

四国電力(株) 正員 ○浅野 彰 洋
徳島大学工学部 正員 藤井 清 司
徳島大学大学院 学生員 後藤 喜 陸

よえがき さ裂を有する岩質材料に破壊力学を適用する場合には材料特性値の決定が必要となるが、一般にさ裂先端近傍は混合モード状態となり、その場合の破壊じん性値を決定する必要があり、今回は、本研究での使用材料の混合モード破壊じん性値を求める。そして、その値を有限要素法を用いたさ裂進展解析法へ導入し、材料特性値としての性質を確認し、さらに、分岐さ裂をもとりあつかえるよう解析法の拡張を行ったので報告する。

混合モード破壊じん性値 単一モード、すなわちモードⅠ、モードⅡに対する破壊じん性値 K_{Ic} , K_{IIc} に関しては、およそ $K_{Ic}=60.0 \text{ kgf/cm}^{3/2}$, $K_{IIc}=200.0 \text{ kgf/cm}^{3/2}$ という値を得ていることはすでに報告を済ませているが、今回は、中央に切欠きを有する円板試験体を用い、荷重軸と切欠きとのなす角 β を $0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 28^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ に変化させ種々の混合モード状態での圧裂試験を行い、混合モード破壊じん性値を求める。なお、試験体、試験方法および試験結果からの K 値算出法の詳細については前回の報告⁽²⁾にゆずる。図1は縦軸に K_I , 横軸に K_{II} をとり試験結果をプロットしたもので原点からの距離は試験体破壊時の切欠き先端部での K_I と K_{II} 値の関係を示している。これらの得られた試験結果をむすべば混合モード状態下の破壊じん性値に相当する曲線が得られると考えられ本報告では図に示すように曲線を円で近似し次式で表わす。

$$(K_I + 27.0)^2 + K_{II}^2 = 77.0^2 \quad (1)$$

なお、この混合モード破壊じん性値は、さ裂進展に関する混合モード破壊規準と同意であり、既存さ裂先端での K_I , K_{II} 値の関係がこの円の内側であればさ裂の進展は生じず、この円に接した時点ではさ裂の進展が始まることを示すものである。

さ裂進展解析法の分岐さ裂問題への拡張 一般に切欠き先端部から発生・進展するさ裂の挙動は分岐・屈折を含み複雑で、さ裂材の強度評価の精度を向上させるためにはそれらの分岐・屈折さ裂の挙動をとらえることが必要となる。そこで今回は、分岐さ裂をとらえることを目的として解析法の拡張を行う。解析上、分岐さ裂をとらえよう場合には次の2点が問題となる。1つは分岐さ裂の発生条件であり、もう1つは分岐後の各さ裂先端での K 値計算の精度の問題である。前者の分岐さ裂の発生条件としては、さ裂が進展してゆく場合、そのさ裂経路の代表的隅角部にGriffithの破壊規準を適用し、分岐さ裂の発生をとらえる。また、後者の、分岐後の各さ裂先端での K 値計算の精度については厳密解のわかっている分岐さ裂モデルを本解析法によ、て K 値を求めることにより確かめる。ここで用いたモデルは図2に示す十字形切欠きモデルと両端分岐切欠きモデルで、これらに対する厳密解は北川らにより等角写像法を用いてすでに求められており、それを準用する。十字形切欠きモデルに対する K 値計算結果は、本解析法では $K_I=41.57 \text{ kgf/cm}^{3/2}$, また厳密解では $K_I=41.51 \text{ kgf/cm}^{3/2}$ と十分な精度で

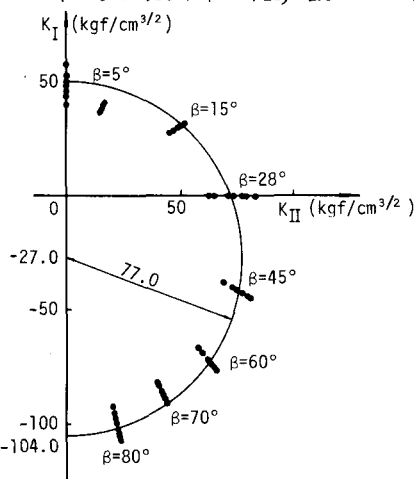
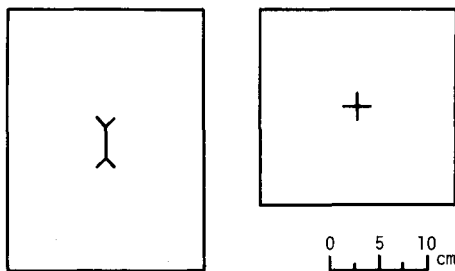


図1 円板の圧裂試験による
混合モード破壊じん性値



両端分岐切欠きモデル 十字形切欠きモデル
図2 分岐さ裂モデル

あることが確認された。しかし、両端分岐切欠きモデルに対しては、本解析法では、 $K_I = -35.14 \text{ kgf/cm}^{3/2}$, $K_{II} = 43.64 \text{ kgf/cm}^{3/2}$, 厳密解では $K_I = -49.38 \text{ kgf/cm}^{3/2}$, $K_{II} = 49.38 \text{ kgf/cm}^{3/2}$ とやや精度が低下することが示された。これは両端分岐切欠きが、分岐形状でしかも屈折しているためと考えられ、今後、分岐屈折き裂の K 値計算には新しい理論の導入による精度の改良が望まれる。

き裂進展解析 解析手法の概要は、き裂進展開始条件としては(1)式を用い、解析から計算される K_I , K_{II} 値の関係が(1)式で表わされる円上にあるときにき裂が発生するものとし、き裂進展方向角の決定には数種の計算法による結果からき裂先端部での最大引張主応力から決定するものを採用した。また、き裂進展量はき裂進展に伴うエネルギー解放率とエネルギー吸収率の平衡を考慮して定量的に決定するもので、次段階でき裂進展開始条件を満足するまでき裂は停留するものとしている。なお、分岐き裂の発生条件に関してはGriffithの破壊規準を用い、発生後は上記の手法を用いる。また、各き裂先端部の K 値計算には有限要素法に適した村上の簡便決定法を用い、き裂先端要素を特異要素として精度の向上を計っている。解析モデルは、前回報告を行なった平行する2つの切欠き(長さ3cm, $\beta = 45^\circ$)を有する縦26cm, 横20cm, 板厚4cmの長方形板をモデル化したもので、2つの切欠きが荷重軸方向に離れて存在する場合のその切欠き中心間隔 D_0 が4cm, 5cm, 6cmのものを用いる。図3は解析より得られたき裂進展経路を $D_0 = 5\text{cm}$ の場合を例として示したもので、比較のためにき裂進展実験により得られた結果とならべてある。ただし、実験結果は数回の実験により得られたものを重ねて示してある。図3から、き裂進展経路に関しては、解析結果は実験における初期き裂および分岐き裂の発生・進展を比較的良く再現していることがわかる。また、初期き裂発生荷重値に関しては、実験では2.75tfであるが、解析では1.48tfとかなり小さい値を得た。これは、実験による初期き裂発生荷重値の決定は、切欠き先端より3mmの位置に接着してある抵抗線ひずみゲージ(巾3mm)より得られる荷重-ひずみ曲線から行っており、切欠き先端から約3mmの位置を通過するき裂をとらえるものと考えられる。一方、解析での初期き裂発生荷重値は、進展量が0.3mmである極く微小なき裂の発生に対する値で、図3中、Stage 1からStage 4までの荷重値は、それぞれ4つの切欠き先端からのこの0.3mmの進展量を持つ微小き裂に対する荷重値である。このことより、これらの値に違いが生じたものと考えられるが、次のStage 5のき裂は進展量が4.6mmであり、切欠き先端から4.9mmの位置まで進展することになる。したがって、このき裂進展が実験時においてとらえる初期き裂に対応するものであり、この段階での荷重値は、2.75tfという値を得ており、実験結果と良く一致している。また、き裂の成長は荷重増分を伴っており、安定破壊を呈することを示しているが、これも実験時にみられる状況と一致している。以上のことから、分岐き裂問題に対して拡張された本解析法は実験を全般的に良く再現しており、この問題に対しても充分適用していることがわかる。屈折き裂および分岐き裂については、き裂を単位円に写像することにより、正確な K 値を求めることが可能であるが、その場合、等角写像関数を決定する作業はかなり困難であって、切欠きの形状が対称性のある場合や単純な場合をのぞけば一般的に使用できない。そこで、本解析法が分岐問題に拡張が可能であることから、本法は複雑な形状の欠陥からの破壊現象をとらえる場合の比較的簡単で有効な一手法となりうると考えられる。また、円板試験体を用いて決定した混合モード破壊じん性値が円板形状のみでなく他の任意の形状に対しても用いることができることを示している。

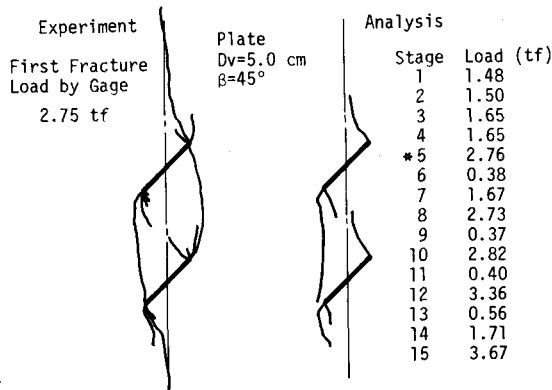


図3 長方形板のき裂進展状況

- 参考文献** (1)北川英夫, 結城良治; 二次元応力状態における分岐き裂の応力拡大係数, 機論, No. 740-11
(2)藤井ら; 破壊力学によるぜい性材料のき裂進展解析(その4), 第36回年次学術講演要集3, 1981