傾斜を持つだ円形介在物における引張負荷による影響*

野 口 哲 雄^{*1}, 江 角 務^{*2}

Influence on the Tensile Load in Inclination Elliptic Inclusion

Tetsuo NOGUCHI^{*3} and Tsutomu EZUMI^{*3} Graduate School in Shibaura Institute of Technology,
3-9-14 Shibaura, Minato-ku, Tokyo, 108-8548 Japan

All structures have the potential to contain inclusion. Tensile load was given to inclusion. High stress appeared on the matrix in the circumference of the inclusion, which exfoliates from the matrix due to the high stress. Cracks then appeared on the matrix, gradually spread and destroyed the structure. This study researched elliptic inclusion in the tensile load. The direction of the tensile load is defined in the zero. Elliptic inclusion has some angle value. Studies on inclination elliptic inclusion did not exist until today. This study used the photoelastic method, method of caustics and finite element method. There are a few studies on inclusion by the experimental analysis but experimental analysis is difficult. However, this study identified a method for the experimental analysis of inclusion. If this method is used, results can easily be obtained by the experimental analysis of inclusion. As a result of this study, an elliptic inclusion equation was obtained. Elliptic inclusion can approximate all inclusions, and the result of this study can be applied to all inclusions.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Stress Concentration, Finite Element Method, Photoelastic Method, Method of Caustics, Inclusion, Tensile Load

1. 緒 言

構造体における介在物は構造体を破壊に至らせる原因となる。介在物を含有する構造体が負荷を受けたとき介在物周辺の母材に高い応力が発生する。過去において体積法による研究⁽¹⁾、有限要素法による研究⁽²⁾が見られる。しかし光弾性法による研究⁽³⁾等は少なく、介在物に関する実験的検討が不足していると思われる。介在物の形状に関して円形⁽⁴⁾、傾斜を有しないだ円形⁽⁵⁾、六角形⁽⁶⁾等がほとんどであり、傾斜を有するだ円形に関する検討は見られない。傾斜を有するだ円形介在物は実機材における様々な形状の介在物を近似的にモデル化できると考えられる。

本研究は光力学を主体とし、有限要素法を併用することにより引張負荷を受ける傾斜を持つだ円形介在物について、次の3項目の解析を試みた。

(1) 介在物を含有する試験片モデルによる引張試験に光弾性法を適用し、等色線縮写真と荷重-変位線図を得る。等色線縮写真より応力集中部の主応力差を求め、荷重-変位線図と試験片モデルを観察することにより破壊過程を求めた。同様に有限要素法により解析し、応力集中部の主応力差と相当応力を求めた。

(2) 長期間における負荷により界面に脆性き裂が発生

した状態をモデル化した試験片モデルに負荷を与え、光弾性法を適用して等色線縮写真を得る。等色線縮写真より応力拡大係数を得る。

(3) 塑性域において界面が剥離し、き裂が発生した状態をモデル化した試験片モデルに負荷を与え光弾性法を適用し、等色線縮写真を得る。き裂先端における応力拡大係数を得る。

2. 光弾性法における試験片モデルの製作

図1に示す JIS7 号引張試験片モデルを使用した。母材の平行部長さについては文献⁽⁷⁾に従った。介在物の寸法、界面の状態、き裂について表1に示す。本研究では、(a) 介在物と母材の界面が接着されたモデル(表1, No.1-1 ~ 3-13), (b) 界面が剥離し、き裂が発生したモデル(表1, No.4-1 ~ 6-13), (c) 界面は接着された状態でき裂が発生したモデル(表1, No.7-1 ~ 7-3), の3種類のモデルを用意した。

材料の特性値を表2に示す。母材をポリカーボネート(透明, 板厚 6mm, JIS K 6899-1-PC)により製作し、介在物の材料としてエポキシ樹脂(透明, 板厚 6mm, JIS K 7238-1-EP), アクリル(透明, 板厚 6mm, JIS K 6717-1-PMMA), ポリエチレン(透明, 板厚 6mm, JIS K 6922-1-PE)の3種を使用した。母材と介在物の製作において電子制御工作機械(MDX-15, Roland DG 社)を使用した。

* 原稿受付 2003 年 4 月 16 日。

^{*1} 正員, 芝浦工業大学大学院(〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)。

^{*2} 正員, 芝浦工業大学工学部。

E-mail: m602103@sic.shibaura-it.ac.jp

Table 1 Data of test specimen model

	No.							2a [mm]	2b [mm]	θ [DEG.]
	1-1	2-1	3-1	4-1	5-1	6-1	7-1	8	5	0
Shape data	1-2	2-2	3-2	4-2	5-2	6-2	7-2			30
	1-3	2-3	3-3	4-3	5-3	6-3	7-3			60
	1-4	2-4	3-4	4-4	5-4	6-4	7-4			90
	1-5	2-5	3-5	4-5	5-5	6-5	7-5		6	0
	1-6	2-6	3-6	4-6	5-6	6-6	7-6			30
	1-7	2-7	3-7	4-7	5-7	6-7	7-7			60
	1-8	2-8	3-8	4-8	5-8	6-8	7-8			90
	1-9	2-9	3-9	4-9	5-9	6-9	7-9		7	0
	1-10	2-10	3-10	4-10	5-10	6-10	7-10			30
	1-11	2-11	3-11	4-11	5-11	6-11	7-11			60
	1-12	2-12	3-12	4-12	5-12	6-12	7-12			90
	1-13	2-13	3-13	4-13	5-13	6-13	7-13		8	—
Inclusion data	Glued inclusion			Inserted inclusion			Glued inclusion			
	Epoxy resin	PMMA	Polyethylene	Epoxy resin	PMMA	Polyethylene	Epoxy resin			
Crack data	No crack			With the crack						

予備実験と文献⁽⁸⁾より引張負荷においてき裂が発生する位置は図2に示す P_1 部であり、き裂を有する試験片モデルにおいて、治具を使用して極細糸のこ(刃厚0.18mm, FFC社)を案内することにより P_1 部に直線状人工き裂(長さ3mm)を挿入した。

接着界面を有する試験片モデルにおいてエポキシ系接着剤を使用し、母材に介在物を接着した。24時間放置することにより接着剤を硬化させ、機械加工等における残留応力を除去するために、全ての試験片モデルにおいて図3に示すアニーリングを施した。2段の温度一定部を有するアニーリングサイクルにより、介在物を含有する試験片モデルにおける残留応力を除去可能である。アニーリング後の等色線縮写真を図4に示す。等色線が見られないことより残留応力が除去されたことが分かる。

Fig.1 Test specimen model (JIS No.7)

Table 2 Material data

Part	Material	Modulus of elasticity [MPa]	Poisson's ratio
Matrix	Polycarbonate	2600	0.36
	Epoxy resin	3000	0.33
Inclusion	PMMA	3200	0.38
	Polyethylene	600	0.46

Fig.2 Inclusion

Fig.3 Annealing cycle

Fig.4 Isochromatic line (After the annealing)

Table 3 Data of finite element model

	No.			2a [mm]	2b [mm]	θ (DEG.)	Node	Element
	8-1	9-1	10-1					
Shape data	8-2	9-2	10-2	8	5	0	269	502
	8-3	9-3	10-3			30	565	1060
	8-4	9-4	10-4			60	557	1048
	8-5	9-5	10-5			90	267	498
	8-6	9-6	10-6		6	0	265	494
	8-7	9-7	10-7			30	563	1060
	8-8	9-8	10-8			60	565	1064
	8-9	9-9	10-9			90	297	510
	8-10	9-10	10-10		7	0	291	502
	8-11	9-11	10-11			30	561	528
	8-12	9-12	10-12			60	561	1056
	8-13	9-13	10-13			90	291	498
Inclusion data	Glued inclusion			—	—	—	—	—
	Epoxy resin	PMMA	Polyethylene					
Crack data	No crack			—	—	—	—	—

3. 有限要素法における解析モデルの作成

光弾性法において使用した試験片モデル No.1-1 ~ 3-13 をモデル化した 2 次元有限要素解析モデルを作成した。要素分割を図 5 に示し、要素数等を表 3 に示す。平面応力モデルである。介在物周辺における要素を細かく分割することにより、目的とする介在物周辺について詳細に解析した。

4. モデルによる解析

4.1 引張試験 接着界面を有する介在物を含有する試験片モデル No.1-1 ~ 3-13 に対し、引張試験機 (Model 210, Intesco 社) により引張負荷を与え光弾性法を適用し、等色線縞写真と荷重-変位線図を得る。引張速度を 0.2mm/min とした。等色線縞写真より応力集中部の主応力差を求めた。荷重-変位線図と試験片モデルの観察により破壊過程を調べた。

比較のために介在物を含有しない試験片モデルと有限要素法により解析した。

4.2 塑性域に関する解析 4.1 より塑性域において界面が剥離し、き裂が発生すると分かった。界面が剥離し、き裂が発生した状態を可能な限り再現した試験片モデル No.4-1 ~ 6-13 に光弾性法を適用した。等色線縞写真を撮影し、応力拡大係数を求めた。き裂先端における応力集中を確認するためにヘリウムネオンガスレーザー光線を使用した発散光によるコースティック法を併用した。

4.3 脆性破壊に関する解析 長期間における繰り返し負荷により構造体内部に疲労が生じ、き裂が発生する。構造体における大部分は健全な状態であるが、き裂先端のみが塑性域にある。繰り返し負荷によりき裂は進展し、設計荷重に比して極めて低い荷重により構造体は脆性破壊される。長期間における負荷により界面にき裂が発生した状態をモデル化した試験片モデル

No.7-1 ~ 7-13 に光弾性法を適用し、等色線縞写真を撮影した。応力拡大係数を求めた。

(a) All element

(b) Close up of inclusion

Fig.5 Finite element model (Model No.8-2)

Fig.6 Isochromatic line (Model No.1-9)

5. 解析結果

5.1 引張試験 光弾性法による解析より得られた等色線縮写真を図 6 に示す。介在物周辺に応力集中が見られる。介在物界面において特に応力が集中する部分を図 2 に示す。P₁ 部はき裂が発生する部分であり、P₂ 部は剥離が生じる部分である。等色線の推移と荷重-変位線図を図 7 に示す。点 A は弾性域であり点 B は最大荷重である。点 B から点 C において介在物界面が剥離し、き裂が発生する。点 C から点 D において局部的なくびれが発生し、点 E において破断した。これより引張負荷を受ける介在物において図 8 に示す破壊過程を経ることが分かった。最大荷重と角度 θ の関係を図 9 に示す。角度 θ が大きくなるに従い最大荷重が低くなることが分かった。主応力差と角度 θ の関係を図 10 に示す。

有限要素法による解析結果は光弾性法による解析結果と傾向が一致した。これより介在物に関する光弾性法による解析は有効であると思われる。相当応力と角度 θ の関係を図 11 に示す。3 次元応力場において直交する 3 方向の主応力 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ より、相当応力 σ_e は次式により定義される。

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \}}$$

5.2 脆性破壊に関する解析 き裂先端に高い応力集中が見られた。応力拡大係数と角度 θ の関係を図 12 に示す。

5.3 塑性域に関する解析 き裂先端に高い応力集中が見られた。応力拡大係数と角度 θ の関係を図 13 に示す。角度 $\theta = 30^\circ, 60^\circ$ 付近において応力拡大係数は高い値を示すことが分かった。コースティックス法により得られたコースティック像を図 14 に示す。

Fig.7 Relation between tensile load and displacement

き裂先端に高い応力集中が見られ、P₁ 部に発生するき裂が破壊に関与することが分かり、5.1 において求めた破壊過程と一致した。

6. 考 察

6.1 主応力差による評価 負荷を受ける材料における降伏条件として最大せん断応力説 (Tresca の降伏条件) が知られる⁽⁹⁾。3 次元応力場において直交する 3 方向の主応力を $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ とし、相当降伏応力を σ_e 、最大せん断応力を τ_{max} とする。

$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ の関係が成立するとき、最大せん断応力説によると

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{1}{2} \sigma_e \quad (1)$$

各主応力面における主応力が存在する一般的な 2 次元応力場に最大せん断応力説を適用すると

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{1}{2} \sigma_e \quad (2)$$

式 (2) より主応力差は

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_e \quad (3)$$

主応力差と相当降伏応力が等しい状態において材料が降伏することが分かる。主応力差は光弾性法により求められるパラメータである。しかし主応力差による評価は一般的と考えられず、直応力、せん断応力による評価が一般的である。光弾性法において σ_2 が零であり応力が直接的に求まる自由境界における解析、多くの時間を要する特殊な解析⁽¹⁰⁾が見られる。光弾性法により自由境界以外を容易に解析する方法が必要であり、本研究は主応力差による評価⁽¹¹⁾を適用した。光弾性法による結果と有限要素法による結果は一致しており、主応力差による評価は有効であると思われる。光弾性法において困難であった試験片モデル内部にお

Fig.8 Fracture

Fig.9 Maximum load (Model No.1-1 ~ 1-13)

Fig.10 $\sigma_1 - \sigma_2$ (Part P_1 , Model No.1-1 ~ 1-13) Fig.11 Equivalent stress (Part P_1 , Model No.8-1 ~ 8-13) Fig.12 Stress intensity factor K_1 (Model No.7-1 ~ 7-13) Fig.13 Stress intensity factor K_2 (Model No.4-1 ~ 4-13)

ける解析が主応力による評価により容易となり、光弾性法の適用範囲が拡大すると考えられる。

6.2 引張試験、塑性域に関する実験式 引張試験における光弾性法の適用により得た P_1 部における主応力差を σ_{PE1} 、 P_2 部における主応力差を σ_{PE2} 、有限要素法より得た P_1 部における相当応力を σ_{ES1} 、 P_2 部における相当応力を σ_{ES2} とする。き裂を有する試験片モデルに光弾性法を適用することによる塑性域に関する解析により得たき裂先端における開口形応力拡大係数を K_1 、き裂先端における面内せん断形応力拡大係数を K_2 とする。実験式の基本形を例えば σ_{PE1} について次のように仮定した。

$$\sigma_{PE1} = A \cdot \sin(B\theta + C) + D \quad (4)$$

例として光弾性法により求められた P_1 部における主応力差 σ_{PE1} に関する実験式を導く。エポキシ樹脂製介在物を含有する試験片モデル (Model No.1-1 ~

Tips of cracks

Fig.14 Caustic pattern

1-13) に関する主応力差と角度 θ の関係 (図 10) を式 (4) により近似的に示すと

$$b/a = 0.625 \Rightarrow \sigma_{PE1} = 24 \left| \sin \frac{3}{2} \theta \right| + 13$$

$$b/a = 0.750 \Rightarrow \sigma_{PE1} = 13 \left| \sin \frac{3}{2} \theta \right| + 14$$

$$b/a = 0.875 \Rightarrow \sigma_{PE1} = 2 \left| \sin \frac{3}{2} \theta \right| + 15$$

$$b/a = 1.000 \Rightarrow \sigma_{PE1} = 16$$

上式において式 (4) の係数 A に相当する値と b/a の関係を図 15 に示し、定数 D と b/a の関係を図 16 に示す。 A, D を 1 次方程式により近似的に示すと

$$A = -64 \frac{b}{a} + 64 \quad (5)$$

Fig. 15 Relation between coefficient A and b/a Fig. 17 Relation between coefficient A_1 and b/a Fig. 19 Relation between coefficient D_1 and b/a

$$D = 8 \frac{b}{a} + 8 \text{ ----- (6)}$$

σ_{PEI} の上記近似式と式(4)より $C = 0$ と分かる。
式(5), 式(6)を式(4)に代入すると

$$\sigma_{PEI} = \left[-64 \frac{b}{a} + 64 \right] \left| \sin \frac{3}{2} \theta \right| + \left(8 \frac{b}{a} + 8 \right) \text{ -- (7)}$$

すなわち

$$A_1 = -64, A_2 = 64, D_1 = 8, D_2 = 8$$

式(7)に A_1, A_2, D_1, D_2 を適用すると

$$\sigma_{PEI} = \left[A_1 \frac{b}{a} + A_2 \right] \left| \sin \frac{3}{2} \theta \right| + \left[D_1 \frac{b}{a} + D_2 \right] \text{ -- (8)}$$

同様にアクリル製介在物を含有する試験片モデル

$$\begin{aligned} \sigma_{PEI} &= \left\{ \left[24 \frac{E_A}{E_B} - \frac{904}{13} \right] \frac{b}{a} + \left[-24 \frac{E_A}{E_B} + \frac{904}{13} \right] \right\} \left| \sin \frac{3}{2} \theta \right| + \left\{ \left[16 \frac{E_A}{E_B} + \frac{56}{13} \right] \frac{b}{a} + \left[-6 \frac{E_A}{E_B} + \frac{8}{13} \right] \right\} \\ &= \left\{ \left[24 \frac{E_A}{E_B} - 69.54 \right] \frac{b}{a} - 24 \frac{E_A}{E_B} + 69.54 \right\} \left| \sin \frac{3}{2} \theta \right| + \left\{ \left[16 \frac{E_A}{E_B} + 4.308 \right] \frac{b}{a} - 6 \frac{E_A}{E_B} + 0.6154 \right\} \text{ ---- (9)} \end{aligned}$$

6.3 実験式の一般化 6.2 において求められた実験式を一般化するための係数を求めるために介在物と P_1 部の相対位置を求める。座標軸を図 21 に示す。介在物の輪郭は次式により求められる。

Fig. 16 Relation between constant D and b/a Fig. 18 Relation between constant A_2 and b/a Fig. 20 Relation between constant D_2 and b/a

(Model No.2-1 ~ 2-13), ポリエチレン製介在物を含有する試験片モデル (Model No.3-1 ~ 3-13) に関する解を求めた。引張試験に関する全ての試験片モデル (Model No.1-1 ~ 3-13) より A_1, A_2, D_1, D_2 に関して図 17 ~ 図 20 を得た。 E_A は介在物の縦弾性係数, E_B は母材の縦弾性係数である。図 17 ~ 図 20 より近似的に

$$A_1 = 24 \frac{E_A}{E_B} - \frac{904}{13}, A_2 = -24 \frac{E_A}{E_B} + \frac{904}{13}$$

$$D_1 = 16 \frac{E_A}{E_B} + \frac{56}{13}, D_2 = -6 \frac{E_A}{E_B} + \frac{8}{13}$$

A_1, A_2, D_1, D_2 を式(8)に代入すると

$$\frac{x_1}{a^2} + \frac{y_1}{b^2} = 1 \text{ ---- (10)}$$

介在物の輪郭に接し, P_1 部を通る直線は

$$y_1 = AC \cdot x_1 + BC \text{ ---- (11)}$$

$$y_C = A_C \cdot x_C + B_C \quad (12)$$
$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta \quad \text{-----} (13)$$
$$A_C = \tan \theta_1 \text{-----} (14)$$
$$\left[\frac{1}{a^2} + \frac{A_C^2}{b^2} \right] x_1^2 + \frac{2A_C B_C}{b^2} x_1 + \frac{B_C}{b^2} - 1 = 0 \quad \text{---(15)}$$
$$B_C = \frac{1}{ab} \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{A_C^2}{b^2}} \quad (16)$$
$$x_c = \left\{ -\frac{2A_c B_c}{b^2} \pm \sqrt{\left(\frac{2A_c B_c}{b^2} \right)^2 - 4 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{A_c^2}{b^2} \right) \left(\frac{B_c^2}{b^2} - 1 \right)} \right\} / \left\{ 2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{A_c^2}{b^2} \right) \right\} \quad (17)$$
$$r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \dots\dots\dots (18)$$
$$X_V = r \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} - \theta - \tan^{-1} \frac{\sqrt{y_C^2 - r^2}}{r} \right] \quad \dots (19)$$

求められた x_r により, 実験式に関する試験片モデル平行部の幅を一般化するための無次元量を持つ係数を求める. P_1 部において介在物における主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)_A$, 母材における主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)_B$, 介在物における開口形応力拡大係数 $(K_1)_A$, 介在物における面内せん断形応力拡大係数 $(K_II)_A$, 試験片モデル平行部における開口形応力拡大係数 $(K_1)_B$, 試験片モデル平行部における面内せん断形応力拡大係数 $(K_II)_B$.

Fig.21 Relation between inclusion and P_1

$$(B_B - B_A) : B_A = (\sigma_1 - \sigma_2)_A : (\sigma_1 - \sigma_2)_B \dots (20)$$

$$(B_B - B_A) : B_A = (K_I)_A : (K_I)_B = (K_{II})_A : (K_{II})_B \cdots (21)$$

$$(D^B \quad D^A) \cdot D^A = (\pi_1^* A \cdot (\pi_1^*)^B - (\pi_1^* A \cdot (\pi_1^*)^B) \quad (21)$$

$$B_A = 2x_v \quad (22)$$

実機材における平行部の幅を B_{BM} 、試験片モデルにおける平行部の幅を B_{BA} とすると、式(20)、式(21)より平行部の幅に関して諸量を一般化する係数 U が次のように求められた。

$$U = \frac{B_A}{B_{BA} - B_A} \cdot \frac{B_{BM} - B_A}{B_A} \\ = \frac{24 - B_A}{B_{BA} - B_A} \cdots \cdots (23)$$

Exfoliation	Crack	Part	Equation
Nothing	Nothing	P _I	$\sigma_{PEI} = \left(\left(\left(24 \frac{E_A}{E_B} - 69.54 \right) \frac{b}{a} - 24 \frac{E_A}{E_B} + 69.54 \right) \left \sin \frac{3}{2} \theta \right + \left(16 \frac{E_A}{E_B} + 4.308 \right) \frac{b}{a} - 6 \frac{E_A}{E_B} + 0.6154 \right) TUVW$
			$\sigma_{RSI} = \left(\left(\left(98.67 \frac{E_A}{E_B} - 273.4 \right) \frac{b}{a} - 98.67 \frac{E_A}{E_B} + 273.4 \right) \left \sin \frac{3}{2} \theta \right + \left(-8 \frac{E_A}{E_B} + 41.85 \right) \frac{b}{a} + 10 \frac{E_A}{E_B} - 16.31 \right) TUVW$
		P _{II}	$\sigma_{PEI} = \left(\left(\left(8 \frac{E_A}{E_B} - 41.85 \right) \frac{b}{a} - 8 \frac{E_A}{E_B} + 41.85 \right) \left \sin \frac{3}{2} \theta \right + 18 \frac{b}{a} + 1 \right) TUVW$
			$\sigma_{RSI} = \left(\left(\left(-277.3 \frac{E_A}{E_B} - 32 \right) \frac{b}{a} + 277.3 \frac{E_A}{E_B} + 32 \right) \left \sin \frac{3}{2} \theta \right + 40 \frac{b}{a} - 13 \right) TUVW$
	Exist	P _I	$(K_I)_B = (1.136 \sim 1.559) K_I$
			$(K_{II})_B = (3.686 \sim 4.500) K_{II}$
Exist	Exist	P _I	$K_I = \left(\left(\left(\left(0.133 \frac{E_A}{E_B} - 0.4308 \right) \frac{b}{a} - 0.1333 \frac{E_A}{E_B} + 0.4308 \right) \left \sin(3 \theta \cos 2 \theta + 3 \theta) \right + \left(-3.6 \frac{E_A}{E_B} + 4.831 \right) \frac{b}{a} + 2.35 \frac{E_A}{E_B} - 2.642 \right) TUV$
			$K_{II} = \left(\left(-0.2133 \frac{b}{a} + 0.2133 \right) \left \sin(3 \theta \cos 2 \theta + 3 \theta) \right + \left(0.16 \frac{E_A}{E_B} + 0.1497 \right) \frac{b}{a} - 0.08667 \frac{E_A}{E_B} + 0.03333 \right) TUV$

Table 5 Coefficient

Coefficient	Step	Equation
T		$T = \frac{t}{6}$
	1	$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta$
U	2	$A_c = \tan \theta_1$
	3	$B_c = \frac{1}{ab} \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{A_c^2}{b^2}}$
	4	$X_c = -\frac{2A_c B_c}{b^2} \pm \sqrt{\left(\frac{2A_c B_c}{b^2}\right)^2 - 4\left(\frac{1}{a^2} + \frac{A_c^2}{b^2}\right)\left(\frac{B_c^2}{b^2} - 1\right)} \left/ 2\left(\frac{1}{a^2} + \frac{A_c^2}{b^2}\right) \right $
	5	$Y_c = A_c X_c + B_c$
	6	$r = \sqrt{x_c^2 + y_c^2}$
	7	$x_r = r \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta - \tan^{-1} \frac{\sqrt{y_c^2 - r^2}}{r} \right)$
	8	$B_A = 2x_r$
	9	$U = \frac{24 - B_A}{B_{BA} - B_A}$
V		$V = \sqrt{\frac{ac}{3}}$
W		$W = \frac{P}{3000}$

Table 6 Variable

σ_{P1}	Difference in principal stress (P_1) [MPa]	a	Major axis of elliptic inclusion [mm]
σ_{P2}	Difference in principal stress (P_2) [MPa]	b	Minor axis of elliptic inclusion [mm]
σ_{BS1}	Equivalent stress (P_1) [MPa]	t	Thickness of structure [mm]
σ_{BS2}	Equivalent stress (P_2) [MPa]	θ	Slant of the elliptic inclusion [DEG.]
K_I	Stress intensity factor (Mode I, ductile fracture, P_1) [$N \cdot mm^{-3/2}$]	B_{BA}	Breadth of structure [mm]
K_{II}	Stress intensity factor (Mode II, ductile fracture, P_1) [$N \cdot mm^{-3/2}$]	A_c	Crack length [mm]
$(K_I)_B$	Stress intensity factor (Mode I, brittle fracture, P_1) [$N \cdot mm^{-3/2}$]	E_A	Modulus of longitudinal elasticity (Inclusion) [MPa]
$(K_{II})_B$	Stress intensity factor (Mode II, brittle fracture, P_1) [$N \cdot mm^{-3/2}$]	E_B	Modulus of longitudinal elasticity (Matrix) [MPa]
		P	Load to structure [N]

同様に実機材における板厚 t 、実機材におけるき裂長さ ac 、実機材における荷重 P より、板厚を一般化するための係数 T 、き裂長さを一般化するための係数 V 、荷重を一般化するための係数 W を求め、実機材における状況に対応可能とした。

6.4 脆性破壊における実験式 接着界面を持つ試験片モデル (Model No.7-1 ~ 7-13) と他の試験片モデルにおける応力拡大係数⁽¹²⁾を比較することにより脆性破壊における開口形応力拡大係数 $(K_I)_B$ 、面内せん断形応力拡大係数 $(K_{II})_B$ に関する実験式を得た。

6.5 総括 表 4 に示す実験式と表 5 に示す係数を得た。表 6 に変量を示す。プログラムを作成し、任意の条件における値を求めると適正な値を得た。介在物を含有し、引張負荷を受ける物体に関する解析等に実験式を適用可能であると思われる。

7. 結 言

傾斜を有するだ円形介在物に関する引張負荷における影響を調べ、次の知見を得た。

- (1) だ円形介在物周辺に高い応力集中が見られ、構造体が破壊する可能性が高い。
- (2) 引張負荷における破壊過程が分かった。
- (3) 引張方向を零とした介在物傾斜角度 θ が大きくなるに従い、最大荷重は低くなる。
- (4) だ円形介在物最外部 P_1 における主応力差と相当応

力は介在物傾斜角度 θ により大きく影響される。

- (5) だ円形介在物最外部 P_1 における開口形応力拡大係数と介在物傾斜角度 θ の関係において、母材と介在物の界面における剥離の有無により異なる傾向を示す。

(6) 光弾性法による主応力差をパラメータとした評価は有効であると思われる。

- (7) 応力集中部における主応力差、相当応力、応力拡大係数に関する実験式を得た。

参 考 文 献

- (1) 平島健一・木村清和・広瀬幸雄, 機論, **57**-540, A (1991), 211-218.
- (2) 村田雅人・向井喜彦, 機論, **58**-555, A (1992), 57-62.
- (3) 中川文人・仲野雄一・沢俊行, 機論, **58**-554, A (1992), 177-183.
- (4) 陳玳珩, 機論, **61**-584, A (1995), 121-125.
- (5) 藤本浩司, 機論, **65**-640, A (1999), pp.85-93.
- (6) 陳玳珩・西谷弘信, 機論, **57**-542, A (1991), 226-230.
- (7) 西谷弘信・森山稔, 機論, **67**-653, A (2001), 55-59.
- (8) 村田雅人・向井喜彦, 機論, **58**-555, A (1992), 57-62.
- (9) 竹内洋一郎, 材料力学, (1969), 296, 日新出版.
- (10) 辻二郎・西田正孝・河田幸三, 光弾性実験法, (1940), 141, 日刊工業新聞社.
- (11) 大滝誠一・小林慎・松本信彦, 機講論, No.02-1 (2002-9), 199-200.
- (12) 野口哲雄・江角務, 2002 年度実験力学学会年次講演論文集, (2002-8), 285-286.