

[65] コンクリート部材のひびわれ伝播と K_I 値

正会員 大津政康 (熊本大学工学部)

1. はじめに

コンクリート部材のひびわれは、構造上の重大な問題であり、耐久性、使用性に大きな影響を与える。これについては、色々な方面から検討されているが、構造用材料におけるひびわれの発生、伝播の機構は、材料の破壊靱性 (Fracture Toughness) と大きく関連していると考えられる。ひびわれ先端の応力場の特異性に基ずいた線形破壊力学 (L E F M) から破壊靱性パラメータとして導入された開口モードに対する応力拡大係数 K_I は、材料の異方性、非線形性、寸法効果などの影響について多くの研究者により検討がなされ、L E F M のコンクリート材料への適用に関する幾つかの問題点が指摘されている¹。

本報告では、この応力拡大係数 K_I をコンクリート部材におけるマクロな不安定ひびわれ伝播を支配するパラメータとして位置づけ、ノッチ付きはりの破壊試験と A E 計測、および境界要素法による解析を行って、ひびわれ伝播機構の解明に適用することを試みたものである。

2. 実験概要および解析手法

実験には、普通コンクリート (Plain)、鋼繊維補強コンクリート (S F R)、軽量コンクリート (L W) の 3 種類の配合のコンクリートを使用した。それぞれの配合と物性値は、表-1 に示す。粗骨材の最大寸法は 20 mm であり、L W 供試体には粗骨材のみ人工軽量骨材を用いた。鋼繊維としては、セン断ファイバー (0.5 x 0.5 x 30 mm) を体積混入率 1% で使用した。また、S F R および L W 供試体には、A E 剤をセメント重量の 0.04% 混和させた。供試体形状としては、中央にノッチを有する大 (Large, 15 x 15 x 55 cm)、小 (Small, 7.5 x 10 x 40 cm) の 2 種類の角柱供試体を作製した。ノッチは、頂角 30° 厚さ 3mm 長さ 3cm および 6cm の鋼板を打設時に供試体中央部に挿入することにより人工的に設けた。

実験方法および装置の概要を図-1 a) に示す。供試体は 28 日間恒温室にて水中養生を行った後に、図に示すような三等分载荷の曲げ試験を行った。試験中のノッチ開口変位とロードセルの値は A/D 変換を行って、A E 頻度は GP-IB を用い、それぞれマイクロコンピュータに収録した。大供試体では、スパン長 $S = 45$ cm、小供試体では $S = 30$ cm としたため、いずれの場合もスパン長はり高さ比 S/W は 3 となった。

$S/W = 3$ のノッチ付きはりに対する応力拡大係数 K_I は 2 次元弾性論によりすでに解析的に求められている²。従来の研究では、これら理論式に終局荷重を代入することにより限界応力拡大係数 K_{Ic} が決定されている。しかしながら、これらの式はクラックに対するものであ

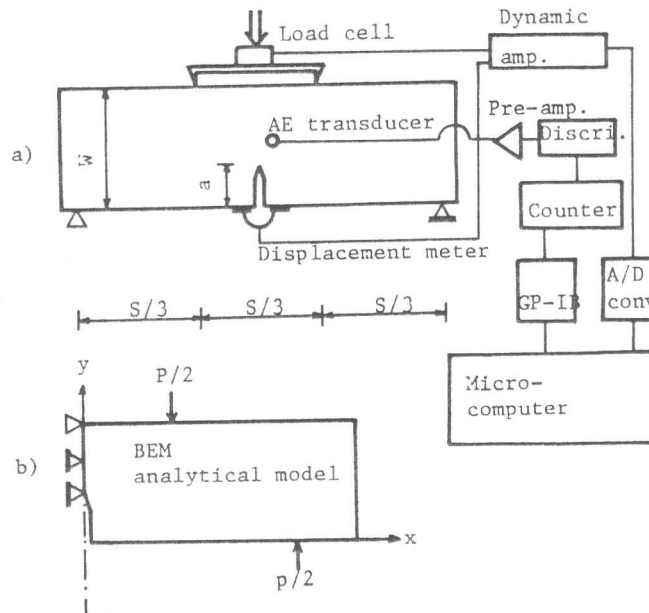


図-1 a) 実験装置および b) 解析モデル

表-1 供試体に用いた材料の配合と物性値

Specimen	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	Slump (cm)	Air (%)	σ_c (kg/cm ²)	σ_t (kg/cm ²)	$\times 10^5 E$ (kg/cm ²)
Plain	201	347	810	1083	18.5	1.8	336	26.3	3.1
Steel fiber reinforced	181	347	742	1072	5.5	2.2	391	32.7	3.2
Light weight	181	347	753	464	17.0	3.8	312	18.5	2.0

り、コンクリート部材の破壊靱性評価の際に問題となるであろうノッチ形状、供試体寸法などの影響は考慮されていない。そこで、実験を行った各供試体の応力拡大係数を境界要素法(BEM)³を用いた数値解析により検討することにした。図-1b)には、その解析モデルを示している。解析では、モデルの対称性より図のように右半分のみを対象とした。ここで、数値解析法としてBEMを採用した理由は、FEMのように大容量の計算、領域の細分割を必要とせず、分割数に支配されずに、応力拡大係数を精度良く決定しうることが知られているからである。

BEMとしては、モデルが混合境界値問題であることより、直接法の定式化を採用し、 K_I は内部応力から外挿法によって求めることにした。

さらに、最大耐力点以後におけるひびわれの伝播挙動をも検討するためにシミュレーション解析を行い、これに対応して、万能試験機の引張載荷部にPC鋼棒を装着することによって $a/W = 3$ の供試体の剛性試験を行った。実験では、内部のひびわれ進展を見るために、任意の開口変位値まで載荷した後、直ちに除荷しノッチ上部を染色し、破断することによって染色域からひびわれ深さの決定も行った。

3. 結果および考察

3.1 BEMによる K_I の解析

解析では図-1b)のモデルの境界を60程度に分割し、各境界積分はガウスの4分点法の数値積分で評価した。境界条件は図に示すとおりであり、この条件を用いて積分方程式を解き境界上の変位、作用力を決定した。直接法に基づいた定式化では境界上の応力を決定することは、困難である。そのため応力拡大係数の決定には、幾つかの方法が提案されているが⁴、ここでは、決定された境界上の変位、作用力より内部の応力を求め、 K_I の定義にしたがって内点を境界に近づけて境界上に外挿する方法を採用した。内部応力を求める点は、ノッチ先端からX軸に平行に10点程度とった。

ただし、直接法の解析では境界に近づくと応力の精度が極端に悪くなることが知られているため、ノッチ先端に最も近い点で1mmとした。

本手法の精度を検討するために、ノッチ形状を幅が0の完全なスリットとし、解析解と比較することを試みた。結果の一例を図-2に示す。これは普通コンクリートの小供試体で3cmのスリットを持つモデル ($a/W = 0.3$)に、単位厚さあたり1kgの荷重が作用した場合に白丸で示された内部応力から決定された K_I を図のように外挿することによって、スリット先端での K_I を求めた結果を示したものである。外挿には、一般に用いられている線形近似⁴(一点鎖線)の外に応力拡大係数の定義に基づいた無理級数展開の3項までとった近似(破線)の2種類を用いた。図より後者の外挿法によれば、妥当な精度で K_I が求められることがわかる。この結果から、実験を行ったノッチ付き供試体の K_I をこの外挿法によって決定することにした。ここで、近似級数の係数決定には最小二乗法を用いた。

3.2 ノッチ形状、供試体寸法の影響

2次元弾性理論による解析解では、一般に応力拡大係数は荷重項と境界条件を含む形状関数とに分離して示され、解の検討は形状関数について行われている。しかし、ここでは実験供試体での値を検討し易くするために、図-2の結果と同様に単位厚さあたり1kgの載荷時における K_I を各供試体に対して求めることにした。SFR供試体において求めたBEMによる結果(Notch model)をスリットの場合(同じくBEMによる)と比較して表-2に示す。 $a/W = 0.3$ の場合のスリットモデルの K_I が図-2での結果と少々異なるが、これはポアソン比の影響である。BEMは、FEMと同じく変位に基づいた定式化を用いているため、ポアソン比により、応力値は多少変動することになる。表の結果からもスリットモデルでは、解析解²に対

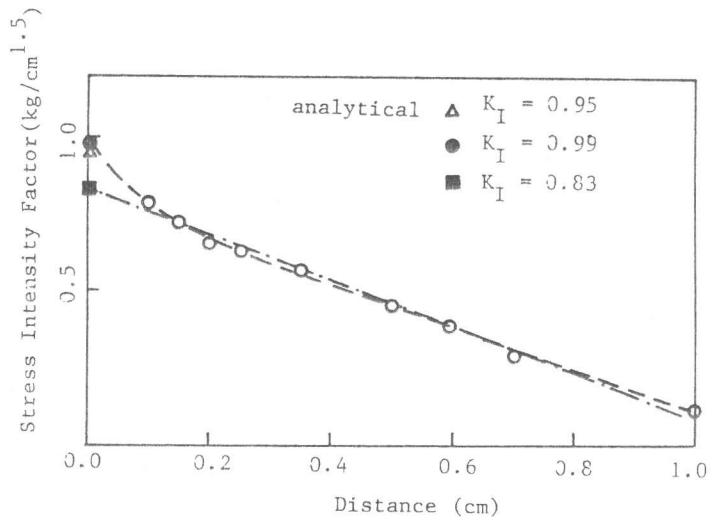


図-2 スリットモデルにおける K_I の分布
(普通コンクリート供試体)

して妥当な精度で K_I の値が求められていることがわかる。ノッチモデル(実験供試体)とスリットでの比較より、ノッチモデルに対する K_I はスリットモデルの場合に比べ全体に大きな値となっている。実験に用いた供試体でのノッチ先端の状態は、解析条件のような鋭角的であるとは考えられないため、この値をすぐに実験結果に適用することは、問題があると思われる。

表-2 SFR供試体に対する K_I 値 ($\text{kg}/\text{cm}^{1.5}$)

Specimen	a/W	Analytical	Slit model	Notch model
Small	0.3	0.95	0.93	1.71
	0.6	2.30	2.20	2.12
Large	0.2	0.59	0.54	2.44
	0.4	1.02	0.97	3.14

しかしながら、小、大供試体それぞれで a/W が0.3から0.6へ、0.2から0.4へ変化すると、解析解あるいはスリットモデルでは単位荷重に対する K_I の値が2倍程度に大きくなるのに対し、ノッチモデルでは5割程度しか K_I が増加しないのは、注目すべき結果と思われる。

3.3 限界応力拡大係数

表-3 供試体の限界応力拡大係数値 K_{Ic} ($\text{kg}/\text{cm}^{1.5}$)

Specimen	a/W	Plain	SFR	LW
Small	0.3	91.3(82.1)	112.1(94.7)	95.2(37.9)
		123.3(82.1)	131.1(101.0)	96.0(37.9)
Small	0.6	135.4(122.6)	138.5(91.9)	106.6(76.6)
		155.0(107.2)	145.8(91.9)	134.2(91.9)
Large	0.2	71.1(63.2)	112.9(75.0)	59.6(51.3)
		86.9(82.9)	80.5(75.0)	55.8(51.3)
Large	0.4	79.6(67.7)	84.6(74.5)	63.6(44.4)
		78.2(67.7)	90.7(67.7)	65.7(47.4)

それぞれの供試体、各2本の実験より解析解²を用いて得られた限界応力拡大係数を表-3に示す。载荷試験中AE頻度は、ほぼ終局に近づくまでほとんど観測されず、破断直前に急激に発生した。LEFMをコンクリート材料に適用するさいの問題点の1つは、その全体破壊に対するき裂の鈍感性である。ここでは、ひびわれの発生、伝播機構の解明に K_{Ic} を適用することを目的としているため、AEの頻発時における荷重値より求めた応力拡大係数の値も求めることにした。その結果は表の()の中に示している。供試体本数が少ないためもあるが、 K_{Ic} の値は同じ配合においてもかなり変動している。実験に用いた供試体は、大供試体でも限界はり高さ¹以下であり、表-1の引張強度を参照すれば分かるようにbrittleness number¹ $S = K_{Ic}/(\sigma_c W^{0.5})$ もかなり大きな値となっている。しかし、AEより求めた値で考えれば、 S は小さくなる。また、同配合の供試体での変動の中も小さくなるようである。これは、 K_{Ic} をコンクリート材料の全体破壊に対する破壊靱性値としてではなく、AE頻発荷重で評価することによって、ひびわれ発生の条件として扱う可能性を示すものと考えられる。

小供試体の結果では、特に、 a/W の変化による K_{Ic} の変化が大きいが、これは表-2での結果より、ノッチ形状の影響も含まれているのではないかと考えられる。 a/W が小さい場合には、ひびわれの安定成長域の存在によって K_{Ic} が小さくなると言われているが、ノッチの形状を考慮すればこの効果も小さくなると考えられる。したがって、実際の実験に対応したモデルの解析を行ってノッチ形状および供試体寸法を考慮すれば、 K_{Ic} を材料定数とした場合の問題はある程度除かれるものと思われる。

3.4 ひびわれ伝播挙動

ひびわれ伝播の挙動を、 K_I により検討することを目的とし、ノッチ先端での K_I 値をひびわれの進展基準としたシミュレーション解析をBEMを用いて行った。解析は、モデルは弾性体と仮定し第1ステップで求められたノッチ先端の K_I 値を限界値とし、次のステップではノッチ先端のX軸方向の拘束条件を解除し(ノッチ先端にスリット状のひびわれを形成させることに対応する)、新たにスリット先端での K_I 値を求め限界値に達するまで荷重を増加あるいは減少させ、さらにその次のステップに進むという方法によって行った。

図-3 a)にSFR供試体での結果を示す。これは、シミュレーション解析の結果得られた荷重-開口変位曲線を示したものであり、縦軸はひびわれ発生時の荷重に対するその後の荷重比を横軸はひびわれ発生時の開口変位に対するその後の開口変位の比を示している。図-3 b)はSFR供試体における剛性試験での実験を示したものである。両図は、縦軸、横軸のスケールは異なるが、図-3 b)の荷重-開口変位曲線の概略は図-3 a)により表現されているようである。これは、 K_{Ic} をひびわれ伝播の基準として用いること

の妥当性を示すものと考えられる。

図-3 b) に示されているように、剛性試験では、AE 頻度は荷重-開口変位曲線が線形を外れるあたりから漸増的に多くなり、その後は定常的に発生し続け最大耐力点、終局破壊にいたることが認められた。AE 頻度は個々の微小ひびわれと対応することより、荷重曲線の線形領域以後は連続的にひびわれが進展していることがわかる。荷重-開口変位曲線上に破線で示し数字を表示しているのは染色した供試体から求めたひびわれ深さである。この結果によれば、ひびわれの進展は、最大荷重点ですでにかなり進んでいる。

4. 結論

1) BEMによる応力拡大係数 K_I の決定法として、内部応力から外挿法によって求める手法を考案した。そして、外挿では無理級数展開の3項までとれば、 K_I を精度良く決定できることが認められた。

2) ノッチ形状と供試体寸法の K_I への影響を検討するために、実験供試体にたいする K_I を求め

た。その結果、き裂形状によって K_I が異なる値をとることが示され、さらに、 a/W の増加による K_I の増加は解析解のスリットの場合ほどは大きくないことが認められた。

3) 従来の方法で実験により決定された各供試体の限界応力拡大係数 K_{Ic} の値は、かなり変動した。ただし、AEの頻発荷重より求めた K_{Ic} の値は変動が少なかった。解析結果よりこの変動の理由として、ノッチ形状の影響も含まれていると考えられた。また、AEの頻発点から K_{Ic} を決定し、それをひびわれの発生基準とする可能性が示された。

4) ひびわれ伝播のシミュレーション解析として、 K_{Ic} をひびわれ進展の基準に用いたBEMによる弾性解析を行い、実際の剛性試験で得られた荷重-開口変位曲線をほぼシミュレートしうることができた。これからも、 K_{Ic} をひびわれ伝播の基準として用いる妥当性が示されたと考えられる。

参考文献

1. A. Carpinteri : Application of fracture mechanics to concrete structures, ASCE, Vol. 108, No. ST4, April, 1982, 833-848.
2. C. C. Go, S. E. Swartz and K. K. Hu : Stress intensity factors for single-edge-notch beam, ASCE, Vol. 110, No. EM4, April, 1984, 629-632.
3. C. A. Brebbia, et al. : Boundary element techniques, Springer-Verlag, 1984.
4. 第1回境界要素法シンポジウム研究発表論文集, 1984年11月.

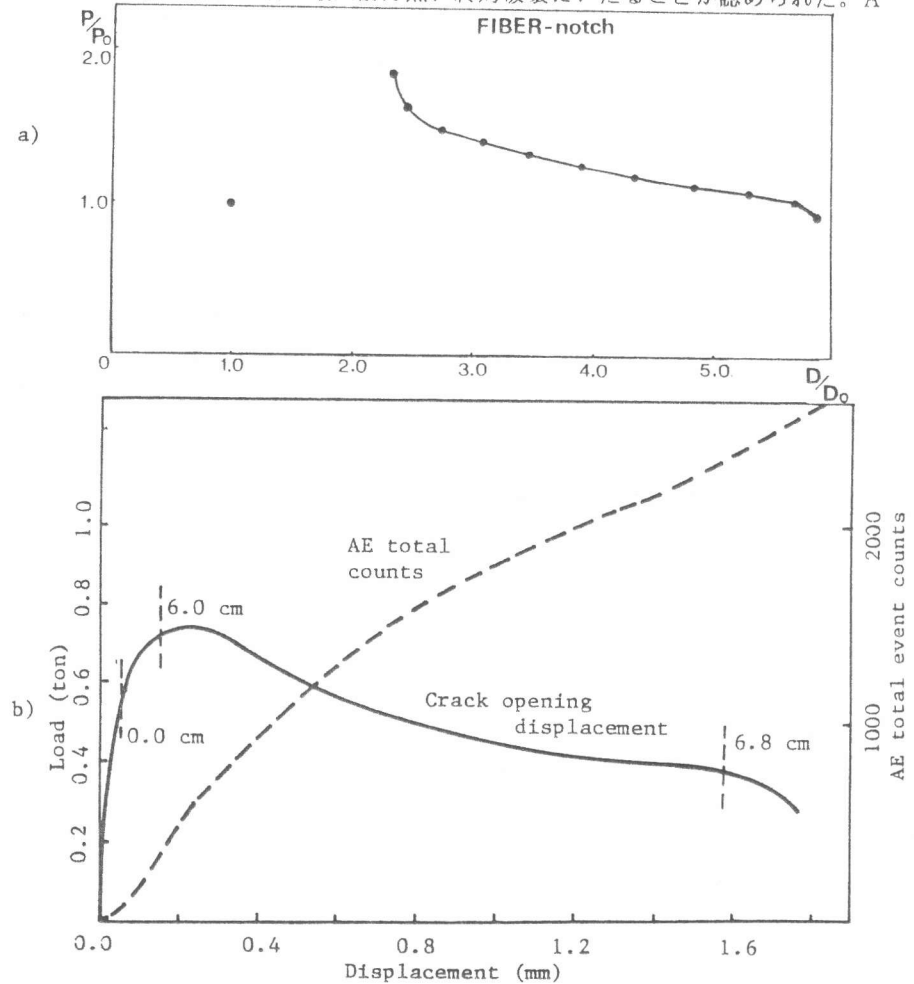


図-3 a) ひびわれ伝播のシミュレーション解析結果と b) 剛性試験における荷重-開口変位-AE頻度図 (SFR 供試体)