

岡山大学大学院 学生員

○森脇 清明

岡山大学工学部 正会員

谷口 健男

岡山大学大学院 学生員

真田 健司

1. まえがき 近年、土木構造物における、き裂を有する部材の強度を扱う必要性が増してきたため、き裂の成長を定量的に扱う研究がなされてきている。しかし、応力にかわる力学的パラメータである応力拡大係数(K)を精度良く求める研究が多い一方、き裂の成長の核とも言うべき、き裂の進展方向、進展量に関する研究は少ない。そこで、本研究では有限要素法を用いて、き裂伝播過程をシミュレーションし、本研究室で実施したアクリル板による試験結果と比較検討することで、き裂伝播解析法を提案する。さて、き裂の進展方向を決定するためにはK1(開口型)、K2(面内せん断型)との比を求めなければならない。このK値を求める方法として、応力法、J積分法、変位法などが挙げられるが、ここでは精度良くK1、K2を求めることが可能である Ingraffeaによる変位法を用いた。次に、K1、K2の比を用いて決定する、き裂の進展方向には、1) き裂先端の周方向直応力最大方向(以下 $\sigma_{\theta \max}$ 方向)、2) ひずみエネルギー密度最小方向(以下 $S(\theta)_{\min}$ 方向)、3) K2=0の方向、4) 弾性エネルギー解放率最大方向 が考えられる。この中で、3)、4)は、き裂を仮想的に進展させて解析するため、演算時間を多く要する。よって、き裂進展前の応力場あるいはエネルギー場より方向決定をする、1)、2)を用いて、本研究では主に、き裂進展方向について解析を行った。

2. アクリル板による試験 Test1: くさび貫入による破壊試験。図1のようにアクリル板に0.5cmスリットを入れ、くさびを押し込み、き裂を進展させる。スリットを入れる地点は端面より3cm, 4cm, 5cmの3通りとした(図1のa)。どの場合においても、き裂は瞬間に0.5cm~1.0cm進展し、あとは徐々に進んでいった。後の数値シミュレーションの際に強制変位量が必要であるが、直接測定が困難であったため、くさび形状よりくさびの貫入量の

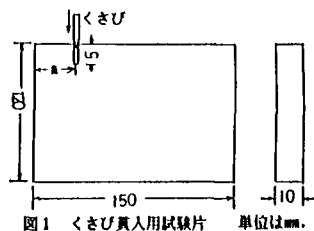


図1 くさび貫入用試験片 単位はmm.

表1 くさび貫入による試験結果

2/5を強制変位量とした。なお、底面は設置台に固定しており、くさびにはグリスを塗布している。試験結果を表1に示す。 Test2: 傾斜き裂入り試験片の圧縮試験。 図2のよう

(7) a= 3cm		(4) a= 4cm		(9) a= 5cm	
き裂進展長	くさび貫入量	き裂進展長	くさび貫入量	き裂進展長	くさび貫入量
0.0	0.096	0.0	0.100	0.0	0.096
1.0	0.104	1.0	0.107	1.0	0.109
2.0	0.108	2.0	0.113	2.0	0.122
3.0	0.125	3.0	0.120	3.0	0.134
		4.0	0.126	4.0	0.142

単位はcm. 室温12℃.

にアクリル板に斜めスリットを入れ、圧縮荷重を載荷することで、き裂を進展させる。試験の際には上・下面にゴムシートを敷き、グリスを塗布した。き裂が約3cm進展したとき、面外方向へのふくらみが観察された。試験結果を表2に示す。アクリル板を使用した主な理由は、(1)材質が均質である、(2)加工しやすい、(3)き裂面を観察できる、の3つである。また、材料定数はヤング率33000.0(kg/cm²)、ポアソン比0.4である。

表2 傾斜き裂の試験結果

き裂進展長	圧縮荷重
cm	kg/cm ²
0.0	186.7
1.0	220.0
2.0	320.0
3.0	420.0

室温9℃.

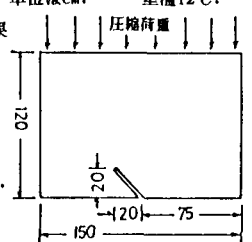


図2 傾斜き裂入り試験片 単位はmm. 厚さは図1と同.

3. 数値シミュレーション き裂先端での現象を有限要素法で十分に表すために、本研究では Barsoumによって提案された6節点三辺形アイソパラメトリック特異要素を用いることにした(図3参照)。さらに、き裂先端のメッシュ分割は図4で統一した。 Test1: くさび貫入による破壊試験。強制変位量は前

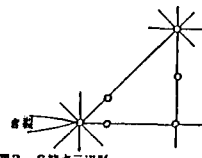


図3 6節点三辺形アイソパラメトリック特異要素

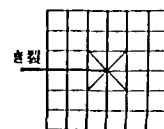


図4 き裂先端のメッシュ分割

述したとおり、換算値を採用し、き裂の伝播過程を進展距離 1.0cm毎に分け、それぞれの地点で解析を行った。なお、き裂伝播解析手順として図5のように行った。境界条件として、底面は鉛直、水平両方向とも全拘束とし、平面応力状態で解析した。試験結果と解析結果の比較を図6に示し、各点でのK値、進展角を表3に示す。図6からわかるように試験結果と解析結果は、おおむねその形は相似しているものの、き裂が進展するにしたがいずれを生じている。この原因として次のようなことが考えられる。

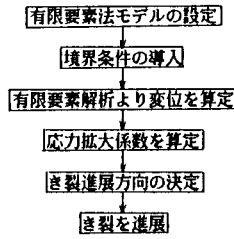


図5 き裂伝播解析手順

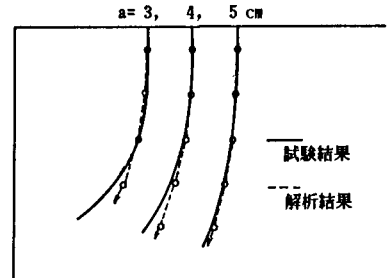


図6 試験結果と解析結果の比較（くさび貫入）

（ア）解析に用いた強制変位量が直接測定によるものではない。

（イ）くさびを垂直に貫入させることができず、傾きが生じ、モーメントが発生している可能性がある。（ウ）試験片に設けたスリットは最初に存在するき裂を想定しているが、約 0.1cm程度の幅を有し、また先端も鋭い切り欠きとはいえず、き裂と同じものとは考えにくいものとなっている。しかしながら、き裂が瞬間に進展する範囲では試験結果とよく対応しており、き裂進展方向を予測する各方法は、この試験において妥当であると考えられる。

表3 各点での進展角、K値（くさび貫入）

(7) a = 3cm				(8) a = 4cm				(9) a = 5cm			
き裂進展長 cm	θ_0 deg	K 1 kg/cm ^{3/2}		き裂進展長 cm	θ_0 deg	K 1 kg/cm ^{3/2}		き裂進展長 cm	θ_0 deg	K 1 kg/cm ^{3/2}	
0.0	-2.4	139.8270		0.0	-1.8	133.2200		0.0	-1.4	124.3222	
1.0	-6.7	122.2077		1.0	-4.0	110.7446		1.0	-2.8	103.6860	
2.0	-7.3	118.5691		2.0	-6.3	113.6598		2.0	-5.3	112.7149	
3.0	-3.9	118.8030		3.0	-4.4	114.0607		3.0	-4.4	121.9359	
				4.0	-2.7	106.3984		4.0	-3.6	122.5146	

α_{max} 方向と $S(\theta)_{min}$ 方向との差は認められなかった。

Test2:傾斜き裂入り試験片の圧縮試験。境界条件として、底面をy方向拘束のみとし、上面から分布荷重を载荷した。また、き裂の進展距離は曲率の大きい初期段階では 0.5cm毎に分け、直線に近くなる段階では 1.0cm毎に分け、それぞれの地点で解析を行った。その結果の比較を図7に示す。これからわかるように、試験結果と大きくずれたものとなっている。ここで考えられることは、試験を行う際に底面に敷いたゴムシートの影響があるということである。そこで底面にゴムシート部の要素を付加して解析を行った。なお、ゴムシート部のヤング率は 3000.0 (kg/cm²)、ポアソン比 0.5とした。その結果を図8に示し各点でのK値、進展角を表4に示す。図8からわかるように、試験結果と解析結果はよく一致している。しかし、き裂の進展が大きく進むとずれを生ずる。この原因として、試験中に観察された面外方向へのふくらみが影響しているものと考えられる。すなわち、本研究では面内問題のみを考慮しており、対応できていないと思われる。また、最初の段階で K 1 < 0 が解析結果として現れたが、き裂の進展方向の予測に適応できないと思われるため、進展角は試験結果を採用した。以上より、この試験においてもき裂進展方向を予測する各方法は妥当であるといえる。



図7 試験結果と解析結果の比較1（傾斜き裂）



図8 試験結果と解析結果の比較2（傾斜き裂）

表4 各点での進展角、K値（傾斜き裂）

き裂進展長 cm	α_{max} (S(θ)) _{min} deg (deg)	K 1 kg/cm ^{3/2}	K 2 kg/cm ^{3/2}
0.0	-86.0† (←)	-219.4553†	262.8089†
0.5	9.8 (9.7)	145.1577	-12.6713
1.0	14.4 (14.1)	108.4324	-14.1842
1.5	10.7 (10.6)	108.9913	-10.3851
2.0	-9.9 (-9.8)	120.3680	10.6015
3.0	52.7 (50.8)	111.6894	-108.4369

†:本文参照

試験中に観察された面外方向へのふくらみが影響しているものと考えられる。すなわち、本研究では面内問題のみを考慮しており、対応できていないと思われる。また、最初の段階で K 1 < 0 が解析結果として現れたが、き裂の進展方向の予測に適応できないと思われるため、進展角は試験結果を採用した。以上より、この試験においてもき裂進展方向を予測する各方法は妥当であるといえる。

4. あとがき き裂の伝播解析を行うには、応力拡大係数を求める必要がある。そこで、K 1、K 2 が一意的かつ精度良く求まる Ingraffea による変位法を用いた。また、き裂の進展方向を予測する、『き裂先端の周方向直応力最大方向』および『ひずみエネルギー密度最小方向』が妥当であることを確認した。

＜参考文献＞ A.R.Ingraffea "Numerical modeling of fracture propagation" Rock Fracture Mechanics (ed. H.P.Rossmait), Springer-Verlag P.151-208