

帯水層の圧縮変化を考慮したパイピング破壊に関する研究

A study on piping failure with considering the compressive deformation of aquifer

14N3100046I 刘 雨辰

Yuchen LIU

Key Words: Piping failure, unsaturated infiltration, 2D Simulation

1. はじめに

近年地球温暖化により集中的な豪雨が多発し、そのため堤防が破壊されたことも多くなった。その主因は越水、浸透及びそれらの相互作用である。平成 27 年の鬼怒川の決壊について、国土交通省関東地方整備局の調査委員会はパイピング破壊が決壊を助長したとの結果をまとめた。浸透破壊というのは、帯水層の水圧が上昇した際に、水が土壌を侵害し、土壌が破壊されることである。パイピング破壊は、上流の水位の上昇とともに、地下水の圧力水頭も高くなることにより生じる。そのため、局所動水勾配も上昇し水が地表噴出することである。また、越水破堤対策により、堤防裏法面がコンクリートブロックで被覆された場合、川裏は不透水面になる。その現象を分析するため、適当なモデルが必要である。本研究は、パイピング破壊を分析するため、全領域の圧力水頭及び流速の変化について FEM 法を用いて飽和・不飽和浸透流計算を行う。さらに、浸透流流速により、パイピング破壊が発生する可能性を検討する。

2. 浸透流解析

(1) 地下水流動の支配方程式

本研究では、堤体および近傍帯水層の圧力水頭の算出が必要である。そのため、まず地下水流動の支配方程式を考える。飽和状態の浸透流支配方程式はダルシー法則と連続式で導出され、式(2-1)で表せる¹⁾

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k \right) = S_s \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (2-1)$$

これは飽和領域における地下水流動の支配方程式（基礎方程式）である。

これから地下水を飽和領域から不飽和領域へ拡張する場合を考える。不飽和領域では、空気の穴があるため、水の流れが阻害され、不飽和時の透水係数は飽和状態の透水係数より小さくなる。さらに、透水係数は飽和率の低いほど低くなる、減っていることである。不飽和状態の透水係数を表すため、不飽和状態の透水係数 k と飽和状態の透水係数 k_s の割合を比透水係数 kr と定義する。 x 方向を例として、ダルシー則は次式のように表わされる。

$$q_x = -k_x(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} = -k_{s_x} kr(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2-2)$$

y 方向と z 方向も同じ方法で書き直すと、不飽和浸透の支配方程式は式 2-3、

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s kr \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_s kr \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s kr \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k_s kr \right) \\ & = (C + \alpha S_s) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \end{aligned} \quad (2-3)$$

で表せる。ここで、 kr : 比透水係数[-], h : 全水頭 [m], φ : 圧力水頭[m], C : 比水分容量[1/m] α : 1 の場合飽和領域, 0 の場合不飽和領域, S_s : 比貯留係数[1/m] k_s : 透水係数 [m/hr]である。

(2) 不飽和浸透特性

本研究では、不飽和浸透特性を表現するため、最も広く用いられている Van Genuchten による不飽和浸透モデルを用いる²⁾。Van Genuchten (1980) が提案した連結モデルは、次式で与えられる。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \{1 + |ah|^n\}^{-m} \quad (2-4)$$

$$k_r = S_e^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m^2}} \right)^{m_2} \right\}^2$$

ここで、 S_e : 有効飽和度[-], θ : 体積含水率[-], θ_s : 飽和体積含水率[-], θ_r : 最小体積含水率[-]である。また、 a は定数であり、 m, n の値は水分特性曲線の形を決める。 m と n の関係は以下の式で与える。

$$m = 1 - 1/n$$

(3) パイピング破壊に関する検討

パイピング破壊については、局所動水勾配の値の算出が必要である。局所動水勾配の値が増加したら、パイピング破壊の発生する可能性も上昇する。局所動水勾配の具体的な計算方法については、式(2-3)で得られた全領域の全水頭 h および圧力水頭 φ を次の式に代入して計算する。

$$i_x = \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{\Delta \varphi}{\Delta x} \quad (2-5)$$

$$i_z = \frac{\Delta h}{\Delta z} = \frac{\Delta \varphi - \rho \Delta z}{\Delta z}$$

ここで、 i_x : 水平方向の局所動水勾配、 i_z : 鉛直方向の局所動水勾配、 ρ : 水の密度である。

パイピング破壊が発生するところの検討方法は、不飽和浸透の過程で、浸透流の流量および流速を求めて、その流速が一番速いところをあきらかにすることだと考えられる。

(4) 帯水層の圧縮変化に関する検討

帯水層の圧縮変化を考えると、比貯留係数は帯水層の水頭変化および間隙率の変化により変化する。比貯留係数 S_s は、飽和状態にある単位体積の多孔質媒体内で圧力水頭変化が与えられた時の流入出流量をあらわす。この時の水の出入は、水圧変化による土粒子あるいは媒体骨格の伸縮による空隙体積の変化と水の圧縮特性に相当するもので、弾性変形を前提としている。

ここで、コントロールボリュームの固体部分 $(1-n)dx dy dz$ は一定と仮定する。つまり、圧縮したのは土壌の間隙であり、土壌粒子自身の圧縮は考慮しない。土壌の固体部分以外の部分を間隙と仮定し、飽和状態での間隙は水分と仮定する。この空間を間隙率で表現すると、水部分比率は n とすると、固体部分比率は $1-n$ になる。

土壌個体部分の圧縮率を γ とし、圧縮した分空隙率が低くなった。その分は以下の式で表す。

$$\begin{aligned} \gamma(1-n) &= -\frac{\partial n}{\partial \sigma_i} \\ \frac{\partial n}{\partial t} &= -\gamma(1-n)\frac{\partial \sigma_i}{\partial t} \end{aligned} \quad (2-6)$$

ここで、 σ_i : i 方向の有効応力である。さらに、有効応力を空隙の水圧と考えると、

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial t}$$

となるため、最終的には以下の形になる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \gamma(1-n)\frac{\partial p}{\partial t} \quad (2-7)$$

不圧条件では、貯留係数は土壌の物性により、変化しないと考える。被圧条件では、土壌粒子は間隙の圧縮変化によって水は貯留あるいは流出するので、貯留係数は不圧条件状態もより小さくなる。

式(2-7)を(2-3)に代入すると、 $x-z$ 方向の支配方程式は以下の式になる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(k_s k_r \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_s k_r \frac{\partial \varphi}{\partial z} + k_s k_r \right) \\ = (C + \alpha S_s) \frac{\partial \varphi}{\partial t} \end{aligned} \quad (2-8)$$

$$S_s = \gamma(1-n)$$

以上の式を飽和・不飽和浸透の支配方程式(基礎方程式)として、数値計算を行う。

3. 数値解析例

数値計算のモデルは、図-1に示すような堤体と基盤土壌

の二層2次元モデルである。堤体片側の水位を瞬時に10 m 上昇させた時の堤体内の圧力水頭及び浸透流流速を求めするため、計算を行う。堤体片側の水位を10 mに固定とした⁴⁾。

数値計算については、飽和・不飽和浸透支配方程式は式(2-6)より与えられる。式(2-6)を図-1に示すような解析領域で、ガラーキン法を用いた有限要素法で解析することを考える。

計算条件(初期条件及び境界条件)は以下に示す。

初期条件 : $t=0, h_0=h(0, xi)$

既知水頭境界条件 : $h(t, xi)=h_0(t, xi)$

全領域内の水頭分布は既知であるとし、水頭境界条件は河川水位であるとする。河道内の水が帯水層に浸透する。

浸出面境界は飽和・不飽和浸透解析特有のものである。浸出境界面では、初期条件で不飽和状態であり、水がシステムに浸透しているとともに、飽和度が上昇して、後飽和状態になり、システム外部へ流出する境界面である。またはこの逆で、初期条件では飽和状態であり、後にシステム内の浸透により不飽和状態に変更し、水の出入りが見られなくなる境界面である。

不透水境界は流量0の既知境界と考えられる。これは、対象とする帯水層の透水性に比較して透水性が低く十分に不透水性と看做せる地層境界層である³⁾。

数式では以下の条件式が適用できる。

$\psi \geq 0$ の時、 ψ = 大気圧とした既知水頭境界に変更する。

$\Psi < 0$ の時、不透水境界条件に変更する。

このように、浸出境界面での間隙水圧の値により、正值の時は既知水頭境界で、負値の時には不透水境界に変更する。

表-1 浸透特性値

透水係数 k [m/s]	1.0×10^{-4}
比貯留係数 s_s [1/m]	1.0×10^{-6}
有効間隙率 n_e	0.4
最小体積含水率 θ_r	0

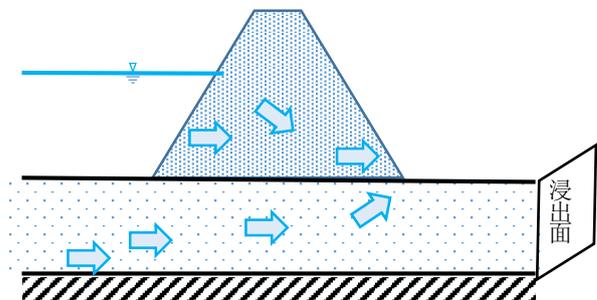


図-1 数値計算のモデル図

解析に用いたパラメータは表-1に示す。なお、不飽和浸透特性について、河川堤防の構造検討の手引きを参考し

て、 $a=2, n=4$ を用いている。

4. 計算結果および考察

説明した支配方程式(2-8)，計算条件及び解析パラメータで，最大計算時間を200時間で飽和不飽和浸透流解析を行う。堤体片側の水位は10 m上昇させたとき，システム内の圧力水頭の分部変化は図-2のように示す。この図から，水位上昇によって水が川表側から川裏側へ浸透し，浸潤面が変化している不飽和浸透の状態がわかる。圧力水頭は負値の時，土壌はまだ不飽和状態と考える。水が浸透しているとき，堤体内の圧力水頭は高くなっている。さらに，川裏のところで，法先の近傍が一番上昇している。200時間の時，川裏法先のところで，圧力水頭の最大値は563.6 cmになった。つまり，不飽和状態から浸透するとき，法先近傍のところ圧力水頭が一番高い。一般的には局所動水勾配が0.5を超えたら，パイピング破壊が発生する恐れがあるが，確率的に，局所動水勾配が上昇しているとともに，パイピング破壊が発生する可能性も上昇している。図-2から見ると，法先のところでパイピング破壊が発生する可能性はほかのところより高い。

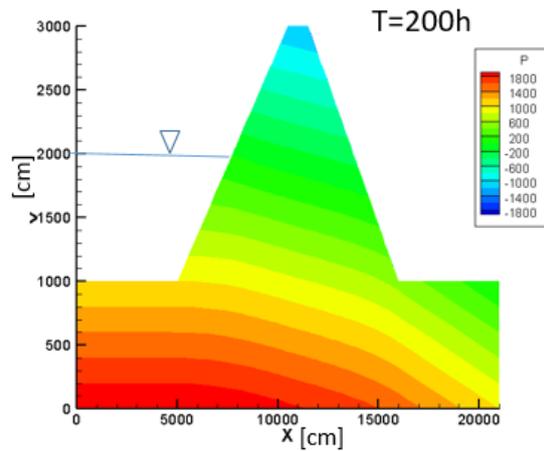


図-2 堤体内圧力水頭[cm]の経時変化

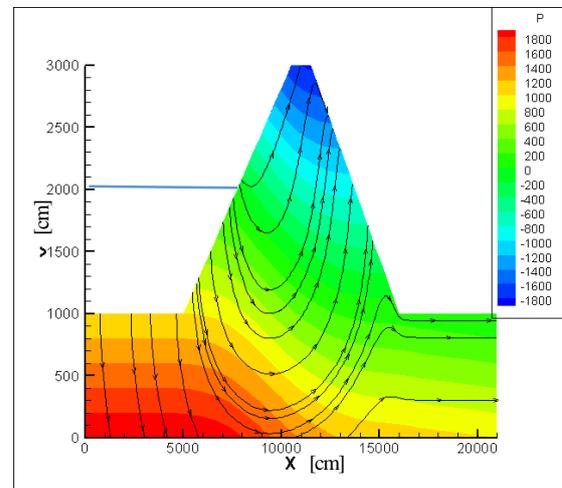
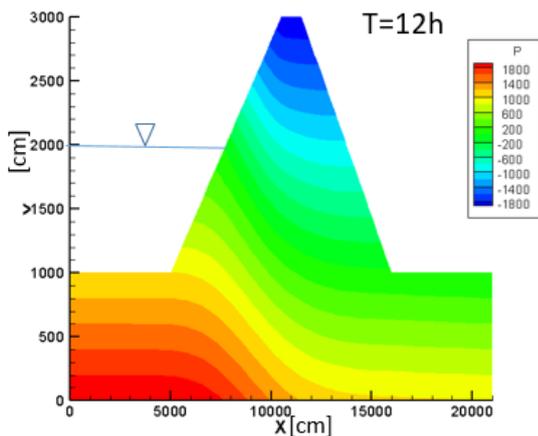
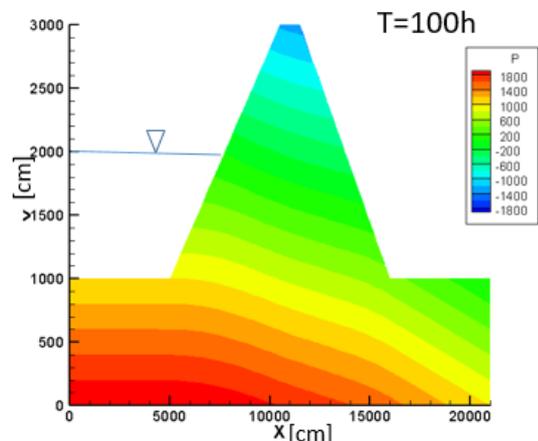


図-3 24時間後の圧力水頭分布と浸透流線



次に，パイピング破壊が発生する可能性を浸透流流速により判断できるかどうかを検討するため，全領域の流速分部を算出した。全領域の流速変化は図-4に示す。明らかに，川裏法先の近傍で，浸透流速は高いのがわかる。浸透流速が高いところで，圧力水頭と局所動水勾配も高い。つまり，ある程度で流速によりパイピング破壊が発生する可能性を表現することである。もっと詳しく説明するため，図-5のように，法先近傍のところ，7個の計算節点を選んで，それぞれの局所動水勾配及び速度を計算する。計算結果は表-2で示す。局所動水勾配と流速の計算結果からみると，a点からf点までには，局所動水勾配と流速は上昇している。そしてg点のところまで下がっている。つまり，局所動水勾配と流速の変化傾向は同じだと考える。流速とパイピング破壊の安定性の解析式は困難であるが，本研究は数値計算の上で両者の関係を示した。現在パイピング破壊の発生判断標準は局所動水勾配であるけど，浸透流の流速もパイピング破壊が発生する可能性を表すことができると考える。

表-2 計算節点の計算結果

	座標(x,y)(cm)	P(cm)	i	V(10^{-3} cm/s)
a	(15775,1100)	458.26	0.28	1.00
b	(15840,1070)	480.19	0.30	1.05
c	(15915,1035)	505.74	0.31	1.10
d	(16000,1000)	530.41	0.33	1.15
e	(16050,1000)	523.68	0.34	1.17
f	(16100,1000)	516.96	0.36	1.19
g	(16150,1000)	511.22	0.33	1.17

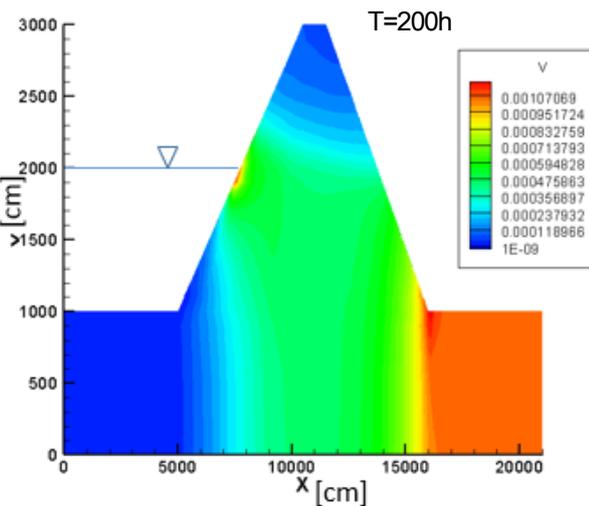
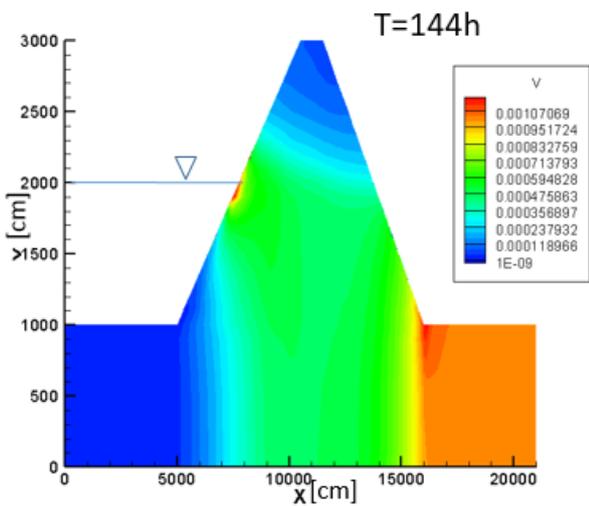
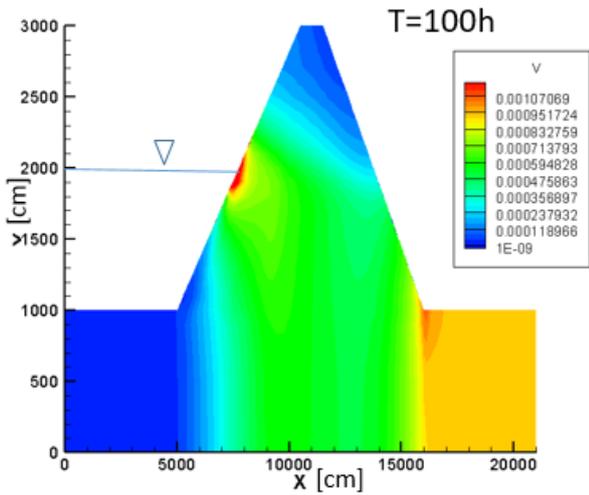


図-4 堤体内流速[cm/s]の経時変化

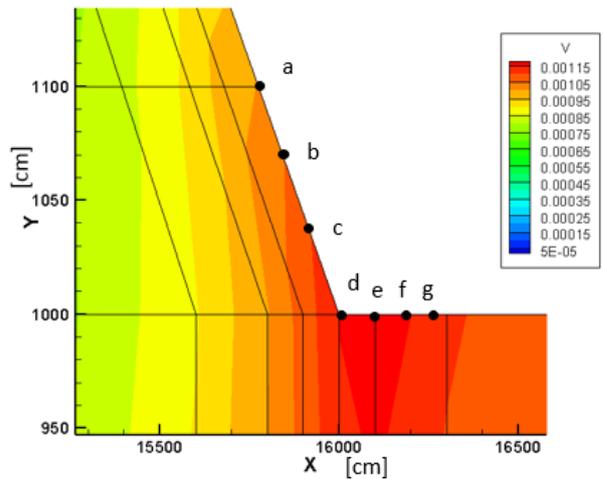


図-5 法先の計算節点

5. まとめ

- 1) 本研究では、図-1に示した堤防を例として、計算領域内の圧力水頭と浸透流速の経時変化を検討するため2次元飽和不飽和浸透流解析を計算した。
- 2) 計算結果により、川裏近傍のところ、圧力水頭と浸透流速が一番上昇していることがわかる。そのうえで、節点の局所動水勾配と流速の計算結果を比較した。
- 3) 従来のパイピング破壊判断手段は局所動水勾配であるが、流速によりパイピング破壊の発生を判断する可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 窪田順平：地下水の挙動のモデル化。水文地形学，古今書院，pp.44~55，1996
- 2) 坂井 勝，取出伸夫：水分保持曲線と不飽和透水係数の水分移動特性モデル
- 3) S. Bonelli, N. Benahmed, Piping flow erosion in water retaining structures: inferring erosion rates from hole erosion tests and quantifying the failure time, 2011
- 4) 小高猛司，岡二三生：不飽和浸透—変形連成解析による河川堤防の安全性評価，第50回地盤工学シンポジウム 平成17年度論文集