技 術 論 文

縁を補強した帯板におけるクラックによる応力集中*

Stress Concentration due to a Central Transverse Crack in a Strip Reinforced on Either Sides

石 田 誠**・田 上 重 美***

Makoto ISIDA, Sigemi TAGAMI,

板 垣 芳 雄****

Yoshio ITAGAKI

Abstract

The purpose of this work is to investigate the effect of reinforcement of the straight edges on the elastic stress concentration at the tip of a central transverse crack in a strip subjected to tension.

The analysis is carried out by the method of perturbation in the extreme cases where the bending stiffness of the reinforcements is negligibly small or infinitely large.

The formulae for the maximum stress at the tip of the crack are obtained in power series of λ , the ratio of crack-length to plate-width, and the numerical results given for $\lambda \leq 0.8$ are examined in detail.

1. 諸 言

航空機の使用上、その翼や胴体の外板に絶対にクラックが生じないように設計することは理想であるが、実さいはなかなか困難である。強度計算を十分慎重に行ない、部材および構造の詳細な静強度試験、疲労試験の結果を考慮して最終設計を行なった航空機であっても、運航中に予期しない過大負荷がかかったり、異物の衝突などのため、外板にクラックを生ずることがあるかもしれない。この場合、クラックを発見し、補修するまでの間、構造は空気力、与圧荷重等に対する静強度を保たなければならないし、突風等による繰返し荷重に対しても、クラックの進展速度が十分おそく、事故に至る前に発見できることが保証されなければならない。したがって、クラック部材の静強度や、クラック進展状況を求める試験も数多く行なう必要があるが、これらの試験結果を整理する理論的資料に乏しいため、結論を導くのに不便を感じることが多い。

これらの試験あるいは実験に理論的な裏づけを行な

うためには、クラック周縁の応力やひずみの分布を知る必要があるが、広い板に1個のクラックがあるような単純な場合はともかく、境界条件がさらに複雑な場合に弾塑性論的な応力解析を行なうことは現在の段階では困難と思われる。

最近 G. R. Irwin¹⁾ は鋼材の脆性破壊の研究に関連して、有名な Griffith²⁾ の理論を発展して、クラック先端付近の弾性応力と弾性変形の分布から求められる“crack extension force”なる量を定義し、材料と荷重状態によって、この critical な値が定まると仮定して、クラックを有する板の静強度の実験結果をかなり合理的に説明することができた。

また石橋正博士³⁾ はクラック先端付近が弾性状態になくても、ひずみ集中係数が弾性応力集中係数から近似的に導かれることを用いて、疲労クラックの進展速度を予測する方法を提案し、実験とよく一致することを確認している。

これらの立場からクラックを有する板における弾性応力集中を知ることは極めて重要であるが、従来得られた資料は解析の比較的容易な補強しない板、しかも無限板に限られている。

最近、航空機構造にいわゆる fail-safe 特性を与えることが設計の一つの方針とされるに至り、これに関連して補強材がクラック・ストップとして持つ効果を知ることが重要な問題となっている。

本論文は一つの基本的な場合の資料を与えるために両縁を補強した帯板におけるクラックによる応力集中の問題を取り扱う。補強材の引っ張り剛性と曲げ剛性がともにクラック周縁の応力状態に影響するが、そのいずれもが任意の場合は解析が複雑なため、ここでは補強材の引っ張り剛性は任意であるが、曲げ剛性を無視できる場合と、無限大と見なし得る場合との両極限について解析を行なった。

* 昭和35年2月 構造強度シンポジウムにて発表、昭和36年10月12日原稿受理

、** 航空技術研究所

*** 徳島大学工学部

2. 理 論

中央にクラックを有する補強帯板が遠方で一様引張り応力 T を受ける場合を考える。

補強材の断面形や、これと板との結合様式はいろいろ考えられるが、ここでは簡単のため、板が縁でフランジを形成したいわゆる一体構造であると考え、クラックがあまり大きくないならば、そしてクラック周縁の応力に関する限り、上のように仮定して得る結果は、補強材を腹板に鋸、ボルト等で結合した実際の場合にも良い近似値を与えることは Saint Venant の原理が保証するであろう。

第1図

板幅を $2b$ 、厚さを w 、フランジ部分の断面積を A 、クラックの長さを $2l$ 、その両端の曲率半径を ρ とする。直角座標軸 x, y 、とこれに属する極座標 rb, θ (r は無次元の動径) を図のように定め、解析の便宜上、つぎの無次元の記号と座標を用いる。

$$\lambda = \frac{l}{b}, \quad k = \frac{A}{wb} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} z = x + iy, \quad \xi = \frac{x}{b}, \quad \eta = \frac{y}{b} \\ \zeta = \xi + i\eta = re^{i\theta} = \frac{z}{b} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

板、補強材とも板面に直角な方向の変形を生ぜず、問題を平面応力問題として取り扱えたと仮定すれば、補強材を除く板内の応力、ひずみ、変位等は重調和方程式

$$\frac{\partial^4 \chi}{\partial \xi^4} + 2 \frac{\partial^4 \chi}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + \frac{\partial^4 \chi}{\partial \eta^4} = 0 \quad (3)$$

を満足する。いわゆる Airy の応力関数 $\chi(\xi, \eta)$ によって導かれる。 χ はまた2つのいわゆる複素応力関数 $\varphi(\zeta), \psi(\zeta)$ を用いて

$$\chi = Tb^2 \operatorname{Re}\{\bar{\zeta}\varphi(\zeta) + \psi(\zeta)\} \quad (4)$$

の形で表わされ、これによる応力と変位の成分は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= TR_e\{2\varphi'(\zeta) - \bar{\zeta}\varphi''(\zeta) - \psi''(\zeta)\} \\ \sigma_y &= TR_e\{2\varphi''(\zeta) + \bar{\zeta}\varphi'(\zeta) + \psi'(\zeta)\} \\ \tau_{xy} &= TIm\{\bar{\zeta}\varphi'(\zeta) + \psi'(\zeta)\} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E(u - iv) &= Tb[(3 - \nu)\bar{\zeta}\varphi(\zeta) \\ &\quad - (1 + \nu)\{\bar{\zeta}\varphi'(\zeta) + \psi'(\zeta)\}] \end{aligned} \quad (6)$$

と書くことができる。

ここに E, ν はそれぞれ材料のヤング率とポアソン比であり、 R_e, Im は実数部分と虚数部分、 $-$ は共軛

複素数を意味する。

今の問題に対する応力関数をつぎの3つに分けて考える。

$$\chi = \chi_0 + \chi_1 + \chi_2 \quad (7)$$

χ_0 は遠方の引張り応力に対応する応力関数で、周知のごとく

$$\chi_0 = \frac{T}{2}x^2 = \frac{Tb^2}{4}R_e(\bar{\zeta}\zeta + \zeta^2) \quad (8)$$

χ_1 は原点に特異点を持つ応力関数で、つぎのような展開形で書くことができる。

$$\left. \begin{aligned} \chi_1 &= Tb^2 R_e\{\bar{\zeta}\varphi_1(\zeta) + \psi_1(\zeta)\} \\ &= Tb^2\{-D_0 \log r + \sum_{n=1}^{\infty}(D_{2n}r^{-2n} \\ &\quad + F_{2n}r^{-(2n-2)}) \cos 2n\theta\} \\ \varphi_1(\zeta) &= \sum_{n=0}^{\infty} F_{2n}\zeta^{-(2n+1)}, \\ \psi_1(\zeta) &= -D_0 \log \zeta + \sum_{n=1}^{\infty} D_{2n}\zeta^{-2n} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに F_{2n}, D_{2n} は後で境界条件から定める未定係数で、この場合は実数である。

(9), (5), (6) を用いて χ_1 が板から補強材への移行部 $\xi=1$ に生ずる応力 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ と補強材に直角方向の変位 u を求めるとつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1(\eta) &= (\sigma_x)_{\xi=1} \\ &= -T \left[\frac{D_0 + 2F_0}{1 + \eta^2} \cos 2\theta \right. \\ &\quad + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(2n+1)(nD_{2n} + F_{2n})}{(1 + \eta^2)^{n+1}} \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{n(2n-1)F_{2n-2}}{(1 + \eta^2)^n} \right\} \cos(2n+2)\theta \right] \\ \sigma_2(\eta) &= (\sigma_y)_{\xi=1} \\ &= T \left[\frac{D_0 - 2F_0}{1 + \eta^2} \cos 2\theta \right. \\ &\quad + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(2n+1)(nD_{2n} - F_{2n})}{(1 + \eta^2)^{n+1}} \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{n(2n-1)F_{2n-2}}{(1 + \eta^2)^n} \right\} \cos(2n+2)\theta \right] \\ \tau_1(\eta) &= (\tau_{xy})_{\xi=1} \\ &= -T \left[\frac{D_0}{1 + \eta^2} \sin 2\theta + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{n(2n+1)D_{2n}}{(1 + \eta^2)^{n+1}} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{n(2n-1)F_{2n-2}}{(1 + \eta^2)^n} \right\} \sin(2n+2)\theta \right] \\ Eu_1(\eta) &= (Eu)_{\xi=1} \\ &= Tb \left[\frac{(1+\nu)D_0 + (3-\nu)F_0}{(1 + \eta^2)^{\frac{1}{2}}} \cos \theta \right. \\ &\quad + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(1+\nu)2nD_{2n} + (3-\nu)F_{2n}}{(1 + \eta^2)^{\frac{2n+1}{2}}} \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{(1+\nu)(2n-1)F_{2n-2}}{(1 + \eta^2)^{\frac{2n-1}{2}}} \right\} \cos(2n+1)\theta \right] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\text{ここに} \quad \theta = \tan^{-1} \eta \quad (11)$$

つぎに χ_2 は χ_0, χ_1 とともに境界条件を満足させるために付加する, 板内に特異点を持たない応力関数である。

さきに述べたように, この論文では補強材の曲げ剛性が無視できる場合と, 無限大の場合との両極限を取り扱うのであるが, 板と補強材の接合部の境界条件がこの2つの場合で異なるので, 分けて論ずることにする。

(a) 補強材の曲げ剛性を無視する場合 第2図のように補強材の $y=y, y+d_y$ の間の素片の y 方向の力の釣り合いを考えると

第2図

$x=b$ において

$$\left(\sigma_y + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} dy \right) A - \sigma_y A = \tau_{xy} w dy$$

すなわち

$$\xi=1 \text{ において} \quad \tau_{xy} - k \frac{\partial \sigma_y}{\partial \eta} = 0 \quad (12a)$$

同様にして

$$\xi=-1 \text{ において} \quad \tau_{xy} + k \frac{\partial \sigma_y}{\partial \eta} = 0 \quad (12b)$$

ここに k は補強材の引っ張り剛性をあらわす定数で

$$k = \frac{A}{wb} \quad (13)$$

つぎに補強材の曲げ剛性を無視しているから, 補強材はこれに垂直な荷重を分担し得ず, 板と補強材の接合部における σ_x は 0 でなければならない。すなわち

$$\xi = \pm 1 \text{ において} \quad \sigma_x = 0 \quad (14)$$

(12), (14) は $\xi = \pm 1$ において応力関数 χ が満足すべき境界条件である。そして, χ_0 はそれ自体 (12), (14) を満たしており, χ_1 による境界部の応力と変位は (10) で与えられるので, χ_2 の満たすべき境界条件を改めてつぎのように書くことができる。

$$\xi = \pm 1 \text{ において} \quad \tau_{xy} \mp k \frac{\partial \sigma_y}{\partial \eta} = - \left(\tau_1 \mp k \frac{\partial \sigma_2}{\partial \eta} \right) \quad (15)$$

$$\sigma_x = -\sigma_1 \quad (16)$$

ここで σ_1, σ_2 は η の偶関数, τ_1 は奇関数であることを用いた。

いま χ_2 として重調和方程式 (3) と x, y 両軸に関

する対称性を満足するつぎの形を仮定する。

$$\begin{aligned} \chi_2 &= Tb^2 \int_0^\infty \{ A(m) \xi \sinh m\xi + B(m) \cosh m\xi \} \cos m\eta dm \\ &= Tb^2 R_\xi \left[\int_0^\infty \left\{ \frac{A(m)}{2} (\xi + \bar{\xi}) \sinh m\xi \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + B(m) \cosh m\xi \right\} dm \right] \quad (17) \end{aligned}$$

これによる応力成分と x 方向の変位は (5), (6) から, つぎの諸式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= -T \int_0^\infty m^2 \{ A\xi \sinh m\xi + B \cosh m\xi \} \cos m\eta dm \\ \sigma_y &= T \int_0^\infty m \{ mA\xi \sinh m\xi + \\ &\quad (2A+mB) \cosh m\xi \} \cos m\eta dm \\ \tau_{xy} &= T \int_0^\infty m \{ mA\xi \cosh m\xi + \\ &\quad (A+mB) \sinh m\xi \} \sin m\eta dm \\ Eu &= Tb \int_0^\infty \left[-(1+\nu) mA\xi \cosh m\xi \right. \\ &\quad \left. + \{ (1-\nu)A - (1+\nu)B \} \sinh m\xi \right] \cos m\eta dm \quad (18) \end{aligned}$$

境界条件 (15), (16) を満足するように, 応力関数 (17) の係数 $A(m), B(m)$ を定めるのであるが (17) の形の対称性から, $\xi=1$ における境界条件を満足させれば, $\xi=-1$ の条件もおのずから満たすことになるので, 前者だけを考える。

(18) の第 1~3 式に $\xi=1$ とおいた表示を用いて境界条件 (15), (16) を書くと

$$\begin{aligned} T \int_0^\infty [m \{ (mc+s)A + msB \} \\ + km^2 \{ (2c+ms)A + mcB \}] \sin m\eta dm \\ = - \left(\tau_1 - k \frac{\partial \sigma_2}{\partial \eta} \right) \quad (19) \end{aligned}$$

$$-T \int_0^\infty m^2 (sA + cB) \cos m\eta dm = -\sigma_1 \quad (20)$$

ここに

$$s = \sinh m, \quad c = \cosh m \quad (21)$$

σ_1, σ_2 が η の偶関数, τ_1 が奇関数であることを考慮して, (19), (20) の右辺をフーリエ積分で表わし, 部分積分を行なった後, 両辺の被積分関数を比較してつぎの連立方程式を得る。

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{aligned} mc + s + km(ms + 2c) A + m(s + kmc) B \\ = - \frac{2}{\pi T m} \left\{ \int_0^\infty \tau_1(t) \sin mtdt \right. \\ \quad \left. + km \int_0^\infty \sigma_2(t) \cos mtdt \right\} \\ sA + cB = \frac{2}{\pi T m^2} \int_0^\infty \sigma_1(t) \cos mtdt \end{aligned} \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

これらを連立に解けば $A(m), B(m)$ の表示

$$\left. \begin{aligned} A(m) &= -\frac{2}{\pi T m} \cdot \frac{1}{m + cs + 2kmc^2} \left[(s + kmc) \int_0^\infty \sigma_1(t) \cos mtdt + c \left\{ \int_0^\infty \tau_1(t) \sin mtdt + km \int_0^\infty \sigma_2(t) \cos mtdt \right\} \right] \\ B(m) &= \frac{2}{\pi T m^2} \cdot \frac{1}{m + cs + 2kmc^2} \left[\{mc + s + km(ms + 2c)\} \int_0^\infty \sigma_1(t) \cos mtdt \right. \\ &\quad \left. + ms \left\{ \int_0^\infty \tau_1(t) \sin mtdt + km \int_0^\infty \sigma_2(t) \cos mtdt \right\} \right] \end{aligned} \right\} \quad s = \sinh m, \quad c = \cosh m \quad (23)$$

が得られ、応力関数 χ_2 は

$$\chi_2 = Tb^2 \int_0^\infty \{A(m) \xi \sinh m\xi + B(m) \cosh m\xi\} \cos m\eta dm \quad (24)$$

と与えられる。

(23) に (10) の η を t に変えた式を代入した後、さきに Howland が求めた積分公式⁴⁾ を拡張して得る式

$$\left. \begin{aligned} \int_0^\infty \frac{\cos n\theta \cos mtdt}{(1+t^2)^{\frac{n}{2}}} &= \int_0^\infty \frac{\sin n\theta \sin mtdt}{(1+t^2)^{\frac{n}{2}}} \\ &= \frac{\pi e^{-m} m^{n-1}}{2(n-1)!} \\ \int_0^\infty \frac{\cos(n+2)\theta \cos mtdt}{(1+t^2)^{\frac{n}{2}}} &= \int_0^\infty \frac{\sin(n+2)\theta \sin mtdt}{(1+t^2)^{\frac{n}{2}}} \\ &= \frac{\pi e^{-m} m^{n-1} 2(m-n)}{2n!} \\ \theta &= \tan^{-1} t \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

を用いれば、 $A(m)$, $B(m)$ が (9) の未定係数 D_{2n} , F_{2n} を含む形で求められる。これらを (24) に代入し容易に証明される展開式⁵⁾

$$\left. \begin{aligned} \xi \sinh m\xi \cos m\eta &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^\infty \frac{m^{2n+1} r^{2n+2}}{(2n+1)!} \{ \cos 2n\theta \\ &\quad + \cos(2n+2)\theta \} \\ \cosh m\xi \cos m\eta &= \sum_{n=0}^\infty \frac{(mr)^{2n}}{(2n)!} \cos 2n\theta \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

を用い、級数と積分の順序を交換して長い計算の結果、 χ_0 , χ_1 とともに板と補強材の接合部の境界条件を満足する応力関数 χ_2 はつぎのような展開表示として与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \chi_2 &= Tb^2 \left\{ M_0 r^2 + \sum_{n=1}^\infty (K_{2n-2} r^{2n} + M_{2n} r^{2n+2}) \cos 2n\theta \right\} \\ &= Tb^2 R_e \{ \zeta \varphi_2(\zeta) + \psi_2(\zeta) \} \\ \varphi_2(\zeta) &= \sum_{n=0}^\infty M_{2n} \zeta^{2n+1}, \quad \psi_2(\zeta) = \sum_{n=0}^\infty K_{2n} \zeta^{2n+2} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

ここに係数 K_{2n} , M_{2n} は (9) の χ_1 の展開係数の一次結合としてつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} K_{2n} &= \sum_{p=0}^\infty (\alpha_{2p}^{2n} D_{2p} + \beta_{2p}^{2n} F_{2p}) \\ M_{2n} &= \sum_{p=0}^\infty (\gamma_{2p}^{2n} D_{2p} + \delta_{2p}^{2n} F_{2p}) \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{2n}^{2n} &= \frac{1}{(2n+2)!} \{ (2n+1) I_{2n+1} + J_{2n+1} \\ &\quad - (2k+2) I_{2n+2} - 2k J_{2n+2} \} \\ \alpha_{2p}^{2n} &= \frac{1}{(2n+2)!(2p-1)!} \{ (2n+1) I_{2n+2p+1} \\ &\quad + J_{2n+2p+1} - (2k+2) I_{2n+2p+2} - 2k J_{2n+2p+2} \} \\ &\quad (p \geq 1) \\ \beta_{2p}^{2n} &= -\frac{2}{(2n+2)!(2p)!} \{ (2np+n+p+1) I_{2n+2p+1} \\ &\quad + (n+p+1) \{ J_{2n+2p+1} - (2k+2) I_{2n+2p+2} \\ &\quad - 2k J_{2n+2p+2} + (4k+2) I_{2n+2p+3} \} \} \\ \gamma_{2n}^{2n} &= \frac{I_{2n+1}}{(2n+1)!}, \quad \gamma_{2p}^{2n} = \frac{I_{2n+2p+1}}{(2n+1)!(2p-1)!} \\ &\quad (p \geq 1) \\ \delta_{2p}^{2n} &= \frac{1}{(2n+1)!(2p)!} \{ -(2p+1) I_{2n+2p+1} \\ &\quad - J_{2n+2p+1} + (2k+2) I_{2n+2p+2} + 2k J_{2n+2p+2} \} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

かつ I_q , J_q は次のような定積分である。

$$\left. \begin{aligned} I_q &= \frac{1}{2^{q+1}} \int_0^\infty \frac{m^q dm}{m + \sinh m + km(\cosh m + 1)} \\ J_q &= \frac{1}{2^{q+1}} \int_0^\infty \frac{m^q e^{-m} dm}{m + \sinh m + km(\cosh m + 1)} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Howland はさきに $k=0$ (補強材なし) の特別な場合について計算を行なったが、その結果は (27)~(30) に $k=0$ とおいたものに完全に一致することが確かめられる⁶⁾。

(b) 補強材の曲げ剛性を無限大と見なす場合 も
 う一つの極端な場合として、補強材の曲げ剛性が無限大と見なせる場合を考える。

この場合も χ_2 に対する境界条件 (15) は変わらず、したがって (22) の第1式

$$\begin{aligned} &\{mc + s + km(ms + 2c)\} A + m(s + kmc) B \\ &= -\frac{2}{\pi T m} \left\{ \int_0^\infty \tau_1(t) \sin mtdt + km \int_0^\infty \sigma_2(t) \cos mtdt \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

は今の場合も成立する。

しかし前の場合の境界条件 (16)、したがって (22) の第2式は成り立たない。今の場合は補強材の曲げ剛性が無限大なので負荷前の補強材の直線性は負荷後も保たれ、板の遠方を固定と考えれば、そこで $u=0$ であるから、結局板と補強材の接合部 $x=\pm b$ において

$u=0$ でなければならない。すなわち χ_2 に対するもう一つの境界条件は

$$\xi = \pm 1 \quad \text{において} \quad u = \mp u_1 \quad (32)$$

である。

(18) の第 4 式に $\xi=1$ とおいた表示を用い、右辺 (η の偶関数) をフーリエ積分で表わし、両辺の被積分関数を比較すれば $A(m)$, $B(m)$ に対する他の関係式

$$\begin{aligned} & \{(1+\nu)mc - (1-\nu)s\}A \\ & + (1+\nu)msB = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{Eu_1(\ell)}{Tb} \cos mtdm \quad (33) \end{aligned}$$

を得る。

(31), (33) から $A(m)$, $B(m)$ の表示をつくり、

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0^{2n} &= \frac{1}{(2n+2)!} [2(P_{2n+1} - Q_{2n+1}) + k\{-(2n(1+\nu)+1-\nu)P_{2n+2} + (3+\nu)Q_{2n+2} + 2(1+\nu)P_{2n+3}\}] \\ \alpha_p^{2n} &= \frac{1}{(2n+2)!(2p-1)!} [2(P_{2n+2p+1} - Q_{2n+2p+1}) + k\{-(2n(1+\nu)+1-\nu)P_{2n+2p+2} \\ & \quad + (3+\nu)Q_{2n+2p+2} + 2(1+\nu)P_{2n+2p+3}\}] \quad (p \geq 1) \\ \beta_p^{2n} &= \frac{2}{(2n+2)!(2p)!} [4P_{2n+2p+2} - 2(n+p+1)(P_{2n+2p+1} - Q_{2n+2p+1}) \\ & \quad + k\{(1+\nu)(2np-p+3n-1) + 2(p-n+3)P_{2n+2p+2} - (3+\nu)(n+p+1)Q_{2n+2p+2} \\ & \quad - 2(1+\nu)(n+p+1)P_{2n+2p+3} + 2(1+\nu)P_{2n+2p+4}\}] \\ \gamma_0^{2n} &= -\frac{k(1+\nu)P_{2n+2}}{(2n+1)!}, \quad \gamma_p^{2n} = -\frac{k(1+\nu)P_{2n+2p+2}}{(2n+1)!(2p-1)!} \quad (p \geq 1) \\ \delta_p^{2n} &= \frac{1}{(2n+1)!(2p)!} [-2(P_{2n+2p+1} - Q_{2n+2p+1}) + k\{(2p(1+\nu)+1+3\nu)P_{2n+2p+2} \\ & \quad - (3+\nu)Q_{2n+2p+2} - 2(1+\nu)P_{2n+2p+3}\}] \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

かつ P_q , Q_q はつぎの定積分である。

$$\left. \begin{aligned} P_q &= \frac{1}{2^q} \int_0^\infty \frac{m^q dm}{4(\cosh m - 1) + km\{(3+\nu)\sinh m - (1+\nu)m\}} \\ Q_q &= \frac{1}{2^q} \int_0^\infty \frac{m^q e^{-m} dm}{4(\cosh m - 1) + km\{(3+\nu)\sinh m - (1+\nu)m\}} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} a_0^0 &= 1, \quad a_2^0 = \frac{3}{2}, \quad a_4^0 = \frac{15}{8}, \quad a_6^0 = \frac{35}{16}, \quad \dots \\ a_0^{2n} &= b_n, \quad a_2^{2n} = \frac{1}{2}(3b_n + a_{n+1} + 2a_{n+2}) \\ a_4^{2n} &= \frac{1}{8}(15b_n + 6a_{n+1} + 8a_{n+2} + 16a_{n+3}) \\ a_6^{2n} &= \frac{1}{16}(35b_n + 15a_{n+1} + 18a_{n+2} + 24a_{n+3} + 48a_{n+4}) \\ & \dots \dots \dots (n \geq 1) \\ c_0^{2n} &= a_{n+1}, \quad c_2^{2n} = a_{n+1} + 2a_{n+2} \\ c_4^{2n} &= \frac{3}{8}(3a_{n+1} + 4a_{n+2} + 8a_{n+3}) \\ c_6^{2n} &= \frac{1}{4}(5a_{n+1} + 6a_{n+2} + 8a_{n+3} + 16a_{n+4}) \\ & \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

以上、板と補強材の接合部の境界条件を 2 つの場合に分けて考察し、これを満足する χ_2 の表示を (27) ~ (30) および (34), (35) のように与えた。

つぎに応力関数はまた、クラックの縁を自由境界とするものでなければならない。筆者の一人はさきに (7) ~ (9) および (27) の形で表わされた応力関数が楕円孔縁を自由とするために (9), (27) の χ_1 , χ_2 の展開係数間に成り立つべき関係式を与えた⁷⁾。そして楕円孔が細長くなった極限として、第 1 図の位置にあるクラック縁が自由境界となるための条件を求めるとつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} D_{2n} &= \frac{1}{2} a_0^{2n} \lambda^{2n+2} + \sum_{p=0}^{\infty} (K_{2p} + M_{2p}) a_{2p}^{2n} \lambda^{2n+2p+2} \\ F_{2n} &= -\frac{1}{2} c_0^{2n} \lambda^{2n+2} - \sum_{p=0}^{\infty} (K_{2p} + M_{2p}) c_{2p}^{2n} \lambda^{2n+2p+2} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

であり, b_n, a_n は展開式

$$\left. \begin{aligned} \log(1 + \sqrt{1-X^2}) &= \log 2 - \sum_{n=1}^{\infty} b_n X^{2n} \\ \sqrt{1-X^2} &= 1 - \sum_{n=1}^{\infty} a_n X^{2n} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

で定義される数値, すなわち

$$a_n = \frac{1}{2^{2n-1}n} \binom{2n-2}{n-1}, \quad b_n = \frac{1}{2^{2n}n} \binom{2n-1}{n} \quad (39)$$

である.

(28) と (36) を連立に解いて, 未定係数 $D_{2n}, F_{2n}, K_{2n}, M_{2n}$ を求めれば, 応力関数が定まり, 問題が解けることになるが, 計算の便宜上

$$\left. \begin{aligned} K_{2n} + M_{2n} &= L_{2n} \\ \Gamma_{2p}^{2n} &= \alpha_{2p}^{2n} + \gamma_{2p}^{2n}, \quad \Delta_{2p}^{2n} = \beta_{2p}^{2n} + \delta_{2p}^{2n} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

とおいて, これらをつぎの形に書いておく.

$$\left. \begin{aligned} D_{2n} &= \frac{1}{2} a_0^{2n} \lambda^{2n+2} + \sum_{p=0}^{\infty} a_{2p}^{2n} L_{2p} \lambda^{2n+2p+2} \\ F_{2n} &= -\frac{1}{2} c_0^{2n} \lambda^{2n+2} - \sum_{p=0}^{\infty} c_{2p}^{2n} L_{2p} \lambda^{2n+2p+2} \\ L_{2n} &= \sum_{p=0}^{\infty} (\Gamma_{2p}^{2n} D_{2p} + \Delta_{2p}^{2n} F_{2p}) \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

数値計算は前記 (a), (b) の両場合についてポアソン比 ν を $1/3$ とし, 補強材と板の断面積比 k をいろいろに与えて行なった.

まず (30) あるいは (35) の I_q, J_q, P_q, Q_q を数値積分によって求める. ただし P_1, Q_1 だけは $m=0$ で被積分関数が発散するので, (34) 式で必要な P_1-Q_1 を直接計算する. 数値積分には $m=0 \sim 3$ の間を 0.1 間隔で被積分関数を計算し, 5 区間ごとに 5 次曲線と見なして数値積分を行ない, $m>3$ の部分を別に近似評価して加える方法 (卓上計算機を使用) と $\int_0^{\infty} e^{-x} x^n f(x) dx$ の型の数値積分に便利な, いわゆる Laguerre-Gauss の積分公式⁹⁾ (20 点法を用い, 航技研のデータロン 205 電子計算機を使用) を併用し, 結果を相互にチェックした. こうして I_p, J_q あるいは P_q, Q_q が求まれば (29) または (34) で α_{2p}^{2n} 等が得られ, ついで (40) から $\Gamma_{2p}^{2n}, \Delta_{2p}^{2n}$ が計算される. また a_{2p}^{2n}, c_{2p}^{2n} は (37), (39) からパラメータに関係しない定数として求められ, かくして, 未知係数 L_{2n}, D_{2n}, F_{2n} に関する連立方程式 (41) が確定する.

(41) を解くにさいして摂動法を用いる. すなわち未知係数が $\lambda (<1)$ のべき級数に展開できると仮定すると, それらをつぎの形をとるべきである.

$$\left. \begin{aligned} D_{2n} &= \sum_{p=n}^{\infty} D_{2p}^{(2n+2)} \lambda^{2p+2}, \quad F_{2n} = \sum_{p=n}^{\infty} F_{2p}^{(2n+2)} \lambda^{2p+2} \\ L_{2n} &= \sum_{p=0}^{\infty} L_{2p}^{(2n+2)} \lambda^{2p+2} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

(42) を (41) に代入して λ について整頓し, 両辺の λ の同じべきの項どうしを等置すれば, 関係式

$$\left. \begin{aligned} D_{2n}^{(2n+2)} &= \frac{1}{2} a_0^{2n}, \quad F_{2n}^{(2n+2)} = -\frac{1}{2} c_0^{2n} \\ L_{2n}^{(2)} &= D_0^{(2)} \Gamma_0^{2n} + F_0^{(2)} \Delta_0^{2n} \\ D_{2n}^{(2n+4)} &= L_0^{(2)} a_0^{2n}, \quad F_{2n}^{(2n+4)} = -L_0^{(2)} c_0^{2n} \\ L_{2n}^{(4)} &= D_0^{(4)} \Gamma_0^{2n} + D_2^{(4)} \Gamma_2^{2n} + F_0^{(4)} \Delta_0^{2n} + F_2^{(4)} \Delta_2^{2n} \\ D_{2n}^{(2n+6)} &= L_0^{(4)} a_0^{2n} + L_2^{(2)} a_2^{2n}, \\ F_{2n}^{(2n+6)} &= -L_0^{(4)} c_0^{2n} - L_2^{(2)} c_2^{2n} \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (43)$$

が得られ, これによって (42) の展開係数を低次から高次へと逐次求めていくことができる.

つぎにクラック先端に生ずる最大応力の計算式を求めるのであるが, われわれはクラックを楕円孔が非常に細長くなった極限と考えて計算を行なう.

中央に楕円孔を有する帯板の引っ張り問題において, 孔の長軸端に生ずる弾性最大応力の式は, 筆者の前論文からつぎの形で与えられる⁹⁾.

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{max}}{T} &= 1 - 4 \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) F_{2n}^{(2n+2)} e^{n+1} \\ &\quad + 4\lambda^2 \left\{ M_0^{(2)} e - \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) F_{2n}^{(2n+4)} e^{n+2} \right\} \\ &\quad + 4\lambda^4 \left\{ M_0^{(4)} e^2 + 3M_2^{(2)} e - \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) F_{2n}^{(2n+6)} e^{n+3} \right\} \\ &\quad + \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (44)$$

ここに

$$e = 1 - \frac{\rho}{l} \quad (45)$$

クラックの場合は (43) による計算結果を (44) に代入して計算すればよい. 式 (44) の中の $F_{2n}^{(2n+2)}, F_{2n}^{(2n+4)}$ 等を含む級数は (38) から求められる公式

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) a_{n+p} X^{2n+2} &= \frac{1}{X^{2p-4} \sqrt{1-X^2}} \\ &\quad - \frac{(2p-1)(1-\sqrt{1-X^2})}{X^{2p-2}} + \sum_{q=0}^{p-2} \frac{(2q+1) a_{p-q-1}}{X^{2q}} \end{aligned} \quad (46)$$

に $X^2 = e = 1 - \rho/l$ とおき, $\rho \ll l$ を考慮して得られる式

$$\sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) a_{n+p} e^n = \sqrt{\frac{l}{\rho}} \quad (p=1, 2, 3, \dots) \quad (47)$$

と (37) の後半を用いて得る関係

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) c_{2p}^{2n} e^n &= k_{2p} \sqrt{\frac{l}{\rho}} \\ k_0 &= 1, \quad k_2 = 3, \quad k_4 = 5.625, \quad k_6 = 8.75, \quad k_8 = 12.305, \\ k_{10} &= 16.242, \quad k_{12} = 20.528, \quad k_{14} = 25.137 \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

によって総和することができる。

また $p \ll l$ の場合 (44) 式中の $M_{2n}^{(2p)}$ の項は $F_{2n}^{(2n+2)}$ 等を含む級数に対して無視できるので、これを省略した。

以上の計算を行なえば、クラックの先端に生ずる弾性最大応力はつぎのような λ の級数表示として与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{\max}}{T} &= 2\sqrt{\frac{l}{\rho}} (1 + A_2\lambda^2 + A_4\lambda^4 + A_6\lambda^6 + \dots + A_{14}\lambda^{14}) \\ &= 2\sqrt{\frac{l}{\rho}} f(\lambda) \\ f(\lambda) &= 1 + A_2\lambda^2 + A_4\lambda^4 + A_6\lambda^6 + \dots + A_{14}\lambda^{14} \end{aligned} \quad (49)$$

3. 数値計算結果

補強材の曲げ剛性を 0 あるいは無限大と仮定した両場合について、ポアソン比 ν を $1/3$ とし、補強材と板の断面積比 k を 0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, ∞ の 23 とおりに変えて数値計算を行なって応力計算式 (49) を求め、 λ を仮定して $f(\lambda) = \sqrt{\rho/l} \cdot \sigma_{\max}/2T$ の値を計算した。代表的な場合の A_{2n} と $f(\lambda)$ の値は第 1 表と第 3 図 (a), (b) のようになる。

(49) 式による $f(\lambda)$ の計算値には当然 λ^{16} より高次の項を無視したことによる誤差が入ってくるが、その厳密な見積りは今のところ不可能である。しかし第 1 表でわかるように、大体において $A_{2n}(n \leq 7)$ は n が

第 3 図

第 1 表

	k	A_2	A_4	A_6	A_8	A_{10}	A_{12}	A_{14}
(a) 補強材の曲げ剛性無視	0	0.5948	0.4812	0.3963	0.3367	0.2972	0.2713	0.2535
	0.10	0.4970	0.3366	0.2306	0.1611	0.1166	0.0843	0.0627
	0.20	0.4244	0.2429	0.1857	0.0722	0.0846	0.0120	-0.0020
	0.35	0.3418	0.1499	0.0532	0.0053	-0.0177	-0.0281	-0.0321
	0.50	0.2791	0.0889	0.0073	-0.0261	-0.0378	-0.0402	-0.0388
	0.75	0.2020	0.0259	-0.0322	-0.0476	-0.0480	-0.0439	-0.0388
	1.00	0.1463	-0.0115	-0.0507	-0.0547	-0.0495	-0.0427	-0.0366
	1.50	0.0711	-0.0512	-0.0649	-0.0572	-0.0474	-0.0393	-0.0329
	2	0.0225	-0.0703	-0.0689	-0.0560	-0.0450	-0.0368	-0.0307
	3	-0.0368	-0.0865	-0.0696	-0.0531	-0.0418	-0.0339	-0.0292
	5	-0.0944	-0.0950	-0.0672	-0.0497	-0.0389	-0.0315	-0.0262
	8	-0.1321	-0.0966	-0.0647	-0.0475	-0.0371	-0.0301	-0.0250
	∞	-0.2056	-0.0909	-0.0593	-0.0437	-0.0342	-0.0277	-0.0230
(b) 補強材の曲げ剛性無限大	0	0.4112	0.3213	0.2782	0.2413	0.2182	0.2005	0.1863
	0.10	0.3201	0.1962	0.1291	0.0866	0.0574	0.0366	0.0214
	0.20	0.2491	0.1149	0.0501	0.0148	-0.0055	-0.0173	-0.0242
	0.35	0.1670	0.0375	-0.0127	-0.0329	-0.0402	-0.0417	-0.0406
	0.50	0.1045	-0.0099	-0.0440	-0.0520	-0.0509	-0.0469	-0.0422
	0.75	0.0273	-0.0549	-0.0673	-0.0625	-0.0543	-0.0463	-0.0396
	1.00	-0.0284	-0.0784	-0.0761	-0.0645	-0.0532	-0.0440	-0.0368
	1.50	-0.1037	-0.0983	-0.0909	-0.0682	-0.0500	-0.0403	-0.0332
	2	-0.1522	-0.1041	-0.0801	-0.0611	-0.0475	-0.0379	-0.0310
	3	-0.2112	-0.1037	-0.0782	-0.0562	-0.0446	-0.0353	-0.0287
	5	-0.2686	-0.0988	-0.0782	-0.0551	-0.0420	-0.0330	-0.0267
	8	-0.3060	-0.0865	-0.0764	-0.0531	-0.0404	-0.0317	-0.0256
	∞	-0.3790	-0.0694	-0.0771	-0.0485	-0.0379	-0.0293	-0.0236

大きいほど絶対値が小さくなる傾向にあるから、 A_{16} 以下もそうであると仮定すれば、誤差は $|A_{14}(\lambda^{16} + \lambda^{18} + \dots)| = |A_{14}\lambda^{16}/(1-\lambda^2)|$ より小さいと考えることができる。

この便法によれば、たとえば $f(0.8)$ の誤差は、 $0.078|A_{14}|$ 以内で、級数の収れんがもっとも悪い (a) の $k=0$ の場合で 0.02 以内、その他の場合ははるかに小さく、図上では判別できない程度の誤差と考えられる。

第4図

上の結果の中につぎの特別な場合が含まれている。

まず (a) で $k=0$ の場合は、縁を補強しない帯板 (第4図 (i)) に相当する。この場合については筆者の一人が楕円孔問題の極限として、 A_6 まで求めたことがあるが¹⁰⁾、これらは当然第1表の値と一致している。

(b) で $k=0$ の場合は等間隔にならぶ無限個のクラックを有する無限板の引っ張り (第4図 (ii)) に相当する。この場合に対して H. M. Westergaard¹¹⁾ は

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi\lambda} \sqrt{\tan \frac{\pi}{2}\lambda} \quad (50)$$

なる解を与えている。筆者らの $A_2, A_4, \dots, A_{14}$ の値は (50) を λ について展開したときの展開係数と一致し、 $f(\lambda)$ の値は $\lambda \leq 0.6$ では有効数字4桁まで、 $\lambda=0.7$ で3桁、 $\lambda=0.8$ では2桁まで (50) による結果と一致する。

さいごに (b) で $k=\infty$ の場合は両直線縁を完全に固定した帯板 (第4図 (iii)) に相当し、縁の固定効果で、クラック先端の応力がもっとも緩和される場合である。

第3図でわかるように (a), (b) いずれの場合も、クラック率 λ が同じならば k , すなわち補強材の引っ張り剛性が大きいほど $f(\lambda)$ は小さくなり、応力集中は軽減される。ただし k がある程度大きくなると、それ以上いくら大きくしてもあまり効果がないことも図にあらわれている。また同じ k, λ について (a), (b) の結果を比較すると、曲げ剛性が大きい (b) の方が $f(\lambda)$ が小さいことがわかる。すなわち、荷重、板幅

クラックの長さ、両端の曲率半径が同じならば、補強材の引っ張り剛性あるいは曲げ剛性が大きいほど、クラック先端の応力集中が緩和される。

この論文では、理論の簡単のため、補強材の曲げ剛性が0あるいは無限大の両極端だけを解析したが、実際の構造では補強材の曲げ剛性は0と無限大の間のある有限値をとるので、第3図 (a) は $f(\lambda)$ の下界、(b) は上界を与えると考えられる。そして航空機の翼や胴体のように多数の補強材のある構造の場合は、隣接するパネルの拘束効果によって (a) より (b) の場合に近いことが想像される。

なお式 (49) 中の ρ について注意すべきことがある。人工的につくった鋸歯切断のようにクラック先端の曲率半径が材料を構成する粒子に比較して相当大きい場合には、もちろんこれを ρ としてよいが、疲労クラックのような場合には非常に鋭いのが普通である。金属材料は均質でなく、多くの粒子から成り立っていて、応力は各粒子内ではあまり変化せず、粒子の境界で不連続に変化する場合が多いと思われる。そして切り欠き先端の曲率半径が比較的大きく、応力勾配があまり大きくない場合には、材料の均質性の仮定に基づいた弾性論は実さいに近い結果を与えることになるが、鋭いクラックの場合は、弾性論から得られるような急げきな応力勾配は現実には存在し得ず、粒子の大きさを考慮した解析を行わなければならない。

H. Neuber¹²⁾ は鋭い両側切り欠きを持つ板を引っ張る場合について、粒子内で応力一定と仮定した近似計算を行ない、弾性論による応力式 $\sigma_{\max}/T = 4/\pi \cdot \sqrt{a/\rho}$ における ρ を切り欠き底部の応力一様と考えられる粒子の半径 ρ' におきかえるだけでこの場合の応力計算式を得ることを示した。筆者の一人は Neuber が行なったと類似の計算を今の問題について行なった。紙面の都合上、計算経過は省略するが、結果は

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{\max}}{T} &= 2\sqrt{\frac{l}{\rho'}} (1 + A_2\lambda^2 + A_4\lambda^4 + A_6\lambda^6 + \dots + A_{14}\lambda^{14}) \\ &= 2\sqrt{\frac{l}{\rho'}} f(\lambda) \end{aligned} \quad (51)$$

となる。すなわち今の問題でクラックが鋭い場合は Neuber の場合と同様に ρ を応力一様と考えられる切り欠き底部の粒子の半径 ρ' でおきかえるだけで、均質の仮定に基づく弾性論の結果がそのまま用いられることがわかる。また疲労クラックが進展する場合のように、クラックの先端付近に小さな塑性領域が生成される場合も、塑性による応力一様化の状態はさきに述べた粒子による一様化に類似すると考えられるから、前述の結果における ρ をこの場合は塑性域の大きさと

代表する値 ρ'' で置き換えるだけで最大応力の近似値が得られるであろう。

ρ' , ρ'' の決定は簡単ではないし、二三の資料もあるが広くばらついているので、今後の研究にまたねばならない。これらの値が合理的に決定されたならば、本論文の結果がクラックを有する薄板構造の静強度や補強板における疲労クラックの進展等の研究を推進することが期待される。また ρ' , ρ'' の値が不明確な場合でも、とにかくこれらは材料によって定まる量であると考えられるから、種々の補強材の効果を定性的に比較するような場合には第1表、第3図を直接議論の根拠とすることができる。なお引続き、任意の曲げ剛性引張り剛性をもつ補強材で補強した帯板や、多数な平行な補強材を有する無限板におけるクラックによる応力集中の解析も行ないつつあるので、完了次第報告する予定である。

論文を終わるにさいし、数値計算に協力された当研究所の飯田宗四郎技官に深謝する。

参 考 文 献

- 1) G. R. Irwin "Fracture" Pre-publication copy of Vol. VI article in Handbuch der Physik, 1958.
- 2) A. A. Griffith "The Phenomenon of Rupture and Flow in Solids" Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 221, pp. 163~198, 1920.
- 3) 石橋 正 "疲労亀裂の伝播に関する最近の問題" 機械の研究, 10 巻 5 号, pp. 609~615, 1958.
- 4) R. C. J. Howland "On the Stresses in the Neighbourhood of a Circular Hole in a Strip Under Tension" Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 229, pp. 56~57, 1930.
- 5) 同上, p. 58.
- 6) 同上, p. 59~60, ただし E_{2p} , L_{2p} はそれぞれ本論文の F_{2p} , K_{2p} に相当することを考慮する。
- 7) 筆者 "自由だ円孔を有する二次元弾性体の応力関数について" 機械学会論文集, 21 巻 107 号, pp. 502~506, 1955.
- 8) P. Rabinowitz & G. Weiss "Tables of Abscissas and Weights for Numerical Evaluation of Integrals of the Form $\int_0^\infty e^{-x} x^n f(x) dx$ " Mathematical Tables and Other Aids to Computation, Vol. 13, pp. 285~294, 1959.
- 9) 筆者 "だ円孔を有する帯板の引張り" 機械学会論文集, 21 巻, 107 号, p. 509, 式 (17), 1955.
- 10) 同上, p. 511, 式 (31).
- 11) H. M. Westergaard "Bearing Pressure and Cracks" J. Appl. Mech., Vol. 6, No. 2, p. A-49, 1939. また文献 1), p. 2. 17.
- 12) H. Neuber "Kerbspannungslehre" pp. 146~148, 1937.

抄 録 (続 き)

(172 頁よりつづく)

ベストテープを、マンドレルに 45° の角度で巻き付け、減圧状態で 350°F で重合させて skirt の内張りを作る。重合完了後、所定の寸法に機械仕上げして、さらにフェノリック・レジンを含浸のグラス・クロスを巻き付ける。この外側にファイバー・グラスのハニカム構造の層を作って一層強化したものをアルミニウムのフランジによって燃焼室に固定する。[注。文中の合金の組成。347 (ステンレス鋼): Cr 17-19%, Ni 9-13%, Mn 2%, Si 1%, C 0.08%, Fe Bal. 17-7 PH (ステンレス鋼): Cr 17%, Ni 7%, Mn 0.7%, Si 0.4

%, C 0.07%, Fe Bal. AM 350 (ステンレス鋼): Cr 16.5%, Ni 4.25%, Mo 2.75%, Mn 0.75%, Si 0.35%, C 0.10%, Fe Bal. N-155 (耐熱合金): Cr 21%, Ni 20%, Co 20%, Mo 3%, W 3%, Cb 1%, Mn 1.5%, Si 0.5%, C 0.15%, Fe Bal. Haynes Stellite 21 (耐熱合金): Cr 27%, Ni 3%, Mo 5%, Fe 1%, Mn 0.6%, Si 0.6%, C 0.25%, Co Bal. A-286 (耐熱合金): Ni 26%, Cr 15%, Mo 1.25%, Ti 2%, Al 0.2%, V 0.3%, Mn 1.35%, Si 0.5%, C 0.05%, Fe Bal.] (小原 嗣朗)

表 紙 写 真 説 明

航空技術研究所に昭和 36 年 7 月完成した吹き出し超音速風洞の測定部付近を示す写真である。

本風洞は川崎重工工業株式会社を主契約として去る昭和 34 年 12 月起工したもので本研究所の既設高圧貯気槽、乾燥空気製造設備およびデータロン 205 型電子計算機等と連結して使用される。

内径 10 m の 2 基の貯気槽から出た空気は調圧弁により集合胴で一定圧に制御されさらに可撓ノズルを通

り測定部に超音速流を生じた後拡散胴、消音器を経て大気に放出される。写真の測定部のシュリーレン写真用窓の直径は 650 mm で片側は取り外してフラッター試験用模型出入装置が取り付けられたフラッター試験のために風洞運転中に気流の全圧あるいはマッハ数がある程度変化できるようにしてある。

主要要目 圧縮機 1,200EP, 充填時間約 2.2 h, 測定部断面 1 m×1 m, マッハ数 1.4~4.0 持続時間 30 s 以上。 (航技研 高木広治)