

I - A293

空隙あるいは材料欠陥の干渉を受ける破壊き裂の

進展挙動に関する数値解析

徳山高専 学会員 柳井 竜*
 徳山高専 正会員 橋本 堅一
 金沢大学 正会員 矢富 盟祥

1. はじめに

現在,様々な建造物に用いられているコンクリートは骨材が含まれている上に,練り混ぜ時に混入する気泡や,打設後に起こる乾燥収縮によるひび割れなどの材料欠陥を必ず有している.このため材料内部の応力状態は非常に複雑になり,コンクリートの破壊の予測はかなり難しいものとなっている.従って,その材料内部の最も単純な例を取り出し,空隙や骨材などがどのように破壊に影響しているかを検討していくことは非常に興味を持てる課題である.本研究では,有限要素法を用いたエネルギー解放率の数値解析により,き裂先端付近に空隙が存在するとき,その大きさ及び位置が破壊き裂進展にどのように影響するかを検討した.解析結果は空隙のない場合のモデルと比較し,そのき裂進展挙動および折れ曲がり角を考察した.エネルギー解放率の解析は超弾性体においては,エネルギー解放率を与える経路独立積分であるE積分¹⁾を用いた.

2. 数値解析

扱ったモデルは図-1に示すような無限遠方一方向で引張応力 σ_0 を受ける片側主き裂を有する帯板モデルで,そのき裂先端に矩形に近い形の空隙を考えた.ここで主き裂長さ l と板幅 W の比 l/W は0.5としている.数値解析には有限要素法を用いE積分法を適用した.ひずみエネルギーを持つ弾性体(超弾性体)においては,き裂折れ曲がり瞬間時のエネルギー解放率を与えるE積分は,不均質物体内に準静的に進展するき裂に対して物体を線形弾性体と仮定すると次式で与えられる.

$$E(\ell) = \int_{\Gamma} \left(\frac{1}{2} s \cdot \frac{\partial u}{\partial \ell} - \frac{1}{2} \frac{\partial s}{\partial \ell} \cdot u \right) ds \quad (1)$$

ここで ℓ による偏微分は右微分係数($\ell \rightarrow +0$)を表し, ℓ は進展き裂の全長, Γ はき裂先端を含む領域の境界, u, s は Γ 上での変位ベクトルおよび表面応力ベクトルを示している.この経路積分の評価には,積分経路を要素辺上に設定し,式中の微分項を2点差分近似することにより,次式を用いた.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left\{ s_i(\ell) \cdot \frac{u_i(\ell + \Delta\ell) - u_i(\ell)}{\Delta\ell} - \frac{s_i(\ell + \Delta\ell) - s_i(\ell)}{\Delta\ell} \cdot u_i(\ell) \right\} \quad (2)$$

ここで n は経路における節点の数, s_i は各節点において算出された表面応力ベクトル, u_i は各節点における変位ベクトル,そして $\Delta\ell$ は基本モデル(対象となるモデル)とき裂進展モデルのき裂長さの差である.積分経路を境界辺上に設けているため表面応力ベクトル及び変位ベクトルは節点での変位,節点力を直接用いている.

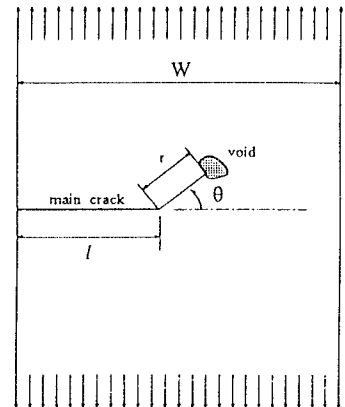


図-1 解析モデル

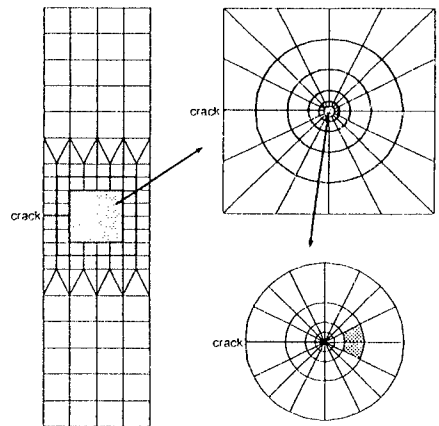


図-2 有限要素モデル

Key Words: crack extension, energy release rate, E-integral, crack kinking, void

*〒745-8585 山口県徳山市久米高城 TEL.0834-29-6328 FAX.0834-29-6328

有限要素モデルは図-2 の通りである。E 積分による方法は全エネルギー法と呼ばれる方法を経路独立積分に一般化したものでもあり、前述の説明からもわかるようにき裂長さの異なる 2 つのモデルの解析が必要である。その 2 つの解析モデルのうちき裂が進展する前の基本モデルについては節点数が 749、要素数が 240 であり、き裂進展モデルについては要素数が同じで節点数は 751 である。積分経路は 5 本 (図-2 の太線参照) 設け、き裂の折れ曲がり角は 15 方向 (図-2 き裂先端部参照) を考えた。 $\Delta \ell$ は全エネルギー法同様に、試行錯誤的に決める必要があるが、ここでは、種々の長さの $\Delta \ell$ に関し数値計算を試み理論解のある場合で最も精度のよい範囲中にある $\Delta \ell = 0.00625\ell$ を使用した。空隙として弾性係数を他の部分の 0.001 倍として近似した²⁾。空隙は隣接する 2 個の要素で構成される矩形に近い形とし、き裂先端からの距離 r を $0.0125\ell, 0.025\ell, 0.05\ell, 0.1\ell, 0.2\ell, 0.35\ell$ と変化させ、き裂進展角度と最大エネルギー解放率がどのように変化するかを 48 通りのモデルにより検討した。

3. 結果と考察

図-3 には空隙を 2 つの要素で近似し、 r が $0.0125\ell, 0.025\ell, 0.05\ell, 0.1\ell, 0.2\ell, 0.35\ell$ の場合の最大エネルギー解放率と θ の関係が示されている。 r が 0.0125ℓ のときは、主き裂が直進する場合の方向 ($\theta = 0^\circ$) ではつきりとエネルギー解放率が最大になり $\theta = \pm 90^\circ$ で最小の 0.84 となっている。この最小値をとる θ の値は r が大きくなるに従って絶対値が大きくなっている。次にエネルギー解放率の $\theta = 0^\circ$ での値は、 r が 0.0125ℓ から 0.1ℓ までは徐々に増加し 0.2ℓ から急激に低下している。そして $r = 0.35\ell$ では $\theta = \text{約 } 63.4^\circ$ でエネルギー解放率が最大となり、 $\theta = 0^\circ$ に空隙がある場合よりもき裂の進展を促進する効果があることが分かる。これは林のアクリル供試体による実験結果³⁾と似た傾向を示している。図-4 は図-3 と同様の条件で行った解析でのエネルギー解放率が最大となる時の折れ曲がり角度 α と θ の関係を示している。 $r = 0.0125\ell$ では $\theta = 45^\circ$ で α が最大になっているのに対し残りの 5 つにおいては 90° 前後で最大となっている。 α の値も r が 0.025ℓ で急に大きくなりその後 r が大きくなるにつれて徐々に小さくなっている。 $\theta = 27^\circ$ 付近に注目すると α は r の増加とともに減少し $r = 0.35\ell$ のときには負の値になっている。

4. 結論

本研究ではき裂先端付近に空隙が存在する場合の、空隙やその大きさがき裂進展に及ぼす影響を数値解析によって検討した。それにより以下のことが明らかとなった。

1. き裂先端から空隙の位置が遠くなると (ここでは $r = 0.35\ell$)、き裂直進方向から約 60° 傾いた位置に空隙が存在するときに最もき裂の進展が促進される。
2. 空隙がき裂先端から離れるに従って最大折れ曲がり角度は小さくなる。また空隙側とは反対側に折れ曲がる領域が存在する。

参考文献

- 1) 矢富盟祥, エネルギー解放率の新公式とその応用, 材料, 35, 767 (1986), 57-61
- 2) 橋本堅一, 柳井 竜, 矢富盟祥, き裂先端付近に介在物あるいは空隙がある場合の E 積分によるエネルギー解放率の解析, 構造工学論文集, Vol.14A, (1995), 499-508
- 3) 林慎太郎, き裂と空隙の干渉問題における破壊き裂進展挙動に関する実験的検討, 徳山高専卒業研究論文集, (1998), 173-178

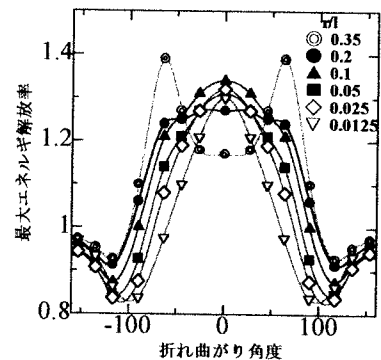


図-3 エネルギー解放率と折れ曲がり角度の関係

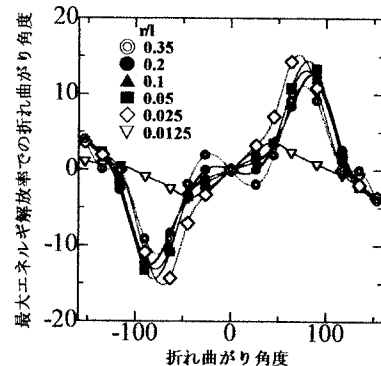


図-4 折れ曲がり角度と最大エネルギー解放率での折れ曲がり角度の関係