

1. まえがき

斜面安定工は、現在、主に限界平衡法に基づいた計画論で設計がなされている。ところで、この手法では、あるすべり領域内の全体的(総括的)な安定性は評価できるが、すべり領域内の部分的な安定性や実際には現地で発現していることの多い斜面の変位(変形)に対する安定性の評価はできない。しかし、後者の安定性の評価は、現場での維持管理上非常に大きな問題点となっている。

本研究は、集中豪雨(降雨継続時間10⁷分, 総雨量100^{mm})時に地すべり性のクラックが発生し、また、それに対する対策工がなされた斜面をモデルとし、有限要素法と剛体バネモデルを用いたシミュレーション解析により斜面の現状の安定性および対策工事の効果性を評価することを試み、今後の維持管理上の対応を考える為の基礎資料を得る方法を検討したものである。

2. 解析ケース及び解析手法

解析ケースを表-1に示す。表中、一般降雨とは、総雨量10^{mm}とし、異常時降雨とは、直接地すべりの原因となった集中豪雨を示す。

解析手法としては、浸透流解析において雨水の流入という問題を考慮し、飽和-不飽和浸透流解析、また、斜面崩壊解析には、クラック、すべり線といった不連続面を表現できる剛体バネモデル(2次元平面ひずみ条件)を用いた。

3. 解析断面

図-1に、解析断面の対策工及び地質図を示す。

解析断面には、地すべり対策工事とし、斜面上部に、抑止アンカー工、排水ボーリング、斜面下部に法枠工、アンカー工の対策が行われている。

4. 降雨パターン

降雨パターンは、一般的に、過去の雨量資料を用いて、確率強度式、正規曲線を仮定し正規確率紙にプロットして求めるが、データのバラツキが多く、また、データの絶対量が不足していることから、今回の解析では、次のような仮定を行った。

降雨パターン定義とし、降り始めと降り止む時点では、小雨であり、中間において激しい雨となる形を予想する。つまり、降雨強度(R)と時間の関係は、中間に頂点を持ち、上側に凸な曲線状を考え、正弦

表-1 解析ケース

解析名	解析手法
浸透流解析 a. 異常降雨時 b. 一般的降雨時	有限要素法
斜面崩壊解析 a. 自然地山応力状態 b. 湿潤-飽和状態	剛体バネモデル
防災工事終了後の補強効果の確認 防災工事終了後の降雨による影響	剛体バネモデル

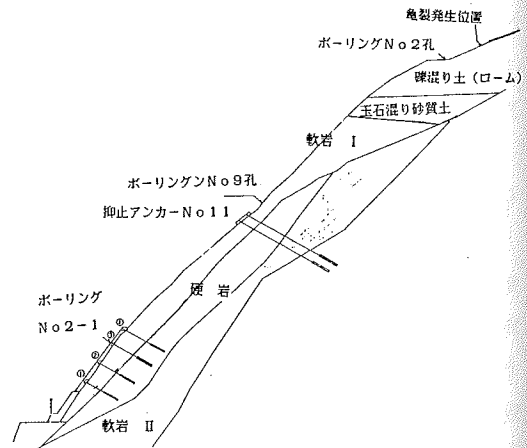


図-1 解析断面地質図及び対策工法

曲線を仮定した。

$$R = A \cdot \sin(\omega t + \theta) + B \quad \text{--- (1) } \omega, \theta; \text{ 地域定数}$$

(1)式を積分し、時間(t)までの降雨量を求めると、

$$\Sigma R = \int_0^t R \cdot dt = a \cdot \cos(\omega \cdot t + \theta) + b \quad \text{--- (2)}$$

以上の仮定を用い降雨パターンを求めた。解析において一般的降雨として、年に2、3回の出現確率雨量である150^{mm}を用いた。そこで、モデル斜面周辺の観測データから、一降雨の総雨量と降雨時間の関係を最小二乗法より求めた。その結果降雨量150^{mm}に対する継続時間は、21.4^{hr}であった。そこで、最も近い現実の雨として、図-2のデータ(総雨量151^{mm}、降雨時間20^{hr})を選び、降雨時間を20^{hr}とし解析を行った。

次に、異常降雨については、図-3に示すように、累積降雨量曲線を折線で近似し、降雨強度(R)と経過時間(t)の関係とした。

5. 地盤定数

各種解析手法に必要な入力定数を、浸透流解析は、表-2 斜面崩壊解析について、表-3に示す。

今回の解析斜面については、これらの物性値そのものについて土質試験結果が得られていない為に、ボーリング柱状図、及び、既往の資料より、各土質の特徴を調べ、各種文献より地盤定数に関するデータを参考とし、地盤定数を決定した。

6. 解析結果

6.1 浸透流解析結果

図-4に、浸透流解析の水圧の分布図を示す。

一般的降雨の場合、5時間後で斜面中腹と法尻付近に飽和域が現れ、雨が激しくなる10時間後では、中腹から軟岩工の土層が飽和域となる。斜面上部では、透水層の為、不飽和域が大きく残っている。その後、雨の降り方は、収まっていくが斜面内では、飽和域がさらに広がり、20時間後に初めて、斜面上部から雨水が大きな流れになって流入していく。斜面崩壊解析には、斜面内水圧が最も高くなる20時間後水圧分布を用いる。

次に、異常降雨時は、16時間後、中腹の軟岩IIの層を除いては、ほぼ全域が飽和域となった。その後

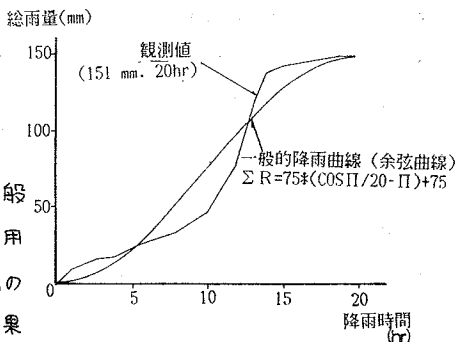


図-2 一般的降雨パターン

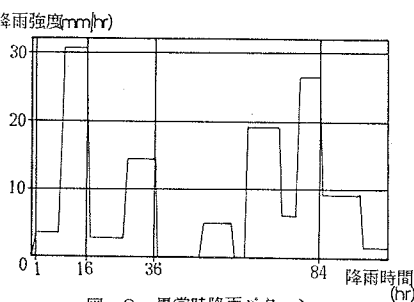


図-3 異常時降雨パターン

表-2 浸透流解析入力定数

土層	γ_d	γ_t	Gs	Wn	e	Ks	Ho	θ_n	Sr
雑混り土	1.60	1.80	2.68	12.5	0.68	5.0×10^{-3}	0.70	0.20	0.50
玉石混り砂質土	1.80	1.90	2.60	5.60	0.44	1.0×10^{-2}	0.45	0.10	0.33
軟岩 I	1.70	1.90	2.70	12.0	0.58	5.0×10^{-3}	0.70	0.10	0.55
軟岩 II	1.80	1.90	2.68	5.60	0.48	1.0×10^{-3}	0.70	0.10	0.31
硬岩	2.20	2.20	2.69	1.00	0.23	1.0×10^{-5}	0.70	0.02	0.11
	L/m3	L/m3		%		cm/sec	m		

表-3 斜面崩壊解析入力定数

土層	γ_t	γ_{sat}	E	ν	C	ϕ	A	I
雑混り土	1.80	2.00	300	0.45	3	16.0	—	0.50
玉石混り砂質土	1.90	2.10	1300	0.33	3	20.0	—	0.33
軟岩 I	1.90	2.00	1700	0.35	5	20.0	—	0.55
軟岩 II	1.90	2.20	5000	0.35	50	35.0	—	0.31
硬岩	2.20	2.20	1.0×10^5	0.33	100	40.0	—	0.11
コンクリート	2.30	2.30	2.7×10^6	0.33	2400	30.0	—	—
アンカー	—	—	2.0×10^7	0.33	1.39×10^9	—	2.9×10^4	6.28×10^1
	L/m3	L/m3	L/m2		L/m2	度	m2	m4

降雨の浸入と斜面上方からの雨水の流入により、中腰部間隙水圧も高くなり、かつ、範囲も拡大していくが84時間以後は、あまり変化は見られない。

異常降雨時については、84時間後の水圧分布を用い、斜面崩壊解析を行う。

6.2 一般的降雨時斜面崩壊解析結果

一般的降雨時の浸透流解析結果の水圧分布を用い、防災工事以前と防災工事終了後について解析を行った結果のすべり線を図-4に示す。

防災工事以前では、水圧分布が高い位置ですべり線が生じており、法尻付近から斜面上法まで、ほぼ一本にすべり線が連なり、防災工事を実施しなければ、総雨量15^{mm}の降雨時に危険な状態であることがわかる。一方、防災工事終了時において、法枠工を実施した部分ですべり線は生じていないが抑止アンカー工より上部では、以前とほとんど変化がない結果が得られた。

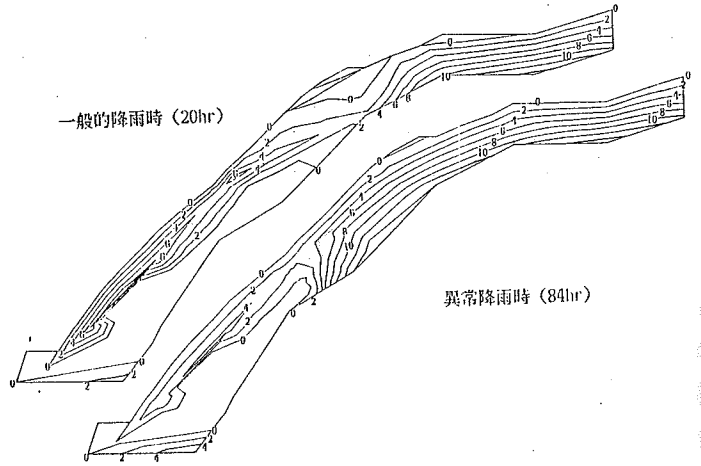
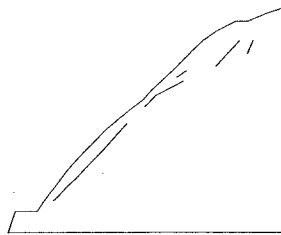
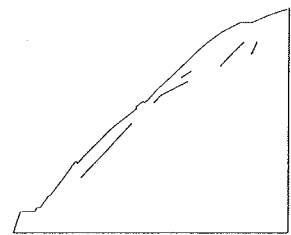


図-4 浸透流解析結果



(a) 防災工事以前



(b) 防災工事終了後

図-5 一般的降雨時斜面崩壊解析結果

6.3 異常降雨時斜面崩壊解析結果

異常降雨時の浸透流解析結果の水圧分布を用い、防災工事以前と防災工事終了後について解析を行った結果のすべり線を図-6に示す。

防災工事以前において、図中の矢印の位置が実際に出現した地表のクラックの位置を示している。解析結果においても、この地点にすべり線が生じる結果を得た。また、解析結果によると、この地点から延びるすべり線が斜面法尻まで、ほぼ連続していることがわかる。一方、防災工事終了後については、法枠工を設置した位置にすべり線はないが、抑止アンカー工上方の斜面において、連続したすべり線が生じる。また、法枠工と抑止アンカー工の間にもすべり線が生じる結果となった。しかし、

実際の斜面においては、抑止アンカー工の上部斜面内に、既に設置されている水抜きボーリング工の効果を浸透流解析に考慮していないので、安全側の結果であると考えられる。

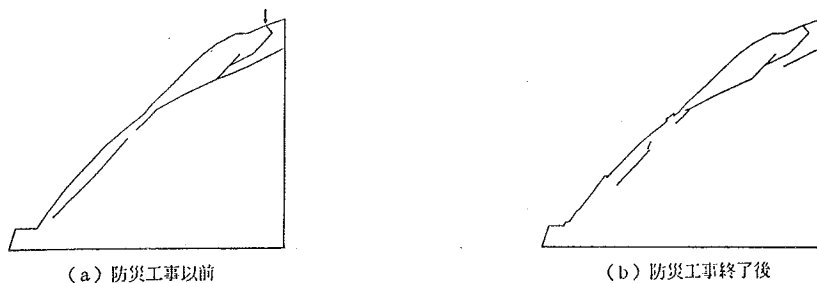


図-6 異常降雨時斜面崩壊解析結果

7. まとめ

有限要素法と剛体バネモデルを用いて解析を行い、結果をまとめると次のようになる。

- 1) 一般的降雨時には、降雨強度がピークになる時点よりも、それ以後において斜面内に大きな水圧が発生する。
- 2) 1)の理由により、防災工事終了後も依然として、斜面中腹部にすべり線を生じる。しかし、このすべり線は、防災工事によるアンカー支保効果より、地表面には達しない。
- 3) 異常降雨時は、降り始めから16時間後にはほぼ全域にわたって飽和状態となっている。この時から斜面内上方の山側から雨水の流入が始まり、頭部間隙水圧が上昇する。そして、84時間後に、斜面頭部にクラックとなり現われた。解析結果から、この斜面は、崩壊寸前であったと考えられる。
- 4) 防災工事により斜面は、安定化し法枠設置箇所においてその効果は、顕著に現われた。
- 5) 異常降雨が発生した場合は、抑止アンカー設置箇所より下方斜面崩壊の危険性は、少ないが抑止アンカー工より、上部ではさらに上方の山側からの雨水の流入があり危険性がある。しかし、実際には、水抜きボーリング工があり、解析では、それを考慮していないので安全側の解を与えていると考えられる。

今回の解析では、少ない地盤情報から異常降雨時、斜面上部にクラックが入るといった現象を解析のチェック事項とし定数を仮定し、シュミレーション解析を実施した。

現在の斜面の補強対策、維持管理の考え方は、比較的現場技術者の経験的判断にゆだねられていることが多い。しかし、今回のような、既往のプログラムを用い斜面の降雨に対する影響について、浸透流解析、斜面崩壊解析などの総合的解析を行うことにより、斜面の状態、斜面の挙動予測を行い、斜面に対しどのような補強対策を行えば良いか、また、斜面のどの位置で、どのような動態観測を行えば良いか、ということについて現場技術者の1つの判断材料となると考えられる。

<参考文献> 1)川本・林；地盤工学における有限要素法解析,1978 2)川井・竹内・渡田；新離散化Eモデルによる極限解析について、第36回土木学会年次講習会概要集 P326～P327