

# Rieraの方法による柔飛翔体衝突時の強度分布推定

## Estimation of Structural Strength of Soft Projectile at Impact Using Riera Method

相馬和貴\*、山田和彦\*\*、澤田祥平\*\*\*、岡安隆史\*\*\*\*、安本宏\*\*\*\*\*

Kazuki Soma, Kazuhiko Yamada, Shohei Sawada, Takashi Okayasu, Hiroshi Yasumoto

\* 工修、鹿島建設株式会社原子力部 (〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)

\*\* 博士(工学)、山口大学大学院教授、創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

\*\*\* Ph.D、鹿島建設株式会社原子力部 (〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)

\*\*\*\* 工修、鹿島建設株式会社技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

\*\*\*\*\* 工修、株式会社小堀鐸二研究所構造研究部 (〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

Key Words: impact load, soft projectile, strength distribution

キーワード: 衝撃荷重、柔飛翔体、強度分布

### 1. はじめに

構造物に物体が衝突する際に生じる衝撃において、比較的剛な物体(剛飛翔体)と柔な物体(柔飛翔体)が衝突する場合には、同じ運動量を有していてもその衝撃荷重特性は大きく異なる。

剛飛翔体が剛な壁に衝突する場合には、衝撃荷重の作用時間が極めて短く、非常に大きいピークを有する荷重が作用する。一方、柔飛翔体の場合には、衝突時に飛翔体自体が損傷することで衝突エネルギーを吸収する他、長い時間衝撃荷重が作用し、荷重ピークが小さくなる性質がある。また、柔飛翔体では、総質量や衝突時速度以外にも、その強度分布や質量分布が衝撃荷重特性に大きく影響する。

剛板に飛翔体が衝突する時の強度特性を考慮した衝撃荷重について、Riera<sup>1)</sup>は1次元のモデルにて評価法(Rieraの方法)を提案しており、耐衝撃設計の検討にしばしば用いられてきた。この方法では、飛翔体の構成として、衝突軸方向の質量分布と強度分布が必要になる。このうち、質量分布は、比較的高い精度で設定できるが、強度分布については、座屈、局部破壊形式、材料のひずみ速度依存効果など様々な因子が影響するため、容易に設定することはできない。

著者らは、総質量25kg、全長2.6m、直径0.24mの薄肉鋼製円筒型の柔飛翔体を製作し、①各部パーツの衝突軸方向の静的強度特性を確認するための静的加力実験、②50m/s、100m/s、160m/sの3段階の速度による、剛なターゲット鋼板への衝突実験を行った。

本論は、これらの計測記録を用いて、柔飛翔体が衝突する時の強度分布を推定し、その結果について考察したものである。

### 2. 柔飛翔体の概要

製作した柔飛翔体を図-1に示す。飛翔体は総質量25kg、全長2.6m、直径0.24mのステンレス鋼板(SUS304)製であり、3つの部分(前部、中央部、後部)に分けられる。前部は円錐台状であり、板に多くの穴をあけて強度を小さくしている。中央部には衝突時に大きな衝撃荷重が作用するように錘を付加した。後部は発射時の加速度に耐える強度を確保するために板を厚くし、質量調整のための錘を付加している。図-2に衝突軸方向の質量分布を示す。

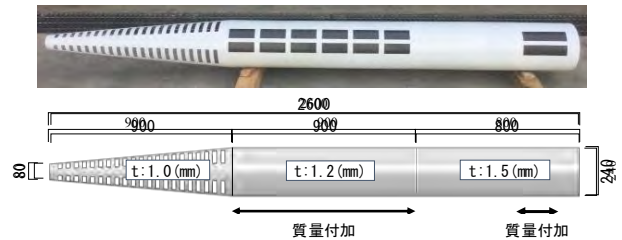


図-1 柔飛翔体の概要

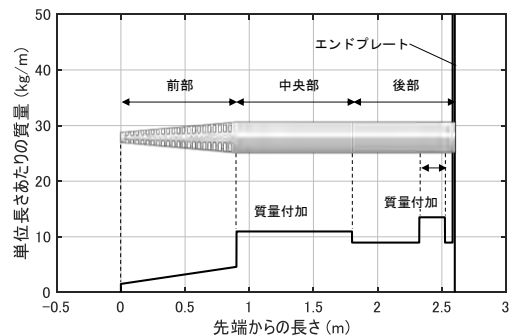
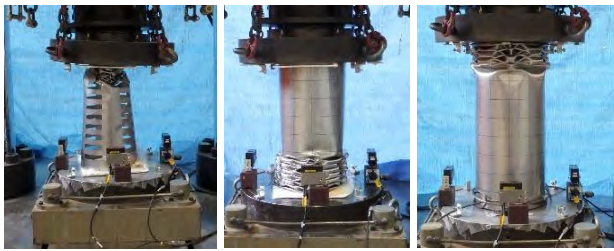


図-2 柔飛翔体の質量分布

### 3. 柔飛翔体各部の静的加力実験

柔飛翔体の3つの部分（前部、中央部、後部）ごとに静的加力実験用の試験体を作成し、変位制御の下で加力実験を実施した。写真-1に実験の実施状況、図-3に荷重-変形関係および座屈開始後のデータから求めた平均強度を示す。図-3 (a) 前部の平均的な強度は、形状が円錐台状であることを踏まえて、最小二乗法で算定した。

いずれの試験体も幾度もの座屈を繰り返し、荷重-変形曲線は波状となった。中央部と後部では、波状ピーク間隔がほぼ一定となり、一回の座屈で複数の皺形状が生まれる高次の座屈モードとなった。



(a) 前部 (b) 中央部 (c) 後部

写真-1 静的加力実験の実施状況

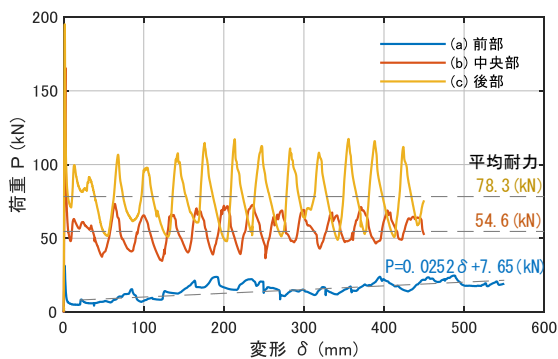


図-3 静的加力実験による荷重-変形関係

### 4. 柔飛翔体の衝突実験

製作した柔飛翔体を衝突させる実験は VTT フィンランド技術研究センター<sup>2)</sup>にて実施した。実験では、十分に剛とみなせる板厚 70mm の鋼板をターゲットとして、これをロードセル 3 点で支持することで、衝突時の荷重を測定した。ターゲット鋼板と設置したロードセルの概要を図-4 に示す。衝突時の速度は、衝突直前の約 1.6m 間にレーザー測定器を配置し、照射光を飛翔体が通過する時間差の計測により算定した。

表-1 に実験条件、衝突時速度および衝突後の飛翔体長さを示す。柔飛翔体は、薄い鋼板で構成されるため、衝突によって局部座屈を繰り返し、全長が短くなる。Case 1 では飛翔体の前部、Case 2 では飛翔体の前部と中央部の一部、Case 3 では飛翔体の前部、中央部と後部の一部が座屈した。

写真-2 に Case 3 の飛翔体衝突時の状況、写真-3 に衝突後の飛翔体外観を示す。いずれのケースでも、飛翔体は偏心することなく、ほぼ垂直にターゲットに衝突した。Case2 と Case3 の中央部および後部では、主として皺形状が均一な 1 次の座屈モードとなった。

図-5 に 3 点のロードセルの合計による荷重時刻歴を示す。荷重時刻歴では、飛翔体の衝突時運動量と力積に著しい誤差を生じさせるパルス成分を除去した上で、各実験ケースに共通する 700Hz 前後の振動成分に対して、これをターゲット鋼板側の固有振動成分とみなして除去するべく、500Hz~900Hz のバンドストップフィルタを施した。なお、フィルタリング前後において、力積の履歴がほとんど同一とみなせることを別途確認している。

図-6 に荷重時刻歴から計算した力積の時刻歴および衝突時の飛翔体運動量を示す。Case1 と Case3 では運動量と最終的な力積の値が良く一致するのに対して、Case2 では 30%程度力積が不足している。

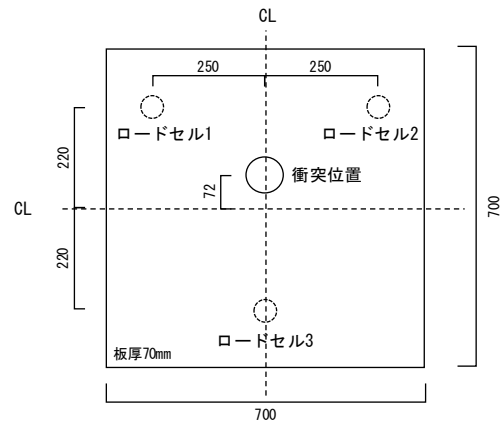
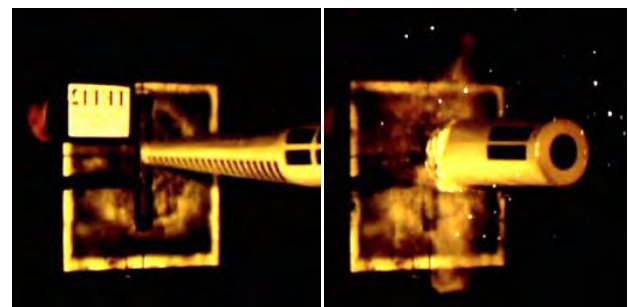


図-4 ターゲット鋼板とロードセル設置の概要

表-1 実験速度と衝突実験結果

| ケース名   | 設定速度(m/s) | 衝突速度(m/s) | 衝突後長さ(mm)    |
|--------|-----------|-----------|--------------|
| Case 1 | 50        | 54.5      | 1630 (1590)* |
| Case 2 | 100       | 103.1     | 1160 (1060)* |
| Case 3 | 160       | 160.6     | 751 (570)*   |

\* ( )内は、座屈していない部分の長さ



衝突時 衝突終了時  
写真-2 Case 3 飛翔体衝突時の状況

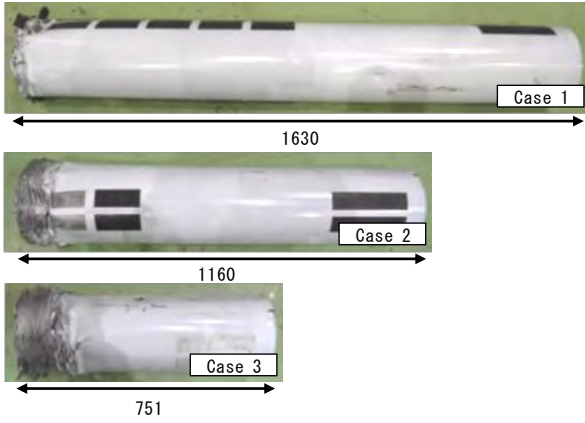


写真-3 衝突後の飛翔体外観

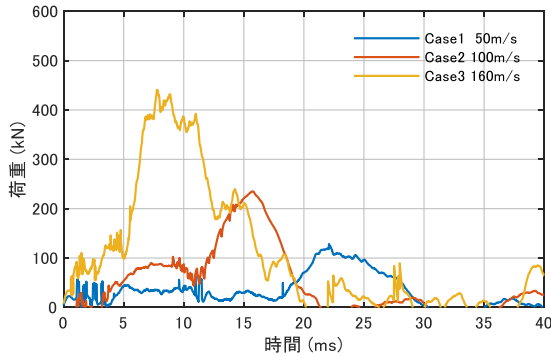


図-5 衝突実験による荷重時刻歴

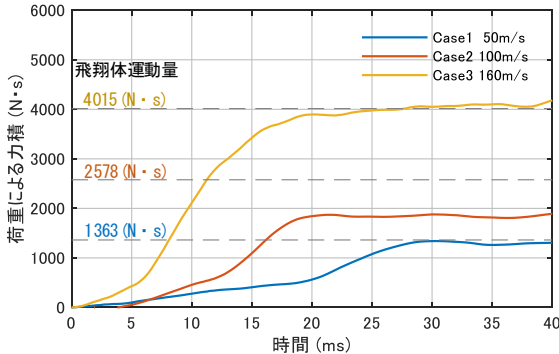


図-6 衝突実験による力積の時刻歴

## 5. Riera の方法による強度分布の推定法

Riera の方法では、衝突現象を 1 次元でモデル化し、 $x(t)$  を時刻  $t$  における飛翔体衝突面の位置（初期形状先端からの長さ）、 $F(t)$  を時刻  $t$  での衝撃荷重、 $P(x(t))$  を衝突面における強度、 $\alpha$  を有効質量の係数（本論では 1 とする）、 $\mu(x(t))$  を衝突面における飛翔体の単位長さあたりの質量として、次式のように表される。

$$F(t) = P(x(t)) + \alpha \mu(x(t)) \{\dot{x}(t)\}^2 \quad (1)$$

衝突していない部分の質量  $M(x(t))$  および加速度  $\ddot{x}(t)$  は、飛翔体全長を  $L$  として次式で与える。

$$M(x(t)) = \int_{x(t)}^L \mu(\xi) d\xi \quad (2)$$

$$\ddot{x}(t) = -P(x(t))/M(x(t)) \quad (3)$$

これらをもとに、離散化した時刻  $t_i$  での位置  $x_i$ 、速度  $\dot{x}_i$ 、加速度  $\ddot{x}_i$  を与え、 $\Delta t$  後の  $\dot{x}_{i+1}$ 、 $x_{i+1}$  を評価し、その結果から荷重を算定する。

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \ddot{x}_i \Delta t \quad (4)$$

$$x_{i+1} = x_i + \dot{x}_i \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{x}_i (\Delta t)^2 \quad (5)$$

式(1)において、強度分布を推定する形を式(6)に示す。これをもとに、飛翔体の質量分布、実験結果の荷重時刻歴および衝突速度の結果を用いて、強度分布を推定する。

$$P\{x(t)\} = F(t) - \alpha \mu(x(t)) \{\dot{x}(t)\}^2 \quad (6)$$

## 6. 衝突実験結果に基づく強度分布の推定

飛翔体の質量分布と衝突実験の荷重時刻歴をもとに、前記 5 の方法にて強度分布を推定する。評価結果と衝突実験の飛翔体損傷長さを図-7 に示す。

Case1 と Case3 では衝突終了時の長さにおいて、概ね対応がみられた。また、前部の強度は小さく、中央部は大きく評価された。Case2 では荷重値の欠損により、強度が小さく評価されたと考えられる。

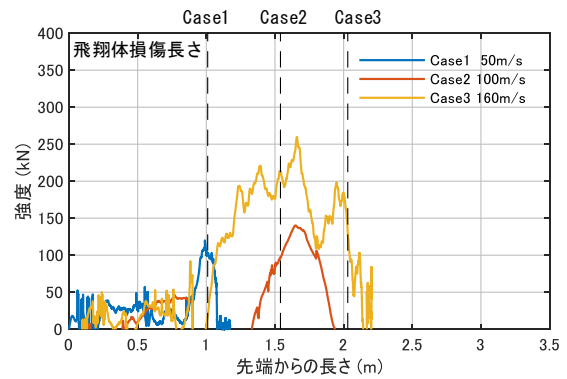


図-7 衝突実験結果に基づいて推定した強度分布

## 7. 静的加力実験に基づく動的強度分布の推定

衝突実験では衝突時に飛翔体の鋼板が高速変形するため、ひずみ速度依存効果によって強度増加が生じていると考えられる。金属材料のひずみ速度依存効果について Cowper と Symonds ら<sup>3)</sup>は、動的強度を  $\sigma_d$ 、静的強度を  $\sigma_s$ 、ひずみ速度を  $\dot{\epsilon}$  として、式(7)の構成方程式を提案している。このうち、 $D$  および  $q$  は材料種別ごとに定めるパラメータ定数である。

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{1/q} \quad (7)$$

ここで、ステンレス材料のパラメータ定数として Forreстал と Sagartz<sup>3)</sup>らは実験結果をもとに  $D = 100$ 、 $q = 10$ を提案している。また、鋼管座屈部に生じる平均的なひずみ速度は、Jones<sup>5)</sup>の方法によると、速度を  $V_0$ 、鋼管半径を  $R$ として次式の通り表される。

$$\dot{\epsilon} = \frac{V_0}{4R} \quad (8)$$

式(7)、式(8)より、動的強度増加率は次式となる。

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{V_0}{4RD}\right)^{1/q} \quad (9)$$

式(9)を式(1)に組み込むと、ひずみ速度依存効果を考慮した鋼管の衝撃荷重関数は次式のようになる。

$$F(t) = \left\{1 + \left(\frac{V(t)}{4RD}\right)^{1/q}\right\} P(x(t)) + \alpha\mu(x(t))\{\dot{x}(t)\}^2 \quad (10)$$

飛翔体の質量分布と静的加力実験による平均強度をもとに、式(10)を用いて計算した強度分布と強度増加率を図-8に示す。

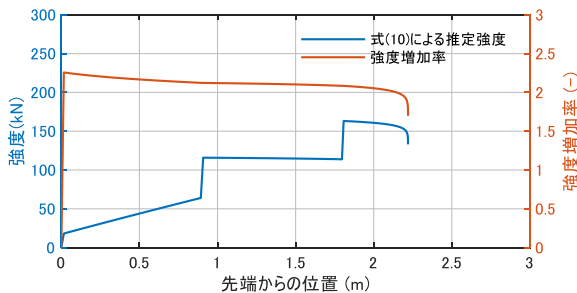


図-8 静的加力実験結果から推定した動的強度

## 8. 強度分布の比較と考察

衝突実験 Case3 の荷重時刻歴から計算した強度分布と、静的加力実験結果から推定した強度分布を比較して図-9に示す。前部では静的加力実験から求めた推定値の方がやや大きく、中央部では衝突実験結果の方が大きく評価された。両者の差異の理由として、以下が考えられる。

- ・ 座屈部の皺形状は、静的加力実験で高次、衝突実験で1次モードであり、発現した強度に差があった。
- ・ 中央部と後部では、衝突実験において、座屈の皺が生じる際に働く慣性力の拘束効果により、強度が大きくなった。
- ・ 前部では、断面欠損と上記の拘束効果によって両者の皺形状の差が大きくなり、反対に衝突実験の方が小さく評価された。

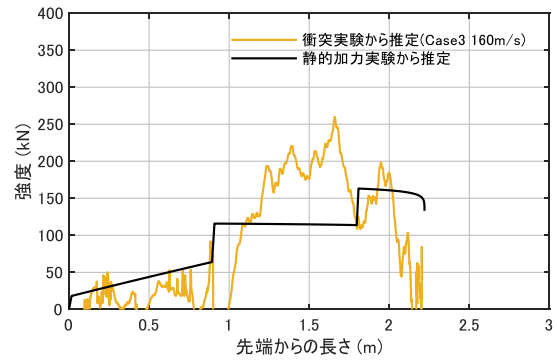


図-9 強度分布の比較

## 9. まとめ

薄肉鋼製円筒型の柔飛翔体を製作し、①各部パーツの静的加力実験、②50m/s、100m/s、160m/sの3段階の速度による、剛なターゲット鋼板への衝突実験を行った。

さらに、衝突実験から得られた荷重時刻歴を用いて、飛翔体の強度分布を推定し、これとひずみ速度依存効果を考慮した静的加力実験の結果と比較した。計算はいずれも Riera の方法によった。

結果比較では、静的加力実験の方が前部でやや大きく、中央部で小さく評価された。今後、飛翔体の衝突時強度分布を精度よく推定するためには、慣性力による鋼管の座屈拘束効果や、座屈による皺形状の分析を含めた更なる検討が必要となる。

## 謝辞

本報告は、原子力規制庁より委託された「平成29年度原子力施設等防災対策等委託費（衝突に伴う建造物の衝撃伝搬に関する基礎的研究）事業」で実施された実験結果をもとにしたものである。

## 参考文献

- 1) J. D. Riera : "On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces," Nuclear Engineering and Design, 8(4),415-426, 1968.
- 2) VTT Technical Research Centre of Finland: <http://www.vttresearch.com/>
- 3) Cowper, G.R. and Symonds, P.S. : "Strain-hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams," Division of Applied Mathematics Report. vol. 28, Brown University. 1957.
- 4) M. J. Forreстал and M. J. Sagartz : "Elastic-plastic response of 304 stainless steel beams to impulse loads," journal of applied mechanics 45, 685-7, 1978.
- 5) N. Jones : "Structural Impact 2nd edition", Cambridge University Press., 2012.