飛来物衝突による炭化けい素の破壊挙動の検討* (衝突損傷に及ぼす板厚および飛来物寸法の影響)

中山 真人^{*1}, 町田 隆志^{*1}
寺前 哲夫^{*2}, 浜田 晴一^{*2}

A Study on Fracture Behavior in SiC by Projectile Impact (Influence of Thickness and Projectile Size on Impact Damage)

Masato NAKAYAMA, Takashi MACHIDA,
Tetsuo TERAMAE and Seiichi HAMADA

The influence of target thickness and projectile size on the projectile impact damage generated on SiC targets is investigated. The projectile impact generates several types of damage such as a ring crack, a crater or a cone crack. In the case of thick targets, the residual strength of the targets does not depend on target thickness. This is due to that damage is generated only near the impacted surface. On the other hand, in the case of thin targets, the residual strength drops drastically. This is due to the generation of "back surface cracks." In addition, the projectile size affects the residual strength and the cone crack size. However, the minimum impact velocity at which ring cracks are generated does not change with projectile size.

Key Words: Impact Strength, Impact Damage, Ceramics, Silicon Carbide, Size Effect, Target Thickness, Projectile Size, Residual Strength

1. 緒 言

セラミックスは金属材料と比較して耐熱性、耐食性、耐摩耗性に優れ、これらの特性を活用することによって機器全体の耐熱性向上あるいは高効率化を図ることができるので、現在、ガスタービン、ターボチャージャー等への適用が進められている。セラミックスの適用に当たっては、金属材料と同様、まず、セラミックス機器に発生する熱応力、遠心応力等に対する強度信頼性の確保が重要である。さらに、セラミックスは金属材料と比較して靱性が低く、また、欠陥に対して非常に敏感であるため、新たな問題として、燃焼ガス流中に含まれる微小飛来物の衝突の影響による損傷や強度低下を設計に考慮することも必要となる。そこで、微小飛来物の衝突を模擬した小球衝突実験を行い、セラミックスの衝突損傷形態および強度低下等を検討した報告^{(1)~(14)}がこれまでにいくつかなされている。

本研究では、同様に、セラミック平板にセラミックスもしくは金属の小球を衝突させた場合の衝突損傷に

ついて評価するが、実際のセラミック機器の厚さ、および微小飛来物の寸法は均一でないことを考慮して、主にセラミックスの衝突損傷に及ぼす板厚および微小飛来物の寸法の影響について検討した。さらに、微小飛来物の衝突によるセラミックスの強度低下と衝突損傷の関係についても検討した。

2. 供試材および試験片

供試材は、飛来物(プロジェタイル)にはセラミック系飛来物を模擬したジルコニア ZrO_2 、および金属系飛来物を模擬した SUJ 2 鋼を用い、被衝突体(ターゲット)には炭化けい素 SiC を選定した。表 1 に、本供試材の機械的特性を示す。ターゲットである炭化けい素の曲げ強度 σ_f およびワイブル係数 m は、JIS R1601 の四点曲げ試験において、それぞれ $\sigma_f=580.5$ MPa, $m=12.0$ である。

試験片は、プロジェタイルとして直径 1 mm, 2 mm の二段階の小球、ターゲットとして長さ 85 mm × 幅 10 mm × 厚さ 1, 3, 5 mm の三段階の平板とした。ターゲットの表面粗さは $R_{max}=0.2$ である。

3. 実験方法

実験装置概略図を図 1 に示す。

* 平成 3 年 11 月 2 日 第 69 期材料力学講演会において講演、原稿受付 平成 4 年 11 月 4 日。

^{*1} 正員、(株)日立製作所機械研究所 (〒300 土浦市神立町 502)。

^{*2} 正員、東京電力(株)技術研究所 (〒182 調布市西つつじヶ丘 2-4-1)。

実験装置は、圧縮空気駆動によりプロジェクタイトを飛翔させる構成となっている。実験は、アキュムレータ内に充てんした圧縮空気を解放することによってプロジェクタイトの装着されたサボーを直進させ、バレル先端のストッパでサボーを停止させることによって、プロジェクタイトのみをターゲットに衝突させて行った。プロジェクタイトの飛翔速度はストッパ直前のサボーの直進速度で代表させた。ターゲットは両端固定状態(スパン長 65 mm)で支持した。プロジェクタイトを衝突させた後、ターゲットの衝突損傷を観察し、さらに、衝突面を引張側にした四点曲げ試験(クロスヘッドスピード 0.5 mm/min)によりターゲットの残留強度を測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 プロジェクタイト衝突による損傷形態 図 2～5 に、プロジェクタイトの衝突によってターゲットに発生した衝突損傷形態例を示す。

実験では、プロジェクタイトの衝突により、ターゲットには衝突表面に複数のリングクラック(図 2)およ

びクレータが発生し、また、リングクラックは内部に進展することによりコーンクラック(図 3)を形成することが認められた。ターゲットの板厚が小さく、プロジェクタイトの衝突速度がある程度以上大きい場合には、プロジェクタイトの衝突で生じた応力波の影響によって衝突直下の背面に独立した放射状のき裂(図 4)の発生、もしくはパーカッションコーン(図 5)と呼ばれる離脱が発生することも認められた。また、本実験では、これらの衝突損傷は、プロジェクタイトがジルコニアあるいは SUJ 2 鋼の場合を問わず、同様の形態であった。

4.2 残留強度に及ぼす板厚および飛来物寸法の影響

図 6, 7 に、プロジェクタイトの衝突後のターゲットの残留強度とプロジェクタイト衝突速度の関係を示す。ここで、残留強度とは、衝突面を引張側にし、引張側スパン 60 mm, 圧縮側スパン 20 mm で四点曲げ試験により測定した曲げ強度で定義した。図 6, 7 からわかるように、プロジェクタイトがジルコニアの場合は板厚 1 mm, また、SUJ 2 鋼の場合は板厚 1, 3

表 1 供試材の機械的特性

	Young's Modulus (MPa)	Poisson's Ratio	Density (g/cm ³)
SiC	4.12×10^5	0.181	3.24
ZrO ₂	1.96×10^5	0.310	6.05
SUJ2	2.05×10^5	0.333	7.82

図 1 実験装置概略図

Target : SiC $t=3\text{mm}$
Projectile : ZrO₂ $\phi 1$
Impact velocity : 183.6 m/s

図 2 衝突表面に発生したリングクラック

Target : SiC $t=3\text{mm}$
Projectile : ZrO₂ $\phi 1$
Impact velocity : 183.6 m/s

図 3 ターゲット内部のコーンクラック

mmと板厚の小さいターゲットでは、残留強度は衝突速度の増加とともに急激に低下する傾向を示した。この残留強度の急激な低下は、衝突背面に損傷が生じる現象に対応しており、衝突速度が大きい場合には、背面損傷の進展によりプロジェクタイトの衝突時にターゲットが破断する例もあった。しかしながら、ターゲットの板厚が大きくなると、このような背面損傷は見られなくなり、残留強度は衝突速度の増加とともに緩やかに低下した。また、このような状況では残留強度の板厚依存性もほとんど見られなくなることがわかった。さらに、プロジェクタイトの直径が1mmの場合と2mmの場合の比較からは、直径の大きいプロジェクタイトの衝突のほうが残留強度は低くなることがわかった。

残留強度を測定した際のターゲットの破面観察の結果、背面損傷が生じないターゲットの場合、残留強度は本質的に衝突面に生じたコーンクラックに支配されていることがわかった。図8、9に、ターゲットに背面損傷が生じない場合のコーンクラック深さとプロジェクタイト衝突速度の関係を示す。この結果によれば、

コーンクラック深さは衝突速度の増加とともに大きくなること、また、ターゲットの板厚にはあまり影響されないことがわかる。さらに、直径2mmのプロジェクタイトのほうが、直径1mmの場合と比較して、衝突によって生じるコーンクラックの寸法がより大きくなることわかる。したがって、背面損傷が発生せず、Hertz 応力の寄与により発生する衝突面の損傷のみが残留強度を支配する場合には、残留強度とコーンクラック深さには相関関係があると考えられる。図10には、図6～9の結果をプロジェクタイトの衝突後のターゲットの残留強度とコーンクラック深さの関係に整理して両対数で示す。結果は、プロジェクタイトの材質によらず、残留強度とコーンクラック深さは良い相関関係を示していることがわかる。

4・3 残留強度とコーンクラック深さの破壊力学的関係

図11には、図10の關係に、供試材である炭化けい素の破壊強度と欠陥寸法の関係を重ね合わせて示す。ここで、破壊強度と欠陥寸法の関係は、JIS R1601に基づく四点曲げ試験によって求めた。欠陥寸法は、破壊状況により表面近傍に存在する自然欠陥の

Target : SiC t=1mm
Projectile : ZrO₂ φ1
Impact velocity : 80.0m/s

図4 衝突背面に発生した放射状き裂

図5 衝突背面におけるパーカッションコーン離脱部

図6 残留強度とプロジェクタイト衝突速度の関係
(プロジェクタイトがジルコニアの場合)

図7 残留強度とプロジェクタイト衝突速度の関係
(プロジェクタイトがSUJ2鋼の場合)

深さ、もしくはビッカース圧子で導入した表面半円き裂の深さで表した。なお、ビッカース圧子を用いた人工き裂試験片については、真空中で1200°C、6hの熱処理を行い、き裂先端の残留応力を除去した。図11の結果によると、破壊強度とき裂深さは、約400 μm 以上のき裂深さでは線形破壊力学の関係が成り立っているが、それ以下の寸法では非線形の関係を示している⁽¹⁵⁾。一方、プロジェクトイルの衝突後のターゲットの残留強度とコーンクラック深さの関係は、両対数上

で傾き-1/2とはならないが、その傾きは破壊強度とき裂深さの関係と同様な傾向を示すことがわかった。また、図11においては、残留強度とコーンクラック深さの関係のほうが、供試材である炭化けい素の靱性値 $K_{Ic}=5.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ で規定される破壊強度とき裂深さの関係より強度的に高めに分布する結果となっている。これは、形状の異なる2種類のき裂を同一の図中表示した結果であって、コーンクラックの深さおよび形状、ターゲットの板厚を考慮してき裂の形状係数の補正を行えば、両者の関係は同様な傾向を示すことから、ほぼ一つの曲線で表せる可能性があると考えられる。今後は、表面近傍に存在するコーン形状のき裂における応力拡大係数の解析を行い、詳細な検討を行う。

4.4 コーンクラック深さとプロジェクトイル運動エネルギーの関係 図12に、図8、9のコーンクラック深さとプロジェクトイル衝突速度の関係を、コーンクラック深さとプロジェクトイル運動エネルギーの関係に整理して示す。4.2節で述べたように、同じ衝突速度においては、プロジェクトイルの衝突によって生

図8 コーンクラック深さとプロジェクトイル衝突速度の関係(プロジェクトイルがジルコニアの場合)

図9 コーンクラック深さとプロジェクトイル衝突速度の関係(プロジェクトイルがSUJ2鋼の場合)

図11 炭化けい素の破壊強度と欠陥寸法の関係

図10 残留強度とコーンクラック深さの関係

図12 コーンクラック深さとプロジェクトイル運動エネルギーの関係

じるコーンクラックの深さは、ターゲットの板厚にはあまり影響されないが、プロジェクトの寸法あるいは材質には大きく影響を受ける。しかしながら、図12のように、コーンクラック深さをプロジェクトの持つ運動エネルギーで整理すると、これらの関係はプロジェクトの寸法あるいは材質によらず、ほぼ一つの曲線で表せることがわかった。これは、本実験の範囲では、プロジェクトの材質によらず、ターゲットに発生する衝突損傷は同形態であること、また、コーンクラックが進展する際の外部からのエネルギー供給は、プロジェクトの衝突による押し込みのみであることに起因するためと考えている。

4・5 表面損傷に及ぼす板厚および飛来物寸法の影響
ターゲットの表面に発生した衝突損傷の大きさについて、図13, 14に、リングクラックの直径とプロジェクト衝突速度の関係、また、図15, 16に、クレータ深さとプロジェクト衝突速度の関係をそれぞれ示す。

プロジェクトがジルコニアの場合、リングクラック最外径は衝突速度の増加とともに大きくなっているが、リングクラック最内径は衝突速度によらず、ほ

ぼ一定の値を示している。また、リングクラック最外径は110 m/s程度からほぼ飽和する傾向を示している。これは、プロジェクト自体がターゲットとの衝突によって破壊することに起因している。一方、プロジェクトがSUJ2鋼の場合は、図14に示すように、リングクラック最外径は飽和することなく、衝突速度の増加に伴って大きくなることが認められた。また、プロジェクトがジルコニアおよびSUJ2鋼の場合とも、プロジェクトの衝突によって生じるリングクラックの直径は、ターゲットの板厚にはあまり影響されないことがわかる。これは、衝突表面にのみ観察される損傷はターゲットの背面の影響をほとんど受けないことを意味している。さらに、リングクラックの直径は衝突するプロジェクトの直径に対応しているが、リングクラックの発生限界衝突速度はプロジェクトの直径によらないことがわかる。これは、密度 ρ 、縦弾性係数 E_p 、ポアソン比 ν_p の完全弾性体のプロジェクトが縦弾性係数 E_t 、ポアソン比 ν_t の完全弾性体のターゲットに衝突速度 V で衝突する場合、両者の接触部のターゲットの境界表面に生じる半径方向の最大引張応力 σ_r は、Hertzの接触論⁽¹⁶⁾

図13 リングクラックの直径とプロジェクト衝突速度の関係(プロジェクトがジルコニアの場合)

図15 クレータ深さとプロジェクト衝突速度の関係(プロジェクトがジルコニアの場合)

図14 リングクラックの直径とプロジェクト衝突速度の関係(プロジェクトがSUJ2鋼の場合)

図16 クレータ深さとプロジェクト衝突速度の関係(プロジェクトがSUJ2鋼の場合)

によって

$$\sigma_r = \frac{2(1-2\nu_p)}{3} \left(\frac{5}{4\pi^8} \frac{\rho V^2}{(\lambda_p + \lambda_t)^4} \right)^{1/5} \dots\dots\dots (1)$$

ここで,

$$\lambda_p = (1-\nu_p^2)/\pi \cdot E_p, \lambda_t = (1-\nu_t^2)/\pi \cdot E_t$$

で表され, プロジェクトイルの直径に無関係となることによる。すなわち, この最大引張応力 σ_r がターゲットの引張強度を越えたときに初期き裂(プロジェクトイルが小球の場合はリングクラック)が発生すると考えるならば, ターゲットにはプロジェクトイルによる初期き裂発生限界衝突速度が存在するものと思われる。また, このようにして発生したリングクラックは, プロジェクトイルの押し込み過程において, ターゲットの内部に進展してコーンクラックを形成し, その深さはプロジェクトイルの押し込み方によって規定されることが考えられる。

5. 結 言

炭化けい素の平板試験片にジルコニアもしくはSUJ2鋼の小球を衝突させる実験を行い, 炭化けい素の衝突損傷に及ぼす板厚および微小飛来物の寸法の影響について検討した。また, 微小飛来物の衝突による炭化けい素の強度低下と衝突損傷の関係についても検討した。その結果, 以下の結論を得た。

(1) プロジェクトイルの寸法に対してターゲットの板厚が小さい場合, プロジェクトイルの衝突で生じた応力波の影響によってターゲットの衝突背面には独立した放射状のき裂, もしくはパーカッションコーンと呼ばれる離脱が発生し, これによってターゲットの残留強度は急激に低下する。

(2) 一方, ターゲットの板厚が大きい場合, ターゲットには背面損傷は発生せず, 残留強度は本質的にターゲットの衝突面に生じたコーンクラックの寸法に

依存する。

(3) プロジェクトイルの衝突によって衝突表面にのみ観察される損傷は, ターゲットの背面の影響をほとんど受けず, その大きさはターゲットの板厚には依存しない。

(4) 衝突表面に生じる損傷の大きさは, プロジェクトイルの寸法に対応するが, その発生限界衝突速度はプロジェクトイルの寸法には依存しない。

(5) ターゲットに発生する衝突損傷が主にコーンクラックであるならば, コーンクラック深さとプロジェクトイル運動エネルギーの関係は, プロジェクトイルの寸法あるいは材質によらず, 同一曲線で整理することができる。

文 献

- (1) 寺前・浜田, 機論, 55-520, A(1989), 2423.
- (2) Akimune, Y., ほか2名, *J. Am. Ceram. Soc.*, 72-5(1989), 791.
- (3) Akimune, Y., ほか2名, *J. Am. Ceram. Soc.*, 72-8(1989), 1422.
- (4) Shockey, D. A., ほか3名, *J. Am. Ceram. Soc.*, 73-6(1990), 1613.
- (5) Tsuruta, H., ほか3名, *J. Am. Ceram. Soc.*, 73-6(1990), 1714.
- (6) Akimune, Y., *J. Mater. Sci.*, 9(1990), 659.
- (7) 秋宗, セラミックス, 25-2(1990), 134.
- (8) 浜田・寺前, 材料, 39-443(1990), 1082.
- (9) 鈴木・ほか4名, 機論, 56-532, A(1990), 2431.
- (10) 寺前・浜田, 機構論, No. 900-50, A(1990), 359.
- (11) 前川・ほか2名, 第40期材料学会学術講演会前刷集, (1991), 348.
- (12) Maekawa I., ほか2名, *Eng. Fract. Mech.*, 40-4/5(1991), 879.
- (13) 申・ほか3名, 機論, 57-544, A(1991), 3057.
- (14) 浜田・寺前, 第34回構造強度に関する講演会講演集(1992), 258.
- (15) 例えば, 高橋・ほか4名, 窯業協会誌, 93-4(1985), 186.
- (16) 例えば, Knight, C. G., ほか2名, *J. Mater. Sci.*, 12(1977), 1573.