

任意分布力を受ける表面き裂の応力拡大係数の解析*

(第4報, 影響係数データベースの応力集中部材への応用)

白鳥正樹^{*1}, 三好俊郎^{*2}, 酒井義明^{*3}

Analysis of Stress Intensity Factors for Surface Cracks Subjected to Arbitrarily Distributed Surface Stresses

(4th Report, Application of Influence Coefficients for the Cracks Originating at the Notches and Welding Joints)

Masaki SHIRATORI, Toshiro MIYOSHI, and Yoshiaki SAKAI

The authors have developed an influence function method by which the stress intensity factor, K , for surface cracks can be analyzed easily for arbitrarily distributed surface stresses. The data of the influence coefficients, K_0 , have been obtained for a semielliptical or a quarter-elliptical surface crack in a flat plate and for a semielliptical surface crack in a round bar. In this paper, the authors have shown how these data can be applied to the analysis of K for a surface crack originating at the stress-concentrated portions such as notch roots, welding joints and circular holes. It has been found that the proposed estimation scheme gives approximate values of K at most 10% higher than the exact values.

Key Words: Fracture, Stress Intensity Factor, Surface Crack, Arbitrarily Distributed Stress, Influence Function Method, Notch

1. 緒 言

構造物や機械の破壊は疲労によるものが多い、その疲労き裂は応力集中部から発生することが多い。近年切欠底の微小き裂の応力拡大係数 (K 値) を求める研究において、二次元では中井ら⁽¹⁾が簡便評価式を提案し、三次元では村上ら⁽²⁾が簡便決定法を示している。しかしながら応力集中部の表面き裂の K 値の解析を厳密に行うのは容易でない。本報では著者らの提案している影響関数法⁽³⁾を用い、すでに公表している平板中の半だ円表面き裂⁽⁴⁾、4分の1だ円コーナき裂⁽⁵⁾、および丸棒中の表面き裂⁽⁶⁾の影響係数データベースを利用することにより、応力集中部である切欠き、円孔の縁、溶接継手部に存在する表面き裂の K 値を容易に評価できることを示す。

2. 解 析 方 法

著者らは、表面き裂の深さ方向および幅方向に任意

に分布する表面力に対し、き裂前縁の各点の応力拡大係数を効果的に評価する方法(一種の影響関数法)を提示した⁽³⁾⁽⁴⁾この方法によれば、以下の手順で応力拡大係数が解析できる。

(1) き裂面上に形状関数で表される単位分布荷重を負荷した場合の K 値のリスト K_0 をあらかじめつくっておく。

(2) き裂のない部材の応力解析を行い(熱応力および残留応力等の解析も含む)、仮想き裂面上の応力分布を求める。

(3) 上記(1)で求めた影響係数 K_0 のリストと(2)で求めた仮想き裂面上の応力分布を重ね合わせることにより、(2)で扱った問題でき裂が存在する場合のき裂前縁の K 値が簡単に求められる。

上記(2)の解析は、き裂を含まないので解析は容易である。

本解析では、切欠材、円孔の縁、溶接継手部において、解析対象物自身の形状の影響係数 K_0 を求める代わりにそれぞれ対応する平滑材の影響係数で近似する。この近似により、どの程度の近似解が得られるかを検討した。

* 昭和62年4月3日 第64期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和61年10月31日。

^{*1} 正員、横浜国立大学工学部 (〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台156)。

^{*2} 正員、東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)。

^{*3} 学生員、横浜国立大学大学院。

3. 応 用 例

(1) 半円切欠材の表面き裂⁽⁷⁾

図1に示す両外側に半円切欠きを持つ部材が遠方で一様引張りを受ける問題を扱い、有限要素法により直接求めた K 値と、影響関数法により求めた K 値の比較を行った。切欠底に $a/c=1.0$, $a/t=0.4$ 半円表面

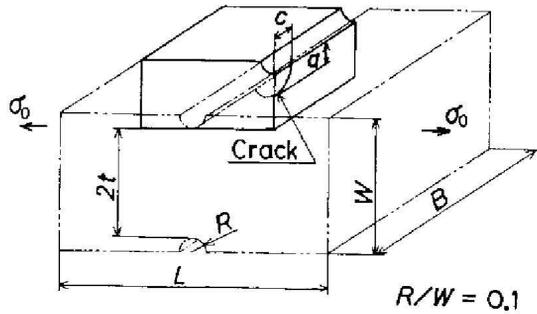


図1 半円切欠材の表面き裂

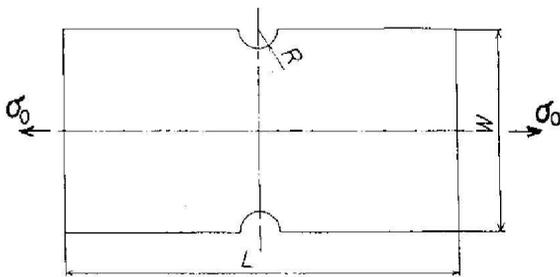


図2 半円切欠材

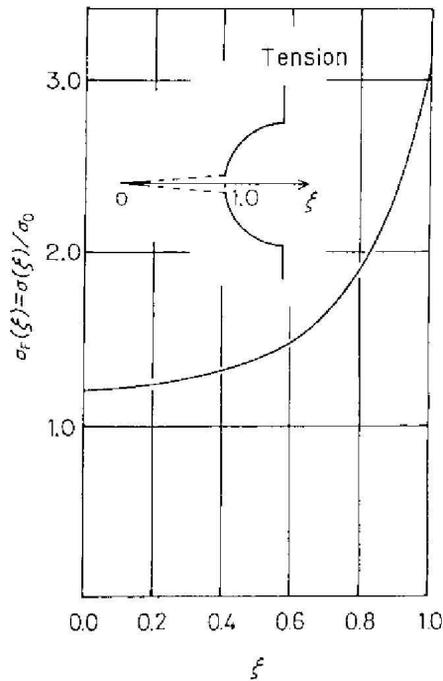


図3 仮想き裂面上の応力分布

き裂が存在する。

解析は次の手順で行う。

(a) 図2に示すようにまず二次元問題としてき裂がない切欠材の応力集中の解析を行い、切欠底に想定した仮想き裂面上の応力分布を求める。この解析は三

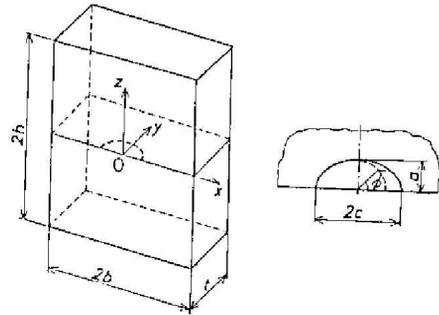


図4 平板中の半円表面き裂

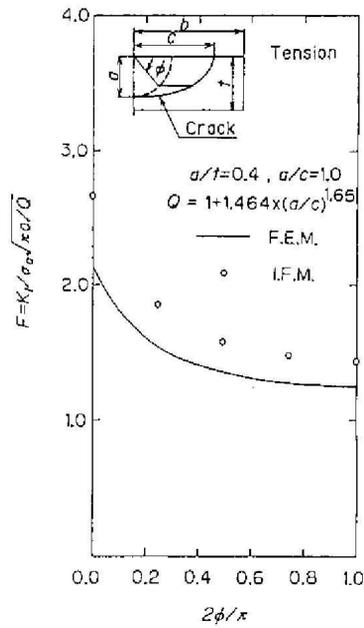


図5 直接法と影響関数法のき裂前縁に沿う K 値の比較

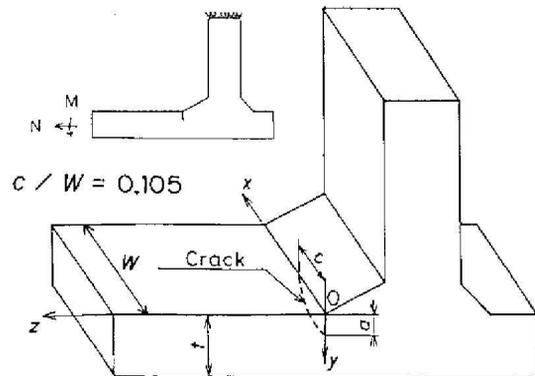


図6 溶接継手部の半円表面き裂

好⁽⁶⁾が行っており、その結果を図3に示す。ここで座標 ξ は、き裂最深部からの距離をき裂深さ a で正規化した値である。

(b) (a)によりき裂のない切欠部材において求めた仮想き裂面上の応力分布に対して近似的に図4に示す平板中の半だ円表面き裂のデータベース⁽⁴⁾を用いて

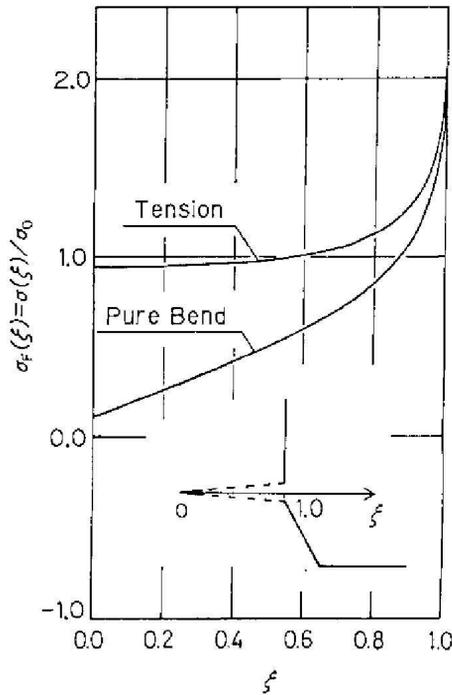


図7 仮想き裂面上の応力分布

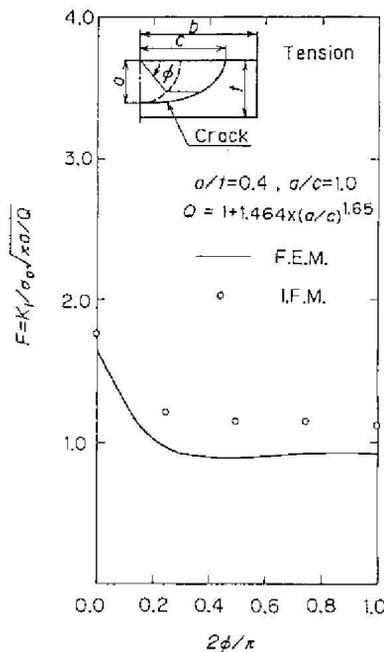


図8 直接法と影響関数法のき裂前縁に沿う K 値の比較 (一様引張り)

影響関数法を適用して K 値を求める。図5に直接法により求めた K 値と影響関数法を適用して求めた K 値の比較を示す。ここに直接法とは、表面き裂のはいった半円切欠部材を、有限要素法を用いて直接三次元解析したものである。なおFEMは直接法の解を、IFMは影響関数法を適用して求めた近似解を示す。

(2) 溶接継手部の表面き裂⁽⁷⁾

図6に示すような溶接継手部のモデルがある。図6において yz 面は対称面であり、半だ円表面き裂を有する。このモデルに対して、有限要素法解析により直接求めた K 値と、影響関数法により求めた K 値の比較を行った。溶接継手部に $a/c=1.0$, $a/t=0.4$ の半だ円表面き裂が存在し、遠方で一様引張り、純曲げを受ける問題を扱った。き裂が存在しない場合の継手部の応力集中の解析は二次元解析で行いその結果を図7に示

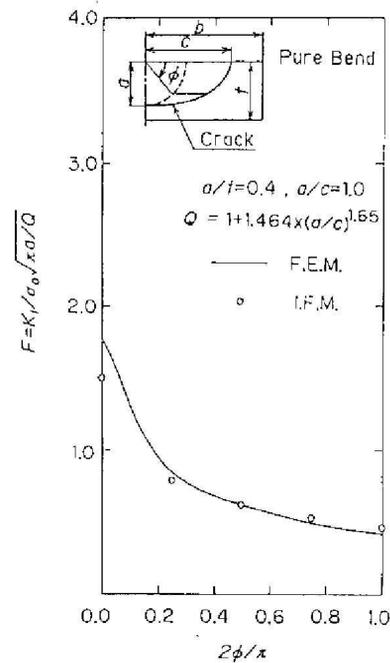


図9 直接法と影響関数法のき裂前縁に沿う K 値の比較 (曲げ)

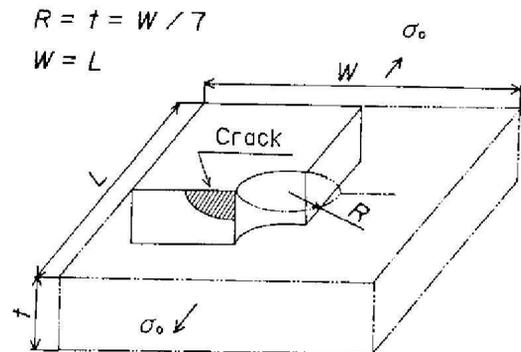


図10 円孔の縁の両側コーナき裂

す。直接法により求めた K 値と、影響関数法を適用して求めた K 値の結果の比較を図8, 図9に示す。ここに、影響関数法では(1)の半円切欠きの場合と同様に平板中の半楕円表面き裂のデータベース⁽⁴⁾を用いて解析した。一様引張りの場合を図8に、曲げの場合図9に示す。

(3) 円孔の縁に発生した表面き裂

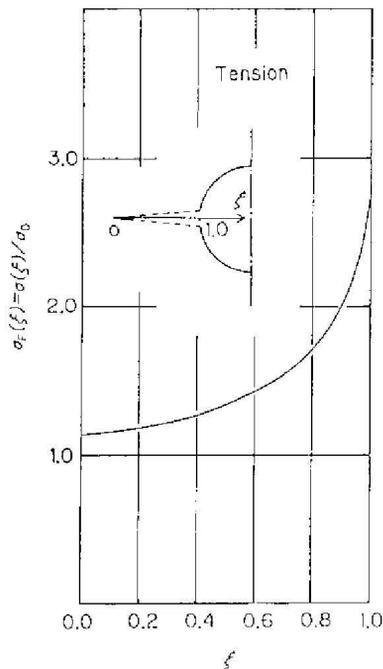


図 11 仮想き裂面上の応力分布

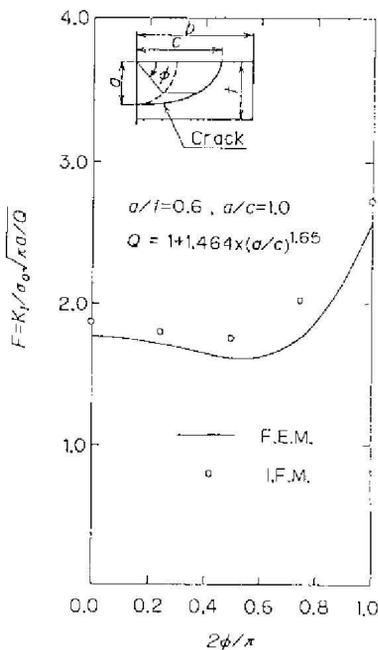


図 12 直接法と影響関数法のき裂前縁に沿う K 値の比較

図10に示すように円孔の縁の両側にコーナき裂を持つ部材が遠方で一様引張りを受ける問題を扱い、影響関数法および有限要素法により求めた K 値の比較を行った。円孔の縁に、 $a/c=1.0$, $a/t=0.6$ のコーナき裂が存在する。き裂が存在しない場合の円孔の縁の応力集中の解析は二次元解析で行い図11に示す。直接法により求めた K 値と、影響関数法を適用して求めた K 値の結果の比較を図12に示す。ここに、影響関数法では平板中のコーナき裂のデータベース⁽⁵⁾を用いて解析した。

(4) 軸の円環状切欠底に発生した表面き裂

図13に示すような円環状の切欠底に発生した表面き裂について、有限要素法により直接求めた K 値と影響関数法により求めた K 値の比較を行った。この部材は、遠方で一様引張応力 σ_0 を受けるものとし、切欠形状、き裂形状等の諸元は以下のとおりである。

$$r_1/r_0=1.2, \rho/r_0=0.2$$

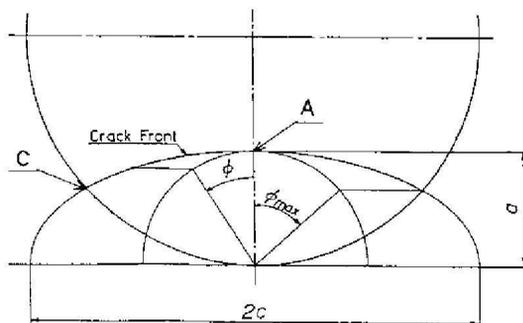
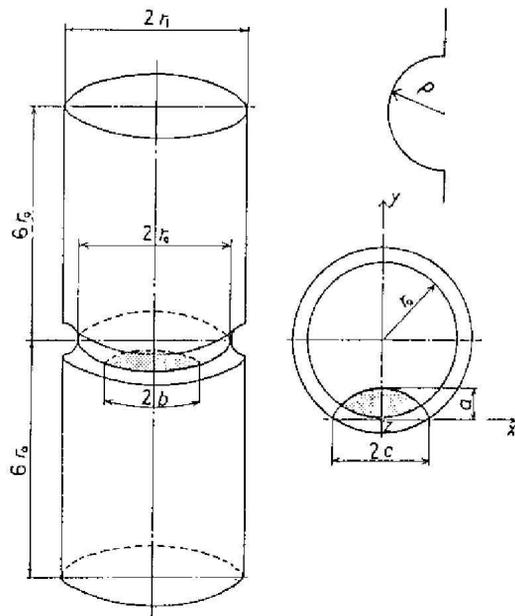


図 13 切欠きを持つ丸棒の形状

$a/r_0=0.2, a/c=0.2$

FEMで直接解析する場合には対称性を利用して、 $x \geq 0, z \geq 0$ の全体の4分の1の部分解析の対象とした。この場合、切欠きの存在のために切欠き裂部材の要素分割は極めて複雑になる。

一方影響関数法を用いる場合は、ここで必要とされる作業はき裂のない部材の応力解析であり、これは軸対称問題となるため簡単に実行できる。仮想き裂面を含む切欠部最小断面上の応力分布は、軸対称FEM解析の結果図14のようになった。ここで丸棒平滑材に対するき裂の影響係数 $K_0^{(6)}$ を用いて簡単に K 値を求めることができる。図15は直接法による解が得られている $a/r=0.2, a/c=0.2$ の場合について、両者の解の結果を比較して示した。

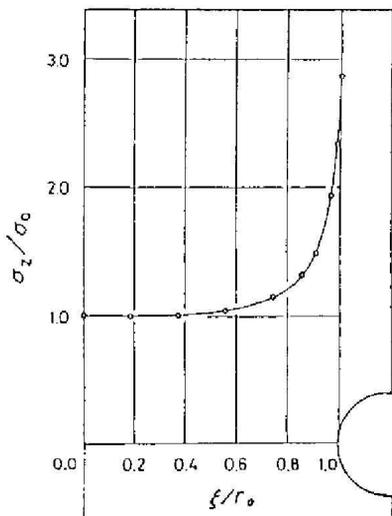


図14 仮想き裂面を含む切欠部最小断面上の応力分布

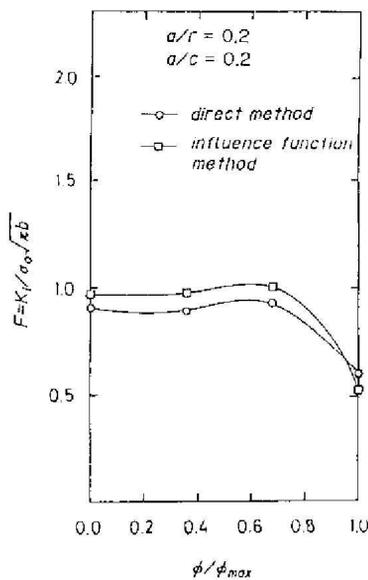


図15 直接法と影響関数法のき裂前縁に沿う K 値の比較

4. 考 察

4章においていくつかの例を挙げ、影響関数法を適用して近似的に K 値を求めた結果を示した。切欠部、円孔の縁、溶接継手部、軸の円環部に存在する表面き裂の応力拡大係数の解析のように、応力集中があり直接解析するのが困難であるような問題に対し、著者らの提案している影響関数法を適用すると効率的に K 値を評価できることを示した。なお影響関数法を用いた結果が約1割から2割ほど高めにでているがこの原因として次のことが考えられる。

- (1) 切欠き裂部材の影響係数の代わりに対応する平滑材の影響係数を用いている。
- (2) 直接法の解析は三次元で行っているために要素数、節点数が制限されたため、応力集中の影響が十分に現れなかった。すなわち厳密解は、もう少し大きい値をとると考えられる。
- (3) あらかじめ求められている影響係数 K_0 と、仮想き裂面の応力分布を求めるときの境界条件が異なることがあげられる。

上記(3)について今少し詳しく考察する。前章(1)および(3)の例題では、対称性のゆえに回転が拘束されている。したがって、これらの例においては本来用いるべき影響係数のデータベースは、回転が拘束された状態のもとにおけるデータベースでなければならない。しかし、これまでに著者ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾が求めた影響係数のデータベースでは、き裂縁以外の周辺を自由縁として扱っており、回転が拘束されていない。したがって、このデータベースを用いて K 値を求めた場合、回転の影響が過大に評価されて K 値が大きく計算されてしまう。そこで、境界条件の相違により影響係数 K_0 データベースの値にどのくらいの差異があるか確かめるために次のような解析を行った。すなわち図4に示す平板中の半だ円表面き裂において、回転を固定した境界条件のもとで解析した。ここで、半だ円表面き裂は、

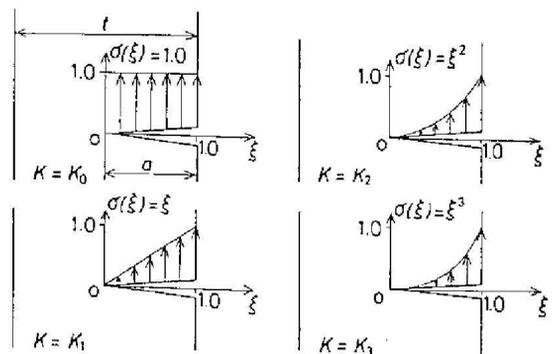


図16 き裂面上板厚方向に変化する基本モードの分布力

表1 境界条件の差異による F 値の差

	A:最深部 C:表面部	境界条件		差 (%)
		回転自由	回転固定	
一様	A	1.107	1.067	-3.6
	C	1.441	1.350	-6.3
線形	A	0.327	0.302	-7.6
	C	1.174	1.112	-5.3
二次	A	0.183	0.165	-9.8
	C	1.011	0.963	-4.7
三次	A	0.127	0.112	-11.8
	C	0.896	0.858	-4.2

差が最も顕著にでると考えられる $a/c=1.0$, $a/t=0.8$ のものを取り上げた。これは、き裂表面がき裂を含む断面の面積にしめる割合が最も大きく、最もき裂面に近い面で固定するものである。回転自由と、回転固定の境界条件で求めたデータベースを用いてき裂面上に、図16に示すき裂板厚方向に変化する一様、線形、2次、3次の応力分布を負荷したときの表面部と最深部の F 値の比較を、表1に示す。最も差異ができると考えられる $a/c=1.0$, $a/t=0.8$ において、表1に示す結果であることを考えると $0 < a/t \leq 0.8$, $0.2 \leq a/c \leq 1.0$ のすべての範囲では、近似解はたかだか1割程度高めの評価でおさえられると考えられる。したがって、 K 値はやや安全側に評価されるものの工業上十分な精度であると思われる。

5. 結 言

本報では、著者らの開発した影響関数法を用いて、すでに公表している平板中の半だ円表面き裂、4分の

1だ円コーナき裂、および丸棒中の表面き裂の影響係数データベースを利用することにより、応力集中部である切欠き、円孔の縁、溶接継手部などに存在する表面き裂の K の近似値を容易に評価することができることを示した。そして、いくつかの具体的な応用例を示すとともにその近似解は、たかだか1割程度高めで安全側の評価となり、工業上十分な精度の解が得られることを示した。

文 献

- (1) 中井・久保・大路, 機論, 50-460, A (昭59), 2017.
- (2) 村上・鶴・坂本, 材料, 35-396 (昭61) 998.
- (3) 白鳥・ほか2名, 機論, 51-467, A (昭60), 1828.
- (4) 白鳥・ほか2名, 機論, 52-474, A (昭61), 390.
- (5) 白鳥・三好, 日本材料学会第3回破壊力学シンポジウム講演論文集, (昭60-6), 78.
- (6) 白鳥・ほか3名, 第941回材料力学講演会にて講演予定.
- (7) 平田, 横浜国立大学修士論文, (昭58).
- (8) 三好・ほか3名, 有限要素法, (昭51), 109, 実数出版社.

討 論

〔質問〕 村上敬宜・鶴 秀登

〔九州大学工学部〕

- (1) 図3と図7の形状寸法はどのような場合か。
- (2) 影響関数法を適用した場合、き裂形状比 a/c , き裂深さ比 a/t , き裂幅の比 c/b などの変化によって精度はどのようになるとお考えか。切欠底のき裂形状が切欠半径に比べて小さくなってくれば、精度がよくなるか。ご教示願いたい。

〔回答〕 (1) 本文中に記してあるとおりいずれの場合も $a/c=1.0$, $a/t=0.4$ の半円表面き裂である。

- (2) まず c/b については、平板中の半だ円き裂お

よび4分の1だ円コーナき裂の場合、 $c/b=0.2$ の場合についての影響係数データベース K_U を求めている。これは幅方向には十分に広い平板を考えたもので、 c/b が1に近くなった場合には有限幅の影響を考慮した K_U を求める必要がある。

次に a/t と d/W (d :切欠深さ)の影響について調べるため、二次元問題について(すなわち、 $c/b=1.0$, $a/c=0$ の場合)上記のパラメータを系統的に変えて、平滑材の影響係数による近似(以下平滑材近似と呼ぶ)がどの程度に成り立つか考察を行った。結果の詳細は別報に譲るが、 d/W のいずれの値に対しても、切欠底

半径と同程度以下の浅いき裂に対して、平滑材近似が最大6%程度高めの値を与えるが、深いき裂に対しては正解とよく一致している。a/cの値が有限となる表面き裂についても別途解析の必要があるが、上記の二

次元解析の結果から推定して、切欠底半径と同程度以下の浅いき裂に対してたかだか6%程度の誤差を与えるものと予想される。

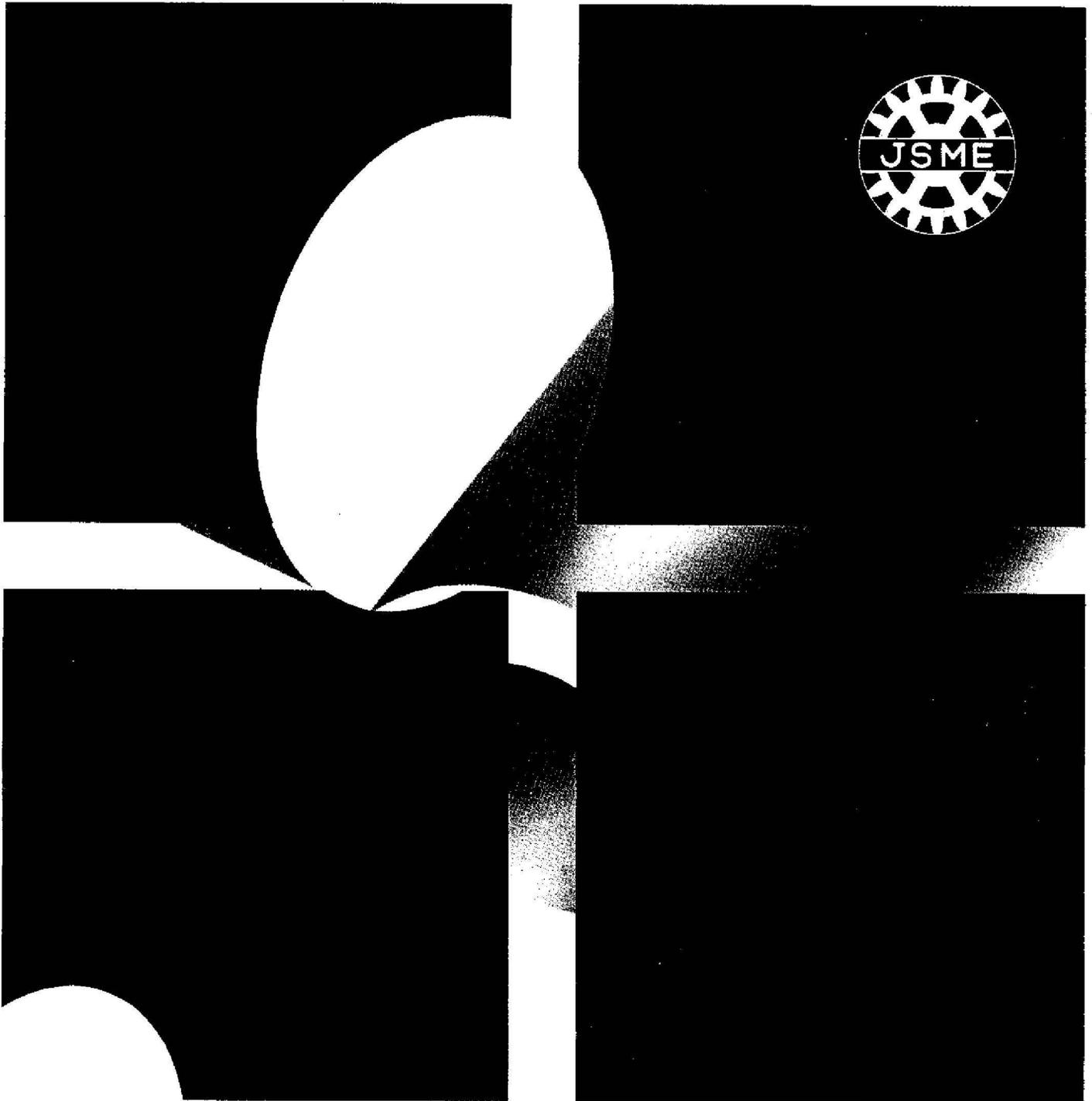
53巻490号, A編(昭62-6) 正誤表

執筆者名	ページ	欄	行	誤	正
北村隆行ほか	1065	図2(a)	表中	Mode	Median
	1068	図10	図中	Mode	Median
	1070		文献	Pearson, S.	Pearson, S.
宮崎則幸ほか	1104	右	(1) 20	殻板厚内ひずみ	殻板厚内でひずみ
	1105	左	30	$\sin \theta$	$\sin n\theta$

昭和62年8月

第492号 A編

日本機械学会論文集



**TRANSACTIONS OF
THE JAPAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS**
August, 1987

日本機械学会

