

大規模災害のリスクと評価例

—竜巻飛来物—

別府 万寿博, 市野 宏嘉

近年、竜巻が発生した際に破壊した破片などが上空から飛散することで構造物や人命に二次的な被害を与える例が報告されている。このような落下飛散物は竜巻飛来物と称されており、最大衝突速度は約 60 m/s (時速 216 km) である。竜巻飛来物に対する防災構造としては、鋼板や鉄筋コンクリート (RC) 版を用いることが検討されている。本稿では、竜巻飛来物の防護対策として用いられる鉄筋コンクリート版を対象として、実験や数値シミュレーションによる RC 版の破壊特性の検討や安全性評価を行った例を紹介する。また、リスク評価の一部であるフラジリティ評価について、既往の実験式を用いて評価した例を示す。

キーワード：竜巻飛来物, 鉄筋コンクリート版, 破壊評価

1. はじめに

近年、竜巻などの強風によって生じた飛散物の衝突による被害が報告されている。平成 24 (2012) 年に茨城県つくば市で発生した竜巻においては、竜巻の風圧や竜巻によって巻き上げられた飛来物の衝突による死者 1 名、負傷者 76 名、全壊家屋 76 棟の被害が報告されている [1]。また、平成 30 (2018) 年に発生した台風 21 号においては、死者 14 名、重傷者 46 名および 8 万棟を超える家屋の被害が発生しており、道路の寸断や断水などのライフラインへの被害が生じるとともに、強風によって飛散した飛来物が衝突することで生じた構造物の被害も報告されている [2]。竜巻の発生件数については、平成 20~28 (2008~2016) 年における地上竜巻は 231 件、海上竜巻は 295 件発生しており、今後も強風による飛来物の被害が増大することが懸念される。

竜巻などの強風による飛来物や火山噴石の衝突に対しては、原子力発電所に及ぼす影響評価や防護シェルターに関する指針類が策定されている。竜巻による飛来物に対しては、平成 25 (2013) 年に原子力規制委員会が「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」[3] を制定 (平成 25 (2013) 年 9 月に一部改訂) しており、原子力発電施設を対象とした設計用飛来物が設定されている。これらの竜巻飛来物は原子力発電所の敷地内における設置物の飛散を想定しており、その種類は棒状

物、板状物および塊状物に区分されている。これらの最大水平速度は竜巻の風速を 100 m/s とした条件下で数値解析的に算定されたものであり、飛来物の質量は 8.4~4,750 kg、最大水平速度は 30~60 m/s と設定されている。

本稿では、竜巻飛来物に対する鉄筋コンクリート (RC) 版の破壊特性を実験によって確認し、その破壊を数値シミュレーションによって再現した例を紹介する。次に、構造物のリスク評価において必要となる RC 版の破壊を確率的に表現した脆弱性 (フラジリティ) 評価を行った例を紹介する。

2. 鉄筋コンクリート版に生じる破壊の特徴

図 1 に、高圧空気式飛翔体発射装置の側面図を示す。本装置は、空気圧縮機、エアチャンバー (空気室)、飛翔体つかみ部および加速管で構成されており、飛翔体つかみ部によって飛翔体尾部を拘束固定することでエアチャンバーが密閉される。その後、空気圧縮機によってエアチャンバーに空気圧を蓄圧し、飛翔体固定部のつかみ部を開くと蓄圧した空気圧が開放され、飛翔体が加速管内に押し出されて発射される構造である。エアチャンバーに蓄圧することができる最大空気圧は 4.3 MPa であり、質量 8.3 kg の飛翔体を用いると最大で約 100 m/s の衝突速度を得ることが可能である。

図 2 に、実験に用いた剛飛翔体 (質量 8.3 kg) の概要を示す。竜巻飛来物のような高速度衝突では、衝突体の先端部の形状の相違によりコンクリート版の破壊性状は異なることが指摘されている。本研究における飛翔体の先端形状は、RC 版に対してある程度の貫入が生じやすい半球型とした。

べっぷ ますひろ, いちの ひろよし
防衛大学校システム工学群建設環境工学科
〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20
beppu@nda.ac.jp
ichino@nda.ac.jp

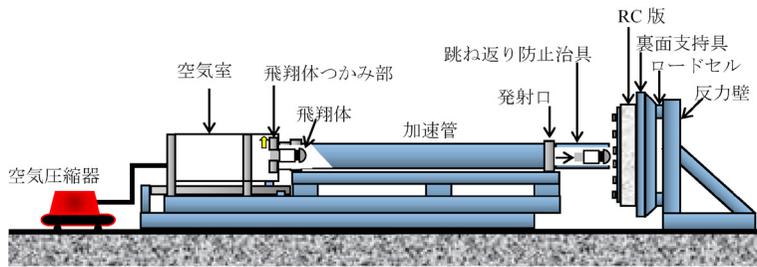


図 1 高圧空気式飛翔体発射装置 (側面図)

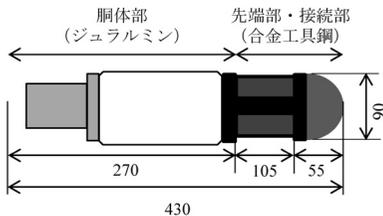


図 2 剛飛翔体の概要

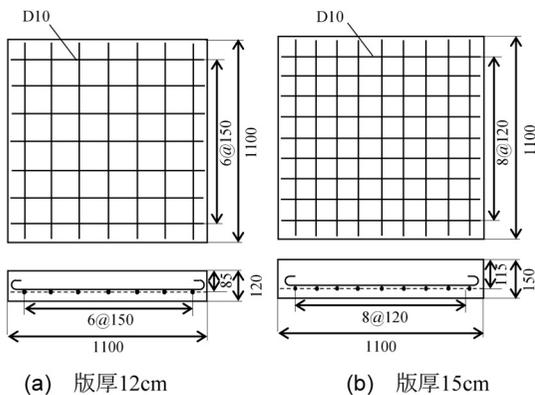


図 3 RC 版の寸法および配筋図の例

図 3 に、RC 版の寸法および配筋図の例を示す。RC 版の寸法は縦横 1,100 mm とし、版厚については 9 cm、12 cm および 15 cm の 3 種類を作製した。鉄筋は 2 方向の格子状に配置した。コンクリートの圧縮強度は 42 N/mm^2 である。衝突速度は、既往の破壊評価式と実験結果の整合性を調べるため、衝突速度 20~99 m/s に設定して実験を行った。

図 4 に、一例として、衝突後の RC 版の破壊性状を示す。破壊モードについては、既往の研究 [4] における局部破壊の分類を参考に、RC 版の破壊性状において表面の衝突部だけが破壊したものを表面破壊、裏面が剥離したものを裏面剥離、飛翔体が完全に RC 版を通り抜けたものを貫通と判定した。破壊の版厚 12 cm のケースから、実験ケース M8.3-12-20 (衝突速度 20 m/s) で

は RC 版の裏面に中心から放射状のひび割れと、直径約 200 mm の円周状のひび割れが生じている。衝突速度を 40 m/s へ増加させた実験ケース M8.3-12-40 では剥離片が生じたが、RC 版の断面をみると中心部のコンクリート塊は鉄筋で押さえられて飛散せずに残留している。さらに衝突速度を 83 m/s へ増加させた実験ケース M8.3-12-83 では、衝突部に貫通孔が生じているが、飛翔体は鉄筋で押さえられたため完全に貫通していなかった。実験ケース M8.3-12-99 (衝突速度 99 m/s) では、飛翔体が RC 版を完全に通り抜けて貫通した。版厚 15 cm のケースにおいても版厚 12 cm のケースと同様に、衝突速度が小さい実験ケースでは RC 版裏面の中心から放射状および円周状のひび割れが生じ、衝突速度が増大すると裏面の剥離が生じている。衝突速度 83 m/s の実験ケース M8.3-15-83 では飛翔体は完全に貫通していないが、貫通孔が生じる結果となった。なお、裏面剥離が生じた実験ケース M8.3-15-52 (衝突速度 52 m/s) では、版厚 12 cm のケースと同様に中心部のコンクリート塊は飛散せず、かぶりコンクリートのみが飛散している。

3. 鉄筋コンクリート版の破壊に関する数値シミュレーション

解析は、中心差分法によって時間積分を行う汎用の衝撃解析コードである ANSYS® AUTODYN® を用いて行った。実験のモデル化については、計算時間の短縮を図るために実験条件の対称性を考慮して 1/4 モデルを作成した。

図 5 に衝突実験の解析モデルを示す。剛飛翔体の先端部および胴体部については、1 節点 3 自由度の 6 面体ソリッド要素を用いて要素分割を行い、総節点数および総要素数はそれぞれ 2,201 および 1,701 である。コンクリート要素の要素寸法については $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}$ とした。版厚 9 cm、12 cm および 15 cm における RC 版の総節点数はそれぞれ 234,099、308,025 および 381,951 で

実験ケース	M8.3-12-20		M8.3-12-40		M8.3-12-83		M8.3-12-99									
破壊性状	表面		断面		表面		断面		表面		断面		表面		断面	
	裏面		裏面		裏面		裏面									
	実験ケース	M8.3-15-27		M8.3-15-42		M8.3-15-52		M8.3-15-83								
	破壊性状	表面		断面		表面		断面		表面		断面		表面		断面
裏面			裏面		裏面		裏面									

図4 RC版の破壊性状

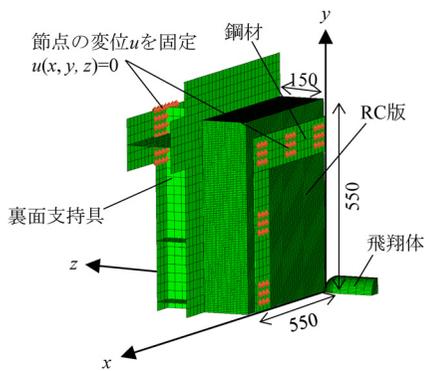


図5 RC版の解析モデル

あり、総要素数はそれぞれ 217,800, 290,400 および 363,000 である。RC 版の裏面支持具については、1 節点 5 自由度の 4 角形平板シェル要素を用いてモデル化した。また、各要素における積分点は 1 次の低減積分とした。飛翔体、コンクリート、裏面支持具および平板鋼材の境界面については、パネルティ法による接触面処理を行った [5]。RC 版における鉄筋は、要素長

5 mm の 1 節点 6 自由度のオイラーはり要素でモデル化し、鉄筋とコンクリートの付着については、コンクリート要素と鉄筋の節点を完全結合した。また、初期条件として、各ケースの衝突速度を飛翔体の全節点に与えた。なお、本衝突速度における RC 版の応答時間は十数 ms と短く、また重力に比べて衝突による荷重は数百倍であるため、本解析では減衰と重力の影響は無視している。

コンクリートは高い圧力や大きな変形速度を受けると強度が増加することが知られている。また、引張変形時の強度は圧縮変形時の強度の約 1/10 であり、脆く壊れる特徴がある。一方、鋼材は、降伏応力に達すると粘り強く変形する特徴を有する。数値シミュレーションにおいては、これらの特徴を反映した数値モデルを用いている。詳細は、文献 [5] を参照していただきたい。

版厚 15 cm の衝突実験における表面破壊の実験ケース M8.3-15-27 と、裏面剥離が生じた実験ケース M8.3-15-52 について解析を行った。図 6 および図 7 に、剛

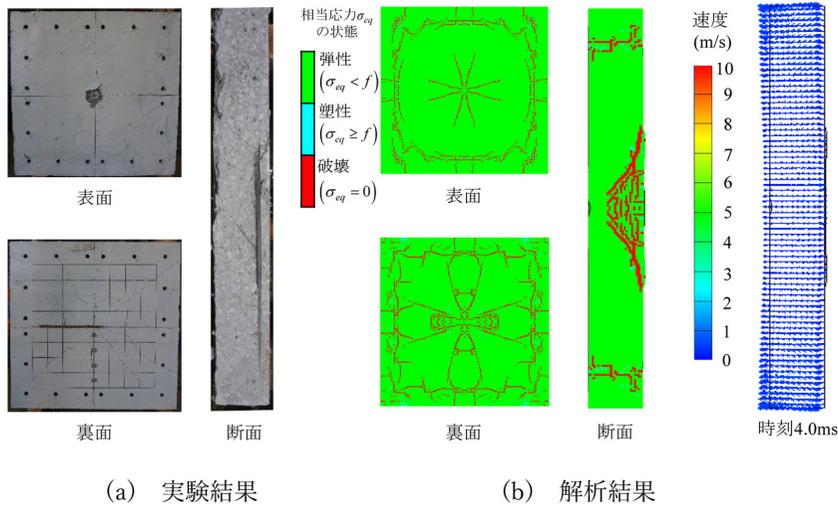


図6 RC版の破壊性状(実験ケース M8.3-15-27, 破壊モード: 表面破壊)

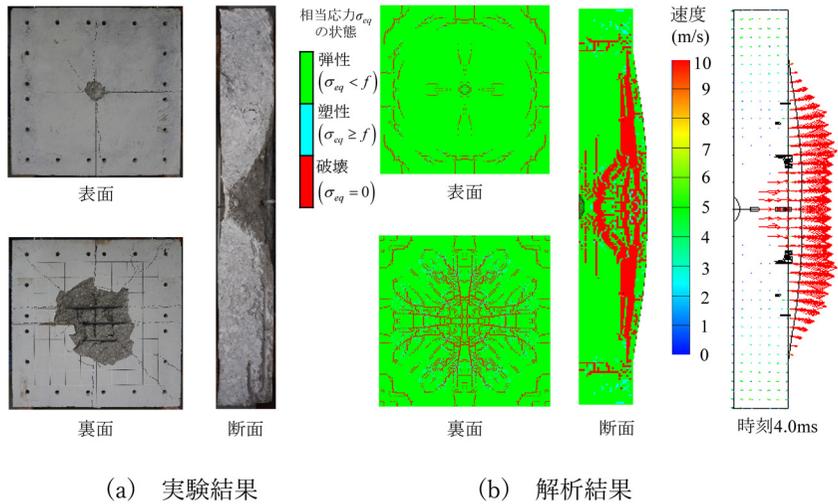


図7 RC版の破壊性状(実験ケース M8.3-15-52, 破壊モード: 裏面剥離)

飛翔体のケースにおけるRC版の損傷状況の比較を示す。図6に示す実験ケース M8.3-15-27 に対しては、RC版試験体の表面および裏面に大きく開口しているひび割れは認められず、断面には斜めひび割れが生じている。解析結果においても表面および裏面に破壊判定されている要素はあるが、局所的な破壊の形成には至っていない。また、断面には衝突部付近から斜めに破壊領域が広がっている。また、RC版断面の速度分布をみると、時刻4.0msにおいてはRC版全体が応答することによる約1m/s程度の速度が衝突方向と反対の方向に生じている。以上から、実験結果と同様に、裏面剥離は生じていないものと判定した。図7に示す実験ケース M8.3-15-52 に対しては、解析結果のRC

版の表面および裏面における破壊領域はさらに拡大し、断面においては斜めひび割れの内側の要素の多くが破壊判定されており、実験で観察されたような斜めひび割れの内側が剥離片となった状態に類似している。また、速度分布をみると、時刻4.0msにおいてRC版の全体には速度はほとんど生じていないが、斜めひび割れの内側に位置する裏面の要素には10m/s以上の速度が生じており、実験において生じたRC版の裏面剥離と対応している。すなわち、実験において裏面剥離した状態を解析によって再現したものと考えられる。以上のように、適切な解析モデルを構築することにより、実験で確認されたRC版の破壊モードを再現できることがわかる。

4. 鉄筋コンクリート版の脆弱性評価

飛翔体の衝突条件とコンクリートの圧縮強度にばらつきが存在するという前提で、局部破壊の破壊確率の算定とフラジリティ（脆弱性）評価を行った。局部破壊は、表面破壊・貫入、裏面剥離、貫通の破壊モードに区分され、モンテカルロシミュレーションを用いてこれらの値とばらつきを算定した。さらに、コンクリートの版厚を変更した場合について、それぞれの破壊モードの発生確率を算定し、フラジリティ評価を行った。

表面破壊・貫入、裏面剥離、貫通の破壊モードを予測するために多くの実験式が提案されている。局部破壊に対する破壊確率の算定においては、以下に示す修正 NDRC 式 [6] と Chang 式 [7] を用いることとした。

修正 NDRC 式の貫入深さ x は、剛飛翔体が無限厚さのコンクリート版に衝突した際の力のつり合いに基づいて定式化されている。裏面剥離限界版厚 s は、貫入深さ x を変数とした実験回帰式である。修正 NDRC 式による貫入深さは以下のように表される。

$$G\left(\frac{x}{D}\right) = 3.813 \times 10^{-5} \frac{NM}{D\sqrt{f'_c}} \left(\frac{V_0}{D}\right)^{1.8} \quad (1a)$$

$$G\left(\frac{x}{D}\right) = \left(\frac{x}{2D}\right)^2 : \frac{x}{D} \leq 2 \quad (1b)$$

$$G\left(\frac{x}{D}\right) = \frac{x}{D} - 1 : \frac{x}{D} \geq 2 \quad (1c)$$

ここに、 x ：貫入深さ (m)、 D ：飛翔体の直径 (m) ($D \leq 0.405$ m)、 M ：飛翔体の質量 (kg) ($0.005D^3 \sim 0.166D^3$ kg)、 V_0 ：飛翔体の衝突速度 (m/s) (152~914 m/s)、 S ：飛翔体の先端形状に関する係数、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度 (N/mm²) とする。

また、修正 NDRC 式による裏面剥離限界版厚 s の算定式を以下に示す。

$$\frac{s}{D} = 7.91 \left(\frac{x}{D}\right) - 5.06 \left(\frac{x}{D}\right)^2 : \frac{x}{D} \leq 0.65 \quad (2a)$$

$$\frac{s}{D} = 2.12 + 1.36 \left(\frac{x}{D}\right) : 0.65 \leq \frac{x}{D} \leq 11.75 \quad (2b)$$

修正 NDRC 式による貫通限界版厚 e は以下のように表される。

$$\frac{e}{D} = 1.32 + 1.24 \left(\frac{x}{D}\right) : \frac{x}{D} \geq 1.35 \quad (3a)$$

$$\frac{e}{D} = 3.19 \left(\frac{x}{D}\right) - 0.718 \left(\frac{x}{D}\right)^2 : \frac{x}{D} \leq 1.35 \quad (3b)$$

表 1 飛翔体の荷重条件

項目	平均値	変動係数
衝突速度 V_0 (m/s)	140~300	0.1
直径 D (m)	0.1	0
質量 M (kg)	9	0
先端形状係数 S	1.14	0

表 2 コンクリート圧縮強度と変動係数

項目	平均値	変動係数
圧縮強度 (N/mm ²)	30	0.1

Chang 式による裏面剥離限界版厚 s の算定式を以下に示す。

$$\frac{s}{D} = 1.84 \left(\frac{61}{V_0}\right)^{0.13} \left(\frac{MV_0^2}{D^3 f'_c \times 10^6}\right)^{0.4} \quad (4)$$

本式の適用範囲については、飛翔体の直径 D は 0.02~0.30 m、飛翔体の質量 M は 0.1~343 kg、飛翔体の衝突速度 V_0 は 16~312 m/s である。

これらの実験式では、衝突作用の特性値は飛翔体の質量、速度、直径および先端形状であり、構造抵抗の特性値としてはコンクリートの圧縮強度となる。そこで、これらの衝突条件に対して、各変数は正規分布に従うと仮定して、表 1、表 2 に示す変動係数を与えてモンテカルロシミュレーションを行った。変動係数の値は、衝突条件のシナリオ、実験データおよび被災値の統計データの分析によって詳細に決定されるべきものである。ここでは一例として、飛翔体の条件に関しては衝突速度に変動係数 0.1 を与え、構造部材の抵抗に関しては、既往の統計値を参考にしてコンクリートの圧縮強度に変動係数 0.1 を与えた。

外力と強度のばらつきが局部破壊に与える影響を調べるため、衝突速度 140~300 m/s の範囲で 1 m/s ずつ速度を増加させ、各速度に対して試行回数を $N = 10^5$ 回とし、貫入量、裏面剥離および貫通限界版厚を算定した。図 8 に修正 NDRC 式を用いて算定した貫入深さ、裏面剥離限界版厚、貫通限界版厚、および Chang 式を用いて算定した裏面剥離限界版厚を示す。計算結果には、平均値、累積確率が 5% となる値、95% となる値を示している。図から、速度が大きくなるほど貫入量や各限界版厚のばらつきも大きくなるのがわかる。また、図 8(b)、(c) に示す裏面剥離限界版厚については、修正 NDRC 式よりも Chang 式の方がばらつきが大きいことから、算定に用いる式によって安全性のレベルが異なるため、十分に検討する必要がある。本手

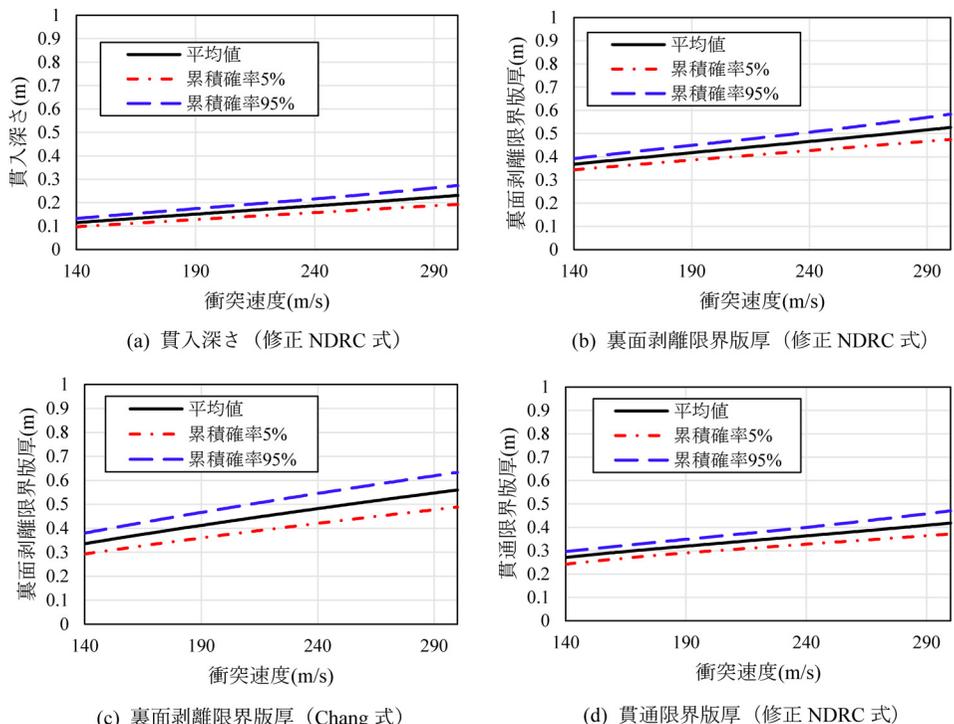


図 8 局部破壊の算定結果 (平均値, 累積確率 5%, 95% 値)

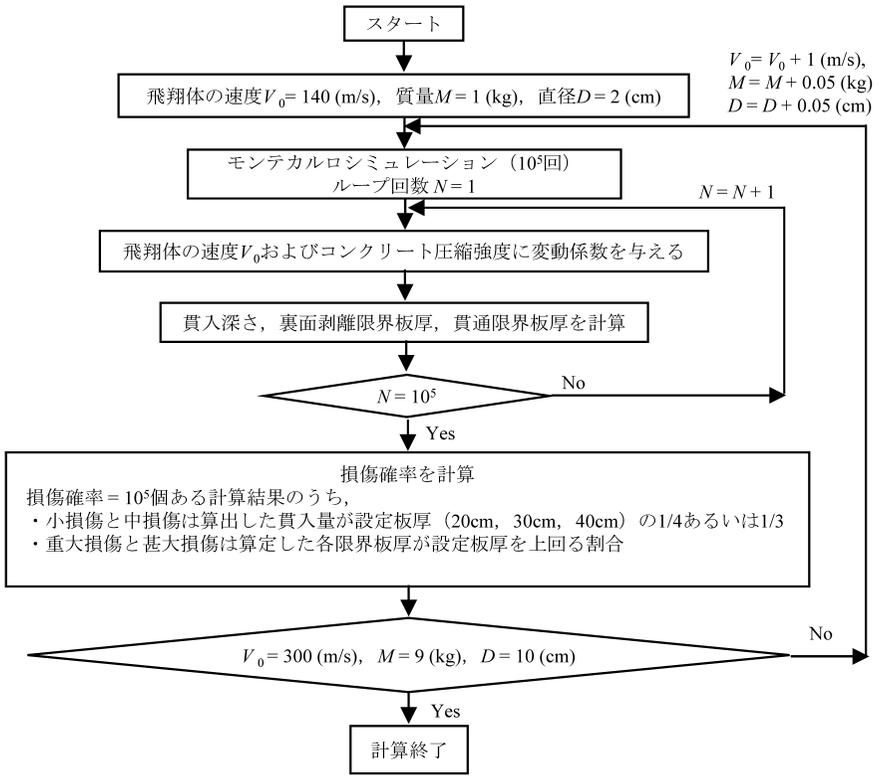


図 9 フラジリティ曲線算定のフロー

法を用いると、設定した許容破壊確率 P_{fa} に対応するコンクリート版厚を算出することも可能である。たとえば、飛翔体の速度 $V_0 = 150 \text{ m/s}$ に対してコンクリート版の貫通に関する許容破壊確率を $P_{fa} = 1 \times 10^{-3}$ と設定した場合、試行計算 $N = 10^5$ の結果の中から 10^2 番目に大きい値が、 P_{fa} に対応する版厚となる。

構造物のフラジリティ評価を行うためには、外力の大きさを代表する物理量（代表値）が必要である。たとえば地震荷重であれば、代表値として最大加速度がよく用いられる。局部破壊においては、実験式の変数からわかるように飛翔体の質量、速度が破壊へ大きな影響を与える。既往の局部破壊評価式の多くが飛翔体の運動エネルギーを変数として定式化されていることから、飛翔体の運動エネルギーを外力の代表値とした。

表 3 飛翔体の荷重条件

項目	平均値	変動係数
衝突速度 V_0 (m/s)	140~300	0.1
直径 D (cm)	2~10	0
質量 M (kg)	1~9	0
先端形状係数 S	1.14	0

表 4 コンクリート圧縮強度と変動係数

項目	平均値	変動係数
圧縮強度 (N/mm^2)	36	0.1

図 9 に示すフローにしたがってフラジリティ曲線を算定した。まず、フラジリティ曲線を算定する RC 版の版厚を 20 cm, 30 cm, 40 cm とし、衝突速度の範囲は 140~300 m/s, 質量 M は 1~9 kg, 直径 D は 2~10 cm とした。この範囲の中で、飛翔体の衝突速度 V_0 を 1 m/s, 質量 M を 0.05 kg, 直径 D を 0.05 cm ずつ増加させ、合計 161 レベルの運動エネルギーを設定した。そのうえで、各運動エネルギーレベルに対して試行回数 $N = 10^5$ のモンテカルロシミュレーションを行うことで損傷確率を算定した。ここで、損傷レベルの設定については、次に示す 4 段階とした。一般的に、局部破壊は表面破壊・貫入、裏面剥離、貫通に区分されるが、既往の研究によると貫入量が部材厚の 1/4 あるいは 1/3 に達すると裏面剥離が発生するとの報告がある。そこで、損傷レベルとしては、①貫入量が部材厚の 1/4 (小損傷)、②貫入量が部材厚の 1/3 (中損傷)、③裏面剥離が発生 (重大損傷)、④貫通 (甚大損傷) の 4 段階とした。モンテカルロシミュレーションの中では、衝突速度とコンクリートの圧縮強度に変動係数を与えたうえで、修正 NDRC 式と Chang 式を用いて貫入量と各限界版厚を算定した。次に、小損傷と中損傷については算出した貫入量と設定版厚 (20 cm, 30 cm, 40 cm) の 1/4 あるいは 1/3 を比較し、重大損傷と甚大損傷については算定した各限界版厚と設定版厚を比較することで損傷レベルの発生確率を求めて損傷確率

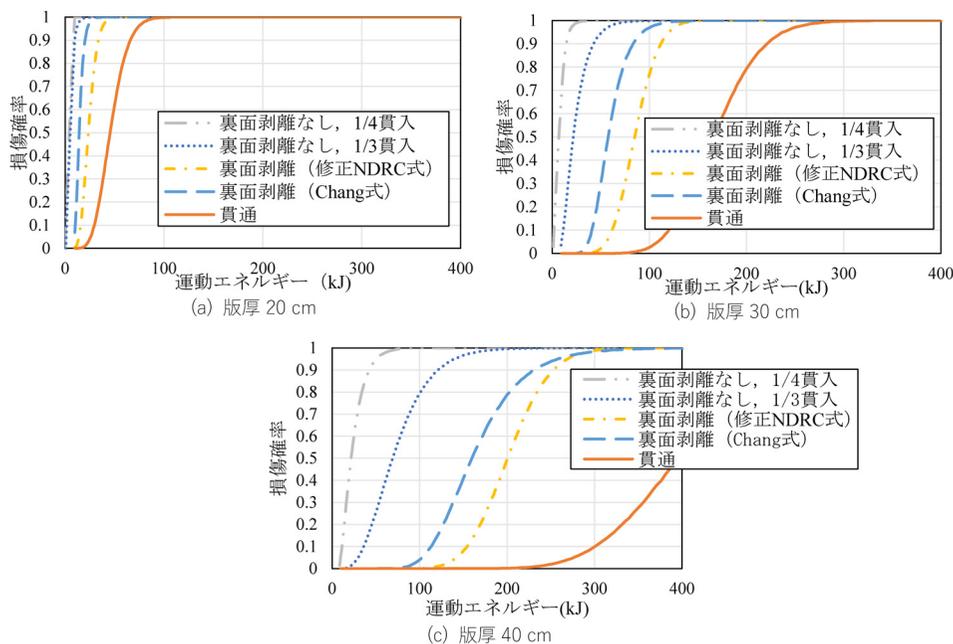


図 10 飛翔体の運動エネルギーを指標とした局部破壊のフラジリティ曲線

とした。

飛翔体の荷重条件を表 3 に示す。衝突速度 V_0 に変動係数 0.1 を与えた。コンクリートの圧縮強度は表 4 に示すように平均値を 36 N/mm^2 とし、変動係数 0.1 を与えた。版厚 20 cm, 30 cm および 40 cm に対するフラジリティ曲線を図 10 に示す。図から、いずれの版厚も飛翔体の運動エネルギーの増加とともに各損傷が進展することがわかる。版厚 20 cm の場合、運動エネルギーが 90 kJ を超えるとすべての損傷モードの発生確率が 1.0 となり、これ以上の運動エネルギーであると必ず貫通することを示している。一方、版厚 30 cm, 40 cm の場合は、版厚 20 cm の場合と比較して、設定した運動エネルギーの範囲で、損傷が徐々に進展した。なお、修正 NDRC 式で算出した損傷確率よりも Chang 式で算出した損傷確率の方が大きい。この理由は、Chang 式の方が計算結果の標準偏差が大きくなるためと考えられる。

5. おわりに

本稿では、竜巻飛来物の衝突を受ける鉄筋コンクリート (RC) 版を対象として、実験および数値シミュレーションによって RC 版の安全性評価を行った例を紹介した。また、リスク評価において必要となる RC 版の脆弱性 (フラジリティ) 評価を行った例を紹介した。紹

介した事例のように、想定した外力に対して、構造物がどの程度の安全性を有しているかを定量的に評価することが可能である。今後は、竜巻飛来物の質量、速度およびエネルギーなどの評価 (ハザード評価) を行うことができれば、リスク評価手法を確立することが可能であり、今後の発展を期待したい。

参考文献

- [1] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所, 平成 24 年 5 月 6 日に茨城県つくば市で発生した竜巻による建築物被害 (速報), 2012.
- [2] 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所, 平成 30 年台風第 21 号に伴う強風による建築物等被害現地調査報告 (速報), 2018.
- [3] 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, 2018 一部改定.
- [4] 電力中央研究所, 飛来物の衝突に対するコンクリート構造物の耐衝撃設計手法, 電力中央研究所報告, 総合報告 U24, 1991.
- [5] 片岡新之介, 別府万寿博, “飛翔体の座屈変形が RC 版の局部破壊特性に及ぼす影響に関する考察,” 土木学会論文集 A2 (応用力学), **74**, pp. L381–L392, 2018.
- [6] R. P. Kennedy, “A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects,” *Nuclear Engineering and Design*, **37**, pp. 183–203, 1976.
- [7] W. S. Chang, “Impact of solid missiles on concrete barriers,” *Journal of the Structure Division*, **107**, 257–271, 1981.