

東邦ガス(株) 基盤技術研究部 正 ○水谷安伸

新東Vセラックス(株) 内村勝次 名古屋工業大学名誉教授 高津 學

1. 緒言

セラミックスの耐熱衝撃性試験方法としては、水中急冷によって試験片に熱衝撃を与え、その後のき裂の有無から最大急冷温度差 ΔT_c を判定する方法が JIS で定められている。しかし、水中投下による急冷法では、熱伝達係数の値に大きな温度依存性があり、また、試験結果が試験片の形状や寸法に大きく左右されるなどの問題点がある。演者らはこれまでに円盤状試験片を外周から一定熱流束の境界条件で加熱する方法で熱衝撃抵抗係数 $R (= \sigma_f / E \alpha)$ の算出および損傷の程度が推定できることを示した¹⁾²⁾。この一定熱流束加熱法は熱流束に比例した熱応力が得られ、急冷媒体を用いないため熱伝達係数や応力腐食の影響を受けにくいなどの特長を持っている。今回、3点で拘束した JIS 形状の強度試験片の一面を一定熱流束加熱する方法で試験片に過渡的な熱応力を加え、同時に拘束点に発生する荷重を計測することにより熱衝撃時の破壊応力をリアルタイムに計測できる試験法を用いた試験装置を開発したので紹介する。

2. 原理

角柱試験片を上面から一定熱流束で加熱すると、その温度分布により凸状に梁の曲げが生じる。そこで、図1に示すように、梁の曲げを拘束すると、拘束点には荷重（反力）が生じ、試験片の下面には引張応力が発生することになる。そこで、この反力をロードセル

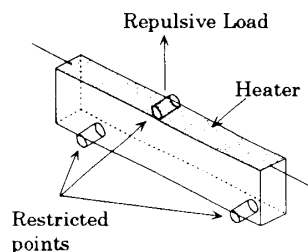
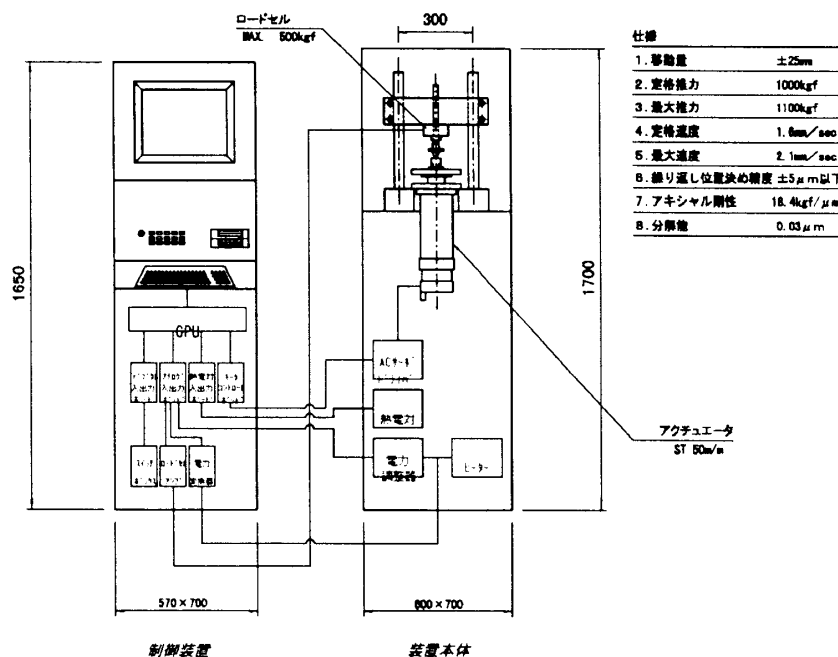


Fig.1 Schematic diagram of constant heat flux method.

Fig.2 Diagram and specifications of testing apparatus.



でモニターすれば試験片の破壊応力が推定できる³⁾。

伝熱条件としては上面が一定熱流束加熱、下面および側面は断熱条件であるため、一次元の熱伝導方程式により温度分布を求めることができる。

試験片高さ方向の温度分布を用いると、 $T = a + b\xi^2 + c\xi^n$ の多項式で近似すると、試験片下面の熱応力 σ および拘束点に発生する反力 P は、いずれも熱膨張係数 α 、ヤング率 E 、試験片寸法を定数として、 b 、 c 、 n の関数で示される。これらから熱応力と反力の関係 ($\phi = P / \sigma$) を求めた。 ϕ の値を用いると、実験で得られた反力の値から次式により熱応力の値が推定できる。

$$\sigma = 1 / \phi \times P \times L / \delta \quad \text{式(1)}$$

3. 開発した試験機の概要

開発した試験機は、3点拘束治具とサーボモーターによる移動テーブル、制御系、計測系、加熱電源を一体化したもので、テーブルの移動、加熱、荷重の計測はすべてシーケンス制御されるため、試験片を治具にセットすれば、(1)試験片の拘束→(2)一定電力で加熱→(3)計測→(4)破壊を検知して停止・復帰までがすべて自動で行われる。また、熱衝撃試験の他にも曲げ強度試験、繰り返し疲労試験など一般的なセラミックスの強度試験機としても用いることができる。

試験機の構成と仕様を図2に示す。

4. 実測例

開発した試験機を用いて、表1の物性値を持つ99.5%アルミナの耐熱衝撃性を評価した。なお、水中急冷法で求めたところ、この材料の最大急冷温度差 ΔT_c は200℃であった。試験では、加熱用ヒーターにはルテニウムペーストを850℃で焼付けて用い、ヒーターの加熱電力は200Wとした。

Table1 Properties of tested material

Material	99.5% Alumina
Density ρ (g/cm ³)	3.9
Young's modulus E (GPa)	400
Bending strength σ_{4f} (MPa)	450
Thermal Expansion Coefficient α ($\times 10^{-6}/K$)	8
Thermal conductivity λ (W/mK)	21
Specific heat C_p (J/KgK)	0.795

得られたデータの一例を図3に示す。図3の試験片では、加熱開始後12秒、ロードセル荷重60.3kgfで破壊した。解析にあたっては、加熱開始から破壊までの時間 t [sec]からフーリエ数 $\eta = \kappa t / l^2$ (無次元時間)を求め、予め数値計算によって求めた計算パラメータ ϕ の値を算出し、式(1)により耐熱衝撃破壊強度を求めた。図3の試験片では耐熱衝撃破壊強度 $\sigma = 401\text{MPa}$ であった。

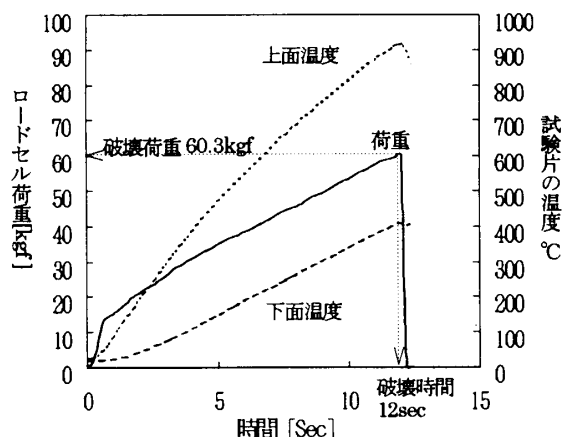


Fig.3 Measured load and temperature profiles during the thermal shock test.

同様にいくつかの試験片について測定し、解析した結果を表2に示す。アルミナを試験片とした場合にはフーリエ数の値は2～5程度であり、この領域においては、計算パラメータ ϕ の値は $\phi = 0.92 \sim 0.93$ とほぼ定数として取り扱えることがわかった。また、4本の試験片の測定値から、耐熱衝撃破壊強度の平均値は412MPaであり、4点曲げによる破壊強度 $\sigma = 450\text{MPa}$ よりも若干低い値を示した。これは曲げ強度試験と耐熱衝撃試験の熱応力分布(有効体積)や荷重負荷速度が異なることが原因と思われる。

Table2 Result of thermal shock test

Sample No.	Fractured Load [kgf]	Time to Fracture [sec]	Fourier number η	Parameter ϕ	Fractured Stress σ [MPa]
1	60.3	12	5.1	0.92	401
2	59.5	6	2.6	0.93	392
3	60.0	10	4.3	0.92	399
4	68.4	8	3.4	0.92	455
Avg.					412

5. 考察

測定された耐熱衝撃破壊強度は、耐熱衝撃環境下における材料の破壊強度を示す数値であり、数値シミュレーション等による熱応力解析を併用すればセラミック部品の設計等で活用できると考えられる。ここでは単純に理解するために耐熱衝撃性を示すパラメータ R ($= \sigma / E \alpha$)を求めた。 σ に耐熱衝撃破壊強度、 $\sigma = 412\text{MPa}$ を用いると、 $R = 130^\circ\text{C}$ となる。この値は、耐熱衝撃の条件にかかわらずここまで材料が耐えられるという最大の急冷温度差であり、部品設計時に最高温度と最低温度の温度差をこれ以下になるように設計すれば部品が耐熱衝撃により破壊することはない。

また、耐熱衝撃試験法としては、水中急冷法などの従来法と互換性があることが望まれる。水中急冷における最大急冷温度差は、経験式から、 $\Delta T_c = (1.5 + 3.25 / \beta) \times R$ で示すことができる。ここで β ($= \lambda / h l$)はビオ一数で、実験条件によって異なるが、水中急冷における熱伝達係数は多くの場合、 $h = 10^4 \sim 10^5$ 程 $\text{W/m}^2\text{K}$ 程度であるので、アルミナの場合には $\beta = 5 \sim 50$ 程度となる。)先に求めた R の値(130℃)から $\beta = 20$ と仮定して、水中急冷における試験結果を推定すると、 $\Delta T_c = 216^\circ\text{C}$ となる。この値は試験した材質を水中急冷した結果($\Delta T_c = 200^\circ\text{C}$)とも良く一致した。

6. 結言

3点で拘束した試験片の一面を一定熱流束加熱する方法により、セラミックスの耐熱衝撃試験ができる試験装置を開発した。試験の結果、拘束点に発生する反力から試験片の破壊応力が精度良く推定でき、部材設計に活用できる実験データが得られた。また、水中急冷試験法の結果と比較したところ良く一致した。

記号

σ : 応力, σ_f : 破壊応力, α : 熱膨張係数
 E : ヤング率, R ($= \sigma_f / E \alpha$) : 耐熱衝撃抵抗係数,
 T : 温度分布, a, b, c, n : 温度分布のパラメータ :
 ΔT_c : 最大急冷温度差, P : 反力, l : 試験片の梁高さ, L : スパン間距離, δ : 試験片の幅, $\eta = \kappa t / l^2$: フーリエ数, t : 時間, h : 熱伝達係数

文献

- 1) Journal of the Ceramic Society of Japan, 103[5] 525-528 (1995).
- 2) Journal of the Ceramic Society of Japan, 103[5] 494-499 (1995).
- 3) 材料, 44[498] 362-367 (1995).