

## 広島市の降雨による斜面崩壊

## Slope Failure Due to Rainfall in Hiroshima City

畦地晶美\* (Akiyoshi Azechi)

大竹勉\*\* (Tutomu Ohtake)

滝昌和\*\*\* (Masakazu Taki)

キーワード: 降雨/斜面安定/まさ土/浸透/不飽和土 (IGC: E-6)

## 1. ま え が き

本年6月21日から7月6日にかけて延べ16日間断続的に降り続いた梅雨明け特有の豪雨と長雨は記録的であり、我々の記憶にまだ新しい。この降雨は、広島市内に概ね総雨量 800 mm と年間雨量の約 1/2~1/3 に相当する雨量をもたらし、これによる地盤のゆるみによって惹き起こされた山崩れやがけ崩れは、消防局や自治体の調べによると実に 380 件余りにのぼっている。

広島市は、旧市街地には比治山、黄金山、江波山と言った小山を擁し、周辺は高さ 100 m から 300 m 内外の山々に囲まれている。これらの山々は主に花崗岩から成り、その表面はまさ土と呼ばれる花崗岩が強度に風化してできた土砂に覆われているのが特徴であり、その斜面は降雨によって水を含むと崩壊し易い性質を有している。これらの山麓には家屋が密集して近接しており、山崩れやがけ崩れは単なる自然現象にとどまることなく、土砂災害と言う危険性を内包している。

降雨による斜面崩壊の研究は、防災工学上の分野では新しいものではなく、現在まで多くの研究者によって貴重な成果が納められてきている一方、未解明の点多々残されており将来に至っても尽きることのない課題にあふれるテーマであると思われる。この現象の特徴は地形や地質に特に支配されることはなく、到るところの斜面で起こり得る可能性があり、当地ではまさ土と言う特殊土を素因とした地域の特徴が背景に在るために、他に比べてその可能性を高くしているに過ぎない。崩壊の直接的な引き金となるのは降雨であり、降雨量やこれの継続時間が斜面の安定性を強く支配していることは既往の研究<sup>1)</sup>等でも着目されている。このような現象面から帰納する方法に対して、斜面の安定性を数値的に解く場合、地中に浸透した水の挙動や土のせん断強さの変化の度合及びその過程を明らかにしておく必要があるが、原位置でのこのような追跡は現在のところ極めて困難な方法の一つであることが、この研究の泣きどころとなっているように思われる。

本研究は、降雨と崩壊件数の相関性、降雨浸透による地下水挙動と斜面安全率の変化の二つの側面から当地の崩壊の特徴を明らかにすることに務めている。崩壊事例は、広島市消防局に提供していただいた昭和54年から昭和60年までの 500 例余りのデータとその時の降雨記録を主に用いている。一方、地下水挙動や斜面安定の問題はコンピュータによる数値解析を手段としており、これに供する地盤の諸性質は既往の研究文献等を参考にして設定しているのが主である。その成果として、崩壊現象を確率で表わしていること、先行降雨の影響が数値解析によっても表現出来たことが特筆される。

## 2. 降雨による斜面崩壊の事例調査

本節では、降雨特性と斜面崩壊の発生状況について解析を行った。基礎資料として、降雨については広島県気象月報<sup>2)</sup>を、斜面崩壊事例については広島市の降雨災害記録<sup>3)</sup>(昭和54~58年)を用いた。

## 2.1 月別崩壊発生状況

昭和54年から58年までの5年間における月別の崩壊件数を降雨災害記録より求めたものを図-2.1.1に示す。崩壊は梅雨時及び台風到来時に集中して発生しており、以後の解析に際しては昭和54年から58年までの6月から9月を基礎資料とする。

\*不動建設㈱広島支店、\*\*基礎地盤コンサルタンツ㈱広島支店、\*\*\*復建調査設計㈱

2.2 日降雨量と崩壊発生

日降雨量と広島市内における崩壊発生件数の関係を図-

2.2.1 に示す。日降雨量が大きくなれば、崩壊件数が増大する傾向が伺えるが、日降雨量が小さい場合でも崩壊は発生しており不合理である。よって、先行雨量（崩壊発生前日まで 14 日間の累加雨量）にも着目する必要があると考えられる。

2.3 先行雨量と崩壊発生

崩壊発生日の先行雨量と崩壊発生件数の関係を図-2.3.1 に示す。崩壊の発生は、先行雨量が 100 mm を越えると顕著になり、100 mm 以下の先行雨量で崩壊しているのは、①局所的な豪雨、②当日雨量が 100 mm 以上となる日である。よって、崩壊発生と降雨特性の関係については日降雨量と先行雨量の双方に着目する必要があると考えられる。図-2.4.1 に崩壊発生日の日降雨量と先行雨量の関係を示す。

2.4 崩壊の予測方法

降雨量や降雨強度を用いた斜面崩壊の予測法が数多く提案されているが、呉市に於ける災害例より解析された網干らによって提案されている方法を用いて、広島市における崩壊例の比較を行う。網干・低引は、崩壊発生日の日降雨量と先行雨量との関係より、斜面災害の予測を図2.4.1 に示す曲線で示した。これによれば、20 件以上の災害については定性的に崩壊の予測が可能であるが、50 mm 以下の日降雨量でも崩壊は発生している。よって、先行雨量、日降雨量に対して、崩壊確率という概念を用いて解析することを提案する。

2.5 広島市における崩壊予測

斜面崩壊の予測に際しては、土質・地形・気象等の素因・誘因が挙げられるが、ここでは広島市における降雨特性（日降雨量及び先行雨量）により、統計的手法を用いた崩壊予測について述べる。

本分において、崩壊確率：Pを次の様に定義する。

$$P = \frac{a}{n} \times 100 (\%)$$

ただし、n：降雨日数

a：降雨日数のうち、崩壊が発生した日数

図-2.5.1 に日降雨量と崩壊確率の関係を示す。同図より、日降雨量に比例して崩壊確率は大きくなる。

日降雨量が 30 mm 以上となれば崩壊確立は 50 % となり、150 mm 以上の日降雨量があれば、100 %となる。

図-2.5.2 に先行雨量と崩壊確率の関係を示す。先行雨量が 100 mm 以下の場合には、崩壊確率は極めて小さく

(数%)、100 mm を越えると急激に増大し、崩壊発生

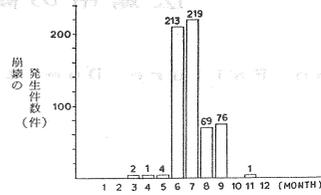


図-2.1.1 月別の崩壊発生状況(昭和54年~58年)

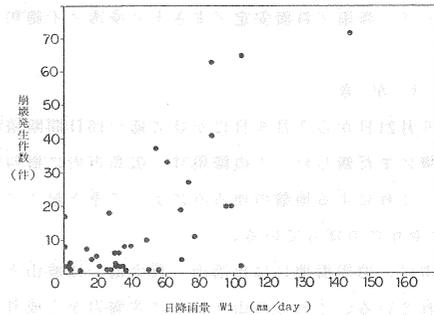


図-2.2.1 崩壊発生日の日降雨量と崩壊発生件数の関係

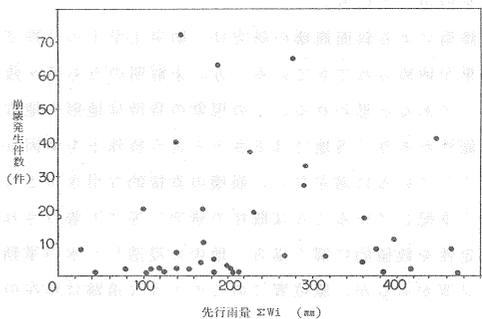


図-2.3.1 崩壊発生前日までの先行雨量と崩壊発生件数の関係

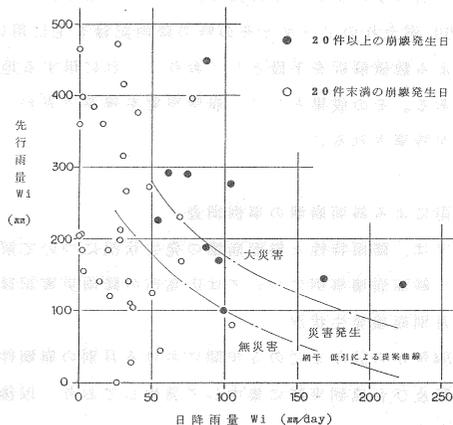


図-2.4.1 日降雨量と先行雨量の関係

広島市の降雨による斜面崩壊

が大きくなることが伺える。

図-2.5.3, 図-2.5.4 をまとめて, 日降雨量及び先行雨量と崩壊確率の関係として, 図-2.5.5 に示す。同図において, 先行雨量が 100 mm 以下の場合には, 日降雨量がかなり大きくなって崩壊確立は 50 % に達しないが, 先行雨量が 100 mm を越えると, 少しの日降雨量でも崩壊確率は 50 % を越える。ゆえに, 日降雨量が大きくても崩壊が発生しないことがあったりわずかの日降雨量で多数の崩壊が発生したりすることが説明できる。

図-2.5.6 に“広島市における降雨特性による崩壊予測図”を提案する。同図を本節における結論とし, 本年(昭和60年)6月から7月にかけて発生した降雨災害について解析を行った結果を図-2.5.7 に示す。

同図において, 上段より, 降雨データ(日降雨量, 先行雨量), 崩壊予測結果, そして崩壊発生件数を表わす。

6月21日に雨が降り始めてから3日目に先行雨量が 100 mm 近くとなり, 日降雨量が 100 mm を越え, 30 件近い崩壊が発生した。このとき崩壊確率は 50 %, 翌日には先行雨量が 100 mm を越えたため 100 % に達して5日目の120 件にも及ぶ大災害を予測している。以後7月6日まで崩壊確立は 80 % 前後で推移しており, 崩壊も継続して起きている。

以上より, 土質や地形といった素因を無視しても, 誘因である降雨パターンを調べることによって, 広島市における災害予測が, 確率という表現で, ある程度可能であることが言える。

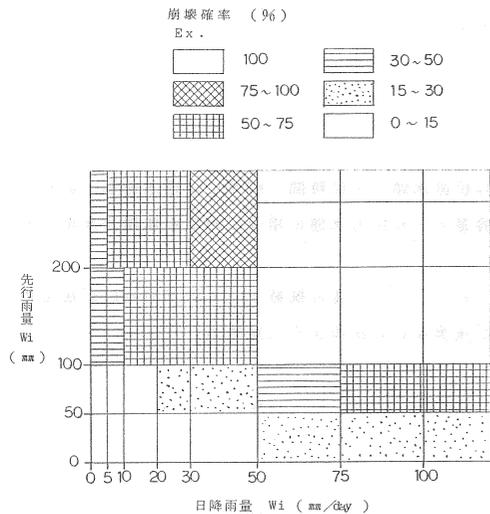


図-2.5.4 広島市における降雨特性による崩壊予測図

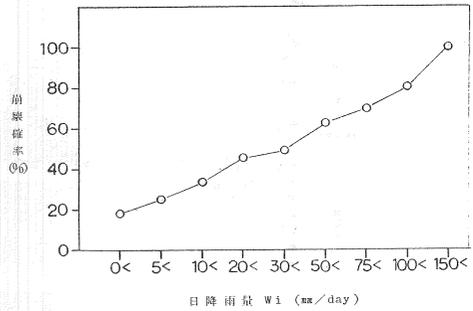


図-2.5.1 日降雨量と崩壊確率の関係

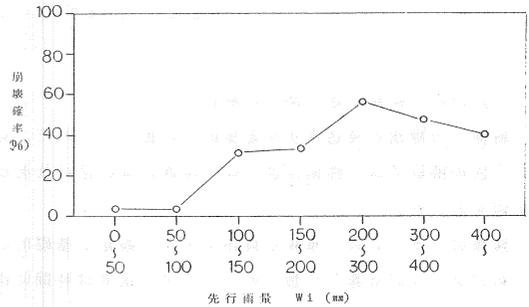


図-2.5.2 先行雨量と崩壊確率の関係

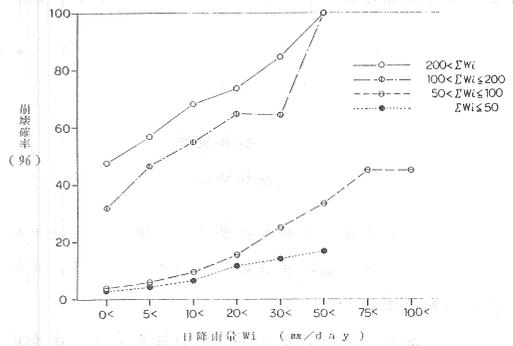
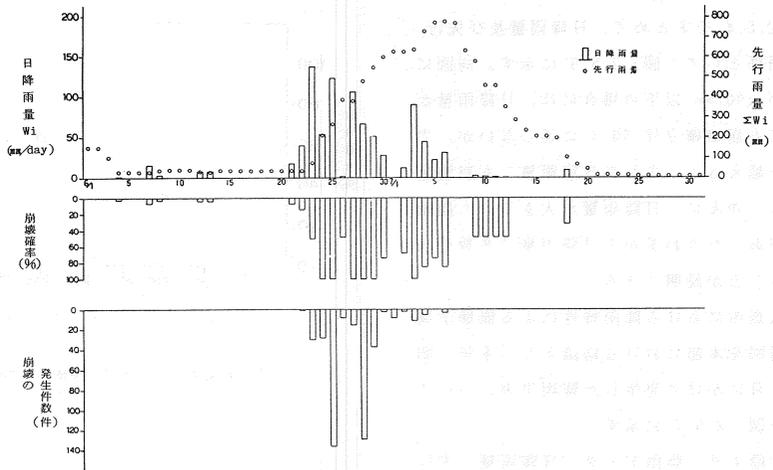


図-2.5.3 日降雨量、先行雨量と崩壊確率の関係



図一 2.5.5 昭和60年6月降雨による斜面崩壊の予測と実態

3. 斜面内の降雨浸透に関する解析

斜面への降雨の浸透性状を定量的に把握する目的で、有限要素法による飽和、不飽和浸透流の解析を行う。

今回の解析では、降雨浸透に伴う浸潤前線の進行状況及び自由水面の形成状況において、経時変化を求めることに主眼をおいた。

降雨のパターンは、単純な降雨モデルを設定し基礎的な解析内容に留め、①集中豪雨型降雨と、②長雨型降雨の2つのパターンに分類して扱った。ここで、前者は時間降雨強度が 10 mm/hr 以上で降雨継続時間を 24 hr 以内とする降雨を考え、後者では時間降雨強度が 5 mm/hr 以下で4日間以上の降雨継続を想定した。

3.1 解析方法の概要<sup>4)</sup>

飽和-不飽和領域の浸透流を支配する基礎方程式は、土中を運動する水に対する連続の式と Darcy の法則（運動方程式）を不飽和領域へ拡大することにより、次の非線形法定式で表わされる。

$$\text{div } K(\Psi) \vec{\nabla} (\Psi + \alpha_s) = (C(\Psi) + \alpha S_s) \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{: 不飽和領域} \\ 1 & \text{: 飽和領域} \end{cases}$$

また、 $\Psi$  は圧力水頭（不飽和状態では毛管ポテンシャル）、 $\alpha_s$  は位置水頭、 $t$  は時間、 $K(\Psi)$  は透水係数である。 $S_s = dn / d\Psi$  は比貯留係数、 $C(\Psi) = d\theta / d\Psi$  は比水分容量であり圧力水頭の増分に対する体積含水率 ( $\theta$ ) の変化の割合を表わす。

式(1)は、重みつき残差法を用いた有限要素法による定式化を行った。ここで、重み関数としては Galerkin 法を用いた。時間項の取扱いは後退差分法によった。また、初期条件及び境界条件は次のように定める。

(a) 初期条件

$$\Psi(\chi_i, 0) = \Psi_0(\chi_i) \quad (2)$$

(b) 境界条件

① 水頭が既知の境界

$$\Psi(\chi_i, t) = \Psi_b(\chi_i, t) \quad (3)$$

② 流量が既知の境界

$$(K_{ij}(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial \chi_j} + K_{is}) n_i = -V(\chi_i, t) \quad (4)$$

広島市の降雨による斜面崩壊

ここに、 $n_i$  は境界面からの垂直ベクトルである。

なお、有限要素法の定式化の誘導などの説明は専門書に譲ることとしここでは割愛する。

ところで、飽和-不飽和浸透解析を行うときに必要な入力において、以下に示す物性値が重要である。

- ① 飽和状態における透水係数  $K_{i,s}$  と貯留係数  $S_s$
- ② 構成材料の間隙率  $n$
- ③ 不飽和状態の浸水係数と体積含水率  $\theta$  の関係
- ④ 不飽和状態のサクション（負の圧力水頭） $\Psi$  と体積含水率  $\theta$  の関係
- ⑤ 浸透領域の初期圧力水頭  $\Psi_0$  または初期体積含水率  $\theta_0$  の値

結局、図-3.1.1 に示すような構成材料の水分保持曲線を決定しなければならない。

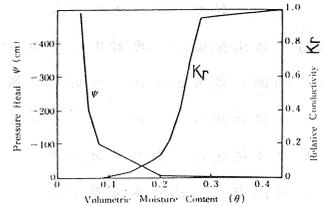


図-3.1.1 水分保持曲線

3.2 浸透解析のモデル斜面

(1) 斜面の形状と寸法

解析モデル斜面を図-3.2.1 に有限要素分割図で示す。解析斜面は、斜面勾配  $\beta = 35.0^\circ$ 、鉛直層厚  $D = 2.0$  m の等方均質地盤である。また、斜面高さは 21.0 m、斜面長で 36.5 m である。以上のモデル斜面の設定にあたっては、網干ら<sup>5)</sup>、及び網干<sup>6)</sup> による昭和42年呉市災害の調査報告を参考にした。

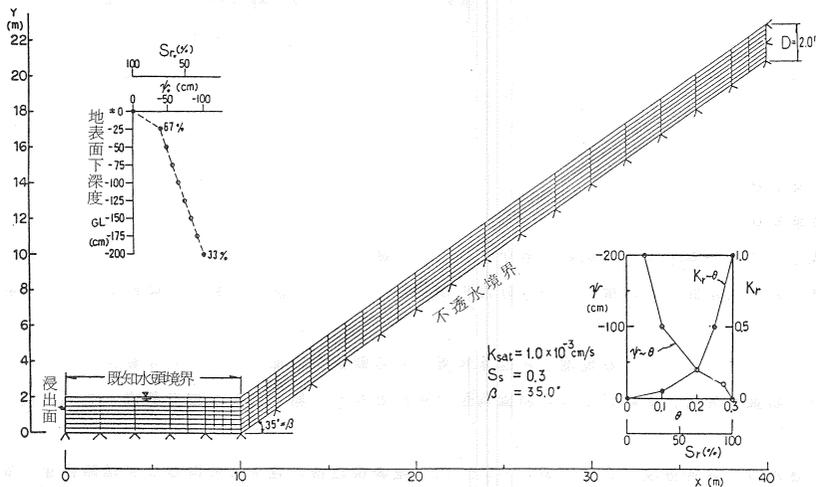


図-3.2.1 有限要素解析モデル図

(2) 地盤の水分保持曲線

水分保持曲線の推定は、実験方法が不確定で圧力水頭及び体積含水率の測定制度に関する問題などから、これまでに実験的に求められた例が少ない。また、現象あるいは原理的な説明付けも十分とは言えず、今後の研究成果に拠るところが大きいものである。

今回のまが土を対象とした水分保持曲線は、八木ら<sup>7)</sup>、西垣ら<sup>8)</sup>、芥川ら<sup>9)</sup> の解析で用いられているものを参考にして、図-3.2.1 に示した関係を仮定して用いることにした。ここで、飽和浸水係数は  $K_{sat} = 1.0 \times 10^{-3}$  cm/s、有効間隙率は  $n_a = 0.3$  と考えた。

(3) 初期条件と境界条件

斜面内の初期圧力水頭  $\Psi_0$ （または飽和度  $S_{r0}$ ）は、図-3.2.1 に示した深度分布を与えた。これは以下に述べる3つの根拠から導き出したものである。

① 一般的なまさ土の物性特性<sup>10)</sup>は  $G_s = 2.65$ ,  $W = 10\%$  であり,  $n = 0.4 \sim 0.5$  で  $S_r = 40 \sim 27\%$  の範囲となる。

② 広島市内のまさ土斜面における網干ら<sup>11)</sup>の調査研究によれば,  $G_s = 2.63 \sim 2.66$ ,  $W = 11.4 \sim 24.9\%$ ,  $e = 0.899 \sim 1.435$ ,  $n = 0.5$  であり  $S_r = 33 \sim 50\%$  の範囲であった。

③ ①②の結果から平常時のまさ土斜面の飽和度は,  $S_r = 30 \sim 40\%$  と推定される。これに加えて梅雨期及び集中豪雨期の降雨期間は, 断続的な降雨があるため斜面表層の飽和度が上昇傾向にあるものと考えられる。なお, 斜面の地表面の圧力水頭は, 降雨直後を想定して便宜上  $\Psi_s = 0$  とした。

一方, 境界条件は, 図-3.2.1 に示すとおり基盤面(地表面下深度  $GL-2.0$  m)を不透水境界(流量が0), 斜面法先下の水平地盤部を既知水頭境界(圧力水頭が0)とした。また, 解析領域の制約から, モデルの左右両端面は, それぞれ浸出面と不透水面を便宜的に与えた。

④ 降雨条件

降雨パターンは, ①集中豪雨型と②長雨型の2形態を想定した。両者の定義は前で述べた。降雨強度及び降雨継続時間は, 2.節で述べた事例調査ならびに広島市内における過去10年間の降雨記録<sup>12)</sup>を参考にして以下の7ケースを設定した。

① 集中豪雨型降雨

| 解析ケース  | 降雨条件 | 降雨強度 $R$ (mm/hr) | 降雨継続時間 $T$ (hr) |
|--------|------|------------------|-----------------|
| Case-1 |      | 10               | 24              |
| Case-2 |      | 15               | 24              |
| Case-3 |      | 20               | 24              |
| Case-4 |      | 30               | 24              |

② 長雨型降雨

| 解析ケース  | 降雨条件 | 先行降雨条件             |                   | 崩壊降雨強度 $R_z$ (mm/hr) |
|--------|------|--------------------|-------------------|----------------------|
|        |      | 降雨強度 $R_1$ (mm/hr) | 降雨継続時間 $T_1$ (hr) |                      |
| Case-5 |      | 5                  | 96                | —                    |
| Case-6 |      | 2                  | 96                | 10                   |
| Case-7 |      | 2                  | 96                | 20                   |

3.3 斜面内の浸透状況

(1) 自由水面の形成状況

自由水面の形成ならびに時間的水位状況を, 各ケースごとに図-3.3.1 ~ 3.3.7 に示す。ここに, 描いた自由水面は, 解析結果に基づき圧力水頭が0の地点をつなげたものである。また, 図中の数字は降雨開始からの経過時間を示している。

図から自由水面は, 全てのケースで基盤面(不透水境界)から斜面の表面へ上昇する挙動を呈している。さらに, 自由水面の形態は, 斜面法先付近を除けばほぼ斜面勾配に平行となり, 斜面内の全般で鉛直一次元方向に一律な上昇を示す。

自由水面の形成速度は, 降雨強度によって異なる。これを地表面近傍に達する時間及び累積降雨量が整理してみたものが表-3.3.1 である。なお, Case-1, Case-2, Case-6 では地表面までの水位上昇には至らなかった。表より, 経過時間には差異があるものの, 累積降雨量は概ね  $\Sigma R = 300 \sim 450$  mm の範囲にあることが推察される。また, 降雨強度の大小によって  $\Sigma R$  は変化し, 大き目の場合 (Case-4, Case-7) で 300 mm 程度, 小さ目の場合で 450 mm 程が推定される。

表-3.3.1 自由水面の地表到達時期

| 解析ケース  | 時間降雨量 | 経過時間 $T$ (hr) | 累積降雨量 $\Sigma R$ (mm) |
|--------|-------|---------------|-----------------------|
| Case-3 |       | 23.1          | 460                   |
| Case-4 |       | 11.6          | 345                   |
| Case-5 |       | 96.0          | 480                   |
| Case-7 |       | 102.2         | 315                   |

ところで, 降雨パターンにより水位上昇傾向を観察するならば, Case-1~Case-4 の集中豪雨型は漸増的な上昇速度とみなせるのに対し, Case-7 にみる長雨型では未期的な豪雨に伴い急激な水位上昇を示す。これは, 降雨強度は小さいながら, 長期的な降雨に従って斜面内の全域が飽和状態に近い状態になるためである。こうした現象は, 網干ら<sup>11)</sup>, 奥田<sup>13)</sup>, 芥川ら<sup>9)</sup>の言う先行降雨と崩壊発生降雨の相関性とも対応するものである。

広島市の降雨による斜面崩壊

② 浸潤前線の進行状況

図-3.3.8～図-3.3.14 は、斜面内の飽和度  $S_r = 80\%$  なる浸潤前線の挙動を示したものである。図より Case-3 及び Case-4 を除いて他のケースでは、 $S_r \geq 80\%$  の領域が前述の自由水面より上方の 30～60 cm 迄、ほぼ相似形に上昇した状況にある。したがって、降雨浸透に伴う  $S_r \geq 80\%$  のゾーンの進行は、自由水面の形成速度に比べ速くなり、地表に到達する時間及び累積降雨量が表-3.3.2 のように求まる。

表より累積降雨量は、250～350 mm 程度の範囲にある。なお、Case-1 は降雨強度 ( $R = 10\text{mm/hr}$ ) が小さいため、累積降雨量が 240 mm であるがまだ浸潤前線の地表到達には至らなかった。

一方、Case-3 と Case-4 は、集中豪雨形の降雨パターンでしかも降雨強度が  $R \geq 20\text{mm/hr}$  のケースであり、浸潤前線が地表面から降下する挙動となっている。図-3.3.10 と図-3.3.11 に示すごとく、浸潤前線は斜面に平行に降下しており、斜面全域での一様な降雨浸透がなされていることが明らかである。

浸潤前線の降下速度は、かなり速く斜面内全域が  $S_r \geq 80\%$  に至る時間及び累積降雨量を表-3.3.3 に示す。表より累積降雨量は、190 mm と 210 mm であり概ね 200 mm 程度と推定される。

以上の解析結果は、前にも述べたがあくまで基礎的な降雨パターンに限定した解析例であるが、各ケースとも降雨浸透状況を定性的かつ定量的に表現し得るものと考えられる。したがって、一般的な降雨パターンに関しても十分に斜面内の降雨浸透現象を予測できそうである。

表-3.3.2 自由水面の地表到達時期

| 解析ケース  | 時間降雨量 | 経過時間<br>$T'$ (hr) | 累積降雨量<br>$\Sigma R'$ (mm) |
|--------|-------|-------------------|---------------------------|
| Case-2 |       | 16.6              | 250                       |
| Case-5 |       | 72.6              | 363                       |
| Case-6 |       | 107.0*            | 300*                      |
| Case-7 |       | 101.2*            | 290*                      |

(注) \*印数値は推定による。

表-3.3.3 自由水面の地表到達時期

| 解析ケース  | 時間降雨量 | 経過時間<br>$T''$ (hr) | 累積降雨量<br>$\Sigma R''$ (mm) |
|--------|-------|--------------------|----------------------------|
| Case-3 |       | 9.6                | 190                        |
| Case-4 |       | 7.1                | 210                        |

図-3.3.1

Case-1 : 集中豪雨型  $R = 10\text{mm/hr}$   
 $S_r = 100\%$

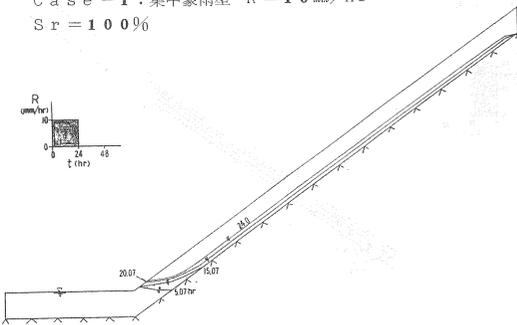


図-3.3.2

Case-2 : 集中豪雨型  $R = 15\text{mm/hr}$   
 $S_r = 100\%$

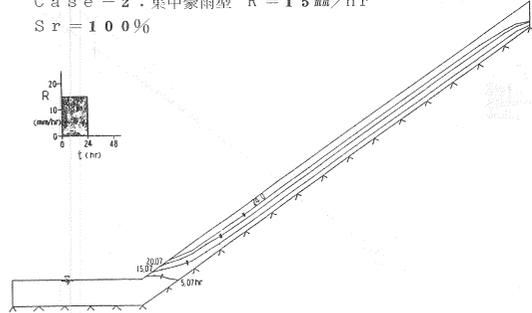


図-3.3.3

Case-3 : 集中豪雨型  $R = 20\text{mm/hr}$   
 $S_r = 100\%$

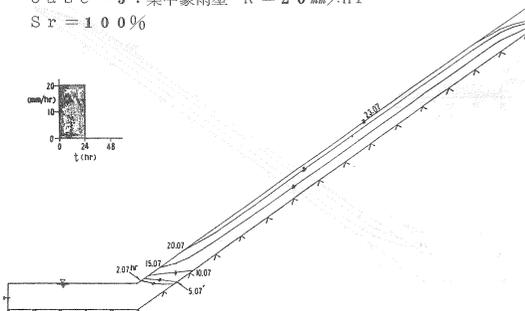


図-3.3.4

Case-4 : 集中豪雨型  $R = 30\text{mm/hr}$   
 $S_r = 100\%$

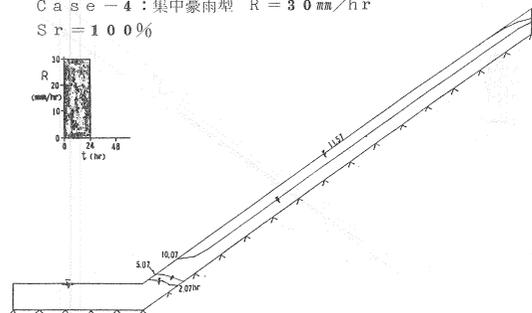


図-3.3.5

Case-5: 長雨型  $R_1 = 5 \text{ mm/hr}$   
 $Sr = 100\%$

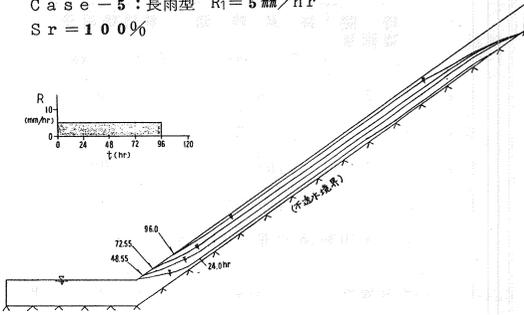


図-3.3.6

Case-6: 長雨型  $R_1 = 2 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 10 \text{ mm/hr}$   
 $Sr = 100\%$

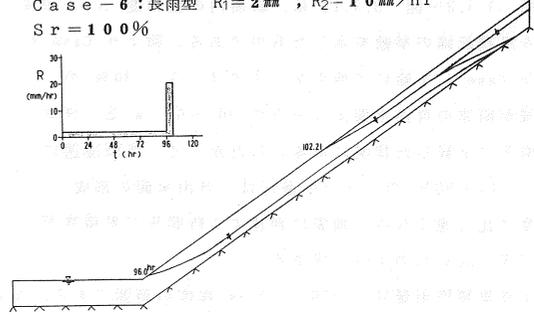


図-3.3.7

Case-7: 長雨型  $R_1 = 5 \text{ mm/hr}$   
 $Sr = 100\%$

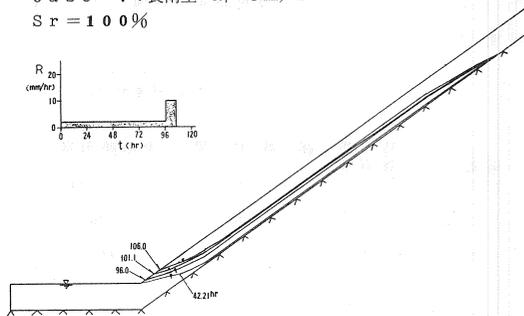


図-3.3.8

Case-1: 集中豪雨型  $R = 10 \text{ mm/hr}$   
 $Sr \geq 80\%$

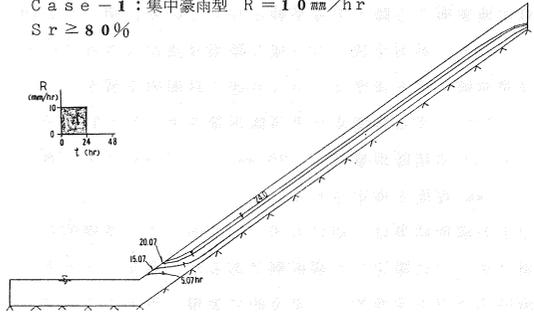


図-3.3.9

Case-2: 集中豪雨型  $R = 15 \text{ mm/hr}$   
 $Sr \geq 80\%$

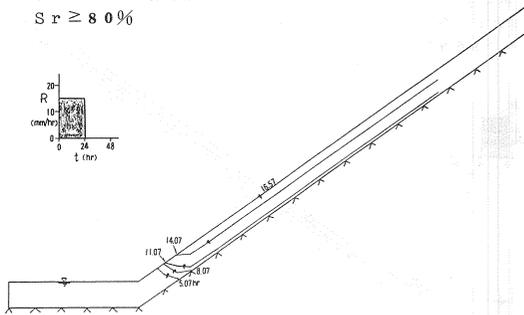


図-3.3.10

Case-3: 集中豪雨型  $R = 20 \text{ mm/hr}$   
 $Sr \geq 80\%$

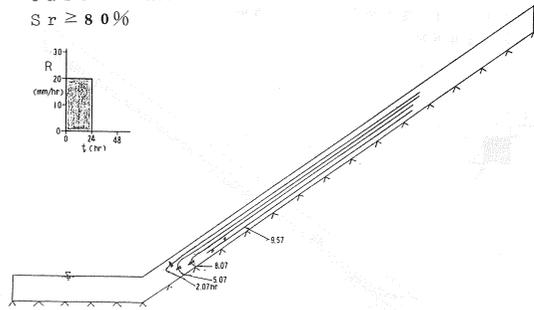


図-3.3.11

Case-4: 集中豪雨型  $R = 30 \text{ mm/hr}$   
 $Sr \geq 80\%$

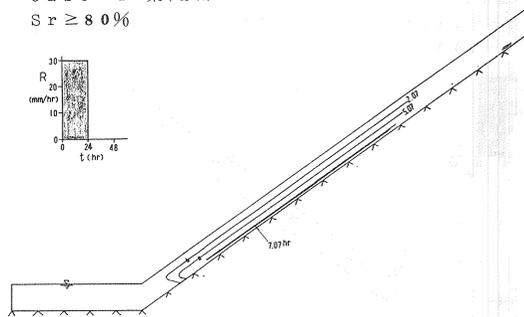
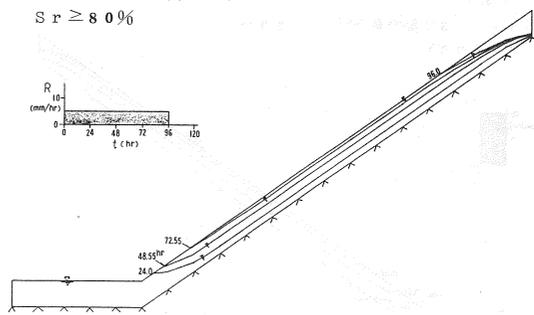


図-3.3.12

Case-5: 長雨型  $R_1 = 5 \text{ mm/hr}$   
 $Sr \geq 80\%$



広島市の降雨による斜面崩壊

図-3.3.13

Case-6: 長雨型  $R_1=2\text{mm/hr}$ ,  $R_2=10\text{mm/hr}$   
 $Sr \geq 80\%$

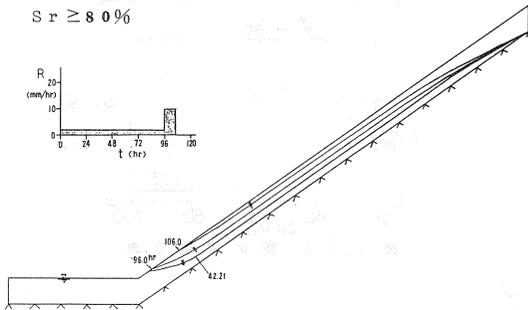
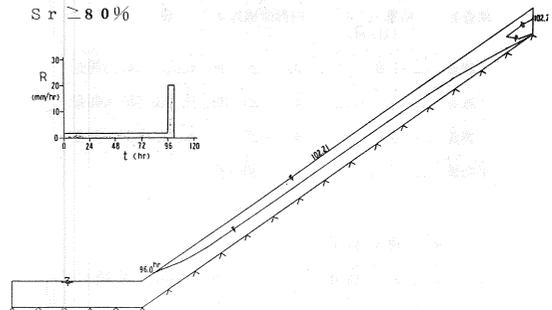


図-3.3.14

Case-7: 長雨型  $R_1=2\text{mm/hr}$ ,  $R_2=20\text{mm/hr}$   
 $Sr \geq 80\%$



4. 降雨浸透と斜面安定に関する解析

3. で求まった浸潤前線の挙動に即して、斜面の安定性の低下状況を把握する目的で斜面安定解析を行う。ここでは、盛土の安定解析などに一般的に用いられている分割法による円形すべり計算法を適用した。

4.1 解析方法と地盤特性値の設定

(1) 円形すべり計算法

円形すべり計算法は大きく分けて、Bishop 法、Fellenius 法があり、ここではこれらの内扱い方が最も簡易な修正 Fellenius 法を用いている。これは、ここで対象としている斜面安定の問題が多く、未知要因を内包しており、特に安定解析法の選定のみで結果が決定的に支配され難いと考えたことによる。したがって、得られた安全率は、その条件（浸潤前線の位置）による相対的な変化の度合いが重要視されよう。

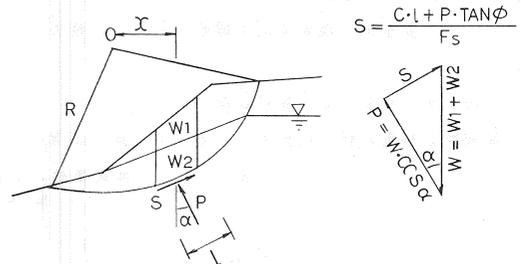


図-4.1.1 修正 Fellenius 法

図-4.1.1 に修正 Fellenius 法による分割片に働く力の多角形を示す。これより、すべり土塊全体に関する円形すべり安全率は次式で算出されることになる。

$$F_s = \frac{E \sum (C' \cdot l + W' \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi')}{\sum (W' \cdot x)}$$

ここに、

- R : すべり円の半径
- x : 円心より分割片重心までの水平距離
- W : 土塊の重量 ( $W_1 =$  空中重量,  $W_2 =$  水中重量)
- $W' = W_1 + W_2$
- l : すべり面の長さ
- d : 水平に対するすべり面の傾き
- c' : 粘着力 (有効応力表示)
- $\phi'$  : 内部摩擦角 (有効応力表示)
- $F_s$  : 安全率

(2) 地盤のせん断強度特性値の設定

不飽和土のせん断強度に関する研究は、宇野<sup>14)</sup>、久楽<sup>15)</sup>、内田<sup>16)</sup>、高速道路調査会<sup>17)</sup>、芥川<sup>18)</sup>の報告が参考になろう。これらの研究で対象としている土は、関東ローム、まさ土、砂質土であり、ここで対象としているまさ土斜面の土質特性値の設定に充分参考になるものと判断される。表-4.1.1 は、広島市内のまさ土斜面を対象に行った既存の土質調査データであり、それぞればらつきは認められるものの、概ね  $C_u = 1 \sim 2 \text{ tf/m}^2$ 、 $\phi_u = 30 \sim 35^\circ$  の範囲を示しているものと考えられる。飽和度が增大すると特に粘着力が低下する研究報告<sup>19)</sup>を重要視して、 $Sr = 80\%$  を境に図-4.1.2 に示したような地盤のせん断強度を設定した。なお、単位体積重量は、空中重量で  $\gamma = 1.9 \text{ tf/m}^3$ 、水中重量で  $\gamma' = 1.0 \text{ tf/m}^3$  とした。

表-4.1.1 既往調査によるまさ土斜面の強度定数

| 調査名 | 粘着力 C (tf/m <sup>2</sup> ) | 内部摩擦角 φ (°) | 備考          |
|-----|----------------------------|-------------|-------------|
| A調査 | Cu=1.0~3.7                 | φu = 20~38  | 比治山 S41.3調査 |
| B調査 | Cu=0.3~7.0                 | φu = 29~39  | 比治山 S57.6調査 |
| C調査 | Cu=0.6                     | φ' = 35     | 高天原 S57.6調査 |
| 平均値 | Cu=1~2                     | φu = 30~35  |             |

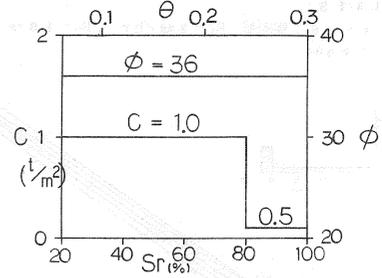


図-4.1.2 設定強度定数

(3) すべり面位置の設定

(2)で述べたとおり強度定数は、 $S_r = 80\%$ を境にして2つのゾーンに分けて取扱う。このゾーン分けは3.で求めた浸潤前線分布を用いる。

すべり面は、八木<sup>1)</sup>、西垣<sup>8)</sup>、芥川<sup>1)</sup>の研究報告を参考に、法尻から斜面上部に向かって崩壊が進行し易いことを考慮して、図-4.1.3に示したように、円心が法尻位置直上方に $O_1 \sim O_8$ の間の8個の円形すべり面を設定した。従って、解析結果は浸潤前線の進行に伴って生ずるすべり安全率の現象傾向を観察することに務めている。

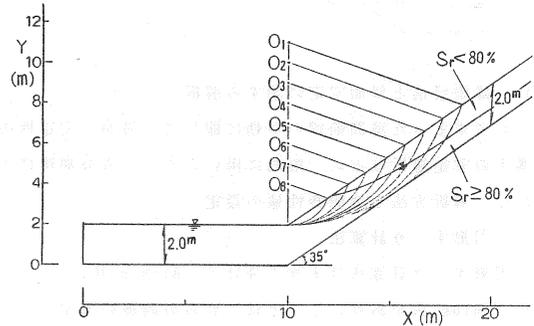


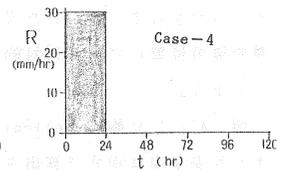
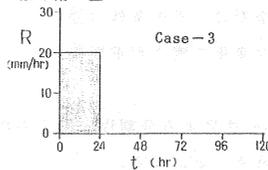
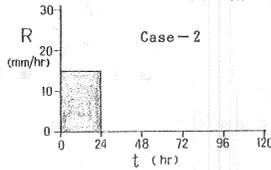
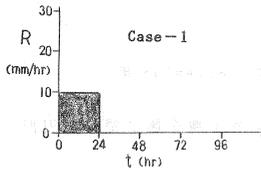
図-4.1.3 すべり面位置の設定

4.2 円形すべり安全率の変化状況

浸潤前線の移動に伴う円形すべり安全率の低下状況をまとめたものが表-4.2.1である。

表-4.2.1 降雨条件によるすべり安全率の経時変化

(1) 集中豪雨型



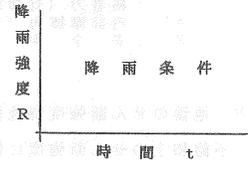
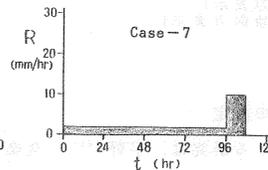
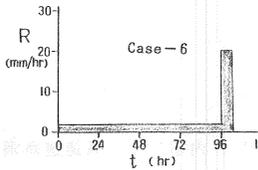
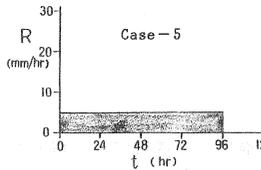
| 円弧             | 時間 t (hr) |      |       |       |       |
|----------------|-----------|------|-------|-------|-------|
|                | 0         | 5.07 | 15.07 | 20.07 | 24.00 |
| O <sub>1</sub> | 2.16      | 1.92 | 1.34  | 1.06  | 0.91  |
| O <sub>2</sub> | 2.28      | 1.95 | 1.46  | 1.12  | 0.95  |
| O <sub>3</sub> | 2.44      | 2.07 | 1.70  | 1.20  | 1.00  |
| O <sub>4</sub> | 2.65      | 2.17 | 1.75  | 1.30  | 1.07  |
| O <sub>5</sub> | 2.95      | 2.30 | 1.81  | 1.47  | 1.16  |
| O <sub>6</sub> | 3.39      | 2.47 | 1.87  | 1.45  | 1.15  |
| O <sub>7</sub> | 4.14      | 2.75 | 1.92  | 1.43  | 1.14  |
| O <sub>8</sub> | 5.62      | 3.16 | 1.86  | 1.15  | 1.01  |

| 円弧             | 時間 t (hr) |      |       |       |       |
|----------------|-----------|------|-------|-------|-------|
|                | 0         | 5.07 | 11.07 | 14.07 | 16.57 |
| O <sub>1</sub> | 2.16      | 1.88 | 1.31  | 0.93  | 0.68  |
| O <sub>2</sub> | 2.28      | 1.91 | 1.41  | 0.96  | 0.69  |
| O <sub>3</sub> | 2.44      | 1.97 | 1.62  | 1.00  | 0.70  |
| O <sub>4</sub> | 2.65      | 2.04 | 1.62  | 1.06  | 0.72  |
| O <sub>5</sub> | 2.95      | 2.11 | 1.55  | 1.14  | 0.75  |
| O <sub>6</sub> | 3.39      | 2.17 | 1.52  | 1.05  | 0.79  |
| O <sub>7</sub> | 4.14      | 2.14 | 1.33  | 0.86  | 0.86  |
| O <sub>8</sub> | 5.62      | 1.72 | 1.01  | 1.01  | 1.01  |

| 円弧             | 時間 t (hr) |      |      |      |      |
|----------------|-----------|------|------|------|------|
|                | 0         | 2.07 | 5.07 | 8.07 | 9.57 |
| O <sub>1</sub> | 2.16      | 1.72 | 1.40 | 1.17 | 0.68 |
| O <sub>2</sub> | 2.28      | 1.76 | 1.39 | 1.11 | 0.69 |
| O <sub>3</sub> | 2.44      | 1.81 | 1.36 | 1.03 | 0.70 |
| O <sub>4</sub> | 2.65      | 1.85 | 1.29 | 0.86 | 0.72 |
| O <sub>5</sub> | 2.95      | 1.88 | 1.14 | 0.75 | 0.75 |
| O <sub>6</sub> | 3.39      | 1.86 | 0.79 | 0.79 | 0.79 |
| O <sub>7</sub> | 4.14      | 1.60 | 0.86 | 0.86 | 0.86 |
| O <sub>8</sub> | 5.62      | 1.01 | 1.01 | 1.01 | 1.01 |

| 円弧             | 時間 t (hr) |      |      |      |      |
|----------------|-----------|------|------|------|------|
|                | 0         | 2.07 | 5.07 | 7.07 | 7.07 |
| O <sub>1</sub> | 2.16      | 1.61 | 1.27 | 0.68 |      |
| O <sub>2</sub> | 2.28      | 1.63 | 1.24 | 0.69 |      |
| O <sub>3</sub> | 2.44      | 1.66 | 1.19 | 0.70 |      |
| O <sub>4</sub> | 2.65      | 1.68 | 1.08 | 0.72 |      |
| O <sub>5</sub> | 2.95      | 1.68 | 0.75 | 0.75 |      |
| O <sub>6</sub> | 3.39      | 1.61 | 0.79 | 0.79 |      |
| O <sub>7</sub> | 4.14      | 1.25 | 0.86 | 0.86 |      |
| O <sub>8</sub> | 5.62      | 1.01 | 1.01 | 1.01 |      |

(2) 長雨型



| 円弧             | 時間 t (hr) |       |       |       |       |
|----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
|                | 0         | 24.00 | 48.55 | 72.55 | 96.00 |
| O <sub>1</sub> | 2.16      | 1.27  | 0.95  | 0.70  | 0.68  |
| O <sub>2</sub> | 2.28      | 1.37  | 0.99  | 0.71  | 0.69  |
| O <sub>3</sub> | 2.44      | 1.52  | 1.05  | 0.73  | 0.70  |
| O <sub>4</sub> | 2.65      | 1.71  | 1.14  | 0.75  | 0.72  |
| O <sub>5</sub> | 2.95      | 1.80  | 1.27  | 0.77  | 0.75  |
| O <sub>6</sub> | 3.39      | 1.91  | 1.34  | 0.79  | 0.79  |
| O <sub>7</sub> | 4.14      | 2.05  | 1.36  | 0.86  | 0.86  |
| O <sub>8</sub> | 5.62      | 2.20  | 1.01  | 1.01  | 1.01  |

| 円弧             | 時間 t (hr) |       |       |        |
|----------------|-----------|-------|-------|--------|
|                | 0         | 42.21 | 96.00 | 102.21 |
| O <sub>1</sub> | 2.16      | 1.30  | 1.12  | 0.68   |
| O <sub>2</sub> | 2.28      | 1.40  | 1.16  | 0.69   |
| O <sub>3</sub> | 2.44      | 1.57  | 1.22  | 0.70   |
| O <sub>4</sub> | 2.65      | 1.85  | 1.29  | 0.72   |
| O <sub>5</sub> | 2.95      | 1.93  | 1.38  | 0.75   |
| O <sub>6</sub> | 3.39      | 2.04  | 1.38  | 0.79   |
| O <sub>7</sub> | 4.14      | 2.16  | 1.38  | 0.86   |
| O <sub>8</sub> | 5.62      | 2.25  | 1.36  | 1.01   |

| 円弧             | 時間 t (hr) |       |       |        |
|----------------|-----------|-------|-------|--------|
|                | 0         | 42.21 | 96.00 | 106.00 |
| O <sub>1</sub> | 2.16      | 1.30  | 1.12  | 0.77   |
| O <sub>2</sub> | 2.28      | 1.40  | 1.16  | 0.79   |
| O <sub>3</sub> | 2.44      | 1.57  | 1.22  | 0.82   |
| O <sub>4</sub> | 2.65      | 1.85  | 1.29  | 0.83   |
| O <sub>5</sub> | 2.95      | 1.93  | 1.38  | 0.85   |
| O <sub>6</sub> | 3.39      | 2.04  | 1.38  | 0.86   |
| O <sub>7</sub> | 4.14      | 2.16  | 1.38  | 0.86   |
| O <sub>8</sub> | 5.62      | 2.25  | 1.36  | 1.01   |

| 円弧     | 時間 t |       |       |        |        |
|--------|------|-------|-------|--------|--------|
|        | 0    | 42.21 | 96.00 | 106.00 | 106.00 |
| すべり安全率 |      |       |       |        |        |

広島市の降雨による斜面崩壊

(1) 集中豪雨型

Case-1~4の結果から、集中豪雨型の降雨パターンでは、降雨強度で  $R \approx 20\text{mm/hr}$  が安全率の変化傾向の変異点と言える。すなわち、Case-1 ( $R = 20\text{mm/hr}$ )と Case-2 ( $R = 15\text{mm/hr}$ )においては、法尻部表層及び深層のすべり円弧ではほぼ同時期に  $F_s < 1.0$  となり、直ちに斜面全域にまで及んでいる。これに対し、Case-3 ( $R = 20\text{mm/hr}$ )と Case-4 ( $R = 30\text{mm/hr}$ )では、 $F_s < 1.0$  のすべり面は法尻表層の小円弧が次第に深層の大円弧へと進展を見せており、法尻部を機転とした進行性破壊の様相を呈している。

斜面内の最深部(最大円弧)で  $F_s < 1.0$  に到達する時間は、Case-1と2が14/~24時間(累積雨量 211~244mm)で、Case-3と4が5時間(累積雨量 101~152mm)となる。したがって、降雨強度が  $20\text{mm/hr}$  を超える集中豪雨の場合は、極めて短時間で斜面崩壊が発生することが予測できる。また、 $R \geq 15\text{mm/hr}$  の連続降雨の場合は、かなりの経過時間を経ることによって累積雨量が大きくならなければ崩壊には至らないようである。これは長雨型の Case-5 でも同様であり、斜面崩壊には概ね  $200\text{mm}$  を超える累積雨量が必要と言える。

(2) 長雨型

Case-6と7は、降雨強度  $R_1 = 2\text{mm/hr}$  の先行降雨を4日間継続させ、その直後に短時間の豪雨 ( $R_2 = 10\text{mm/hr}, 20\text{mm/hr}$ )が発生したケースである。この4日間の累積降雨量は  $192\text{mm}$  であり、この状態で斜面は  $F_s > 1.1$  を維持している。しかし、斜面内の飽和度はかなり高い状態 ( $S_r \approx 80\%$ ) にあり、先行降雨直後の豪雨が衝撃的な誘因としての役割を果たし、斜面内全域において急激な安全率の低下 ( $F_s < 1$ ) が見られる。すなわち、長雨末期の豪雨で経験してきた大規模な斜面崩壊とよく対応のつく解析結果である。累積雨量は  $210 \sim 250\text{mm}$  であり、この内先行雨量が  $190\text{mm}$  とその大部分を占めており、斜面の安定性を損う下地造りとしての先行降雨の影響が数値解析でも表現されていることが興味深い。

表-4.3.1 崩壊発生降雨量の推定値

| 降雨パターン | 降雨強度 $R(\text{mm/hr})$      | 小規模崩壊                       | 大規模崩壊                         |                               |
|--------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|        |                             | 当日降雨量 $\Sigma R(\text{mm})$ | 先行降雨量 $\Sigma R_1(\text{mm})$ | 当日降雨量 $\Sigma R_2(\text{mm})$ |
| 集中豪雨型  | 10                          | —                           | —                             | 240                           |
|        | 15                          | 166                         | —                             | 211                           |
|        | 20                          | 101                         | —                             | 191                           |
|        | 30                          | 120                         | —                             | 213                           |
| 長雨型    | 5                           | 120                         | 240                           | 120                           |
|        | 2( $=R_1$ )<br>10( $=R_2$ ) | —                           | 192                           | 100以下<br>(50*)                |
|        | 2( $=R_1$ )<br>20( $=R_2$ ) | —                           | 192                           | 120以下<br>(20*)                |

(注) \*印は推定値。

4.3 崩壊発生降雨量の推移

4.2の結果から斜面の崩壊発生時における降雨量を推定する。表-4.3.1にその結果を示す。表は網干<sup>5)</sup>らが昭和42年の呉災害で行った整理方法を参考にしてまとめたものである。さらにこの結果を図-4.3.1のとおりプロットして、2.節の事例調査結果との整合性を検討した。その結果、最大の大小や崩壊確率と本解析値との詳細な対応にはいささか無理があるが事例調査結果とは一応の整合性が得られていると判断して充分であろう。したがって、ここでの浸透解析ならびに安定解析に基づいた斜面の崩壊解析手法は有効な方法であると言えよう。なお、今後種々の降雨パターン及び地盤条件に適用するとともに、安定解析に際してはより現実的な方法を選択していくことが大切と考えられる。

5. 結論としての防災に対する一提案

ここでは、解析してきた結果が防災の観点からどのように解釈できるかを説明する。

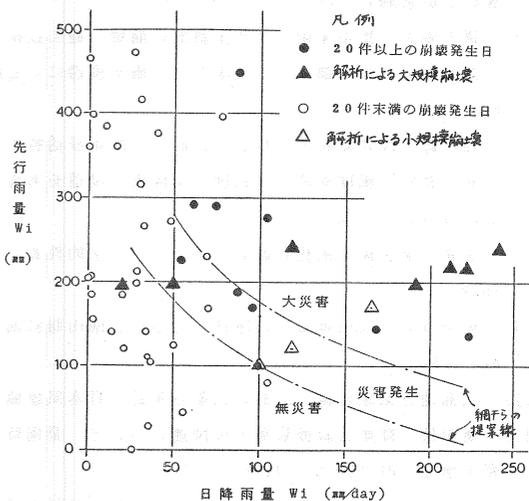


図-4.3.1 崩壊発生日の日降雨量と先行降雨量の関係

河川防災では、洪水時の警戒の判断の一つに河川水位という明瞭なスケールがある。しかし、斜面崩壊の基準雨量については、確立されたものがないと言っても過言ではなからう。現状では、避難指示のタイミングは気象台から大雨洪水警報が発表され、小災害が発生し始めた事態、河川水位が警戒水位を突破した時の雨の降り方等を一つの目安としているところが多い<sup>20)</sup>。このように目安とする要因はいくつかあり、これらを総合的に検討して慎重に一つの決断を下すことにはなる。しかし、降雨と崩壊の二者の因果関係を特定の地域に対して適用できるように調べておけば、降雨を支配的な要因としてとらえ、決断を下すことにより有力とならう。

このような適用のもとに、本研究の解析結果の成果を図-2.5.4 (図-4.3.1でも同様)として、降雨と崩壊確率関係のグラフとして活用されよう。ただし、この関係は、市内全体についての一般的な傾向から得られたものであり、局地的な適用に際してはその地域の過去の崩壊頻度による補正が必要となる。このグラフより、結論として次のような解釈ができれば。

- 先行雨量 (14日前)100 mm 以上で当日雨量 50 mm 以上の場合、崩壊確率 100%となり極めて危険な状態となる。
- 先行雨量が 100 mm 以上であれば、当日雨量が 10 mm 内外でも警戒すべき状態となる。
- 逆に、当日雨量が 75 mm 以上となれば、先行雨量にかかわらず警戒状態となる。

#### 謝 辞

この研究は、土質工学会中国支部土質研究会の活動を通じて行われたものであり、当研究会会員諸兄から貴重な御助言を賜ったことに謝意を表します。さらに、多くの崩壊事例資料を提供していただき、貴重な御援助を賜った広島市消防局に対し深謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 網干寿夫・低引洋隆・真砂土自然斜面の崩壊について、第7回土質工学研究発表会、PP.507~510, 1972.
- 2) 広島地方気象台：広島県気象月報・年報、日本気象協会広島支部
- 3) 広島市消防局：広島市の降雨災害記録
- 4) 赤井浩一、大西有三、西垣誠：有限要素法による飽和-不飽和浸透流の解析、土木学会論文報告集、第264号、PP.87~96, AUG. 1977.
- 5) 網干寿夫・門田博知・吉国洋：昭和42年7月豪雨による呉市災害の調査速報-土砂災害の実態研究、文部省災害科学研究報告、PP.75~158, 1976.
- 6) 網干寿夫：集中豪雨とマサ土斜面の崩壊、施工技術 Vol.15, No.11, PP.39~46, 1972.
- 7) 八木則夫・矢田部龍一・山本浩司：雨水浸透による斜面崩壊、土木学会論文報告集、第330号、PP.107~114, FEB. 1983.
- 8) 西垣誠・今井紀和：不均質な斜面への降雨浸透特性、第21回自然災害科学シンポジウム、1984.
- 9) 茶川真知・風間秀彦・中島健一：降雨の浸透を考慮した砂質斜面の安定性について、第18回土質工学研究発表会、PP.1277~1280, 1983.
- 10) 土質工学会編：風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用、土質基礎工学ライブラリー-16, PP.177~179, 1982.
- 11) 網干寿夫・門田博知・吉国洋：比治山公園山腹斜面崩壊危険ヶ所に関する調査報告書、広島大学網干研究室、MAR. 1966.
- 12) 広島地方気象台編：広島の気象百年誌、日本気象協会広島支部、1984.
- 13) 奥田穰：降雨と斜面崩壊との関連について、豪雨時における自然斜面の安定に関するシンポジウム論文集、土質工学会、PP.55~66, 1978.
- 14) 宇野尚雄・宮下高昭：浸水による不飽和土の強度低下について、土と基礎、土質工学会 29-6 (281), PP.41~48, JUN.1981.
- 15) 久楽勝行：盛土構造物の崩壊と対策に関する研究、九州大学博士学位論文、PP.30~33, 1983.

広島市の降雨による斜面崩壊

- 16) 内田一郎・松本錬三・鬼塚克忠：不飽和土のせん断強度について，第2回土質工学研究発表会，PP.101～106，1967.
- 17) 高速道路調査会：関東ローム土の土工－その土質と設計・施工－，共立出版，1973.
- 18) 芥川真知・風間秀彦・長島健一：降雨の浸透に伴う飽和度の経時変化と斜面の安定性，第17回土質学会研究発表会，PP.1137～1140，1982.
- 19) 八木則夫・矢田部龍一・山本浩司：雨水浸透による斜面内間隙水圧分布と安定解析，第17回土質工学研究発表会，PP.1141～1144，1982.
- 20) 広島県：昭和58年7月豪雨災害－広島・島根県災害を中心として－，PP.25～26，OCT. 1983.