

# 鉄筋コンクリート版に対する剛飛翔体衝突による 局部破壊のフラジリティ評価

Fragility assessment of local damage for reinforced concrete members subjected to hard-projectile impact

川上洋介\*, 神田繁\*, 笠置昌寿\*, 宇賀田健\*, 別府万寿博\*\*

Yosuke Kawakami, Shigeru Kanda, Masatoshi Kasagi, Takeshi Ugata, Masuhiro Beppu

\*大成建設株式会社 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1 丁目)

\*\* 博 (工), 防衛大学校教授, 建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1 丁目)

キーワード: 鉄筋コンクリート, 衝突試験, フラジリティ, 局部破壊, 裏面剥離, 貫通

Keywords: Reinforced concrete, Impact Experiment, Fragility, Local damage, Scabbing, Perforation

## 1. はじめに

原子力発電所やその関連施設, 避難所施設等の重要構造物や防護施設は, 外部からの飛来物による衝撃荷重を考慮した設計が必要とされている<sup>1,2)</sup>. また, 構造設計標準は信頼性設計に基づく方向に向かっており<sup>3,4)</sup>, RC 部材の裏面剥離や貫通等の局部破壊に関するフラジリティ評価として, モンテカルロシミュレーションに基づく手法が提案されている<sup>5)</sup>. 本報告では, RC 部材の局部破壊のフラジリティを, 剛飛翔体の衝突試験結果に基づき統計的に評価する.

## 2. フラジリティ

信頼性設計法では, 荷重 (応答)  $R$  と耐力  $C$  に統計的変動を考慮して破壊確率や安全性指標を算定する.  $R$  および  $C$  は対数正規分布に近似されることが多く, 本報告でも  $\ln R \sim N(\ln \lambda_R, \zeta_R^2)$ ,  $\ln C \sim N(\ln \lambda_C, \zeta_C^2)$  と仮定する. ここで,  $(\lambda_R, \zeta_R)$  および  $(\lambda_C, \zeta_C)$  は, 荷重および耐力の中央値と対数標準偏差である. 性能関数を  $Z = C/R$  と定義すると,  $\ln Z \sim N(\ln \lambda_C - \ln \lambda_R, \zeta_Z^2)$  となる.  $\zeta_Z = \sqrt{\zeta_C^2 + \zeta_R^2}$  は荷重と耐力の対数標準偏差を合成したもので, 複合偏差と呼ぶ. 破壊確率は  $P(R > C)$  で,

$$P(R > C) = P(\ln Z < 0) = \Phi\left(\frac{\ln \lambda_R - \ln \lambda_C}{\zeta_Z}\right) \quad (1)$$

となる. ここで,  $\Phi$  は標準正規分布の確率分布関数である. すなわち, 破壊確率は, 耐力中央値  $\lambda_C$ , 複合偏差  $\zeta_Z$  の対数正規分布における, 荷重中央値  $\lambda_R$  の非超過確率として算出される. この荷重レベルと破壊確率の関係を一般的にフラジリティと呼んでいる. 本報告では, 耐力中

央値  $\lambda_C$  と, 複合偏差  $\zeta_Z$  を衝突試験結果に基づき推定する.

## 3. 衝突試験結果に基づくパラメータの推定

衝突試験結果の破壊モードを, 貫通, 裏面剥離, それ未満の 3 つの排反事象に分け, 多項反応モデルによる最尤法を用いて, フラジリティに係るパラメータを推定する<sup>6)</sup>. 所与の荷重  $x$  における, 各破壊モードの発生確率は次のように表せる.

$$P_p(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln \lambda_p}{\zeta_p}\right) \quad (2)$$

$$P_s(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \ln \lambda_s}{\zeta_s}\right) - P_p(x) \quad (3)$$

$$P_b(x) = 1 - P_s(x) - P_p(x) \quad (4)$$

添字  $p, s, b$  は, それぞれ貫通, 裏面剥離, それ未満の破壊モードを表す. ここで, 裏面剥離限界および貫通限界の評価式として, 次式に示す電中研式<sup>7,8)</sup>がある.

$$t_s = \alpha_s \alpha \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.13} \frac{(MV^2)^{0.4}}{d^{0.2} f_c^{0.4}} \quad (5)$$

$$\leftrightarrow v_s = \left(\frac{d^{0.2} f_c^{0.4} t}{\alpha_s \alpha M^{0.4} V_0^{0.13}}\right)^{\frac{1}{0.67}}$$

$$t_p = \alpha_p \beta \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0.25} \left(\frac{MV^2}{df_c}\right)^{0.5}$$

$$\leftrightarrow v_p = \left(\frac{d^{0.5} f_c^{0.5} t}{\alpha_p \beta M^{0.5} V_0^{0.25}}\right)^{\frac{1}{0.75}} \quad (6)$$

ここに,  $t_s$  および  $t_p$ : 裏面剥離および貫通の限界厚さ (m),

$v_s$ および $v_p$ ：裏面剥離および貫通の限界速度(m/s),  $t$ ：版厚(m),  $V_0$ ：基準速度(60.96m/s),  $V$ ：衝突速度(m/s),  $M$ および $d$ ：飛来物の質量(kg)および直径(m),  $f_c$ ：コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>),  $\alpha_s = 6.96 \times 10^{-3}$ ,  $\alpha_p = 8.96 \times 10^{-4}$ ,  $\alpha$ ：裏面剥離の形状係数(平坦:1.00, 球状:1.13, 鋭い:1.18),  $\beta$ ：貫通の形状係数(平坦:1.00, 球状:1.15, 鋭い:1.21)である。本評価では、耐力中央値を衝突速度で表し、電中研式の係数倍で、 $\lambda_p = \gamma_p v_p$ および $\lambda_s = \gamma_s v_s$ と仮定する。なお、(5)式および(6)式によって、厚さと衝突速度とは相互変換が可能であり、厚さに対する係数は $\gamma_p^{-0.75}, \gamma_s^{-0.67}$ , 複合偏差は $0.75\zeta_p, 0.67\zeta_s$ となる。

### 3.1 衝突試験結果の整理

各衝突試験結果の破壊モードの発生確率を(2)式~(4)式にて算出し、最尤法にて $(\gamma_p, \zeta_p)$ および $(\gamma_s, \zeta_s)$ を推定する。パラメータ推定には、RC版に対する剛飛翔体の衝突試験結果が示されている既往の研究<sup>7)18)</sup>を参照する。これらの試験は、それぞれ異なる条件で実施されているため、そのままだと各破壊モードを厚さと衝突速度の関係で一様に示すことはできない。そこで、(5)式および(6)式の電中研式に基づき、各試験の衝突速度を、圧縮強度25N/mm<sup>2</sup>のRC版に対する直径27cm, 質量135kg, 先端球状の剛飛翔体衝突試験相当(以下、統一条件)に変換する。なお、質量135kgは原子力発電所の竜巻影響評価ガイドリの鋼製材を参照して設定した。各試験の衝突速度を $v$ , 対応する裏面剥離限界速度および貫通限界速度を $v_s$ および $v_p$ とし、統一条件に変換後の衝突速度を $v'$ , 対応する裏面剥離限界速度および貫通限界速度を $v'_s$ および $v'_p$ とする。条件変更前後で裏面剥離限界と貫通限界との相対的關係が維持されるものと仮定すると、 $v'$ は次式で表現できる。

$$\log v' = \log v'_s + \log \frac{v}{v_s} \cdot \log \frac{v'_p}{v'_s} / \log \frac{v_p}{v_s} \quad (7)$$

図-1に、各試験の衝突速度を電中研式に基づき統一条件に変換し、各破壊モードを厚さと衝突速度の関係で一様に示したものを示す。同図には、電中研式による裏

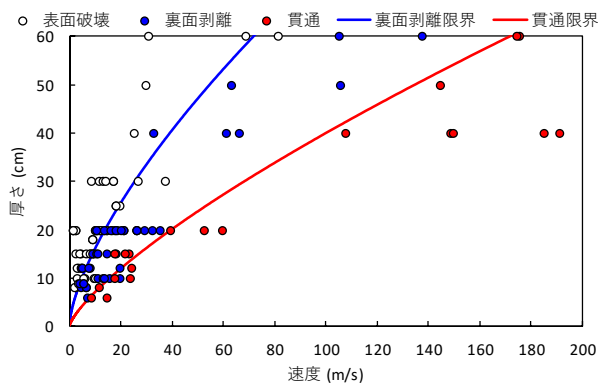


図-1 電中研式に基づき統一条件に変換した衝突試験結果

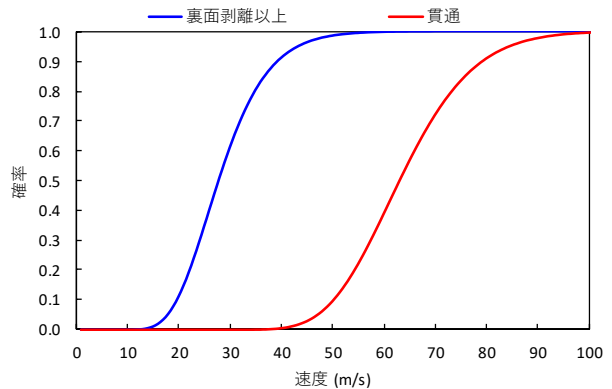
面剥離限界と貫通限界も示してある。この図から、各試験結果は概ね電中研式と整合しているが、限界曲線未満で局部破壊が生じているものも一部見受けられる。

### 3.2 パラメータの推定

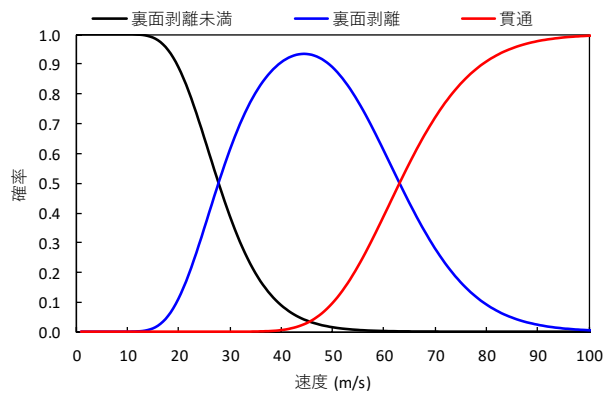
これらの試験結果に基づきパラメータを推定した結果、貫通に係るパラメータとして $(\gamma_p, \zeta_p) = (0.949, 0.178)$ , 裏面剥離に係るパラメータとして $(\gamma_s, \zeta_s) = (1.090, 0.270)$ が得られた。

図-2に、統一条件における厚さ30cmのRC版に対する fragility および各破壊モードの発生確率を示す。同図より、衝突速度50m/sの場合、貫通となる確率が9.5%, 裏面剥離となる確率が89%, 裏面剥離未満である確率が1.5%であることが分かる。

図-1では各試験の衝突速度を電中研式に基づき統一条件に変換したが、図-3には各試験の衝突速度を、推定した耐力中央値に基づき統一条件に変換したものを示す。同図には耐力の95%超過値も併せて示してある。各試験結果は95%超過値に概ね包絡されており、耐力の95%超過値を局部破壊の限界曲線と考えることも可能である。図-3より、衝突速度50m/sの場合、裏面剥離を



(a) フラジリティ



(b) 各破壊モードの発生確率

図-2 統一条件における厚さ30cmのRC版に対する局部破壊の fragility

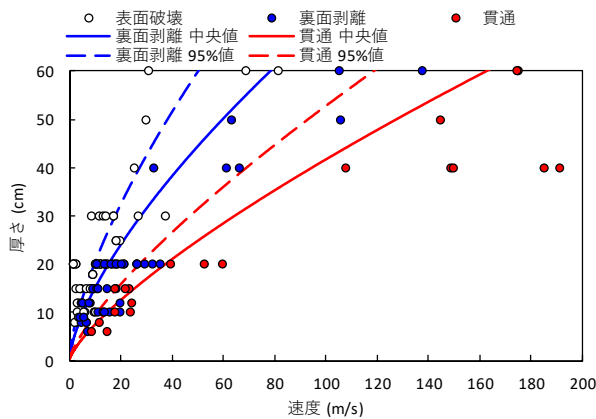


図-3 耐力中央値に基づき統一条件に変換した衝突試験結果

95%生じさせないためには、厚さ 60cm 程度が必要となることが分かる。

#### 4. フラジリティ評価法の違いによる影響の確認

衝突試験結果に基づき統計的に評価した局部破壊のフラジリティと、モンテカルロシミュレーションによって評価されたフラジリティ<sup>5)</sup>を比較する。文献<sup>5)</sup>を参照し、モンテカルロシミュレーションによって評価されたフラジリティと同じ、直径 6cm、質量 5kg、先端球状の剛飛翔体に対する、圧縮強度 36N/mm<sup>2</sup>の RC 版(厚さ 20cm、30cm、40cm)のフラジリティを評価する。荷重の大きさの代表値も文献<sup>5)</sup>と同様に、飛翔体の質量や速度等が破壊へ大きな影響を与え、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とする。

図-4に、フラジリティ評価結果を示す。文献<sup>5)</sup>と概ね似た傾向となっているが、本評価の傾きの方が緩やかであり、複合偏差が相対的に大きくなっていると考えられる。

モンテカルロシミュレーションでは、既往の実験式のパラメータである、飛翔体の衝突速度、直径、質量、およびコンクリート圧縮強度を増加させながら、衝突速度とコンクリート圧縮強度に変動係数 0.1 を考慮してばらつかせている。一方、本評価における複合偏差には、荷重と応答の変動が含まれており、実験式のパラメータには直接的には含まれていないコンクリート剛性、単位体積重量、骨材寸法、鉄筋種別、かぶり厚さや配筋状況、試験体の支持状況等の変動要因等、更には、荷重や応答の本質的なランダム性も反映されたものとなっている。

このように、衝突試験結果から統計的に評価したフラジリティには種々の不確かさが反映されており、これは、モンテカルロシミュレーションを実施する際にも参考となるものと考えられる。また、モンテカルロシミュレーションでは変動成分を特定することができるため、試験

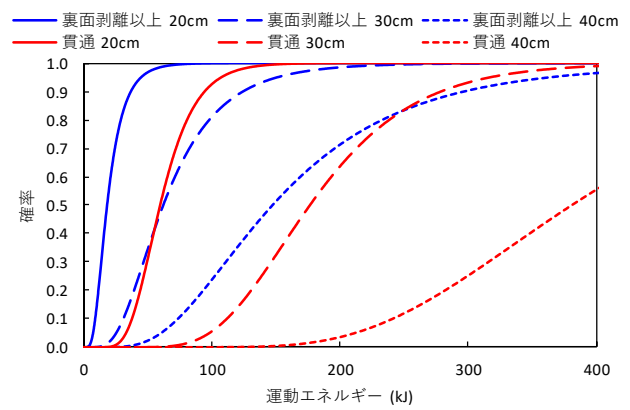


図-4 飛翔体の運動エネルギーを指標とした局部破壊のフラジリティ

結果から評価した複合偏差の要因分析に利用できると思われる。

#### 5. まとめ

信頼性設計に資するため、剛飛翔体衝突を受ける RC 版の局部破壊のフラジリティを、衝突試験結果に基づき統計的に評価した。耐力中央値の関数形には電中研式を参照した。結果として以下の成果を得た。

- (1) 局部破壊に対する耐力の確率分布を評価したことで、耐力の 95%超過値等を、局部破壊の限界曲線として考えることが可能となった。
- (2) 局部破壊に対する荷重と応答の不確実性を評価することで、パラメータに起因する変動性だけではなく、荷重や応答の本質的なランダム性を反映したフラジリティを評価することができた。
- (3) 試験結果に基づき統計的に評価したフラジリティと、モンテカルロシミュレーションに基づき評価したフラジリティは補完的な関係にあり、両者を適切に活用することで、衝突現象に対する局部破壊の変動要因分析が可能となるものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻影響評価ガイド、原規技発第 1909069 号、制定 2013、改定 2019。
- 2) 日本機械学会：発電用原子力設備規格、竜巻飛来物の衝撃荷重による構造物の構造健全性評価手法ガイドライン、2019。
- 3) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本、2002。
- 4) 古田均、佐藤尚次：構造設計基準の合理化とその国際標準化、土木学会論文集、No.710、pp.1-7、2002。
- 5) 別府万寿博、高橋満、永田真、市野宏嘉：爆風圧および飛散物衝突を受ける鉄筋コンクリート部材の性能設計およびフラジリティ評価法の一提案、構造工学論文集、Vol.63A、pp.1121-1131、2017。

- 6) 望月智也, 中村孝明: 多項反応モデルによる地震時損傷度曲線の統計的推定, 土木学会第2回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集, pp.47-50, 2000.
- 7) 大沼博志, 伊藤千浩, 佐藤宏一, 高野博: 鉄筋コンクリートスラブの衝撃応答特性および有限要素法による解析, 電力中央研究所報告, 1985.
- 8) 伊藤千浩, 大沼博志, 白井孝治: 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, 1991.
- 9) 伊藤千浩, 白井孝治, 大沼博志: 剛飛来物の衝突に対する鉄筋コンクリート構造物の設計評価式, 土木学会論文集, No.507, pp.201-208, 1995.
- 10) 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 高速衝突を受けるポリプロピレン短繊維補強コンクリートの耐衝撃性能, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, No.684, pp.319-327, 2013.
- 11) 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 剛飛翔体の高速衝突を受けるコンクリート板の局部破壊性状における短繊維補強と鉄筋補強の効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013.
- 12) 片岡新之介, 上野裕稔, 別府万寿博, 市野宏嘉: 剛飛翔体の中速度衝突を受けるコンクリート版の衝撃応答に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.62A, 2016.
- 13) Shinnosuke Kataoka, Masuhiro Beppu, Hiroyoshi Ichino, Tatsuya Mase, Tatsuya Nakada and Ryo Matsuzawa: Failure behavior of reinforced concrete slabs subjected to moderate-velocity impact by a steel projectile, International Journal of Protective Structures, Vol.8, No.3, pp.384-406, 2017.
- 14) 笠置昌寿, 太田成, 宇賀田健, 別府万寿博, Pierluigi Olmati, 川上洋介, 片岡新之介: 剛飛翔体の中速度衝突を受ける鉄筋コンクリート版の衝撃応答に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.21591, 2019.
- 15) 川上洋介, 神田繁, 笠置昌寿, 宇賀田健, 別府万寿博: 剛飛翔体衝突を受ける鉄筋コンクリート部材における局部破壊のフラジリティ評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, No.21591, 2020.
- 16) 太田良巳, 高橋千明, 蔡飛, 鈴木哲夫: 柔飛翔体の衝突による鉄筋コンクリート板の局部損傷評価に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.890-900, 2019.
- 17) 片岡新之介: 飛来物衝突を受けるRC版およびUFCパネルの局部破壊評価法に関する研究, 大学改革支援・学位授与機構, 博士論文, 2020.
- 18) 河野克哉, 別府万寿博, 岸良竜, 溝口愛実, 落合昂雄, 小亀大佑: 高速飛翔体衝突に対する繊維補強PFCパネルの防護性能, 太平洋セメント研究報告, 第180号, pp.31-40, 2021.