

破壊力学に基づく損傷モデルによる 流体力を受けるコンクリート構造物の動的破壊解析

茨城大学 学生会員 ○小沼 慎弥 正会員 車谷 麻緒
中央大学 正会員 凌 国明 正会員 檜山 和男

1. はじめに

津波被害を低減するためには、津波が堤防に及ぼす力学的影響を評価し、その堤防の破壊挙動を予測しなければならない。そのためには、堤防の材料であるコンクリートの破壊を、ひび割れ進展まで考慮した動的解析手法が必要である。また、堤防に作用する津波流体力を直接的に評価するためには、津波と構造物を同一の手法で解析することが望ましい。

既往の研究では、車谷らは破壊力学に基づいた損傷モデルを有限要素法に組み込むことで、コンクリートの破壊挙動を高い精度で再現し、ひび割れ進展過程まで可視化している。

そこで本研究では、流体および構造物の解析手法を有限要素法で統一する。また、車谷らの損傷モデルを動的解析に組み込むことで、津波流体力を受ける堤防のひび割れ進展過程を再現する。

2. 自由表面流れ解析手法

流れの解析には、VOF 法に基づく自由表面流れ解析を用いる。VOF 法は VOF 関数 ϕ (液体:1, 気体:0, 界面:0.5) と呼ばれるスカラー関数によって界面を表現する手法である。

2.1 支配方程式

非圧縮性粘性流体の支配方程式は、次の Navier-Stokes 方程式と連続の式で表される。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \mathbf{b} \right) - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}, p) = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

ここで、 ρ は密度、 $\mathbf{u}$ は速度ベクトル、 $\mathbf{b}$ は物体力ベクトル、 p は圧力であり、応力テンソル $\boldsymbol{\sigma}$ は次式で表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = -p\mathbf{I} + \mu[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{I}$ は 2 階の単位テンソル、 μ は粘性係数である。

自由表面流れにおいて界面の位置を表現する VOF 関数 ϕ は、次に示す移流方程式によって支配される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = 0 \quad (3)$$

各節点における気体、液体の密度と粘性係数は VOF 関数を用いて次式のように求められる。

$$\rho = \rho_{\text{liq}}\phi + \rho_{\text{gas}}(1 - \phi), \quad \mu = \mu_{\text{liq}}\phi + \mu_{\text{gas}}(1 - \phi) \quad (4)$$

ここで $\rho_{\text{gas}}, \rho_{\text{liq}}, \mu_{\text{gas}}, \mu_{\text{liq}}$ はそれぞれ気体、液体の密度および粘性係数である。

2.2 支配方程式の離散化

非圧縮性粘性流体の支配方程式および移流方程式に対する離散化において、空間方向に SUPG/PSPG (Streamline Upwind Petrov Galerkin/Pressure stabilizing Petrov Galerkin) 法に基づく安定化有限要素法、時間方向に Crank-Nicolson 法を適用する。

3. 動的破壊解析手法

本研究では、動的解析手法に粘性を考慮せず慣性力のみを考慮した非減衰動的解析を用いる。

3.1 破壊力学に基づく損傷モデル

車谷らが考案した損傷モデルを動的解析に組み込むことで構造物の破壊挙動を再現する。損傷モデルの構成式は次式で表される。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - D)\mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon} \quad (5)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル、 $\mathbf{c}$ は弾性係数テンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみテンソル、 D は損傷度合いを表す損傷変数であり、0 ~ 1 の値をとる。損傷の判定には、ひずみテンソルをスカラー値へ変換した等価ひずみ ε_e を用いる。

等価ひずみは次式で表される。

$$\varepsilon_e = \frac{k-1}{2k(1-2\nu)} I_1' + \frac{1}{2k} \sqrt{\left(\frac{k-1}{1-2\nu} I_1' \right)^2 + \frac{12k}{(1+\nu)^2} J_2'} \quad (6)$$

ここで、 ν はポアソン比、 k は引張圧縮強度比、 I_1' はひずみテンソルの第 1 不変量、 J_2' は偏差ひずみテンソルの第 2 不変量である。

変形履歴における等価ひずみの最大値を $\varepsilon_e \geq 0$ で表すことにより、損傷変数 $D(\varepsilon_e)$ は次式で表される。

$$D(\varepsilon_e) = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_e} \exp \left(-\frac{E\varepsilon_0 h_e}{G_f} (\varepsilon_e - \varepsilon_0) \right) \quad (7)$$

ここで、 E はヤング率、 ε_0 は破壊発生ひずみ、 h_e は要素長さ、 G_f は破壊エネルギーである。

3.2 非減衰動的解析の支配方程式

運動中の弾性体の支配方程式は、つり合い方程式に、単位体積当たりの慣性力を考慮した運動方程式で表される。

$$\nabla^T \boldsymbol{\sigma}' + \mathbf{b} + \mathbf{B} = 0 \quad (8)$$

キーワード 動的破壊解析, 損傷モデル, ひび割れ, 有限要素法

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 茨城大学工学部 TEL. 0294-38-5151 FAX. 0294-38-5268

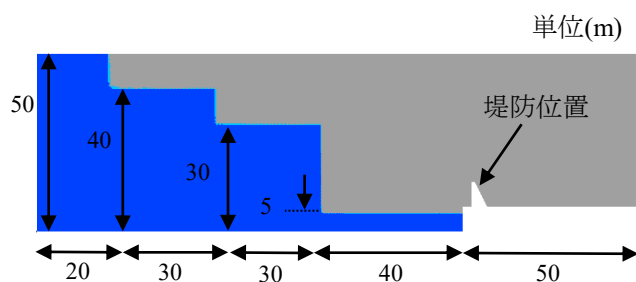


図-1 自由表面流れ解析モデル

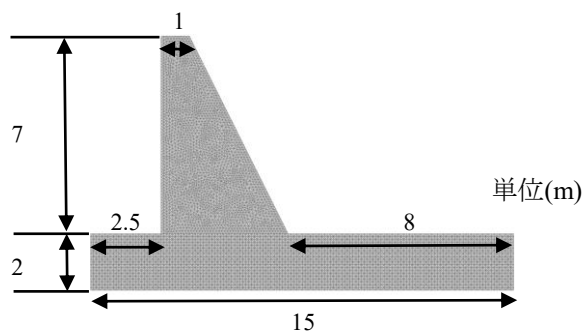


図-2 動的破壊解析モデル

ρ	E	ν	k	κ_0	G_f
2400 kg/m ³	30 GPa	0.2	10	0.0001	100 N/m

表-1 コンクリート堤防の材料パラメータ

ここで、 σ' は応力ベクトル、 b は物体力ベクトル、 B は慣性力ベクトル、 ∇ は変位に微分演算を行ってひずみをつくる行列である。運動中の弾性体の支配方程式に対する離散化において、空間方向に有限要素法、時間方向に Newmark's β 法 ($\gamma=1/2, \beta=1/4$) を適用する。

4. 津波流体力を受ける堤防の動的破壊解析

4.1 自由表面流れ解析モデルと解析条件

津波が堤防に衝突する状況を想定して、図-1 に示すような、左端に水底から高さ 30m の水柱、水柱から 40m の位置に堤防を配置した 2 次元モデルを対象に自由表面流れ解析を行った。解析条件として、液体と気体の密度および粘性係数は 20 °C における水と空気の値を用い、解析時間 T は 4s、解析ステップは 400step とした。有限要素として三角形要素を用い、節点数は 93133、要素数は 184904 である。境界条件は、全壁面で slip 条件（斜線部のみ nonslip 条件）を与えた。

4.2 動的破壊解析モデルと解析条件

堤防の寸法を図-2 に示す。この堤防が津波流体力を受けた時の動的破壊解析を行う。堤防の材料であるコンクリートのパラメータを表-1 に示す。解析時間およびステップ数は自由表面流れ解析と同様である。有限要素として三角形要素を用い、節点数は 5318、要素数

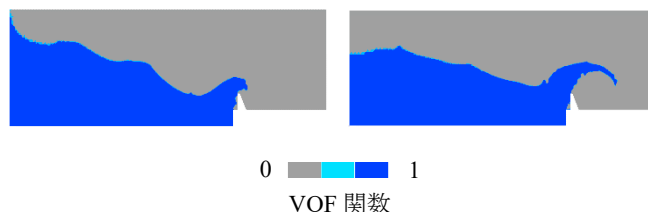


図-3 3.0s(左), 4s(右)における自由表面流れ解析結果

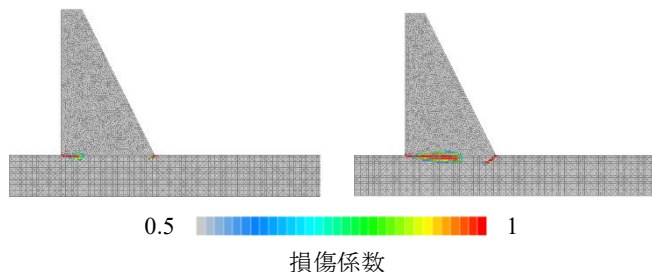


図-4 3.5s(左), 4s(右)における動的破壊解析結果

は 10179 である。境界条件は、底辺を y 方向固定、右側辺を x 方向固定とした。

4.3 解析結果

自由表面流れ解析結果を図-3 に示す。また、図-4 は堤防の動的破壊解析結果であり、損傷係数を可視化することでひび割れの様子を示している。津波が堤防に到達したことで破壊が発生し、進展していくため、津波流体力の評価および津波流体力を受けた堤防のひび割れ進展過程を再現することができた。

5. おわりに

本研究では、流体および構造物の解析手法に有限要素法を用いることで、堤防に作用する津波流体力を直接的に評価した。さらに、車谷らが考案した損傷モデルを動的解析に組み込むことで、津波流体力を受けたコンクリート堤防のひび割れ進展過程を再現した。今後は、ひび割れ進展の妥当性について比較、検討を行う必要がある。また、より現実的な解析を行うため、3 次元問題へ拡張していく予定である。

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 加藤準治, 京谷孝史, 樫山和男: コンクリートの破壊力学に基づく等方性損傷モデルの定式化とその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2013, pp.20130015, 2013.
- 2) 田中聖三, Fangtao Sun, 堀宗朗, 市村強, Maddeggedara L.L. Wijerathne: 動的津波解析による構造物の破壊解析の基礎研究, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4 (地震工学論文集第 32 巻), I_903-I_908, 2013