

1. はじめに

構造用材料におけるひびわれの発生、伝播の機構は、材料の破壊靱性と深く関係している。ひびわれ先端での応力の特異性に基づいて線形破壊力学 (LEFM) より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検討がなされており、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。

本研究は、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付け、ノッチ付きはりの破壊試験におけるAE計測と境界要素法 (BEM) による解析を行なって、限界応力拡大係数 K_{Ic} の決定法について検討したものである。

2. 実験概要および解析手法

実験には、普

表-1 供試体に用いた材料の配合と物性値

通コンクリート (Plain)、鋼繊維補強コンクリート (SFR)、軽量コンクリート (LW) の3種類の配合のコン

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)	E ($\times 10^5$ 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

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。粗骨材の最大粒径は20mmであり、LW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、SFRおよびLW供試体には、AE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 mm)、小 (Small; 7.5 x 10 x 40 mm) の2種類のはり供試体を作成した。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日間恒温室内にて水中養生の後、図に示すような三等分載荷の曲げ試験を行なった。試験中のノッチ開口変位とロードセルの荷重値はA/D変換器を用い、AE頻度はGP-IBを用いて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 S/W は3となった。

$S/W=3$ のノッチ付きはりの応力拡大係数 K_I は、弾性論より求められており、従来の研究ではこの理論式に終局荷重値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、理論式はノッチ幅が0の完全なスリットに対するものであり、金属を対象とした分野で行なわれている疲労クラックによる予備き裂に適用するのであれば、これより求められた K_{Ic} は実際のノッチ先端での値を示していないと考えられる。さらに、理論式ではノッチ形状、供試

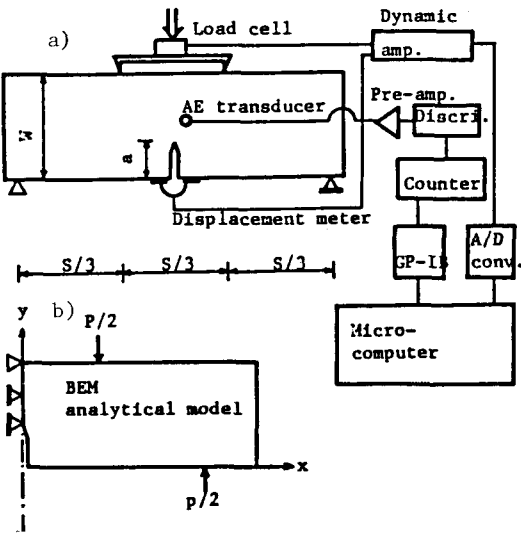


図-1 a) 実験装置およびb) 解析モデル

体寸法などの効果は考慮されていない。そこで、実験を行なった各供試体の応力拡大係数を境界要素法（BEM）を用いた数値解析により検討することにした。図-1 b）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により図のように右半分のみを対象とした。ここで、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応力拡大係数を決定しうることが知られているからである。BEMとしては、直接法の定式化を採用しガウスの4分点法で境界積分を評価した。そして、 K_I は内部応力から定義に従って外挿によりもとめることにした。

3. 結果および考察

実験より得られた荷重-AE頻度曲線の一例を図-2に示す。どの実験においても図のようにAEは終局破壊の直前に頻発し始め、急増して終局に至るのが観察された。そこで、このAE頻発点の荷重を不安定ひびわれの開始点の荷重として考えることにした。

BEMの精度を検討するために、ノッチ形状を幅が0の完全スリットとして解析し、理論解と比較することによって誤差が全ての場合に5%以内という十分な精度で解析解が得られていることを確かめた。さらに、実験供試体であるノッチモデルに対しても K_I を求めた。その結果、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倍程度大きくなるのに対し、ノッチモデルでは5割程度しか増加しないことが認められた。

実際に求められた K_{Ic} を図-3に示す。破線で示したものが終局荷重を理論式に代入することにより求められた K_{Ic} の値である。これより、大供試体で得られた応力拡大係数

($a/W=0.2, 0.4$)は小供試体で得られたもの($a/W=0.3, 0.6$)より小さいことがわかる。そして、これらの実験結果としてよく知られているとおり、供試体寸法、 a/W の変化によって K_{Ic} の値は大きく変動しているのが見られる。これからも K_{Ic} を物性値と考えることの困難さがわかる。

ところが、ここでBEMより求められたノッチモデルに対する単位荷重当りの K_I 値を K_{Ic} の決定に採用すると、この変動は小さくなる。そこで、 K_{Ic} をひびわれ伝播を支配するパラメータと考え、上述のAE頻発点として求められたひびわれ開始点の荷重より求めた K_{Ic} が図中に実線で示したものである。図より明らかなように、この場合には K_{Ic} はほとんど変動せず普通、SFR、LWコンクリート供試体における K_{Ic} の差異をよく表わしている。SFRコンクリート供試体の K_{Ic} はほぼ普通コンクリート供試体でのそれに等しいが、変動の大きいことが観察される。これはノッチ先端でのファイバーの配置によるばらつきが結果に反映されたものと考えられる。このようにAE計測によってひびわれ開始荷重を決定し、その値を用いてBEMから供試体のノッチ形状に応じた K_{Ic} を求めれば、寸法効果の影響もうけずひびわれ伝播を支配するものとして限界応力拡大係数を求めうことが示された。

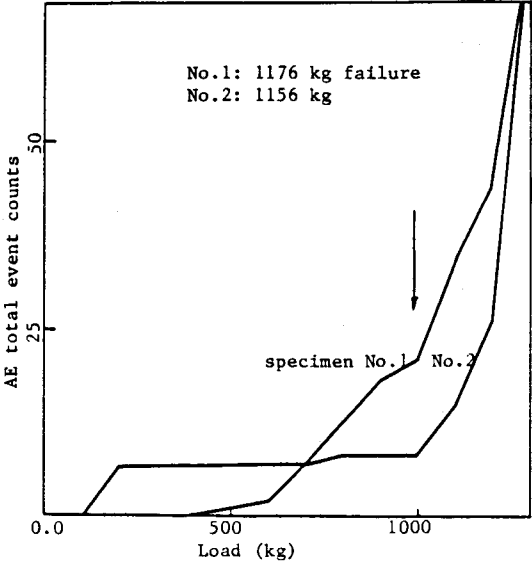


図-2 荷重-AE頻度曲線（SFR供試体）

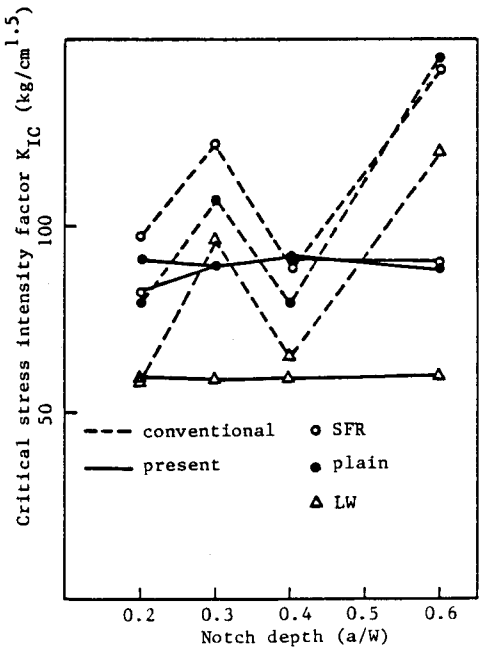


図-3 限界応力拡大係数