等二軸引張りを受ける WC-Co 溶射皮膜の 繰返し分割およびはく離過程の解析†

高 三 徳* 中 佐 啓治郎** 加 藤 昌 彦**

Analysis of Repeating-Division and Delamination Processes of Sprayed WC-Co Coating under Biaxial Tension

by

Sande GAO *, Keijiyo NAKASA ** and Masahiko KATO **

In order to characterize the "Repeating-division type" cracking pattern which is often observed in brittle coating on a ductile substrate under increasing biaxial tensile stress, the bulge tests were carried out on steel disks with WC-Co coating which were prepared by high-velocity flame spraying. Moreover, an elastic analysis was applied to the division process of coating to derive a relation among the crack interval, the tensile stress and strain of substrate at the division, coating and substrate thickness and material's constants. The characteristics of the division process calculated from the analytical equation agree qualitatively well with the experimental results that the crack interval decreases with an increase in tensile stress and the crack interval is large when the coating thickness is large at the same stress.

Key words: Spray coating, Biaxial tension, Cracking pattern, Repeating-division, Elastic and plastic analysis

1 緒 言

セラミックおよびサーメット溶射¹⁾は、機械・構造物に耐熱性、耐摩耗性、耐食性などの機能を与えるために有効な方法であるが、溶射部材が熱サイクル、繰返し応力または過大応力を受けると、皮膜に割れまたははく離が生じることがある。溶射の目的が熱遮へい性や耐摩耗性の向上であれば、皮膜に割れが生じて性能はあまり低下しない。しかし、金型や圧延ロールなどではコーティング皮膜に割れが生じると製品にきずが転写されるし、耐食または耐酸化コーティングの場合には、腐食雰囲気なき裂を通して基材に達するので、き裂発生応力および応力上昇によるき裂密度の増加割合が問題となる。さらに、もし皮膜がはく離すると、損傷は決定的となる。したがって、皮膜の割れ過程、割れ形態およびはく離についての研究は、コーティング部材の表面損傷の評価と表面性能向上のために不可欠である。

ところで、実際の構造物では压力容器、パイプ、金型など、二軸引張応力を受ける部材も多い。著者らの研究によると、二軸引張りを受けるぜい性コーティング皮膜に発生する割れ形態は、一軸引張応力を受ける皮膜の割れ形態と大きく異なり、皮膜の強度と皮膜・基材の界面強度の相対的な大小関係によって、「くもの巣型」、「島状はく離型」、「繰返し分割型」と、最低限3つのタイプに分類できる。^{2), 3)} このうち、皮膜強度に比べて界面強度の小さいぜい性皮膜では島状はく離型の割れが、³⁾ 界面強度の大きいぜい性皮膜では繰返し分割型の割れが生じる。

本研究では、「繰返し分割型」の割れ挙動の特徴を明らかにするために、実験および解析を行った。

2 試 験 方 法

等二軸引張試験として液圧バルジ試験を行った。このとき用いた円板試験片基材(厚さ $B_2 = 1\text{mm}$, 直径 190mm)は、冷間圧延鋼板(SPCC-S)であり、これをブラスト処理後、表面中央部の直径 70mm の円形領域に WC (88mass%) - Co (12mass%) 粉末を高速フレーム溶射した。溶射条件は、溶射装置および溶射ガン: スルーザーマテコ社製ダイヤモンドジェット (DJ) ガン, 溶射ガン移動速度: 333mm/s , 溶射距離: 250mm , 溶射ガス: プロピレン + 酸素で、溶射繰返し回数を変えて膜厚 B_1 を $0.05 \sim 0.28\text{mm}$ に変化させた。

バルジ試験装置を Fig. 1 に示す。試験方法は前報³⁾と同様であり、所定の油圧 p ごとに、ダイヤルゲージで皮膜表面の垂直方向変位を数点測定し、曲率半径 r を最小自乗法によって求めた。溶射を施していない基材部分の曲率半径を r' とすると、 $r' \approx r \gg B_2$ であるので、この部分の等二軸引張応力 σ は、次式によって求めた。

$$\sigma = \frac{r p}{2B_2} \approx \frac{r p}{2B_2} \quad (1)$$

また、皮膜の繰返し分割の大部分は基材が塑性変形している間に起こるので、基材の一軸引張応力下の変形挙動を次式で表される直線硬化材のそれで近似した。

$$\begin{aligned} \sigma &= E_e \varepsilon & (\sigma \leq \sigma_{ys}) \\ \sigma &= \sigma_{ys} + E_p (\varepsilon - \varepsilon_{ys}) & (\sigma > \sigma_{ys}) \end{aligned} \quad (2)$$

† 原稿受理 平成 10 年 2 月 6 日 Received Feb. 6, 1998

* 広島大学大学院 〒739-8527 東広島市鏡山, Graduate Student, Hiroshima Univ., Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527

** 正 会 員 広島大学工学部第一類(機械系) 〒739-8527 東広島市鏡山, Dept. of Mech. Eng., Hiroshima Univ., Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, 739-8527

Fig. 1. An apparatus for bulge test of disk specimen.

ここで, E_e , E_p および σ_{ys} は基材の弾性係数, 塑性係数および降伏強度であり, ε および ε_{ys} は基材のひずみおよび降伏ひずみである.

つぎに, 等二軸引張を受ける溶射試験片の溶射を施した基材部分に作用する二軸引張応力 σ_2 およびひずみ ε_2 は次式によって計算した.³⁾

$$\sigma_2 = \left\{ \sigma + \frac{(1-\nu_2)}{(1-\nu_1)} \cdot \frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{E_1}{E_p} \left(1 - \frac{E_p}{E_e} \right) \sigma_{ys} \right\} / \left\{ 1 + \frac{B_1}{B_2} \cdot \frac{(1-\nu_2)}{(1-\nu_1)} \cdot \frac{E_1}{E_p} \right\}$$

$$\varepsilon_2 = (1-\nu_2) \left\{ \sigma_{ys} / E_e + (\sigma_2 - \sigma_{ys}) / E_p \right\} \quad (3)$$

ここで, E_1 は皮膜の弾性係数, ν_1 および ν_2 はそれぞれ皮膜および基材のポアソン比, σ は溶射を施していない基材部分に作用する引張応力 (式 (1) から求める) である. 皮膜の分割が起こると, 皮膜内の応力のみならず分割き裂先部近傍の基材の応力も不均一となるので, 式 (3) は, 皮膜の分割が生じたのちには分割位置から十分離れた部分の応力およびひずみを表す.

3 解 析

3・1 繰返し分割型割れの形成過程とモデル化

Fig. 2 に, 皮膜厚さ $B_1 = 0.28\text{mm}$ の試料で観察された繰返し分割型の割れ形態を示す. 高速フレーム溶射皮膜と基材との界面強度は大きいので, 圧力が増加すると, 界面せん断応力が臨界値 τ_c^i に達する前に皮膜に作用する引張応力が臨界引張強度 σ_{c1} に達して, 皮膜は次々と小さな領域に分割される. その際, 後から発生したき裂は, すでに発生したき裂に衝突して停止し, これらを横断することはない. 界面に作用するせん断応力が臨界値 τ_c^i に達するとはく離が生じ, 分割が終了する.

つぎに皮膜の分割過程を, Fig. 3 (a) に示すような正方形の分割モデルで表す. 最初一辺の長さ a_1 の正方形領域が長さ $a = a_1$ のき裂によって二つの領域に分割され, 応力が上昇すると $a_2 = a_1/2$ の 6 本のき裂により 8 つの領域に分割される, という過程が繰返されるなら, n 番目の分割が生じたときのき裂長さは $a_n = a_1/2^{n-1}$, き裂本数は $N = 3 \times 2^{2n-3}$ であるから, a_n と N の間には次式が成立する.

$$\log N = \log(3/2) - 2\log(a_n/a_1) \quad (4)$$

Fig. 4 は, Fig. 2 のような写真から a_n と N の関係を測定したものである. 実測されるき裂長さはランダムである

Fig. 2. Repeating division type cracking pattern ($p = 8.5\text{MPa}$, $B_1 = 0.28\text{mm}$).

Fig. 3. Idealized model of repeating division process.

Fig. 4. Relation between crack length or division interval and number of cracks after repeating division.

ので, $0.75a_n < a < 1.5a_n$ であるき裂はすべて $a = a_n$ としてプロットし, 直径 24mm の円領域内で $a_n = 16\text{mm}$ ($12 < a \leq 24$), 8mm ($6 < a \leq 12$), 4mm ($3 < a \leq 6$) および 2mm ($1.5 \leq a \leq 3$) に相当するき裂本数 N を測定した. Fig. 4 によると, 膜厚が 3 種類に異なる場合について求めた直線の勾配はいずれもほぼ -2 であり, 式 (4) が成立することが分る. このように, Fig. 3 (a) の分割モデルは実際の皮膜分割過程をよく表現しているので, 本研究ではこのモデルを用いて解析を行う.

3・2 割れ間隔と膜厚および材料特性の関係の導出

一軸引張応力下における皮膜の分割過程を解析した研究は多数あるが、^{4)~8)} 二軸応力下における皮膜の分割過程を取扱った例は少ない。そこで、本研究では Jeong および Kwon⁸⁾ の弾性解析を二軸引張応力下の皮膜分割過程に拡張するとともに基材が塑性変形する場合にも適用できるようにする。任意の皮膜分割過程の1段階として Fig. 3 (a) の一部 (円で囲んだ部分) を拡大した Fig. 3 (b) の矩形分割領域 ABCD を考える。ただし、横方向とたて方向の応力が異なる一般の二軸引張応力が作用する場合の皮膜分割過程も表現できるようにするため、一辺の長さが L_x および L_y の矩形皮膜を取り扱い、 x 軸と y 軸の原点 O を皮膜の中心にとり、Fig. 5 は、この矩形皮膜の y 断面について、 z 軸の原点を皮膜と基材の界面にとり、皮膜および基材の任意の点に作用する x 方向の引張応力 σ_{x1} および σ_{x2} 、界面近傍の基材のせん断応力 τ_{zx2} (接合界面のせん断応力を τ_{zx}^i とする) の分布を単純化して描いたものである。解析の容易さのため、皮膜内の引張り応力 σ_{x1} は厚さ方向には一定で皮膜内のせん断応力 $\tau_{zx1} = 0$ とする。界面近くの基材部では、引張応力 σ_{x2} およびせん断応力 τ_{zx2} は界面から $z = z_0$ の距離を越えると一定および0になるが、 $0 \leq z < z_0$ の領域では一定ではないとし、この領域の引張応力の平均値を σ_{x2}^0 とする。また、 z_0 は x および y に無関係に一定と仮定する。

まず、Fig. 6 (a) に示すような皮膜内の微小部分において、 x 方向の力のつりあいから、

$$\begin{aligned} \sigma_{x1} B_1 dy + B_1 \tau_{yx1} dx = \\ \left(\sigma_{x1} + \frac{\partial \sigma_{x1}}{\partial x} dx \right) B_1 dy + B_1 \left(\tau_{yx1} + \frac{\partial \tau_{yx1}}{\partial y} dy \right) dx + \tau_{zx}^i dx dy \end{aligned} \quad (5)$$

が得られ、したがって次式が成り立つ。

$$B_1 \frac{\partial \sigma_{x1}}{\partial x} = -B_1 \frac{\partial \tau_{yx1}}{\partial y} - \tau_{zx}^i \quad (6)$$

つぎに、Fig. 6 (b) に示すような界面近傍の基材部において $0 < z < z_0$ の領域の微小部分の x 方向の力のつりあいから、

$$\begin{aligned} \sigma_{x2}^0 dy dz + \tau_{zx2} dx dy + \tau_{yz2} dz dx = \\ \left(\sigma_{x2}^0 + \frac{\partial \sigma_{x2}^0}{\partial x} dx \right) dy dz + \left(\tau_{zx2} + \frac{\partial \tau_{zx2}}{\partial z} dz \right) dx dy \\ + \left(\tau_{yz2} + \frac{\partial \tau_{yz2}}{\partial y} dy \right) dz dx \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 5. Stress distribution in the coating and ductile substrate.

Fig. 6. Equilibrium of force in the infinitesimally small cubic in (a) coating and (b) substrate, and (c) balance of total force in coating and substrate.

の関係が得られ、したがって次式が求まる。

$$\frac{\partial \sigma_{x2}^0}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz2}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx2}}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

ここで、等二軸引張りを受ける無限板においてはせん断応力 τ_{xy} は0であり、また通常の二軸引張りにおいて、 x 方向と y 方向に作用する外部応力の値が異なっても、その方向の応力が主応力である場合には、 x 軸に垂直な面および y 軸に垂直な面に作用するせん断応力 τ_{xy} は0である。さらに、Fig. 2 によると、分割された領域の角部近傍のき裂開口幅は他の部分の開口幅とほぼ同じであり、角部近傍に大きな γ_{xy} が発生しているようには思われない。そこで本研究ではすべての領域で $\gamma_{xy1} = \tau_{xy1}/G_1 \approx 0$ 、 $\gamma_{xy2} = \tau_{xy2}/G_2 \approx 0$ みなし、式 (6) および (8) において $\tau_{xy1} = \tau_{xy2} = 0$ とする。

また、Fig. 6 (c) に示すような皮膜および基材全体の x 方向の力のつりあいを考え、 y 軸に垂直な面に作用するせん断応力 τ_{yx1} および τ_{yx2} を0とみなすと、

$$\sigma_{x1} B_1 dy + \sigma_{x2}^0 z_0 dy + \sigma_{x2} (B_2 - z_0) dy = \sigma B_2 dy \quad (9)$$

であり、この式を x で偏微分して次式が得られる。

$$B_1 \frac{\partial \sigma_{x1}}{\partial x} = -z_0 \frac{\partial \sigma_{x2}^0}{\partial x} \quad (10)$$

式 (6) および (8) を式 (10) に代入するとつぎのようになる。

$$\frac{\partial \tau_{zx2}}{\partial z} = -\frac{\tau_{zx}^i}{z_0} \quad (11)$$

式 (11) を z で積分して次式が得られる。

$$\tau_{xz} = \tau_{xz}^i \left(1 - \frac{z}{z_0}\right) \quad 0 \leq z \leq z_0 \quad (12)$$

ところで、皮膜の分割が起こるときには基材は塑性変形している。そこで、解析の容易さのために基材の塑性変形挙動を式(2)のように直線硬化材のそれで表すと、せん断ひずみ γ_{xz} と x 方向の変位 u_2 および z 方向の変位 w_2 の関係および γ_{xz} とせん断応力 τ_{xz} の関係は次式で表される。

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u_2}{\partial z} - \frac{\partial w_2}{\partial x} = \frac{\tau_{ys}}{G_2} + \frac{\tau_{xz} - \tau_{ys}}{G_{2p}} \quad (13)$$

ここで、 G_2 および G_{2p} は基材のせん断弾性係数およびせん断塑性係数、 τ_{ys} は基材のせん断降伏強度である。また、界面近傍の基材部には、 z 方向に引張応力の大きな変化が存在し、 $\partial u_2 / \partial z \gg \partial w_2 / \partial x$ であるので、 $\partial w_2 / \partial x$ を無視する。式(12)を式(13)に代入すると次のようになる。

$$G_{2p} \frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{G_2 - G_{2p}}{G_2} \tau_{ys} = \tau_{xz}^i \left(1 - \frac{z}{z_0}\right) \quad (14)$$

$z = 0$ で $u_2 = u_2^+$ 、 $z = z_0$ で $u_2 = u_2^-$ とし、式(14)を z で積分して次式が得られる。

$$u_2^- - u_2^+ = \frac{\tau_{xz}^i}{2G_{2p}} z_0 - \frac{G_2 - G_{2p}}{G_2 G_{2p}} \tau_{ys} z_0 \quad (15)$$

式(6)を式(15)に代入し、 x で偏微分すると次式のようにになる。

$$\frac{\partial^2 \sigma_{x1}}{\partial x^2} = \frac{2G_{2p}}{z_0 B_1} \left(\frac{\partial u_2^+}{\partial x} - \frac{\partial u_2^-}{\partial x} \right) \quad (16)$$

ここで、 $\partial u_2^+ / \partial x$ は界面における基材のひずみで皮膜のひずみ ε_{x1} に等しく、 $\partial u_2^- / \partial x$ は $z \geq z_0$ における基材のひずみ ε_{x2} である。一方、二軸応力下では

$$\varepsilon_{x1} = (\sigma_{x1} - \nu_1 \sigma_{y1}) / E_1 \quad (17)$$

であり、したがって式(16)は次式のようにになる。

$$\frac{\partial^2 \sigma_{x1}(x, y)}{\partial x^2} - \alpha^2 \sigma_{x1}(x, y) + \alpha^2 \{ \nu_1 \sigma_{y1}(x, y) + E_1 \varepsilon_{x2} \} = 0$$

$$\alpha^2 \equiv 2G_{2p} / E_1 B_1 z_0 \quad (18)$$

同様にして、皮膜内の y 方向の引張応力 σ_{y1} に対する偏微分方程式も次式のように求まる。

$$\frac{\partial^2 \sigma_{y1}(x, y)}{\partial y^2} - \alpha^2 \sigma_{y1}(x, y) + \alpha^2 \{ \nu_1 \sigma_{x1}(x, y) + E_1 \varepsilon_{y2} \} = 0 \quad (19)$$

式(18)と(19)の連立偏微分方程式を満足する解の一つとして次式が求まる。

$$\sigma_{x1}(x, y) = \frac{E_1(\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2})}{1 - \nu_1^2} \left\{ 1 + \frac{\left(\frac{\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2}}{\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2}} \right) \nu_1 \cdot \cosh(k_1 \cdot \alpha x) \cdot \cosh(k_2 \cdot \alpha y)}{\cosh(k_1 \cdot \alpha L_x / 2) \cdot \cosh(k_2 \cdot \alpha L_y / 2)} - \frac{\cosh(k_3 \cdot \alpha x)}{\cosh(k_3 \cdot \alpha L_x / 2)} - \frac{\left(\frac{\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2}}{\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2}} \right) \nu_1 \cdot \cosh(k_4 \cdot \alpha y)}{\cosh(k_4 \cdot \alpha L_y / 2)} \right\}$$

$$\sigma_{y1}(x, y) = \frac{E_1(\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2})}{1 - \nu_1^2} \left\{ 1 + \frac{\left(\frac{\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2}}{\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2}} \right) \nu_1 \cdot \cosh(k_1 \cdot \alpha x) \cdot \cosh(k_2 \cdot \alpha y)}{\cosh(k_1 \cdot \alpha L_x / 2) \cdot \cosh(k_2 \cdot \alpha L_y / 2)} - \frac{\cosh(k_3 \cdot \alpha x)}{\cosh(k_3 \cdot \alpha L_x / 2)} - \frac{\left(\frac{\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2}}{\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2}} \right) \nu_1 \cdot \cosh(k_4 \cdot \alpha y)}{\cosh(k_4 \cdot \alpha L_y / 2)} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{(\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2})}{(\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2})} \nu_1 \cdot \cosh(k_3 \cdot \alpha x) - \frac{\cosh(k_4 \cdot \alpha y)}{\cosh(k_4 \cdot \alpha L_y / 2)} \end{aligned} \right\}$$

$$k_1 \equiv \sqrt{(1 - \nu_1^2) \varepsilon_{y2} / (\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2})}$$

$$k_2 \equiv \sqrt{(1 - \nu_1^2) \varepsilon_{x2} / (\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2})}$$

$$k_3 \equiv \sqrt{\left\{ (1 - \nu_1^2) \varepsilon_{x2} + \nu_1 (1 - \nu_1^2) \varepsilon_{y2} \right\} / (\varepsilon_{x2} + \nu_1 \varepsilon_{y2})}$$

$$k_4 \equiv \sqrt{\left\{ (1 - \nu_1^2) \varepsilon_{y2} + \nu_1 (1 - \nu_1^2) \varepsilon_{x2} \right\} / (\varepsilon_{y2} + \nu_1 \varepsilon_{x2})} \quad (20)$$

とくに、等二軸引張り ($\varepsilon_{x2} = \varepsilon_{y2} \equiv \varepsilon_2$) の場合には $L_x = L_y \equiv L$ として

$$\sigma_{x1}(x, y) = \frac{E_1 \varepsilon_2}{1 - \nu_1} \left\{ 1 + \frac{\nu_1 \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha x) \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha y)}{\cosh^2(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha L / 2)} - \frac{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha x)}{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha L / 2)} - \frac{\nu_1 \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha y)}{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha L / 2)} \right\}$$

$$\sigma_{y1}(x, y) = \frac{E_1 \varepsilon_2}{1 - \nu_1} \left\{ 1 + \frac{\nu_1 \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha x) \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha y)}{\cosh^2(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha L / 2)} - \frac{\nu_1 \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha x)}{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha L / 2)} - \frac{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha y)}{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha L / 2)} \right\} \quad (21)$$

である。 σ_{x1} および σ_{y1} の最大値は、 $x = 0$ 、 $y = 0$ として次式で与えられる。

$$\sigma_{x1\max}(0, 0) = \sigma_{y1\max}(0, 0) = \frac{E_1 \varepsilon_2}{1 - \nu_1} \left\{ 1 + \frac{\nu_1}{\cosh^2(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha L / 2)} - \frac{1 + \nu_1}{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha L / 2)} \right\}$$

$$\alpha^2 \equiv 2G_{2p} / E_1 B_1 z_0 \quad (22)$$

皮膜の臨界引張強度を σ_{c1} とすると、 $\sigma_{x1\max} = \sigma_{y1\max} = \sigma_{c1}$ となった時点で、皮膜は中心点 O から断面 G-O-E または断面 F-O-H に沿って割れることになる。したがって、式(1)、(3) および(22)を用いて、等二軸引張応力 σ または基材のひずみ ε_2 の増加にともなう皮膜の割れ間隔 L の変化を計算することができる。

つぎに、皮膜と基材の界面に作用する x 方向および y 方向のせん断応力 τ_{xz}^i および τ_{zy}^i は、式(6)から $\tau_{xz}^i = -B_1 \partial \sigma_{x1} / \partial x$ および $\tau_{zy}^i = -B_1 \partial \sigma_{y1} / \partial y$ として求め、等二軸引張りの場合には次式で表される。

$$\tau_{xz}^i(x, y) = -\frac{E_1 \varepsilon_2 B_1}{1 - \nu_1} \left\{ \frac{\nu_1 \sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha \cdot \sinh(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha x) \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha y)}{\cosh^2(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha L / 2)} - \frac{\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha \cdot \sinh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha x)}{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha L / 2)} \right\}$$

$$\tau_{zy}^i(x, y) = -\frac{E_1 \varepsilon_2 B_1}{1 - \nu_1} \left\{ \frac{\nu_1 \sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha \cdot \cosh(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha x) \cdot \sinh(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha y)}{\cosh^2(\sqrt{1 - \nu_1} \cdot \alpha L / 2)} - \frac{\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha \cdot \sinh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha y)}{\cosh(\sqrt{1 - \nu_1^2} \cdot \alpha L / 2)} \right\} \quad (23)$$

$\tau_{zy}^i(x, y)$ は $x = 0$ で 0 であるが、 $x = \pm L/2$ で有限値をとる。皮膜端部近傍の界面せん断応力分布についての厳密な解析（一軸引張り）⁹⁾ では $x = \pm L/2$ は特異点であ

Table I. Calculated tensile stresses in the coating.

$B_1 = 0.14\text{mm}$			$x(\text{mm})$					
			0.0	± 0.6	± 1.2	± 1.8	± 2.4	± 3.0
$y(\text{mm})$	0.0	σ_{x1}	356	348	319	263	167	8.2
		σ_{y1}	356	354	347	333	309	269
	± 0.6	σ_{x1}	354	345	317	261	166	8.3
		σ_{y1}	348	345	339	325	302	263
	± 1.2	σ_{x1}	347	339	310	256	163	8.3
		σ_{y1}	319	317	310	298	277	241
	± 1.8	σ_{x1}	333	325	298	246	157	7.8
		σ_{y1}	263	261	256	246	229	198
	± 2.4	σ_{x1}	309	302	277	229	145	5.7
		σ_{y1}	167	166	163	157	145	124
	± 3.0	σ_{x1}	269	263	241	198	124	0.0
		σ_{y1}	8.2	8.3	8.3	7.8	5.7	0.0

Table II. Calculated shear stresses at the interface.

$B_1 = 0.14\text{mm}$			$x(\text{mm})$					
			0.0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0
$y(\text{mm})$	0.0	τ_{zx}^i	0.0	3.9	8.8	15.8	26.5	43.6
		τ_{zy}^i	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0.6	τ_{zx}^i	0.0	3.9	8.7	15.7	26.4	43.4
		τ_{zy}^i	3.9	3.9	3.8	3.6	3.3	2.9
	1.2	τ_{zx}^i	0.0	3.8	8.5	15.3	25.8	42.5
		τ_{zy}^i	8.8	8.7	8.5	8.2	7.6	6.6
	1.8	τ_{zx}^i	0.0	3.6	8.2	14.7	24.8	41.0
		τ_{zy}^i	15.8	15.7	15.3	14.7	13.7	12.1
	2.4	τ_{zx}^i	0.0	3.3	7.6	13.7	23.2	38.4
		τ_{zy}^i	26.5	26.4	25.8	24.8	23.2	20.6
	3.0	τ_{zx}^i	0.0	2.9	6.6	12.1	20.6	34.4
		τ_{zy}^i	43.6	43.4	42.5	41.0	38.4	34.4

Fig. 7. Calculated tensile stresses distribution in coating σ_{x1} , σ_{y1} and shear stresses at the interface τ_{zx}^i , τ_{zy}^i ($L = 6\text{mm}$, $B_1 = 0.14\text{mm}$).

り、き裂先端近傍の界面には非常に大きなせん断応力が存在する。本研究の解析による計算値が $x = \pm L/2$ で有限値となった理由は、解析が近似的なものであるためである。

3・3 解析結果に対する考察

等二軸引張りの場合に対して得られた皮膜内引張応力の解の一つである式 (21) は、式 (18) および (19) の連立偏微分方程式を満足し、また皮膜中央で応力が最大となり $x = y$ で $\sigma_{x1} = \sigma_{y1}$ となる応力の対称性を満足しているが、 $(\pm L_x/2, y)$, $(x, \pm L_y/2)$ の皮膜端面で $\sigma_{x1} = 0$ または $\sigma_{y1} = 0$ となる境界条件をどの程度満足しているかは明らかではない。また、皮膜と基材の界面におけるせん断応力分布も式 (23) からは直観的には分らない。そこで式 (3), (21) および (23) において、 $L_x = L_y = L = 6\text{mm}$, $B_1 = 0.14\text{mm}$, $\sigma_{x2} = \sigma_{y2} = \sigma_2 = 304\text{MPa}$, $z_0 = 0.15\text{mm}$ として x および y を変化させて σ_{x1} および σ_{y1} , τ_{zx}^i および τ_{zy}^i を計算した。その結果を Table I および Table II (Fig. 3 (b) の AEOH の部分のみ) に示す。ここで、材料定数には前報^{3), 10)} で求めた値を用いて $\sigma_{ys} = 240\text{MPa}$, $E_1 = 163\text{GPa}$, $E_e = 205\text{GPa}$, $E_p = 2.9\text{GPa}$, $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ とし、 G_{2p} は、弾性体に対して成り立つ $G = E/2(1+\nu)$ の関係から、 $G_{2p} = E_p/2(1+\nu_2)$ として求め、 $G_{2p} = 1.12\text{MPa}$ とした。また、 σ_{x1} , σ_{y1} および τ_{zx}^i , τ_{zy}^i の分布を Fig. 7 (a) および (b) に示す。

Table I および Fig. 7 (a) によると、皮膜の四つの角では $\sigma_{x1}(\pm L/2, \pm L/2) = \sigma_{y1}(\pm L/2, \pm L/2) = 0$ であり、皮膜の端部 (AB, BC, CD, DA) では $\sigma_{x1}(\pm L/2, y)$ または $\sigma_{y1}(x, \pm L/2)$ は非常に小さい値になる。また、皮膜の中心点 O で σ_{x1} または σ_{y1} は最大であり、境界条件はほぼ満足されている。Table II および Fig. 7 (b) によると、皮膜と基材の界面のせん断応力は中心点で $\tau_{zx}^i(0, 0) = \tau_{zy}^i(0, 0) = 0$ であり、端部 (AB, BC, CD, DA) では大きなせん断応力が存在している。このように、式 (21) および式 (23) は、皮膜における実際の引張応力分布および皮膜と基材の界面における実際のせん断応力分布を近似的に表していると思われるので、これらの式を用いて等二軸引張応力下における皮膜の繰返し分割およびく離過程を考察する。

4 実験結果および考察

4・1 皮膜の分割過程

WC-Co サーメットを溶射した膜厚 $B_1 = 0.05, 0.14$ および 0.28mm の円板試験片の等二軸引張 (バルジ) 試験を行った。所定の油圧 p ごとに写真撮影を行い、測定した平均割れ間隔 L と、等二軸引張応力 σ (そのときの p を用いて式 (1) から計算した) の関係を求めた結果を Fig. 8 に示す。また、この図には、式 (22) から計算した L の値と σ の関係もあわせて示してある。計算に際しては、上記の材料定数を用い、皮膜の強度 σ_{c1} を 120MPa とした。Fig. 8 によると、実験結果および計算結果ともに、等二軸引張応力 σ の増加とともに皮膜が繰返し分割され、割れの間隔 L が小さくなることを示している。また、同じ引張応力では、膜厚が厚いほど L は大きい。 L の計算値は実測値とかなり異なるが、その原因は、解析が多くの近似を含んでいること、基材を直線硬化材で近似したこと、残留応力の影響を無視したこと、皮膜の強度を膜厚に無関係に同じ値にして計算したこと、などが

Fig. 8. Comparison of the calculated relation between stress of substrate and crack interval with that of the experiment.

考えられる。

この内、残留応力については、別報¹¹⁾の実験および解析で示したように、X線残留応力測定によると高速フレーム溶射皮膜内（基材は工具鋼）には圧縮応力が存在し、基材側界面近傍にはこれと平衡する形で引張応力が存在するので、基材が弾性変形する間に皮膜の分割が起こる場合には、残留応力の影響を考慮する必要があった。しかし、本研究の場合には、皮膜の繰返し分割の大部分は基材が塑性変形を生じる過程で起こるので、基材界面で塑性変形が起こり始めると基材内の残留応力と同時に皮膜内の残留応力も減少し、塑性変形の進行とともに残留応力は消失すると思われる。このため、本研究では残留応力の効果を解析に組み込まなかった。

また、計算では皮膜の強度を膜厚によらず $\sigma_{c1} = 120\text{MPa}$ と一定にしたが、参考のためき裂間隔の実測値に適合するように逆に σ_{c1} を決めると、 $B_1 = 0.28, 0.14$ および 0.05mm に対してそれぞれ $\sigma_{c1} = 100, 110$ および 150MPa となる。ただし、解析精度から考えて、これらの値が真の皮膜強度に対応しているとは限らない。

いずれにしても、Fig. 8 によると、皮膜の強度 σ_{c1} が膜厚に依存せずに一定であると仮定したときの計算結果は、き裂間隔に及ぼす膜厚の影響を少な目に見積もっているが、実測値の傾向とほぼ同じであり、皮膜の繰返し分割過程は、本研究で行った解析によって半定量的に表現できていると思われる。

4・2 皮膜のはく離

Table II および Fig. 7 (b) によると、 τ_{zx}^i および τ_{zy}^i の最大値は分割された皮膜端部中央界面 ($x = \pm L/2, y = 0$ または $y = \pm L/2, x = 0$) で生じ、皮膜の角部界面 ($x = \pm L/2, y = \pm L/2$) ではない。しかし、皮膜角部の対角線方向のせん断応力 τ_{45}^i は $\tau_{zx}^i = \tau_{zy}^i$ の $\sqrt{2}$ 倍となり、これは $\tau_{zx}^i (\pm L/2, 0) = \tau_{zy}^i (0, \pm L/2)$ よりも大きい。したがって、皮膜のはく離は皮膜の角部から対角線方向に生

じることになり、このことは実際の観察結果とも一致している。対角線方向のせん断応力 τ_{45}^i は式 (23) から次のように表される。

$$\begin{aligned} \tau_{45}^i &= \sqrt{2}\tau_{zx}^i (\pm L/2, \pm L/2) = \sqrt{2}\tau_{zy}^i (\pm L/2, \pm L/2) \\ &= \mp \frac{\sqrt{2}E_1\varepsilon_2 B_1}{1-v_1} \cdot \left\{ v_1 \sqrt{1-v_1} \cdot \alpha \cdot \tanh(\sqrt{1-v_1} \cdot \alpha L/2) \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{1-v_1^2} \cdot \alpha \cdot \tanh(\sqrt{1-v_1^2} \cdot \alpha L/2) \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

バルジ試験を続けると、 τ_{45}^i が臨界せん断強さ τ_c^i に達して皮膜のはく離が生じるから、はく離が生じたときのき裂間隔 L_c とそのときの圧力 p から、式 (24) により τ_c^i を推定することができる。実際には、はく離開始時の圧力を決めるのはやや困難であるが、たとえば膜厚 $B_1 = 0.14\text{mm}$ の場合には、圧力 $p \approx 9\text{MPa}$ （等二軸引張応力 $\sigma = 380\text{MPa}$ ）に達するときにははく離が生じ始め、そのとき平均割れ間隔 $L_c = 2.5\text{mm}$ であったから、 $\tau_c^i \approx 18\text{MPa}$ と推定される。同様に $B_1 = 0.28\text{mm}$ のときには $\tau_c^i \approx 16\text{MPa}$ となった。なお、 $B_1 = 0.05\text{mm}$ の場合には、バルジ装置の圧力を最大 ($p = 9.8\text{MPa}$) にしても皮膜がはく離しなかったので τ_c^i の値は 30MPa 以上ということになるが、膜厚が非常に薄い場合には、溶射前のショットプラストによる凹凸の影響（アンカー効果）が τ_c^i に強く現われたことも考えられる。前報¹⁰⁾によると、一軸引張応力下における高速フレーム溶射皮膜（基材は工具鋼）のはく離エネルギーは、皮膜厚さの増加とともにわずかに低下する。応力状態や基材のちがひ、解析精度の問題はあるが、本研究で得られた結果の傾向は前報の結果とほぼ一致しているとみなせる。

4・3 皮膜の繰返し分割が起こる条件

皮膜が分割されたのちにはく離が起こる場合には、 $\tau_{45}^i = \tau_c^i$, $\sigma_{x1} = \sigma_{c1}$ が同時に満足されるから、式 (22) と式 (24) の比をとると、

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{c1}}{\tau_c^i} &= \frac{1}{\sqrt{2}B_1} \cdot \left\{ 1 + \frac{v_1}{\cosh^2(\sqrt{1-v_1} \cdot \alpha L_c/2)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1+v_1}{\cosh(\sqrt{1-v_1^2} \cdot \alpha L_c/2)} \right\} / \left\{ v_1 \sqrt{1-v_1} \cdot \alpha \cdot \tanh(\sqrt{1-v_1} \cdot \alpha L_c/2) \right. \\ &\quad \left. - \sqrt{1-v_1^2} \cdot \alpha \cdot \tanh(\sqrt{1-v_1^2} \cdot \alpha L_c/2) \right\} \end{aligned} \quad (25)$$

となる。

上式において、 τ_c^i が非常に小さければ、極端な場合には、皮膜に最初にき裂が入ったのちにただちにはく離が生じ、「繰返し分割型」の割れは起こらないことが考えられる。その場合には、「島状はく離型」の皮膜割れ形態³⁾になると思われるので、ここでは両者の形態の遷移を決める σ_{c1}/τ_c^i の値について考察する。

繰返し分割の初期段階では $L_c \gg B_1$ であり、式 (25) において $\cosh(\sqrt{1-v_1} \alpha L_c/2) \approx \cosh(\sqrt{1-v_1^2} \alpha L_c/2) \approx \sinh(\sqrt{1-v_1} \alpha L_c/2) \approx \sinh(\sqrt{1-v_1^2} \alpha L_c/2) \approx$

$\exp(\sqrt{1-v_1} \alpha L_c/2)/2 \approx \exp(\sqrt{1-v_1^2} \alpha L_c/2)/2 \equiv k$ とおき、 $k \rightarrow \infty$ とすると、結局

$$\sigma_{c1} < \frac{\tau_c^i}{\sqrt{2aB_1} \sqrt{v_1 \sqrt{1-v_1} - \sqrt{1-v_1^2}}} \\ = \frac{\tau_c^i \sqrt{E_1 z_0}}{2 \sqrt{G_{2p} B_1} (\sqrt{1-v_1^2} - v_1 \sqrt{1-v_1})} \quad (26)$$

が満足されるなら、皮膜の繰返し分割が起こる可能性があるが、逆に式 (26) が満足されなければ、島状のはく離が起こる可能性がある。本研究で推定した $\sigma_{c1} = 120\text{MPa}$ の値、 $B_1 = 0.14\text{mm}$ の場合に推定した $\tau_c^i = 18\text{MPa}$ の値および他の材料定数の値を式 (26) に代入すると、この条件を満足している。すなわち、確かに皮膜の繰返し分割が生じることになり、式 (26) を用いてどちらの割れ形態が起こるかを判別することは妥当であると考えられる。

5 結 論

二軸引張応力が作用するときの WC-Co サーメット溶射皮膜の割れ形態をバルジ試験により調べるとともに、理論解析を行った。得られた結果は次のとおりである。

(1) WC-Co 溶射皮膜では、等二軸引張応力下で繰返し分割型の割れ形態が現れ、皮膜のはく離が生じると分割が停止する。

(2) いずれの膜厚でも、割れ間隔は基材の引張応力の増加とともに小さくなるが、基材の応力が同じときには皮膜の厚さが厚いほど割れ間隔は大きい。

(3) 皮膜の繰返し分割過程をモデル化して皮膜に作用する応力を理論解析により導出し、基材に作用する応力と割れの間隔の関係を膜厚および材料定数の関数として求めた。解析結果は実験結果の傾向を半定量的に説明できる。

参 考 文 献

- 1) 竹田博光編, “セラミックコーティング” (1988) 日刊工業新聞社.
- 2) K. Nakasa and J. Nakatsuka, Eng. Frac. Mech., **47**, 403 (1994).
- 3) 中佐啓治郎, 高田宗一郎, 市後博造, 材料, **45**, 212 (1996).
- 4) J. C. Grosskreutz and M.B. McNeil, J. Applied Physics, **40**, 335 (1969).
- 5) M. S. Hu and A. G. Evans, Acta Metal., **37**, 917 (1989).
- 6) F. Delannay and P. Warren, Acta Metal., **39**, 1061 (1991).
- 7) M. D. Thouless, E. Olsson and A. Gupta, Acta Metal., **40**, 1287 (1992).
- 8) J. Jeong and D. Kwon, Proc. of Asian Pacific Conf. for Frac. and Strength '96, 573 (1996).
- 9) 結城良治編著, “界面の力学”, p.85 (1993) 培風館.
- 10) 中佐啓治郎, 加藤昌彦, 江河史晃, 浦田政信, 原 信彦, 材料, **45**, 680 (1996).
- 11) K. Nakasa, M. Kato and D. Zhang, Proc. of Third Int. Conf. on Frac. and Strength of Solids, part 2, 907 (1997).