

確率降雨量を用いた応力変形・浸透解析

株式会社 構造計画研究所 ○ 藤 岡 徹
林 保 志

1 はじめに

斜面崩壊が発生する原因として浸透流による間隙水圧の増加、すなわち有効応力の減少がある。本報告では、飽和-不飽和浸透流を考慮した応力変形解析を行うことにより、雨量強度の時間的変化および浸透流(間隙水圧)の時間的変化を考慮した斜面安定検討について述べる。従来の斜面安定解析では、降雨データとして実際の雨量強度分布をそのまま用いる場合を除き、適当な雨量強度を時間的に矩形分布として入力する場合が多々あった。これに対し、本報告で採用する降雨データは既存の降雨資料をもとに確率統計的な手法により雨量強度および時間的降雨分布を作成するものである。したがって、適当な確率年の雨量強度に対しての斜面安定検討を行うことができ、現実 に即した解析ができることになる。例題として昭和58年度台風10号による三重県の災害例をとりあげ、平面的な斜面崩壊危険箇所の選定から危険箇所の鉛直断面における応力変形・浸透解析を行い、本報告で採用した手法の妥当性を検討するものである。また、安定検討の方法として通常は粘着力および内部摩擦角を定数として取り扱うが、本報告では粘着力に着目して、粘着力は飽和度に依存すると考え、粘着力を飽和度により変化させて斜面のすべり安全率を求めることを試みた。なお、本報告で検討のために用いるプログラム・システムは傾斜地開発安定検討システム(LAND-SLIDE)の一部であるので、まず、このシステムについて概述する。

2 システムの概要

図-1にシステムの流れ図を示す。本システムでは、斜面安定検討を全流域における斜面崩壊危険箇所の検討(sub 1～sub 4)と各危険箇所における精査(sub 5～sub 6)の2つに分けて行う。

全流域における検討では、平面的な斜面崩壊危険箇所の検討を数理統計的な手法を用いて行う。対象地区において斜面崩壊を起こす要因(地形特性、地質、植生、降雨条件等)と考えられる項目を選び、空中写真または地形図等から各項目データを採取し統計処理し易いように適当な大きさのメッシュデータに変換する。メッシュ化された各項目データを説明変数として数理統計的な手法(たとえば林¹⁾の数量化理論、判別分析等)を用いて予測式をたて、対象地区内のメッシュデータについてモデル値を算出し崩壊・健全の判定から斜面崩壊モデルを作成する。斜面崩壊モデルおよび降雨条件、要因として選択された項目間の相関図をカラーディスプレイ上へ出力しモデルの妥当性の検討を行う。このようにして、モデルを何度かリファインし精度の高い予測モデルの中から精査を行う危険箇所を選定する。

危険箇所における精査では、鉛直2次元断面の斜面安定解析を有限要素法を用いて行うが、手法として次の2とおりのうちいずれかを選ぶことができる。

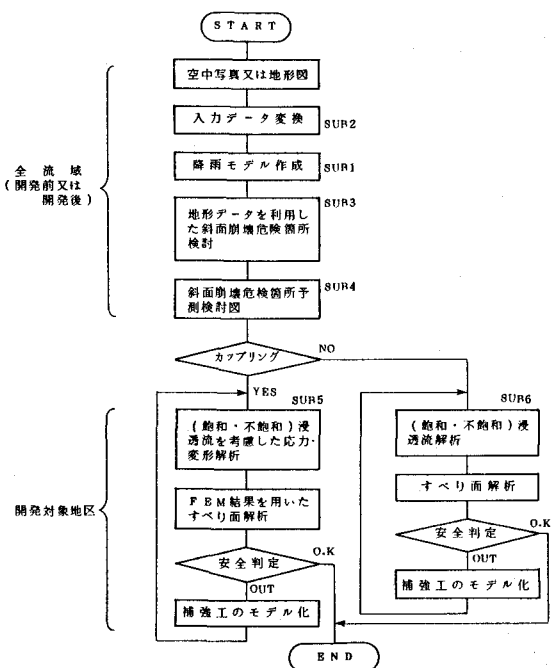


図-1 システムの流れ

一つは、応力変形・浸透解析を行った後、計算結果の応力を用いてすべり面解析を行う方法であり、他の一つは飽和・不飽和浸透流解析を行った後、計算結果の間隙水圧を用いて円弧すべり面解析（簡略法）を行う方法である。どちらの方法も、安全判定において危険と判断された時には補強工等をモデルに反映させて再度の解析により安全検討を行うことができる。また、応力変形・浸透解析では、sub 1により作成された任意の確率年における降雨ハイトグラフをデータとして考慮することができ、より現実に即した斜面安定解析を行うことが可能となっている。

3 確率降雨量

確率降雨量は一般によく知られているので、ここでは実例を用い簡単に紹介する。防災計画の上で降雨量として問題となるのは、ある降雨量が生じる確率よりも、その降雨量以上の起こる確率が問題となる。このような確率を超過確率といい、降雨量 R がある値 X を超える割合が T 年に 1 回と期待されるとき、この T 年を X の確率年、X を T 年確率降雨量と呼ぶ。確率降雨量の算定には、通常は極値データ（年最大日雨量等）が用いられ、これらのデータの確率密度関数がどのような分布形に従うかによって計算方法が異なる。本報では、津市気象台における 1901 年～1976 年までの 77 個の年最大日雨量の降雨資料をもとに、岩井法²⁾によって表-1に示すような確率降雨量を得た。一方、台風 10 号により津市気象台が観測した日雨量（8 月 1 日）は約 219 mm であり、表の計算結果と比べると同降雨は約 20 年確率の降雨であることがわかる。確率降雨量を時系列へ展開するために、ここでは台風 10 号による実降雨の配分パターンを用いて確率降雨量を面積比例配分³⁾し、図-2に示す降雨モデル（ハイトグラフ、時間間隔 1 時間）を作成した。表-1に示す確率降雨量と地形データ等の環境項目をメッシュデータに変換することにより、平面的な斜面崩壊危険箇所の検討を行うことができるが、これについての詳細は別報⁴⁾に譲るとして、ここでは図-2の降雨モデルを入力データとして用いた応力変形・浸透解析について述べる。

表-1 確率降雨量

確率年	超過確率 (%)	確率降雨量 (mm)
2	50.0	125.1
5	20.0	172.0
10	10.0	204.8
20	5.0	237.4
30	3.3	256.7
50	2.0	281.3
70	1.4	297.8
100	1.0	315.6

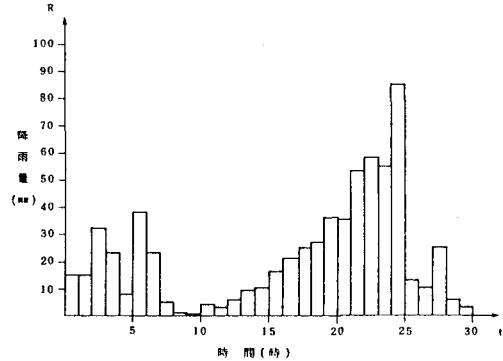


図-2 降雨モデル（T=20）

4 応力変形・浸透解析

本システム（LAND-SLIDE）で用意されている鉛直 2 次元断面の斜面安定検討の手法としては、前述したように 2 種類の方法が選択できるようになっている。円弧すべり面解析（簡略法）については良く知られているので、ここでは応力変形・浸透解析についてのみ簡単に述べておく。

応力変形・浸透解析は、地盤骨格と水のカップリング問題を扱い、応力変形と浸透流の支配方程式を連立させて解くものである。したがって任意のハイトグラフに対して、地盤と水の相互作用を把握することができる。基礎方程式は以下の 5 式である。ただし、基礎方程式は飽和・不飽和領域の一般式で表わす。

$$(\sigma_{ij} + \chi \delta_{ij} \gamma_w \psi), j + \rho_s b_i = 0$$

（有効応力に対するつり合い式）

$$-(\rho_f \cdot v_i), i = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \cdot \theta)$$

（浸透水の連続式）

$$v_i = -k(\theta) \cdot h, i$$

（浸透水の運動方程式）

$$\sigma_{ij}' = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl}$$

（応力-ひずみ関係式）

①

②

③

④

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (\text{ひずみ-変位関係式}) \quad \text{--- ⑤}$$

ここに、 σ_{ij} ；有効応力、 χ ；体積含水率に依存するパラメータ（飽和状態で $\chi=1$ ）、 δ_{ij} ；クロネツカのデルタ、 γ_w ；水の単位重量、 ψ ；圧力水頭、 ρ_s ；地盤材料の密度、 b_i ；物体力、 ρ_f ；間隙水圧、 v_i ；流速、 θ ；体積含水率（ n を間隙率、 S_r を飽和度とすると、 $\theta = n S_r$ ）、 $k(\theta)$ ；体積含水率 θ に依存するパラメータ（飽和状態で $k(\theta) = k_s$ 、 k_s は透水係数）、 h ；全水頭（ $h = \psi + z$ ）、 C_{ijkl} ；弾性定数、 ϵ_{kl} ；ひずみテンソル、 u_{ij} ；変位ベクトル、なお添字 i, j, k, l は空間座標の方向を表わし、 $, j$ は偏微分を示す。式①～式④より未知数 u_i 、 ψ に対する連立方程式を求めると、飽和-不飽和領域における浸透現象と応力・変位の相互作用の問題の支配方程式を式⑥、式⑦のように得ることができる。

$$\left[\frac{1}{2} C_{ijkl} (u_{k,l} + u_{l,k}) + \chi \delta_{ij} \gamma_w h \right], j + \rho_s b_i = 0 \quad \text{--- ⑥}$$

$$[k(\theta) h, i], i - \frac{\partial u_{i,i}}{\partial t} S_r - C(\psi) \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad \text{--- ⑦}$$

支配方程式を解くための初期条件及び境界条件は以下のとおりである。

(i) 初期条件 $u_i(\underline{x}, t) = u_i(\underline{x}, 0)$, $h(\underline{x}, t) = h(\underline{x}, 0)$ 、ここに、 $\underline{x}$ ；その点の位置ベクトル

(ii) 境界条件

- ・ 変位既知 $u_i(\underline{x}, t) = \hat{u}_i(\underline{x}, t)$ 、ここに、 $\hat{u}_i$ は既知の値であることを示す。
- ・ 応力既知 $\sigma_{ij}(\underline{x}, t) n_j(\underline{x}) = \hat{T}_i(\underline{x}, t)$ 、ここに、 $\hat{T}_i$ ；既知の表面トランクシオン、 n_j ；法線ベクトル
- ・ 水頭既知 $h(\underline{x}, t) = \hat{h}(\underline{x}, t)$
- ・ 流量既知 $\{k(\theta) \cdot h_i\} \cdot n_i = -\hat{Q}(\underline{x}, t)$ 、ここに $\hat{Q}(\underline{x}, t)$ ；既知流量
- ・ 浸水面 浸出面の境界条件を満足するようにプログラム内部で繰返し計算を行う。
- ・ 降雨境界面 降雨強度と地盤内部のポテンシャル分布を考慮して、降雨境界の境界条件を満足するようにプログラムの内部で繰返し計算を行う。

支配方程式⑥、⑦式をガラーキン法により定式化し、初期条件および境界条件式のもとで未知数について解けば、浸透現象と地盤の応力・変形の相互作用の解を得ることができる。

5. 解析例

精査として応力変形・浸透解析を行った。本来ならば、実際の崩壊箇所を対象としてシミュレートすべきであるが、自然斜面であるため物性値を正確に把握することが困難なことから、とりあえずは定量的判断よりも定性的判断を先にすることとし、物性値は適当な値を設定し、モデル形状のみは三重県の被災例（三重県美杉村）の相似形を用いて解析することにした。モデルは図-3に示すような表層と岩盤の2層構造として、表層、岩盤それぞれの物性値は表-2に示すものを用いた。図-3には自重のみを考慮した初期応力解析の結果も併記してある。境界条件は、モデル底部が変位固定、モデル左右端が鉛直方向ローラーとし、浸透流の境界条件としては、モデル底部が不透水、モデル左右端は対称条件とした。また、斜面は降雨境界面として、図-2に示す降雨強度分布を入力として与えた。

図-4に計算結果の一例として表層の飽和度が最大（75.2%）になったときの飽和度の分布を示す。初期飽和度が66%であるから、降雨（20年確率降雨）に比べて飽和度の上昇が小さいようにも思われる。これは、表層の透水係数の値が小さいことと初期条件としてのポテンシャルの分布に勾配をもたせなかった（一様に66%の飽和度とした）ことによる。主応力（有効応力）の変化は、飽和度が上がるにつれて減少する傾向を示したが、初期応力の値に比べれば小さいものであった。

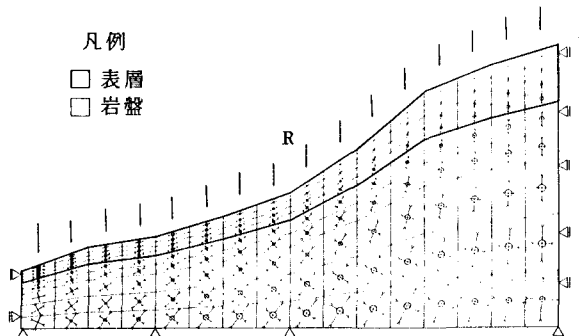


図-3 初期応力図

次に斜面安定検討としてすべり安全率を計算したので、これについて述べることにする。すべり安全率は通常の円弧すべり面解析（簡略法）と有限要素法の応力の結果を用いたすべり面解析を行った。後者の方法は、仮定すべり面が横切る有限要素の応力を仮定すべり面に射影して抵抗力とすべり力を求め、それらをすべり面に沿って足し合わせてすべり安全率を計算する。図-5に初期状態と $t = 26.0$ h（表層の平均飽和度最大時）の上記の計算結果を示す。ただし、 $t = 26.0$ hの計算では単位体積重量を平均飽和度に対応するように変えた。また、抵抗力の計算では粘着力と内部摩擦角を使うが、粘着力は飽和度の値により変化すると考え⁵⁾、次式により計算した粘着力を用いた。

$$C = C^* \cdot C_{\max} \\ = (1.0 - 0.018 \Delta S_r) \cdot C_{\max} \quad \text{--- ⑧}$$

ここに、 $\Delta S_r = S_r - S_r^*$ で S_r は飽和度、 S_r^* は土質の差にかかわらず C がピーク値をとる飽和度の平均値で e_0 から決まる定数、 $C_{\max}$ はピーク粘着力

ちなみに、 $S_r = 75.2\%$ のときの粘着力は 1.74 (t/m^2)であった。

6. おわりに

以上、簡単ではあるが、LAND-SLIDEの一部を用いた斜面安定検討について報告した。今回の報告では解析例として限られたものしか発表できなかったが、実際の斜面安定検討を行うときには、降雨パターンをいろいろ変えたり、または物性値の正確な把握のもとに種々のケース・スタディが必要であろう。特に、今回の報告の最後に簡単に触れたが、すべり安全率の計算の際の粘着力の評価については今後とも大きな課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 林知己夫・駒澤 勉：数量化理論とデータ処理，1982，朝倉書店
- 2) 岩井重久・石黒政儀：応用水文統計学，1970，森北出版
- 3) 建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編：建設省河川砂防技術基準，昭和52年，山海堂
- 4) 松林宇一郎・林保志・藤岡徹：数理統計手法を用いた集中豪雨による斜面崩壊危険箇所の検討，第21回自然災害科学総合シンポジウム
- 5) 松尾稔：地盤工学，1984，技報堂

表-2 物性値一覧表

物性種別	区分	表 層	岩 盤
単位体積重量 r_t (t/m^3)		1.7	1.9
初 期 間 隙 比 e_0		0.90	0.86
初期飽和度 S_{r0} (%)		66.0	100.0
初期粘着力 C_0 (t/m^2)		2.55	70.0
内部摩擦角 ϕ (°)		23.0	40.0
弾 性 係 数 E (kg/cm^2)		2.0×10^2	1.0×10^4
ポ ア ソ ン 比 ν		0.40	0.30

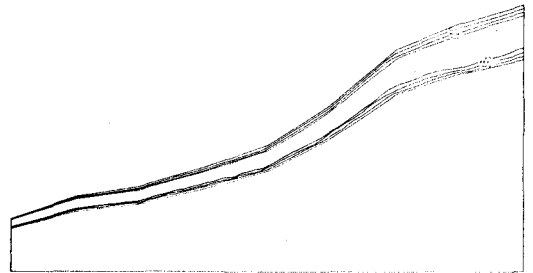


図-4 飽和度の分布 ($t = 26.0$ h)

安全率の計算結果

飽和度	解析手法	円弧すべり	線すべり
$S_r = 66$ 例		2.63	3.52
$S_r = 75$ 例		1.99	2.59
$S_r = 90$ 例		1.01	—
$S_r = 95$ 例		0.76	—

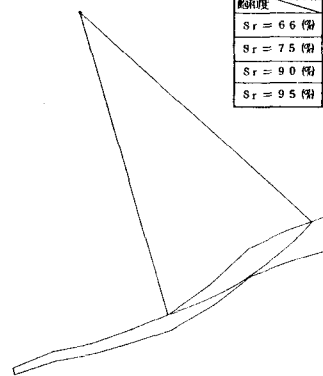


図-5 すべり面解析

注) 線すべりの
仮定すべり
面は円弧す
べり面と同
一