

I-119

剛性変化部に近接するき裂のJ積分解析

長岡技術科学大学工学部 正員 林 健治

大阪大学溶接工学研究所 正員 堀川 浩甫

1. はじめに

構造物中に存在する欠陥の多くは、力の流れが不均一な応力集中部に見られる。ボルト孔等の円孔や板厚不連続部などの構造的な不連続部に近接するき裂の応力解析は、従来より数多く見られ、主としてき裂先端近傍の特異応力一ひずみ場をハイブリッド変位法などに基づく有限要素解析により精度良く評価することに力点が置かれている。本研究では特異場を評価する手法に重点を置き、この観点から、剛性変化部に近接するき裂材を対象としてJ積分解析を実施した結果を報告する。

2. 円孔を有するき裂材の解析

ボルト孔に近接する欠陥を想定して、図-2に示す2個の等大円孔に挟まれるき裂材が無遠方で一様引張応力を受ける場合を考える。J積分評価法には昨年度報告した非均質材のJ積分評価法を用いた。同法に関する説明は省略する。

解析の制約から無限板を有限長の板として取り扱い、幅を320mm、長さを480mm、円孔の半径(ρ)を30mm、き裂中央から円孔の中央までの距離(d)を60mmとし、き裂半長(a)を6mmから24mmまでの4ケースについて平面応力解析を実施した。解析に用いた材料定数は、ヤング率が21000kg/mm²、ポアソン比が0.3である。解析は対称性を考慮してその1/4について要素分割し、三角形定ひずみ要素を用いた。積分経路はき裂を囲む経路1-5、き裂と円孔を囲む経路6-10と円孔のみを囲む経路11の3種類とした。

解析結果を表-1に示す。ここで、番号1-11は経路積分を実施した結果であり、き裂のみを囲む経路1-5の値は、RiceのJ積分を適用したものである（均質材のみから成る領域内に経路を取った場合には正しい結果を与える）。同表よりき裂先端近傍の経路1の値を除外した各値の平均値(J_r)は、上記の解析仮定の範囲内においてほぼ妥当な値を与える。経路6-10までのJ積分値は、経路独立性は満足するものの J_r に比較して小さい値を示す。したがって、き裂と円孔を囲む経路についてRiceのJ積分を適用することはできない。

これに対して、非均質材のJ積分評価法を適用し、それらの平均値から経路11の値を引いたもの(J_c)は、 J_r と比較して最大でも誤差が2.1%であり、また、この J_c を用いて等価エネルギー法により応力拡大係数 K を求め、これを石田の解析解 K_{ex} と比較しても11%未満の誤差しかなく、その妥当性は明らかである。き裂が円孔に接近すると、 J_c の精度が悪化しているが、これは無限板を有限板に近似している影響をより強く受けるためであり、この場合、板の長さや幅を大きくして解析することにより解析精度の向上が期待できる。同時に、J積分を用いてボルト孔等に近接するき裂材の K 値を比較的粗いメッシュで精度良く評価することも期待できる。

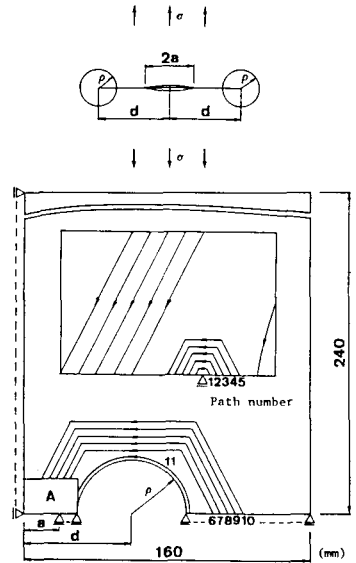


図-1

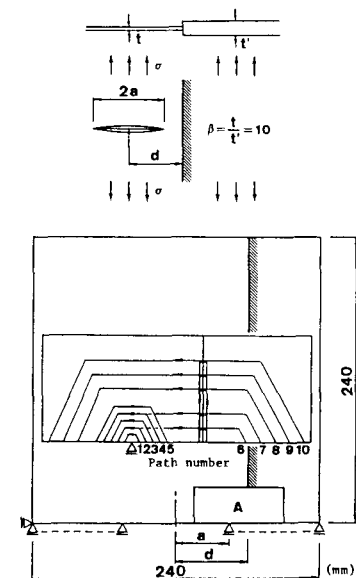


図-2

3. 板厚変化部に

近接するき裂材の解析

次に、二つの異なる板材の接合部に近接するき裂の問題を解析する。図-2に示す様に板の長さを480mm, 幅を240mm, き裂の中心から境界までの距離(d)を60mmとし、き裂半長(a)を24mmから54mmまでの6ケースについて平面応力解析を実施した。ここで、二つの板の板厚比(β)は10である。解析は対称性により1/2を要素分割し、き裂のみを囲む径路1-5とき裂を囲み、接合部境界の寄与を取り除いた径路6-10の二通りについて行った。材料定数は円孔の場合と同様とした。

表-2にその解析結果を示す。

RiceのJ積分を適用した径路1-5の値および非均質材のJ積分を適用した径路6-10の値は、共にばらつきが少なく径路独立性を満足し、それぞれの平均値 J_r と J_c は非常に良く一致している。また、石田の解析解と比較して、誤差が10%以内であり、この種のき裂の問題にJ積分評価法を適用することは実用上妥当であり、応力拡大係数のより簡便な評価法として確立することが期待される。なお、円孔の場合と同様に、 a/d が大きい、境界により近接する場合には要素分割を細かくする必要がある。

4. あとがき

剛性変化部の例に円孔や接合境界を有する板材を取り上げ、弾性特異応力一ひずみ場を規定する破壊パラメータ、応力拡大係数K、を簡便に評価する手法を確立する基礎としてそれらに近接するき裂のJ積分解析を実施した結果、その有効性が明らかとなった。本報では、き裂面に対称な問題を取り上げたが、今後、非対称な問題について検討し、き裂の進展方向等の評価も併せて実施したい。

表-1 円孔に近接するき裂材の解析結果

a/d	J contour value (Path number) kg/mm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0.1	0.55	0.49	0.48	0.47	0.47	0.36	0.37	0.37	0.37	0.36	-0.10
0.2	1.27	1.13	1.09	1.09	1.08	0.80	0.80	0.80	0.80	0.79	-0.28
0.3	2.38	2.12	2.06	2.04	2.03	1.28	1.27	1.28	1.28	1.28	-0.74
0.4	4.97	4.43	4.31	4.27	4.26	1.94	1.94	1.94	1.94	1.93	-2.31
a/d	J_r kg/mm	J_c kg/mm	$(J_c - J_r)/J_r$ %		$K = \sqrt{E J_c}$ kg·mm ^{-3/2}	K_{ex} kg·mm ^{-3/2}		$(K - K_{ex})/K_{ex}$ %			
0.1	0.48	0.47	-2.1		98.9	95.4		3.7			
0.2	1.10	1.08	-1.8		150.4	141.0		6.7			
0.3	2.06	2.02	-1.9		205.9	191.0		7.8			
0.4	4.32	4.25	-1.5		298.7	271.4		10.1			

Remark ; 1) a : Half crack length , d : Distance from crack center to hole center , E : Young's modulus , K_{ex} : Analytical solution by M. Isida

2) J_r and J_c indicate the averaged value of J for path 2-5 excluding path 1 closest to the crack tip and the averaged value of J for path 6-10 subtracted by J-value for path 11, respectively.

表-2 接合境界に近接するき裂材の解析結果

a/d	J contour value (Path number) kg/mm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.4	0.390	0.347	0.337	0.339	0.333	0.344	0.333	0.329	0.334	0.328
0.5	0.479	0.426	0.414	0.416	0.408	0.422	0.410	0.401	0.412	0.401
0.6	0.555	0.493	0.478	0.473	0.472	0.489	0.474	0.467	0.470	0.470
0.7	0.603	0.536	0.520	0.515	0.512	0.532	0.515	0.507	0.512	0.516
0.8	0.527	0.522	0.522	0.527	0.522	0.521	0.513	0.521	0.519	0.517
0.9	0.429	0.444	0.451	0.454	0.420	0.440	0.449	0.454	0.461	0.462
a/d	Jr kg/mm	Jc kg/mm	(Jc-Jr)/Jr %		$K = \sqrt{E J_c}$ kg·mm ^{-3/2}	K_{ex} kg·mm ^{-3/2}		(K-K _{ex})/K _{ex} %		
0.4	0.339	0.334	-1.5		83.7	83.4		0.4		
0.5	0.416	0.409	-1.7		92.7	91.3		1.5		
0.6	0.479	0.474	-1.0		99.8	96.5		3.4		
0.7	0.521	0.516	-1.0		104.1	98.9		5.3		
0.8	0.523	0.518	-1.0		104.3	98.4		6.0		
0.9	0.442	0.453	2.5		97.6	89.8		8.7		

Remark ; 1) a : Half crack length , d : Distance from crack center to phase boundary , E : Young's modulus , K_{ex} : Analytical solution by M. Isida

2) J_r and J_c indicate the averaged value of J for path 2-5 excluding path 1 closest to the crack tip and the averaged value of J for path 6-10, respectively.