

コンクリートの破壊靱性とAEに関する考察

熊本大学大学院 学生員 ○澤井 信一郎

熊本大学工学部 矢野 敬徳

熊本大学工学部 正員 大津 政康

1. はじめに

最近、コンクリート材料におけるひびわれの力学的な発生機構の解明に関連して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 であり、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} は寸法効果の影響を大きくうけ、実験室で実施される程度の供試体では妥当な値を得ることは困難とされている(1)。この理由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)のためと考えられている。このようなプロセスゾーン形成荷重の検出とそれを用いた破壊靱性値の評価について考察する。

表-1 コンクリートの配合と物性値

2. 実験および解析の概要

実験に用いたモルタル(MOR)、AEコンクリート(AEC)、鋼繊維補強コンクリート(SFR)の配合を表-1に示す。SFRには長さ30mmのせん断ファイバーを体積の1%混入させた。それらの材料の力学的特性値も表中には示している。

配合	W	C	S	G	air	slump	σ_c	σ_t	E:(kg/cm ²)	ν
MOR	353	589	1178	--	3.4	12.4	287	18.0	1.97×10 ⁵	0.20
AEC	169	375	695	1156	5.9	9.9	344	29.4	2.90×10 ⁵	0.21
SFR	169	375	684	1138	3.0	0.7	459	52.0	3.21×10 ⁵	0.22

以上の材料を使用してノッチ付の曲げ供試体を作製し、図-1 a)に示すような3等分載荷の曲げ試験を実施した。曲げ供試体の寸法は10cm x 10cm x 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取り付けることにより供試体を導入した。製作したノッチ深さは2cm, 3cm, 5cmの3種類である。ただし、ノッチ形状の影響も検討するためにノッチ深さ3cmのものについては厚さ3mmの鋼板製のものも製作した。実験には剛性試験器ではなく、一般の万能試験器を使用し、最大荷重まで10kgf/sec程度の載荷速度で載荷した。この際に、開口変位はクリップゲージにより、ひびわれ発生はノッチ先端に取り付けたAEセンサにより計測した。

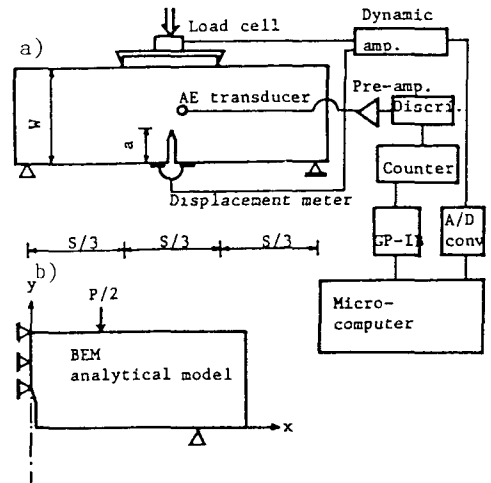


図-1 a) 実験装置ならびに b) 解析モデル

この場合、破壊荷重 P に対する応力拡大係数は2次元弾性理論解により、次式で評価される。

$$K_I = 2PSa^{1/2}Y/(2BW^2), Y = 1.99 - 2.47(a/W) + 12.97(a/W)^2 - 23.17(a/W)^3 + 24.80(a/W)^4$$

実験に対応して供試体内部の応力状態を検討するために境界要素法(BEM)を用いた弾性応力解析を行った。その解析モデルを図-1 b)に示す。境界を1cm間隔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。そして、各ノッチ深さに対するモデルでは、ノッチ形状を正しく表現した。そして、境界上の応力に加えてノッチ先端付近に内部点を幾つか取り内部応力

の評価も行った。

3. 結果および考察

全ての供試体において上式に破壊荷重を代入し、限界応力拡大係数を求めたところ、寸法効果のため同一材料でノッチ深さに対して一定とならず、物性値と考えるには困難であることが明かになった。また、AE頻度の計測結果によれば、AEは載荷初期から発生し、限界の開口変位量に達するあたりより急激に加速度的に発生することが観測された。このことから、破壊荷重時における供試体内部の応力状態をBEM解析により検討した。

AECでの応力解析の結果を図-2 a) に示す。これはノッチ先端から $\theta = 0^\circ$ (図-1のy軸方向) と 45° 度方向における開口方向への引張応力 σ_{xx} をノッチからの距離に対してプロットしたものである。図中に記入しているように、このコンクリートの引張強度は 29.4 kg/cm^2 であり、いずれの方向についてもノッチ先端から8 mm程度の部分は完全に引張強度以上の引張応力が作用していることになっている。

ノッチ先端から距離 r の点での応力 σ と応力拡大係数 K_I との間には、次の関係が知られている。

$$\sigma_{xx} = K_I \cos \theta / 2 (1 + \sin \theta / 2 \sin 3 \theta / 2) / (2 \pi r)^{1/2}$$

そこで、図-2 a) での応力値より各点での応力拡大係数を求めた結果を図-2 b) に示す。 $\theta = 0^\circ$ 度の場合には距離1 cmのあたりで少々停滞するが、いずれでも全体的には、応力拡大係数もノッチ先端に近づくにつれて増加しているのが見られる。この場合に実験での破壊荷重より決定された応力拡大係数は図中に $K_{Ic}(\text{Pu})$ と示してあるように $59.6 \text{ kg/cm}^{1.5}$ であった。解析で決定された応力拡大係数の曲線から判定すれば、この限界値を越えるのはノッチ先端からわずかに3 mm程度の領域である。

このことは、応力拡大係数の値が限界値を越えている領域よりも、引張応力が引張強度以上になっている領域の方が広範囲なことになり、この供試体は破壊力学で対象としているノッチによる応力集中によってではなく、単に引張破壊を生じているにすぎないことを意味する。実際にはプロセスゾーンが形成されるため、引張強度以上の応力場は存在することはない。

しかし、この結果は標準的な寸法の供試体から破壊靱性を評価することの困難さを明らかにしている。そこで、前述のAE急増荷重を用いて K_{Ic} を評価すると図に示すように $51.2 \text{ kg/cm}^{1.5}$ となる。この場合には限界値を越える領域はほぼ引張強度限界を越える領域と一致しており、さらにAEの頻発荷重時には図の場合より応力は明らかに低くなるため、強度によりひびわれの進展が左右されないと考えられる。それゆえ、AEから決定した限界応力拡大係数は、プロセスゾーン形成前の段階で評価されていると考えられる。紙面の都合により、このようにして決定された各材料の破壊靱性値については当日発表を行う。

参考文献：(1) RILEM Technical Committee TC 90-FMA Report, "Fracture Mechanics of Concrete Applications," Third Draft, 1988.

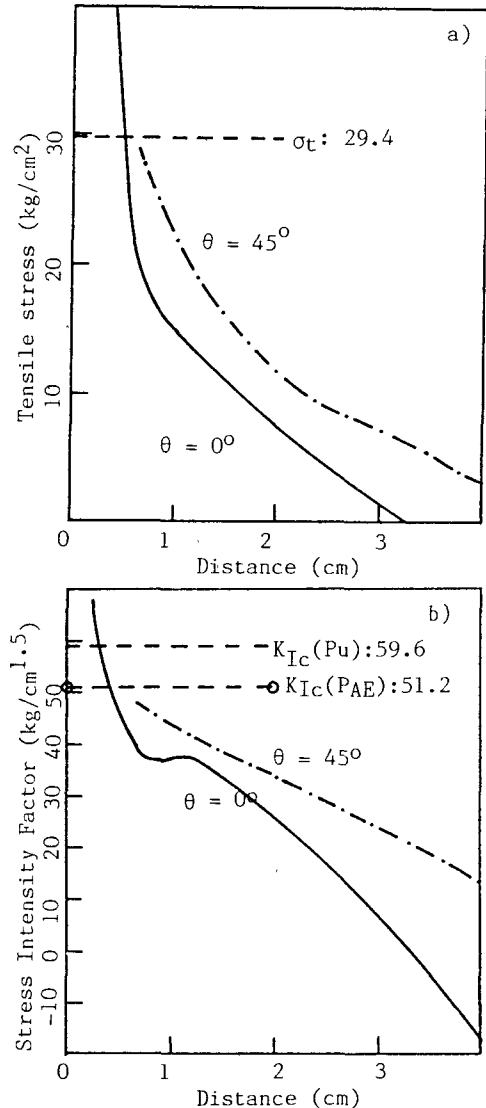


図-2 a) ノッチ先端の応力分布と

b) 応力拡大係数 (AEC)