

V-143

破壊力学に基づいたコンクリートのひびわれ進展解析に関する考察

熊本県土木部 正員 〇沢井 信一郎
熊本大学工学部 正員 大津 政康

1. まえがき

最近、コンクリート材料におけるひびわれの数値解析に破壊力学の適用が検討されている。破壊力学で著名なパラメータは、ノッチ先端での開口モードの応力拡大係数 K_I である。この限界値はひびわれ進展に対する耐力の指標と考えられることにより、破壊靱性と呼ばれている。しかし、限界応力拡大係数 K_{Ic} はひびわれ先端に主破壊前に形成されるプロセスゾーン(微小ひびわれ領域)のため、実験室で実施される程度の供試体で妥当な値を得るのは難しいとされている。また、プロセスゾーンでは、ひびわれ幅の増大にともなって引張伝達応力が減少する引張軟化現象が生じる。本研究では、アコースティック・エミッション(AE)法により得られる K_{Ic} の評価、および K_{Ic} を用いた線形破壊力学(LEFM)によるコンクリートのひびわれに関する解析とプロセスゾーンでの引張軟化を考慮した解析の比較および考察を行なう。

2. 実験および解析の概要

表-1 コンクリートの配合と物性値

実験に用いたAEコンクリート(AEC)、鋼繊維補強コンクリート(SFR)の示方配合、フレッシュおよび硬化コンクリートの諸試験値を表-1に示す。SFRには長さ30mmのせん断ファイバーを体積混入率1%で使用した。また、AECとSFRにはAE剤をセメント重量の0.05%混和した。

配合	単位量(kg/cm ²)				air slump		σ_c σ_t		E
	W	C	S	G	(%)	(cm)	(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	
AEC	169	375	695	1156	4.1	6.7	451	38.6	2.51×10^5
SFR	169	375	684	1138	2.7	1.5	530	50.7	2.66×10^5

以上の材料を使用してノッチ付きの曲げ供試体を作製し、図-1 a)に示すような3等分载荷の曲げ試験を実施した。曲げ供試体の寸法は10cm×10cm×40cmであり、ノッチは厚さ1mmのプラスチック板を打設時に型枠に固定した後、コンクリートを打設することにより供試体に導入した。ノッチ深さは2, 3, 4, 5 cmである。曲げ試験には剛性試験器ではなく、一般の万能試験器を使用した。この際に、ひびわれ発生はノッチ先端に取り付けたAEセンサーにより計測した。また、最大耐力点以降、供試体が急激な破壊を起こさないように载荷と除荷を繰り返しながら荷重開口変位を計測した。ここで、破壊荷重Pに対する限界応力拡大係数はsingle edge notch beam法(SEN)により、次式で評価される。

$$K_{Ic} = 2 P S a^{1/2} Y^* / (2 B W^2)$$

$$Y^* = 1.99 - 2.47(a/W) + 12.97(a/W)^2 - 23.17(a/W)^3 + 24.80(a/W)^4$$

実験に対応して供試体の荷重-開口変位をシミュレートするために境界要素法(BEM)を用いた解析を

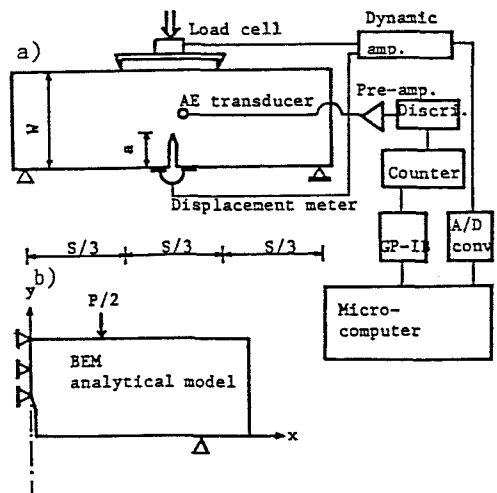


図-1 a)実験装置 ならびに b)解析モデル

行なった。解析モデルを 図-1 b) に示す。L E F Mのみによる解析では、ひびわれ先端の K_{Ic} が限界値 K_{Ic} に達したときにひびわれが進むとし、境界を2mm程度に細分割した。ひびわれ節点に引張軟化則より定まる結合力が作用するとして解析ではリガメント部を2.5mm、他の部分を1cm程度に細分割し、一定要素を用いて解析した。各要素での数値積分にはガウスの4点積分法を用いた。

3. 結果および考察

A E 頻度の計測結果によれば、A E は載荷初期から発生し、最大耐力点に達する直前より急激的に加速度的に増加することが観測された。そこで、A E 急増点における荷重(以後、A E 頻発時荷重と呼ぶ。)を用いて直接応力法と直接変位法で限界応力拡大係数 K_{Ic} を求めた。変位法での結果を図-2 に示す。変位法ではS E Nによる解とほぼ一致し、また、同一材料でノッチ深さに対して安定した値が得られた。このことより、 K_{Ic} はA E 頻発時荷重を用いて決定するとノッチの深さに依存しない物性値であると考えることができる。

引張軟化を考慮した解析には引張強度と破壊エネルギーより定まる引張軟化モデルの適用が必要であり、様々な形状が提案されているが、今回は図-3 に示すような1直線モデルを使用した。ここで、破壊エネルギー G_F は、図-2 の K_{Ic} の平均値より算定した。

A E Cでの荷重-開口変位曲線の実験値および解析値を図-4 に示す。実験値は最大耐力点以降、供試体が急激に破壊しないように載荷と除荷を繰り返しながら計測して得た曲線の包絡線であり、3本の供試体の平均をプロットした。引張軟化を考慮した解析においては、立ち上がりから最大耐力点に達するまでの領域についてはよくシミュレートできている。しかし、最大耐力点以降の曲線の形状には明らかに違いがみられ、荷重の減少が実験値よりも大きい値を示した。このことは、引張軟化に採用した直線モデルにおいて靱性を評価していないためであると思われる。また、ひびわれ先端の応力拡大係数が限界値に達したときにひびわれが進むとしたL E F Mのみによる解析では、実験値の大略はシミュレートできると考えられる。この場合、材料非線形が再現されていないために、解析値は実験値よりも低くなっていると考えられる。

以上の結果より、ひびわれ進展中のコンクリートの変形挙動は最大耐力点まではL E F Mでの破壊エネルギーの放出過程として引張軟化を考慮した解析によりシミュレート可能で、変形挙動の大略はL E F Mにおける限界応力拡大係数により支配される過程であると考えられる。

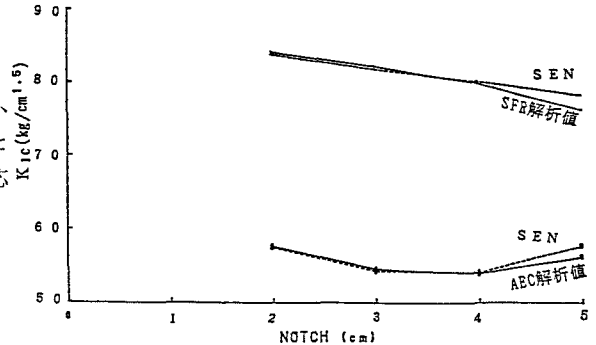


図-2 限界応力拡大係数とノッチ深さの関係(変位法)

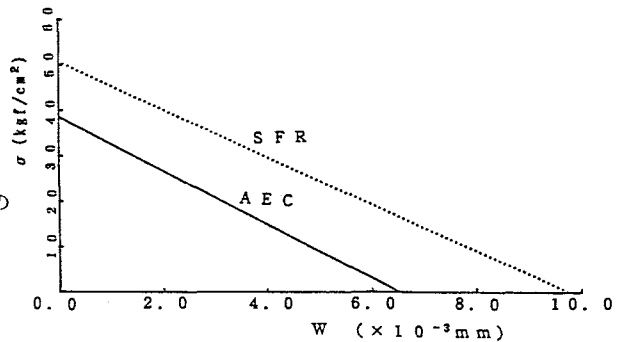


図-3 引張軟化モデル

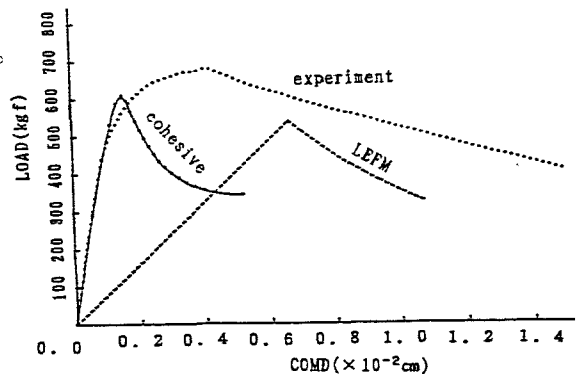


図-4 荷重-開口変位 (A E C)