慮される。降伏関数は式(7)及び(8)で表わされる。

$$F(p, \sigma_{eq}, \theta, \dot{\epsilon}_p) = \sigma_{eq} - \sigma_f(p, \theta, \dot{\epsilon}_p) \quad (7)$$

$$\sigma_f(p, \theta, \dot{\epsilon}_p) = f'_c \sigma_f^* \left(p^*, F_R(\dot{\epsilon}_p, p^*) \right) R_3(\theta, p^*) \quad (8)$$

ここで, F : 降伏関数, σ_{eq} : ミーゼス応力, σ_f : 降伏応力, f'_c : 一軸圧縮強度, p : 静水圧, F_R : ひずみ速度の効果を表す関数, R_3 : Lode角の効果を表す関数, $\dot{\epsilon}_p$: 塑性ひずみ速度, θ : Lode角である。図-9にRHTモデルの概要を示す。図-10に解析モデルを示す。解析モデルは2章に示す実験概要にある材料物性を再現した。鉄筋コンクリート板は, コンクリートをソリッド要素, 鉄筋をビーム要素で, 飛翔体はソリッド要素でそれぞれモデル化した。すべての部材について平均的な要素サイズは5.0mmとし, 試験体の対称性を考慮し1/4モデルとした。

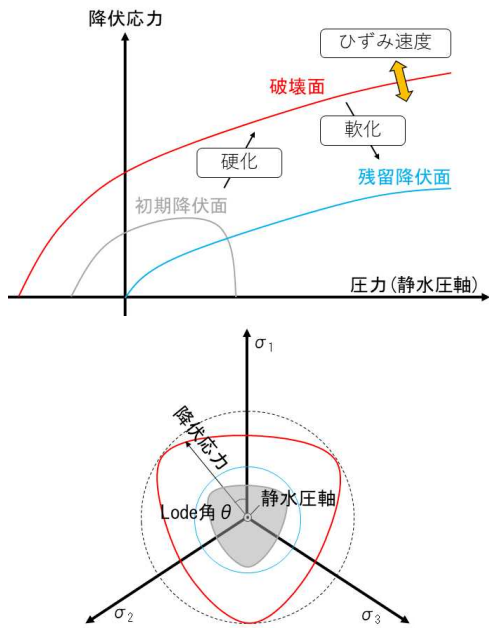


図-9 RHT モデルの概要

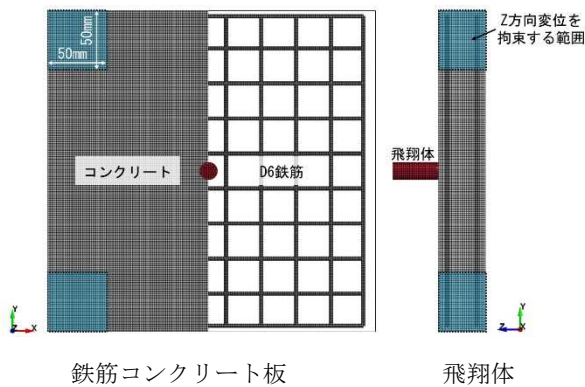


図-10 解析モデル

力学モデルに基づく既往の理論的評価として、防衛施設学会より発刊されている「衝突を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術—」に示されている手法（以下、「防衛施設学会の手法」⁹⁾を用いる。防衛施設学会の手法は、Q.M.Liら^{6),7),8)}が完全塑性材料に対して貫入深さを予測するモデルを高ひずみ速度下のコンクリート材料に適用できるように改良したものである。防衛施設学会の手法の詳細については、参考文献9)を参考にされたい。

飛翔体の鉄筋コンクリート板への衝突時における速度及び貫入量について、計測結果の分析、数値シミュレーションを用いた解析的評価及び力学モデルに基づく理論的評価を実施した結果を図-11及び図-12にそれぞれ示す。図-11に飛翔体の速度-時間関係を示す。飛翔体発射装置に設置した速度計による飛翔体衝突速度は43.0m/sである。一方、画像解析より得られた飛翔体の衝突直前の速度は41.7m/sであり、概ね一致した。また、

加速度記録の積分より算出した速度は画像解析と一致している。加速度記録の積分値より算出した速度では0.17msで飛翔体が反跳する結果となった。数値シミュレーション及び理論解析結果は、画像解析や積分値と比べて減速が若干早いものの、反跳または停止する時刻については、加速度値と比較して0.05ms以下の差であり概ね一致していると考えられる。図-12に飛翔体の鉄筋コンクリートへの貫入量-時間関係を示す。表-1に示す実験ケースNo.4の貫入量3.6mmに対して、飛翔体衝突から0.2ms時刻における貫入量は、積分値3.9mm、数値解析シミュレーション3.4mm、理論解析4.0mmとそれぞれの解析結果は概ね一致した。今回実施した実験結果に対して、計測結果の分析、数値シミュレーション及び理論解析が概ね一致することが確認できた。これは、衝突速度が43m/sと比較的低速で、貫入量が3.6mmと微小であったため、大きな差異が生じなかったと考えられる。

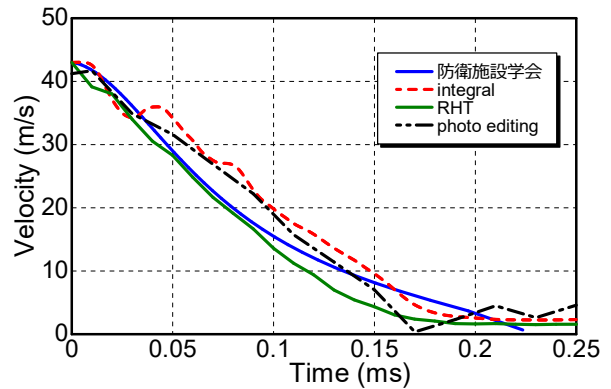


図-11 飛翔体の速度-時間関係

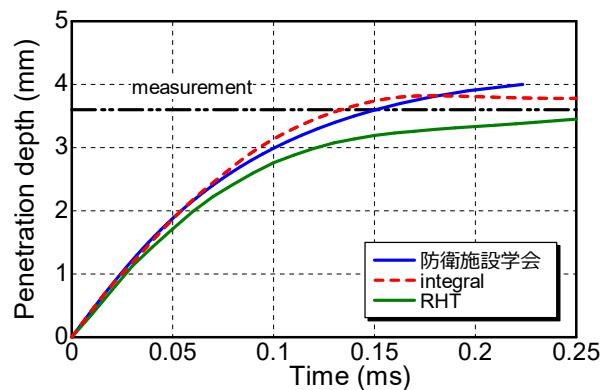


図-12 飛翔体の貫入量-時間関係

4. まとめ

本論文では、鉄筋コンクリート板への剛飛翔体の衝突実験を実施し、その結果について既往実験式による評価、既往理論式による評価及び解析的評価より検討した。本論で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 実験結果のうち裏面剥離及び貫通について Chang 式を用いた評価を実施し、本実験結果に対して保

守的な評価結果が得られた。また、貫入量について、UKAEA式を用いた評価を実施し、本実験結果と良い対応が見られた。

- 2) 貫入量の評価について、飛翔体の衝突エネルギーと鉄筋コンクリート板が受ける抵抗力の関係式を用いて、実験結果に近似した評価を実施した。その結果、係数 $\alpha = 0.1$ を考慮すると実験結果と良い対応が見られた。
- 3) 本実験では、鉄筋コンクリート板だけでなく、飛翔体自体の加速度計測を実施した。そのデータを積分し、飛翔体の速度・変位（貫入）を算出した。衝突に伴う飛翔体の速度・貫入量について、実験結果の分析、数値シミュレーション評価及び理論解析評価から検討した。その結果、衝突速度が43m/sと比較的低速で、貫入量が3.6mmと微小であったため、いずれの手法でも、その適用性が確認できた。

今後、異なる条件の衝突実験に対して詳細な計測・分析、既往実験式を用いた評価、既往理論式を用いた評価及び解析評価を実施し、その適用性を確認していくと共に評価式の高度化及び速度依存性等について検討していく。

謝辞

本論文の作成に当たっては、元原子力規制庁 鈴木哲夫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, Vol.37, pp.183-203, May 1976.
- 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) 原子力規制委員会 : 実用発電用原子炉に係る航空機衝突影響評価に関する審査ガイド, 2014.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Li, Q. M. and Chen, X. W.: Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile, International Journal of Impact Engineering, Vol.1, No.28, pp. 93-116, 2003.
- 7) Li, Q. M. and Tong, D. J.: Perforation thickness and ballistic limit of concrete target subjected to rigid projectile impact, ASCE, Journal of Engineering Mechanics, Vol.129, No.9, pp.1082-1091, 2003.
- 8) Li, Q. M., Weng, H. J., Chen, X. W.: A modified model for the penetration into moderately thick plates by a rigid, sharp-nosed projectile, International Journal of Impact Engineering, Vol.30, No.2, pp. 193-204, 2004.
- 9) 一般社団法人防衛施設学会 : 衝突作用を受ける構造物の局部破壊に関する評価ガイドライン—評価手法と対策技術—, pp.84-95, 2018.
- 10) OECD/NEA/CSNI : Improving Robustness Assessment Methodologies for Structures Impacted by Missiles (IRIS_2012) Final Report, JT03359989, 2014.
- 11) Chang, W. S.: Impact of solid missiles on concrete barriers, Journal of the Structural Division, ASCE, 107, pp.257-271, 1981.
- 12) Wen, H. M. and Xian, Y. X.: A unified approach for concrete impact, International Journal of Impact Engineering, 77, pp.84-96, 2015.
- 13) 藤掛一典 : 高ひずみ速度下におけるコンクリートの引張・圧縮特性に関する研究, 筑波大学博士論文, pp.97-113, 1999.
- 14) 日本機械学会編 : 数値積分法の基礎と応用, コロナ社, pp.22-43, 2003.7.
- 15) LSTC: LS-DYNA Keyword user's manual, LS-DYNA R7.1, 2014.
- 16) Riedel, W., Kawai, N., Kondo, K.: Numerical assessment for impact strength measurement in concrete materials, International Journal of Impact Engineering, 36, pp.283-293, 2009.
- 17) Grunwald, C., Schaufelberger, B., Stols, A., Riedel, W., Borrvall, T. : A general concrete model in hydrocodes: Verification and validation of the Riedel-Hiermaier-Thoma model in LS-DYNA, International Journal of Protective Structures, 8(1), pp. 58-85, 2017.