流体力を受けるコンクリート構造物の動的破壊シミュレーション

○東北大学工学部　学生員　佐藤 義浩
東北大学大学院工学研究科　学生員　青葉 勇樹
東北大学災害科学国際研究所　正　員　加藤 準治
東北大学災害科学国際研究所　正　員　寺田 賢二郎
東北大学大学院工学研究科　正　員　京谷 孝史
茨城大学工学部　正　員　車谷 麻緒
中央大学理工学部　正　員　樫山 和男
東北大学災害科学国際研究所　正　員　高瀬 慎介

1.　はじめに

本研究では，津波のような流体力を想定した動的かつ面的な荷重の作用下におかれたコンクリート構造物の動的破壊挙動を特徴づけるための数値シミュレーションを行う．具体的には，ボクセル有限要素法に動的陽解法の時間積分アルゴリズムと損傷モデルを導入して，コンクリート構造物に圧力による衝撃荷重を与えたときの動的破壊挙動を再現する．そして，既往の研究によるコンクリート構造物の準静的な破壊挙動と比較して，遡上津波のような衝撃力によるコンクリート構造物の動的破壊挙動を特徴づける．

2.　支配方程式

等方性損傷モデルは，スカラー変数である損傷変数 D を用いて，応力ひずみ関係式を次式で表す.

$$\overset{\triangledown}{\boldsymbol{\sigma}} = (1-D)\,\boldsymbol{H} : \boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

ここで、$\overset{\triangledown}{\boldsymbol{\sigma}}$ は Cauchy 応力テンソルの Jaumann 速度，$\boldsymbol{H}$ は弾性係数テンソル，$\boldsymbol{\varepsilon}$ は変形速度テンソルである．この損傷変数 D は損傷の程度を $0 \le D \le 1$ で表し，$D = 0$ の場合，材料は損傷のない弾性挙動を表すが，$D \approx 1$ の場合，材料は完全に剛性を失って破壊となる．

損傷の進展は，等価ひずみの増加によって決定する．本研究では準脆性材料に適した等価ひずみとして次式に示す de Vree *et al.*[1])よる定義式を採用する．

$$\varepsilon_{eq} = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)}I_1 + \frac{1}{2k}\sqrt{\frac{(k-1)^2}{(1-2\nu)^2}I_1^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2}J_2} \tag{2}$$

ここで，I_1，J_2 は蓄積ひずみの第 1 不変量とその偏差成分の第 2 不変量, ν は Poisson 比，k は圧縮引張強度比である．本研究では引張に弱い準脆性材料であるコンクリートを用いており，$k = 10$ となる．なお，材料が経験した最大の等価ひずみ κ として，荷重状態の載荷と除荷の区別は次のように定義できる．

$$\begin{cases} \kappa = \varepsilon_{eq}\ (\text{載荷}) & \left(\text{if}\ \ \kappa \le \varepsilon_{eq}\right) \\ \kappa = \kappa \quad (\text{除荷}) & \left(\text{if}\ \ \kappa > \varepsilon_{eq}\right) \end{cases} \tag{3}$$

損傷の進展を表すために，次の Mazars と Pijaudier により定義された関数[2])を用いる.

$$D(\kappa) = 1 - \frac{\kappa_0}{\kappa}\left(1 - \alpha + \alpha e^{\beta(\kappa_0-\kappa)}\right) \tag{4}$$

ここで，κ_0 は損傷開始の閾値，α，β は実験結果とのキャリブレーション等により定まるスカラー値の材料パラメーターである．なお，損傷の判定は次のようになる.

$$\begin{cases} D = 0 & (\text{if}\ \ \kappa \le \kappa_0) \\ D = D(\kappa) & (\text{if}\ \ \kappa > \kappa_0) \end{cases} \tag{5}$$

本研究では，流体力の外力データを構造物の節点力に変えて，運動方程式を陽的に時間積分をして解く．運動方程式は次式の通りである.

$$\mathrm{div}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{b} = \rho\ddot{\boldsymbol{u}} \tag{6}$$

ここで，$\boldsymbol{\sigma}$ は Cauchy 応力テンソル，$\boldsymbol{b}$ は物体力ベクトル，ρ は質量密度，$\boldsymbol{u}$ は変位ベクトルである.

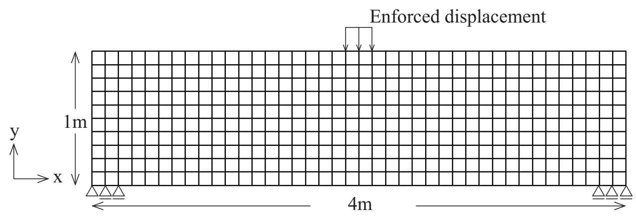
3.　検証例題および解析結果

図–1 のような単純梁を例題として，準静的載荷と動的載荷 2 ケースで検証する．材料パラメータはヤング係数 E = 30GPa，ポアソン比 $\nu = 0.3$，損傷開始の閾値 $\kappa_0 = 1.0\times10^{-4}$ とする．梁の上面に 5.0×10^{-4}m の強制変位を与え，動的載荷の 2 ケースにおいては載荷速度を変えて比較する．case1 は準静的載荷の場合であり，case2 と case3 の載荷速度はそれぞれ 0.005m/s，case3 は 0.5m/s とした.

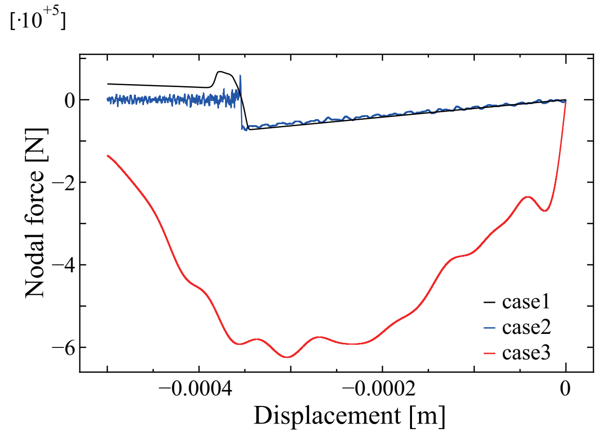
解析結果として，強制変位の載荷点における節点荷重 - 変位曲線を**図–2** に示す．準静的載荷の case1 と載荷速度の小さい case2 では弾性域からひずみ軟化を起こす挙動が再現されている．一方，載荷速度の速い case3 では，領域全体に荷重が伝達する前に載荷部に大きな圧縮応力を生じ，節点反力が大きい値となっている.

また，損傷の始まりと最終変形の様子を x 軸方向の応力とともに，case1，case3 についてそれぞれ**図–3**，**図–4** に示す．損傷の進展として損傷変数 D が 0.8 に達すると徐々に

Key Words: *Damaged model, Finite deformation, Dynamic explicit method, Crack propagation*
〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06,TEL 022-795-7425,FAX 022-795-7423



図–1 Analysis model



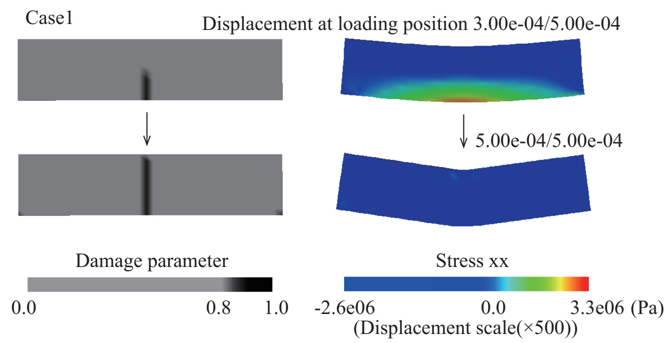
図–2 Nodal force - Displacement curve

黒くなるように示し，圧縮応力については一色で示し，引張応力についてのコンター図を示した．case1 では，梁の下面中央から大きな引張応力が働き，やがて損傷も発生する．そして，梁中央において下面から上方向に損傷が進展し，破断する．しかし，載荷速度の速い case3 では下面からの損傷および載荷点まわりの損傷も起きている．

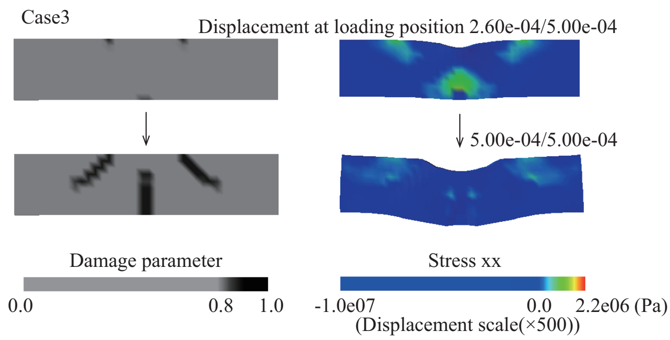
ここで case3 について考察を深めるために，初期状態からの x 軸方向の応力を**図–5** のように示す．載荷点まわりの要素に局所的な圧縮応力が加わるため，さらにその周辺の要素には引張応力が生じている．この引張応力は時間とともに下面に広がり，やがて全体的な曲げモードを持つような引張応力が生じ，下面からの損傷が起こる．また，上面においての載荷点まわりも，局所的な曲げモードによる引張応力は次第に大きくなり，やがて押抜せん断破壊のような損傷が起こる．この局所的な破壊は動的載荷のみで生じたものであり，動的破壊挙動の一つの特徴であると言える．

4. おわりに

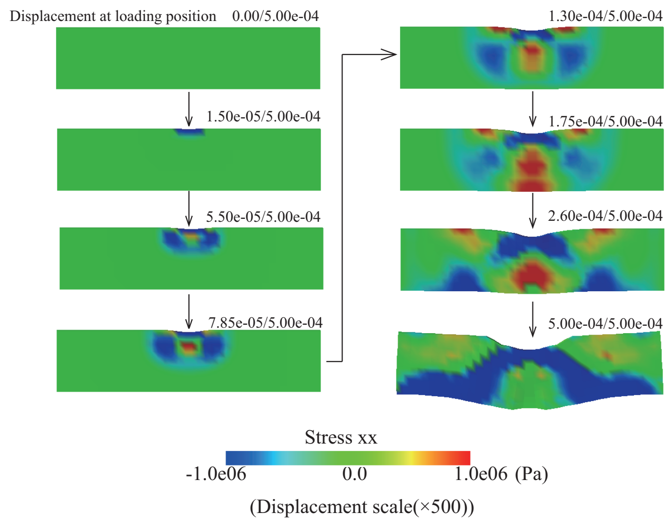
本研究では，解析手法や簡単な検証例題を示し，準静的破壊と動的破壊の違いについて載荷速度での破壊挙動の違いを示した．その結果，動的載荷の損傷の進展は，準静的載荷のケースと比べ，局所的な損傷が生じることが分かった．さらに動的載荷の軸方向応力状態を見ると，載荷点まわりの局所的な圧縮応力の生じた要素の周辺の要素には引張応力が生じた．圧縮応力に比べ，引張応力に弱いコンクリート構造物ではその引張応力の大きい部分から損傷が起き，上面では動的載荷で斜め方向の損傷が生じた．このように，準静的破壊挙動と異なるような動的破壊挙動の特徴の一つを見出すことが出来た．



図–3 Result - case1



図–4 Result - case3



図–5 Evolution of axial stress for case3

参考文献

1) J.H.P. de Vree, W.A.M. Brekelmans and M.A.J. van Gils : Comparison of nonlocal approaches in continuum damage mechanics, *Comput. Struct.* , Res, Vol.17, pp. 441–452, 1995.
2) J.Mazars, Pijaudier-Cabot G : Continuum damage theory-application to concrete, pp.345–346