

パイピング・内部侵食の計算手法の開発

Numerical Method to Analyze Piping owing to Internal Erosion

○ 新名大輔・藤澤和謙・村上 章・西村伸一

Daisuke NIINA, Kazunori FUJISAWA, Akira MURAKAMI and Shin-ichi NISHIMURA

1.はじめに

従来、土構造物の破壊要因として越流や法面崩壊が挙げられているが、パイピングが原因とされる破壊も多々ある。一方で現在、パイピングなどの浸透破壊に関する数値解析手法の発展が遅れている。本研究の目的は、パイピングの数値解析方法を構築するために必要な土内部の土粒子侵食・移動を解析できる手法を確立することである。

2.支配方程式と数値解析手法

土内部の侵食を考えるには、1)土の間隙を通過する浸透流、2)土粒子の内部侵食、3)土粒子の輸送、を考慮する必要がある、支配方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial}{\partial x_i} \left(z + \frac{u_w}{\rho g} \right) \right) = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial n}{\partial t} = EA_e \quad (2) \quad \frac{\partial C\theta}{\partial t} + \frac{\partial Cv_i}{\partial x_i} = EA_e \quad (3)$$

ここで t は時間、 x_i は直交座標、 n は間隙率、 k は透水係数、 z は位置水頭、 u_w は間隙水圧、 ρ は間隙流体の密度、 g は重力加速度、 θ は体積含水率、 v_i は間隙流体の流速である。添え字 i に対して総和規則を適用している。 C は土粒子濃度であり、間隙流体中に含まれる土粒子の体積を間隙流体の体積で除したものを意味する。 A_e は単位体積に存在する侵食領域の表面積である。 E は侵食速度を意味し、経験的に以下の式で表される¹⁾。

$$E = \alpha(\tau - \tau_c) \quad (4)$$

ここに α は侵食速度係数、 τ は土塊表面に作用するせん断応力、 τ_c は限界せん断応力である。数値解析では、式(1)に有限要素法、式(2)に差分法、式(3)に有限体積法を適用した。式(1)を解いて得られた浸透流場から、侵食速度式(4)と式(2)によって間隙率の増分を求める。それらの結果を用いて式(3)を解くことで、間隙流体中に含まれる土粒子濃度を算出する。算出された土粒子濃度から透水係数などを更新し解析終了まで計算を継続する。

3.解析結果と考察

図1に示す小規模貯水堤体に本解析法を適用し、堤体中の間隙変化を調べる。高さ2.5m、天端1.5m、法面勾配1:2の堤体である。メッシュは有限体積セルとしても用いる。本論では2.0m貯水時に生じる定常浸透流下での侵食過程を考察した。堤体の侵食に関する材料定数として、侵食速度係数 ($=5.1 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kN}\cdot\text{s}$)、限界せん断応力

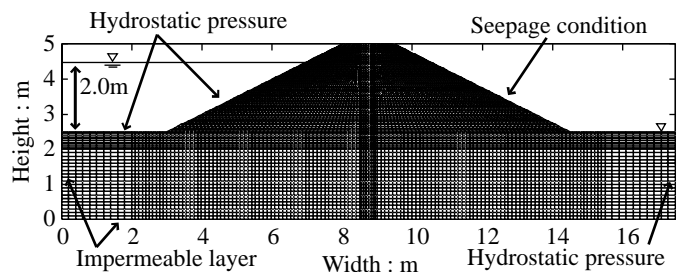


図1 有限要素メッシュと境界条件
Finite element mesh and boundary conditions

($=6.40 \times 10^{-6} \text{ kPa/m}^2$) を与えた。堤体は一様な初期間隙率 ($=0.31$)，初期飽和透水係数 ($=1.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) を持つと仮定した。図 2 はそれぞれ計算開始から 10 日後, 30 日後, 100 日後, 1 年後の間隙率分布, 図 3 は計算開始から 30 日後, 1 年後の間隙流体の流速を示す。図 2(a) より大きなせん断応力が作用する堤体法尻より侵食が発生し, 図 2(b) では侵食が 2 方向へ進展している様子が見て取れる。これは図 3(a) の要素内を移動する浸透流の方向からもわかる。その後, 図 2(b) から図 2(c), 図 2(d) へと堤体下部を上流側へと水平に侵食が進展している。このとき図 3(b) より間隙率が増加した要素で, 浸透流が集中していることがわかる。計算開始から 1 年で間隙率は最大で 0.365 まで増加した。

図 2(b) で地盤内へ潜り込んで発展した侵食は, 図 2(c) 以降発展していない。侵食が生じるには式(4)で土塊表面に作用するせん断応力が限界せん断応力を上回らなければならない, 侵食が進展しなかったことはこの条件を満たしていないことを意味する。

一般に土内部の侵食は表面侵食より非常に進行が遅いとされる。侵食速度に関して式(4)の侵食速度係数が大きな意味を持つ。しかし土内部の侵食を実験で観測することは難しいため, 侵食速度係数の測定も難しい。そこで本解析では表面侵食で測定された侵食速度係数 ($=10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kN}\cdot\text{s}$)¹⁾ の値よりはるかに小さい侵食速度係数 ($=5.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kN}\cdot\text{s}$) を用いた。

本解析法によって内部侵食の発展やそれに伴う間隙率, 浸透流場の変化を表現することができる。

4.まとめ

本解析手法は土内部の侵食を表現し, その進展状況を予測できる。さらに本手法に土の変形解析を組み込むことで, 侵食に伴う応力状態への変化も解析可能になり, パイピングによる土の変形や破壊が予測可能になると考えられる。

参考文献 1) Khilar, K. C., Fogler, H. S. and Gray, D. H. (1985): Model for piping-plugging in earthen structures, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 111(7), 833-846.

