脆性材料の強度保証試験法の基礎検討

高橋 一郎

(神奈川県工科大学工学部機械工学科, 243-02 厚木市下荻野 1030)

Proof Test for Assuring the Strength of Brittle Materials

Ichiro TAKAHASHI

(Department of Mechanical Engineering, Kanagawa Institute of Technology,)
1030, Shimoogino, Atugi-shi, Kanagawa 243-02

A test technique for loading the arbitrary stress and a method for strength evaluation were studied to develop a reliability testing method. (1) The test technique for loading arbitrary stress was developed by using thermal stress. (2) The thermal stress reached a maximum immediately after cooling, and then decreased monotonically. (3) The maximum thermal stress increased with an increase of both temperature and thickness of specimen. (4) The strength of brittle materials was evaluated by using a relationship between temperature and the maximum stress. [Received March 28, 1988; Accepted April 26, 1988]

Key words : Proof test, Brittle material, Thermal stress, Glass, Temperature, Strength, Finite element method

1. 緒 言

セラミックスのような脆性材料を機械部品等の強度部材として使用する場合に障害になる点は、他の構造用材料に比べて強度のばらつきが大きいことである。そのため、現在は、強度のばらつきをワイブル統計で解析し、寸法効果や部材の破壊確率を予測する方法等がとられている。しかし、強度設計上最も重要な破壊確率の極めて小さい領域で強度がワイブル分布に従わないことや、平滑材の強度が50%程度ばらつく材料においてもき裂材の強度のばらつきは数%程度と小さいことはよく知られている。

一方、セラミックスの破面を観察すると、破壊の起点には表面加工傷、介在物、粗大粒子、空孔等の微小な欠陥が認められることが多い。すなわち、構造用セラミックスの破壊靱性値は構造用鉄鋼材料の数十分の一であり、同一の応力が作用する場合の許容欠陥の寸法は百分の一から千分の一であるから、鉄鋼材料では問題にならないような微小な欠陥が強度を支配し、このことが強度のばらつきを大きくしていると考えられる。したがって、セラミックスにおいて得られている強度の大きなばらつきは材料が本質的に有している強度の統計的性質ではなく、欠陥分布に依存していると考えられる。

このため、最近欠陥に注目した強度^{(1)~(12)}や非破壊検査技術^{(13)~(16)}の研究が盛んとなってきている。しかしながら、X線や超音波探傷装置等で数十 μm 程度の機械部品の欠陥を検出する事は困難である。そこで、回転体であれば過速試験によって応力を作用させ実機の信頼性を確保している^{(17)~(18)}。しかし他の構造体では必要な応力を負荷する適当な試験法がないのが現状である。

本報では、部品の強度保証試験法を確立するために任意の応力を作用させる方法、及びその強度を評価する手法を平滑な脆性材料を取り上げ検討する。

2. 実験方法

供試材には、非晶質なセラミックスとして、建築用窓に使用されているフロート板ガラス(ソーダ石英ガラス)を用いた。供試材料の機械的性質を表1に示す。

試験片は、縦60 mm、横60 mm、厚さ5, 3, 2 mmの3種類とした。試験片の表面仕上げは、試験片採取時の両切断面を80~1000番の炭化ケイ素研磨紙を用いて行い、他の両表面は受け入れのままとした。

Table 1. Mechanical property of a glass.

Density (Kg/m^3)	2.46×10^3
Young's modulus (Pa)	6.86×10^{10}
Poisson's ratio	0.2
Thermal expansion coefficient ($1/^\circ\text{C}$)	9.9×10^{-6}
Specific heat ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)	1.15×10^3
Thermal conductivity ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	1.4

Fig. 1. Schematic of proof test apparatus.

Fig. 2. Schematic of cooling nozzle.

実験装置の概略を図1に示す。カンタル線を用いて製作した加熱炉に試験片を設置し試験温度に加熱する。昇温時間は30~40 minで、その後10~15 min保持した後、試験片に図2に示す直径3 mmの水冷却冷却端子を接触させ熱応力を発生させた。冷却端子の先端は熱伝導率が比較的大きいタフピッチ銅を用いた。冷却方法としてはガスによる直接冷却が考えられるが¹⁹⁾、この方法では熱伝達率が変化しやすいため本実験では水冷を採用した。冷却水は約15°Cの水道水を使用し、流量を $5 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ に変えて実験を行った。このとき、試験片表面の温度の測定を行うとともに、熱応力によるき裂の発生の有無を確認するためにA.E. (Acoustic Emission)を用いた。A.E.信号は試験片表面に取り付けた石英ガラス棒によって炉外に取り出し、A.E.カウンターで計数した。

3. 実験結果及び考察

3.1 熱負荷実験結果

図3は試験片を300°Cに加熱した後、流量 $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ の冷却端子を接触させ、端子中心より10 mmの点の温度変化を測定した結果を示す。温度は時間とともに単調に減少し、60 sで十数°C低下する。また、流量による温度の変化は本実験の範囲ではあまりなかつ

Fig. 3. Relationship between passed time and measured temperature at 10 mm from the center of a specimen.

Heated temperature $\theta = 300^\circ\text{C}$,
Thickness of a specimen $h_1 = 5 \text{ mm}$

Table 2. Experimental results for various thermal conditions.

○ : Initial cracks were observed,
× : Initial crack were not observed

Flow rate (m^3/s)	Thickness of speci- men (mm)	Heated temperature ($^\circ\text{C}$)		
		300	400	500
5×10^{-6}	2	× ×	× ○	○ ○
	3	× ○	× ○	○ ○
	5	× ○	○ ○	○ ○
1×10^{-5}	2	× ×	○ ○	○ ○
	3	× ×	○ ○	○ ○
	5	× ○	○ ○	○ ○
1.4×10^{-4}	2	× ×	○ ○	○ ○
	3	× ○	× ○	○ ○
	5	× ○	○ ○	○ ○

た。

加熱温度を300°Cから500°Cまでかえ、流量を $5 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ として行った実験結果を表2に示す。○×印はそれぞれ初期き裂の発生の有無を示す。初期き裂は冷却端子を接触させた瞬間(1 s以内)に発生し、その後2次的き裂が5~15 s後に発生及び進展した。本実験の範囲では、流量の増加はき裂の発生の有無に顕著な影響を与えない。また、試験片厚さと加熱温度の増加にしたがって、き裂が発生しやすくなる。

3.2 熱負荷応力解析

試験片に水冷端子を接触させたときに発生する温度分

布及び熱応力分布を解析するために有限要素法(“ANSYS-PC/THERMAL, LINEAR”:サイバネットシステム)を用いた。

解析にはアイソパラメトリック要素を用い、図4に示す分割モデル(節点:288, 要素:255)で非定常温度及び応力計算を行った。試験片中央部に冷却端子が接触したモデルを考慮し、端子中心から右部を図4のように分割した。試験片上で冷却端子と接触するa部とそれ以外のb部の熱伝達係数 h , h' は、流れている水(290~5816 W/m²°C)及び静止している空気(1.16~23 W/m²°C)の概略値²⁰⁾の範囲で、図3に示す温度の実測値と後述する計算結果を基に推定した。解析にはa, b部の熱伝達係数を仮定し、一様に加熱された試験片の冷却開始から経過時間毎の温度分布を非定常温度解析プログラム(ANSYS-PC/THERMAL)を用いて求めた。また、

Fig. 4. Mesh model used in finite element calculation.

Part (a) shows the surface contacting with a cooling nozzle and part (b) shows the surface contacting with the air.

Fig. 5. Relationship between passed time and temperature at point A and B after cooling a specimen.

Heated temperature $\theta = 300^{\circ}\text{C}$,

Thickness of a specimen $h_1 = 3\text{ mm}$

応力分布は前述の経過時間毎の温度分布を基に応力解析プログラム(ANSYS-PC/LINEAR)を用いて求めた。

図5は300°Cに加熱した試験片に冷却端子を接触させたときの端子中心直下(A点)と端子端(B点)の温度変化を示す。両点とも温度は10s程度まで急激に低下するが、その後はほぼ一定となる。また、端子中心直下であるA点の方がB点よりも温度低下は大きい。

図6は図5に示した条件下の試験片内部の等温度線図を冷却開始0.2s後と10s後について示す。後述のように応力が最大となる0.2s後では端子周辺に大きな温度こう配があるのに対し、10s後では温度こう配も非常にゆるやかで、ほぼ一様に冷却されていることがわかる。

図7は加熱温度を300°Cとした時の表面の熱伝達係数 h (図4のa部)と最大発生応力 σ の関係を示す。熱伝達係数及び試験片厚さが増すにしたがって、応力は単調に増加する。本材料の曲げ強度が約50 MPaであること及び表2に示した試験片厚さ3~5 mmの実験結果を基に、端子接触部の熱伝達係数 h を約2500 W/m²°Cと推定した。

経過時間 t と発生応力 σ の関係を図8に示す。各厚さの試験片とも冷却開始後0.2sまでは応力は増加するが、それ以後時間とともに単調に減少する。このことか

Fig. 6. Contour map on temperature of inside of a specimen.

Heated temperature $\theta = 300^{\circ}\text{C}$,

Thickness of a specimen $h_1 = 3\text{ mm}$

Fig. 7. Relationship between heat transfer coefficient and maximum stress of various specimens.
Heated temperature $\theta=300^{\circ}\text{C}$

Fig. 8. Relationship between passed time and maximum stress of various specimens.
Heated temperature $\theta=300^{\circ}\text{C}$

ら、最大応力が発生する時間は実験から得られたき裂発生時間とほぼ一致しているものと考えられる。

加熱温度 θ と最大発生応力 σ の関係を図 9 に示す。また、破線で示した値は曲げ強度の平均値を示す。加熱温度と試験片厚さを増加するに従って、応力は増加する。表 2 に示したき裂の発生状況は、曲げ強度を基準にした本図によって比較的よく説明できる。すなわち、加熱温度が 300°C では 5 mm の厚さの試験片に発生する応力は曲げ強度を超えているため、多少のばらつきはあるもののき裂が発生している。これに対し、 500°C では 2~5 mm の厚さのすべての試験片に発生する応力が曲げ強度を超えているためき裂が発生する。

以上より、本報告で検討した手法により任意の応力を任意の場所に発生させることができるとともに、部材の強度を評価することができる。

Fig. 9. Relationship between heated temperature and maximum stress of various specimens.

4. 結 言

部品の信頼性保証試験法を確立するために任意の応力を作用させる方法及びその強度を評価する手法を検討した結果、次のような結論が得られた。

(1) 熱応力を利用して任意の応力を発生させる手法を考案した。

(2) 発生する応力は冷却を開始してから短時間のうちに最大となり、その後ゆるやかに減少していく。

(3) 発生する最大応力は加熱温度及び試験片厚さの増加にしたがって増加する。

(4) 加熱温度と最大応力の関係を用いて脆性材料の曲げ強度を評価することができる。

謝 辞 本研究を実施するに当たって本学卒研究生・長谷川敏幸、渡辺聖一両君のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- 1) H. P. Kirchner, R. M. Gruver and W. A. Sotter, *Mater. Sci. Eng.*, 22, 147-56 (1976).
- 2) 井関孝善, 丸山忠司, 花房啓一, 鈴木弘茂, 窯協, 86, 47-52 (1978).
- 3) M. Kawai, H. Abe and J. Nakayama, International Symposium of Factors in Densification and Sintering of Oxide and Non-oxide Ceramics, Japan, 545-52 (1978).
- 4) W. C. Bourne and R. E. Tressler, *Frac. Mech. Ceram.*, 3, 113-24 (1978).
- 5) R. W. Rice, S. W. Freiman, R. C. Pohanka, J. J. Mecholsky, Jr. and C. Cm. Wu, *Frac. Mech. Ceram.*, 4, 849-74 (1978).
- 6) K. R. Mackinney and R. W. Rice, "Fracture Mechanics Methods for Ceramics, Rocks and Concrete", ASTM STP-745 (1981) pp. 118-26
- 7) H. P. Kirchner and E. D. Isaacson, *Frac. Mech. Ceram.*, 5, 57-70 (1983).
- 8) 宇佐美三郎, 高橋一郎, 木本 寛, 日本材料学会第 33 期学術講演会前刷, 159-61 (1984).
- 9) 山田敏郎, 星出敏彦, 古屋博章, 材料, 33, 28-33 (1984).
- 10) 高橋一郎, 宇佐美三郎, 中門公明, 宮田 寛, 志田 茂, 窯協, 93, 186-94 (1985).
- 11) 木本 寛, 宇佐美三郎, 宮田 寛, 日本機械学会論文集 (A 編), 51, 2482-88 (1985).

- 12) S. Usami, H. Kimoto, I. Takahashi and S. Shida, *Eng. Frac. Mech.*, **23**, 745-61 (1986).
 - 13) B. T. Khuri-yakub, G. S. Kino and A. G. Evans, *J. Am. Ceram. Soc.*, **63**, 65-71 (1980).
 - 14) 小塚 健, 山本哲夫, 非破壊検査昭和 57 年春期大会講演概要, 156-57 (1982).
 - 15) 北館憲一郎, 谷本慶哲, 田中俊一郎, セラミックス, **20**, 907-13 (1985).
 - 16) H. E. Helms, P. W. Heitman, L. C. Lindgren and S. R. Trasher, "Ceramic Applications in Turbine Engines", Noyes (1986) pp.106-31.
 - 17) P. Rothenkolber, M. Langer, R. S. Storm and F. Frechette, SAE No. 810523 (1981).
 - 18) 佐々木正史, 和泉隆夫, 阿知波清次, 伊藤高根, GTSJ, **13**, 28-35 (1985).
 - 19) K. T. Faber, M. D. Huang and A. G. Evans, *J. Am. Ceram. Soc.*, **64**, 296-301 (1981).
 - 20) 岐美 格, 奥野純平, 牧野州秀, "工業熱力学", 森北出版 (1972) p.151
-