

Cohesive crack model を用いた動的破壊解析による低速載荷と高速載荷の比較

中央大学大学院 学生員 ○ 関谷 香恵
 茨城大学 正会員 車谷 麻緒
 中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

構造物の破壊現象を数値解析により評価することは、自然災害に対する防災・減災の観点から非常に重要であり、社会的な関心も高い。またコンクリートのような脆性材料でかつ非均質複合材料のひび割れ進展を解析するためには、母材・介在物の破壊や界面剥離が考慮できる解析手法が必要である。さらに、このような破壊現象を再現するためには、ひび割れ先端部における破壊進行領域の力学的挙動を評価する必要がある。このため、岩田・車谷らはひび割れ先端部の力学的挙動の評価に Cohesive crack model を適用した動的ひび割れ進展解析手法を提案した¹⁾²⁾。

本報告は、提案手法を用いて準脆性材料の破壊現象における載荷速度の影響について検討を行ったものである。

2. 数値解析手法

(1) 基礎方程式

構造解析における動的問題に対する力のつり合い方程式、変位-ひずみ方程式、応力-ひずみ関係式をそれぞれ以下に示す。

$$\partial^T \sigma - \rho \ddot{u} + b = 0 \quad (1)$$

$$\epsilon = \partial u \quad (2)$$

$$\sigma = D \epsilon \quad (3)$$

ここに、 σ は応力、 ρ は密度、 b は物体力、 ϵ はひずみ、 u は変位、 D は弾性係数行列を表す。また、幾何学的境界条件と力学的境界条件は以下のように与える。

$$u = \bar{u} \quad \text{on } \Gamma_u \quad (4)$$

$$m \sigma = t = \bar{t} \quad \text{on } \Gamma_t \quad (5)$$

Γ_u は変位が拘束されている領域、 Γ_t は表面力が加わっている領域を表す。ここで、 m は境界に対して外向き法線ベクトルを表す。ペナルティ法と Cohesive crack モデルを適用した場合の弱形式は、通常の弾性体の弱形式にペナルティ係数による剛性、または、Cohesive crack モデルによる剛性による項が加わったものとなり、次式(6)のように表される。 t は外力ベクトル、 Ω は全体領域である。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} (\partial u^*)^T D (\partial u) d\Omega + \int_{\Omega} \rho \ddot{u} u d\Omega \\ & + \int_{\Gamma_p} \bar{p} (u^{*[1]} - u^{*[2]}) (u^{[1]} - u^{[2]}) d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_{PZ}} p^{coh} (u^{*[1]} - u^{*[2]}) (u^{[1]} - u^{[2]}) d\Gamma \\ & = \int_{\Omega} u^{*T} b d\Omega + \int_{\Gamma_t} u^{*T} \bar{t} d\Gamma \end{aligned} \quad (6)$$

(2) Cohesive crack model の動的問題への導入

ひび割れ先端部における破壊進行領域の力学的挙動のモデル化に Cohesive crack model を用いる。Cohesive crack

model は、十分に開口していないひび割れ面の応力伝達を、結合力でモデル化するものであり、図-1(b) に示すような実験結果に基づく非線形な表面力-開口変位関係を結合力として与える。本論文で用いた表面力-開口変位関係は次式(7)の通りである。

$$\|t^{coh}(w)\| = f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f} w\right) \quad \text{on } \Gamma_{PZ} \quad (7)$$

ここで、 w は不連続面における相対変位を表す。

$$w := \|u^{[1]} - u^{[2]}\| \quad (8)$$

そして、図-2 および次式(9) に示すように Cohesive crack model で与えられる結合力をバネの反力で置き換える。

$$t^{coh}(w) = p^{coh} w \quad (9)$$

ここで、 p^{coh} は不連続面における相対変位間をつなぐバネの剛性となり、 $w \ll 0$ の場合はペナルティ法によるバネ剛性 \bar{p} となる。動的陽解法を用いることで、 p^{coh} を前の時間ステップの値で近似することができ、界面剥離後に \bar{p} を Cohesive crack model によるバネ剛性 p^{coh} に置き換えることが可能となる。図-2 に示す Γ_p がペナルティ法によるバネ剛性が作用する区間、 Γ_{PZ} が Cohesive crack model によるバネ剛性が作用する区間となる。

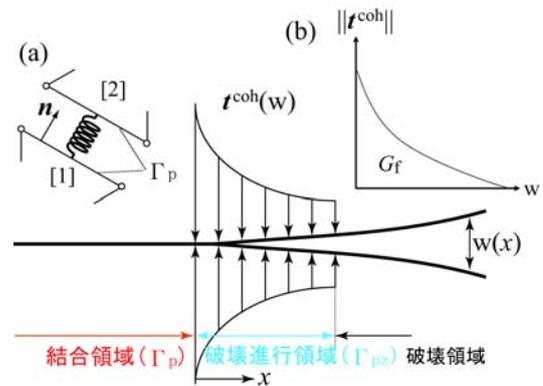


図-1 ひび割れ先端部の応力伝達

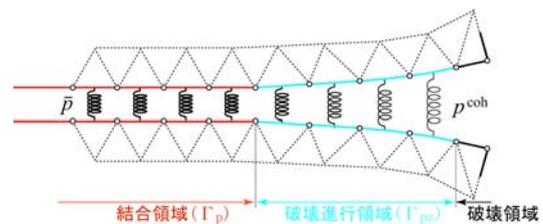


図-2 Cohesive crack model のバネによるモデル化

KeyWords : ひび割れ進展, Cohesive crack model, 動的問題

連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL 03-3817-1815 Email sekítani-y@civil.chuo-u.ac.jp

(3) 破壊の判定

材料界面の破壊の発生については、界面での表面力を用いて評価する。本論文では、ペナルティ法を用いて材料界面の連続条件を近似しているため、界面での表面力 t_p は相対変位を用いて次式 (10) で求められる。

$$t_p = \bar{p}(u^{[1]} - u^{[2]}) \quad (10)$$

ここで、ペナルティ係数 \bar{p} は構成材料のヤング率の $10^4 \sim 10^6$ の値を用いる。 $u^{[1]}$, $u^{[2]}$ は図-1(a) に示す不連続面における変位である。そして、この表面力 t_p と外向き法線ベクトル n を用いて次式 (11) を満たした場合に破壊が発生する。ここで、 t_s は引張強度を示す。

$$t_p \cdot n > 0 \quad \text{and} \quad \|t_p\| \geq t_s \quad (11)$$

3. 均質材料の低速載荷と高速載荷の比較

まず、図-3 に示すようなモデルで破壊解析を行った。ひずみ速度 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0(1/sec) の7種を上部に与え、高速載荷と低速載荷の比較した。載荷速度に関して、載荷時に応力波が発生しないよう、立ち上がりを滑らかにした。解析結果として、図-4 に各ひずみ速度の速度載荷面における引張応力の時刻歴を示す。これから、ひずみ速度 1.0, 0.5(1/sec) はピーク強度が高いことが分かる。これは、Cohesive crack model を用いることで、破断後の応力の低下が遅く、慣性力による変形の方が早いいためピーク値が増加したと考えられる。また、ひずみ速度 1.0, 0.5(1/sec) は弾性領域での傾きが大きくなっている。これは、見かけの弾性係数が増加しているためと考えられる。

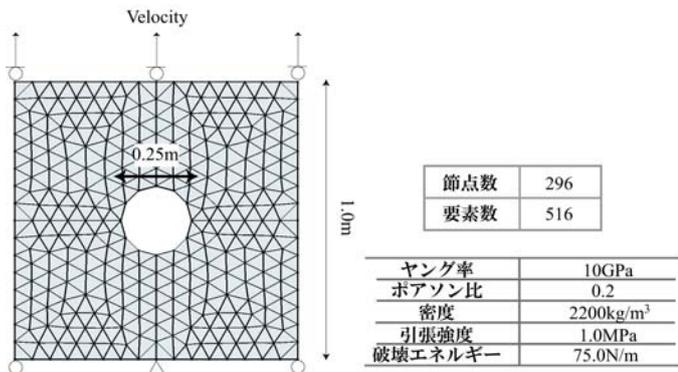


図-3 解析モデル

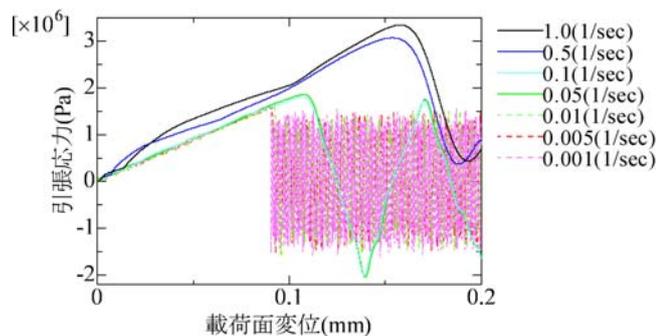


図-4 速度載荷面での荷重と変位の関係

4. 複合材料の低速載荷と高速載荷の比較

次に、図-5 に示すようなモデルで破壊解析を行った。ひずみ速度は同様に7種を上部に与え、速度も同様に立ち上げを滑らかにした。解析結果として、図-6 に各ひずみ速度の速度載荷面における引張応力の時刻歴を示す。均質材料に比べて差異は小さいが、ひずみ速度 1.0, 0.5(1/sec) はピーク強度が高いことが分かる。これは、Cohesive crack model を用いることで、破断後の応力の低下が遅く、慣性力による変形の方が早いいためピーク値が増加したと考えられる。また、ひずみ速度 1.0, 0.5(1/sec) は弾性領域での傾きが大きくなっている。これは、見かけの弾性係数が増加しているためと考えられる。

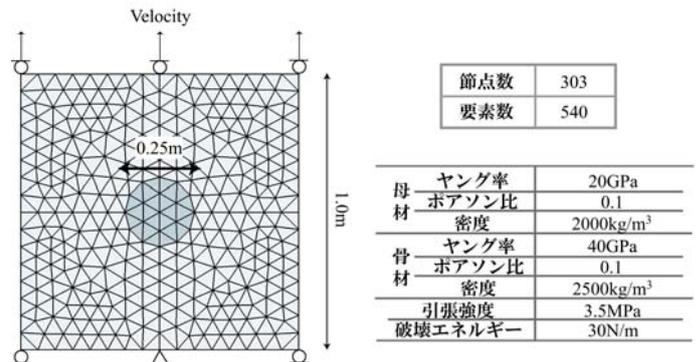


図-5 解析モデル

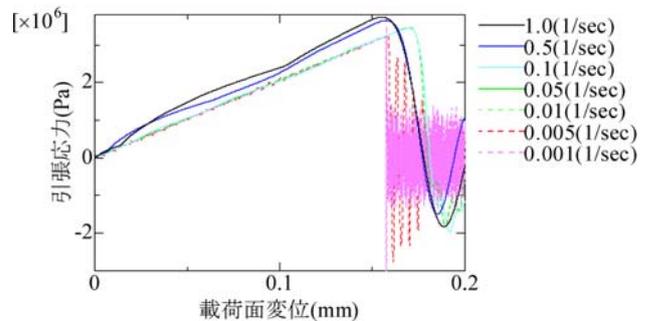


図-6 速度載荷面での荷重と変位の関係

5. おわりに

本報告では、動的破壊解析における低速載荷と高速載荷の比較を行った。その結果、以下の結論を得た。

- 低速載荷より高速載荷の方がピーク強度が高い。
- 低速載荷より高速載荷の方が見かけの弾性係数大きい。

参考文献

- 1) 岩田暁, 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 榎山和男: Cohesive crack model を用いた動的破壊有限要素解析, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.327-328
- 2) 岩田暁, 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 岡澤重信, 榎山和男: 高速引張載荷を受けるコンクリートのメソスケール破壊シミュレーション, 応用力学論文集 Vol.12, pp.311-319