

ひずみ速度依存性を考慮した衝撃貫通試験の 数値シミュレーション

正員 渋 江 唯 司* 中 山 英 治*
 夏 村 匡** 正員 田 中 隆 昭***
 正員 浅 野 利 夫***

A Numerical Simulation of an Impact Penetration Test Including the Strain Rate Effects

by Tadashi Shibue, *Member* Eiji Nakayama
 Tadashi Natsumura Takaaki Tanaka, *Member*
 Toshio Asano, *Member*

Summary

This paper presents the results of numerical simulations applied to an impact penetration test with the simulation code equipped with the capability to evaluate the strain rate effects on the material strength.

The aim of this study is to obtain the designing tool for the protective walls to ensure the safety of operators and equipments around the engine room of a ship, in the case of an accidental explosion.

First, an impact penetration test is carried out to evaluate the protective capability of a plate against the perforation failure. The test is performed with a powder accelerator to shoot the mild steel plate with a simulated cylindrical fragment at the speed of 403 m/s.

Speeds of the fragment and a plug after perforation are measured by strain gauges and a high speed cinematograph during the test. Deformation of the fragment is also measured after the test.

Next, numerical simulations are carried out to reproduce the experiment. DYNA3D is used for the numerical simulations of the test. The elastic-plastic model with failure is employed to express fracture phenomena occurred during the test. The function to evaluate strain rate dependency of material strength is added to this model to refine the accuracy.

The fragment and the wall plate are simplified to an axially symmetric model. The edges of the wall plate are fixed and the initial speed is applied to each grid of the fragment model. The speeds of the fragment and a plug after perforation, and the radial and axial deformation of the fragment, are compared with the simulated values, changing parametrically the mechanical properties of the fragment and the wall plate. The effects of the mechanical properties on the measured values are obtained.

As a result, a set of reasonable material properties is obtained by the numerical simulations. The experimental results are shown to be reproduced well by the numerical simulations with this set of material properties. The numerical simulation method is shown to be an efficient way to estimate the protective capability of a steel plate against the penetration caused by high speed fragments.

A series of numerical simulations is carried out to reproduce five experiments with the same material set. The critical perforation speed and the deformations of fragments after perforation are compared with the experimental results. The estimated critical perforation speed gives 11% less than the measured value. The deformation of fragments show fairly well correlation with the measured values.

* 石川島播磨重工業技術研究所

** 石川島播磨重工業航空宇宙事業本部

*** 石川島播磨重工業船舶海洋事業本部

原稿受理 平成 4 年 7 月 10 日

秋季講演会において講演 平成 4 年 11 月 9, 10 日

1. 緒 言

船舶の機関室に設置されたボイラーやタービンなどの爆発により、爆発物の破片が高速で周囲に飛散した場合に、機関室内はもとより隔壁を貫通した破片により周囲に被害が及ぶ危険性がある。このような爆発は頻繁に発生するわ

けではないが、安全確保の観点から事故の可能性を考慮した設計が必要であると考えられる。防護壁の設置はこのような危険を軽減する手段の1つであり、破片の貫通に対する防護性能を評価して防護壁を設計する技術の確立が必要となる。

高速で飛来する物体に対する防護の研究は、原子力プラントにタービン翼の破片が衝突する場合^{1),2)}、航空エンジンに鳥または氷塊が衝突する場合³⁾、人工衛星に宇宙塵が衝突する場合⁴⁾などについて行なわれている。各分野はそれぞれ対象とする飛来物体の速度、材質、質量等が異なるために独自の研究が行なわれている。

高速飛来物体による衝撃貫通破壊現象では、降伏応力などの材料特性値が歪速度によって変化するために、数値シミュレーションを行うためには、まず材料特性値を推定することが必要となる⁵⁾。材料特性値が推定できれば、この値を用いてより複雑な形状を持った破片が、さまざまな衝突角で衝突する条件に対しても、数値シミュレーションによってその破壊現象を推定することができる。

船舶の分野では、著者らによる数値シミュレーションで高張力鋼材を対象とした衝撃貫通試験結果を再現した研究がある⁶⁾。この中で、試験結果を再現するのに適当な材料特性値をパラメータスタディにより推定する方法を示し、再現が可能であることを示した。しかし、この研究は構造材料強度の歪み速度依存性を厳密に評価したものではなく、衝撃貫通現象に支配的影響を持つ代表的な歪み速度に対応した材料特性値を求めており、求めた材料特性値は衝撃貫通破壊現象を通じて一定値となる。このため、歪み速度に影響を及ぼす衝突速度などの衝突条件が変化した場合には求めた材料特性値を適用することはできないという問題点があった。

本研究では、秒速数百 m で飛来する破片に対する鋼板の防護能力を効率的に評価する目的で、衝撃貫通破壊にいたる過程を数値シミュレーションにより再現することを試みる。特に鋼材の歪み速度依存性が衝撃貫通破壊に及ぼす影響を評価するために、降伏応力の歪み速度依存性を衝撃解析コード DYNA 3D に組込んで用いる。まず前報⁶⁾と同様にパラメータスタディにより、特定の試験結果の再現を確認する。次に得られた材料特性値を用いて、同一材料を用いた衝突速度の異なる衝撃貫通試験のシミュレーションを行い、材料特性値の妥当性を検証する。最後にこの材料特性値を用いて通常の衝撃貫通試験に相当する数値実験を行い、貫通限界速度を推定する。数値シミュレーションにより衝撃貫通破壊が衝突速度にかかわらず再現できることが示されれば、数少ない試験との組合せにより衝突速度、破片の形状、質量、衝突角度などの違いが衝撃貫通破壊に及ぼす影響を評価する設計的な手法として利用できる。

具体的には、船体の構造材料として多く使用されている軟鋼板に対して実際の破片を模擬した模擬破片を秒速 100

-400 m で衝突させる衝撃貫通試験を対象として数値シミュレーションを実施する。

2. 衝撃貫通試験

ここで述べる衝撃貫通試験とは、加速装置を用いて破片を模擬した模擬破片を平板状の試験片に垂直に衝突させ、衝突速度と破壊の状況との関連を求めるために行う試験である。

実際に飛来する破片の形状・大きさ・速度を把握することは困難であるために、模擬破片を用いて試験を行う。解析の便宜上、Fig. 1 に示すように模擬破片は軸対称形とした。試験装置は、当社のジェットエンジン開発部門で用いられている素材評価用小型衝撃試験装置を用いた。この装置は、直径 3-13 mm の弾を秒速 100-800 m の速度で飛ばすことができる 1 段火薬推進式の試験装置で、内径は 20 mm である。直接模擬破片を加速することが困難であるために、ポリカーボネート製のサボアの先に模擬破片を取りつけて加速し、衝突直前にサボアから模擬破片を分離して模擬破片のみを衝突させる。装置の全景を Fig. 2 に、計測装置図を Fig. 3 に、仕様を Table 1 にそれぞれ示す。

試験片は、1 辺の長さが 150 mm の正方形板で、板厚が 4.9 mm の日本海事協会規格の軟鋼材 (KA) を用いた。模擬破片の材料には JIS 規格のニッケル・クロム・モリブデ

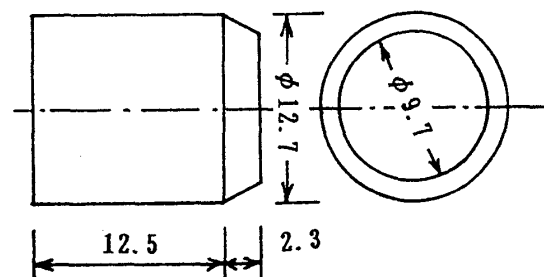


Fig. 1 Configuration of Simulated Fragment

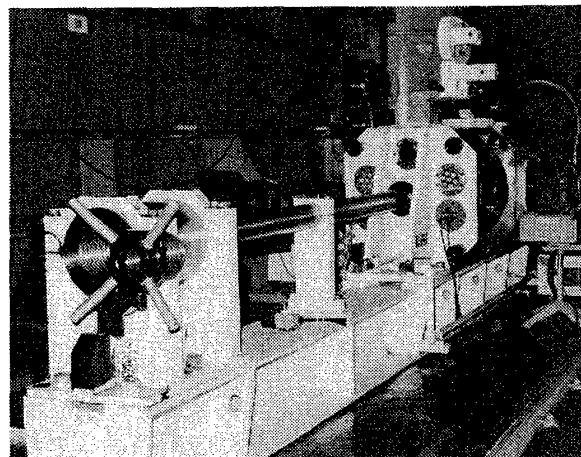


Fig. 2 Powder Accelerator

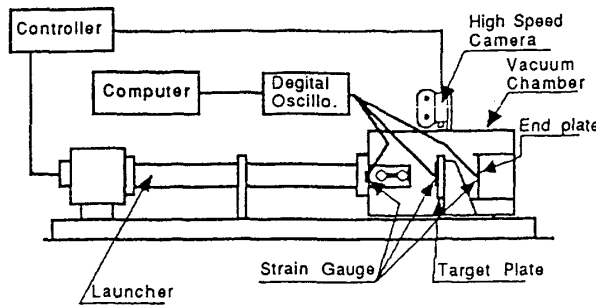


Fig. 3 Measurement and Control System of the Powder Accelerator

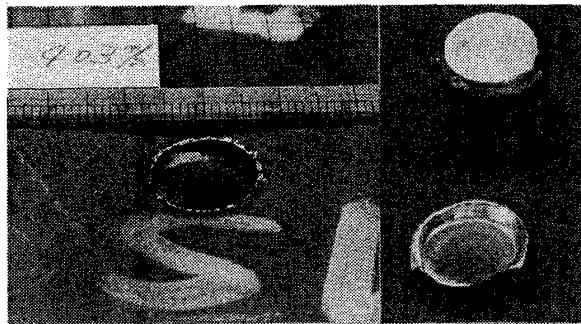


Fig. 4 Perforated Test Piece and Deformed Fragment

ン鋼 (SNCM 439) を用い、直径 12.7 mm、質量 14.3 g の円錐台形状の先端をもつ円柱形状とした。Table 2 に模擬破片と試験片の静的材料特性値 (規格値) を示す。試験片は、真空容器内に設置した 1 辺の長さが 100 mm の正方形の開口部をもつ支持枠に万力で四周を固定する。

試験では、速度、歪履歴、変形・破壊形状などを計測する。計測する速度は、模擬破片の衝突前速度と貫通後速度、および打ち出される試験片の破片 (プラグ) の速度で、これらの速度は、模擬破片とサポーを分離する瞬間、模擬破片が試験片に衝突する瞬間、および模擬破片・プラグが回収板 (End Plate) に衝突する瞬間のそれぞれに発生する歪変化を、歪計により検出し、時間差から平均速度を計算して求める。計測した歪データは直接高速デジタルメモリに保存する。高速デジタルメモリの収録周波数は 5 MHz、歪ゲージの応答周波数は 200 kHz で、計測系全体の応答周波数は 200 kHz である。さらに、模擬破片とプラグのいずれが回収板に衝突するかを識別する目的で、試験片と回収板との間で毎秒 7000 コマの高速度撮影を行う。

数値シミュレーションの対象とする試験は、毎秒 403 m の衝突速度で行った試験で、試験後に撮影した試験片の貫通破壊部分と模擬破片を Fig. 4 に示す。試験では、模擬破片と模擬破片によって円形に打ち抜かれたプラグをともに回収し、それぞれの寸法を計測した。衝突前後で計測した速度の変化、模擬破片の長さ・最大直径の変化を Table 3 に示す。

Table 1 Specifications of the Powder Accelerator

Bore	20mm
Fragment Diameter	3-13mm
Test Velocity	100-800m/s
Acceleration Method	One Stage Powder Gun

Table 2 Mechanical Properties Specifications of a Test Piece and a Simulated Fragment

	Target	Fragment
Material	KA	SNCM439
Yield Stress(MPa)	235.	883.
Tensile Strength(MPa)	402.	980.
Elongation(%)	22.	16.

Table 3 Measured and Calculated Values at the Perforation Test

	Initial	After Perforation	
		Experiment	Current
Fragment Velocity(m/s)	403.	157.	171.
Plug Velocity(m/s)	0.	191.	184.
Fragment Diameter(mm)	12.7	13.4	13.4
Fragment Length(mm)	14.8	14.2	14.2

3. 衝撃貫通試験の数値シミュレーション

数値シミュレーションには衝撃解析コード「DYNA 3 D」を用いた。

衝撃貫通破壊を表現するために、等価塑性歪が予め設定した値に達すると耐力を失うものとする破壊を考慮した弾塑性材料モデルを用いた。

著者らの用いた「DYNA 3 D」⁷⁾には材料強度の歪み速度依存性を考慮する機能が含まれていないので、この機能を追加した。降伏応力を歪み速度の関数として表す式はいくつか提案されており、代表的な式は歪み速度の自然対数が応力増分に比例するとした Johnson-Cook の式⁸⁾である。Johnson-Cook の式を (1) 式に示す。第 1 項は歪み硬化を、第 2 項は温度効果を、第 3 項は歪み速度依存性をそれぞれ表わしている。本論文では、温度効果を考慮する必要があるほど十分高速な衝突速度範囲を取り扱わないので、温度効果の項を無視した。歪み硬化には加工硬化係数を用い、歪み速度のべき乗が降伏応力の増分に比例するものとして、降伏応力を (2) 式により表わして用いた。

$$\sigma = F(\epsilon_p^*) \cdot G(T) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}_p^*) \quad (1)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}_p^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0$ 、 $\dot{\epsilon}_p^*$ ：等価塑性歪み速度

$\dot{\epsilon}_0$ ：単位歪み速度 (=1.0 s⁻¹)

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \cdot F(\epsilon_p^*) \cdot (1 + C \cdot \dot{\epsilon}^n) \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ ：歪み速度

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{i-1} \quad (\dot{\epsilon}_{i-1} > 0)$$

$$\dot{\epsilon} = \sum_{j=2}^m \left(\frac{1}{2} \right)^{j-1} \dot{\epsilon}_{i-j} \quad (\dot{\epsilon}_{i-1} = 0)$$

σ_{y0} ：静的降伏応力

従って、材料特性を表すために必要なパラメータは、静

的降伏応力値 σ_{y0} , 歪み速度依存性のパラメータ C と n , 加工硬化係数 H_t , および破断等価塑性歪み ϵ_{pf}^e の5つとなる。本論文ではこれらのパラメータに試験片を表す t , 模擬破片を表す f をそれぞれ下添え字として加えて用いる。

また, (2)式を使用するとき数値解析上の解の振動を防止するために, 2回以上前の時間増分計算ステップにおける歪み速度の寄与を考慮することとした。

高張力鋼材の歪み量 1%での応力値に及ぼす歪み速度の影響を実験によって調べたデータ⁹⁾を今回解析で用いた(2)式と Johnson-Cook の式の歪み速度依存性を比較して Fig. 5 に示す。Fig. 5 から Johnson-Cook の式は $10^2(1/s)$ 以下の範囲で使用するのに適しており, (2)式は $10^2(1/s)$ 以上の範囲で使用するのに適していると考えられる。

数値シミュレーションに用いた要素分割を Fig. 6 に示す。模擬破片と試験片の全体形状がほぼ軸対称であることを利用して, 模擬破片と試験片の全体を中心角 8 度の扇形に切り出した軸対称部分モデルを用いた。ここで用いた仮定は, 試験片が半径 50 mm の円板で, 周囲が完全に固定され, 試験片の中央に垂直に模擬破片が衝突するというものである。試験片は板厚を 4 層に等分し, 半径方向に 24 分割した。また, 模擬破片は対称軸方向に 7 分割, 半径方向に

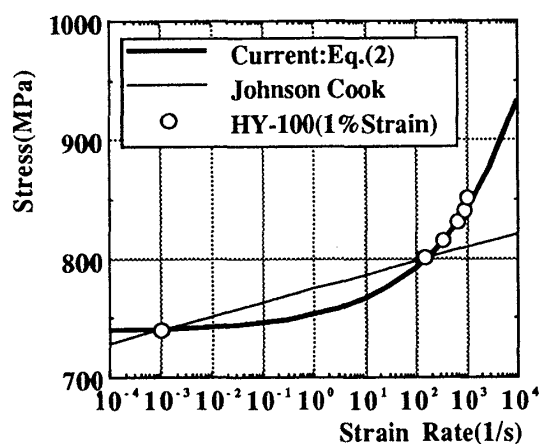


Fig. 5 Strain Rate Effects of Steel and Two Approximation Curves

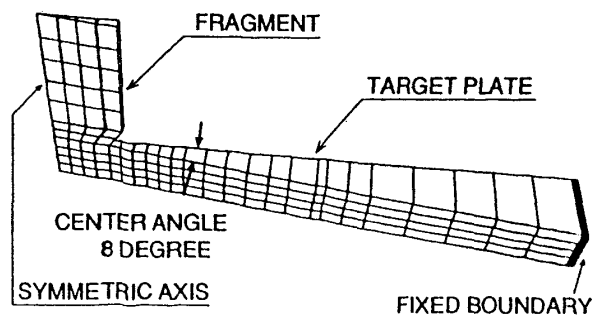


Fig. 6 Numerical Simulation Model

4 分割した。全体の要素数は 124, 節点数は 317 である。

シミュレーションは, 模擬破片が試験片に接触した状態を初期状態として模擬破片を構成する要素全てに初期速度を与えて開始する。模擬破片と試験片の接触する面には力を伝えながら境界面が変形・移動するすべり境界条件を与えている。

試験片と模擬破片の材料特性値はそれぞれ 5 個のパラメータで表わされる。上記モデルと計算条件を用いて試験結果を模擬するために, 合計 10 個のパラメータのうち 1 つだけを変化させて, これらが解におよぼす影響を調べるパラメータスタディを実施し, 試験結果を再現できる材料特性値の組合せを求めることとしたが, 本研究では試験片と模擬破片両方について σ_{y0} には静的降伏応力の規格値を用い, H_t には前報で求めた値を用いた。このため, 実質的な材料特性値のパラメータは合計で 6 個となる。

数値シミュレーションの結果を Fig. 7-12 に示す。各図中の横軸はパラメータの変化を, 各図(a)の縦軸はプラグと模擬破片の貫通後の速度を, 各図(b)の縦軸は模擬破片の貫通後の半径と長さの変形量をそれぞれ示しており, 試験で計測した速度は実線と破線で, パラメータスタディの結果は記号▲と○で表している。

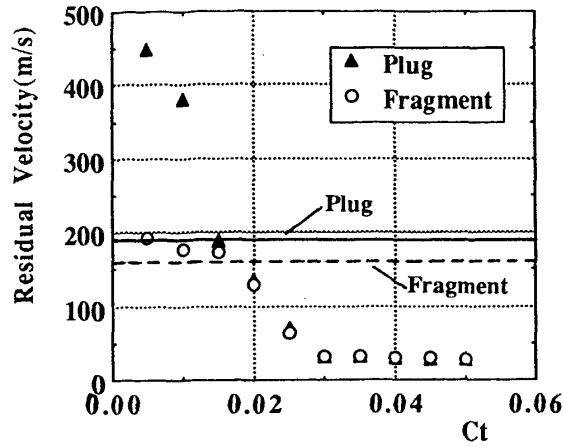
Fig. 7 は試験片の歪み速度依存性パラメータ C_t の影響を示す。 C_t が増加すると試験片の高歪み速度時の降伏応力が高くなり, 変形しにくくなる。このため, プラグと模擬破片の残留速度は C_t の増加とともに減少し, 模擬破片の変形量は増大する傾向を示す。

Fig. 8 は試験片の歪み速度依存性パラメータ n_t の影響を示す。 n_t が増加すると試験片の高歪み速度時の降伏応力が高くなり, 変形しにくくなる。このため, プラグと模擬破片の残留速度は n_t の増加とともに減少し, 模擬破片の変形量は増大する傾向を示す。模擬破片の変形量は n_t が 0.8 付近で極大値を示す。

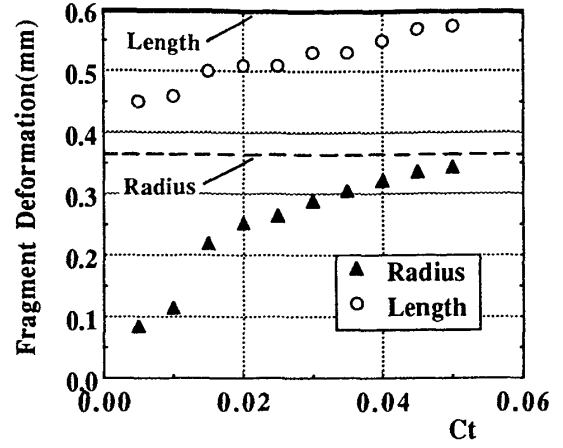
Fig. 9 は試験片の破断等価塑性歪 ϵ_{pf}^e の影響を示す。 ϵ_{pf}^e が増加すると試験片は破断しにくくなる。 ϵ_{pf}^e が 0.6 以上の値になるとプラグと模擬破片の残留速度と模擬破片の変形量は一定となるが, 0.6 以下ではプラグと模擬破片の残留速度は ϵ_{pf}^e の増加とともに減少し, 模擬破片の変形量は増大する傾向を示す。プラグの残留速度と模擬破片の半径方向の変形量は ϵ_{pf}^e が 0.3 付近でそれぞれ極大値, 極小値を示す。

Fig. 10 は模擬破片の歪み速度依存性パラメータ C_f の影響を示す。 C_f が増加すると模擬破片の高歪み速度時の降伏応力が高くなり, 変形しにくくなる。このため, プラグと模擬破片の残留速度は C_f の増加とともに増大し, 模擬破片の変形量は減少する傾向を示す。

Fig. 11 は模擬破片の歪み速度依存性パラメータ n_f の影響を示す。 n_f が増加すると模擬破片の高歪み速度時の降伏応力が高くなり, 変形しにくくなる。このため, プラグと

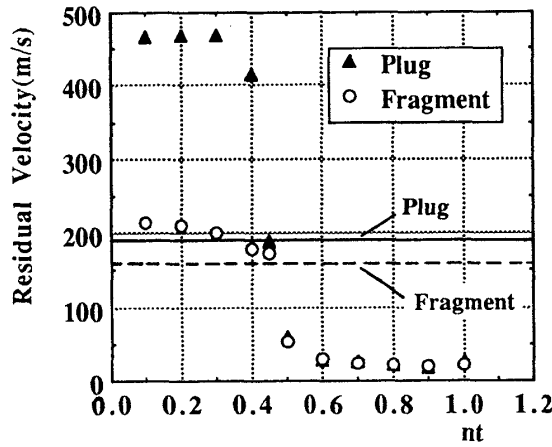


(a) Residual Velocity - C_t Relations

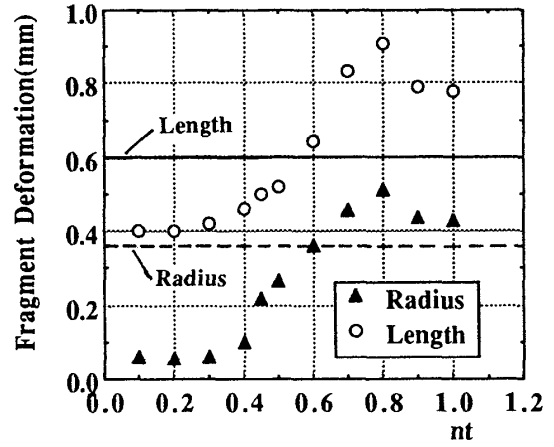


(b) Deformation of Fragment - C_t Relations

Fig. 7 Effects of C_t
: A Strain Rate Dependency Parameter of Test Piece

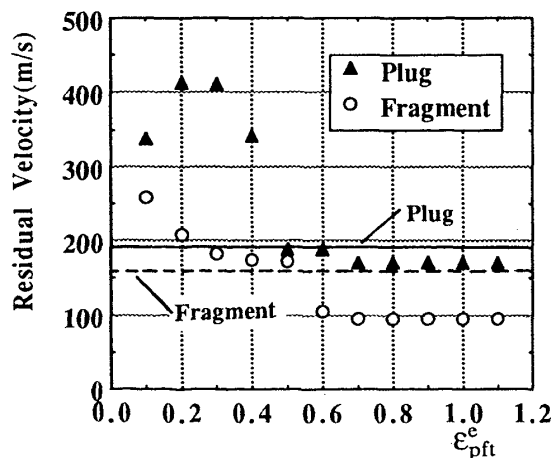


(a) Residual Velocity - nt Relations

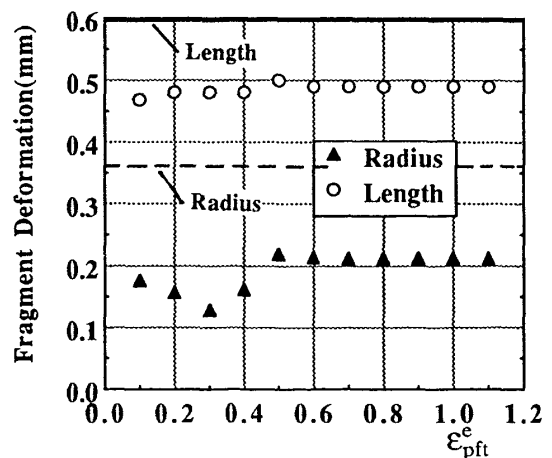


(b) Deformation of Fragment - nt Relations

Fig. 8 Effects of n_t
: A Strain Rate Dependency Parameter of Test Piece



(a) Residual Velocity - ϵ_{pft}^e Relations



(b) Deformation of Fragment - ϵ_{pft}^e Relations

Fig. 9 Effects of ϵ_{pft}^e
: A Critical Effective Plastic Strain of Test Piece

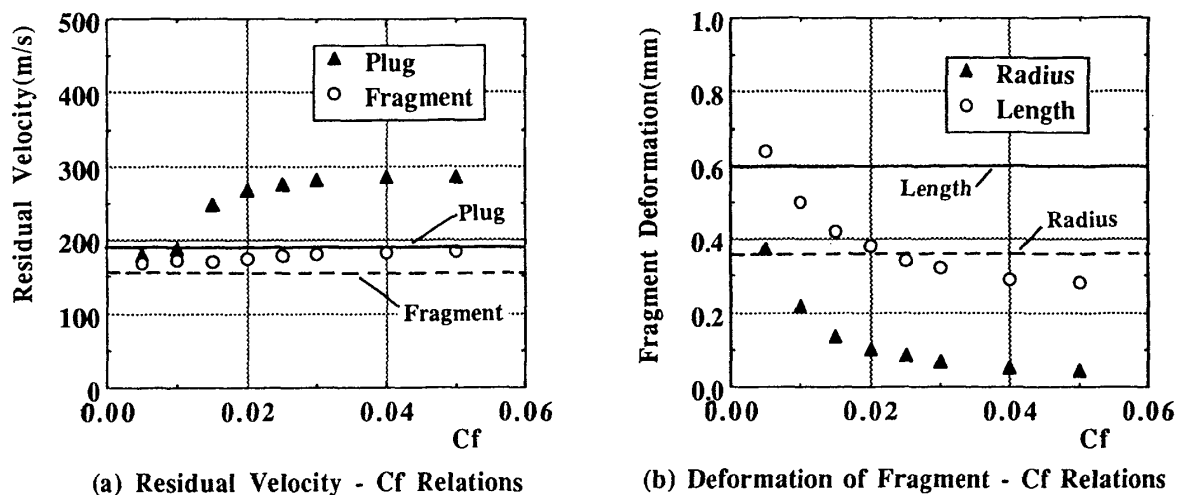


Fig. 10 Effects of C_f
: A Strain Rate Dependency Parameter of
Simulated Fragment

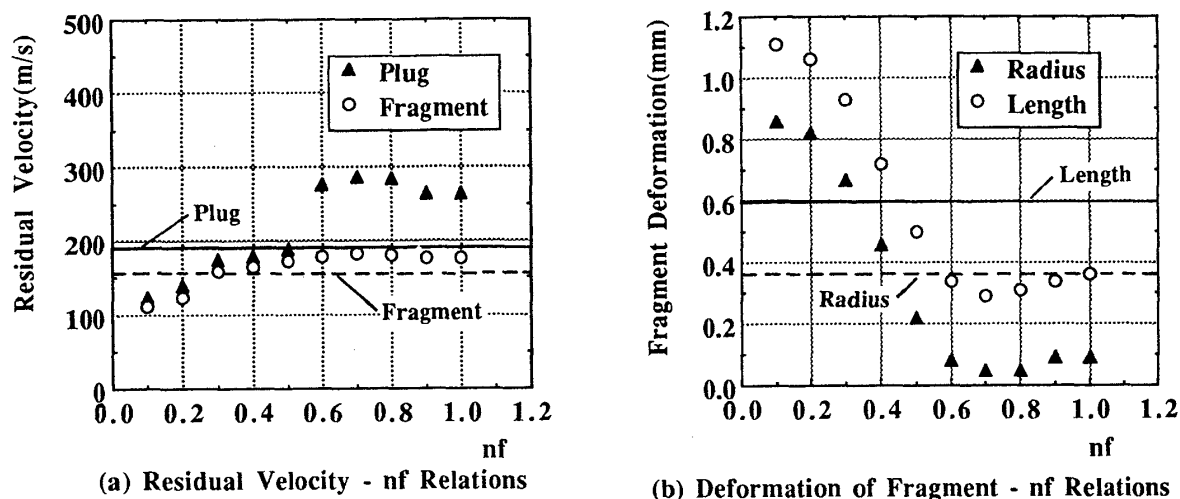


Fig. 11 Effects of n_f
: A Strain Rate Dependency Parameter of
Simulated Fragment

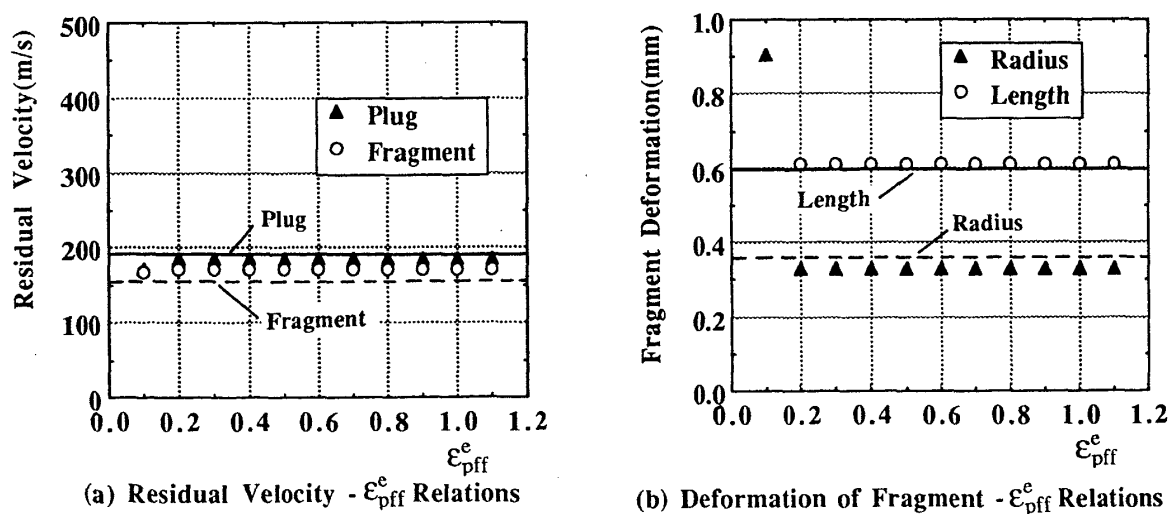


Fig. 12 Effects of ϵ_{pff}^e
: A Critical Effective Plastic Strain of
Simulated Fragment

模擬破片の残留速度は n_f の増加とともに増大し、模擬破片の変形量は減少する傾向を示す。

Fig. 12 は模擬破片の破断等価塑性歪 ε_{prt}^e の影響を示す。 ε_{prt}^e が増加すると模擬破片は破断しにくくなり、0.2 以上の値になるとプラグと模擬破片の残留速度と模擬破片の変形量は一定となる。

これらの数値シミュレーションの結果から、試験結果を良く再現する材料特性値を Table 4 に示すように推定した。

推定した材料特性値を用いて実施した解析結果を Fig. 13, 14 に示す。Fig. 13 には模擬破片先端の節点とプラグ中央の節点の速度の時刻歴応答を、Fig. 14 には、模擬破片の半径と長さの変化量の時刻歴応答をそれぞれ示す。衝突の瞬間から 50 μsec 経過した後は、模擬破片・プラグ中央共に速度が一定となっている。図中に試験で計測された模擬破片とプラグの衝突貫通後の速度を三角印で示す。これらの値は、解析で求められた速度とよく一致しており、解析結果で試験結果をよく再現できることを示している。

衝突の瞬間から 60 μsec 経過した時までの模擬破片と試験片の変形の状態を Fig. 15 に示す。

以上の数値シミュレーションにより、軟鋼の試験片を用いた衝撃貫通試験に対して歪み速度依存性を適用した場合に、貫通後の速度と模擬破片の変形を再現できることを示した。

また、同じ試験片と模擬破片の組合せにより速度を変化

Table 4 Estimated Mechanical Properties of a Test Piece and a Simulated Fragment

	Target	Fragment
Quasi-Static Yield Stress: σ_{yo} (MPa)	235.	883.
Strain Rate Effect Parameter: C	0.01	0.015
Strain Rate Effect Parameter: n	0.50	0.45
Tangent Modulus: H_t (MPa)	784.	735.
Effective Plastic Strain at Failure: ε_{pf}^e	0.70	0.50

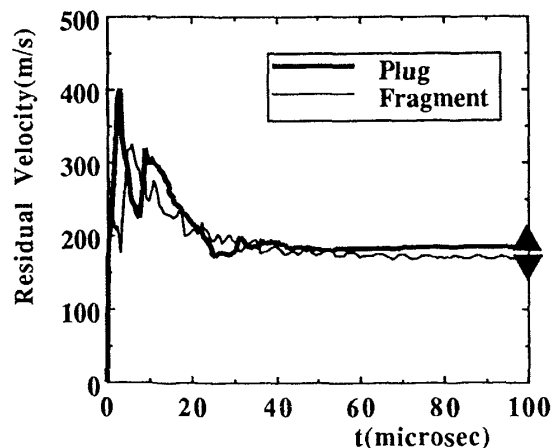


Fig. 13 Simulated Velocity Time History of a Plug and a Fragment

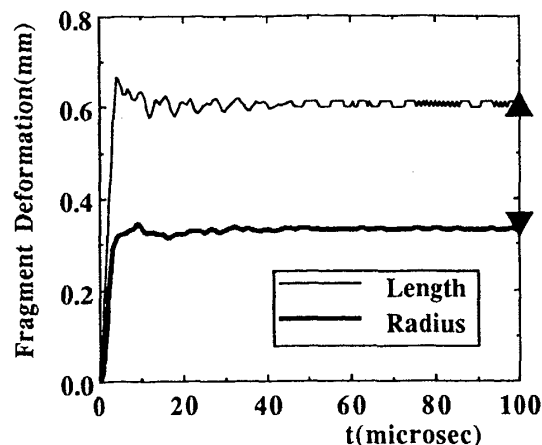


Fig. 14 Simulated Deformation Time History of a Plug and a Fragment

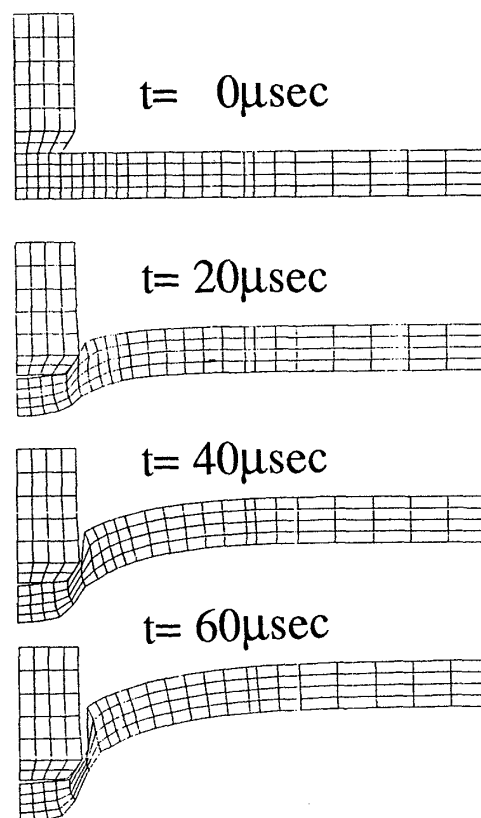


Fig. 15 Simulated Perforation Process

させて行った 5 つの衝撃貫通試験を対象として行った数値シミュレーションの結果を試験結果と比較して残留速度を Fig. 16 に、模擬破片の変形を Fig. 17 にそれぞれ示す。衝撃貫通試験結果で残留速度が 0.0 m/s のものは非貫通であるし、プラグの速度しか計測できなかった試験、模擬破片を回収できなかった試験を含んでいる。数値シミュレーションは、今回求められた材料特性値を用いて実施した。数値シミュレーションから推定される貫通限界速度は約 330 m/s、試験から推定される貫通限界速度は約 370 m/s である。模擬破片の変形は比較的良く一致している。

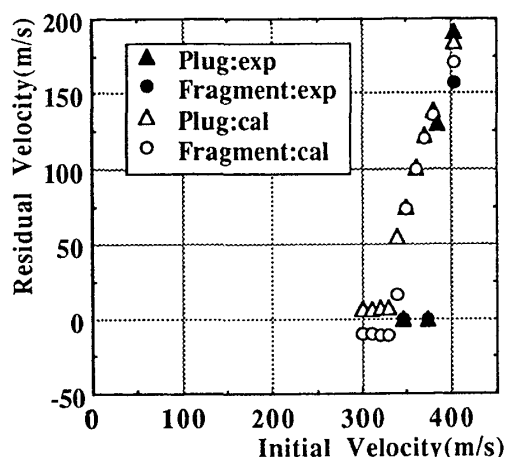


Fig. 16 Numerically Simulated Perforation Tests: Residual Velocity

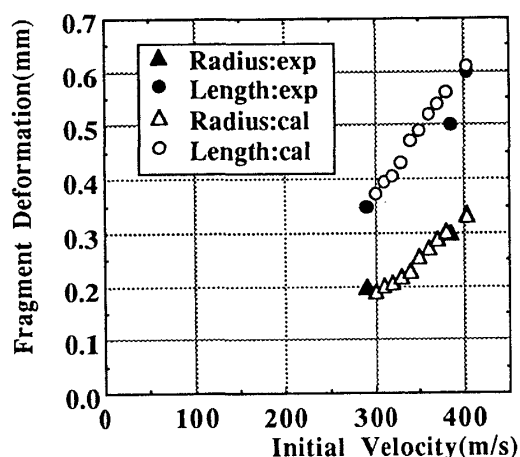


Fig. 17 Numerically Simulated Perforation Tests: Deformation

4. 結 論

船内爆発による破片の貫通を防止し、安全性を確保する観点から、防護壁の性能評価技術を獲得する目的で研究を実施し下記の結論を得た。なお、防護壁の設計においては、爆発により生じる破片の大きさ・形状・速度などを考慮する必要がある。また、爆発にともない発生する爆風についても考慮する必要がある。

○材料強度の歪み速度依存性を考慮する機能を持つ衝撃解析コードを開発した。

○軟鋼材を試験片として用い、模擬破片を衝突させる衝撃貫通試験を実施した。

○秒速 403 m で衝突させる試験を対象として、計測された貫通後の模擬破片とプラグの速度、模擬破片の半径と長さの変形量を解析結果と一致させる数値シミュレーションを、材料の機械的性質を同時に 1 個だけ変化させて影響を調べる事により行い、試験の結果を良く説明できる材料特性値を求めた。

○求めた材料特性値を用いて衝突速度を変化させて数値シミュレーションを行い、結果を 5 つの速度で実施した衝撃貫通試験の結果と比較し、貫通限界速度は試験値との誤差が約 11% の推定値を得た。模擬破片の変形は比較的良く試験結果と一致した。

○この結果、飛来する破片による衝撃貫通破壊に対する防護壁の防護能力を衝突速度にかかわらず推定する方法が得られた。

参 考 文 献

- 1) 千葉矩正, 志田 茂, 大手 敏, 吉沢弘泰: 飛来物体に対する鋼板の耐衝撃性 (第 1 報, 鋼板の破損限界の板厚依存性), 日本機械学会論文集 (A) 47 巻 422 号 (1981)
- 2) 大手 敏, 吉沢弘泰, 千葉矩正, 志田 茂: 飛来物体に対する鋼板の耐衝撃性 (第 2 報, 鋼板の破損限界エネルギー評価式), 日本機械学会論文集 (A) 47 巻 424 号 (1981)
- 3) 川嶋鋭裕, 田中保幸, 夏村 匡: FRP ブレードの衝撃特性シミュレーション, 石川島播磨技報 Vol. 32, No. 2 (1992)
- 4) 伏田 哲, 田村英樹, 澤岡 昭: 宇宙船用防護壁の研究, 衝撃波シンポジウム (1992)
- 5) 中山英治, 渋谷唯司, 田中隆昭, 浅野利夫: 高速引張試験の数値シミュレーション, 第 14 回構造工学における数値解析法シンポジウム (1990)
- 6) 渋谷唯司, 中山英治, 夏村 匡, 田中隆昭, 浅野利夫: 衝撃貫通試験の数値シミュレーション, 日本造船学会論文集, No.170 (1991)
- 7) Hallquist, J. O., and D. J. Benson: DYNA3D USER'S MANUAL, LLNL UCID-19592 (1986)
- 8) Johnson, G. R., and W. H. Cook: Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures, Engng. Fract. Mech., 21 (1985)
- 9) Nicholas, T., and A. M. Rajendran: Material Characterization at High Strain Rate, High Velocity Impact Dynamics, John Wiley & Sons (1990)