

水の浸透による不飽和粒状体の崩壊挙動のモデル化

Numerical and mechanical models for seepage and failure of unsaturated particulate material

福原清作¹・植村桂樹²・北村良介³

Seisaku Fukuhara, Keiju Uemura and Ryousuke Kitamura

- 1 学生員 工修 鹿児島大学大学院工学研究科博士後期課程システム情報工学専攻
(〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)
- 2 学生員 鹿児島大学大学院工学研究科博士前期課程海洋土木工学専攻
(〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)
- 3 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

Kitamura et al. proposed a numerical and mechanical model to analyze the unsaturated-saturated seepage behavior of particulate material and the failure of particulate material. In the seepage model voids and particles are modeled by pipe and other impermeable parts. The void ratio, water content and unsaturated-saturated permeability coefficient can be derived by the seepage model based on some probabilistic consideration. In the failure model the equations for free falling of particle, conservation of momentum and collision of two particles are only used to simulate the flow of particulate material. Some numerical experiments are carried out to simulate the seepage of rain water into soil followed by the slope failure by using these models.

Key Words ; model for voids, unsaturated-saturated permeability coefficient, slope failure, pF-value, numerical experiment

1. まえがき

北村らは不飽和・飽和浸透挙動を解析するための数値力学モデル(ここでは、間隙モデルと称する)を提案している¹⁾。モデルでは、土中の間隙を円管に置き換え、円管の管径とその傾きをそれぞれ独立した確率変数とみなし、若干の確率論的考察を加えることにより、間隙比、含水比、不飽和・飽和透水係数、サクション(=pF-値)が求められる。また、北村らは1粒子の自由落下の運動方程式と2粒子の非弾性衝突における運動量保存則、反発係数を組み合わせ、粒状体の崩壊・流動挙動のシミュレーションを試みている²⁾。本報告では、これらのモデルを有機的に結びつけ、降雨や地下水の上昇に伴う斜面崩壊の数値シミュレーションを行っている。

2. モデルの概要

図-1は本論文で提案しているモデルの流れを示している。本章では、間隙モデル、浸透挙動、2粒子モデル、崩壊モデルの具体的な内容と各モデルで用いられる式の説明を行う。

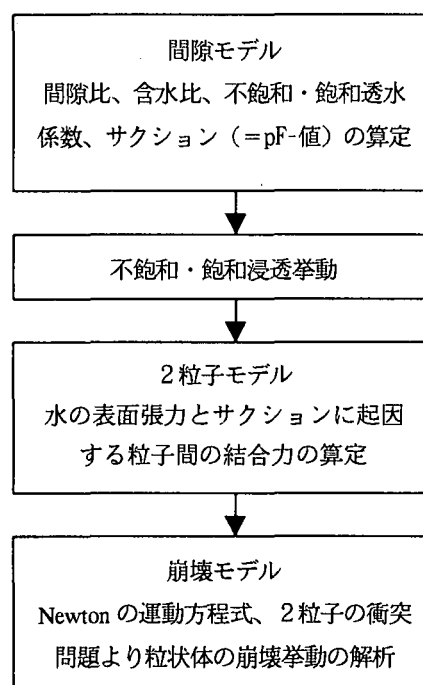
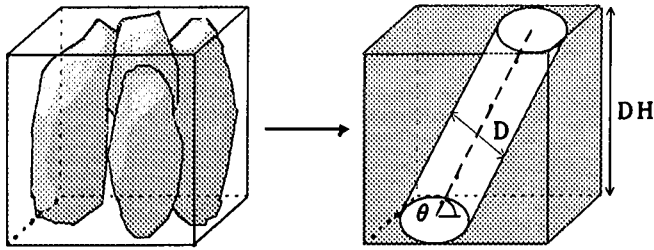


図-1 各モデルの流れ

2. 1 間隙モデル



(a) 土粒子数個の土塊

(b) 間隙のモデル化

図-2 間隙モデル

図-2 (b) は図-2 (a) に示す土粒子数個からなる土塊の間隙をモデル化したものである。図-2 (b) において管径 D 、管の傾き θ をそれぞれ独立した確率変数であると仮定している。粒子構造が不規則な粒状体においてこの過程は妥当と考えられる。それらの変数の確率密度関数を導入すると、間隙比 e 、体積含水率 W_v 、不飽和・飽和透水係数 k 、 pF 値が次式で求められる。

$$e = \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} P_d(D) P_c(\theta) d\theta dD \quad (1)$$

$$W_v = \frac{1}{1+e} \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} P_d(D) P_c(\theta) d\theta dD \quad (2)$$

$$k = \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\pi \cdot \gamma_w \cdot D^3 \sin \theta}{128 \mu (D/\sin \theta + DH/\tan \theta)} P_d(D) P_c(\theta) d\theta dD \quad (3)$$

$$pF = \log_{10} h_c = \log_{10} \left(\frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{\gamma_w \cdot d} \right) \quad (4)$$

ここに、 V_p ：円管の体積、

V_e ：図-2 で示される直方体の体積、

$P_d(D)$ ： D の確率密度関数、

$P_c(\theta)$ ： θ の確率密度関数、

DH ：図-2 で示される直方体の高さ、

d ：間隙水を保持する最大管径、

T_s ：水の表面張力、

α ：管と水の接触角、

γ_w ：水の単位体積重量、

μ ：水の粘性係数、

h_c ：毛管上昇高さ。

式(1)において D の積分範囲を ∞ としているが、 D の確率密度関数を対数正規分布と仮定しているので、実際の数値実験での積分範囲は 4ζ (ζ ：対数正規分布の標準偏差) までと

している。

本論文において土の粒度分布は対数正規分布で近似的に表現できることが知られている。ここでは、管径 D の分布も粒度分布と同じく対数正規分布に従うものと考え、 $\log D$ の平均 λ が 10% 通過粒径である D_{10} の対数である $\log D_{10}$ と等しく、さらには、管径の対数正規分布の変動係数が粒度分布の変動係数と同じであると仮定している。粒度分布のパラメータである λ_1 (対数正規分布の平均)、 ζ_1 (対数正規分布の標準偏差) とすると、これらの関係は式(5)、式(6)で示される。なお、図-1 (b) の DH は粒度分布から得られる D_{10} と等しいと仮定している。

$$\lambda = \log_{10}(D_{10}) \quad (5)$$

$$\zeta = \lambda \cdot (\zeta_1 / \lambda_1) \quad (6)$$

$$P_d(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \zeta \cdot D} 10^{**} \left[-\frac{(\log_{10} D - \lambda)^2}{2\zeta^2} \right] \quad (7)$$

円管の傾き θ の確率密度関数 $P_c(\theta)$ については次のように仮定している。すなわち、北村が提案しているマルコフモデル³⁾では接点角を図-3 において β と定義し、図-4 に示す確率密度関数を仮定している。接点においては接平面に平行な間隙水の流れが卓越すると考えられる。したがって、図-2(b) に示す円管の傾き θ は図-3 における θ に対応していると考え、その確率密度関数として図-5 に示すような分布形を仮定している。 $P_c(\theta)$ の具体的な式は式(8)のようになる。図-5 に示す五角形の確率密度関数の面積は 1 となるので、 ζ_c が決まれば、五角形の形状が決定する。3 章では、 $\theta = 0, \pm \pi/2$ での $P_c(\theta)$ の高さが 3 : 1 となるような ζ_c の具体値を用いている。

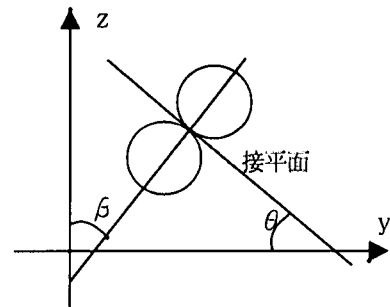


図-3 接点角分布 β と円管の傾き θ

$$P_c(\theta) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} - 2\zeta_c \theta + \frac{2}{\pi} - \zeta_c & (\theta \leq 0) \\ -\frac{2}{\pi} - 2\zeta_c \theta + \frac{2}{\pi} - \zeta_c & (\theta > 0) \end{cases} \quad (8)$$

ここに、 ζ_c : 管の傾き θ の確率密度関数 (pdf) の最低高さ。

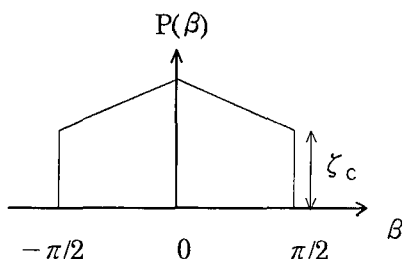


図-4 土粒子の接点角分布

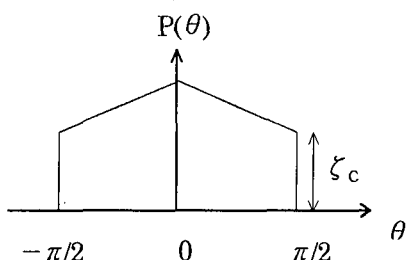


図-5 傾き θ の確率密度関数

2. 2 浸透挙動のモデル化

浸透シミュレーションでは、鉛直 2 次元の地盤を考え、正方形要素に分割し、各要素に初期体積含水率 W_{v0} を与え、それが時間の経過に従ってどのように変化するかをシミュレートしている。

図-6 は浸透挙動のモデル化に際して用いている正方形要素を示している。要素の形状、大きさは任意であるが、ここでは簡単のため同一の大きさの正方形要素を用いている。

それぞれの要素の体積含水率 W_v は、式(9)で表せる。

$$W_v = \frac{Q}{V(\text{element})} \quad (9)$$

ここに、 Q : 要素内の水の体積、 $V(\text{element})$: 要素の体積。

間隙モデルを用いれば体積含水率 W_v は式(2)で求めることができ、式(9)と式(2)を連立させることにより、各要素での間隙モデルに必要な管径の積分範囲 d が求まる。 d が求まれば、透水係数 k は式(3)、水頭 h_c は式(4)を用いて求められる。

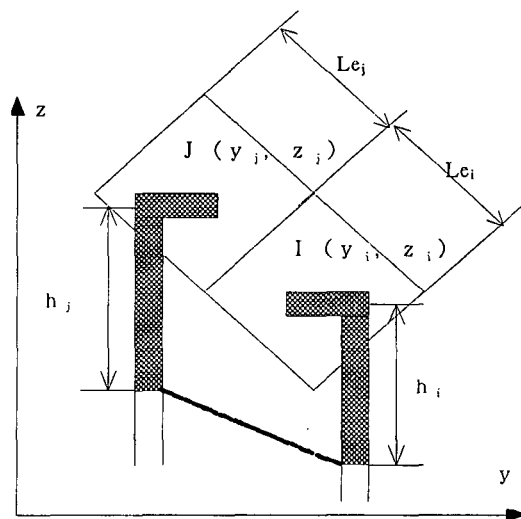


図-6 要素間の水の移動

浸透シミュレーションにおける間隙水の要素間の流れは式(10)に示すダルシーの法則にしたがうものとした。

$$v = k \cdot i \quad (10)$$

ここに、 v : 浸透流速、 i : 動水勾配。

不飽和土に水が浸透していく場合、各要素の体積含水率の変化に従って透水係数 k が変化するが、それは間隙モデルにおける透水係数を求める式(3)で計算できる。

本シミュレーションモデルでは要素間の水の移動については隣接した 2 つの要素間で考える。図-6 において 2 要素が隣接しているかの判定は、2 要素間の距離と要素の大きさを比較する。式(11)が成り立つとき 2 要素は隣接していると考えられる。

$$\frac{L_{e_i} + L_{e_j}}{2} = \sqrt{(y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (11)$$

ここに、 L_{e_i} : 要素 I の一辺の長さ、

(y_i, z_i) : 要素 I の中心座標、

(y_j, z_j) : 要素 J の中心座標。

図-6より要素 I, J 間の動水勾配は式(12)で表せる。

$$i(I, J) = \frac{(z_j + h_j) + (z_i + h_i)}{\sqrt{(y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}} \quad (12)$$

ここに、 $i(I, J)$: 要素 I, J 間の動水勾配
 h_i, h_j : それぞれ要素 I および要素 J の水頭
(≥ 0)。

また、式 (10)より、シミュレーションを行う際の 1 ステップあたりの時間増分の間に要素 I から要素 J へ流入する、あるいは要素 I から要素 J へ流出する水の量は式(13)で求められる。

$$\Delta Q(I, J) = k \cdot i(I, J) \cdot A \cdot \Delta t \quad (13)$$

ここに、 $\Delta Q(I, J)$: 1 ステップで要素 J から要素 I へ流入する水の量、
 A : 要素 I, J 間の接触面積、
 Δt : 1 ステップあたりの時間増分。

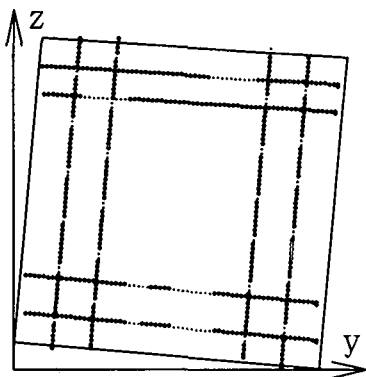


図-7 地盤のモデル化

シミュレーションを行う場合、地盤のモデル化を示した図-7 からわかるように、各要素は複数の要素と接している。このことを考慮すると、1 ステップにおける要素 I の含水量の変化量は式(14)で計算できる。

$$\Delta Q(I) = \sum_{j=1}^n \Delta Q(I, J) \quad (14)$$

ここに、 $\Delta Q(I)$: 1 ステップでの要素 I の水量の変化量、
 n : 要素 I に接触している要素の数。

よって Δt 秒後の要素 I の含水量は式(15)となる。

$$Q(I, t + \Delta t) = Q(I, t) + \Delta Q(I) \quad (15)$$

ここに、 $Q(I, t)$: 要素 I の時刻 t における含水量。

2. 3 2 粒子モデル

斜面の崩壊挙動の解明を困難にしている 1 つの要因として、地盤が不飽和状態にあることが挙げられる。不飽和状態では土粒子接点部分に間隙水を保持してメニスカスを形成している。これは、水の表面張力に起因するもので、その保持力をサクションと呼んでいる。土粒子同士はこのサクションによって互いに引きつけられており、不飽和状態にある斜面等では、晴天時は、この力によって安定な状態となっている。このような状態の斜面に雨が降り、土中に雨水が浸透することによって、サクションが低下（土粒子同士の引きつけ合う力が低下）し、不安定な状態となる。

図-8 は半径 r の 2 粒子（球）の接触したモデル（2 粒子モデル）である。ここでは、2. 1 節の間隙モデルより求められた間隙比 e 、体積含水率 W_v に対応したある厚さ Δr の水膜を有する個々の粒子が接触し、メニスカスが生じるものと仮定している。メニスカスの曲率半径を a 及び r' とする。曲率半径 a を求めるために水膜の重なった部分の体積を利用すると、飽和度が 100% でも粒子間力が存在するという矛盾が発生する。また、間隙モデルでの DH を崩壊モデルでの粒子半径 r と関連づける必要がある。これらのことを考慮し、本論文では $a : d/2 = r : DH/2$ を仮定した。この妥当性の検討は今後の課題である。曲率半径 a が求まると、図-8 の幾何学的関係から r' が求められる。

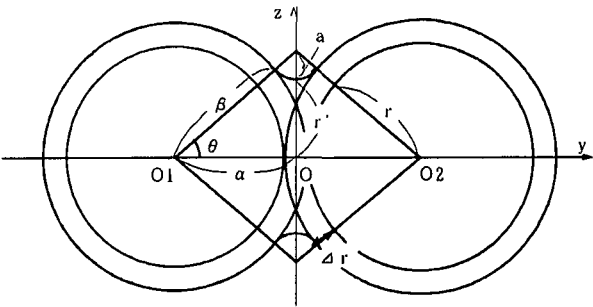


図-8 2 粒子モデル

粒子間力 F_i は、接している 2 粒子にできるメニスカスの曲率半径 r' の円周に水の表面張力 T_s が働き、円の面積にサクション h_c が働くことにより、粒子間力が次式で求められる。

$$\begin{aligned}
 Fi &= 2\pi r' Ts + \pi r'^2 h_c \\
 (r' + a)^2 &= (a + \beta)^2 - \alpha^2 \\
 \alpha &= r + \Delta r/2, \beta = r + \Delta r
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

ここに、 Fi ：粒子間力。

これによりサクションに起因する粒子間力を粘着力と考え、粘着力の低下によって粒状体の崩壊を表現する崩壊モデルに結び付けることができる。

2. 4 崩壊モデル

崩壊モデルでは、土粒子レベルに着目し、個々の力、モーメントのつりあい式をそれぞれ解き、動き出した粒子については個々に運動方程式、Newton の反発の法則、運動量の保存則を適用し、崩壊挙動を解明しようとしている。

また、水の浸透現象については、2. 1 節 間隙モデル、2. 2 節 浸透挙動で述べた手法によりシミュレーションを行い、その結果を崩壊挙動を表すシミュレーションに組み込み、水の浸透から土が流動・堆積する現象を統一的な考えの基に解明しようとするものである。

(1) 地盤のモデル化

崩壊シミュレーションを行う場合の初期状態を、図-9 に示すように想定する。これは、同一直径の球を垂直に積み上げた状態では、計算上は安定してしまい崩壊が生じない。そこで底面に傾き β_s を与えることによって、計算上不安定にし、底面と粒子間に摩擦力、粒子間に粘着力を与えることで、底面を傾けた状態で安定させることができる。図-6、図-7 の1つの要素が、図-9 の4粒子と対応している。

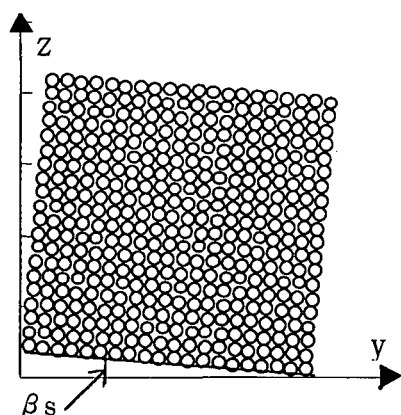


図-9 崩壊挙動のモデル斜面

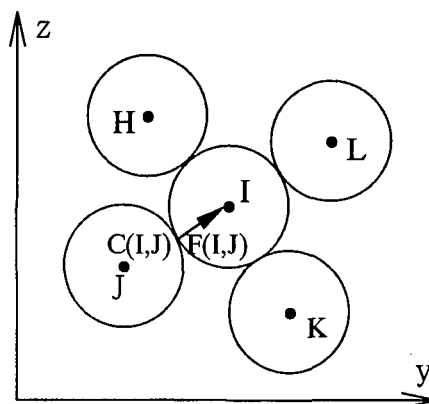


図-10 粒子に働く力

(2) 粒子間に働く力

図-10 は、図-9 の一部の粒子を抜き出したものである。粒子 I は4つの粒子と隣接しており、それらの接点を $C(I, H)$, $C(I, J)$, $C(I, K)$, $C(I, L)$ とする。その接点には、粒子の自重及び粒子間の粘着力による粒子間力が粒子の中心方向に働いている。接点 $C(I, J)$ での粒子間力を $F(I, J)$ とすると、 $F(I, J)$ は式(17)のように表せる。

$$F(I, J) = T(I, J) + M(I, J) \tag{17}$$

ここに、 $T(I, J)$ ： $C(I, J)$ で形成されるメニスカスによる粒子間力（式(16)で定義、すなわち $T(I, J) = Fi$ ），
 $M(I, J)$ ： $C(I, J)$ より上にある粒子の自重による粒子間力の合力。

また、粒子 I が自重及び他粒子から受ける粒子間力によって、 $C(I, J)$ で滑動力が働いている際には、すべり面（接平面）に沿って摩擦抵抗力 MF が滑動力と反対の方向に働き、式(18)ようになる。

$$MF(I, J) = F(I, J) \cdot \tan \phi \tag{18}$$

ここに、 $MF(I, J)$ ： $C(I, J)$ における摩擦抵抗力、
 ϕ ：粒子間摩擦角。

粒子 I が不安定になり落下するのは、各接点に働く力のつりあいが破れた場合と、粒子中心を通る水平線以下の接点でのモーメントのつりあいが破れた場合である。

図-10 のように粒子 I が粒子中心を通る水平線以下に接点を2つ有する場合、粒子 I の自重と粒子 H, L から受ける

力はすべて粒子J, Kの中心方向に伝わる。このとき粒子Iについて考えると粒子J, Kとの接点で生じる反力によって粒子Iに働く力はつりあうので、粒子Iに滑動力は発生しない。また、粒子Iは、粒子J又は粒子Kが移動しない限り転がり落ちることはない。よってこの場合は力のつりあい、モーメントのつりあいについて考慮しなくてよい。この考えは粒子Iの中心を通る水平線以下の接点が3点、4点になった場合にも適用できる。

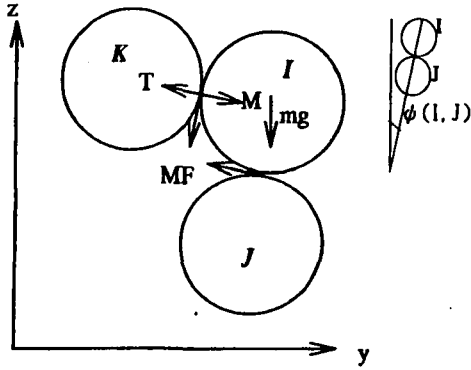


図-11 粒子中心を通る水平線以下に接点が1つしかない場合

図-11 は、粒子中心を通る水平線以下に接点が1つしかない場合を示している。この場合、粒子Iはすべり落ちる可能性も転がり落ちる可能性もあるので、つぎに示す力のつりあい式(式(19), (20))、モーメントのつりあい式(式(21))によって粒子が落下するか判定を行わなければならない。

y軸方向:

$$P(I)_y \geq MF(I, K) \sin \phi(I, K) + MF(I, J) \cos \phi(I, J) \quad (19)$$

z軸方向:

$$P(I)_z \geq MF(I, K) \cos \phi(I, K) + MF(I, J) \sin \phi(I, J) \quad (20)$$

モーメント:

$$mg \cdot r \sin \phi(I, J) + M(I, K) \cdot r \geq T(I, K) \cdot r + MF(I, K) \cdot r \quad (21)$$

ここに、 $P(I)_y$: 粒子Iの滑動力のy軸方向成分
(ここでは $P(I)_y = M(I, K) \sin \phi(I, K)$),
 $P(I)_z$: 粒子Iの滑動力のz軸方向成分
(ここでは $P(I)_z = M(I, K) \cos \phi(I, K) + mg$),
 $\phi(I, J)$: 粒子Iと粒子Jの粒子接点角,
 m : 粒子の質量,
 g : 重力加速度。

式(19)~(21)において、左辺は粒子を動かそうとする力、右辺は抵抗する力を示している。すべての粒子について上記の判定を行い、式(19)~(21)の関係を満たしている場合(左辺 $\geq$ 右辺となった場合)、粒子は移動を始める。

(3) 粒子の落下

不安定になった粒子は、放物運動(自由落下)をしてみると、粒子に働く力は鉛直下向きにはたらく重力だけであるので、y軸方向z軸方向について、式(22)および式(23)がなりたつ。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = 0 \quad (22)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -mg \quad (23)$$

粒子が落下しているときも間隙流体からの抗力を受けており、そのことを考慮することを試みている⁴⁾が、本論文では間隙流体の影響を考えていない。

時刻tにおける粒子の速度及び位置は式(22)および式(23)を解くことにより求められる。

粒子が落下して他の粒子に衝突したときは、2粒子の衝突を考える。粒子が他の粒子と衝突するかの判定は粒子間の距離によって、式(24)がなりたつとき2粒子は衝突していると判定する。

$$\sqrt{(y_1 - y_2)^2 - (z_1 - z_2)^2} \leq r_1 + r_2 \quad (24)$$

ここに、 (y_1, z_1) , (y_2, z_2) : それぞれの粒子位置,
 r_1, r_2 : それぞれの粒子半径。

図-12は、2粒子が衝突する様子すなわち、y軸に対し角度 β の方向に速度ベクトル $|u_1|$ で進んでいた質量 m_1 の球1が角度 α の方向に速度ベクトル $|u_2|$ で進んでいた質量 m_2 の球2と衝突し、その後それぞれy軸に対して β' , α' の方向に速度ベクトル $|u_1'|$, $|u_2'|$ で進んでいく様子を示している。

このとき、運動量が保存され、Newtonの反発の法則が成り立つものとする、式(25)、式(26)が成り立つ。

$$m_1 |u_1| + m_2 |u_2| = m_1 |u_1'| + m_2 |u_2'| \quad (25)$$

$$e = - \frac{(|u_1'| - |u_2'|)}{(|u_1| - |u_2|)} \quad (26)$$

ここに、e: 反発係数。

3. シミュレーションならびに考察

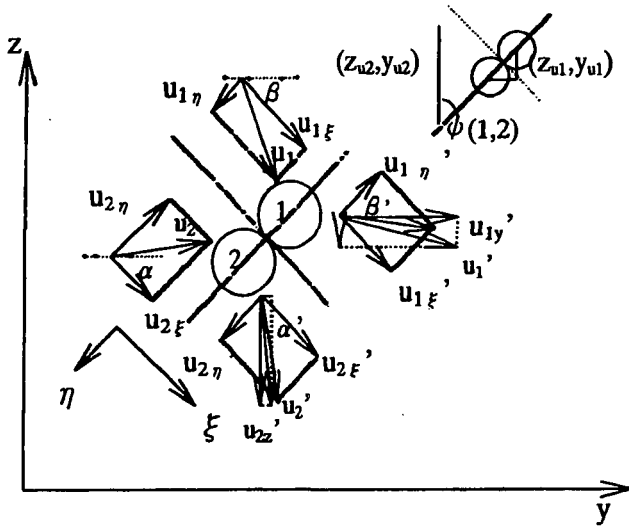


図-12 2粒子の衝突

式(25)と式(26)を連立させて解くことにより、衝突直後の速度 u'_1, u'_2 は式(27)、式(28)となる。

$$u'_1 = u_1 + \frac{m_2(1+e)}{m_1+m_2}(u_2 - u_1) \quad (27)$$

$$u'_2 = u_2 - \frac{m_1(1+e)}{m_1+m_2}(u_2 - u_1) \quad (28)$$

また、そのときの接平面と y 軸のなす角 $\phi(1,2)$ は、式(29)と書ける。

$$\phi(1,2) = \tan^{-1} \left(- \frac{(z_1 - z_2)}{(y_1 - y_2)} \right) \quad (29)$$

粒子が底面と衝突する場合には、底面の摩擦抵抗も考慮する。そのとき、粒子の y 軸方向の運動は式(22)ではなく式(30)にしたがうと考えた。

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -mg \cdot \tan \phi \quad (30)$$

ここに、 ϕ : 粒子と底面の摩擦角（粒子間摩擦角と等しいと仮定）。

これらの式を用いると、土塊を想定した粒状体の浸透・崩壊・流動挙動がコンピュータによってシミュレーションできる。

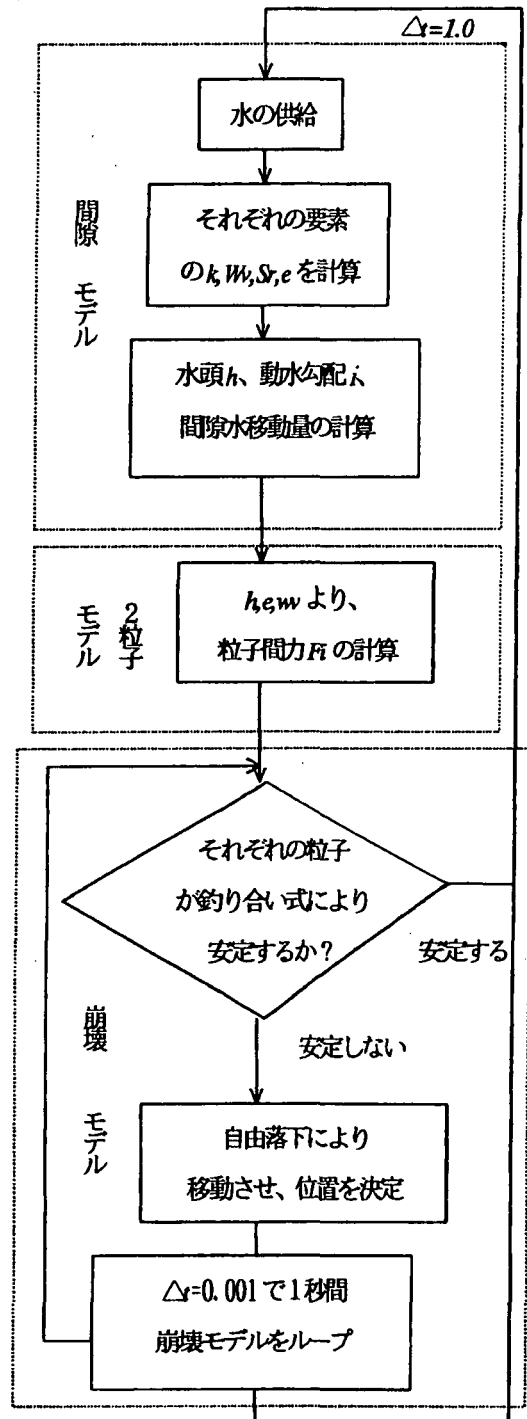


図-13 フローチャート

図-13は数値実験の手順を示すフローチャートである。「2. モデルの概要」で示した式(1)～(8)を用い、間隙モデルより水分特性曲線を算出し、式(9)～(15)を用い、それぞれの要素の間隙水移動量を求める。つぎに2粒子モデルを適用して粒子間力を求め、それぞれの粒子の釣り合い式（式(19)～(21)）により安定すれば、再び間隙水を移動させる。そうでなければ、崩壊モデルのループにより粒子が移動を始める。

表-1 数値実験に用いた入力パラメータ

間 隙 モ デ ル	
素体積高さ (cm)	0.00024
水の粘性係数(gf/s/cm ²)	1.161×10^{-5}
水の表面張力(gf/cm)	0.075
管径の平均(cm)	$10^{-3.62}$
管径の標準偏差(cm)	$10^{0.214}$
図-5の ζ	0.159
浸 透 挙 動 の モ デ ル 斜 面	
要素の数	100
要素の大きさ(cm)	4*4
傾斜角(°)	5.0 or 10.0
初期体積含水率	0.35
時間増分(sec)	1.0
水分増量(mm/10min)	10.0
崩 壊 挙 動 の モ デ ル 斜 面	
粒子数 (個)	400
粒子半径(cm)	1.0
反発係数	0.2
粒子密度	2.58
粒子間摩擦角	30.0
時間増分(sec)	0.001

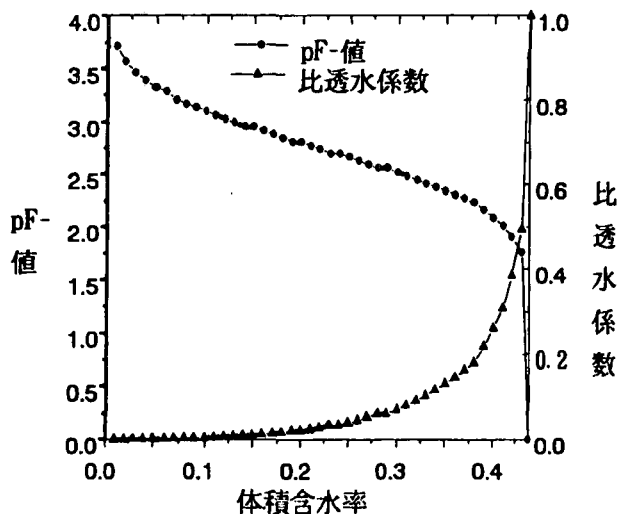


図-14 水分特性曲線

表-1は数値実験に用いた入力パラメータとそれらの具体値である。間隙モデルではしらすを考慮し、それぞれのパラメータを与えている。計算結果は図-14のようになる。

浸透挙動については、傾斜角5°と10°について数値実験を行った。要素数は100、飽和に近い状態を想定して初期体積含水率は0.35としている。水分増分

は図-7の上部、底部より供給される。

崩壊挙動では間隙モデルの1要素に4つの粒子が存在するとして計算を行っている。

傾斜角5°と10°についての計算結果を図にしたものが、図-15～図-18である。どちらのケースも600秒ほどで第一列が崩れ、その後、多少時間がたち次が崩れ始める。これは第一列の底部の粒子が飛び出して崩れ、それらが、第二列目の底部の支えとなったためと考えられる。つぎに、図-17では、少しずつ列がはがれるように崩れ始め、図-18では、数列まとめて崩れている。

4. あとがき

斜面崩壊や土石流の発生・流動・堆積挙動を解析するための数値力学モデルの提案を行い、若干の数値実験を行った。本研究では、均質な状態を想定してシミュレーションを行っているが、個々の粒子径と構造を変化させることは、原理的に可能である。間隙モデル、崩壊・流動モデルの各段階において、土質試験、現地計測等によってモデルの妥当性の検討が今後必要である。また、コンピュータプログラムにおいても改良の余地を残している。今後は、これらの課題に取り組んでいきたいと考えている。

本研究は平成9年度科研費（基盤研究（B）、代表：北村良介）の援助を受けた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- 1) Kitamura, R. et al.: A numerical model for seepage through unsaturated soil, Soils and Foundations (to be appeared).
- 2) Kitamura, R., Fukuhara, S. and Kisanuki, G.: Simulation model for flowage of particulate material, J. of Natural Disaster Science, Vol. 17, No. 1, pp. 29-52, 1995.
- 3) 北村良介: マルコフ・モデル過程を用いた粒状体の力学モデル, 昭和61年度科学研究費研究成果報告書, 1987.
- 4) 北村、早田、植村: しらす斜面浸食のモデル化に関する一考察、第33回地盤工学研究発表会, pp. 1849-1850, 1998.

(1998年4月24日 受付)

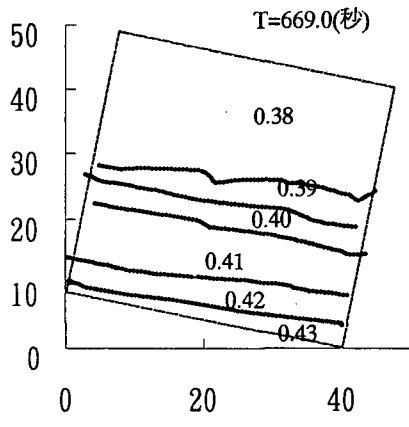
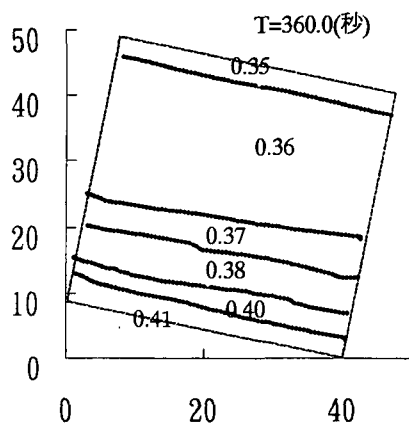
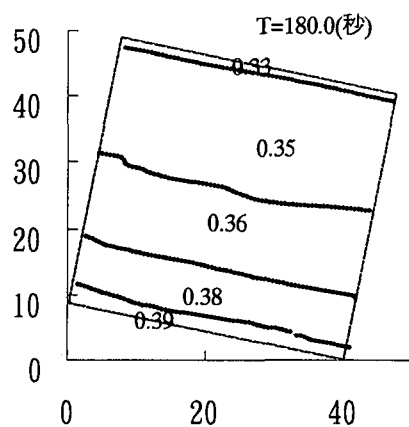
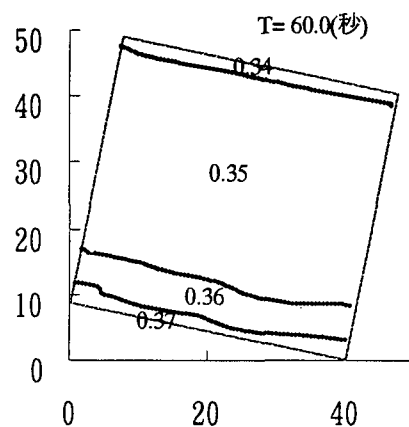
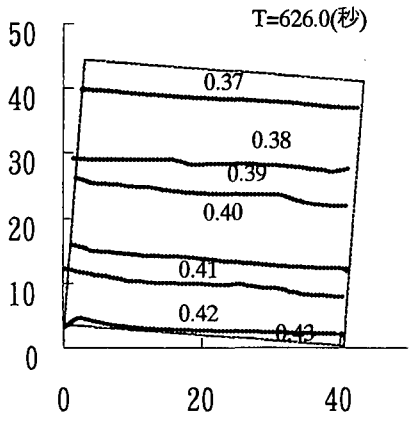
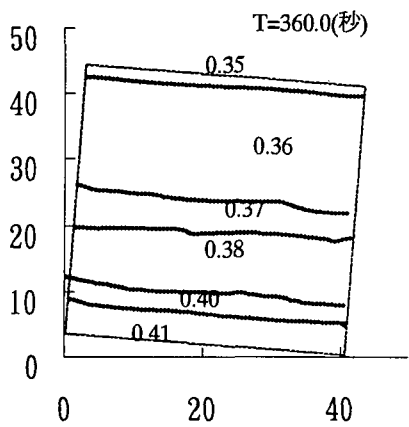
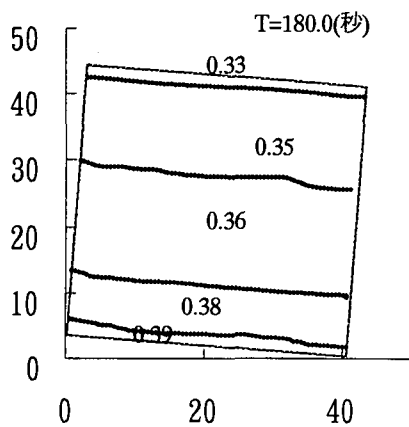
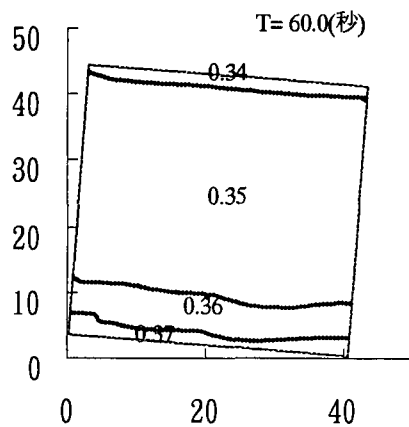


図-15 傾斜角 5° の時の体積含水率の変化

図-16 傾斜角 10° の時の体積含水率の変化

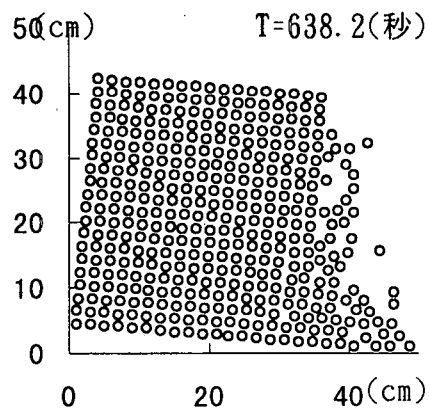
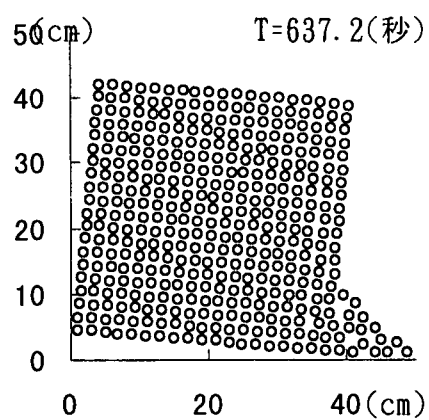
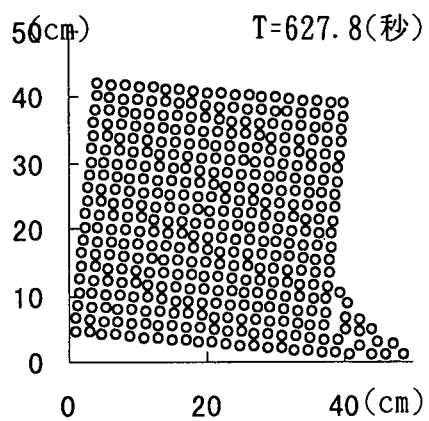
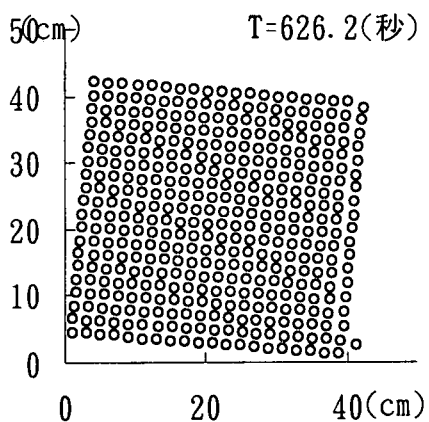


図-17 傾斜角 5° の時の崩壊挙動

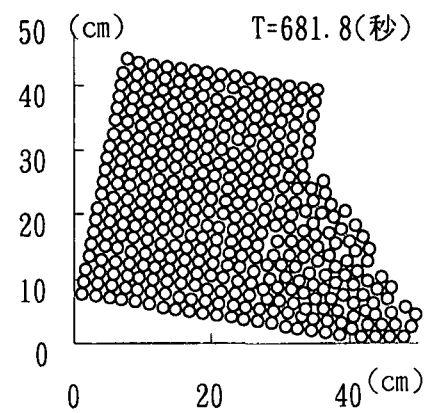
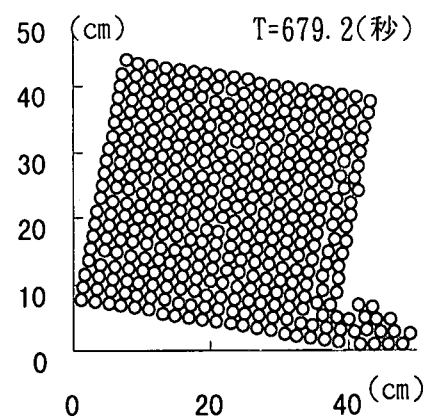
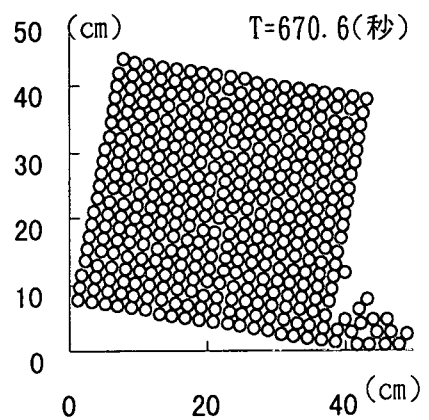
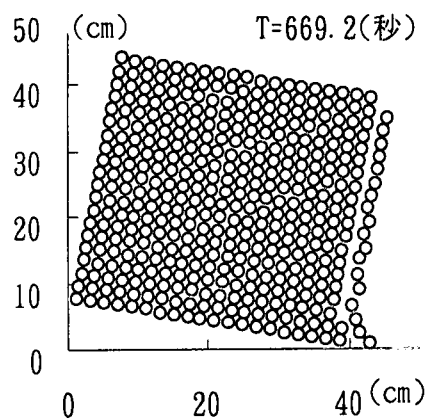


図-18 傾斜角 10° の時の崩壊挙動